

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Методичні вказівки до практичних занять та розрахунково-графічної роботи для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня "спеціаліст" і "магістр" за спеціальністю "Електричні системи і мережі"

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	4
Вступ.....	5
1 Розрахунок показників несиметрії напруг.....	6
1.1 Показники несиметрії напруг	6
1.2 Розрахунки несиметрії напруг і струмів у системах електропостачання напругою понад 1 кВ	6
1.2.1 Правила складання схеми заміщення	6
1.2.2 Співвідношення для визначення опорів зворотної послідовності елементів системи електропостачання	7
1.2.3 Співвідношення для визначення струму зворотної послідовності елементів системи електропостачання	11
1.2.4 Розрахунок напруг і струмів зворотної послідовності в електричних мережах	12
1.3 Приклади розрахунків	12
2 Розрахунок показників несинусоїдальності напруги	18
2.1 Показники несинусоїдальності напруги	18
2.2 Розрахунок несинусоїдальності напруг і струмів у системах електропостачання напругою понад 1 кВ при симетричному навантаженні.....	18
2.2.1 Правила складання схеми заміщення	18
2.2.2 Співвідношення для визначення опорів елементів СЕП.....	19
2.2.3 Параметри джерел струмів вищих гармонік.....	24
2.2.4 Розрахунок напруг і струмів вищих гармонік	27
2.3 Розрахунок несинусоїдальності напруг і струмів у системах електропостачання напругою до 1 кВ.....	28
2.3.1 Правила складання схеми заміщення	28
2.3.2 Особливості схем заміщення елементів СЕП	28
2.4 Розрахунок несинусоїдальності напруг і струмів у системах електропостачання напругою до 1 кВ із застосуванням методу симетричних складових.....	30
2.5 Особливості врахування схеми з'єднання обмоток трансформаторів	31
2.6 Приклади розрахунків	32
3 Розрахунок показників коливань напруги.....	42
3.1 Показники коливань напруги.....	42
3.2 Основні методи визначення показників якості електроенергії, що встановлені для коливань напруги.....	42
3.3 Оцінка інтенсивності флікера у зв'язаних вузлах мережі.....	46
3.4 Приклади розрахунків	47
Додаток А Рекомендації до пошуку довідкової інформації	54
Перелік посилань.....	55

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун
БК – конденсаторна батарея
ВН – висока напруга
ВП – вентильний перетворювач
ДВП – дугові вакуумні печі
ДСП – дугові сталеплавильні печі
ЕЕ – електрична енергія
ЕП – електроприймач
ЕШП – піч електрошлакового переплаву
ІФ – інтенсивність флікера
КЗ – коротке замикання
КЛ – кабельна лінія
КН – коливання напруги
НН – низька напруга
ПЛ – повітряна лінія
СД – синхронні двигуни
СЕП – система електропостачання
СН – середня напруга
СРФ – силовий резонансний фільтр
ТП – трансформаторна підстанція
ТПЧ – тиристорний перетворювач частоти

ВСТУП

Ці методичні вказівки складено для допомоги студентам під час практичних занять та виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни "Забезпечення якості електроенергії" для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня "спеціаліст" і "магістр" за спеціальністю "Електричні системи і мережі".

У методичних вказівках приведені загально прийняті інженерні методики розрахунків показників якості електроенергії у електричних мережах. Дані методики застосовуються на етапі проектування електричних мережах для перевірки здатності таких мереж забезпечувати живлення електроприймачів напругою, що відповідає нормативним вимогам до її якості. Методики можуть бути також корисні для перевірки здатності існуючих електричних мереж функціонувати з заданою якістю при зміні її конфігурації, підключенні додаткових потужних електроприймачів, а також при підключенні фільтруючого та компенсуючого обладнання.

Методичні вказівки включають в себе рекомендації щодо розрахунку таких показників якості електроенергії як показники несиметрії напруг, показники несинусоїдальності напруги та показники коливань напруги.

Підчас виконання розрахунково-графічної роботи студенти отримують навички виконання розрахунків за вищезгаданими методиками, що вкрай необхідно для підготовки майбутнього фахівця.

1 РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ

1.1 Показники несиметрії напруг

Згідно з нормативними документами [3,4,6,21] несиметрія напруг оцінюється коефіцієнтами несиметрії за зворотною та нульовою послідовністю.

Коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю оцінюють як відношення напруги зворотної послідовності основної частоти $U_{2(1)}$ до напруги прямої послідовності $U_{1(1)}$ (або номінальній лінійній напрузі $U_{ЛНОМ}$):

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\% \approx \frac{U_{2(1)}}{U_{ЛНОМ}} \cdot 100\%. \quad (1.1)$$

Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\% \approx \frac{\sqrt{3} \cdot U_{0(1)}}{U_{ЛНОМ}} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

де $U_{0(1)}$ – напруга нульової послідовності основної частоти.

Значення напруг $U_{1(1)}$, $U_{2(1)}$, $U_{0(1)}$ визначаються згідно з методом симетричних складових.

1.2 Розрахунки несиметрії напруг і струмів у системах електропостачання напругою понад 1 кВ

Найпоширенішими джерелами несиметрії в трифазних системах електропостачання (СЕР) промислових підприємств є потужні однофазні споживачі, наприклад індукційні плавильні і нагрівальні печі, зварювальні агрегати, установки електрошлакового переплаву (ЕШП), а також трифазні електроприймачі (ЕР) з нерівномірним навантаженням фаз, наприклад дугові сталеплавильні печі (ДСП), і ін. [13].

В СЕР промислових підприємств найбільш вагомий внесок в несиметрію напруг вносять складові напруги зворотної послідовності. Тому під час розрахунків обмежуються визначенням даного коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю.

1.2.1 Правила складання схеми заміщення

Схема заміщення СЕР для розрахунку струмів та напруг зворотної послідовності аналогічна за структурою схемі заміщення для прямої послідовності.

Правила складання схеми заміщення системи електропостачання:

1) Усі пасивні елементи СЕР у загальному випадку заміщають еквівалентними опорами зворотної послідовності.

2) Несиметричне навантаження представляється джерелом струму зворотної послідовності.

3) Симетричне навантаження представляється еквівалентними опорами зворотної послідовності.

1.2.2 Співвідношення для визначення опорів зворотної послідовності елементів системи електропостачання

Для розрахунків несиметричних режимів, а також правильного вибору технічних засобів, призначених для зниження несиметрії, необхідне знання опорів зворотної послідовності всіх елементів електричних мереж і електроустаткування. Формули для визначення опорів зворотної послідовності більшості елементів промислових електричних мереж наведені нижче.

Енергетична система.

У схемах заміщення енергетична система заміщається еквівалентним індуктивним опором, який розраховується за формулою:

$$X_C = U_{Л}^2 / S_K = U_{\phi} / I_K, \quad (1.3)$$

де X_C – опір короткого замикання (КЗ) на шинах підстанції, зведений до лінійної напруги $U_{Л}$, для якої проводяться розрахунки вищих гармонік, Ом;
 S_K – фактична потужність КЗ для розглянутої ділянки СЕП, ВА.

I_K – струм КЗ для розглянутої ділянки СЕП, А.

Синхронні електродвигуни.

Опорів зворотної послідовності синхронного електродвигуна можна визначити за формулою [8, 13]:

$$X_{2CM} = X_d'' \cdot \frac{U_{ЛНОМ}^2}{S_{CMНОМ}}, \quad (1.4)$$

де X_d'' – надперехідний індуктивний опір зворотної послідовності синхронної машини по поздовжній осі у відносних одиницях. (при відсутності даних допускається обирати $X_d'' \approx 0,24$);

$S_{CMНОМ}$ – номінальна потужність машини, ВА.

Асинхронні електродвигуни.

Значення опору зворотної послідовності асинхронного електродвигуна можна визначити за формулою [8, 13]:

$$X_{2AM} = \frac{U_{ЛНОМ}^2}{k_{П} \cdot S_{ДНОМ}}, \quad (1.5)$$

де $k_{П}$ – кратність пускового струму;

$S_{ДНОМ}$ – номінальна потужність двигуна, ВА.

Двообмоткові трансформатори.

Двообмоткові трансформатори (рисунок 1.1, а) заміщаються схемою (рисунок 1.1, б), параметри якої можна розрахувати за формулами [13]:

$$R_T = \Delta P_K \cdot U_{ЛВН}^2 / S_{ТНОМ} ; \quad (1.6)$$

$$X_{2Т} = \frac{u_K \cdot U_{ЛВН}^2}{S_{ТНОМ} \cdot 100\%}. \quad (1.7)$$

де $S_{ТНОМ}$ – номінальна потужність трансформатора, ВА;
 u_K – напруга КЗ трансформатора, %.

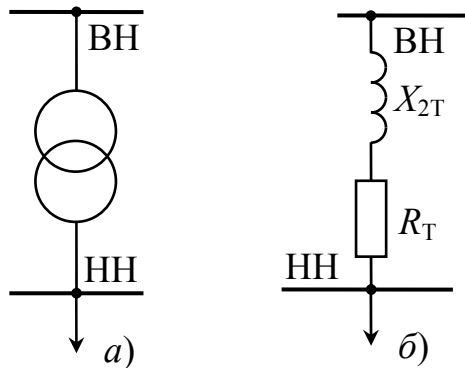


Рисунок 1.1 – Схема включення двообмоткових трансформаторів (а) і його схема заміщення (б)

Триобмоткові трансформатори.

Триобмоткові трансформатори (рисунок 1.2, а) замінюються схемою (рисунок 1.2, б), параметри яких можна розрахувати за формулами (1.6), (1.7), для кожного променя схеми заміщення окремо. При цьому, згідно [12], значення напруги короткого замикання, відповідні до цих променів, знаходять за формулами (2.8)-(2.13).

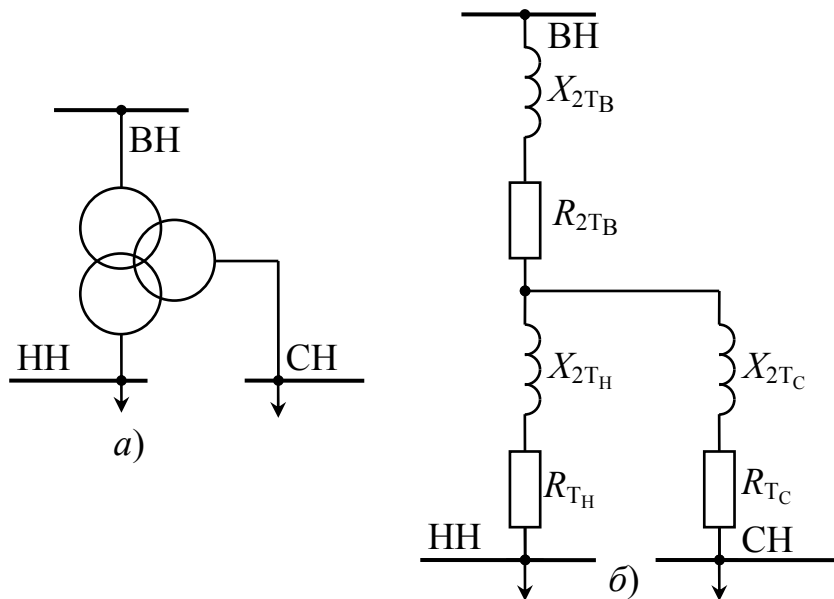


Рисунок 1.2 – Схема включення триобмоткового трансформатора (а) і його схема заміщення (б)

Реактор.

У схемах заміщення реактор замінюється реактивним опором, який розраховується за формулою:

$$X_{2P} = \frac{X_{P\%} \cdot U_{Л}^2}{100\% \cdot I_{PНОМ} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{PНОМ}} = X_P \cdot \frac{U_{Л}^2}{U_{PНОМ}^2}, \tag{1.8}$$

де $X_{P\%}$ – відносний опір реактора, %;
 $I_{P\text{НОМ}}$ – номінальний струм реактора, А;
 $U_{P\text{НОМ}}$ – номінальна напруга реактора, В;
 X_P – опір реактора, Ом.

Здвоєний реактор.

На рисунку 2.3 представлені позначення та схема заміщення здвоєного реактора.

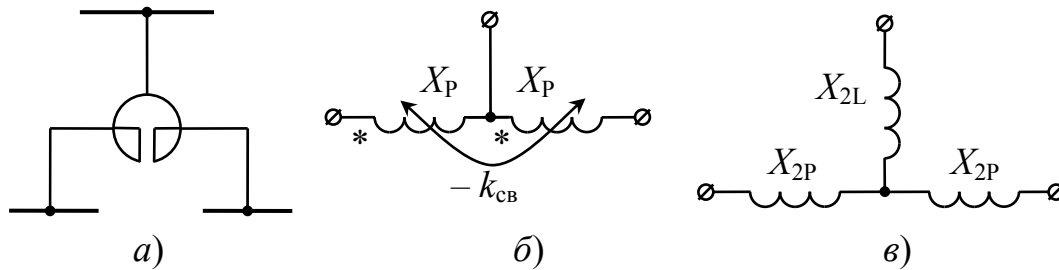


Рисунок 1.3 – Позначення (а), електромагнітна схема (б) та схема заміщення (в) здвоєного реактора

Згідно [5], здвоєний реактор (рисунок 1.3, а), у схемах заміщення можна представити у вигляді схеми (рисунок 1.3, в), яка складається із трьох індуктивностей. Індуктивність розраховуються виходячи з параметрів реактора за формулами:

$$X_{2L} = -k_{зв} \cdot X_P, \tag{1.9}$$

$$X_{2P} = (1 + k_{зв}) \cdot X_P, \tag{1.10}$$

де X_L, X_{2P} – загальний опір та опір гілок;
 X_{2P} – опір однієї гілки, розрахований за формулою (1.8);
 $k_{зв}$ – коефіцієнт зв'язку.

Батарея конденсаторів.

Реактивний опір батареї конденсаторів у схемі заміщення розраховується за формулою:

$$X_{2БК} = -\frac{U_{ЛНОМ}^2}{Q_{БК}}, \tag{1.11}$$

де $Q_{БК}$ – потужність батареї конденсаторів, ВАр.

Вентильні перетворювачі.

Модуль опору вентильного перетворювача в схемі заміщення розраховується за формулою:

$$|Z_{2ВП}| = 2,5 \cdot \frac{U_{ЛНОМ}^2}{Q}, \tag{1.12}$$

де Q – реактивна потужність вентильного перетворювача, ВАр.

Повний комплексний опір вентиляного перетворювача

$$\dot{Z}_{2ВП} = |Z_{2ВП}| \cdot \cos \varphi + j \cdot |Z_{2ВП}| \cdot \sin \varphi, \quad (1.13)$$

де φ – фазний кут перетворювача.

Електродугові сталеплавильні печі.

Модуль опору електродугової сталеплавильної печі в схемі заміщення розраховується за формулою:

$$|Z_{2ДСП}| = \frac{U_{ЛНОМ}^2}{S}, \quad (1.14)$$

де S – потужність електродугові сталеплавильні печі, ВА.

Повний комплексний опір електродугової сталеплавильної печі

$$\dot{Z}_{2ДСП} = |Z_{2ДСП}| \cdot \cos \varphi + j \cdot |Z_{2ДСП}| \cdot \sin \varphi = |Z_{2ДСП}| \cdot e^{j \cdot \varphi}, \quad (1.15)$$

де φ – фазний кут.

Освітлювальне навантаження.

Активний опір трифазної групи ламп розжарювання:

$$R_2 = \frac{4 \cdot U_{ЛНОМ}^2}{P}, \quad (1.16)$$

де P – активна потужність навантаження, Вт.

Опір трифазної групи люмінесцентних ламп:

$$Z_2 = \frac{0,71 \cdot U_{ЛНОМ}^2}{S}, \quad (1.17)$$

де S – повна потужність навантаження представленого трифазною групою люмінесцентних ламп, ВА.

Навантаження підстанцій.

У розрахунках несиметричних режимів навантаження підстанцій розглядається як узагальнене та враховується значенням $\dot{Z}_{2\Sigma}^*$ у відносних одиницях [8]:

$$\dot{Z}_{2\Sigma}^* = 0,18 + j \cdot 0,24 \text{ (для вузлів мережі 6-10кВ), або}$$

$$\dot{Z}_{2\Sigma}^* = 0,19 + j \cdot 0,36 \text{ (для вузлів мережі 35кВ і вище).}$$

Однак вище наведені значення $\dot{Z}_{2\Sigma}^*$ дозволяють лише приблизно оцінити опір навантаження підстанцій, а розрахунки з їх використанням приводять до великої похибки [8].

Відносне значення (у частках повного опору прямої послідовності) модуля \dot{Z}_{2*} , а також фази еквівалентного опору зворотної послідовності секції (системи) шин має вигляд [9]:

$$|Z_{2*}| = \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ}i} \cdot \cos \varphi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ}i} \cdot \sin \varphi_i\right)^2}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ}i} \cdot y_i \cdot \cos \varphi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ}i} \cdot y_i \cdot \sin \varphi_i\right)^2}} \quad (1.18)$$

$$\arg(Z_{2*}) = \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ}i} \cdot y_i \cdot \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^n S_{\text{НОМ}i} \cdot y_i \cdot \cos \varphi_i} \quad (1.19)$$

де $S_{\text{НОМ}i}, \varphi_i, y_i$ – повна номінальна потужність, фазовий кут і відносне значення провідності зворотної послідовності i -го приєднання лінійної (нелінійної) частини навантаження.

1.2.3 Співвідношення для визначення струму зворотної послідовності елементів системи електропостачання

Якщо всі навантаження мають однаковий характер, тоді струм зворотної послідовності I_2 і його початкова фаза φ , при підключенні трьох однофазних навантажень на лінійні напруги АВ, ВС, СА визначається за формулами [8]:

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{I_{AB}^2 + I_{BC}^2 + I_{CA}^2 - I_{AB} \cdot I_{BC} - I_{BC} \cdot I_{CA} - I_{CA} \cdot I_{AB}} \cdot e^{j \cdot (\varphi + \varphi_H)}, \quad (1.20)$$

$$\varphi = \begin{cases} \arctg \frac{\sqrt{3} \cdot (I_{CA} - I_{AB})}{2I_{BC} - I_{AB} - I_{CA}} & \text{при } 2I_{BC} - I_{AB} - I_{CA} > 0 \\ \arctg \frac{\sqrt{3} \cdot (I_{CA} - I_{AB})}{2I_{BC} - I_{AB} - I_{CA}} + \pi & \text{при } 2I_{BC} - I_{AB} - I_{CA} < 0 \text{ и } I_{CA} - I_{AB} \geq 0 \\ \arctg \frac{\sqrt{3} \cdot (I_{CA} - I_{AB})}{2I_{BC} - I_{AB} - I_{CA}} - \pi & \text{при } 2I_{BC} - I_{AB} - I_{CA} < 0 \text{ и } I_{CA} - I_{AB} < 0 \\ \frac{\pi}{2} & \text{при } 2I_{BC} - I_{AB} - I_{CA} = 0 \text{ и } I_{CA} - I_{AB} > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{при } 2I_{BC} - I_{AB} - I_{CA} = 0 \text{ и } I_{CA} - I_{AB} < 0 \end{cases} \quad (1.21)$$

де φ_H – фазний кут навантажень.

Слід відмітити, що початкова фаза ємнісного навантаження $\varphi = 90^\circ$, а індуктивного $\varphi = -90^\circ$, тому при відомому $\cos \varphi = 0,8$ активно-індуктивного навантаження $\varphi = -\arccos(0,8)$.

Для ДСП найбільше значення струму зворотної послідовності виникає в режимі розплаву. Його можна приблизно визначити $I_2 = 0,6 I_{\text{НОМ}}$ ($I_{\text{НОМ}}$ – номінальний струм печі) [13].

1.2.4 Розрахунок напруг і струмів зворотної послідовності в електричних мережах

Для розрахунків необхідні наступні вихідні дані:

- розрахункова схема електричної мережі;
- параметри всіх елементів мережі;
- параметри навантажень, що одержують живлення від даної мережі;
- значення потужності КЗ живильної мережі.

Напругу зворотної послідовності розраховують на основі лінійних схем заміщення. Навантаження, що є причиною несиметрії, представляють у вигляді індивідуальних або еквівалентних джерел струму. Опори елементів схеми та значення струмів зворотної послідовності розраховують за формулами, наведеними вище.

Напруга зворотної послідовності в розподільних мережах визначається за формулою:

$$U_{2q} = I_{2q} \cdot Z_{2\Sigma q} \quad (1.22)$$

де I_{2q} – струм зворотної послідовності q -й гілці, обумовлений усіма джерелами струму зворотної послідовності;
 $Z_{2\Sigma}$ – опір зворотної послідовності q -ї ділянки.

1.3 Приклади розрахунків

Приклад 1.

Визначити коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю K_{2U} на шинах 6кВ підстанції (рисунок 1.4). Дані, необхідні для розрахунків, показані на схемі.

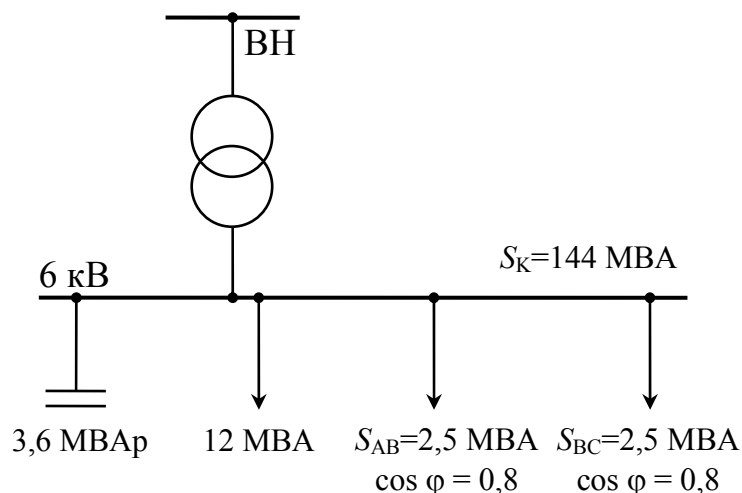


Рисунок 1.4 – Схеми підстанції з однофазними навантаженнями

Розв'язок. Складемо схему заміщення (рисунок 1.5).

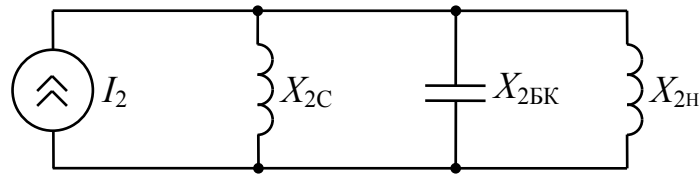


Рисунок 1.5 – Схема заміщення

При включенні двох однофазних навантажень на лінійні напруги АВ і ВС струм зворотної послідовності визначається за формулами (1.20),(1.21):

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\sqrt{3}(0 - 2,5\text{МВА})}{2 \cdot 2,5\text{МВА} - 2,5\text{МВА}}\right) - \arccos(0,8) = 97^\circ,$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\sqrt{3}}{3 \cdot 6\text{кВ}} \cdot \sqrt{(2,5\text{МВА})^2 + (2,5\text{МВА})^2 - (2,5\text{МВА} \cdot 2,5\text{МВА})} \cdot e^{j \cdot \varphi} = 240,6 e^{j \cdot 97^\circ}.$$

Реактивний опір батареї конденсаторів у схемі заміщення розраховується за формулою (1.11):

$$X_{2BK} = -\frac{U_{\text{ЛНОМ}}^2}{Q_{BK}},$$

$$X_{2BK} = -\frac{(6 \text{кВ})^2}{3,6\text{МВАр}} = -10 \text{ Ом},$$

Еквівалентний індуктивний опір енергетичної системи розраховується за формулою (1.3):

$$X_{2C} = (6 \text{кВ})^2 / 144 \text{МВАр} = 0,25 \text{ Ом}.$$

Навантаження підстанції розглядається як узагальнене та враховується значенням $\dot{Z}_{2\Sigma}^*$ у відносних одиницях. Згідно [8] для вузлів мережі 6-10кВ $\dot{Z}_{2\Sigma}^* = 0,18 + j \cdot 0,24$. Тоді опір зворотної послідовності навантаження підстанції

$$\dot{Z}_{2H} = \dot{Z}_{2\Sigma}^* \cdot U_{\text{Л}}^2 / S_{\text{H}},$$

$$\dot{Z}_{2H} = (0,18 + j \cdot 0,24) \cdot (6 \text{кВ})^2 / 12 \text{МВА} = 0,54 + j \cdot 0,72 \text{ Ом} = 0,9 e^{j \cdot 53,1^\circ} \text{ Ом}.$$

Еквівалентний опір зворотної послідовності

$$\dot{Z}_{2\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{j \cdot X_{2BK}} + \frac{1}{j \cdot X_{2C}} + \frac{1}{\dot{Z}_{2H}}} = 215 \cdot e^{j \cdot 101^\circ} \text{ мОм}.$$

Напругу зворотної послідовності визначаємо за формулою:

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \cdot \dot{Z}_{2\Sigma},$$

$$U_2 = 51,7 \cdot e^{j \cdot 162^\circ} \text{ В}.$$

За формулою (1.1) розрахуємо коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{51,7 \text{ В}}{6 \text{ кВ}} \cdot 100\% = 0,86\%.$$

Що задовольняє вимоги стандартів.

Приклад 2.

Визначити опір зворотної послідовності відносно секції шин підстанції, від якої споживає енергію електросталеплавильний цех. Схема підстанції наведена на рисунку 1.6.

Вихідні дані: дугові вакуумні печі (ДВП) $y_1 = 0,4$; $\cos \varphi_1 = 0,8$; СД $y_2 = 5$; $\cos \varphi_2 = 0,9$ (випереджує); БК $y_3 = 1$; $\cos \varphi_3 = 0$; інші навантаження $y_4 = 5$; $\cos \varphi_4 = 0,9$ (де y – провідність елементів).

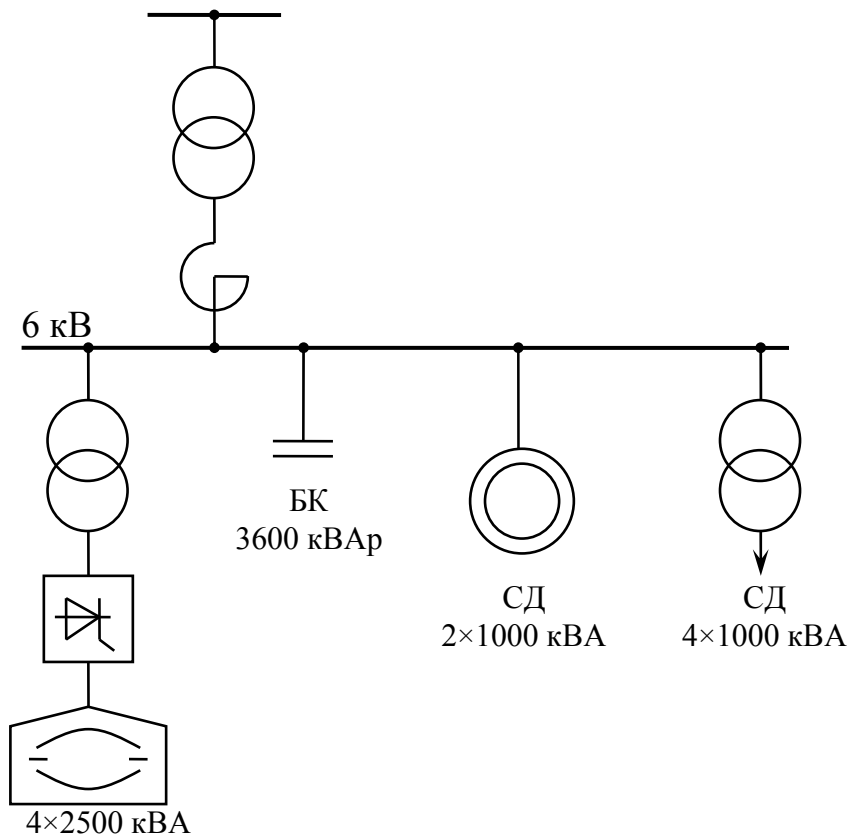


Рисунок 1.6 – Схема підстанції

Розв'язок. Опір зворотної послідовності Z_{2*} (у відносних одиницях, зведений до номінальної потужності) розрахуємо за формулою (1.18):

$$|Z_{2*}| = \frac{\sqrt{(4 \cdot S_1 \cdot \cos \varphi_1 + 2 \cdot S_2 \cdot \cos \varphi_2 + S_3 \cdot \cos \varphi_3 + 4 \cdot S_4 \cdot \cos \varphi_4)^2 + (4 \cdot S_1 \cdot \sin \varphi_1 + 2 \cdot S_2 \cdot \sin \varphi_2 + S_3 \cdot \sin \varphi_3 + 4 \cdot S_4 \cdot \sin \varphi_4)^2}}{\sqrt{(4 \cdot S_1 \cdot y_1 \cdot \cos \varphi_1 + 2 \cdot S_2 \cdot y_2 \cdot \cos \varphi_2 + S_3 \cdot y_3 \cdot \cos \varphi_3 + 4 \cdot S_4 \cdot y_4 \cdot \cos \varphi_4)^2 + (4 \cdot S_1 \cdot y_1 \cdot \sin \varphi_1 + 2 \cdot S_2 \cdot y_2 \cdot \sin \varphi_2 + S_3 \cdot y_3 \cdot \sin \varphi_3 + 4 \cdot S_4 \cdot y_4 \cdot \sin \varphi_4)^2}} \rightarrow$$

$$|Z_{2*}| = \frac{\sqrt{(4 \cdot 2,5 \cdot 0,8 + 2 \cdot 1 \cdot 0,9 + 4 \cdot 1 \cdot 0,9)^2 +}}{\sqrt{(4 \cdot 2,5 \cdot 0,8 \cdot 0,4 + 2 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 5 + 4 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 5)^2 +}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{(4 \cdot 2,5 \cdot 0,6 - 3,6 - 2 \cdot 1 \cdot 0,44 + 4 \cdot 1 \cdot 0,44)^2}{(4 \cdot 2,5 \cdot 0,6 \cdot 0,4 - 3,6 \cdot 1 - 2 \cdot 1 \cdot 0,44 \cdot 5 + 4 \cdot 1 \cdot 0,44 \cdot 5)^2} = 0,45$$

Аргумент опору зворотної послідовності розрахуємо за формулою (1.19):

$$\arg Z_{2*} = \arctg \frac{4 \cdot 2,5 \cdot 0,6 \cdot 0,4 - 3,6 \cdot 1 - 2 \cdot 1 \cdot 0,44 \cdot 5 + 4 \cdot 1 \cdot 0,44 \cdot 5}{4 \cdot 2,5 \cdot 0,8 \cdot 0,4 + 2 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 5 + 4 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 5} = 6^\circ.$$

Повний опір зворотної послідовності для даного вузла навантаження:

$$\dot{Z}_{2*} \approx 0,45e^{j6^\circ}.$$

Приклад 3.

Визначити K_{2U} на шинах 10 кВ і 110 кВ схеми, зображеної на рисунку 1.7. До шин 10 кВ у вузлі 1 підключені ДВП потужністю 6 МВА, $y_1 = 0,42$, $\cos \varphi_1 = 0,85$; $Q_k = 8$ МВАр, $y_2 = 1$, $\cos \varphi_2 = 0$; навантаження потужністю 5 МВА, $y_3 = 5$, $\cos \varphi_3 = 0,8$. У вузлі 2 підключене навантаження потужністю 12 МВА $Z_{2*} = 0,5 + j \cdot 0,55$. Потужність КЗ на шинах 110 кВ становить 1600 МВА. Струм зворотної послідовності, обумовлений підключенням у вузлі 1 однофазних печей електрошлакового переплаву потужністю 5 МВА; становить $I_{2*} = 1,5$.

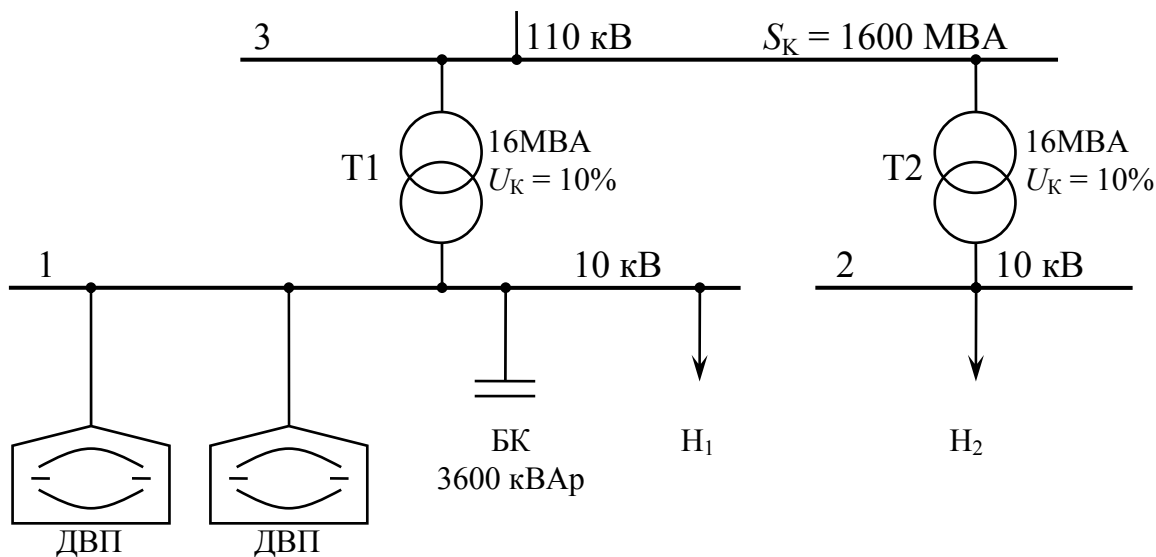


Рисунок 1.7 – Схема

Розв'язок. Опір зворотної послідовності секції шин 10 кВ у вузлі 1 розрахуємо за формулою (1.18):

$$|Z_{2*}| = \frac{\sqrt{(6 \cdot 0,85 + 5 \cdot 0,8)^2 + (6 \cdot 0,53 - 8 \cdot 1 + 5 \cdot 0,6)^2}}{\sqrt{(6 \cdot 0,85 \cdot 0,42 + 5 \cdot 0,8 \cdot 5)^2 + (6 \cdot 0,53 \cdot 0,42 - 8 \cdot 1 \cdot 1 + 5 \cdot 0,6 \cdot 5)^2}} =$$

$$= \frac{\sqrt{9,2^2 + 1,82^2}}{\sqrt{22,41^2 + 8,33^2}} = \frac{9,28}{23,66} = 0,39.$$

Аргумент опору Z_{2^*} розрахуємо за формулою (1.19):

$$\varphi_2 = \arctg \frac{8,33}{22,14} = 20,6^\circ$$

Повний опір зворотної послідовності для у вузлі 1:

$$Z_{2^*} = 0,14 + j \cdot 0,37.$$

Проведемо розрахунки несиметрії напруг у розглянутій схемі з врахуванням лише реактивних опорів. Схема заміщення зворотної послідовності наведена на рисунку 1.8.

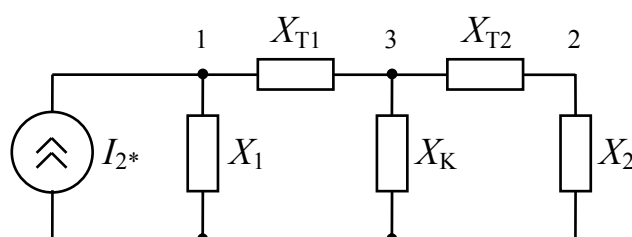


Рисунок 1.8 – Схема заміщення підстанції

При базисній потужності, $S_6 = 9,28$ МВА опір зворотної послідовності шин 10 кВ у вузлі 1 у відносних одиницях: $X_1 = 0,37$.

Опір трансформаторів розрахуємо за формулою (1.7):

$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{u_k \cdot S_6}{100\% \cdot S_{ном}} = \frac{10 \cdot 9,28}{100 \cdot 16} = 0,058.$$

Опір енергетичної системи розрахуємо за формулою (1.3):

$$X_K = \frac{S_6}{S_K} = \frac{9,28}{1600} = 0,0058.$$

Опір зворотної послідовності навантаження на шині 10 кВ у вузлі 2:

$$X_2 = 0,55 \cdot \frac{9,28}{12} = 0,43.$$

Струм джерела струму зворотної послідовності

$$I_{2^*} = 1,5 \cdot \frac{5}{9,28} = 0,81.$$

Вузол 1.

Еквівалентний опір зворотної послідовності

$$X_{2\Sigma} = \frac{X_1 \cdot \left(X_{T1} + \frac{(X_{T2} + X_2) \cdot X_K}{X_{T2} + X_2 + X_K} \right)}{X_1 + X_{T1} + \frac{(X_{T2} + X_2) \cdot X_K}{X_{T2} + X_2 + X_K}} = 0,054.$$

Коефіцієнт несиметрії

$$K_{2U} = X_{2\Sigma} \cdot I_{2*} = 0,054 \cdot 0,81 = 0,044 = 4,4\%.$$

Вузол 3.

Опір зворотної послідовності

$$X_{2\Sigma} = \frac{(X_{T2} + X_2) \cdot X_K}{X_{T2} + X_2 + X_K} = 0,0057.$$

Струм зворотної послідовності в трансформаторі Т1

$$I_{2(T1)*} = I_{2*} \cdot \frac{X_1}{X_1 + X_{T1} + \frac{(X_{T2} + X_2) \cdot X_K}{X_{T2} + X_2 + X_K}} = 0,81 \cdot \frac{0,37}{0,43} = 0,70.$$

Коефіцієнт зворотної послідовності

$$K_{2U} = x_{2\Sigma} \cdot I_{2(T1)*} = 0,0057 \cdot 0,70 = 0,004 = 0,4\%.$$

Вузол 2.

Опір зворотної послідовності

$$X_{2\Sigma} = X_2 = 0,43.$$

Струм зворотної послідовності в трансформаторі Т2

$$I_{2(T2)*} = I_{2(T1)*} \cdot \frac{X_K}{X_K + X_{T2} + X_2} = 0,70 \cdot \frac{0,0058}{0,49} = 0,0082.$$

Коефіцієнт зворотної послідовності

$$K_{2U} = X_{2\Sigma} \cdot I_{2(T2)*} = 0,43 \cdot 0,0082 = 0,0035 = 0,35\%.$$

Отриманий коефіцієнт зворотної послідовності не перевищує допустимих значень, які встановлені стандартами [6,3,4,20,21].

2 РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ

2.1 Показники несинусоїдальності напруги

Згідно зі стандартами [3,4,6,20] несинусоїдальність напруги характеризується наступними показниками:

- коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги;
- коефіцієнтом ν -ї гармонійної складової напруги.

Формула для визначення коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги має вигляд:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=2}^{40} U_{(\nu)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100\% \approx \frac{\sqrt{\sum_{\nu=2}^{40} U_{(\nu)}^2}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де $U_{(\nu)}$ – напруга ν -ї гармоніки напруги,

$U_{\text{НОМ}}$ – номінальна напруга.

Формула для визначення коефіцієнту ν -ї гармонійної складової напруги має вигляд:

$$K_{(\nu)} = \frac{U_{(\nu)}}{U_{(1)}} \cdot 100\% \approx \frac{U_{(\nu)}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%. \quad (2.2)$$

2.2 Розрахунок несинусоїдальності напруг і струмів у системах електропостачання напругою понад 1 кВ при симетричному навантаженні

2.2.1 Правила складання схеми заміщення

Правила складання схеми заміщення СЕП напругою понад 1 кВ за умови симетричного навантаження:

1) Схема заміщення складають на одну фазу. При цьому нульові точки елементів (генераторів, навантажень, батарей конденсаторів і ємнісні провідності кабельних і повітряних ліній) з'єднують між собою [17].

2) Пасивні елементи СЕП (трансформатори, автотрансформатори, реактори, кабельні та повітряні лінії і т.д.) у загальному випадку заміщають еквівалентними опорами (активними $R_{(\nu)}$, індуктивним $X_{L(\nu)}$ і ємнісним $X_{C(\nu)}$), які розраховуються для кожної розглянутої гармоніки.

3) ЕП, що генерують вищі гармоніки, представляють у схемах заміщення джерелами струмів вищих гармонік необмеженої потужності.

4) Надалі розв'язок виконують окремо для кожної гармоніки. Ряд гармонік вибирається виходячи з характеру нелінійних ЕП.

Опори R , X основної частоти для ліній електропередачі, трансформаторів, реакторів, двигунів і батарей конденсаторів визначають за відомими виразами, що наведені у літературі [1,8,7,12,13,14], та виходячи з усереднених значень параметрів, що наведені в довідниках і каталогах.

Нижче наведені співвідношення для визначення опорів конкретних елементів СЕП. Розглянемо їх послідовно.

2.2.2 Співвідношення для визначення опорів елементів СЕП Енергетична система.

При розрахунках вважається, що енергетична система не генерує вищі гармоніки, а є ідеальним джерелом основної частоти. Тому в схемах заміщення для вищих гармонік енергетична система представляється еквівалентним індуктивним опором $X_{C(v)}$, який розраховується за формулою [12]:

$$X_{C(v)} = X_C \cdot v = v \cdot U_{Л}^2 / S_K = v \cdot U_{\phi}^2 / I_K, \quad (2.3)$$

де X_C – опір короткого замикання (КЗ) на шинах підстанції, зведений до лінійної напруги $U_{Л}$, для якої проводиться розрахунок вищих гармонік, Ом;
 v – номер гармоніки;

S_K – фактична потужність КЗ для розглянутої ділянки СЕП, ВА.

I_K – струм КЗ для розглянутої ділянки СЕП, А.

Силовий трансформатор.

Параметри схем заміщення двообмоткових (рисунок 2.1, а, б), триобмоткових (рисунок 2.1, в, г) трансформаторів і автотрансформаторів визначаються на основній частоті та вищих гармоніках за формулами [12]:

$$R_{T(v)} = \sqrt{v} \cdot R_T; \quad R_T = \Delta P_K \cdot U_{ЛВН}^2 / S_{ТНОМ}^2; \quad (2.4)$$

$$X_{T(v)} = v \cdot X_T \cdot k_X; \quad X_T = \frac{u_K \cdot U_{ЛВН}^2}{S_{ТНОМ} \cdot 100\%}; \quad (2.5)$$

$$g_{T(v)} = g_T / \sqrt{v}; \quad g_T = \Delta P_X / U_{ЛВН}^2; \quad (2.6)$$

$$b_{T(v)} = b_T \cdot v; \quad b_T = \Delta Q_X / U_{ЛВН}^2, \quad (2.7)$$

де R_T , X_T – активна і реактивна складова повного опору трансформатора в схемі заміщення;

g_T , b_T – активна і реактивна складова провідності, яка визначає струм намагнічування магнітопроводу трансформатора;

ΔP_K – активні втрати КЗ трансформатора, Вт;

$\Delta P_X, \Delta Q_X$ – активні та реактивні втрати потужності холостого ходу трансформатора, Вт, ВАр;

$S_{ТНОМ}$ – номінальна потужність трансформатора, ВА;

u_K – напруга КЗ трансформатора, %;

k_X – коефіцієнт, що враховує вплив витиснення струму вищих гармонік у провідниках на індуктивний опір, для силового трансформатора $k_X \approx 0,88$.

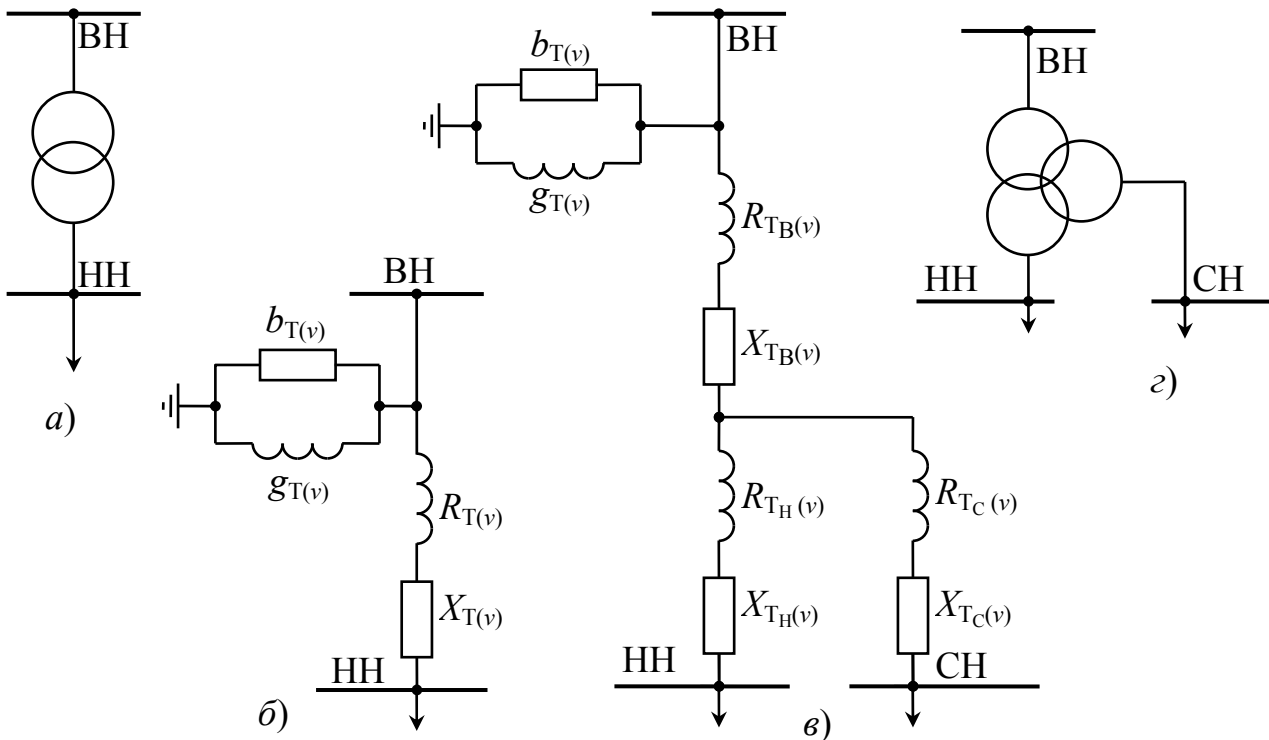


Рисунок 2.1 – Схеми заміщення дво- і триобмоткового трансформаторів

Параметри схеми заміщення триобмоткового трансформатора на основній частоті визначаються за формулами (2.4)-(2.7), для кожного променя схеми заміщення окремо. При цьому значення втрат активної потужності та напруги короткого замикання, відповідні до цих променів, знаходять за формулами [12]:

$$\Delta P_{KB} = 0,5 \cdot (\Delta P_{KBH} + \Delta P_{KBC} - \Delta P_{KCH}); \quad (2.8)$$

$$\Delta P_{KC} = 0,5 \cdot (\Delta P_{KBC} + \Delta P_{KCH} - \Delta P_{KBH}); \quad (2.9)$$

$$\Delta P_{KH} = 0,5 \cdot (\Delta P_{KBH} + \Delta P_{KCH} - \Delta P_{KBC}); \quad (2.10)$$

$$u_{KB} = 0,5 \cdot (u_{KBH} + u_{KBC} - u_{KCH}); \quad (2.11)$$

$$u_{KC} = 0,5 \cdot (u_{KBC} + u_{KCH} - u_{KBH}); \quad (2.12)$$

$$u_{KH} = 0,5 \cdot (u_{KBH} + u_{KCH} - u_{KBC}); \quad (2.13)$$

де $\Delta P_{KBH}, \Delta P_{KBC}, \Delta P_{KCH}, u_{KBH}, u_{KBC}, u_{KCH}$ – довідкові дані.

Параметри трансформаторів визначаються по каталожних і довідкових даних.

Для цехових трансформаторів 10/0,38 кВ рекомендують використовувати повний опір, а при розрахунках у СЕП напругою вище 1000 В використовують лише вирази для індуктивного опору трансформатора, а активним нехтують [17].

Повітряна (кабельна) лінія.

Схема заміщення повітряної лінії електропередавання на основній частоті представляється однофазною П-подібною схемою прямої послідовності (рисунок 2.2), що включає в себе індуктивний і активний опори. Згідно [12] у схемах слід враховувати активну провідність для ліній номінальною напругою більш 220 кВ.

Залежно від номера гармоніки довжина ділянки лінії, км, яка може бути представлена однією П-подібною ланкою, визначається за формулою [7]

$$l = 270 / n; \quad (2.14)$$

Наприклад, для частоти 7-й гармоніки лінія довжиною 100 км буде складатися з 3 П-подібних ланок ($l = 270 / 7 = 38,6$; $100 / 38,6 = 2,56$).

Якщо всі лінії одноколові, то в загальному випадку параметри схеми заміщення на основній частоті визначаються за наступними виразами:

$$R_{Л} = r_0 \cdot l; \quad X_{Л} = x_0 \cdot l; \quad g_{Л} = g_0 \cdot l / 2; \quad b_{Л} = b_0 \cdot l / 2; \quad (2.15)$$

де r_0 , x_0 , g_0 , b_0 – довідкові дані.

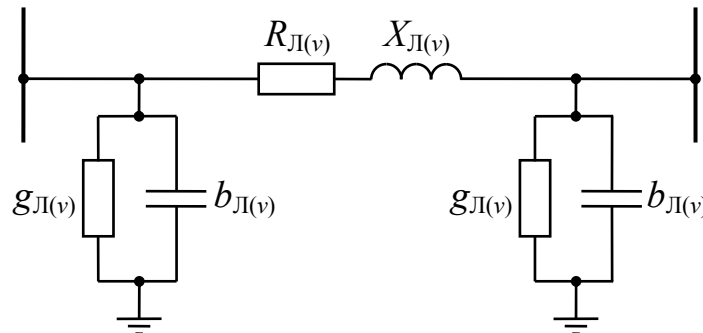


Рисунок 2.2 – Схема заміщення однієї ділянки лінії електропередачі

Згідно [12] зведення опорів до частоти ν -ї гармоніки здійснюється за формулами:

- активний опір $R_{Л(\nu)} = R_{Л} \cdot \sqrt{\nu}$;
- індуктивний опір $X_{Л(\nu)} = X_{Л} \cdot \nu$;
- активна провідність $g_{Л(\nu)} = g_{Л} / \sqrt{\nu}$;
- емнісна провідність $b_{Л(\nu)} = b_{Л} \cdot \nu$.

Для уточнення значення поздовжнього опору для повітряної (кабельної) лінії при зміні її робочої напруги $U_{Л}$ [7] рекомендує використовувати формулу:

$$X_{Л(\nu)} = x_0 \cdot l \cdot \frac{U_{Л}^2}{U_{НОМ}^2} \cdot \nu, \quad (2.16)$$

де X_0 – питомий індуктивний опір лінії, Ом/км;

l – довжина лінії, км;

$U_{НОМ}$ – номінальна напруга лінії, В.

При використанні декількох кабелів, включених паралельно, емнісна провідність розраховується за формулою:

$$b_{Л} = \sum_{i=1}^n b_{oi} \cdot l_i, \quad (2.17)$$

де b_{oi} – емнісна провідність i -ї лінії, 1/(Ом·км);

l_i – довжина i -ї лінії, км;

n – кількість кабельних ліній, підключених до секції шин підстанції, що розглядається.

Ємнісними провідностями кабельних ліній напругою до 1000 В можна нехтувати, а ємнісні провідності кабелів напругою вище 1000 В необхідно враховувати при розрахунках вищих гармонік порядків $\nu \geq 20$ [17].

Реактор.

На рисунку 2.3, а представлені позначення та схема заміщення одиночного реактора.

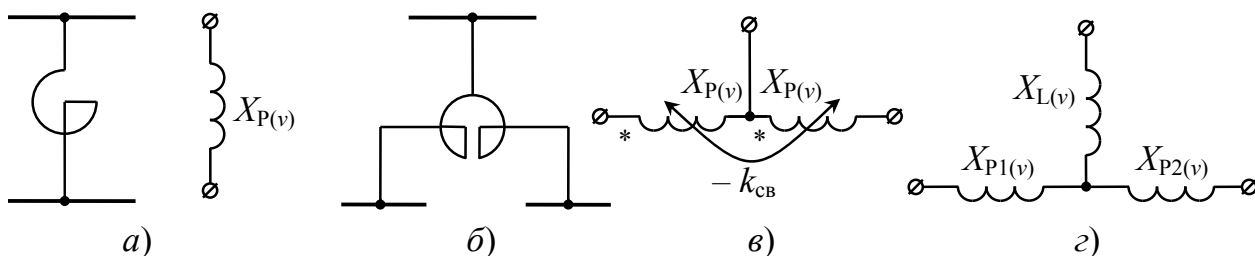


Рисунок 2.3 – Позначення, схема заміщення реактора(а) та позначення (б), електромагнітна схема (в) і схема заміщення (г) зведеного реактора

У схемах заміщення одиночний реактор заміщається реактивним опором (активним опором реактора нехтують через його незначне значення), який розраховується за формулою:

$$X_{P(\nu)} = \frac{X_{P\%} \cdot U_{\text{Л}}^2}{100\% \cdot I_{\text{РНОМ}} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{РНОМ}}} \cdot \nu = X_{\text{P}} \cdot \nu \cdot \frac{U_{\text{Л}}^2}{U_{\text{РНОМ}}^2}, \quad (2.18)$$

де $X_{P\%}$ – відносний опір реактора, %;

$I_{\text{РНОМ}}$ – номінальний струм реактора, А;

$U_{\text{РНОМ}}$ – номінальна напруга реактора, В;

X_{P} – опір реактора, Ом.

Здвоєний реактор.

Згідно [5], здвоєний реактор (рисунок 2.3, б) у схемах заміщення можна представити у вигляді схеми (рисунок 2.3, г), яка складається із трьох індуктивностей. Індуктивність розраховуються виходячи з параметрів реактора за формулами:

$$X_{L(\nu)} = -k_{зв} \cdot X_{\text{P}} \cdot \nu, \quad (2.19)$$

$$X_{P1(\nu)} = X_{P2(\nu)} = (1 + k_{зв}) \cdot X_{\text{P}} \cdot \nu, \quad (2.20)$$

де $X_{L(\nu)}$ – загальний опір;

$X_{P1(\nu)}, X_{P2(\nu)}$ – опір гілок;

$k_{зв}$ – коефіцієнт зв'язку.

Батарея конденсаторів.

Реактивний опір батареї конденсаторів у схемі заміщення розраховується по загальновідомій формулі:

$$X_{\text{БК}(v)} = -\frac{U_{\text{ЛНОМ}}^2}{Q_{\text{БК}} \cdot v}, \quad (2.21)$$

де $Q_{\text{БК}}$ – потужність батареї конденсаторів, ВАр.

Синхронна машина.

Синхронна машина у схемах заміщення для ВГ представляється чисто реактивним опором [8]. Значення цього опору з похибкою до 7 % можна визначити за формулою [7,8]:

$$X_{\text{СМ}(v)} = X_d'' \cdot \frac{U_{\text{ЛНОМ}}^2}{S_{\text{СМНОМ}}} \cdot k_X \cdot v, \quad (2.22)$$

де X_d'' – надперехідний індуктивний опір зворотної послідовності синхронної машини по поздовжній осі у відносних одиницях (при відсутності даних допускається $X_d'' \approx 0,24$);

$S_{\text{СМНОМ}}$ – номінальна потужність машини, ВА.

Згідно [7] для $v = 9; 11; 13$ у середньому коефіцієнт $k_X = 0,7$. Для 5-ї і 7-ї гармонік обох послідовностей у середньому $k_X = 0,75$; для 3-ї гармоніки прямої послідовності в середньому $k_X = 0,8$, зворотної $k_X = 0,85$. Для спрощення при розрахунках для 15-ї і гармонік більш високих порядків використовують $k_X = 0,65$; для $v = 3 \div 9$ обох послідовностей використовують середнє значення коефіцієнта $k_X = 0,75$.

В [1,7] приводяться різні значення коефіцієнта k_X для синхронних електродвигунів. У випадку явнополюсних машин $k_X = 0,60 + 0,35/v$, а неявнополюсних $k_X = 0,75 + 0,40/v$.

Асинхронний двигун.

Асинхронний двигун у схемах заміщення для ВГ представляється тільки реактивним опором [8]. Значення цього опору з похибкою до 7 % можна визначити за формулою [7,8]:

$$X_{\text{АМ}(v)} = \frac{U_{\text{ЛНОМ}}^2}{k_{\text{П}} \cdot S_{\text{ДНОМ}}} k_X \cdot v, \quad (2.23)$$

де $k_{\text{П}}$ – кратність пускового струму;

$S_{\text{ДНОМ}}$ – номінальна потужність двигуна, ВА.

Для високовольтних асинхронних двигунів кратність пускового струму в середньому дорівнює 5,5.

По даним [1,7] значення коефіцієнта k_X визначається для двигунів з короткозамкненим ротором за формулою $k_X = 0,69 + 0,3/\sqrt{\nu}$ і для двигунів з фазним ротором за формулою $k_X = 0,75 + 0,4/\sqrt{\nu}$. Для спрощення при розрахунках використовують середнє значення коефіцієнта $k_X \approx 0,88$.

Опір вузла навантаження напругою 380 В струмам ВГ.

Опір складається з еквівалентних опорів різних груп ЕП, що входять у вузол (рисунок 2.4).

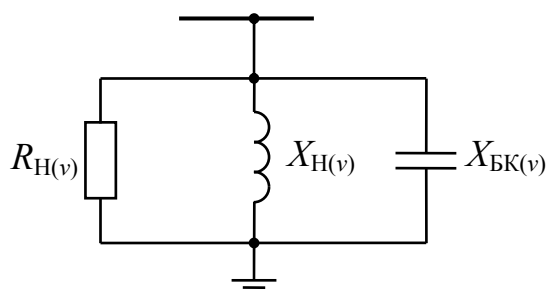


Рисунок 2.4 – Схеми заміщення вузла навантаження

Параметри схеми заміщення на основній частоті визначаються за формулами:

$$R_H = \frac{U_{Л}^2}{P_H}; \quad X_H = \frac{U_{Л}^2}{Q_H}; \quad X_{БК} = -\frac{U_{Л}^2}{Q_{БК}}, \quad (2.24)$$

де P_H, Q_H – активна та реактивна потужність, що споживається лінійним навантаженням для розглянутої години доби.

Типові графіки навантажень для різних підприємств наведені в літературі [1].

2.2.3 Параметри джерел струмів вищих гармонік

Джерела струмів вищих гармонік у схемах заміщення представляють джерелами струму нескінченної потужності. Розглянемо параметри характерних джерел струмів вищих гармонік.

Вентильний нерегульований одиночний перетворювач змінного струму в постійний.

Генерує струми ν -х гармонік. Згідно [8] значення даних струмів можна приблизно розрахувати за формулами:

$$I_{(\nu)} = \frac{I_{(1)}}{\nu} = \frac{S_{\Pi}}{\sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot \nu}, \quad (2.25)$$

де S_{Π} – повна розрахункова потужність перетворювача, ВА. При різко змінному навантаженні береться середньоквадратичне значення потужності.

Для орієнтовних розрахунків у мережах з декількома вентильними перетворювачами можна використовувати коефіцієнт $k_{\nu\Sigma}$, який враховує зсув по фазі між вищими гармоніками. При цьому:

$$I_{\Sigma(v)} = \frac{S_{\Pi\Sigma} \cdot k_{v\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot v}, \quad (2.26)$$

де $S_{\Pi\Sigma}$ – сумарна повна потужність перетворювачів, ВА.

Згідно [8] при орієнтовних розрахунках у мережах з вентильними перетворювачами можна використовувати $k_{v\Sigma} = 0,9$ для $v = 5$ і 7 та $k_{v\Sigma} = 0,75$ для $v = 11$ і 13 ; для дугових і люмінесцентних ламп $k_{v\Sigma} = 1$ для всіх v .

У випадку, коли нелінійними навантаженнями є шестипульсні випрямлячі, що генерують гармоніки струму, розрахунки проводять для 5, 7, 11, 13, 17, 19 і т.д., а при дванадцятипульсних випрямлячах – для 11, 13, 23, 25 і т.д. гармонік.

У випадку, коли нелінійними навантаженнями одночасно є шести- і дванадцятипульсні випрямлячі, для визначення еквівалентних струмів гармонік застосовують формулу [7,8]:

$$I_{\Sigma(v)} = \frac{\sqrt{S_{6\Pi}^2 + S_{12\Pi}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot v}. \quad (2.27)$$

Тиристорний перетворювач із трифазною схемою випрямлення.

Даний перетворювач генерує струми вищих гармонік, значення яких згідно [13] можна приблизно визначити за формулами:

$$I_{(v)} = \frac{I_{(1)}}{1,11(v \pm 1)}, \quad (2.28)$$

де $I_{(1)}$ – номінальний струм першої гармоніки перетворювача, А; для гармонік $v = 5$ і $v = 13$ у знаменнику знак (+), для $v = 7$ і $v = 11$ – знак (-).

Номінальний струм першої гармоніки перетворювача

$$I_{(1)} = \frac{S_{\Pi}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}}} \text{ або } I_{(1)} \approx \frac{0,9 \cdot U_{d_{\text{НОМ}}} \cdot I_{d_{\text{НОМ}}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot \cos \varphi}, \quad (2.29)$$

де $U_{d_{\text{НОМ}}}$, $I_{d_{\text{НОМ}}}$ – номінальні значення випрямленої напруги та струму;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт реактивної потужності перетворювача.

Для групи перетворювачів у якості S_{Π} слід брати середньоквадратичну потужність усіх перетворювачів.

Дугові сталеплавильні печі.

Гармонійний склад і рівні струмів вищих гармонік ДСП залежить від періоду плавки [28]. Визначати гармоніки струмів дугової сталеплавильної печі рекомендується для режиму розплавлювання, як найбільш важкому. Для цього, досить ураховувати тільки гармоніки із другої по сьому. Струми гармонік (крім струму другої гармоніки, який обирають рівним струму третьої гармоніки) залежать від кількості та потужності ДСП і для практичних розрахунків [13] їх рекомендують розраховувати за формулами:

для однієї ДСП

$$I_{(v)} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{v^2} = \frac{S_{\text{ТПНОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot v^2}, \quad (2.30)$$

де $I_{\text{НОМ}}$ – номінальне значення, струму пічного трансформатора, А;

$S_{\text{ТПНОМ}}$ – номінальна потужність пічного трансформатора, ВА.

для групи ДСП різної потужності

$$I_{(v)} = I_{(v)\text{max}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{S_i}{S_{\text{max}}}}, \quad (2.31)$$

де S_i – потужність i -го пічного трансформатора;

$S_{\text{max}}, I_{(v)\text{max}}$ – найбільша потужність трансформатора в групі печей і її струми вищих гармонік,

n – загальна кількість працюючих печей.

Тиристорні регулятори потужності.

Тиристорні регулятори потужності використовуються для керування режимом роботи, наприклад, печей опору [7]. У схемах використовується зустрічно-паралельне включення тиристорів. Потужність таких установок досягає 2,5 МВА. Криві струму пічного трансформатора досить несинусоїдальні. Найбільш характерними вищими гармоніками є 2, 3, 5, 7, 11, 13.

Для одиничної установки струми 5, 7, 11, 13-ї гармонік визначають[7]:

$$I_{(v)} = \frac{0,7 \cdot S_{\text{ТП}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{СТ}} \cdot v}, \quad (2.32)$$

а струми, 2, 3, 4-ї гармонік визначають за формулою:

$$I_{(v)} = \frac{0,1 \cdot S_{\text{ТП}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot v}. \quad (2.33)$$

У випадку, якщо до одній секції шин підключено кілька установок, значення струмів 5, 7, 11, 13-ї гармонік визначають за формулою:

$$I_{\Sigma(v)} = \frac{0,7}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot v} \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2}, \quad (2.34)$$

а значення струмів $v=2, 3, 4$ визначають за формулою:

$$I_{\Sigma(v)} = \frac{0,1}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot v} \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2}. \quad (2.35)$$

Зварювальні установки.

Для установок дугового або контактного електрозварювання струми гармонік (рекомендується враховувати тільки третю та п'яту гармоніки) визначають для одиничної установки за формулою:

$$I_{(v)} = \frac{S_{\text{НОМ}} \cdot k_3 \cdot \sqrt{\text{ТВ}}}{v^2 \cdot U_{\text{Л}}}, \quad (2.36)$$

де $S_{\text{НОМ}}$ – номінальна потужність трансформатора;

k_3 – коефіцієнт завантаження трансформатора;

ТВ – тривалість включення (ТВ зварювальних машин і трансформаторів у повторно-короткочасному режимі становить 20-60%),

для групи установок дугового електрозварювання при незалежному режимі роботи за формулою:

$$I_{\text{гр}(v)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N I_{(v)i}^2}, \quad (2.37)$$

де $I_{(v)i}$ – струм v -ї гармоніки i -ї установки;

m – загальна кількість працюючих установок.

Коли відома тільки сумарна потужність електрозварювальних установок, можна вважати, що коефіцієнт завантаження k_3 вже врахований. Для визначення струмів гармонік у загальному випадку користуються формулами:

$$I_v = \frac{S_{\Sigma}}{U_{\text{Л}} \cdot v^2}. \quad (2.38)$$

Дугові та люмінесцентні лампи.

Еквівалентні струми гармонік дугових і люмінесцентних ламп знаходять арифметичним додаванням гармонік окремих джерел [1, 13]

$$I_{\Sigma(v)} = \sum_{i=1}^N I_{(v)i}. \quad (2.39)$$

Струми 3 і 5-ї гармонік визначають за формулами:

$$I_{(3)} = 0,1 \cdot I_{(1)}, I_{(5)} = 0,03 \cdot I_{(3)}, \quad (2.40)$$

де I_1 – перша гармоніка струму, який споживається лампою.

2.2.4 Розрахунок напруг і струмів вищих гармонік

Для проведення розрахунків необхідні наступні вихідні дані:

- розрахункова схема електричної мережі;
- параметри всіх елементів мережі;
- параметри навантажень, що одержують живлення від даної мережі;
- значення потужності КЗ живильної мережі.

Напруги гармонік розраховують на основі лінійних схем заміщення мережі для кожної гармоніки. Нелінійні навантаження представляють у вигляді індивідуальних або еквівалентних джерел струму. Опори елементів схем електропостачання розраховують за формулами (2.1)-(2.24). Значення гармонік струмів, що генерують нелінійні ЕП, розраховують за формулами (2.25)-(2.40).

Напругу v -ї гармоніки на шинах секції (системи шин) визначають за формулою:

$$U_{q(v)} = X_{q(v)} \cdot I_{\Sigma q(v)}, \quad (2.41)$$

де $I_{\Sigma q(v)}$ – струм v -ї гармоніки q -ї ділянки, обумовлений усіма джерелами гармонік;

$X_{q(v)}$ – опір q -ї ділянки для v -ї гармоніки.

Отримані розрахункові значення струмів $I_{\Sigma q(v)}$ та напруг $U_{q(v)}$ вищих гармонік надалі використовують для оцінки величини коефіцієнта несинусоїдальності, а також оцінки впливу вищих гармонік на електричну мережу.

2.3 Розрахунок несинусоїдальності напруг і струмів у системах електропостачання напругою до 1 кВ

2.3.1 Правила складання схеми заміщення

Як правило електричні мережі напругою до 1 кВ є трифазними чотирьох- або п'ятипровідними, а навантаженням таких мереж є однофазні ЕП. Симетрично розподілені по фазах однофазні нелінійні ЕП в таких мережах генерують гармоніки, які, як відомо, утворюють: пряму послідовність (гармоніки 5, 7, 11, 13 і т.д.) і нульову послідовність (гармоніки 3, 9, 15, 21 і т.д.). Це означає, що гармоніки кратні трьом, складаючись у нульовій точці навантаження, не взаємно компенсуються (як інші гармоніки), а складаються та утворюють струм потроєної амплітуди. Тому гармоніки з номером кратним трьом часто називають гармоніками нульової послідовності.

Опір прямої і нульової послідовності елементів системи електропостачання сильно відрізняється. Тому застосовувати однолінійну схему заміщення, як це робиться для інших мереж, не можна.

Правила складання схеми заміщення системи електропостачання напругою до 1 кВ за умови несиметричного навантаження

1) Схема заміщення системи напругою до 1 кВ складається аналогічно, однак схема складається для кожної фази і нульового провідника з урахуванням опору елементів системи струмам нульової послідовності.

2) Пасивні елементи СЕП (трансформатори, автотрансформатори, реактори, кабельні та повітряні лінії і т.д.) у загальному випадку заміщають еквівалентними опорами, які розраховуються для кожної розглянутої гармоніки.

3) ЕП, що генерують вищі гармоніки, представляють у схемах заміщення джерелами струмів вищих гармонік необмеженої потужності та розраховуються по наведених вище співвідношеннях.

4) Надалі розв'язок виконують окремо для кожної гармоніки. Ряд гармонік вибирається виходячи з характеру нелінійних ЕП.

2.3.2 Особливості схем заміщення елементів СЕП

Такі елементи як реактор, батарея конденсаторів синхронна та асинхронна машина представляються в схемах заміщення зіркою опорів

підключених до фаз системи. Значення опорів у зірці розраховуються по тим же співвідношенням, що наведені у пункті 2.2.2.

Силовий трансформатор

Схему заміщення силового трансформатора який живить мережу за умови нескінченної потужності джерела живлення представлено на рисунку 2.5 [18].

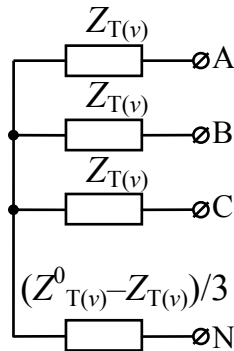


Рисунок 2.5 – Схема заміщення силового трансформатора

Опір трансформатора гармонікам струму прямої послідовності $Z_{T(v)}$ розраховується за формулами (2.4)-(2.5).

Опір трансформатора гармонікам струму нульової послідовності $Z^0_{T(v)}$ розраховується за формулою:

$$Z^0_{T(v)} = Z^0_T \cdot v, \tag{2.42}$$

де Z^0_T – опір нульової послідовності трансформатора, входить у довідкові дані на трансформатор [1].

Повітряна (кабельна) лінія

Схема заміщення лінії електропередачі представляється опорами прямої $Z_{Л(v)}$ і нульової $Z^0_{Л(v)}$ послідовності (рисунок 2.6).

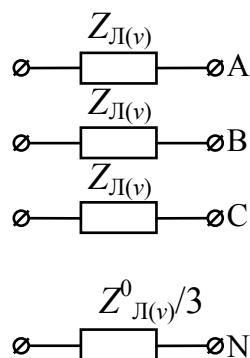


Рисунок 2.6 – Схема заміщення лінії

Фільтр струмів нульової послідовності (ФСНП)

Схема заміщення ФСНП типу зигзаг наведена на рисунку 2.7.

Система рівнянь за законами Кірхгофа для схеми (рисунок 2.7) має вигляд

$$\begin{cases} 2I_1 \cdot [r + j \cdot (X_\delta + X_L)] - I_2 \cdot (j \cdot X_L) - I_3 \cdot (j \cdot X_L) = U_A, \\ 2I_2 \cdot [r + j \cdot (X_\delta + X_L)] - I_2 \cdot (j \cdot X_L) - I_1 \cdot (j \cdot X_L) = U_B, \\ 2I_3 \cdot [r + j \cdot (X_\delta + X_L)] - I_1 \cdot (j \cdot X_L) - I_3 \cdot (j \cdot X_L) = U_C, \\ I_1 + I_2 + I_3 = I_N. \end{cases}$$

де X_L – індуктивний опір однієї з обмоток, обумовлене загальним потоком у стрижні магнітопроводу для бифілярно намотаних обмоток;
 r – активний опір обмотки;

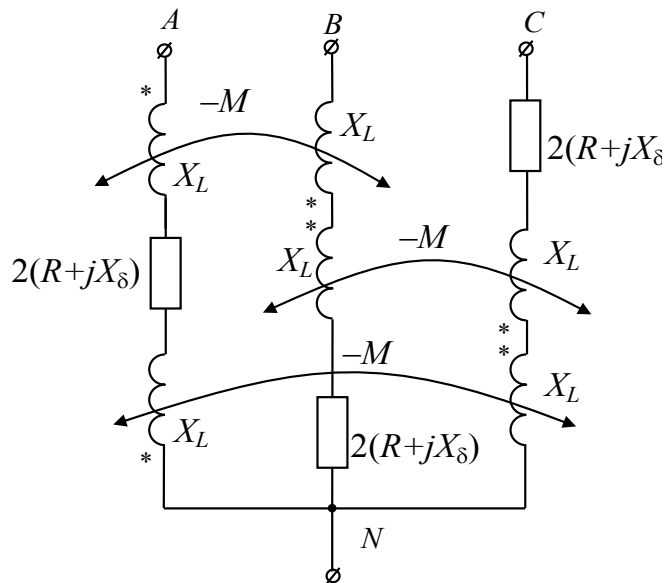


Рисунок 2.7 – Схема заміщення ФСНП типу зигзаг

M – коефіцієнт взаємоіндукції між обмотками на одному стрижні при коефіцієнті зв'язку між обмотками прийнятому рівному 1;
 X_δ – індуктивний опір нульової послідовності однієї з обмоток, обумовлений потоком, який не замикається по магнітопроводу й не є загальним для обмоток ($X_\delta \ll X_L$).

2.4 Розрахунок несинусоїдальності напруг і струмів у системах електропостачання напругою до 1 кВ із застосуванням методу симетричних складових

Для спрощення розрахунків застосовують метод симетричних складових, згідно з яким складаються схеми заміщення для кожної гармоніки та кожної послідовності. Однак у цьому випадку ускладнені розрахунки струмів гармонік для різних послідовностей. Тому для спрощення вважають, що гармоніки 5, 7, 11, 13 і т.д. утворюють пряму послідовність, а гармоніки 3, 9, 15, 21 і т.д. утворюють нульову послідовність.

Опори прямої послідовності елементів СЕП розраховуються за формулами (2.3)-(2.24).

Опори нульової послідовності елементів СЕП звичайно є паспортними даними.

2.5 Особливості врахування схеми з'єднання обмоток трансформаторів

У розрахунках слід звернути особливу увагу на схеми з'єднання обмоток трансформаторів. Справа в тому, що в трансформаторах зі схемами з'єднання обмоток У/Д, Д/У, У/З і т.д. змінюється кут фазного зсуву гармонік струму (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Значення зміни кута фазного зсуву гармонік струму

Схема з'єднання обмоток трансформаторів і автотрансформаторів	Значення кута фазного зсуву для гармоніки струму						
	5	7	11	13	17	19	<i>n</i>
Трансформатори У/Д-11, Д/У-11, У/З-11	150°	210°	330°	30°	150°	210°	<i>n</i> ·30°
Трансформатори У/У-0, Д/Д-0, Д/З-0	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
Автотрансформатор гексагонального типу	150°	210°	330°	30°	150°	210°	<i>n</i> ·30°
Трансформатор Д/З-11*	150°	210°	330°	30°	150°	210°	<i>n</i> ·30°

*такий трансформатор в західній літературі отримав назву Delta Zigzag Transformers with -30° between secondary and primary systems (трансформатор Т4 на рисунку 2.8).

Тому при врахуванні двох або більш нелінійних ЕП, які підключені через відповідні трансформатори, необхідно множити значення *v*-ї гармоніки струму на $e^{j\varphi(v)}$.

Наприклад, розрахуємо значення струмів ВГ при схемі СЕП (рисунок 2.8).

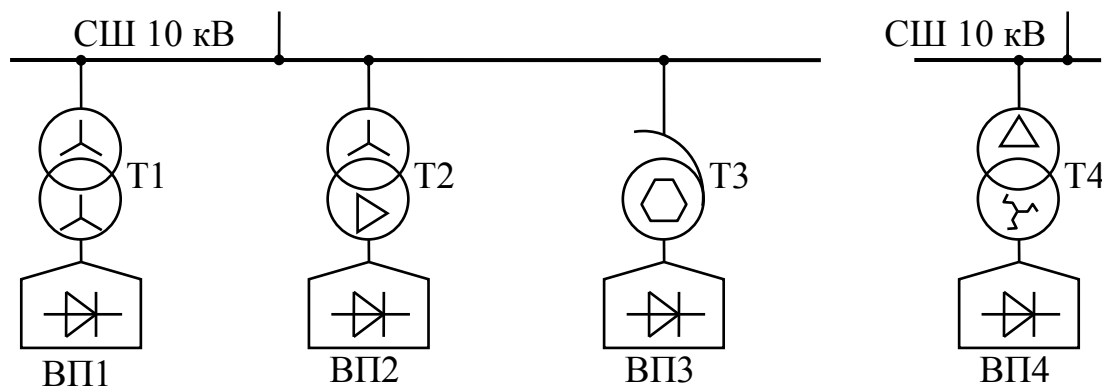


Рисунок 2.8 – Частина схеми СЕП

Розрахуємо значення *v*-тої гармонік струму, що генерують вентиляльні нерегульовані одиночні перетворювачі змінного струму в постійний за формулою (2.25).

Враховуючи зміну фазного зсуву струму гармонік при проходженні через трансформатор отримаємо:

$$I_{ВП1(v)} = I_{(v)}; \quad I_{ВП2(v)} = I_{(v)} \cdot e^{j\varphi(v)}; \quad I_{ВП3(v)} = I_{(v)} \cdot e^{j\varphi(v)},$$

де $\varphi(v)$ – значення кута фазного зсуву гармонік струму, що взяті з таблиці 2.1.

2.6 Приклади розрахунків

Приклад 1.

Розрахувати струми та напруги вищих гармонік на збірних шинах напругою 10 кВ промислового підприємства зі схемою (рисунок 2.9) за умови:

- 1) без включеної БК;
- 2) із включеною БК.

У випадку невідповідності нормам показників якості напруги запропонувати технічний розв'язок, який дозволить нормалізувати показники якості напруги. Розрахувати струми і напруги вищих гармонік і показники якості напруги для цього випадку.

Підприємство, споживає енергію від енергосистеми через знижувальний трансформатор Т1 типу ТДН-16000/110/10. Потужність короткого замикання системи $S_K = 4000$ МВА. Трансформатор Т1 з'єднаний зі збірними шинами через струмообмежувальний реактор РБАС-1500-8. До збірних шин підключено три цехових ТП із трансформаторами ТМ 1000/10/0,4 У/Ун-0 ($S_{T.НОМ} = 1000$ кВА; $u_K = 5,5\%$), навантаження яких становлять АД (завантаження трансформаторів вважати $\sim 0,75$); два синхронні двигуни ($P_{СМНОМ} = 500$ кВт; $Q_{СМНОМ} = 264$ кВАр) і тиристорний перетворювач із трифазною схемою випрямлення ($S_{П} = 1,5$ МВА). Для компенсації реактивної потужності додатково підключена конденсаторна батарея $Q_{БК} = 2,1$ МВАр.

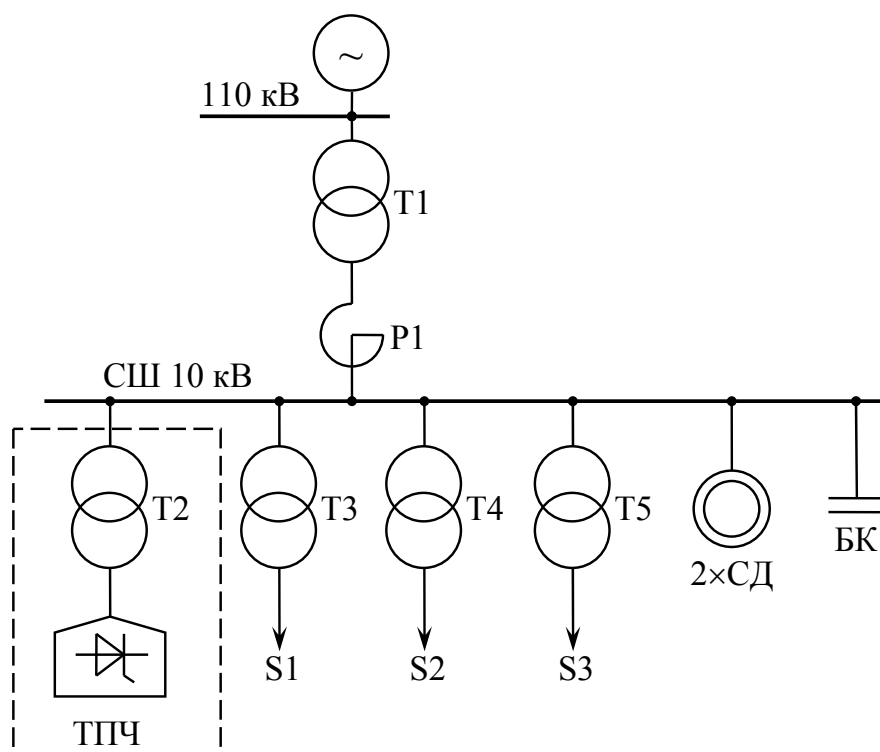


Рисунок 2.9 – Схема системи електропостачання промислового підприємства

Розв'язок.

На першому етапі слід скласти схему заміщення системи електропостачання (рисунок 2.10).

Для простоти розрахунків при складанні схеми заміщення, було знехтувано активними опором елементів системи та провідностями. Під час розрахунків слід ураховувати дані параметри.

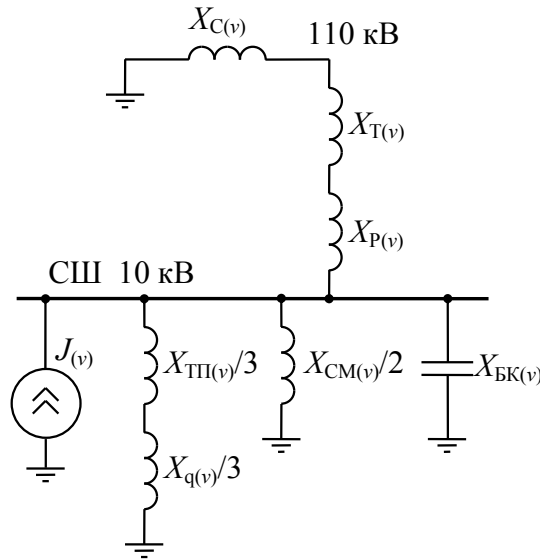


Рисунок 2.10 – Схема заміщення системи електропостачання промислового підприємства, що зображена на рисунку 2.9

Розрахуємо значення еквівалентних опорів у схемі заміщення системи електропостачання промислового підприємства.

Розрахуємо значення еквівалентного опору енергосистеми:

$$X_{C(v)} = \frac{U_{\text{Л}}^2}{S_{\text{К}}} \cdot \nu = \frac{(10\text{кВ})^2}{4000\text{МВА}} \cdot \nu = 0,025 \cdot \nu \text{ (Ом)}.$$

Розрахуємо значення еквівалентних опорів силового трансформатора типу ТДН-16000/110/10 у схемі його заміщення.

Паспортні дані трансформатора: $S_{\text{ТНОМ}} = 16 \text{ МВА}$; $u_{\text{К}} = 10,5\%$.

$$X_{\text{T}(v)} = \nu \cdot \frac{u_{\text{К}} \cdot U_{\text{Л}}^2}{S_{\text{ТНОМ}} \cdot 100\%} \cdot k_X = \frac{10,5\% \cdot (10\text{кВ})^2}{100\% \cdot 16 \text{ МВА}} \cdot 0,88 \cdot \nu = 0,578 \cdot \nu \text{ (Ом)}.$$

Розрахуємо значення еквівалентного опору реактора РБАС-1500-8.

Паспортні дані: $X_{\text{P}\%} = 8\%$; $I_{\text{РНОМ}} = 1500 \text{ А}$; $U_{\text{РНОМ}} = 10\text{кВ}$.

$$X_{\text{P}(v)} = \frac{X_{\text{P}\%} \cdot U_{\text{Л}}^2}{100\% \cdot \sqrt{3} \cdot I_{\text{РНОМ}} \cdot U_{\text{РНОМ}}} \cdot \nu = \frac{8\% \cdot (10\text{кВ})^2}{100\% \cdot \sqrt{3} \cdot 1500 \text{ А} \cdot 10\text{кВ}} \cdot \nu = 0,308 \cdot \nu \text{ (Ом)}.$$

Розрахуємо значення еквівалентного опору трансформаторів цехових ТП.

Паспортні дані: $S_{\text{ТНОМ}} = 1000 \text{ кВА}$; $u_{\text{К}} = 5,5\%$.

$$X_{\text{ТП}} = \frac{u_{\text{К}} \cdot U_{\text{Л}}^2}{S_{\text{ТНОМ}} \cdot 100\%} \cdot k_X = \frac{5,5\% \cdot (10\text{кВ})^2}{100\% \cdot 1000 \text{ кВА}} \cdot 0,88 \cdot \nu = 4,84 \cdot \nu \text{ (Ом)}.$$

Розрахуємо значення еквівалентного опору АД, які становлять основне навантаження трансформаторів цехових ТП.

$$X_{q(v)} = \frac{U_{ЛНОМ}^2}{k_{П} \cdot S_{ДНОМ}} k_X \cdot v = \frac{(0,4 \text{ кВ})^2}{5,5 \cdot 0,75 \cdot 1000 \text{ кВА}} \cdot 0,88 \cdot v = 0,034 \cdot v \text{ (Ом)}.$$

Приведемо опір АД до високої напруги:

$$X'_{q(v)} = X_{q(v)} \cdot k^2 = 0,039 \cdot v \cdot \left(\frac{10 \text{ кВ}}{0,4 \text{ кВ}} \right)^2 = 21,3 \cdot v \text{ (Ом)}.$$

Розрахуємо значення еквівалентного опору синхронного двигуна

$$X_{СМ(v)} = X''_d \cdot \frac{U_{ЛНОМ}^2}{S_{СМНОМ}} \cdot k_X \cdot v = 0,24 \cdot \frac{(10 \text{ кВ})^2 \cdot 0,75}{\sqrt{500 \text{ кВА}^2 + 264 \text{ кВАр}^2}} \cdot v = 31,84 \cdot v \text{ (Ом)}.$$

Тут значення коефіцієнта k_X для спрощення взяте рівним середньому значенню 0,75. При розрахунках рекомендується користуватися більш точними формулами (див. коментарі до формули (2.22)).

Розрахуємо значення еквівалентного опору батареї конденсаторів

$$X_{БК(v)} = -\frac{U_{Л}^2}{Q_{БК} \cdot v} = -\frac{(10 \text{ кВ})^2}{2,1 \text{ МВА} \cdot v} = -47,62 / v \text{ (Ом)}.$$

Згорнемо схему відносно секцій збірних шин напругою 10 кВ, для якої повинний бути проведений розрахунок напруг і струмів вищих гармонік (рисунок 2.11).

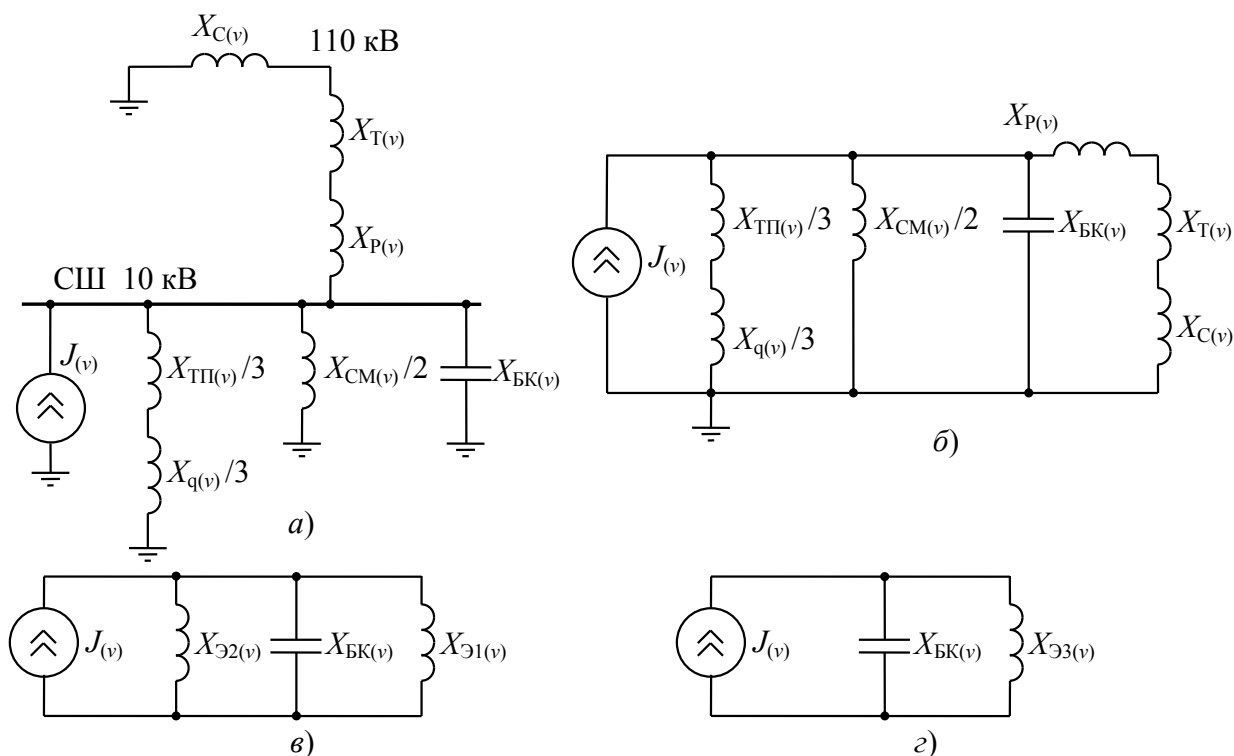


Рисунок 2.11 – Еквівалентні схеми заміщення

Розраховуємо опори елементів схеми заміщення ν -ї гармоніки.

Сумарний опір енергосистеми, силового трансформатора ГПП і реактора:

$$X_{\Sigma 1(\nu)} = X_{C(\nu)} + X_{T(\nu)} + X_{P(\nu)} = 0,025 \cdot \nu + 0,578 \cdot \nu + 0,308 \cdot \nu = 0,91 \cdot \nu \text{ (Ом)}.$$

Сумарний опір трансформаторів ТП, АД та СД

$$X_{\Sigma 2(\nu)} = \frac{(X_{ТП(\nu)} + X_{q(\nu)})/3 \cdot X_{СМ(\nu)}/2}{(X_{ТП(\nu)} + X_{q(\nu)})/3 + X_{СМ(\nu)}/2} = 5,636 \cdot \nu \text{ (Ом)}.$$

Сумарний індуктивний опір усієї схеми

$$X_{\Sigma 3(\nu)} = \frac{X_{\Sigma 1(\nu)} \cdot X_{\Sigma 2(\nu)}}{X_{\Sigma 1(\nu)} + X_{\Sigma 2(\nu)}} = 0,784 \cdot \nu \text{ (Ом)}.$$

Розрахуємо значення ВГ, що генерує тиристорний перетворювач із трифазною схемою випрямлення, за формулами (2.28), (2.29):

$$I_{(\nu)} = \frac{I_{(1)}}{1,11(\nu \pm 1)},$$

де $I_{(1)}$ – номінальний струм першої гармоніки перетворювача, А; для гармонік $\nu = 5$ і $\nu = 13$ у знаменнику знак (+), для $\nu = 7$ і $\nu = 11$ – знак (–):

$$I_{(1)} = \frac{S_{\Pi}}{\sqrt{3} \cdot U_{\Pi}} = \frac{1,5 \text{ МВА}}{\sqrt{3} \cdot 10 \text{ кВ}} = 86,6 \text{ А},$$

$$I_{(5)} = \frac{86,6 \text{ А}}{1,11(5+1)} = 13 \text{ А},$$

$$I_{(7)} = \frac{86,6 \text{ А}}{1,11(7-1)} = 13 \text{ А}, \quad I_{(11)} = 7,8 \text{ А}, \quad I_{(13)} = 5,57 \text{ А}.$$

Визначимо напруги вищих гармонік на збірних шинах напругою 10кВ за умови відключеної батареї конденсаторів. У цьому випадку схема заміщення буде мати вигляд наведений на рисунку 2.12.

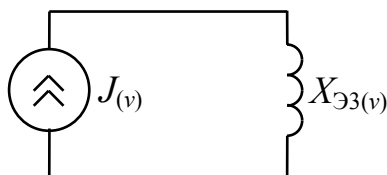


Рисунок 2.12 – Схема заміщення за умови виключеної БК

Напруга вищих гармонік на збірних шинах 10кВ:

$$U_{(\nu)} = I_{(\nu)} \cdot X_{\Sigma 3(\nu)},$$

$$U_5 = 13,5 \text{ А} \cdot 0,784 \cdot 5 \text{ Ом} = 50,96 \text{ В},$$

$$U_7 = 71,34 \text{ В}, \quad U_{11} = 67,27 \text{ В}, \quad U_{13} = 56,78 \text{ В}.$$

Значення коефіцієнтів ν -ї гармоніки розраховуються за формулою:

$$K_{(v)} = \frac{U_{(v)}}{U_{\text{Л}} / \sqrt{3}} \cdot 100\%. \quad (2.43)$$

$$K_{(5)} = 0,88\%; \quad K_{(7)} = 1,24\%; \quad K_{(11)} = 1,17\%; \quad K_{(13)} = 0,98\%.$$

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривій напруги:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum U_{(v)}^2}}{U_{\text{Л}} / \sqrt{3}} \cdot 100\%. \quad (2.44)$$

$$K_U = \frac{\sqrt{50,96^2 + 71,34^2 + 67,27^2 + 56,78^2}}{10000 / \sqrt{3}} \cdot 100\% = 2,15\%.$$

Значення отриманих коефіцієнтів слід порівняти зі значеннями, що встановлені в стандартах з якості напруги [3,4,6,20,21]. Видно, що коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги та коефіцієнти v -х гармонік не перевищують гранично припустимі значення.

Визначимо напруги вищих гармонік на збірних шинах напругою 10кВ за умови увімкненої батареї конденсаторів. У цьому випадку схема буде мати вигляд наведений на рисунку 2.12, з.

Коефіцієнт розподілу струмів гармонік, що протікають по БК (рисунок 2.11, з):

$$k_{\text{БК}(v)} = \frac{X_{\text{ЭЗ}(v)}}{X_{\text{ЭЗ}(v)} + X_{\text{БК}(v)}} = \frac{0,784 \cdot v}{0,784 \cdot v - 47,61/v}$$

Струми гармонік, що протікають через конденсаторну батарею:

$$I_{\text{БК}(v)} = k_{\text{БК}(v)} \cdot I_{(v)},$$

$$I_5 = \frac{0,784 \cdot v}{0,784 \cdot v - 47,61/v} \cdot 13 = -9,1 \text{ А},$$

$$I_7 = -54,2 \text{ А}, \quad I_{11} = 15,7 \text{ А}, \quad I_{13} = 8,7 \text{ А}.$$

Номинальний струм 1-ї гармоніки конденсаторної батареї:

$$I_{\text{БКНОМ}(1)} = \frac{Q_{\text{БК}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{2,1 \text{ МВА}}{\sqrt{3} \cdot 10 \text{ кВ}} = 121,2 \text{ А}.$$

Повний струм батареї конденсаторів з урахуванням вищих гармонік:

$$I_{\text{БКЕ}} = \sqrt{I_{\text{БК}(1)}^2 + \sum_{v=1}^{13} I_{\text{БК}(v)}^2} = \sqrt{121,2^2 + 9,1^2 + 54,2^2 + 15,7^2 + 8,7^2} = 134,3 \text{ А}.$$

Отриманий повний струм БК з урахуванням вищих гармонік необхідно порівняти із допустимим струмом для БК. Для більшості конденсаторів максимально допустимий струм становить 130% (ГОСТ 1282-88) від номінального:

$$I_{\text{ДОП}} = 130\% \cdot I_{\text{БКНОМ}(1)} = 157,6 \text{ А} > I_{\text{БКЕ}}.$$

Визначимо напруги вищих гармонік на збірних шинах напругою 10кВ

$$U_{(v)} = I_{\text{БК}(v)} \cdot X_{\text{БК}(v)},$$

$$U_{(5)} = 86,6 \text{ В}, U_{(7)} = 368,8 \text{ В}, U_{(11)} = -67,8 \text{ В}, U_{(13)} = -31,9 \text{ В},$$

Значення коефіцієнтів v -ї гармоніки розраховуються за формулою (2.43):

$$K_{(5)} = 1,5 \% ; K_{(7)} = 6,3 \% ; K_{(11)} = 1,2 \% ; K_{(13)} = 0,55 \% .$$

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги розраховується за формулою (2.44):

$$K_U = \frac{\sqrt{86,6^2 + 368,8^2 + 67,8^2 + 31,9^2}}{10000 / \sqrt{3}} \cdot 100\% = 6,7\% > 5\% .$$

Отримані коефіцієнти слід порівняти зі значеннями, що установлені в стандартах з якості напруги [3,4,6,20,21]. Коефіцієнт K_U перевищує нормально допустиме значення. Коефіцієнт 7-ї гармоніки перевищує допустиме значення. Тому доцільно замість БК використовувати силовий резонансний фільтр (СРФ).

Резонансна гармоніка схеми

$$v_P = \sqrt{\frac{X_{\text{БК}}}{X_{\text{ЭЗ}}}} = \sqrt{\frac{55,6}{0,843}} = 7,8$$

До збірних шин доцільно підключити СРФ 5-ї гармоніки. Потужність БК СРФ із умови компенсації реактивної потужності приймемо рівною 2,1 МВАр. Резонансну частоту оберемо знижену до 4,85 задля усунення проблем зі зміною резонансної частоти при старінні БК. Тоді опір фази реакторів СРФ

$$X_{P_{\text{MIN}}} = \frac{X_{\text{БК}}}{v_P^2} = \frac{47,6}{5^2} = 1,9 \text{ Ом},$$

$$X_{P_{\text{MAX}}} = \frac{X_{\text{БК}}}{v_{P_{\text{MAX}}}^2} = \frac{55,6}{4,85^2} = 2,02 \text{ Ом}.$$

Обираємо $X_P = 2 \text{ Ом}$. Резонансна гармоніка СРФ $v_{\text{СРФ}} = 4,88$.

Схема заміщення системи при встановленому СРФ представлена на рисунку 2.13.

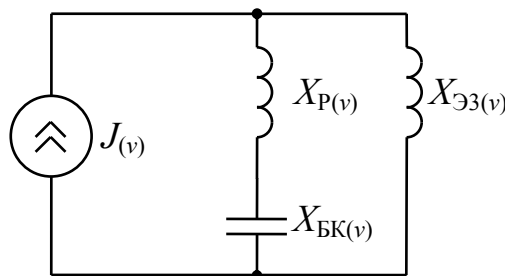


Рисунок 2.13 – Схема заміщення при встановленому СРФ

Визначимо коефіцієнт розподілу струмів гармонік, що протікають через СРФ

$$k_{\Phi(v)} = \frac{X_{\Sigma 3(v)}}{X_{\Sigma 3(v)} + (X_{P(v)} + X_{BK(v)})} = \frac{0,784 \cdot v}{0,784 \cdot v + 2 \cdot v - 47,6/v}$$

Струми вищих гармонік, що протікають по СРФ

$$I_{\Phi(v)} = I_{(v)} \cdot k_{\Phi(v)},$$

$$I_{\Phi(5)} = 11 \text{ А}; \quad I_{\Phi(7)} = 5,6 \text{ А}; \quad I_{\Phi(11)} = 2,6 \text{ А}; \quad I_{\Phi(13)} = 1,7 \text{ А}.$$

$$I_{\Phi(1)} = U_{Л} / \sqrt{3} / (X_{P(1)} + X_{BK(1)}) = 126,6 \text{ А}.$$

Повний струм, що протікає через СРФ, зокрема, через його конденсаторну батарею стане рівним

$$I_{\Phi E} = \sqrt{126,6^2 + 11,6^2 + 5,6^2 + 2,6^2 + 1,7^2} = 127,3 \text{ А} < I_{BK E}.$$

Видно, що використання в СРФ поліпшує струмове навантаження БК. Напруги вищих гармонік на збірних шинах напругою 10 кВ (на СРФ)

$$U_{(v)} = I_{\Phi(v)} \cdot (X_{P(v)} + X_{BK(v)}),$$

$$K_{(5)} = 0,1 \%; \quad K_{(7)} = 0,7 \%; \quad K_{(11)} = 0,8 \%; \quad K_{(13)} = 0,7 \%.$$

Коефіцієнт K_U після встановлення СРФ

$$K_U = 1,25\% < 5\%.$$

Після встановлення СРФ значення вищих гармонік напруги та струму знизились, а коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги та коефіцієнти v -х гармонік напруги не перевищують гранично допустимі значення.

Приклад 2.

Для схеми, представленій на рисунку 2.14, розрахувати струми ВГ у гілках мережі, визначити K_U на шинах 10 кВ і 110 кВ.

Вихідні дані.

Вузол 1: трансформатор 63 МВА, 115/10,5 кВ, $u_K = 12 \%$. $\Delta P_K = 250$ кВт; потужність ТЕЦ 50 МВА, $x_d'' = 0,15$; потужність навантаження 30 МВА ($\dot{Z}_{2\Sigma}^* = 0,19 + j \cdot 0,36$); потужність БК 30 МВАр; ВП – 6-пульсний, потужністю 2 МВА; фаза основної гармоніки струму $\varphi = 10^\circ$.

Вузол 2: трансформатор 125 МВА, 115/10,5 кВ, $u_K = 12 \%$, $\Delta P_K = 400$ кВт; ТЕЦ 100 МВА, $x_d = 0,15$; навантаження 40 МВА ($\dot{Z}_{2\Sigma}^* = 0,19 + j \cdot 0,36$), БК 50 МВАр, ВП паперового комбінату 6-пульсний, 30 МВА, фаза основної гармоніки струму $\varphi = 20^\circ$.

Вузол 3: трансформатор 40 МВА, 115/10,5 кВ, $u_K = 12 \%$, $\Delta P_K = 170$ кВт; навантаження 10 МВА ($\dot{Z}_{2\Sigma}^* = 0,19 + j \cdot 0,36$); БК 20 МВАр; ВП паперового комбінату 12-пульсний, 15 МВА, фаза основної гармоніки струму $\varphi = 30^\circ$. Параметри ліній електропередачі $x_0 = 0,40$ Ом/км, $b_0 = 3 \cdot 10^{-6}$ Ом/км, $y_0 = 0,12$ Ом/км.

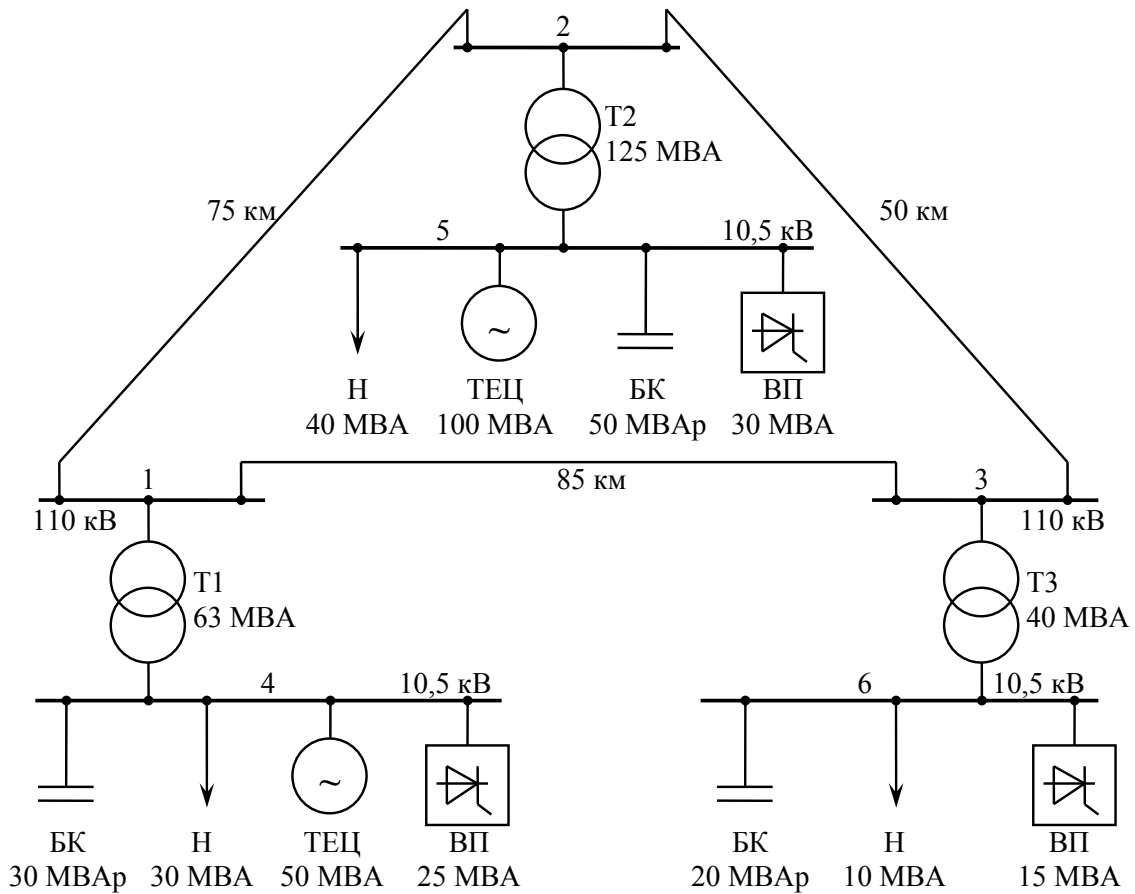


Рисунок 2.14 – Схема електропостачання промислових навантажень, підключених до вузлів автономної електричної системи

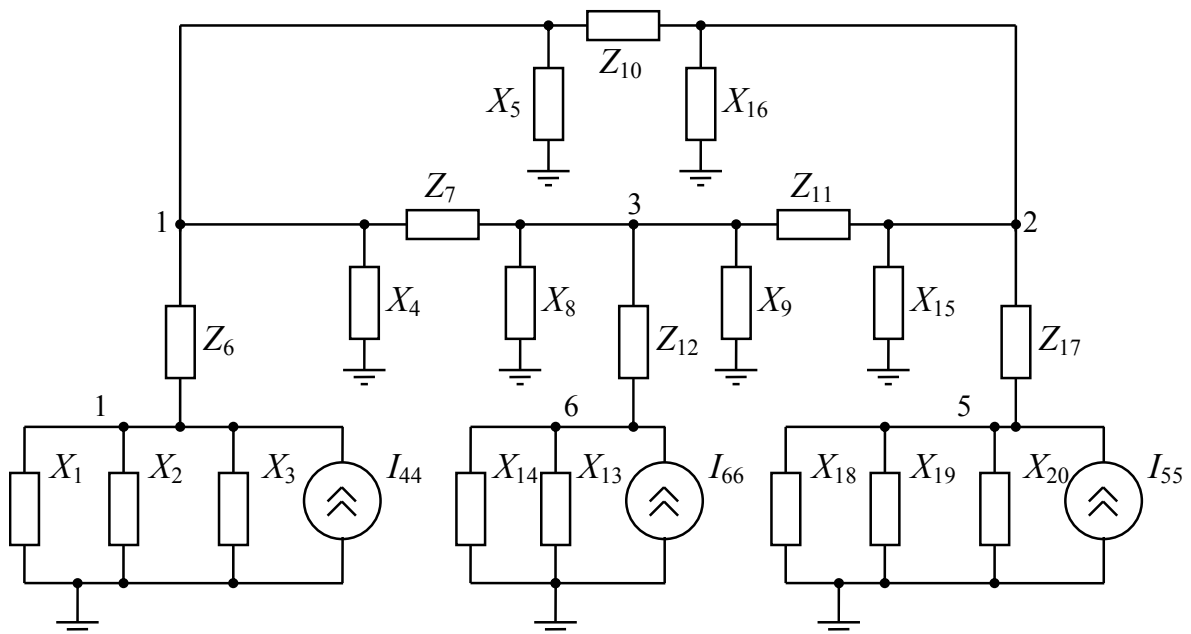


Рисунок 2.15 – Схема заміщення СЕП промислових навантажень, підключених до вузлів автономної електричної системи

Розв'язок. 1. Схема заміщення для ν -ї гармоніки представлено на рисунку 2.22. Цифрами 1-6 позначені відповідні вузли схеми (рисунок 2.14).

Опори елементів схеми заміщення для основної гармоніки у відносних одиницях при $S_6 = 100$ МВА:

$$X_1 = \frac{S_6}{S_{БК}} = \frac{100}{30} = 3,33;$$

$$X_2 = x'' \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = 0,36 \cdot \frac{100}{30} = 1,18; R_2 = r'' \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = 0,19 \cdot \frac{100}{30} = 0,63 ;$$

$$X_3 = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = 0,15 \cdot \frac{100}{50} = 0,3;$$

$$X_4 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{b_0 \cdot l} \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3 \cdot 10^{-6} \cdot 85} \cdot \frac{100}{115^2} = 15,0;$$

$$X_5 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{b_0 \cdot l} \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3 \cdot 10^{-6} \cdot 75} \cdot \frac{100}{115^2} = 16,8;$$

$$X_6 = \frac{u_K}{100\%} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{12\%}{100\%} \cdot \frac{100}{63} = 0,19; R_6 = \frac{\Delta P_K}{S_{НОМ}} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{0,25}{63} \cdot \frac{100}{63} = 0,006;$$

$$X_7 = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 85 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,28; R_7 = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,12 \cdot 85 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,08 ;$$

$$X_8 = X_4 = 15;$$

$$X_9 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{b_0 \cdot l} \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \cdot \frac{100}{115^2} = 25,2;$$

$$X_{10} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 75 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,23; R_{10} = 0,07;$$

$$X_{11} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,15; R_{11} = 0,12 \cdot 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,05;$$

$$X_{12} = \frac{u_K}{100\%} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{100}{32} = 0,38; R_{12} = \frac{0,17}{40} \cdot \frac{100}{40} = 0,01;$$

$$X_2 = x'' \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = 0,36 \cdot \frac{100}{10} = 3,6; R_2 = r'' \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = 0,19 \cdot \frac{100}{10} = 1,9 ;$$

$$X_{14} = \frac{S_6}{S_{БК}} = \frac{100}{20} = 5,0;$$

$$X_{15} = X_9 = 25,2;$$

$$X_{16} = X_5 = 16,8;$$

$$X_{17} = \frac{u_K}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{100}{125} = 0,096; R_{17} = \frac{0,4}{125} \cdot \frac{100}{125} = 0,002;$$

$$X_{18} = x'' \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = 0,35 \cdot \frac{100}{40} = 0,88;$$

$$X_{19} = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{НОМ}} = 0,15 \cdot \frac{100}{100} = 0,15;$$

$$X_{20} = S_6 / S_{БК} = 100 / 50 = 2,0.$$

3. Гармоніки струму ВП.

Для 6-пульсних ВП: $\nu=5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25$.

Для 12-пульсних: $\nu=11, 13, 23, 25$.

$$I_{1(\nu)} = \frac{S_{ВП}}{S_6 \cdot \nu} \cdot (\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi),$$

$$I_{1(\nu)} = \frac{0,25}{\nu} \cdot (\cos 10^\circ + j \cdot \sin 10^\circ), \quad I_{2(\nu)} = \frac{0,15}{\nu} \cdot (\cos 20^\circ + j \cdot \sin 20^\circ),$$

$$I_{3(\nu)} = \frac{0,3}{\nu} \cdot (\cos 30^\circ + j \cdot \sin 30^\circ).$$

У таблиці 2.2 наведені значення струмів гармонік перетворювачів у відносних одиницях.

Таблиця 2.2 – Значення струмів гармонік перетворювачів

ν	5	7	11	13	17	19	23	25
$I_{1(\nu)}$	0,05	0,036	0,023	0,019	0,015	0,013	0,011	0,010
$I_{2(\nu)}$	0,03	0,021	0,014	0,012	0,009	0,008	0,007	0,006
$I_{3(\nu)}$	0,00	0,000	0,027	0,023	0,000	0,000	0,013	0,012

4. Струми ВГ у гілках знайдемо методом вузлових напруг. Для цього необхідно розв'язати систему рівнянь

$$\begin{cases} G_{11}\varphi_1 + G_{12}\varphi_2 + G_{13}\varphi_3 + G_{14}\varphi_4 = 0; \\ G_{21}\varphi_1 + G_{22}\varphi_2 + G_{23}\varphi_3 + G_{25}\varphi_5 = 0; \\ G_{33}\varphi_3 + G_{32}\varphi_2 + G_{35}\varphi_5 + G_{36}\varphi_6 = 0; \\ G_{41}\varphi_1 + G_{44}\varphi_4 = J_{44}; \\ G_{52}\varphi_2 + G_{55}\varphi_5 = J_{55}; \\ G_{63}\varphi_3 + G_{66}\varphi_6 = J_{66}. \end{cases}$$

Результати розрахунків напруг у вузлах схеми наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунків напруг у вузлах схеми

ν	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
5	0,108	0,043	$4,831 \cdot 10^{-3}$	0,167	0,023	0,053
7	0,033	0,056	0,019	0,031	0,09	0,015
11	$7,096 \cdot 10^{-3}$	$7,454 \cdot 10^{-3}$	$6,774 \cdot 10^{-3}$	$8,071 \cdot 10^{-3}$	$9,399 \cdot 10^{-3}$	$4,813 \cdot 10^{-3}$
13	0,019	0,023	$5,218 \cdot 10^{-3}$	$7,225 \cdot 10^{-3}$	$5,236 \cdot 10^{-3}$	$4,857 \cdot 10^{-5}$
17	$1,002 \cdot 10^{-3}$	$1,445 \cdot 10^{-3}$	$6,819 \cdot 10^{-4}$	$3,304 \cdot 10^{-3}$	$3,255 \cdot 10^{-3}$	$5,343 \cdot 10^{-6}$
19	$5,243 \cdot 10^{-4}$	$5,599 \cdot 10^{-4}$	$1,071 \cdot 10^{-4}$	$2,557 \cdot 10^{-3}$	$2,453 \cdot 10^{-3}$	$6,604 \cdot 10^{-3}$
23	$1,971 \cdot 10^{-4}$	$2,147 \cdot 10^{-4}$	$4,312 \cdot 10^{-4}$	$1,682 \cdot 10^{-3}$	$1,578 \cdot 10^{-3}$	$1,204 \cdot 10^{-3}$
25	$1,371 \cdot 10^{-4}$	$1,196 \cdot 10^{-4}$	$2,73 \cdot 10^{-4}$	$1,408 \cdot 10^{-3}$	$1,311 \cdot 10^{-3}$	$1,006 \cdot 10^{-3}$

Коефіцієнт спотворення форми напруги K_U у вузлах

$$K_{U1} = 11,477\%; \quad K_{U3} = 2,097\%; \quad K_{U5} = 9,343\%;$$

$$K_{U2} = 7,438\%; \quad K_{U4} = 17,055\%; \quad K_{U6} = 5,546\%.$$

3 РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ

3.1 Показники коливань напруги

Коливання напруги характеризуються розмахом зміни напруги δU_t [3].

Різкі зміни напруги в електричній мережі, від яких споживають енергію штучні джерела освітлення, викликають у них коливань світлового потоку, яскравості або спектрального складу. Що викликає у людини відчуття нестійкості зорового сприйняття. Дане явище одержало назву флікера.

Існуючі стандарти [3,6,20] нормують наступні показниками якості електроенергії напруги, що характеризують коливання напруги:

- короткочасна доза флікера P_{st} ;
- тривала доза флікера P_{lt} .

При проектуванні СЕП із різкозмінними навантаженнями, які можуть викликати коливання напруги в розподільній мережі, необхідно визначати значення інтенсивності флікера (ІФ).

ІФ може бути визначено двома підходами:

- застосуванням флікерметра для безпосереднього виміру ІФ;
- застосуванням розрахункових методів.

Розглянемо другий підхід, тому що він необхідний на стадії проектування, однак може застосовуватися і в умовах експлуатації СЕП.

3.2 Основні методи визначення показників якості електроенергії, що встановлені для коливань напруги

Згідно [3] при коливаннях напруги, огинаюча яких має форму меандру, гранично припустимі значення розмаху зміни напруги δu_t залежать від частоти повторення змін напруги r та інтервалу між змінами напруги $\Delta t_{i,i+1}$ та дорівнюють значенням, обумовленим кривою 1 (рисунок 3.1), а для споживачів електричної енергії у яких лампи розжарювання розташовані у приміщеннях, де потрібна значна зорова напруга – дорівнюють значенням, обумовленим кривою 2 (рисунок 3.1).

У випадку, коли форма кривої, що огинає коливання напруги, відрізняється від меандру, застосовують більш загальний підхід, який полягає у визначенні короткочасної інтенсивності флікера – P_{st} , що викликана коливаннями напруги різної форми. Потім результуюча інтенсивність флікера за час T визначається та розраховується як результат коливань східчастої форми за допомогою коефіцієнта F_E , який називається коефіцієнтом еквівалентності [8]:

$$P_{st} = F_E \cdot P_{st}$$

На практиці застосовується один із двох розрахункових методів [8].

Метод визначення ІФ за кривою допустимих значень

Згідно із цим методом ІФ визначається за допомогою кривої 2 (рисунок 3.1). Якщо повторювані східчасті зміни напруги d_0 відбуваються із частотою r_0 , необхідно визначити ІФ P_{st0} . Знайдемо значення зміни напруги із частотою r_0 при якому ІФ $P_{st1}=1$. Для цього за графіком визначаємо значення зміни напруги d_1 при частоті r_0 . Згідно з [8] ІФ P_{st0} буде визначатися за формулою:

$$P_{st0} = \frac{d_1}{d_0} \cdot P_{st1}, \quad (3.1)$$

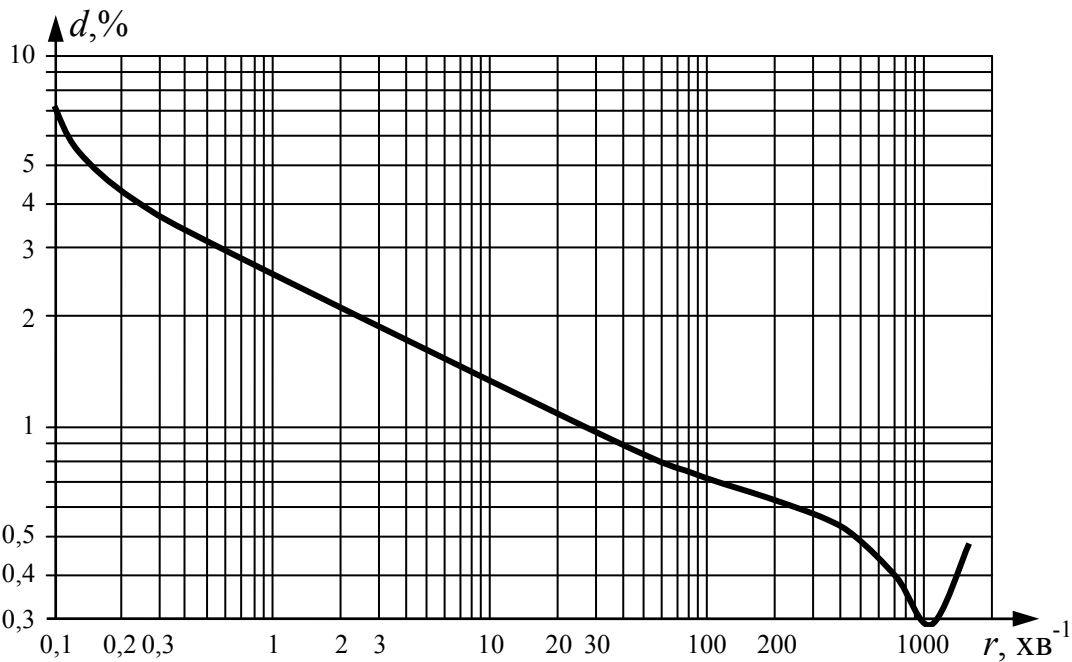


Рисунок 3.1 – Значення гранично допустимих розмахів змін напруги, що встановлені [3,21]

Аналітичний метод визначення ІФ

Аналітичний метод застосовується, якщо мають місце повторювані збурювання.

ІФ визначається за формулою:

$$P_{st} = 0,365 \cdot d \cdot F_E \cdot r^{0,31} \cdot R, \quad (3.2)$$

де d – відносна величина зміни напруги, %;

r – частота зміни напруги, 1/мін;

R – коефіцієнт, що залежить від частоти повторення (рисунок 3.2);

F_E – коефіцієнт еквівалентності або коефіцієнт зведення $F_{пр}$, $F_E \equiv F_{пр}$, що залежить від форми коливань напруги (рисунок 3.3-3.4).

Порівняємо два методи. Наприклад, якщо споживач викликає східчасту зміну напруги $\delta u_t = 1\%$ ($d_1 = 1$), яке має частоту повторення $r = 3 \text{ хв}^{-1}$. Тоді за першим методом для частоти повторення коливань $r = 3 \text{ хв}^{-1}$ за кривою 2 (рисунок 3.1) визначаємо зміну напруги $d_0 = 1,95\%$, яка відповідає значенню $P_{st1} = 1$.

Визначаємо ІФ при збурюваннях $d_1 = 1\%$

$$P_{st1} = \frac{1\%}{1,95\%} \cdot 1 = 0,51. \quad (3.3)$$

При аналітичному методі $F_E = 1$, $R \approx 1$, тоді

$$P_{st} = 0,365 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3^{0,31} \cdot 1 = 0,51. \quad (3.4)$$

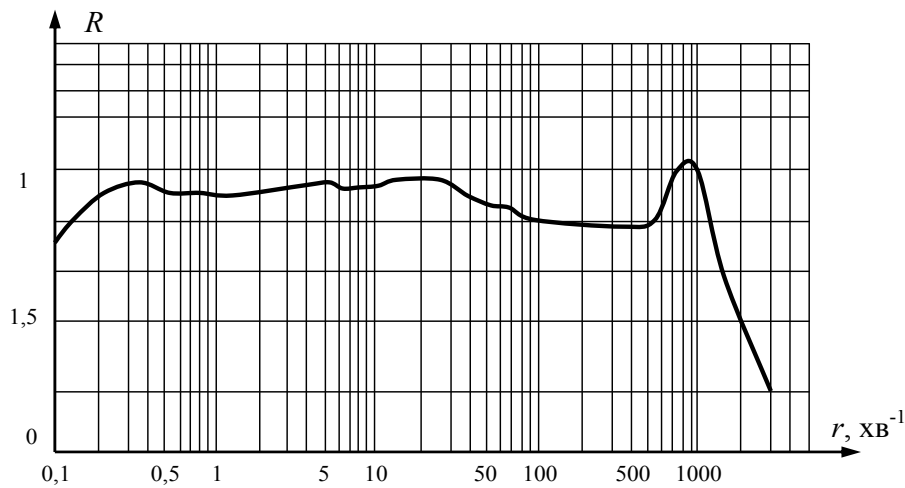


Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнта R від частоти коливань

Розглянемо визначення коефіцієнта F_E при різній формі коливань напруги згідно [3]. Даний метод застосовують для *періодичних коливань напруги, що мають форму:*

- двоступінчасту,
- пилкоподібну,
- прямокутну,
- трикутну,

а також періодичних коливань напруги, викликаних пуском двигунів.

У зв'язку з незначним впливом коливань напруги нахиленої форми на значення ІФ припустимо при розрахунках урахувати зміну напруги тільки прямокутної форми.

Послідовність дій:

1. Визначають форму коливань огинаючої середньоквадратичних значень напруги, отриманих на кожному півперіоді основної частоти.
2. Визначають розмах δu_t і частоту повторення r змін напруги.
3. Для періодичних коливань двоступінчастої та пилкоподібної (рисунок 3.3,а), прямокутної та трикутної (рисунок 3.3,б) форми визначають інтервал між змінами напруги $\Delta t_{i, i+1}$. Для періодичних коливань, викликаних пуском двигунів (рисунок 3.4) визначають тривалості переднього та заднього фронту змін напруги ($\Delta t_{\phi 1}, \Delta t_{\phi 2}$).
4. За рисунками 3.3 і 3.4 визначають коефіцієнт F_E еквівалентності коливань напруги з формою, отриманою за пунктом 1, до коливань східчастої форми.
5. Визначають зведений розмах зміни напруги $\delta u_{t \text{ ін}}$ за формулою:

$$\delta u_{t \text{ Е}} = F_E \cdot \delta u_t. \quad (3.5)$$

Для *періодичних коливань* за кривими (рисунок 3.1) для частоти повторення змін напруги r порівнюють наведений розмах зміни напруги $\delta u_{t \text{ Е}}$ з нормованим значенням $\delta u_{t \text{ норм}}$.

При *неперіодичних коливаннях* визначають короточасну та тривалу дозу флікера. Для цього застосовують наступний алгоритм розрахунків [3]:

1. На інтервалі часу вимірів виділяють тривалі інтервали часу спостереження коливань T_L , рівні 2 год (відповідні до періодів найбільших проявів цих коливань по розмаху і кількості змін напруг). У середині цих тривалих інтервалів виділяють короткочасні інтервали часу спостереження T_{sh} , рівні 10 хв (відповідно до періодів найбільших проявів цих коливань за розмахом та кількістю змін напруги).

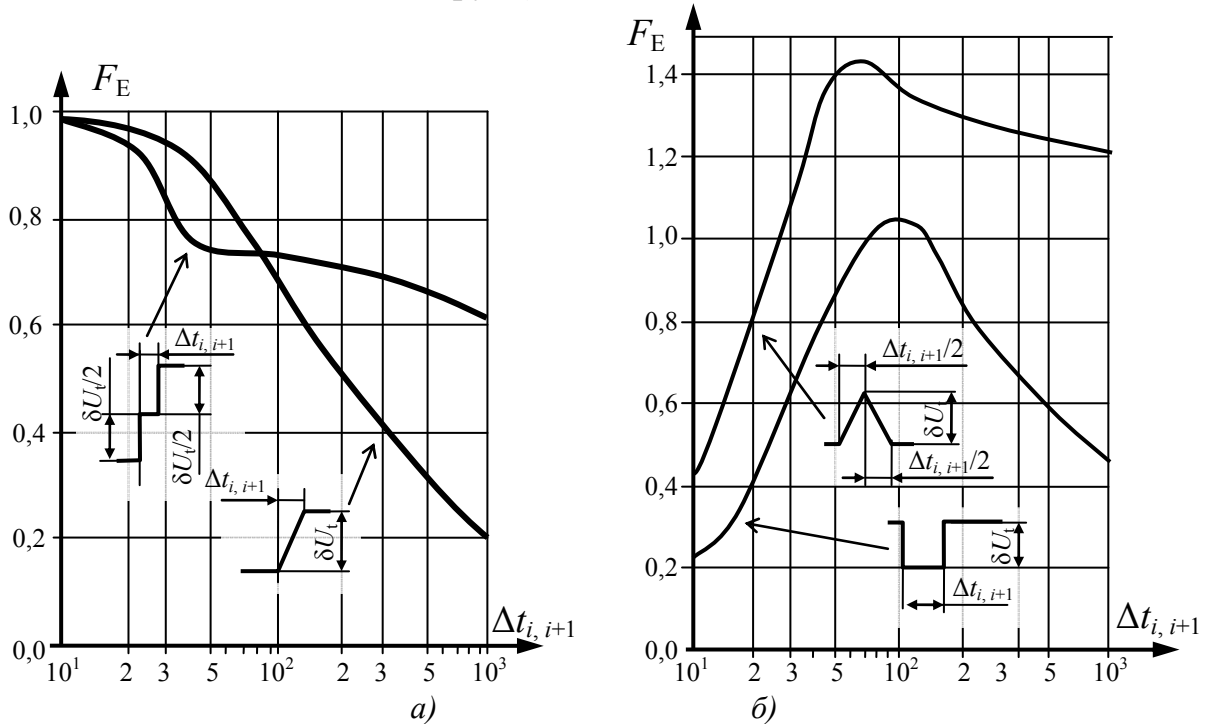


Рисунок 3.3 – Коефіцієнт F_E для коливань напруги, що мають
 а) двоступінчасту та пілкоподібну форму;
 б) прямокутну та трикутну форму

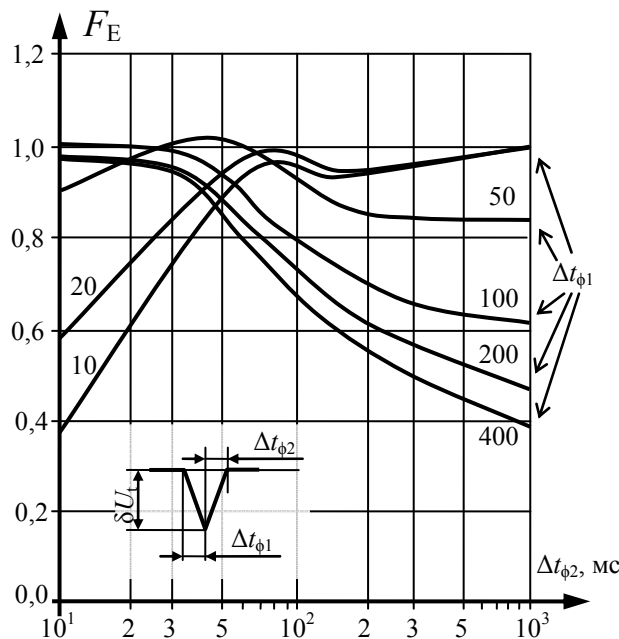


Рисунок 3.4 – Коефіцієнт F_E для періодичних коливань напруги, викликаних пуском двигунів

2. На кожному з виділених короткочасних інтервалів T_{sh} визначають форму коливань напруги.

3. Визначають розмах зміни напруги δu_{ti} для кожного i -го коливання напруги встановленої форми.

4. На виділеному короткочасному інтервалі T_{sh} для коливань двоступінчастої та пілкоподібної (рисунок 3.3,а), прямокутної та трикутної (рисунок 3.3,б) форм визначають інтервали між суміжними змінами напруги $\Delta t_{i, i+1}$ або тривалості переднього та заднього фронтів змін напруги ($\Delta t_{\phi 1}$, $\Delta t_{\phi 2}$) для коливань, викликаних пуском двигунів (рисунок 3.4)

5. Визначають коефіцієнт F_E для кожного i -го коливання напруги (рисунки 3.3 і 3.4).

6. За формулою (3.5) визначають зведений розмах δu_{tiE} для кожного i -го коливання напруги.

7. На кожному короткочасному інтервалі T_{sh} для кожного i -го коливання напруги обчислюють тривалість сприйняття флікера $t_{\phi i}$ за формулою:

$$t_{\phi i} = 2,3 \cdot (\delta u_{tiE})^{3,2}. \quad (3.6)$$

8. На кожному короткочасному інтервалі T_{sh} обчислюють короткочасну дозу флікера за формулою:

$$P_{St} = \frac{\sum t_{\phi i}}{T_{sh}}. \quad (3.7)$$

де m – число коливань напруги на інтервалі T_{sh} .

9. На кожному виділеному тривалому інтервалі часу T_L обчислюють тривалу дозу флікера за формулою:

$$P_{Lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{k=1}^{12} (P_{Stk})^3}{12}}. \quad (3.8)$$

де P_{stk} – короткочасна доза флікера на k -у інтервалі T_{sh} усередині тривалого інтервалу T_L .

Якщо тривала доза флікера P_{Lt} на кожному виділеному інтервалі часу спостереження T_L не перевищує нормованого значення та короткочасна доза флікера T_{sh} на кожному інтервалі часу спостереження T_{sh} не перевищує нормованого значення, то коливання напруги відповідають вимогам стандарту [3,6].

Згідно [8] похибка розрахунків за наведеним вище алгоритмом не перевищує 1,5 %.

3.3 Оцінка інтенсивності флікера у зв'язаних вузлах мережі

У практиці проектування виникає необхідність оцінити ІФ у вузлах мережі, пов'язаних з допомогою трансформаторів, ПЛ або кабелів з вузлом ВП

Елементи СЕП мають переважно індуктивний характер (розглядаємо саме такий випадок); тому форма КН у вузлах 220 кВ і 0,4 кВ із великою точністю

відповідає формі КН джерела, їх амплітуди в складних вузлах мережі зменшуються пропорційно величині $k_u^{(n)}$, де $k_u^{(n)}$ – коефіцієнт передачі по напрузі або коефіцієнт розподілу напруг між вузлами джерела коливань напруги та n -м вузлом.

Згідно [8] оцінка ІФ у вузлах, пов'язаних із джерелом коливань напруги, може проводитися за виразом:

$$P_{St}^{(n)} = P_{St}^{(u)} \cdot k_u^{(n)}. \quad (3.9)$$

де $P_{St}^{(u)}$ – ІФ у вузлі із джерелом коливань напруги.

Наприклад, для схеми СЕП прокатного цеху (рисунок 3.5) [8]. На схемі позначене Т1 – трансформатор зв'язку з енергосистемою, Т2..Т_м – трансформатори, що споживають енергію від підстанції, ВП – вентильний перетворювач прокатного цеху, що є різкозмінним (ударним) навантаженням.

Коефіцієнт розподілу ІФ на стороні 220 кВ схеми (рисунок 3.5) визначається за формулою:

$$k_{u\Phi}^{(n)} = \frac{X_K}{X_K + X_{T1}}. \quad (3.10)$$

де X_K – опір КЗ живильної ЕС,

X_{T1} – опір трансформатора зв'язку з енергосистемою.

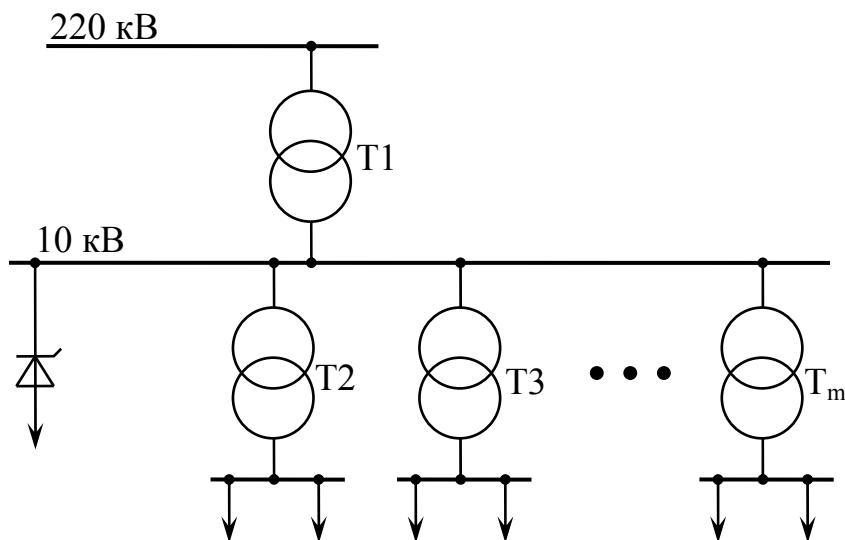


Рисунок 3.5 – Спрощена схема СЕП прокатного цеху

Наявність окремих БК або у складі фільтро-коректуючих пристроїв (ФКУ) трохи знижує точність оцінки $k_{u\Phi}^{(n)}$: у цьому випадку значення $k_{u\Phi}^{(n)}$ потрібно зменшувати на 5-10% [8].

3.4 Приклади розрахунків

Приклад 1.

Визначити параметри КН в електричній мережі прокатного стану та проаналізувати їх відповідність нормам. Графік зміни реактивного

навантаження наведені на рисунку 3.6. Потужність КЗ у мережі 10 кВ становить 300 МВА.

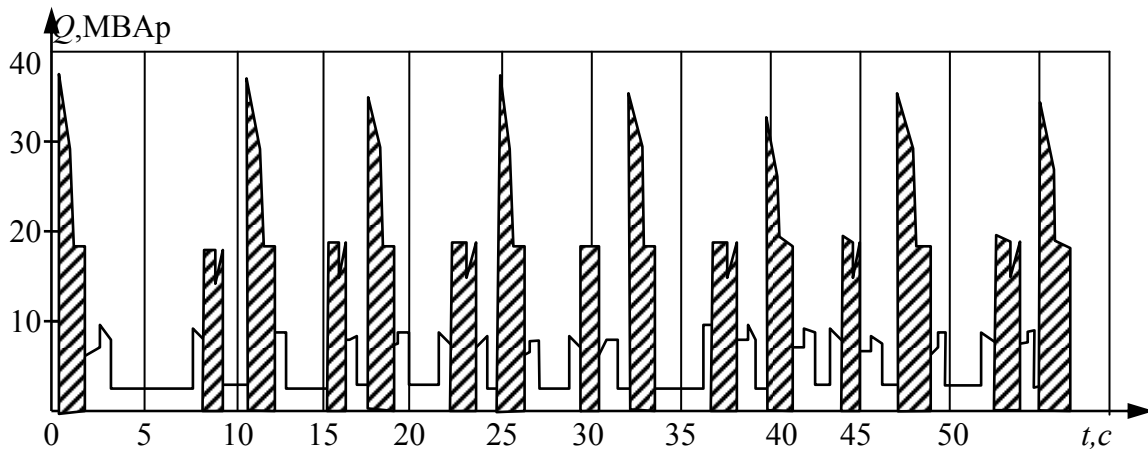


Рисунок 3.6 – Графік реактивного навантаження прокатного стану

Розв'язок. Відповідно до графіка навантаження визначимо розмахи КН:

$$d_1 = \delta U_1 = \frac{\delta Q_1}{S_K} \cdot 100\% = \frac{39}{300} \cdot 100\% = 13\%$$

і тривалість зміни напруги $t_1=0$ с,

$$d_2 = \delta U_2 = \frac{\delta Q_2}{S_K} \cdot 100\% = \frac{12}{300} \cdot 100\% = 4\%$$

і тривалість зміни напруги $t_1=0,6$ с.

Результати розрахунків розмахів КН для усього графіка наведені у таблиці 3.1.

У розглянутому випадку мають місце як прямокутні КН ($t_1=0$), так і трикутні ($t_1 \neq 0$), для яких необхідно визначити еквівалентний розмах КН, тобто привести їх до прямокутної форми:

$$F_1 d_1 = 1 \cdot 13 = 13\%, \quad F_2 d_2 = 0,27 \cdot 4 = 1,08\%,$$

де F_1 – коефіцієнт еквівалентності для похилих КН, наведений на рисунку 3.3.

Інтенсивність флікера для кожної зміни напруги

$$P_{st1} = \frac{F_1 d_1}{d_0} = \frac{13}{2,75} = 4,73,$$

$$P_{st2} = \frac{F_2 d_2}{d_0} = \frac{1,08}{2,75} = 0,39,$$

де d_0 – припустимий розмах КН, визначений за рисунком 3.1 в залежності від частоти повторень у хвилину r . У розглянутому прикладі $r=1$, тому, відповідно до рисунку 3.1, $d_0 = 2,75$.

У таблиці 3.1 наведений повний розрахунок ІФ для графіка навантаження (рисунок 3.6), а на рисунку 3.7 наведена крива зміни ІФ для розглянутого випадку.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків розмахів ІФ в електричній мережі

i	δQ , Мвар	d_1	$t_{1,3}$	F_1	$F_1 d_1$	r	d_0	Pst_1
1	39	13	0	1	13	1	2,75	4,73
2	12	4	0,6	0,27	1,08	1	2,75	0,39
3	9	3	0	1	3	1	2,75	1,09
4	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
5	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
6	6	2	0	1	2	1	2,75	0,73
7	6	2	1	0,2	0,4	1	2,75	0,15
8	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
9	39	13	0	1	13	1	2,75	4,73
10	12	4	0,6	0,27	1,08	1	2,75	0,39
11	9	3	0	1	3	1	2,75	1,09
12	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
13	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
14	6	2	0	1	2	1	2,75	0,73
15	6	2	1	0,2	0,4	1	2,75	0,15
16	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
17	39	13	0	1	13	1	2,75	4,73
18	12	4	0,6	0,27	1,08	1	2,75	0,39
19	9	3	0	1	3	1	2,75	1,09
20	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
21	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
22	6	2	0	1	2	1	2,75	0,73
23	6	2	1	0,2	0,4	1	2,75	0,15
24	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
25	39	13	0	1	13	1	2,75	4,73
26	12	4	0,6	0,27	1,08	1	2,75	0,39
27	9	3	0	1	3	1	2,75	1,09
28	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
29	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
30	6	2	0	1	2	1	2,75	0,73
31	6	2	1	0,2	0,4	1	2,75	0,15
32	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
33	39	13	0	1	13	1	2,75	4,73
34	12	4	0,6	0,27	1,08	1	2,75	0,39
35	9	3	0	1	3	1	2,75	1,09
36	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
37	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
38	6	2	0	1	2	1	2,75	0,73
39	6	2	1	0,2	0,4	1	2,75	0,15
40	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
41	39	13	0	1	13	1	2,75	4,73
42	12	4	0,6	0,27	1,08	1	2,75	0,39
43	9	3	0	1	3	1	2,75	1,09
44	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
45	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
46	6	2	0	1	2	1	2,75	0,73
47	6	2	1	0,2	0,4	1	2,75	0,15
48	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
49	39	13	0	1	13	1	2,75	4,73
50	12	4	0,6	0,27	1,08	1	2,75	0,39
51	9	3	0	1	3	1	2,75	1,09
52	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
53	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
54	6	2	0	1	2	1	2,75	0,73
55	6	2	1	0,2	0,4	1	2,75	0,15
56	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18
57	39	13	0	1	13	1	2,75	4,73
58	12	4	0,6	0,27	1,08	1	2,75	0,39
59	9	3	0	1	3	1	2,75	1,09
60	18	6	0	1	6	1	2,75	2,18

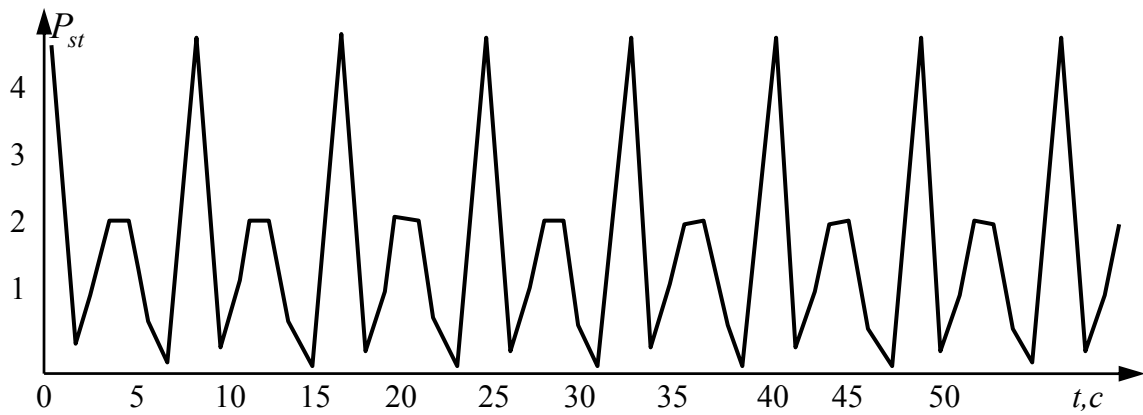


Рисунок 3.7 – Графік зміни ІФ в електричній мережі 10 кВ

Інтенсивність флікера для усього графіка

$$P_{st} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{60} P_{st_i}^3} = 10,28.$$

Так, як $P_{st} > 1$, рівень КН вище допустимого.

Приклад 2.

Визначити допустимість КН на шинах 110 кВ для попереднього прикладу, за умови, що трансформатор 110/10кВ має потужність 40 МВА та напругу КЗ $u_K = 10,5 \%$.

Розв'язок: Прийmemo $S_{\sigma} = 40$ МВА. Опір трансформатора

$$x_T = \frac{u_K}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{ном}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{40}{40} = 0,105.$$

Сумарний опір трансформатора та системи

$$x_T + x_K = \frac{S_{\sigma}}{S_K} = \frac{40}{300} = 0,133.$$

Опір системи

$$x_K = 0,133 - 0,105 = 0,028$$

Коефіцієнт розподілу ІФ на шинах 110 кВ

$$k_{ИФ}^{(110)} = \frac{x_K}{x_T + x_K} = \frac{0,028}{0,133} = 0,21.$$

Інтенсивність флікера на шинах 110 кВ

$$P_{st}^{(110)} = P_{st}^{(10)} \cdot k_{ИФ}^{(110)} = 10,28 \cdot 0,21 = 2,2.$$

$P_{st}^{(110)} > 1$, тому рівень КН вище допустимого.

Приклад 3.

Для схеми, представленної на рисунку 3.8 визначити значення ІФ на шинах 20 кВ. Електродвигун є єдиним різкозмінним навантаженням. Характеристики двигуна: $S_{ном} = 1300$ кВа, $U_{ном} = 6$ кВ, $\cos \varphi = 0,85$, кратність пускового струму

$k_{\Pi} = 5$, коефіцієнт потужності при пуску $\cos \varphi_{\Pi} = 0,2$, робочий цикл представлений на рисунку 3.9.

Система: $S_K = 1800$ МВА. $X/R = 15$. $U_{\text{НОМ}} = 132$. Трансформатор Т1: $S_{\text{НОМ}} = 25$ кВа, 132/20 кВ, $Z_{T^*} = 0,005 + j \cdot 0,13$. Трансформатор Т2: $S_{\text{НОМ}} = 1300$ кВа, 20/6 кВ, $Z_{T^*} = 0,009 + j \cdot 0,04$.

Розв'язок.

1. Опори системи та трансформатора, зведені до напруги $U_6 = 20$ кВ.

$$Z_C = \left(\frac{R}{X} + j \right) \cdot \frac{U_K^2}{S} = \left(\frac{1}{15} + j \right) \frac{20^2}{1800} = 0,015 + j \cdot 0,222 \text{ Ом.}$$

$$Z_{T1} = Z_{T^*} \cdot \frac{U_6^2}{S_{\text{НОМ}}} = (0,005 + j \cdot 0,13) \cdot \frac{20^2}{25} = 0,080 + j \cdot 2,080 \text{ Ом.}$$

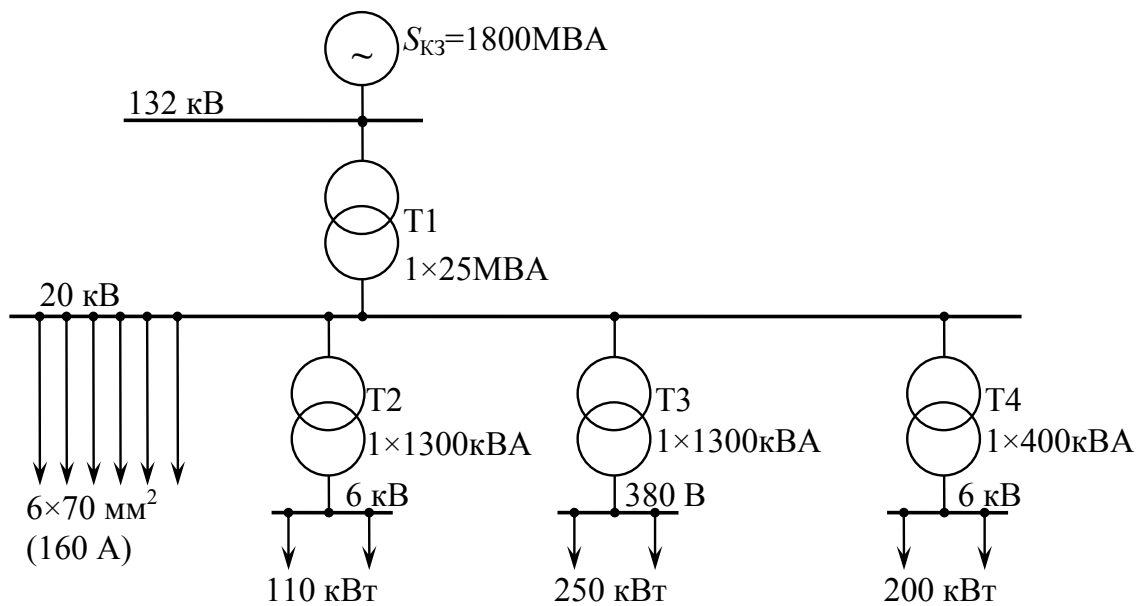


Рисунок 3.8 – Схема СЕП

Повний опір системи

$$Z_{C\Sigma} = Z_C + Z_{T1} = 0,095 + j \cdot 2,302 = 2,304 e^{j87,6^\circ} \text{ Ом.}$$

2. Опір двигуна при пуску

$$Z_D = (\cos \varphi_n + j \sin \varphi_n) \cdot \frac{1}{k_{\Pi}} \cdot \frac{U_6}{S_{\text{НОМ}}} = (0,2 + j0,98) \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{20^2}{1,3} = 12,31 + j60,29 \text{ Ом.}$$

Опір трансформатора Т2

$$Z_{T2} = Z_{T^*} \frac{U_6^2}{S_{\text{НОМ}}} = (0,009 + j \cdot 0,04) \cdot \frac{20^2}{1,3} = 2,77 + j \cdot 12,31 \text{ Ом.}$$

Повний опір двигуна

$$Z_{D\Sigma} = Z_D + Z_{T2} = 15,08 + j72,60 = 74,18 e^{j78,3^\circ} \text{ Ом.}$$

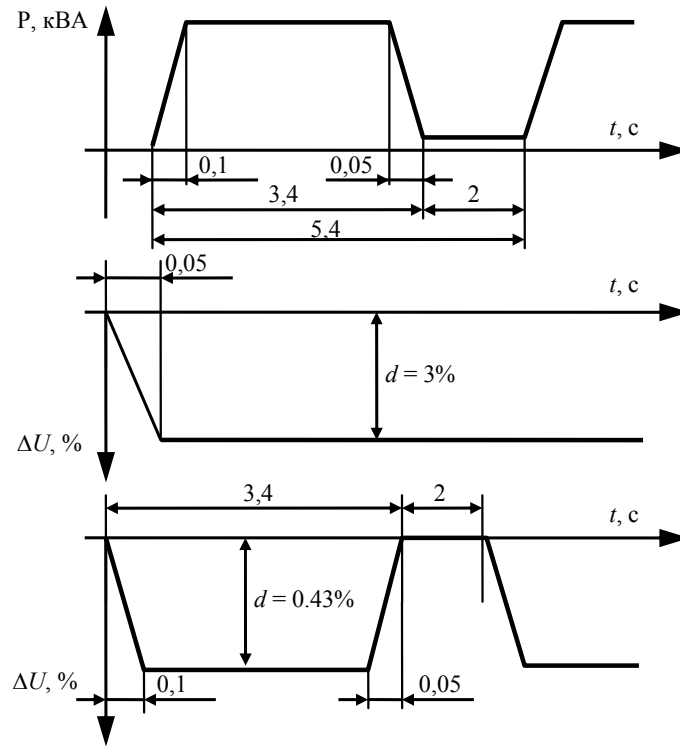


Рисунок 3.9 – Робочий цикл двигуна та графіки зміни напруги

3. Час наростання пускового струму

$$T_1 \approx 3 \cdot \frac{x_{C\Sigma} + x_{D\Sigma}}{r_{C\Sigma} + r_{D\Sigma}} \cdot \frac{1}{314} = 3 \cdot \frac{74,9}{15,2} \cdot \frac{1}{314} = 45 \cdot 10^{-3} \text{ с;}$$

час зниження пускового струму $T_2 \geq 2\text{с}$.

Відносна зміна напруги при пуску

$$d = \left(1 - \left| \frac{Z_{D\Sigma}}{Z_{C\Sigma} + Z_{D\Sigma}} \right| \right) \cdot 100\% \approx \frac{Z_{C\Sigma}}{Z_{D\Sigma}} \cdot \cos(\varphi_{C\Sigma} - \varphi_{D\Sigma}) \cdot 100\% =$$

$$= \frac{2,304}{74,18} \cdot \cos(87,6 - 78,3) \cdot 100\% = 3,07\%.$$

З урахуванням часу наростання та зниження пускового струму апроксимуємо криву зміни напруги; по кривій рисунку 3.3,*a* знаходимо $F_E = 0,85$. Еквівалентна зміна напруги прямокутної форми

$$F_E \cdot d = 0,85 \cdot 3,0 = 2,6\%$$

4. Визначимо КН на шинах 20 кВ при працюючому двигуні. Повний опір системи відносно шини 20 кВ залишається незмінним

$$Z_{C\Sigma} = 2,304 \text{ Ом, } \varphi_{C\Sigma} = 87,6^\circ$$

Опір двигуна

$$Z_{D\Sigma} = (\cos \varphi + j \sin \varphi) \frac{U_6^2}{S_{\text{ном}}} = (0,85 + j0,53) \frac{20^2}{1,3} = 261,50 + j174,41 \text{ Ом}$$

Повний опір двигуна

$$Z_{д\Sigma} = Z_{д} + Z_{T2} = 264,27 + j174,41 = 316,2e^{j33,4^{\circ}} \text{ Ом}$$

Тривалість похилої частини кривої при збільшенні навантаження $T_1 \approx 0,1$ с; тривалість похилої частини кривої при зниженні навантаження $T_2 \approx 0,05$ с. Відносна зміна напруги при роботі двигуна

$$\begin{aligned} d &= \left(1 - \left| \frac{Z_{д\Sigma}}{Z_{C\Sigma} + Z_{д\Sigma}} \right| \right) \cdot 100\% \approx \frac{Z_{C\Sigma}}{Z_{д\Sigma}} \cdot \cos(\varphi_{C\Sigma} - \varphi_{д\Sigma}) \cdot 100\% = \\ &= \frac{2,304}{316,2} \cdot \cos(87,6 - 34,4) \cdot 100\% = 0,43\% \end{aligned}$$

Коефіцієнти еквівалентності для двох значень часу T_1 , T_2 отримані по рисунку 3.3,а рівні $F_{E1} = 0,68$; $F_{E2} = 0,85$.

Еквівалентні значення напруги прямокутної форми:

$$F_{E1} = 0,68 \cdot 0,43 = 0,29\%,$$

$$F_{E2} = 0,85 \cdot 0,43 = 0,37\%.$$

Оцінка КН при пуску електродвигуна становить обмежений інтерес, оскільки двигун зазвичай запускається один раз у день. Однак цей розрахунок наведений для повноти розгляду питання.

Перший підхід. Виходячи з того, що ІФ є величиною, що лінійно залежить від величини зміни напруги (при одній і тій же формі кривої), одержимо

$$F_{E2} \cdot d = 2,6\%.$$

При одній зміні напруги за розглянутий проміжок часу $r = 1/10 = 0,1$ зм/хв згідно рисунку 3.1 при $P_{st} = 1$, $d_0 = 7,4\%$.

$$P_{st1} = \frac{F_E \cdot d}{d_0} \cdot P_{st} = \frac{2,6}{7,4} \cdot 1 = 0,35$$

$$P_s = \sqrt[3]{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{sti}^3} \approx 0 \text{ (при одному пуску в день).}$$

Другий підхід дає наступний результат:

$$F_E d = 2,6\%,$$

$$P_{sti} = 0,365 \cdot F_E \cdot d \cdot r^{0,31} \cdot R = 0,365 \cdot 2,6 \cdot 0,1^{0,31} \cdot 0,75 = 0,35. \quad (3.11)$$

При роботі двигуна з номінальним навантаженням розглянемо дві еквівалентні зміни напруги прямокутної форми

$$F_{E1} \cdot d = 0,29\%, \quad F_{E2} \cdot d = 0,37\%.$$

Згідно рисунка 3.1, при $r = 60/(3,4 + 2) = 11,1$ зм/хв і $P_{st} = 1$, $d_0 = 1,25\%$. Розрахунок ІФ дає наступні значення:

$$P_{st1} = \frac{0,29}{1,25} = 0,232, \quad P_{st2} = \frac{0,37}{1,25} = 0,296,$$

$$P_s = (P_{st1}^3 + P_{st2}^3)^{1/3} = (0,232^3 + 0,296^3)^{1/3} = 0,34.$$

ДОДАТОК А
РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ПОШУКУ
ДОВІДКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Слід використовувати наступну літературу для визначення параметрів:

- силових трансформаторів 10/0,4кВ [1];
- високовольтних силових трансформаторів [10,11,15,16];
- повітряних ліній [11,15];
- кабельних ліній [15,16];
- струмообмежувальних реакторів [10,15];
- реакторів [10,15];
- двигунів [15,19].

Крім приведеної літератури слід користуватися каталогами на сучасне обладнання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Беляев А.В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. – Ленинград, Энергоатомиздат, 1988. – 176 с.
2. Гераскин О.Т. Применение вычислительной техники для расчета высших гармоник в электрических сетях / О.Т. Гераскин, В.В. Черепанов. – М.: ВИПКЭнерго, 1987. – 53 с.
3. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введен в Украине 01.01.2000. – (Межгосударственный стандарт).
4. ГОСТ Р 54149-2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: национальный стандарт Российской Федерации: введен 2013-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М: Стандартинформ, 2012. – 15 с.
5. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. Т.1. – 4-е изд., Санкт-Петербург, Питер, 2004. – 576 с.
6. ДСТУ EN 50160:2010 Характеристики напруги електроживлення, постачаної розподільчими мережами загальної призначеності. – Введений в Україні 01.07.2012. – (Національний стандарт України).
7. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд., перераб. и доп. – М: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
8. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
9. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
10. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
11. Зорін В.В., Штогрин Є.А., Буйний Р.О. Електричні мережі та системи (окремі розділи) : навчальний посібник для студентів вищ. техн. навч. закл. – Ніжин: ТОВ “Видавництво “Аспект-Поліграф”, 2011. – 248 с.
12. Карташев И.И., Тульский В.Н. Управление качеством электроэнергии. – Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
13. Овчаренко А.С. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Проектирование и расчет / А.С. Овчаренко, М.Л. Рабинович, В.Н. Мозырский, Д.И. Розинский. – К.: Техника, 1985. – 279 с.
14. Овчаренко А.С., Розинский Д.И. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий. – К.: Техніка, 1989. – 287 с.

15. Справочник по проектированию электрических сетей / Д.Л. Файбисович, И.Г. Карапетян, И.М. Шапиро. Под ред. Д.Л. Файбисовича. – 3-е изд., перераб. и доп. – М: ЭНАС, 2009. – 392 с.

16. Справочник по проектированию электрических систем / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов, Л.Я. Рудых, Д.Л. Файбисович, Р.М. Фришберг, Л.Д. Хабачев. И.М. Шапиро. Под ред С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.

17. Справочник по электроснабжению и оборудованию. Т.1: Электроснабжение. / Под ред. А.А. Федорова.– М.: Энергоатомиздат, 1986.– 568 с.

18. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. – К.: Наукова думка, 2005. – 210 с.

19. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 4. – "Использование электрической энергии" / Под общ. ред. профессоров Московского энергетического института В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 9-е изд., стер. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 696 с.

20. EN 50160:2010 "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks". – (European Committee for Standardization).

21. ДСТУ ІЕС 61000-2-4-2002 Електромагнітна сумісність. Частина 2. Електромагнітне оточення. Секція 4. Рівні сумісності для промислового обладнання, щодо низькочастотних кондуктивних завад. – К:Держспоживстандарт, 2002. – 18 с.