

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Є. І. Бардик, М. П. Болотний, О. Л. Бондаренко

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

ПРАКТИКУМ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент *Буслова Н. В.*, канд. техн. наук., доцент
кафедра електричних мереж і систем, ФЕА, КПП ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Останчук О. В.*, докт. техн. наук., професор, кафедри
відновлюваних джерел енергії ФЕА КПП ім. Ігоря Сікорського

*Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 24.06.2022 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 10 від 20.06.2022 р.)*

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПРАКТИКУМ

*Укладачі: Бардик Євген Іванович, доцент кафедри відновлюваних джерел енергії, ФЕА
Денисюк Петро Левкович, доцент кафедри відновлюваних джерел енергії, ФЕА
Бондаренко Олександр Леонідович, асистент кафедри відновлюваних
джерел енергії, ФЕА*

Експлуатація та режими роботи електростанцій: практикум. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПП ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Є. І. Бардик, П. Л. Денисюк, О. Л. Бондаренко. – Електронні текстові дані (1 файл: 1.46Мбайт). – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2022. - 145 с.

Навчальний посібник призначений для закріплення теоретичних положень та забезпечення виконання індивідуальних завдань з дисципліни «Експлуатація та режими роботи електростанцій». Розглянуто практичні завдання пов'язані з розрахунком і аналізом нормальних, допустимих і аномальних режимів електрообладнання, ліквідації аварій в електричній частині електростанцій різних типів. Наведено опис характерних нормальних і аномальних режимів роботи синхронних генераторів, силових трансформаторів і автотрансформаторів та електродвигунів власних потреб електростанцій та підстанцій. Значна увага приділена формуванню у здобувачів навичок та умінь виконання оперативних перемикачів в головних схемах електростанцій та підстанцій в режимах нормальної експлуатації та під час ліквідації аварій.

Завдання були сформовані з урахуванням специфіки технологічного процесу і умов функціонування конкретного типу електростанцій, з урахуванням особливостей освітньої програми «Електричні станції».

Призначений для здобувачів ступеня бакалавр, які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» на факультеті «Електроенерготехніки та автоматики».

©Є. І. Бардик, М. П. Болотний, О. Л. Бондаренко
©КПП ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1 «РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРІВ В УСТАЛЕНИХ ТЕПЛОВИХ І ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ».....	7
1.1 Мета та зміст заняття.....	7
1.2 Короткі теоретичні відомості.....	7
1.2.1 Навантажувальна здатність трансформаторів	7
1.2.2 Перетворення заданого графіка навантаження в двоступеневий ...	9
1.2.3 Визначення сталої часу нагрівання трансформатора.....	10
1.2.4 Визначення температури найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора.....	11
1.2.5 Теплове старіння ізоляції трансформатора.....	12
1.3 Приклади типових задач.....	15
1.4 Задачі для самостійного розв'язання	21
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2 «ВИЗНАЧЕННЯ ЗРІВНЮВАЛЬНИХ СТРУМІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПРИ ВКЛЮЧЕННІ НА ПАРАЛЕЛЬНУ РОБОТУ».....	27
2.1 Мета та зміст заняття.....	27
2.2 Короткі теоретичні відомості.....	27
2.2.1 Паралельна робота трансформаторів.....	27
2.2.2 Паралельна робота трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації	29
2.2.3 Паралельна робота трансформаторів з різними напругами короткого замикання.....	29
2.2.4 Паралельна робота трансформаторів з різними групами з'єднання обмоток.....	30
2.2.5 Схеми та групи з'єднання обмоток.....	30
2.3 Приклади типових задач.....	35
2.4 Задачі для самостійного розв'язання	42

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3 «ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМИХ НАВАНТАЖЕНЬ ОБМОТОК І ПЕРЕНАПРУГ АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ У РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ»	45
3.1 Мета та зміст заняття.....	45
3.2 Короткі теоретичні відомості.....	45
3.3 Приклади типових задач.....	54
3.4 Задачі для самостійного розв’язання	59
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4 «ВКЛЮЧЕННЯ НА ПАРАЛЕЛЬНУ РОБОТУ І СИНХРОНІЗАЦІЯ З МЕРЕЖЕЮ ГЕНЕРАТОРІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ»	62
4.1 Мета та зміст заняття.....	62
4.2 Короткі теоретичні відомості.....	62
4.2.1 Спосіб точної синхронізації.....	62
4.2.2 Спосіб самосинхронізації.....	66
4.3 Приклади типових задач.....	68
4.4 Задачі для самостійного розв’язання	71
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 5 «ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОЇ ТРИВАЛОСТІ КОРОТКОЧАСНИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА».	73
5.1 Мета та зміст заняття.....	73
5.2 Короткі теоретичні відомості.....	73
5.3 Приклади типових задач.....	77
5.4 Задачі для самостійного розв’язання	80
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 6 «РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ»	82
6.1 Мета та зміст заняття.....	82
6.2 Короткі теоретичні відомості.....	82
6.3 Приклади типових задач.....	86
6.4 Задачі для самостійного розв’язання	92
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 7 «РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПРИ	

ВІДХИЛЕННІ НАПРУГИ, ЧАСТОТИ І НАВАНТАЖЕННЯ ВІД НОМІНАЛЬНИХ».....	94
7.1 Мета та зміст заняття.....	94
7.2 Короткі теоретичні відомості.....	94
7.3 Приклади типових задач.....	97
7.4 Задачі для самостійного розв’язання	105
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 8 «ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕВИЩЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ В УСТАЛЕНИХ РЕЖИМАХ І В УМОВАХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ»	107
8.1 Мета та зміст заняття.....	107
8.2 Короткі теоретичні відомості.....	107
8.3 Приклади типових задач.....	111
8.4 Задачі для самостійного розв’язання	116
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 9«ПРОВЕДЕННЯ ОПЕРАТИВНИХ ПЕРЕМИКАНЬ В ГОЛОВНИХ СХЕМАХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В НОРМАЛЬНИХ РЕЖИМАХ І ПІД ЧАС ЛІКВІДАЦІЇ АВАРІЇ»	117
9.1 Мета та зміст заняття.....	117
9.2 Короткі теоретичні відомості.....	117
9.3 Задачі для самостійного розв’язання	138
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	141

ВСТУП

Сучасне електричні станції являють собою комплекс взаємопов'язаного електрообладнання (турбогенератори з системами збудження, трансформатори зв'язку, електродвигуни власних потреб, розподільчі установки, повітряні і кабельні лінії) і визначаються високими вимогами по надійності.

В зв'язку з цим, велике значення мають заходи по попередженню і виявленню причин виникнення відмов електрообладнання, аварійних ситуацій в електричній частині електростанцій, що в свою чергу потребує якісної експлуатації всіх елементів, своєчасного проведення діагностування і проведення ремонтів, високої кваліфікації персоналу. Тому важливою задачею є формування у студентів здатностей забезпечення нормальних та допустимих режимів роботи електрообладнання і електростанції в цілому, прийняття ефективних рішень персоналом щодо стратегії експлуатації електрообладнання електростанцій, ліквідації аварій на електричних станціях різних типів.

Виконувані здобувачами практичні заняття дають їм можливість не тільки закріпити набутті знання, але й суттєво розвинути самостійність в активному застосуванні теоретичних знань, оволодіти методикою прийняття рішень щодо забезпечення надійності електричних станцій.

Технологічно успіх засвоєння знань забезпечується постановкою різноманітних завдань, які для їх вирішення потребують застосування, як відомих, існуючих стандартних методів, так і пошуку та застосування нестандартних підходів до розв'язання, колективним пошуком розв'язання.

Завдання, які розв'язують здобувачі на практичних заняттях, а також привиконанні індивідуальних завдань і закріплюють теоретичні положення дисципліни «Експлуатація та режими роботи електростанцій» і підбираються з урахуванням специфіки технологічного процесу і умов функціонування конкретного типу електростанцій.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1

«РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРІВ В УСТАЛЕНИХ ТЕПЛОВИХ І ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ»

1.1 Мета та зміст заняття

Мета: Формування навичок та умінь аналізу теплових характеристик трансформатора в усталеному тепловому режимі і перехідного режимі.

Навчальні запитання:

1. Двоступеневий графік навантаження.
2. Графік навантажувальної здатності трансформатора.
3. Перетворення заданого графіка навантаження в еквівалентний двоступеневий.
4. Залежність відносного зносу і відносного терміну експлуатації ізоляції трансформатора від температури обмотки.
5. Криві залежності перевищень температури масла над температурою охолоджувального середовища і перевищень температури обмотки в найбільш нагрітій точці над температурою масла в усталеному режимі від навантаження трансформатора
6. **Задача** – Розрахунок теплових характеристик трансформатора в усталеному та перехідному режимі.

1.2 Короткі теоретичні відомості

1.2.1 Навантажувальна здатність трансформаторів

Номінальною потужністю трансформатора називають уявну потужність (навантаження), яку трансформатор може нести протягом всього нормального терміну експлуатації при номінальних режимних умовах (номінальних напругах, частоті та температурі охолоджуючого середовища). Нормальний термін експлуатації називають приблизно рівним терміну морального старіння.

Дійсний термін експлуатації трансформатора визначає процес старіння ізоляції його обмоток, який, в свою чергу, залежить від температури ізоляції

обмоток. Для паперової ізоляції, зануреної в масло, нормальний строк експлуатації забезпечується при роботі з незмінною температурою 98 °С. Отже, трансформатор буде мати нормальний термін експлуатації в тому випадку, якщо температура в найбільш нагрітій точці його обмоток буде незмінна і рівна 98 °С. В цих умовах ізоляція трансформатора зазнає номінального (нормального) зношення.

Перевищення температури обмоток трансформатора над температурою охолоджуючого повітря залежить від потужності навантаження. Номінальну потужність трансформатора призначають у відповідності з нормованим перевищенням температури обмоток над температурою повітря. Однак при влаштуванні трансформатора на відкритому повітрі температура останнього не постійна, а змінюється протягом року у відповідності з кліматичними умовами. Для кожної кліматичної зони може бути встановлена еквівалентна за зношенням ізоляції температура повітря за час T , при якій трансформатор, працюючи з незмінним навантаженням, має таке саме зношення ізоляції, як в реальних умовах при змінній температурі повітря за розглянутий період часу. В якості номінальної температури охолоджуючого середовища прийнята температура +20 °С. Для верхніх шарів масла нормоване перевищення температури при номінальному навантаженні дорівнює: для систем охолодження М та Д -55 °С, для систем охолодження Ц та ДЦ -40 °С.

При експлуатації трансформатора необхідно слідкувати за його перевантаженням.

Систематичне перевантаження – це таке перевантаження, яке трансформатор може зазнавати цілодобово в часи добового максимуму навантаження, причому зношення ізоляції за розглянутий період не перевищує номінального [1, 3].

Якщо трансформатор протягом деякого часу працює з навантаженням менше номінального, то зношення його ізоляції проходить повільніше в порівнянні з розрахунковими умовами. За рахунок цього трансформатор можна перевантажити на будь-якому іншому відрізку часу, тобто на посиленій у

порівняні з номінальним зношенням ізоляції, але так, щоб сумарне число відпрацьованих годин дорівнювала розрахунковим.

Для оцінки допустимості режиму систематичного перевантаження трансформатора у години добового максимуму необхідно виконати розрахунок його температурного режиму, тобто обчислити зміну температуру масла та обмоток трансформатора протягом доби. Для цієї мети можна використати наступні розрахункові вирази, справедливі при миттєвій змінній коефіцієнта (кратності) навантаження K від $K_1 = \frac{S_1}{S_{\text{НОМ}}}$ до $K_2 = \frac{S_2}{S_{\text{НОМ}}}$ ($S_{\text{НОМ}}$ – номінальна потужність трансформатора).

1.2.2 Перетворення заданого графіка навантаження в двоступеневий

Для того щоб перетворити заданий графік навантаження в еквівалентний двоступеневий (рис. 1.1), необхідно [1, 3, 4]:

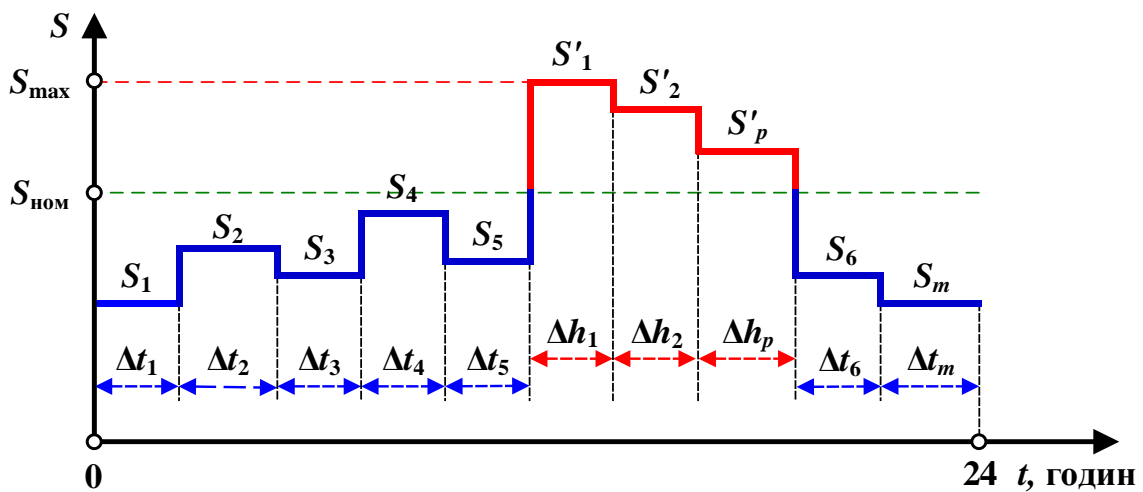


Рисунок 1.1 – Заданий графік навантаження трансформатора

1. На заданому графіку навантаження провести горизонтальну лінію з ординатою, що відповідає номінальному навантаженню $S_{\text{НОМ}}$, тобто $K = 1$.
2. Перетином цієї лінії з вихідним графіком відокремити ділянку найбільшого перевантаження тривалістю h' .
3. Частина графіка навантаження, яка залишилася, розбити на m інтервалів Δt_m , виходячи з можливості провести лінію середнього навантаження на кожному з інтервалів і визначити значення S_1, S_2, \dots, S_m .

4. Визначити початкове навантаження K_1 еквівалентного графіка з виразу:

$$K_1 = \frac{1}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \sqrt{\frac{S_1^2 \cdot \Delta t_1 + S_2^2 \cdot \Delta t_2 + \dots + S_m^2 \cdot \Delta t_m}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_m}}$$

5. Ділянку перевантаження h' на вихідному графіку розбити на p інтервалів і Δh_i , виходячи з можливості провести лінію середнього навантаження на кожному інтервалі і визначити значення S'_1, S'_2, \dots, S'_p .

6. Визначити попереднє значення навантаження K'_2 еквівалентного графіка навантаження з виразу:

$$K'_2 = \frac{1}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \sqrt{\frac{S_1'^2 \cdot \Delta h_1 + S_2'^2 \cdot \Delta h_2 + \dots + S_p'^2 \cdot \Delta h_p}{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_p}}$$

7. Потім зрівнюють попереднє значення K'_2 з $K_{\text{макс}}$ $\left(K_{\text{макс}} = \frac{S_{\text{макс}}}{S_{\text{НОМ}}} \right)$:

	$K'_2 \geq 0,9 \cdot K_{\text{макс}}$	\Rightarrow	$K_2 = K'_2$	$h = h'$
Якщо	$K'_2 < 0,9 \cdot K_{\text{макс}}$		$K_2 = 0,9 \cdot K_{\text{макс}}$	$h = \frac{K_2^2 \cdot h'}{(0,9 \cdot K_{\text{макс}})^2}$

1.2.3 Визначення сталої часу нагрівання трансформатора

Стала часу нагрівання τ трансформатора визначається, як [1, 10]

$$\tau = \frac{C \cdot \Delta\theta_{\text{М.НОМ}}}{P_0 + P_{\text{к}}},$$

де C – теплоємність трансформатора, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{год.}}{\text{град.}}$; $\Delta\theta_{\text{М.НОМ}}$ – перевищення температури верхніх шарів масла над температурою охолоджуючого середовища, град.; P_0 , $P_{\text{к}}$ – відповідно втрати холостого ходу та короткого замикання, Вт.

Теплоємність C визначається, як

$$C = d \cdot G_{\text{обм.}} + 133 \cdot G_{\text{магн.}} + 108 \cdot G_{\text{б.р.}} + 545 \cdot G_{\text{м.}},$$

де d – коефіцієнт, що враховує матеріал провідника обмотки ($d_{\text{Cu}}=132$, $d_{\text{Al}}=288$); $G_{\text{обм.}}$ та $G_{\text{магн.}}$ – відповідно маса обмотки і магнітопроводу, т; $G_{\text{б.р.}}$ та $G_{\text{м.}}$ – відповідно маса бака з радіаторами та масла, т.

Можна використовувати формулу наближеного обчислення для трансформатора з обмотками з міді:

$$C = 133 \cdot G_{\text{а.ч.}} + 108 \cdot G_{\text{б.р.}} + 545 \cdot G_{\text{м.}}$$

У довідниках, як правило, задані $G_{\text{повн.}}$, $G_{\text{трансп.}}$, $G_{\text{м.}}$. В цьому випадку наближено можна прийняти

$$G_{\text{а.ч.}} = 0,7 \cdot (G_{\text{повн.}} - G_{\text{м.}}), G_{\text{б.р.}} = 0,3 \cdot (G_{\text{повн.}} - G_{\text{м.}}).$$

Значення $\Delta\theta_{\text{м.ном}}$ залежить від типу системи охолодження трансформатора та приймається рівним: $+40^\circ\text{C}$ – для трансформаторів із системами охолодження ДЦ та Ц, $+55^\circ\text{C}$ – для трансформаторів із системами М та Д.

1.2.4 Визначення температури найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора

Температуру найбільш нагрітої точки обмотки $\theta_{\text{ннт.к}}$ в тепловому режимі, що встановився (при двох значеннях $K = K_1$ і $K = K_2$) слід розраховувати за формулою [1, 3, 4]

$$\theta_{\text{ннт.к}} = \theta_{\text{м}} + \theta_{\text{ннт.м.к}} \text{ або } \theta_{\text{ннт.к}} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.к}} + \theta_{\text{ннт.м.к}},$$

де

$$\theta_{\text{м.к}} = \Delta\theta_{\text{м.ном}} \cdot \left(\frac{1 + d \cdot K^2}{1 + d} \right)^x,$$

де $\Delta\theta_{\text{м.ном}} = 55^\circ\text{C}$ – для трансформаторів із системою охолодження М та Д; $\Delta\theta_{\text{м.ном}} = 40^\circ\text{C}$ – для трансформаторів із системою охолодження ДЦ та Ц; $d = P_{\text{к}}/P_0$.

$$\theta_{\text{ННТ.М.К}} = \theta_{\text{ННТ.НОМ}} - \theta_{\text{М.НОМ}} \cdot K^y = \theta_{\text{ННТ.М.НОМ}} \cdot K^y,$$

де K – значення навантажень; $x = 0,9$ та $y = 1,6$ – для трансформаторів із системою охолодження М та Д; $x = 1,0$ та $y = 1,8$ – для трансформаторів із системою охолодження ДЦ та Ц; $\theta_{\text{ННТ.НОМ}} = 23^\circ\text{C}$ – для трансформаторів із системою охолодження М та Д; $\theta_{\text{ННТ.НОМ}} = 38^\circ\text{C}$ – для трансформаторів із системою охолодження ДЦ та Ц.

Температуру найбільш нагрітої точки в перехідному тепловому режимі нагріву при тривалості $4 \cdot \tau > h > 0,5$ годин розраховуємо за формулою

$$\theta_{\text{ННТ.н}} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{М.н}} + \theta_{\text{ННТ.М.К2}},$$

де $\theta_{\text{М.н}} = \theta_{\text{М.К1}} + (\theta_{\text{М.К2}} - \theta_{\text{М.К1}}) \cdot \left(1 - e^{-h/\tau}\right)$; $\theta_{\text{ННТ.М.К2}} = \theta_{\text{ННТ.М.НОМ}} \cdot K_2^y$.

Температуру найбільш нагрітої точки в перехідному режимі зменшення температури при тривалості зменшення $4 \cdot \tau > h \geq 0,5$ годин розраховуємо за формулою

$$\theta_{\text{ННТ.т}} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{М.т}} + \theta_{\text{ННТ.М.К1}},$$

де $\theta_{\text{М.т}} = \theta_{\text{М.К1}} + (\theta_{\text{М.н}} - \theta_{\text{М.К1}}) \cdot e^{-t/\tau}$; $\theta_{\text{ННТ.М.К1}} = \theta_{\text{ННТ.М.НОМ}} \cdot K_1^y$.

Відповідно до прийнятих припущень процес зниження температури до значення, що встановилося, закінчується за час $t = 4 \cdot \tau$.

1.2.5 Теплове старіння ізоляції трансформатора

У процесі експлуатації при підвищенні температури через окисні хімічні реакції, міцність ізоляції знижується, і вона зношується й старіє.

Залежність середнього терміну служби ізоляції класу А від температури в діапазоні $80 \div 140^\circ\text{C}$ має вигляд [1]

$$V = A \cdot e^{a \cdot \theta},$$

де V – термін служби (років), A – постійна; a – коефіцієнт; θ – температура ізоляції в найбільш нагрітій точці; (для трансформатора чисельно дорівнює температурі обмоток у найбільш нагрітій точці) $A = (1,5 \div 7,5) \cdot 10^4$ років.

Відповідно до рекомендації МЕК для ізоляції класу А застосовується шестиградусне правило: термін служби ізоляції змінюється вдвічі при зміні температури на 6 °С, при цьому $a = 0,115$.

При $\theta_{\text{ннт.}\delta} = 98 \text{ }^\circ\text{C}$ термін служби V дорівнює в номінальному режимі:
 $V = A \cdot e^{a \cdot \theta_{\text{ннт.}\delta}}$. Відношення $\frac{V}{V_{\text{ном.}}}$, застосоване в практиці називається відносним терміном служби:

$$V_* = \frac{V}{V_{\text{ном.}}} = e^{-a \cdot (\theta_{\text{ннт.}t} - \theta_{\text{ннт.}\delta})}.$$

Відносне зношення ізоляції:

$$L = \frac{1}{V_*} = e^{a \cdot (\theta_{\text{ннт.}t} - \theta_{\text{ннт.}\delta})}.$$

У розрахунках зручно користуватися підставою не e , а 2. Тоді,

$$e^{a \cdot (\theta_{\text{ннт.}t} - \theta_{\text{ннт.}\delta})} = 2^{\beta \cdot (\theta_{\text{ннт.}t} - \theta_{\text{ннт.}\delta})}.$$

Взявши логарифм від обох частин отримаємо:

$$\beta = \frac{a}{0,69}, 0,69 = \frac{\ln 2}{\ln e},$$

$$L = e^{a \cdot (\theta_{\text{ннт.}t} - \theta_{\text{ннт.}\delta})} = 2^{\frac{a \cdot (\theta_{\text{ннт.}t} - \theta_{\text{ннт.}\delta})}{0,69}} = 2^{\frac{(\theta_{\text{ннт.}t} - \theta_{\text{ннт.}\delta})}{\Delta}}.$$

де Δ – приймають рівною 6 °С.

Це означає, що при зміні температури на 6 °С відносне зношення, і відповідно термін служби ізоляції змінюються у два рази. При температурі 98 °С відносне зношення дорівнює 1 номінальному зношуванню. Якщо відносне зношення дорівнює 2, то це значить, що трансформатор відпрацьовує за 1 годину 2 години нормального терміну служби відповідній температурі 98 °С. Добуток відносного зношування на час дає зношування ізоляції у відпрацьованих годинах або добі: $H = L \cdot t$.

Розрахунок зносу ізоляції слід проводити по кожному з m ділянок двоступеневого графіка навантаження.

Для кожного інтервалу Δt_i за формулами:

$$\theta_{\text{ннт.к}} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.к}} + \theta_{\text{ннт.м.к}},$$

$$\theta_{\text{ннт.н}} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.н}} + \theta_{\text{ннт.м.к2}},$$

$$\theta_{\text{ннт.т}} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.т}} + \theta_{\text{ннт.м.к1}}.$$

Слід розрахувати $\theta_{\text{ннт.т}}(t)$ де К, н і т замінити значеннями Δt_i .

Розрахунковий знос ізоляції по кожній ділянці графіка визначається за формулою[1, 10]

$$L_i = \int_0^{\Delta t_i} 2[\theta_{\text{ннт.т}}(t) - \theta_{\text{ннт.д}}] / \Delta dt.$$

Знос за тривалість $T = 24$ год. графіка навантаження дорівнюватиме сумі зносів по ділянках

$$L = \sum_{i=1}^{i=m} L_i.$$

Знос ізоляції допускається визначати по всьому графіку зміни теплового режиму трансформатора ($\theta_{\text{ннт.т}}(t)$ необхідно розділити на m інтервалів Δt_i).

Ділянки графіка з незмінним значенням $\theta_{\text{ннт.}}$ необхідно приймати за один інтервал $\Delta t_{\text{н}} = 24 - h - 4 \cdot \tau$.

1. Тривалість першого та другого інтервалів від початку експоненти не повинні перевищувати $0,3 \cdot \tau$ кожний.

2. Третього та четвертого інтервалів – не більше τ кожен.

3. Тривалість наступних інтервалів не обмежується.

У кожному інтервалі слід провести лінії середнього значення $\theta_{\text{ннт.ср.і}}$, а потім по кожному інтервалу Δt_i графіка $\theta_{\text{ннт.т}}(t)$ розраховується відносний знос

$$L_i = \frac{\Delta t_i}{T} \cdot 2 \frac{\theta_{\text{ннт.ср.і}} - \theta_{\text{ннт.д}}}{\Delta}.$$

Відносний знос за тривалість графіка визначається як сума зносів по ділянках.

При $\theta_{\text{нт.ср.}i} < 80^\circ\text{C}$ зношування дуже мале і ним можна знехтувати. Якщо число віджитої доби за рік дорівнює 365, то це значить, що трансформатор працює в умовах, відносно зношування, близьких до номінального.

1.3 Приклади типових задач

Приклад № 1.1 Перетворити заданий графік навантаження трансформатора власних потреб ТРДНС-25000/10 в двоступеневий прямокутний графік навантаження.

Години	Навантаження	Години	Навантаження	Години	Навантаження
1	0,69	9	1,29	17	0,78
2	0,72	10	1,13	18	0,83
3	0,77	11	0,98	19	0,89
4	0,85	12	0,92	20	0,92
5	0,96	13	0,86	21	0,90
6	1,15	14	0,80	22	0,85
7	1,30	15	0,75	23	0,80
8	1,33	16	0,75	24	0,69

Розв'язок:

Виділяємо ділянку найбільшого навантаження 5 годин (6-10 інтервали). За інтервалами, що залишилися, розраховуємо початкове навантаження K_1 еквівалентного графіка:

$$K_1 = \frac{1}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \sqrt{\frac{S_1^2 \cdot \Delta t_1 + S_2^2 \cdot \Delta t_2 + \dots + S_m^2 \cdot \Delta t_m}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_m}} = 0,831 \text{ (в.о.)}.$$

Розраховуємо навантаження K'_2 еквівалентного графіка навантаження:

$$K'_2 = \frac{1}{S_{\text{НОМ}}} \cdot \sqrt{\frac{S_1'^2 \cdot \Delta h_1 + S_2'^2 \cdot \Delta h_2 + \dots + S_p'^2 \cdot \Delta h_p}{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_p}} = 1,243 \text{ (в.о.)}.$$

Отримане значення порівнюємо з K_{max} :

$$K_{\text{max}} = \frac{S_{\text{max}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{1,33}{1} = 1,33 \text{ (в.о.)}.$$

$$K'_2 \geq 0,9 \cdot K_{\max} \Rightarrow \begin{cases} K_2 = 1,243 \text{ (в.о.)}, \\ h = h' = 5 \text{ (год.)}. \end{cases}$$

$$1,243 \text{ (в.о.)} \geq 0,9 \cdot 1,33 = 1,197 \text{ (в.о.)}$$

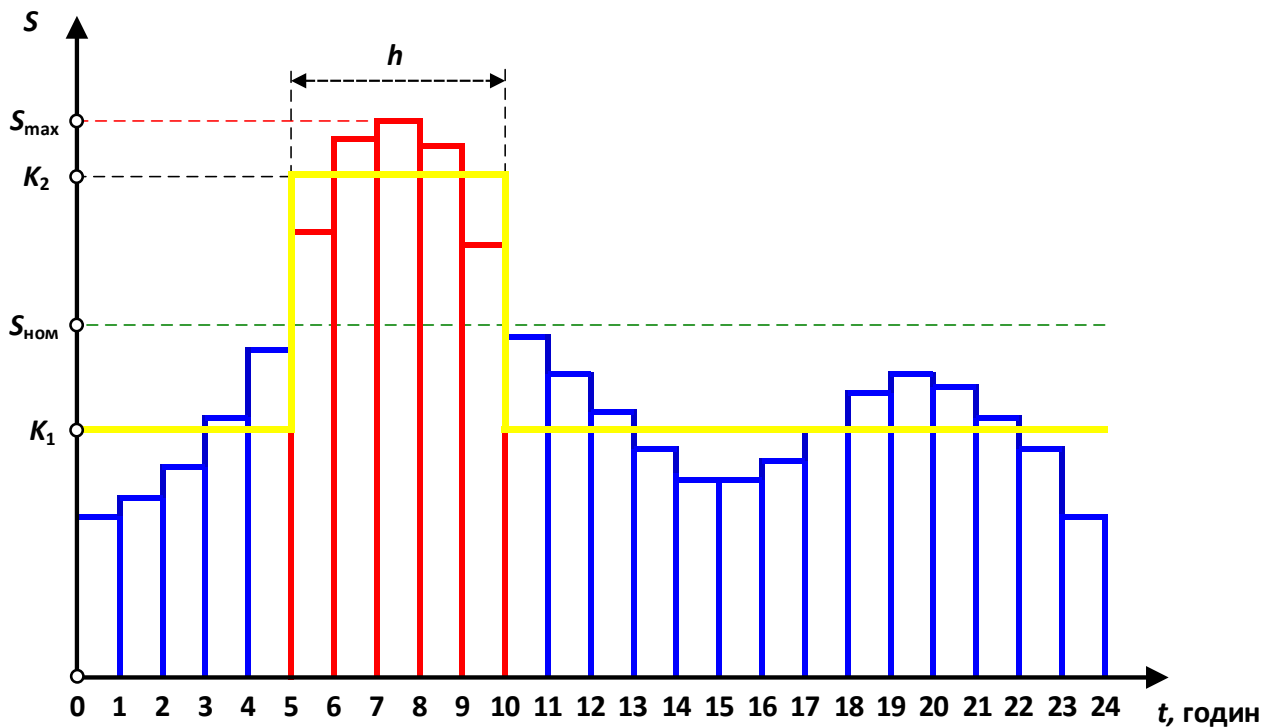


Рисунок 1.2 – Еквівалентний двоступеневий прямокутний графік навантаження трансформатора власних потреб ТРДНС-25000/10

Приклад № 1.2 Визначити сталу часу нагрівання трансформатора, якщо задано:

1. Тип трансформатора: ТРДНС-25000/10.
2. $G_{\text{повн.}} = 41,5 \text{ (т)}$; $G_{\text{м.}} = 8,1 \text{ (т)}$.
3. $P_{\text{к}} = 115 \text{ (кВт)}$; $P_0 = 25 \text{ (кВт)}$.

Розв'язок:

Визначимо теплоємність трансформатора:

$$C = 133 \cdot G_{\text{а.ч.}} + 108 \cdot G_{\text{б.р.}} + 545 \cdot G_{\text{м.}}$$

Наближений розрахунок:

$$G_{\text{а.ч.}} = 0,7 \cdot (G_{\text{повн.}} - G_{\text{м.}}) = 0,7 \cdot (41,5 - 8,1) = 23,38 \text{ (т)},$$

$$G_{\text{б.р.}} = 0,3 \cdot (G_{\text{повн.}} - G_{\text{м.}}) = 0,3 \cdot (41,5 - 8,1) = 10,02 \text{ (т)},$$

$$C = 133 \cdot 23,38 + 108 \cdot 10,02 + 545 \cdot 8,1 = 8606,2 \left(\frac{\text{Вт} \cdot \text{год.}}{\text{град.}} \right).$$

Визначимо сталу часу нагрівання трансформатора:

$$\tau = \frac{C \cdot \Delta\theta_{\text{м.ном}}}{P_0 + P_{\text{к}}} = \frac{8606,2 \cdot 55}{(115 + 25) \cdot 10^3} = 3,381 \text{ (год.)}.$$

Приклад № 1.3 Розрахувати тепловий режим трансформатора власних потреб ТРДНС-25000/10, $\theta_{\text{охл}} = 10 \text{ (}^\circ\text{C)}$.

Розв'язок:

Для системи охолодження Д:

$$\begin{cases} \Delta\theta_{\text{м.ном}} = 55 \text{ }^\circ\text{C та } \theta_{\text{нт.м.ном}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}, \\ x = 0,9 \text{ та } y = 1,6. \end{cases}$$

Побудова графіка $\theta(t)$ проводиться за точками, розрахунок координат яких наведено нижче.

Точка А визначає значення перевищення температури масла над температурою охолоджуючого середовища безпосередньо перед роботою трансформатора з максимальним навантаженням K_1 :

$$d = \frac{P_{\text{к}}}{P_0} = \frac{115}{25} = 4,6,$$

$$\theta_{\text{м.К1}} = \Delta\theta_{\text{м.ном}} \cdot \left(\frac{1 + d \cdot K_1^2}{1 + d} \right)^x = 55 \cdot \left(\frac{1 + 4,6 \cdot (0,831)^2}{1 + 4,6} \right)^{0,9} = 42,24 \text{ (}^\circ\text{C)},$$

$$\theta_{\text{А}} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.К1}} = 52,24 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Точка Б визначає значення перевищення температури масла над температурою охолоджуючого середовища безпосередньо в момент закінчення роботи трансформатора з максимальним навантаженням K_2 :

$$\theta_{\text{м.К2}} = \Delta\theta_{\text{м.ном}} \cdot \left(\frac{1 + d \cdot K_2^2}{1 + d} \right)^x = 55 \cdot \left(\frac{1 + 4,6 \cdot (1,243)^2}{1 + 4,6} \right)^{0,9} = 76,73 \text{ (}^\circ\text{C)},$$

$$\begin{aligned}\theta_B &= \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.К1}} + (\theta_{\text{м.К2}} - \theta_{\text{м.К1}}) \cdot \left(1 - e^{-h/\tau}\right) = \\ &= 10 + 42,24 + (76,73 - 42,24) \cdot \left(1 - e^{-5/3,381}\right) = 78,87(^{\circ}\text{C}).\end{aligned}$$

Оскільки в перехідному тепловому режимі температура нагрівання змінюється за експонентною, то знайдемо її проміжні значення:

$$h = 0,3 \cdot \tau: \theta_{B1} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.К1}} + (\theta_{\text{м.К2}} - \theta_{\text{м.К1}}) \cdot \left(1 - e^{-0,3}\right) = 61,18(^{\circ}\text{C}),$$

$$h = 0,6 \cdot \tau: \theta_{B2} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.К1}} + (\theta_{\text{м.К2}} - \theta_{\text{м.К1}}) \cdot \left(1 - e^{-0,6}\right) = 67,8(^{\circ}\text{C}),$$

$$h = 1,6 \cdot \tau: \theta_{B3} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.К1}} + (\theta_{\text{м.К2}} - \theta_{\text{м.К1}}) \cdot \left(1 - e^{-1,6}\right) = 79,77(^{\circ}\text{C}),$$

$$h = 2,6 \cdot \tau: \theta_{B4} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.К1}} + (\theta_{\text{м.К2}} - \theta_{\text{м.К1}}) \cdot \left(1 - e^{-2,6}\right) = 84,17(^{\circ}\text{C}).$$

Приймаємо стале значення θ через проміжок часу рівний $4 \cdot \tau$. Отримане значення визначає положення точки I:

$$h = 4,0 \cdot \tau: \theta_I = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.К1}} + (\theta_{\text{м.К2}} - \theta_{\text{м.К1}}) \cdot \left(1 - e^{-4,0}\right) = 86,10(^{\circ}\text{C}).$$

Після закінчення проміжку часу h трансформатор знову має навантаження $K_1 < K_2$ тому має перехідний процес зниження температури масла (Б-В):

$$t = 0,3 \cdot \tau: \theta_{B1} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.К1}} + ((\theta_B - \theta_{\text{охл}}) - \theta_{\text{м.К1}}) \cdot \left(e^{-0,3}\right) = 71,97(^{\circ}\text{C}),$$

$$t = 0,6 \cdot \tau: \theta_{B2} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.К1}} + ((\theta_B - \theta_{\text{охл}}) - \theta_{\text{м.К1}}) \cdot \left(e^{-0,6}\right) = 66,86(^{\circ}\text{C}),$$

$$t = 1,6 \cdot \tau: \theta_{B3} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.К1}} + ((\theta_B - \theta_{\text{охл}}) - \theta_{\text{м.К1}}) \cdot \left(e^{-1,6}\right) = 57,62(^{\circ}\text{C}),$$

$$t = 2,6 \cdot \tau: \theta_{B4} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.К1}} + ((\theta_B - \theta_{\text{охл}}) - \theta_{\text{м.К1}}) \cdot \left(e^{-2,6}\right) = 54,22(^{\circ}\text{C}),$$

$$t = 4,0 \cdot \tau: \theta_B = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{м.К1}} + ((\theta_B - \theta_{\text{охл}}) - \theta_{\text{м.К1}}) \cdot \left(e^{-4,0}\right) = 52,73(^{\circ}\text{C}).$$

У разі, якщо точки В, В₁, В₂ та інші опиняться поза графіком навантаження, тобто, за межами $T = 24$ години, їх слід перенести в початкову

частину графіка, що передує максимуму навантаження, враховуючи, що після 24 годин відлік часу починається з 0 годин.

Зміна температури обмотки на ділянці початкового навантаження описується кривою яка повторює закон зміни температури масла з урахуванням перевищення температури $\theta_{\text{ННТ.М.К1}}$:

$$\theta_{\text{ННТ.М.К1}} = \theta_{\text{ННТ.М.НОМ}} \cdot K_1^y = 23 \cdot 0,831^{1,6} = 17,1 (\text{°C}),$$

$$\theta_{\Gamma} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{М.К1}} + \theta_{\text{ННТ.М.К1}} = 69,34 (\text{°C}).$$

Положення точки Д:

$$\theta_{\text{ННТ.М.К2}} = \theta_{\text{ННТ.М.НОМ}} \cdot K_2^y = 23 \cdot 1,243^{1,6} = 32,57 (\text{°C}),$$

$$\theta_{\text{Д}} = \theta_{\text{охл}} + \theta_{\text{М.К1}} + \theta_{\text{ННТ.М.К2}} = 84,82 (\text{°C}).$$

Зміна температури обмотки у період максимального навантаження h описується кривою Д-Е, яка повторює криву А-Б, але з урахуванням перевищення $\theta_{\text{ННТ.М.К2}}$:

$$h = 0,3 \cdot \tau: \theta_{\text{Е1}} = \theta_{\text{Б1}} + \theta_{\text{ННТ.М.К2}} = 93,76 (\text{°C}),$$

$$h = 0,6 \cdot \tau: \theta_{\text{Е2}} = \theta_{\text{Б2}} + \theta_{\text{ННТ.М.К2}} = 100,38 (\text{°C}),$$

$$h = 1,6 \cdot \tau: \theta_{\text{Е3}} = \theta_{\text{Б3}} + \theta_{\text{ННТ.М.К2}} = 112,34 (\text{°C}),$$

$$h = 2,6 \cdot \tau: \theta_{\text{Е4}} = \theta_{\text{Б4}} + \theta_{\text{ННТ.М.К2}} = 116,75 (\text{°C}),$$

$$h = 4,0 \cdot \tau: \theta_{\text{К}} = \theta_{\Gamma} + \theta_{\text{ННТ.М.К2}} = 118,68 (\text{°C}).$$

Положення точки Е визначається значенням температури:

$$\theta_{\text{Е}} = \theta_{\text{Б}} + \theta_{\text{ННТ.М.К2}} = 111,45 (\text{°C}).$$

Положення точки Ж визначається значенням температури:

$$\theta_{\text{Ж}} = \theta_{\text{Б}} + \theta_{\text{ННТ.М.К1}} = 95,98 (\text{°C}).$$

Крива Ж-З повторює криву зміни температури масла Б-В під час роботи трансформатора з навантаженням K_1 після перевантаження з урахуванням перевищення температури $\theta_{\text{ННТ.М.К1}}$:

E_1-E_2	97,066	1,014	0,0379
E_2-E	105,912	2,971	0,3088
$Ж-З_1$	92,524	1,014	0,0224
$З_1-З_2$	86,517	1,014	0,0112
$З_2-З_3$	79,341	3,382	0,0163
$З_3-З_4$	73,022	3,382	0,0079
$З-З_4$	70,577	4,733	0,0083

1.4 Задачі для самостійного розв'язання

Задача № 1.1 Перетворити заданий графік навантаження трансформатора власних потреб в двоступеневий прямокутний графік навантаження. Визначити сталу часу нагрівання. Розрахувати тепловий режим. Розрахувати відносний знос ізоляції.

Задано: тип трансформатора – ТРДНС-25000/10; $\theta_{\text{охл}} = 0$ (°C).

Години	Навантаження	Години	Навантаження	Години	Навантаження
1	0,88	9	0,95	17	0,92
2	0,94	10	0,94	18	0,96
3	1,01	11	0,81	19	0,98
4	1,17	12	0,80	20	0,96
5	1,27	13	0,82	21	0,93
6	1,44	14	0,88	22	0,91
7	1,46	15	0,94	23	0,88
8	0,99	16	0,91	24	0,92

Задача № 1.2 Перетворити заданий графік навантаження трансформатора власних потреб в двоступеневий прямокутний графік навантаження. Визначити сталу часу нагрівання. Розрахувати тепловий режим. Розрахувати відносний знос ізоляції.

Задано: тип трансформатора – ТРДНС-32000/15; $\theta_{\text{охл}} = 10$ (°C).

Години	Навантаження	Години	Навантаження	Години	Навантаження
--------	--------------	--------	--------------	--------	--------------

1	0,81	9	0,75	17	0,85
2	0,90	10	0,98	18	0,88
3	0,94	11	1,27	19	0,85
4	0,95	12	1,31	20	0,82
5	0,92	13	1,25	21	0,80
6	0,85	14	1,10	22	0,80
7	0,72	15	1,00	23	0,79
8	0,69	16	0,85	24	0,75

Задача № 1.3 Перетворити заданий графік навантаження трансформатора власних потреб в двоступеневий прямокутний графік навантаження. Визначити сталу часу нагрівання. Розрахувати тепловий режим. Розрахувати відносний знос ізоляції.

Задано: тип трансформатора – ТРДНС-40000/20; $\theta_{\text{охл}} = 20$ (°C).

Години	Навантаження	Години	Навантаження	Години	Навантаження
1	0,83	9	0,95	17	0,88
2	0,85	10	1,11	18	0,84
3	0,89	11	1,21	19	0,82
4	0,91	12	1,26	20	0,82
5	0,96	13	1,33	21	0,96
6	0,98	14	1,32	22	0,94
7	0,95	15	0,97	23	0,91
8	0,90	16	0,95	24	0,80

Задача № 1.4 Перетворити заданий графік навантаження трансформатора власних потреб в двоступеневий прямокутний графік навантаження. Визначити сталу часу нагрівання. Розрахувати тепловий режим. Розрахувати відносний знос ізоляції.

Задано: тип трансформатора – ТРДНС-25000/10; $\theta_{\text{охл}} = 0$ (°C).

Години	Навантаження	Години	Навантаження	Години	Навантаження
--------	--------------	--------	--------------	--------	--------------

1	0,86	9	0,86	17	0,85
2	0,89	10	1,11	18	0,87
3	0,90	11	1,21	19	0,93
4	0,93	12	1,27	20	0,91
5	0,96	13	1,37	21	0,87
6	0,95	14	1,29	22	0,85
7	0,94	15	0,94	23	0,84
8	0,90	16	0,84	24	0,83

Задача № 1.5 Перетворити заданий графік навантаження трансформатора власних потреб в двоступеневий прямокутний графік навантаження. Визначити сталу часу нагрівання. Розрахувати тепловий режим. Розрахувати відносний знос ізоляції.

Задано: тип трансформатора – ТРДНС-32000/15; $\theta_{\text{охл}} = 10(^{\circ}\text{C})$.

Години	Навантаження	Години	Навантаження	Години	Навантаження
1	0,63	9	1,30	17	0,95
2	0,75	10	1,35	18	0,90
3	0,83	11	1,27	19	0,85
4	0,77	12	1,03	20	0,73
5	0,70	13	0,84	21	0,67
6	0,71	14	0,86	22	0,62
7	0,85	15	0,90	23	0,59
8	1,24	16	0,96	24	0,58

Задача № 1.6 Перетворити заданий графік навантаження трансформатора власних потреб в двоступеневий прямокутний графік навантаження. Визначити сталу часу нагрівання. Розрахувати тепловий режим. Розрахувати відносний знос ізоляції.

Задано: тип трансформатора – ТРДНС-40000/20; $\theta_{\text{охл}} = 20(^{\circ}\text{C})$.

Години	Навантаження	Години	Навантаження	Години	Навантаження
--------	--------------	--------	--------------	--------	--------------

1	0,65	9	0,74	17	1,29
2	0,66	10	0,68	18	1,23
3	0,70	11	0,67	19	1,00
4	0,80	12	0,70	20	0,71
5	0,89	13	0,75	21	0,70
6	0,91	14	0,83	22	0,70
7	0,89	15	1,21	23	0,67
8	0,83	16	1,31	24	0,63

Задача № 1.7 Перетворити заданий графік навантаження трансформатора власних потреб в двоступеневий прямокутний графік навантаження. Визначити сталу часу нагрівання. Розрахувати тепловий режим. Розрахувати відносний знос ізоляції.

Задано: тип трансформатора – ТРДНС-25000/10; $\theta_{\text{охл}} = 0$ (°C).

Години	Навантаження	Години	Навантаження	Години	Навантаження
1	0,87	9	0,96	17	0,82
2	0,90	10	1,14	18	0,82
3	0,91	11	1,18	19	0,82
4	0,94	12	1,22	20	0,80
5	0,97	13	1,16	21	0,80
6	0,96	14	1,04	22	0,78
7	0,95	15	0,95	23	0,77
8	0,91	16	0,88	24	0,82

Задача № 1.8 Перетворити заданий графік навантаження трансформатора власних потреб в двоступеневий прямокутний графік навантаження. Визначити сталу часу нагрівання. Розрахувати тепловий режим. Розрахувати відносний знос ізоляції.

Задано: тип трансформатора – ТРДНС-32000/15; $\theta_{\text{охл}} = 10$ (°C).

Години	Навантаження	Години	Навантаження	Години	Навантаження
--------	--------------	--------	--------------	--------	--------------

1	0,69	9	0,73	17	0,93
2	0,65	10	0,87	18	0,82
3	0,62	11	0,89	19	0,79
4	0,65	12	1,16	20	0,74
5	0,65	13	1,18	21	0,74
6	0,65	14	1,17	22	0,74
7	0,64	15	1,14	23	0,75
8	0,67	16	1,08	24	0,75

Задача № 1.9 Перетворити заданий графік навантаження трансформатора власних потреб в двоступеневий прямокутний графік навантаження. Визначити сталу часу нагрівання. Розрахувати тепловий режим. Розрахувати відносний знос ізоляції.

Задано: тип трансформатора – ТРДНС-40000/20; $\theta_{\text{охл}} = 20$ (°C).

Години	Навантаження	Години	Навантаження	Години	Навантаження
1	0,90	9	0,86	17	0,80
2	0,85	10	0,80	18	0,75
3	0,95	11	0,75	19	0,75
4	1,15	12	0,75	20	0,78
5	1,27	13	0,78	21	0,69
6	1,37	14	0,79	22	0,72
7	1,29	15	0,74	23	0,80
8	1,13	16	0,86	24	0,75

Задача № 1.10 Перетворити заданий графік навантаження трансформатора власних потреб в двоступеневий прямокутний графік навантаження. Визначити сталу часу нагрівання. Розрахувати тепловий режим. Розрахувати відносний знос ізоляції.

Задано: тип трансформатора – ТРДНС-25000/10; $\theta_{\text{охл}} = 0$ (°C).

Години	Навантаження	Години	Навантаження	Години	Навантаження
--------	--------------	--------	--------------	--------	--------------

1	0,73	9	1,35	17	0,82
2	0,75	10	1,31	18	0,87
3	0,73	11	1,13	19	0,92
4	0,73	12	0,97	20	0,92
5	0,76	13	0,76	21	0,83
6	0,82	14	0,69	22	0,69
7	1,03	15	0,69	23	0,64
8	1,24	16	0,72	24	0,72

Задача № 1.11 Перетворити заданий графік навантаження трансформатора власних потреб в двоступеневий прямокутний графік навантаження. Визначити сталу часу нагрівання. Розрахувати тепловий режим. Розрахувати відносний знос ізоляції.

Задано: тип трансформатора – ТРДНС-32000/15; $\theta_{\text{охл}} = 10(^{\circ}\text{C})$.

Години	Навантаження	Години	Навантаження	Години	Навантаження
1	0,83	9	0,75	17	1,07
2	0,85	10	0,98	18	1,03
3	0,89	11	0,96	19	1,04
4	0,91	12	0,93	20	1,01
5	0,96	13	0,64	21	0,96
6	0,93	14	0,67	22	0,94
7	0,67	15	0,73	23	0,91
8	0,70	16	1,13	24	0,80

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2

«ВИЗНАЧЕННЯ ЗРІВНЮВАЛЬНИХ СТРУМІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПРИ ВКЛЮЧЕННІ НА ПАРАЛЕЛЬНУ РОБОТУ»

2.1 Мета та зміст заняття

Мета: Формування навичок та умінь аналізу включення силових трансформаторів на паралельну роботу.

Навчальні запитання:

1. Умови включення силового трансформатора на паралельну роботу.
2. Алгоритм розрахунку зрівнювальних струмів трансформаторів при включенні на паралельну роботу.
3. Аналіз векторних діаграм при включенні трансформаторів з різними параметрами на паралельну роботу.
4. **Задача** – Визначення зрівнювальних струмів трансформаторів при включенні на паралельну роботу.

2.2 Короткі теоретичні відомості

2.2.1 Паралельна робота трансформаторів

Під паралельною роботою двообмоткових трансформаторів розуміється робота декількох трансформаторів при паралельному з'єднанні як первинних, так і вторинних обмоток. Паралельна робота має ряд технічних й економічних переваг [1, 3]:

а) надійність постачання споживачів електроенергією, тому що вихід з ладу одного із трансформаторів не позбавляє споживачів енергії. Навантаження трансформатора, що вибув може бути тимчасово прийнятий повністю або частково іншим трансформатором який залишився в роботі.

б) у періоди зниження навантажень частина трансформаторів може бути відключена, що забезпечить більш економічний режим роботи за рахунок зменшення втрат холостого ходу.

Для досягнення найкращих умов паралельної роботи трансформаторів необхідно, щоб загальне навантаження розподілялося між паралельно працюючими трансформаторами пропорційно їх номінальним потужностям. Цей розподіл досягається при умовах коли паралельно працюють трансформатори мають [1, 4, 7]:

1. Групи з'єднання обмоток трансформаторів мають бути однакові.

2. Рівні первинні й вторинні номінальні напруги або коефіцієнти трансформації.

$$\left. \begin{array}{l} U_{11} = U_{12} = U_{13} = \dots = U_{1n} \\ U_{21} = U_{22} = U_{23} = \dots = U_{2n} \end{array} \right\} \Rightarrow k_1 = k_2 = \dots = k_n.$$

3. Рівні напруги короткого замикання. Активні та індуктивні складові u_k всіх трансформаторів повинні бути рівні.

$$\left. \begin{array}{l} u_{ka1} = u_{ka2} = \dots = u_{kan} \\ u_{kp1} = u_{kp2} = \dots = u_{kpn} \end{array} \right\} \Rightarrow u_{k1} = u_{k2} = \dots = u_{kn}.$$

Якщо трансформатори всім поставленим вище умовам відповідають, то векторні діаграми роботи трансформатора під навантаженням у відносних одиницях збігаються. Паралельна робота трансформаторів з відношенням номінальних потужностей більше 3-х не рекомендується.

Включення трансформатора на паралельну роботу припустимо тільки після фазування.

У випадку, якщо перераховані умови не дотримуються при паралельній роботі трансформаторів навіть на холостому ході в замкнутих контурах обмоток ВН і НН протікають зрівняльні струми, які обумовлені різницею напруг, що з'являється і величинами повних опорів. Найнебезпечніший випадок є недотримання тотожності груп з'єднання обмоток.

Формула для визначення зрівняльного струму між двома трансформаторами має вигляд

$$\vec{I}_{зр} = \frac{\vec{E}_{21} - \vec{E}_{22}}{\underline{Z}_{к1} + \underline{Z}_{к2}},$$

де \vec{E}_{21} , \vec{E}_{22} – вектори вторинних фазних ЕРС трансформаторів, В; Z_{k1} , Z_{k2} – комплексні опори короткого замикання трансформаторів, Ом.

2.2.2 Паралельна робота трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації

Якщо умова рівності коефіцієнтів трансформації не виконується у їх вторинних обмотках виникне зрівняльний струм, який перевантажить трансформатор з меншим значенням k_T .

Паралельна робота з різними коефіцієнтами трансформації допускається у випадках: якщо $\Delta k_T = \pm 1,0\%$ для трансформаторів з $k_T \leq 3$; якщо $\Delta k_T = \pm 0,5\%$ для всіх інших трансформаторів (Δk_T – відносна різниця коефіцієнтів трансформації трансформаторів).

$$\Delta k_{T\%} = \frac{k_{T1} - k_{T2}}{k_T} \cdot 100\%,$$

де $k_T = \sqrt{k_{T1} \cdot k_{T2}}$ – середньгеометричне значення коефіцієнтів трансформації.

Величину зрівняльного струму при різних k_T визначають так

$$I_{зр} = \frac{\Delta U_2 \cdot I_{21ном}}{u_{k1} + \frac{u_{k2}}{\beta}},$$

де u_{k1} , u_{k2} – напруга короткого замикання, відповідно, 1-го та 2-го трансформаторів, %; ΔU_2 – різниця вторинних рівнів напруги,

%: $\Delta U_2 = \frac{U_{21} - U_{22}}{U_{2ном}} \cdot 100\%$; $\beta = \frac{I_{22ном}}{I_{21ном}}$ – відношення номінального струму 2-го

(більшого за потужністю) трансформатора до номінального струму 1-го меншого за потужністю трансформатора.

2.2.3 Паралельна робота трансформаторів з різними напругами короткого замикання

При паралельній роботі трансформаторів з різними напругами короткого замикання u_k , трансформатор з меншим значенням u_k буде перевантаженим.

Допускається паралельна робота трансформаторів з різними u_k , якщо

$$\Delta u_k = \frac{u_{k1} - u_{k2}}{u_{k.ср}} \cdot 100 \% \leq \pm 10 \%,$$

де $u_{k.ср}$ – середньоарифметичне значення: $u_{k.ср} = 0,5 \cdot (u_{k1} + u_{k2})$.

При паралельній роботі групи із n трансформаторів навантаження i -го трансформатора складе

$$S_i = \frac{S}{\sum \frac{S_{НОМ}}{u_k}} \cdot \frac{S_{НОМi}}{u_{ki}},$$

де S_i – навантаження i -го трансформатора, кВ·А; S – загальне навантаження всіх паралельно працюючих трансформаторів, кВ·А; u_{ki} – напруга КЗ i -го трансформатора, %; $S_{НОМi}$ – номінальна потужність i -го трансформатора, кВ·А.

$$\sum \frac{S_{НОМ}}{u_k} = \frac{S_{НОМ1}}{u_{k1}} + \frac{S_{НОМ2}}{u_{k1}} + \dots + \frac{S_{НОМn}}{u_{kn}}.$$

2.2.4 Паралельна робота трансформаторів з різними групами з'єднання обмоток

Якщо трансформатори мають різні групи з'єднання обмоток, то паралельна робота їх неможлива: між обмотками трансформаторів виникає різниця потенціалів, що викликає значні зрівняльні струми ще у режимі холостого ходу

$$I_{зр} = \frac{200 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\frac{u_{k1}}{I_{1НОМ}} + \frac{u_{k2}}{I_{2НОМ}}},$$

де α – кут між векторами вторинних лінійних напруг (ЕРС); $I_{1НОМ}$ та $I_{2НОМ}$ – номінальні струми трансформаторів, А.

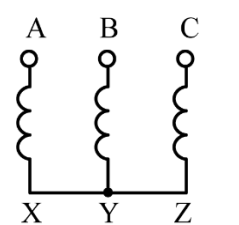
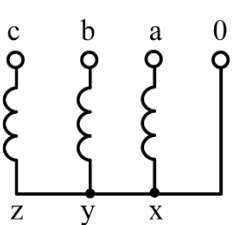
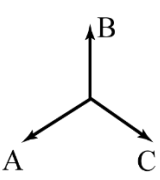
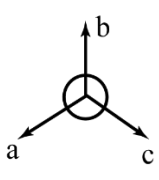
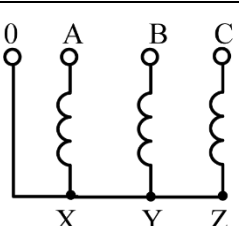
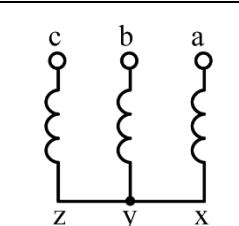
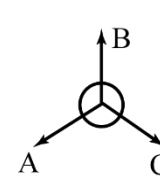
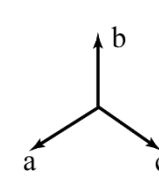
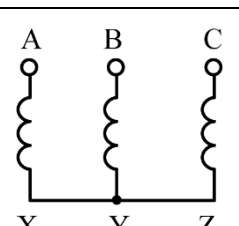
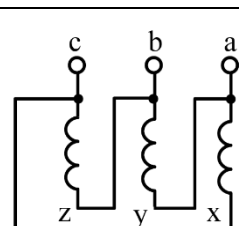
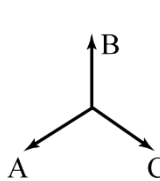
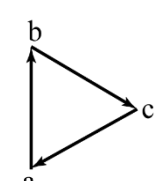
2.2.5 Схеми та групи з'єднання обмоток

Група трансформаторів визначається значенням кута (зсувом фаз) між векторами лінійних напруг обмоток вищої і нижчої напруг. Різні групи зумовлюються різними комбінаціями схем з'єднання обмоток і об'єднанням в одну точку їхніх початків або кінців [1, 3, 4].

Обмотки трифазних трансформаторів здебільшого з'єднуються в зірку Y зірку з виведеною нейтраллю (Y_0) або в трикутник (Δ). У трифазних трансформаторах різними з'єднаннями обмоток можна одержати дванадцять різних груп з кратністю зсуву векторів лінійних напруг 30° . Позначають групи цифрами від 0 до 11.

Найпоширеніші нульова і 11-та групи. За схем з'єднання обмоток Y/Y , Δ/Δ можна одержати будь яку парну групу а за Y/Δ або Δ/Y непарну. Найпоширеніші групи з'єднань обмоток трансформаторів наведено в табл. 2.1-2.7.

Таблиця 2.1 – Схеми з'єднання обмоток трифазних двообмоткових трансформаторів

Схема з'єднання обмоток		Діаграма векторів напруги холостого ходу		Умовне позначення
ВН	НН	ВН	НН	
				Y/Y_n-0
				Y_n/Y-0
				Y/Δ-11

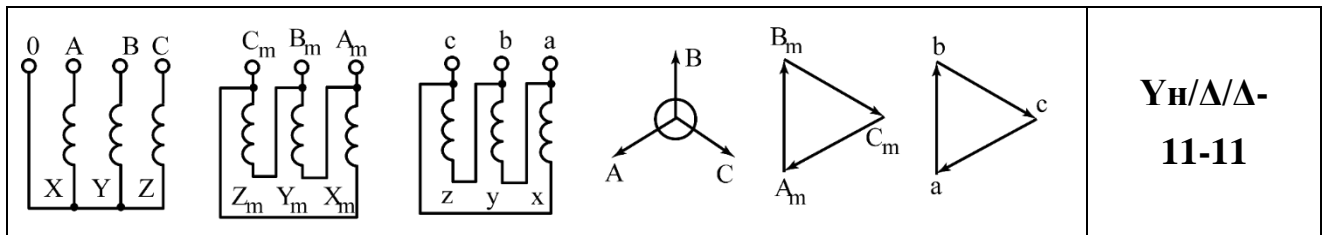
		Yн/Δ-11
		Δ/Yн-1
		Δ/Δ-0

Таблиця 2.2 – Схеми з'єднання обмоток однофазних двообмоткових трансформаторів

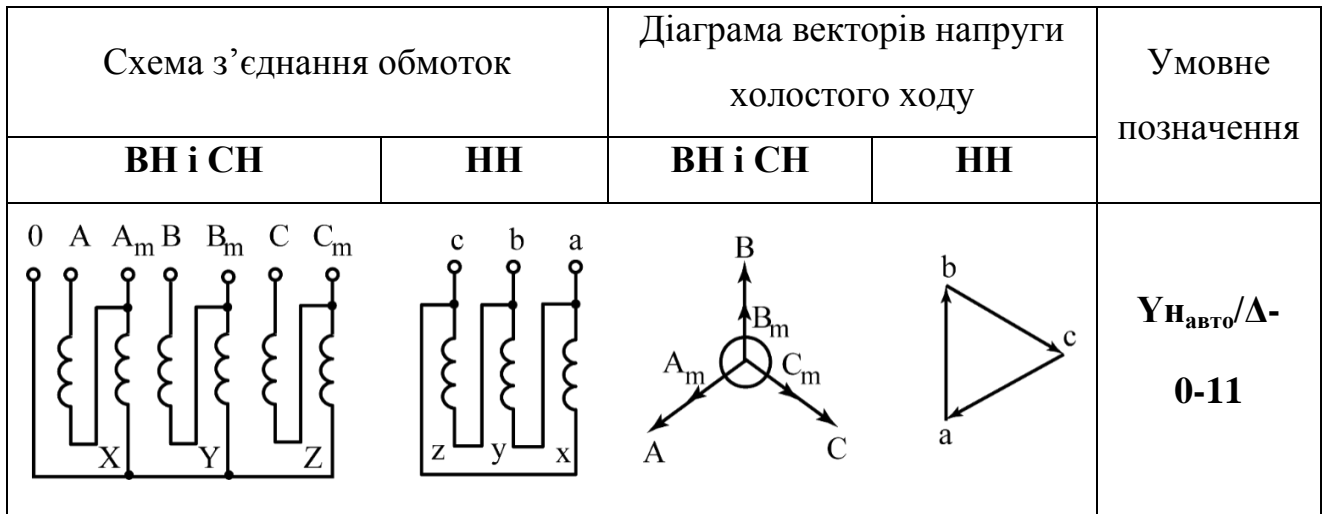
Схема з'єднання обмоток		Діаграма векторів напруги холостого ходу		Умовне позначення
ВН	НН	ВН	НН	
				1/1-0

Таблиця 2.3 – Схема з'єднання обмоток трифазних триобмоткових трансформаторів

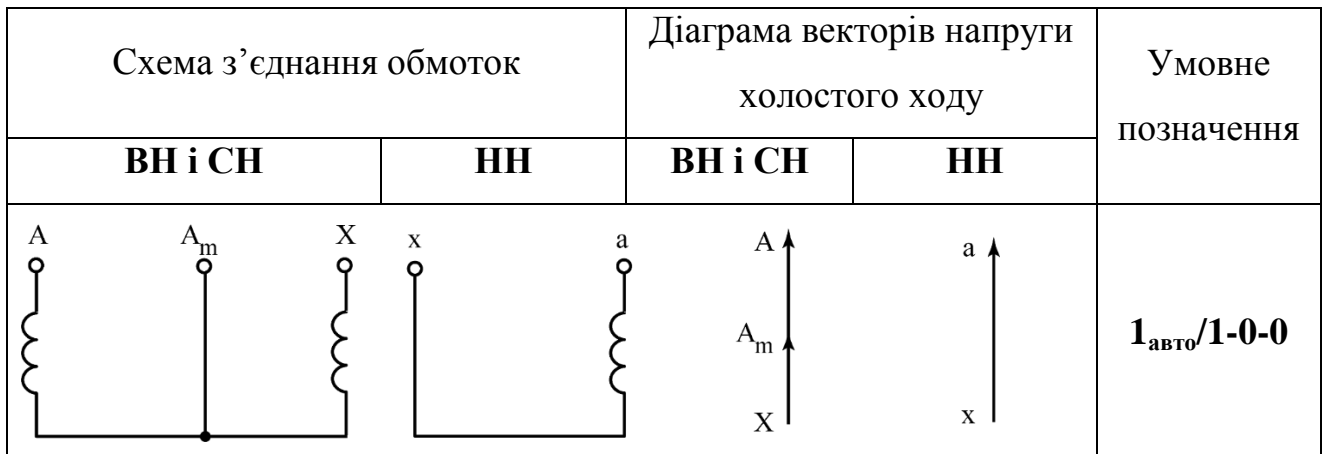
Схема з'єднання обмоток			Діаграма векторів напруги холостого ходу			Умовне позначення
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
						Yн/Yн/Δ-0-11



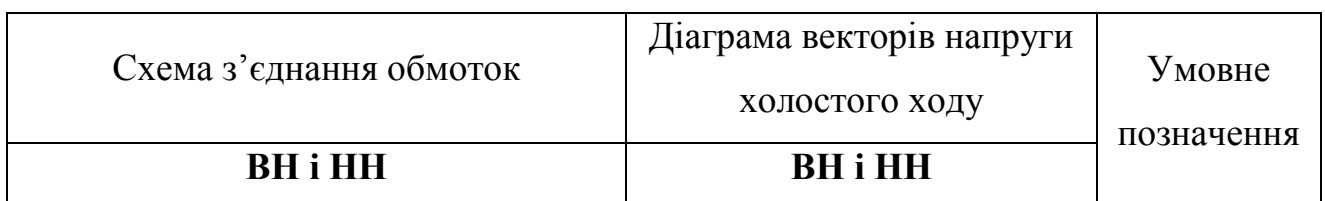
Таблиця 2.4 – Схема з'єднання обмоток трифазних триобмоткових автотрансформаторів

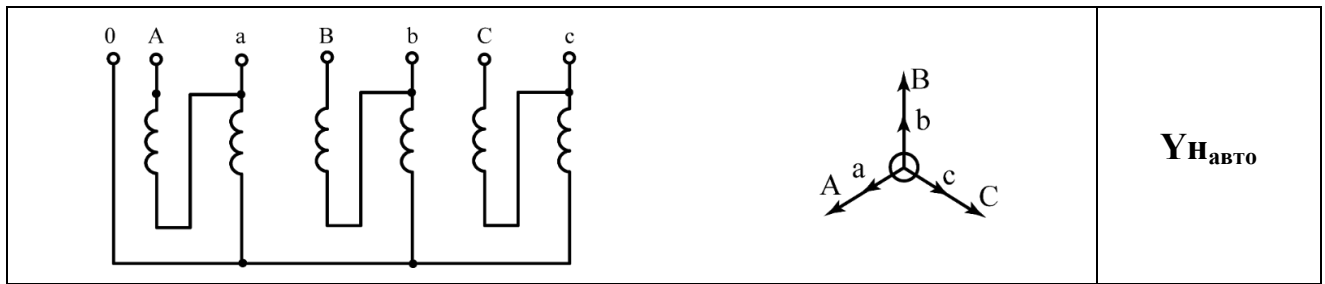


Таблиця 2.5 – Схема з'єднання обмоток однофазних триобмоткових автотрансформаторів



Таблиця 2.6 – Схеми з'єднання обмоток трифазних двообмоткових автотрансформаторів



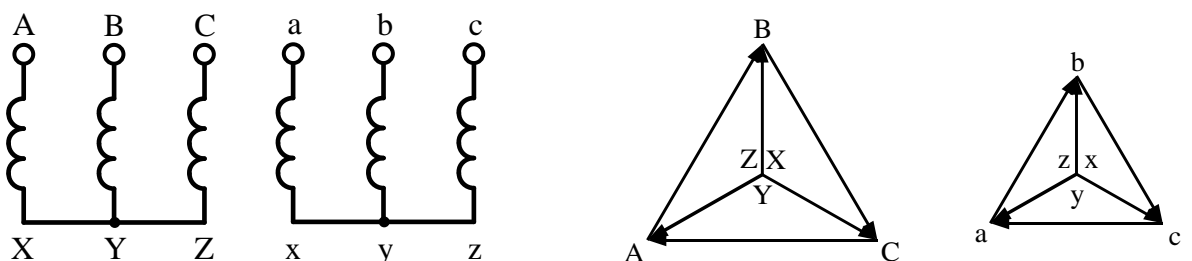


Таблиця 2.7 – Схеми з'єднання обмоток однофазних двообмоткових трансформаторів з розщепленою обмоткою НН

Схема з'єднання обмоток		Діаграма векторів напруги холостого ходу		Умовне позначення
ВН	НН	ВН	НН	
				1/1-1-0-0

Групу трансформатора визначають за аналогією із циферблатом годинника вектор напруги обмотки ВН виконує роль хвилиної стрілки й суміщається із цифрою 12 при цьому вектор напруги обмотки НН, виконуючи роль годинникової стрілки, вкаже номер групи трансформатора.

Коли первинна і вторинна обмотки з'єднані зіркою (рис. 2.1), намотані в одному й тому ж напрямі і мають однакові полярності, то зірки і трикутники вторинних і первинних фазних і лінійних напруг збігаються за фазою. Кут зсуву вторинної лінійної напруги відносно первинної дорівнює нулю, у цьому випадку маємо нульову групу.



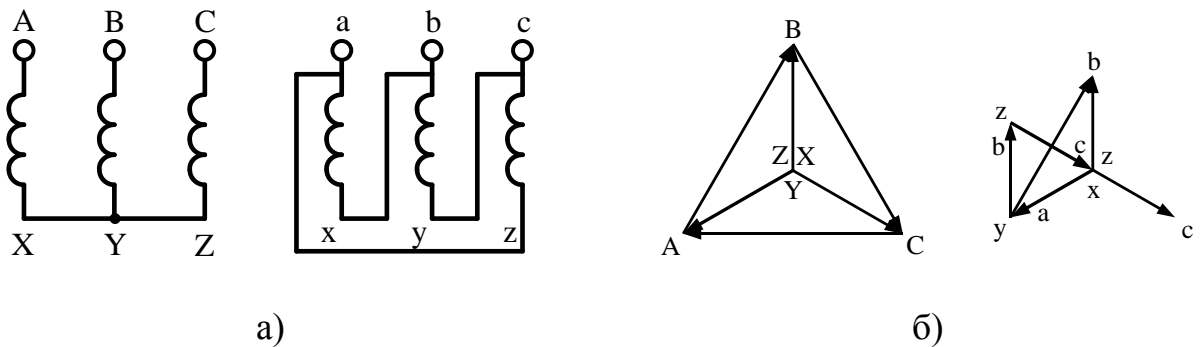
а)

б)

Рисунок 2.1 – Діаграми лінійних напруг за групи з'єднань обмоток Y/Y-0:

а – схема з'єднань обмоток; б – векторна діаграма напруг

Якщо первинна обмотка з'єднана зіркою, а вторинна – трикутником (рис. 2.2) і вони намотані в один бік і мають однакову полярність, то вектори фазних напруг збігаються, а трикутники вторинних і первинних лінійних напруг зсунуті один відносно одного на кут 330° . Це відповідає одинадцятій групі з'єднань обмоток Y/ Δ -11.



а)

б)

Рисунок 2.2 – Діаграми лінійних напруг за групи з'єднань обмоток Y/ Δ -11:

а – схема з'єднань обмоток; б – векторна діаграма напруг

2.3 Приклади типових задач

Приклад № 2.1 Два трансформатори зв'язку шин генераторного РП ТЕЦ вмикаються на паралельну роботу. Раптово спрацював захист. Визначити причину спрацювання захисту, якщо при перевірці виявилось, що трансформатори мають однакові коефіцієнти трансформації $k_{T1} = k_{T2}$, номінальні повні потужності $S_{\text{НОМ}1} = S_{\text{НОМ}2}$, рівні напруги короткого замикання $u_{k1\%} = u_{k2\%} = 5,5\%$, амперметр зареєстрував значення струму, що перевищує номінальний струм $4,7 \cdot I_{\text{НОМ}}$.

Розв'язок:

Спрацювання захисту спричинило перевищення струмом уставки спрацювання. Тому заданих умовах задачі необхідно перевірити групу з'єднань обмоток. Скористаємося формулою для визначення величини зрівнювального струму в обмотках трансформатора:

$$I_{зр} = \frac{200 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\frac{u_{k1\%}}{I_{1НОМ}} + \frac{u_{k2\%}}{I_{2НОМ}}}$$

Якщо $S_{НОМ1} = S_{НОМ2}$ та $u_{k1\%} = u_{k2\%}$ то $I_{зр}$ в долях від $I_{НОМ}$:

$$\frac{I_{зр}}{I_{НОМ}} = \frac{200 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2 \cdot u_{k\%}}$$

Визначимо групу з'єднань обмоток трансформаторів обчисливши значення кута α , виразивши з формули

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{2 \cdot I_{зр} \cdot u_{k\%}}{200 \cdot I_{НОМ}}\right) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{2 \cdot 4,7 \cdot 5,5}{200}\right) = 30^\circ.$$

Такий кут зсуву в 30° характерний для груп з'єднань обмоток Y/Y-0 та Y/ Δ -11, тобто не була виконана умова, що групи з'єднань обмоток трансформатора мають бути однакові.

Висновок. Паралельна робота трансформаторів при зазначених умовах не можлива, необхідно виконати перемаркування фаз для досягнення однакових груп з'єднань обмоток трансформаторів.

Приклад № 2.2 Визначити в процентах від номінального величину зрівнювального струму $I_{зр}$, що проходить в обмотках трансформаторів зв'язку, які включаються на паралельну роботу. Трансформатори мають однакові групи, однакові номінальні потужності $S_{НОМ1} = S_{НОМ2}$ і однакові напруги короткого замикання $u_{k1\%} = u_{k2\%} = 10,5\%$. Різниця коефіцієнтів трансформації $\Delta k_{Т\%}$ в процентному відношенні від їх середнього значення складає 4%.

Розв'язок:

Величина зрівнювального струму $I_{зр}$ при включенні на паралельну роботу трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації визначається за формулою

$$I_{зр} = \frac{\Delta k_{Т\%}}{u_{k1\%} + u_{k2\%} \cdot \frac{S_{НОМ1}}{S_{НОМ2}}} \cdot I_{1НОМ} \cdot 100\% = \frac{\Delta k_{Т\%}}{u_{k1\%} \cdot \frac{S_{НОМ2}}{S_{НОМ1}} + u_{k2\%}} \cdot I_{2НОМ} \cdot 100\%.$$

За умовою задачі $\Delta k_{Т\%} = 4(\%)$, $u_{k1\%} = u_{k2\%} = 10,5\%$. Тоді зрівнювальний струм в долях від номінального дорівнює

$$I_{зр} = \frac{4}{10,5 + 10,5 \cdot 1} \cdot 1 \cdot 100\% = 19,4(\%).$$

Висновок. При включенні на паралельну роботу при неробочому ході по обмотках трансформаторів зв'язку протікає зрівнювальний струм, що становить 19,04 % від номінального струму трансформатора.

Приклад № 2.3 Трансформатори ТЕЦ з однаковими коефіцієнтами трансформації ($k_{Т1} = k_{Т2}$), потужностями ($S_{НОМ1} = S_{НОМ2}$) і напругами короткого замикання ($u_{k1\%} = u_{k2\%} = 5,5\%$) включаються на паралельну роботу і мають відповідно такі групи з'єднання обмоток: Y/Y-0, Y/Δ-11. Визначити у скільки разів зрівнювальний струм $I_{зр}$ в обмотках трансформаторів в режимі неробочого ходу перевищує номінальний.

Розв'язок:

Величина зрівнювального струму $I_{зр}$ в обмотках трансформаторів, які відрізняються групами з'єднання обмоток визначається

$$I_{зр} = \frac{200 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\frac{u_{k1\%}}{I_{1НОМ}} + \frac{u_{k2\%}}{I_{2НОМ}}}.$$

Якщо $S_{НОМ1} = S_{НОМ2}$ та $u_{k1\%} = u_{k2\%}$ то $I_{зр}$ в долях від $I_{НОМ}$:

$$\frac{I_{зр}}{I_{НОМ}} = \frac{200 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2 \cdot u_{k\%}}.$$

За умовою задачі $u_{k1\%} = u_{k2\%} = 5,5\%$, $\alpha = 30^\circ$.

Тоді зрівнювальний струм в долях від номінального дорівнює

$$\frac{I_{зр}}{I_{ном}} = \frac{200 \cdot \sin\left(\frac{30}{2}\right)}{2 \cdot 5,5} = 4,7 \text{ (раз.)}.$$

Висновок. Зрівнювальний струм у 4,7 рази перевищує значення номінального струму трансформатора при включенні на паралельну роботу в режимі неробочого ходу трансформаторів з групами з'єднання обмоток Y/Y-0 та Y/Δ-11.

Приклад № 2.4 Визначте величину зрівнювального струму в долях від номінального при включенні після капітального ремонту на паралельну роботу двох трансформаторів ТЕЦ з однаковими потужностями ($S_{ном1} = S_{ном2}$), коефіцієнтами трансформації ($k_{т1} = k_{т2}$) і напругами короткого замикання ($u_{k1\%} = u_{k2\%} = 5,0\%$), але з різними групами з'єднання обмоток. Один трансформатор має групу з'єднання Y/Y₀-0, а другий: Y/Y-6.

Розв'язок:

Величина зрівнювального струму $I_{зр}$ в долях від номінального при включенні трансформаторів на паралельну роботу, які мають не однакові групи з'єднання обмоток визначається

$$\frac{I_{зр}}{I_{ном}} = \frac{200 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2 \cdot u_{k\%}}.$$

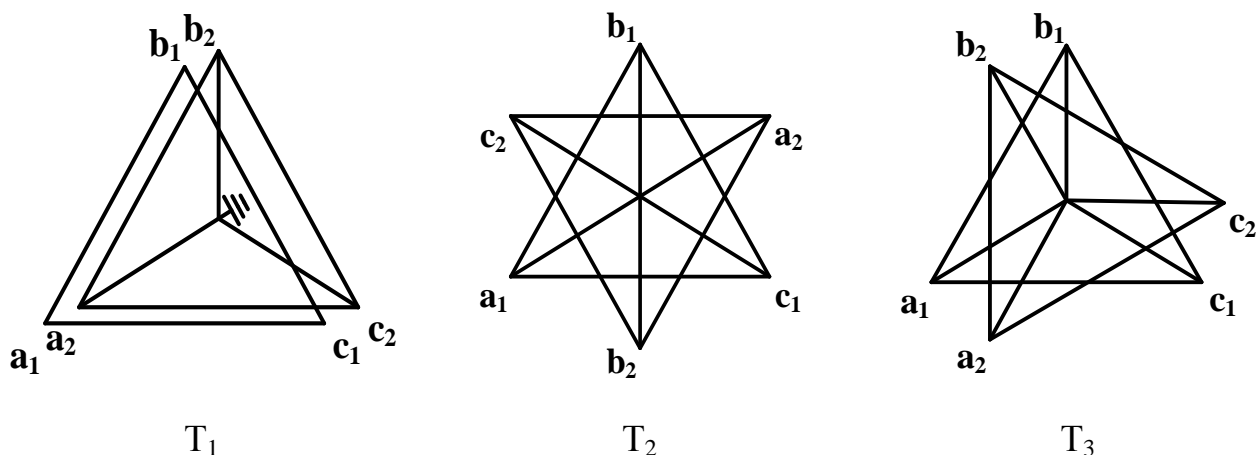
За умовою задачі $u_{k1\%} = u_{k2\%} = 5,0\%$, $\alpha = 180^\circ$.

Тоді зрівнювальний струм в долях від номінального дорівнює

$$\frac{I_{зр}}{I_{ном}} = \frac{200 \cdot \sin\left(\frac{180}{2}\right)}{2 \cdot 5,0} = 20 \text{ (раз.)}.$$

Висновок. При включенні після капітального ремонту на паралельну роботу двох трансформаторів ТЕЦ величина зрівнювального струму перевищує номінальний струм у 20 разів, що вказує на не однакові групи з'єднання обмоток трансформаторів Y/Y₀-0, та Y/Y-6.

Приклад № 2.5 Після капітального ремонту трьох трансформаторів ТЕЦ була виконана процедура їх фазування і на підставі вимірювань напруг були побудовані трикутники $(a_1-b_1-c_1)$ лінійних напруг мережі і трикутники лінійних напруг $(a_2-b_2-c_2)$ фазуємих трансформаторів T_1, T_2, T_3 . Для якого із трьох трансформаторів включення на паралельну роботу з мережею не може бути виконано ні при яких умовах?

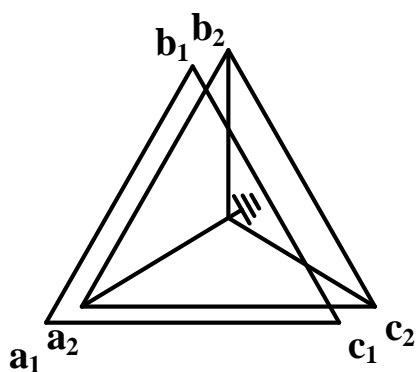


Розв'язок:

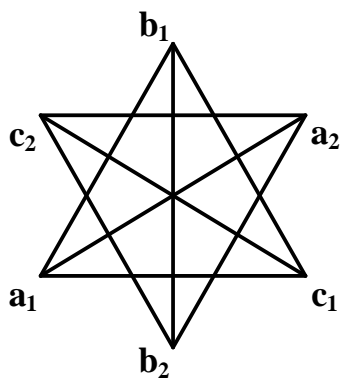
Оскільки зсув векторів лінійних напруг трансформатора T_3 і трансформатора, що підключений до мережі дорівнює 330° , то це значить, що один з них належить до парної групи, а інший до непарної. Тому включення T_3 на паралельну роботу неможливе ні при яких умовах.

Висновок. Для трансформатора T_3 включення на паралельну роботу неможливе ні при яких умовах.

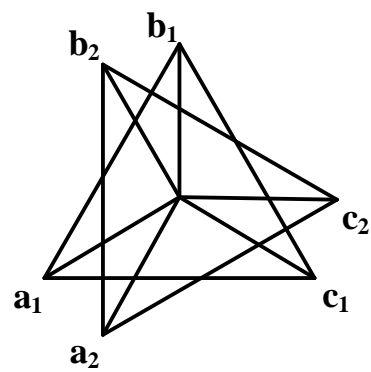
Приклад № 2.6 Після капітального ремонту трьох трансформаторів ТЕЦ була виконана процедура їх фазування і на підставі вимірювань напруг були побудовані трикутники $(a_1-b_1-c_1)$ лінійних напруг мережі і трикутники лінійних напруг $(a_2-b_2-c_2)$ фазуємих трансформаторів T_1, T_2, T_3 . Для якого із трьох трансформаторів можливе включення на паралельну роботу з мережею без додаткових Perez'єднання?



T_1



T_2



T_3

Розв'язок:

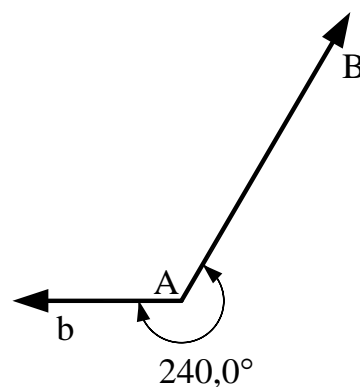
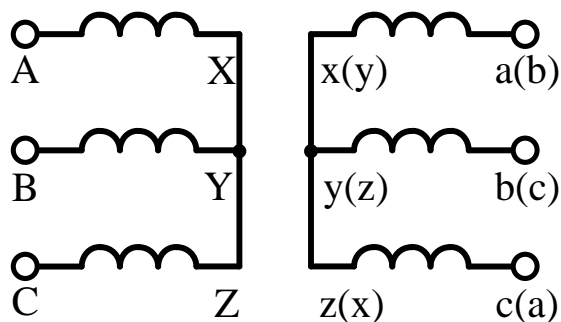
Оскільки зсув векторів лінійних напруг трансформатора T_1 і трансформатора, що підключений до мережі, дорівнює нулю, то включення його на паралельну роботу можливе одразу без додаткових змін з'єднань.

Висновок. Для трансформатора T_1 включення на паралельну роботу можливе одразу без додаткових змін з'єднань.

Приклад № 2.7 У трансформатора підстанції, що має схему з'єднання обмоток Y/Y , перед початком фазування було помилково виконано подвійне кругове перемаркування виводів обмотки низької напруги. Визначити номер групи з'єднання обмоток трансформатора, якщо кут зсуву між векторами лінійних напруг на стороні ВН і на стороні НН дорівнює 240° .

Розв'язок:

Як видно з векторних діаграм кут зсуву векторів лінійних напруг на стороні ВН і стороні НН становить: $\alpha = 240^\circ$. Тоді номер групи визначається:



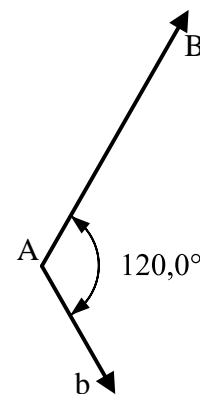
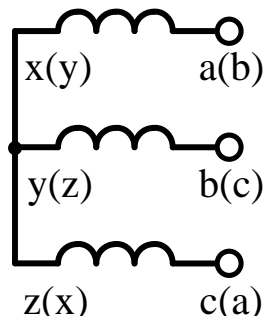
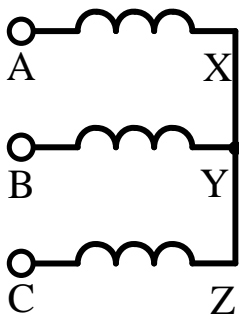
$$N_{гр} = \frac{\alpha}{30} = \frac{240}{30} = 8$$

Висновок. 8 номер групи з'єднання обмоток трансформатора відповідає куту зсуву між векторами лінійних напруг на стороні ВН і на стороні НН 240°.

Приклад № 2.8 У трансформатор підстанції, що має схему з'єднання обмоток Y/Y після капітального ремонту перед початком фазування було помилково виконано кругове перемаркування виводів обмотки низької напруги. Визначити номер групи з'єднання обмоток трансформатора, якщо кут α зсуву між векторами лінійних напруг на стороні ВН і на стороні НН дорівнює 120°.

Розв'язок:

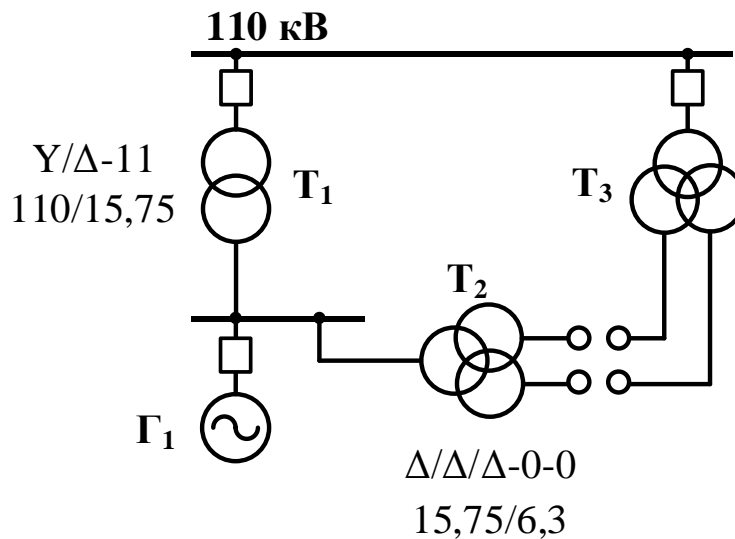
Як видно з векторних діаграм кут зсуву α векторів лінійних напруг на стороні ВН і на стороні НН дорівнює 120°. Тоді номер групи визначається:



$$N_{гр} = \frac{\alpha}{30} = \frac{120}{30} = 4$$

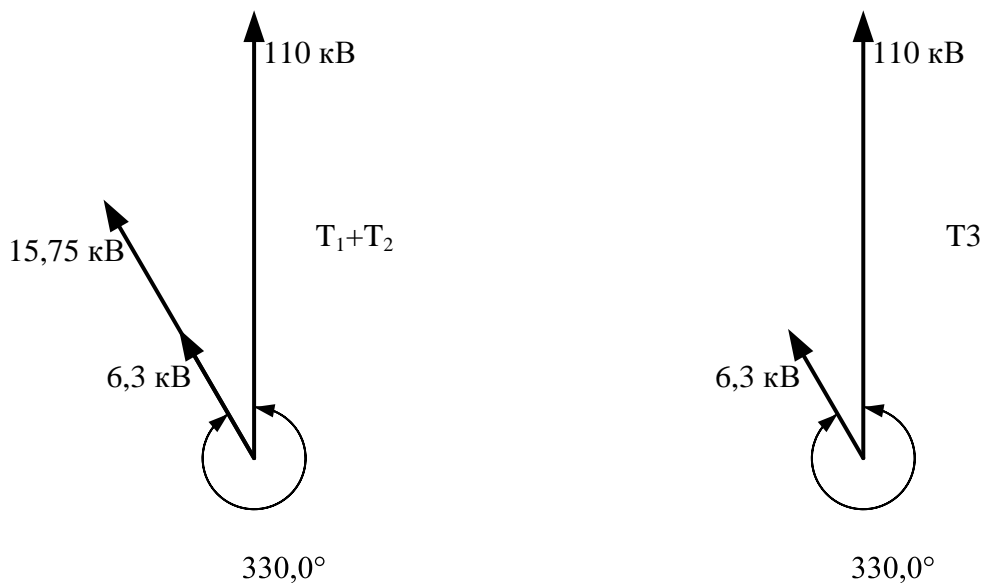
Висновок. 4 номер групи з'єднання обмоток трансформатора відповідає куту зсуву між векторами лінійних напруг на стороні ВН і на стороні НН 120°.

Приклад № 2.9 Визначити номер групи з'єднання обмоток резервного трансформатора власних потреб електростанції T_3 при якій можливе його включення на паралельну роботу з робочим трансформатором T_2 .



Розв'язок:

Кут зсуву вектора лінійної напруги на стороні 6,3 кВ трансформатора T_2 відносно вектора лінійної напруги на стороні 110 кВ становить 330° . Включення трансформатора T_3 на паралельну роботу з трансформатором T_2 можливе тоді, коли трансформатор T_3 має групи з'єднання $Y/Y/\Delta-11$.



Висновок. Необхідно виконати групи з'єднання $Y/Y/\Delta-11$ на трансформаторі T_3 для можливості його включення на паралельну роботу з трансформатором.

2.4 Задачі для самостійного розв'язання

Задача № 2.1 Визначити в процентах від номінального величину зрівнювального струму $I_{зр}$, що проходить в обмотках трансформаторів зв'язку, які включаються на паралельну роботу. Трансформатори мають однакові групи, однакові номінальні потужності $S_{ном1} = S_{ном2}$ і однакові напруги короткого замикання $u_{k1\%} = u_{k2\%} = 11,5\%$. Різниця коефіцієнтів трансформації $\Delta k_{T\%}$ в процентному відношенні від їх середнього значення складає 3 %.

Задача № 2.2 Визначте величину зрівнювального струму в долях від номінального при включенні після капітального ремонту на паралельну роботу двох трансформаторів ТЕЦ з однаковими потужностями ($S_{ном1} = S_{ном2}$), коефіцієнтами трансформації ($k_{T1} = k_{T2}$) і напругами короткого замикання ($u_{k1\%} = u_{k2\%} = 6,5\%$), але з різними групами з'єднання обмоток. Один трансформатор має групу з'єднання Y/Y_0-0 , а другий: $Y/\Delta-11$.

Задача № 2.3 Два трансформатори зв'язку шин генераторного РП ТЕЦ з однаковими параметрами включаються на паралельну роботу. В обмотках високої напруги трансформаторів проходить зрівнювальний струм $I_{зр}$, який при $u_{k1\%} = 10,5\%$ в 9,52 рази перевищує номінальний. Визначити групу з'єднань обмоток другого трансформатора, якщо перший з них має групу: $Y_0/\Delta-11$.

Задача № 2.4 На електростанції трансформатор T_2 включається на паралельну роботу з трансформатором T_1 . Трансформатори мають такі групи з'єднань обмоток: $T_1 - Y_0/\Delta-11$; $T_2 - Y/Y-6$. Які через з'єднання виводів обмоток високої та низької напруги трансформатора T_2 необхідно виконати, щоб забезпечити включення на паралельну роботу трансформаторів з даними групами.

Задача № 2.5 При виконанні фазування трансформаторів T_1 і T_2 електростанції, які не мають на стороні де виконується фазування заземленої нейтралі. Для випадку встановлення перемички між фазою b трансформатора

T_1 і фазою a трансформатора T_2 (b_1-a_2) були одержані такі результати вимірювань напруг:

1 варіант	2 варіант	3 варіант
$U_{a1-b2} = 2,00 \cdot U_{л}$	$U_{a1-b2} = 1,00 \cdot U_{л}$	$U_{a1-b2} = 1,90 \cdot U_{л}$
$U_{a1-c2} = 1,73 \cdot U_{л}$	$U_{a1-c2} = 1,73 \cdot U_{л}$	$U_{a1-c2} = 1,90 \cdot U_{л}$
$U_{c1-b2} = 1,40 \cdot U_{л}$	$U_{c1-b2} = 1,73 \cdot U_{л}$	$U_{c1-b2} = 1,90 \cdot U_{л}$
$U_{c1-c2} = 1,00 \cdot U_{л}$	$U_{c1-c2} = 2,00 \cdot U_{л}$	$U_{c1-c2} = 1,40 \cdot U_{л}$

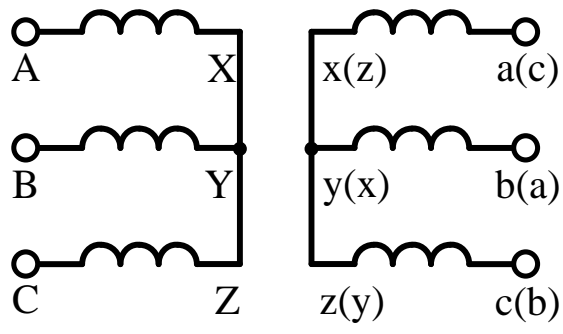
На підставі результатів вимірювань побудувати векторні діаграми лінійних напруг трансформаторів і визначити в якому варіанті вимірювань трансформатори мають однакові групи і можуть бути включені на паралельну роботу.

Задача № 2.6 При виконанні фазування трансформаторів T_1 і T_2 електростанції, які не мають на стороні де виконується фазування заземленої нейтралі. Для випадку встановлення перемички між фазою c трансформатора T_1 і фазою a трансформатора T_2 (c_1-a_2) були одержані такі результати вимірювань напруг:

1 варіант	2 варіант	3 варіант
$U_{a1-b2} = 1,40 \cdot U_{л}$	$U_{a1-b2} = 0$	$U_{a1-b2} = 1,73 \cdot U_{л}$
$U_{a1-c2} = 1,90 \cdot U_{л}$	$U_{a1-c2} = 1,00 \cdot U_{л}$	$U_{a1-c2} = 2,00 \cdot U_{л}$
$U_{b1-b2} = 1,40 \cdot U_{л}$	$U_{b1-b2} = 1,00 \cdot U_{л}$	$U_{b1-b2} = 1,00 \cdot U_{л}$
$U_{b1-c2} = 1,40 \cdot U_{л}$	$U_{b1-c2} = 0$	$U_{b1-c2} = 1,73 \cdot U_{л}$

На підставі результатів вимірювань побудувати векторні діаграми лінійних напруг трансформаторів і визначити в якому варіанті вимірювань трансформатори мають однакові групи і можуть бути включені на паралельну роботу.

Задача № 2.7 Трансформатор підстанції, що має схему з'єднання обмоток Y/Y був виведений з експлуатації для ремонту. Після ремонту перед початком фазування трансформатора була помилково виконано кругове перемаркування виводів обмотки низької напруги. Побудувати векторні діаграми фазних напруг обмоток трансформатора і визначити номер групи з'єднання обмоток трансформатора.



ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3

«ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМИХ НАВАНТАЖЕНЬ ОБМОТОК І ПЕРЕНАПРУГ АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ У РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ»

3.1 Мета та зміст заняття

Мета: Формування навичок та умінь аналізу допустимих навантажень обмоток і перенапруг автотрансформаторів у різних режимах роботи електричної станції.

Навчальні запитання:

1. Особливості режимів роботи автотрансформатора.
2. Алгоритм розрахунку допустимих навантажень обмоток і перенапруг автотрансформаторів у різних режимах роботи електричної станції.
3. Аналіз допустимих навантажень обмоток і перенапруг автотрансформаторів у різних режимах роботи електричної станції.
4. **Задача** – Визначення допустимих навантажень обмоток і перенапруг автотрансформаторів у різних режимах роботи електричної станції.

3.2 Короткі теоретичні відомості

Якщо в мережі використовуються трансформатори, то заземлення на лініях призводить до того, що напруга вводів незаземлених фаз трансформатора збільшується відносно землі з фазного значення до лінійного. Заземлення ліній при використанні автотрансформаторів значно небезпечніші, оскільки вони спричиняють велике насичення осердя, значні перенапруги [1, 3, 7]. Розглядувані явища залежать від способів заземлення нейтралей. Тому розглянемо послідовно окремі випадки різних варіантів заземлення нейтралей автотрансформатора і живильної мережі в разі заземлення на лініях високої напруги. Будемо розглядати трифазну групу однофазних автотрансформаторів без урахування впливу третинної обмотки, з'єднаної в трикутник, а також тристержневого осердя.

Нейтралі автотрансформатора і живильної мережі заземлені.

Заземлення на лінії низької або високої напруги не спричиняють перенапруг або підвищених насичень осердя автотрансформатора. Якщо виникло замикання на землю в мережі середньої напруги (точка 1, рис. 3.1), то фаза джерела живлення і генератора стає накоротко замкненою, при цьому значення напруги фази A автотрансформатора зменшується до нульового, а по обмотках автотрансформатора не протікають струми короткого замикання.

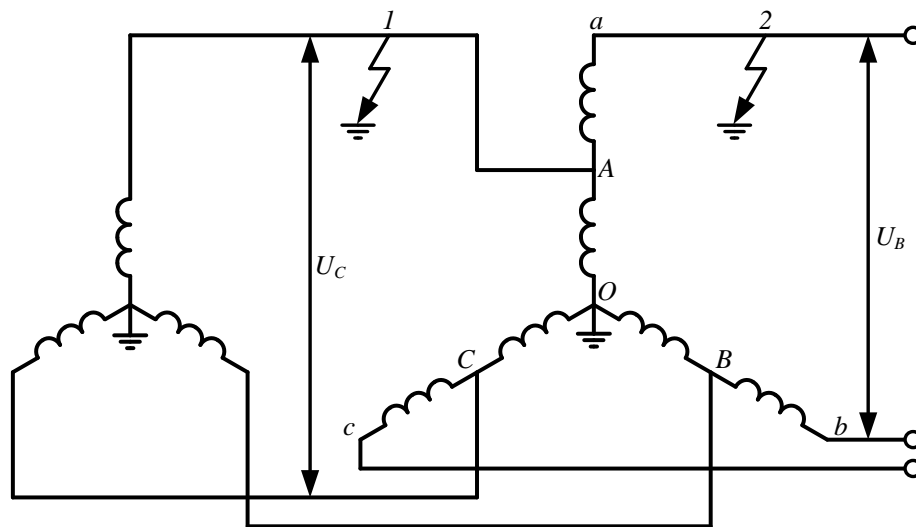


Рисунок 3.1 – Замикання на землю на лініях – нейтралі автотрансформатора і живильної системи заземлені

Якщо виникло замикання на землю на лінії високої напруги (точка 2, рис. 3.1), то виникає і протікає струм короткого замикання. Його значення обмежується сумою опорів фазної обмотки джерела живлення і опору короткого замикання автотрансформатора. В цьому випадку перенапруги не виникають, оскільки в разі замикання на землю в точці 2 фазна напруга прикладається до послідовної обмотки автотрансформатора, але напруги в точках A , B , C залишаються незмінними і визначаються лінійними напругами системи.

Нейтралі автотрансформатора і живильної системи ізолювані. Якщо замикання на землю виникло в мережі середньої напруги (рис. 3.2), то цей випадок нічим не відрізняється від аналогічного випадку для трансформаторів з ізолюваними нейтраліями і з'єднанням обмоток зірка-зірка. Напруга на

незаземлених лініях середньої напруги відносно землі збільшується від фазного значення до лінійного, тобто в $\sqrt{3}$ разів.

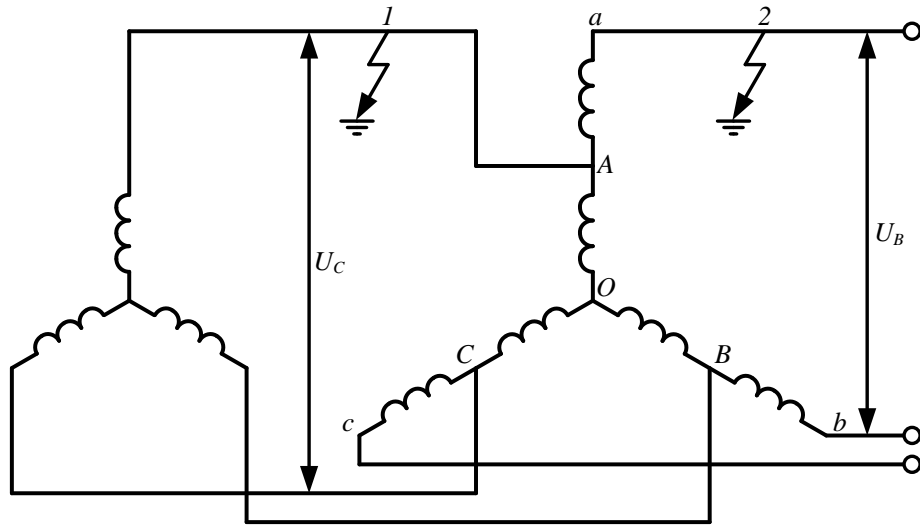


Рисунок 3.2 – Замикання на землю на лініях – нейтралі автотрансформатора і живильної системи ізолювані

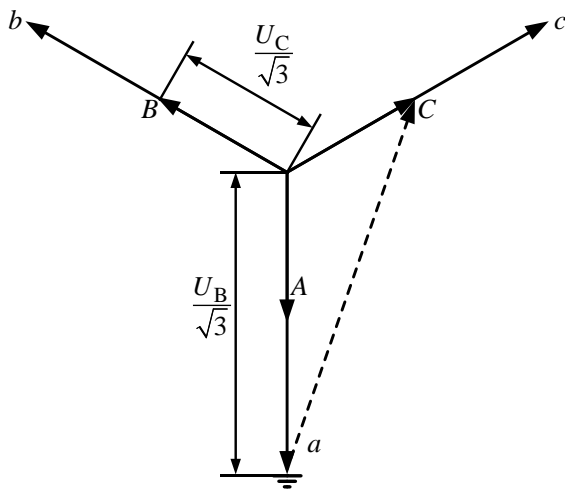


Рисунок 3.3 – Векторна діаграма напруг для визначення перенапруг в автотрансформаторі з ізолюваною нейтраллю в разі замикання на лінії високої напруг

У разі замикання на землю на лінії високої напруги напруга на непошкоджених лініях низької напруги збільшується відносно землі до величини (рис. 3.3):

$$U_{Ba} = U_{Ca} = \sqrt{\left(\frac{U_C}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_B}{\sqrt{3}}\right)^2 - \frac{2 \cdot U_C \cdot U_B}{3} \cdot \cos(120^\circ)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{U_C^2 + U_B^2 + U_C \cdot U_B},$$

де U_C і U_B – лінійні напруги на боці середньої і високої напруг автотрансформатора.

Як видно зі співвідношення перенапруги тим більші, чим більша різниця між вищою і нижчою напругами автотрансформатора. Це є однією з причин,

через яку обмежують допустимі коефіцієнти трансформації в автотрансформаторі (вони не повинні бути більшими ніж 1,5-2).

Нейтраль автотрансформатора ізолювана, нейтраль живильної системи заземлена. Цей випадок характеризується тим, що в системі з глухозаземленою нейтраллю ввімкнена підвищувальний автотрансформатор з ізолюваною нейтраллю. Він є найскладнішим щодо перенапруг в автотрансформаторі, які викликаються заземленнями на землю однієї фази в мережі високої напруги. Електричну схему підвищувального трансформатора для визначення перенапруг у цьому випадку показано на рис. 3.4.

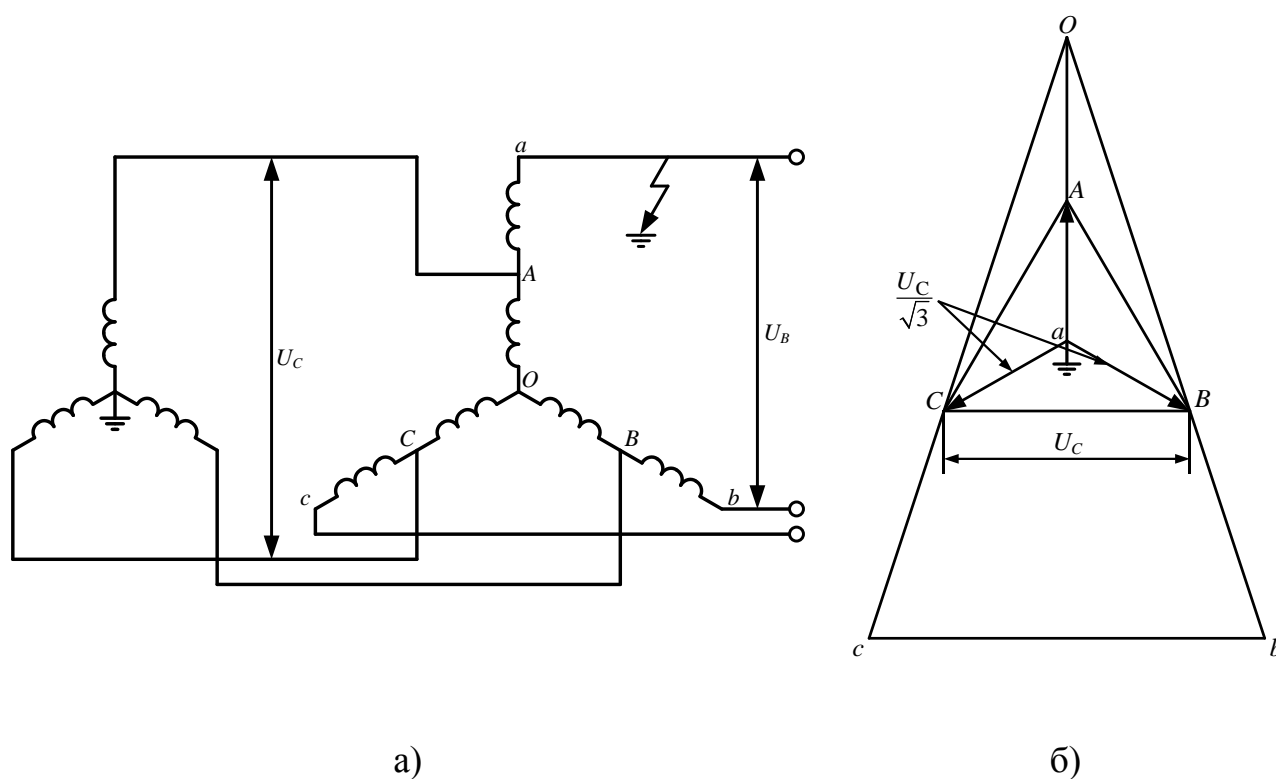


Рисунок 3.4 – Перенапруги в підвищувальному автотрансформаторі з ізолюваною нейтраллю в разі замикання в мережі ВН із заземленою нейтраллю

Фазна напруга живильної системи $\frac{U_C}{\sqrt{3}}$, як видно з рис. 3.4, прикладається до послідовної обмотки. В результаті цього стрижень фази a автотрансформатора буде перенасиченим. Напруга на послідовній обмотці aA збільшиться у стільки разів, у скільки кількість витків послідовної обмотки aA менша за кількість витків загальної обмотки AO , тобто буде у $\frac{U_C}{U_B - U_C}$ разів

більше, ніж у нормальному режимі. Це спричиняє значне збільшення намагнічувального струму і перенапруг в обмотках.

Значення перенапруг можна знайти з потенціальної діаграми (рис. 3.4, б), яку побудовано на припущенні, що лінійні і фазні напруги системи не змінюються у разі замикань на землю на лінії. Напруги між виводами A, B, C дорівнюють U_C . Потенціал точки a дорівнює потенціалу землі, тому точка a на потенціальній діаграмі розміщена в центрі трикутника лінійних напруг, а потенціали виводів A, B, C дорівнюють фазній напрузі $\frac{U_C}{\sqrt{3}}$. З потенціальної діаграми і схеми автотрансформатора витікає, що потенціал нейтральної точки O відносно землі буде визначатись як

$$U_{aO} = U_{aA} + U_{AO} = \frac{U_C}{\sqrt{3}} + \frac{U_C}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_C}{U_B - U_C} = \frac{U_C}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{U_B}{U_B - U_C} \right).$$

Напруга на первинних обмотках автотрансформатора BO і CO

$$U_{BO} = U_{CO} = \sqrt{U_{aO}^2 + \frac{U_C^2}{3} - \frac{2 \cdot U_C \cdot U_{aO} \cdot \cos(120^\circ)}{\sqrt{3}}} = \sqrt{U_{aO}^2 + \frac{U_C^2}{3} + \frac{U_C \cdot U_{aO}}{\sqrt{3}}}.$$

Напруга на обмотках автотрансформатора bo і co

$$U_{bo} = U_{co} = \frac{U_B}{U_C} \cdot \sqrt{U_{aO}^2 + \frac{U_C^2}{3} + \frac{U_C \cdot U_{aO}}{\sqrt{3}}}.$$

Перенапруги у разі замикання фаз на землю тим вищі, чим ближчі за значеннями первинна і вторинна напруги, тобто якраз у випадках, коли використання автотрансформатора є найбільш вигідним. Оскільки такі перенапруги недопустимі, нейтралі всіх автотрансформаторів заземлюють наглухо.

Унаслідок наявності електричного зв'язку між обмотками автотрансформатора і мережами різних напруг перенапруги, які виникають у мережах однієї напруги, поширюються на мережі другої напруги, що може виявитися надто небезпечним як для самого автотрансформатора, так і для апаратури цієї напруги.

Напруга введів b і c відносно землі приблизно дорівнює

$$U_{ba} = U_{ca} = U_{bO} \cdot \frac{U_B - U_C}{U_B} + \frac{U_C}{\sqrt{3}} = \frac{U_B - U_C}{U_C} \cdot \sqrt{U_{aO}^2 + \frac{U_C^2}{3} + \frac{U_C \cdot U_{aO}}{\sqrt{3}}} + \frac{U_C}{\sqrt{3}}.$$

Слід зазначити, що електрообладнання на боці низької напруги в разі заземлення на лінії не зазнає перенапруг.

Якщо замикання на землю виникло на боці низької напруги підвищувального трансформатора, то, як показує аналіз, це не призводить до перенапруг і підвищення насичення осердя. Але заземлення на боці низької напруги знижувального автотрансформатора спричиняє виникнення перенапруг, аналогічних до вищерозглянутих. Перенапруги, які виникають в мережі високої напруги, зумовлюють перенапруги на виводах середньої напруги більші, ніж у трансформаторів.

Цю особливість ураховують у процесі конструювання ізоляції автотрансформаторів. Крім того, з боку високої і середньої напруг автотрансформатори захищають розрядниками та ОПН. Розрядники та ОПН повинні бути приєднані (без роз'єднувачів) між автотрансформатором і найближчим роз'єднувачем для того, щоб розрядники та ОПН залишались увімкнутими у випадку відключення автотрансформатора з однієї із сторін

Для трансформаторів напругою 330 кВ і вище, а також для всіх автотрансформаторів обов'язкове ефективне заземлення нейтралі обмоток високої напруги.

В Україні мережі напругою 110, 150, і 220 кВ працюють з глухо заземленою або ефективно-заземленою нейтраллю, але для зменшення струму однофазного короткого замикання нейтралі частини трансформаторів можуть бути розземлені. Ізоляція нульових виводів зазвичай не розраховується на повну напругу, тому для зниження можливої перенапруги під час роботи трансформаторів у режимі розземлення нейтралі приєднують вентильні розрядники та ОПН до нульової точки трансформатора.

Режими роботи триобмоткових автотрансформаторів. Для автотрансформаторів характерні три основні режими роботи: автотрансформаторний, трансформаторний, комбінований [1, 4, 7].

Для простоти аналізу прийmemo: $k_{В-С} = 2$, $S_{тип.} = 0,5 \cdot S_{ном.}$.

Виразимо всі струми через струм I і покажемо величину та напрямок струмів в обмотках автотрансформатора:

$$\frac{S_{ном.}}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}} = I, \quad \frac{S_{ном.}}{\sqrt{3} \cdot U_{СН}} = 2 \cdot I,$$

$$\frac{S_{тип.}}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}} = \frac{I}{2}, \quad \frac{S_{тип.}}{\sqrt{3} \cdot U_{СН}} = I.$$

1. Автотрансформаторний режим з передачею $S_{ном.}$ з мережі СН в мережу ВН та назад (рис. 3.5) (використання в якості АТ зв'язку на електростанції або підстанції). У цьому режимі можна передавати $S_{ном.}$ з мережі високої напруги до мережі середньої напруги і навпаки: $ВН \rightarrow СН$, $СН \rightarrow ВН$. Обмотки розраховані на $S_{тип.}$. Фактично вони так і навантажені. У загальній частині обмотки струм I , режим можливий і вигідний.

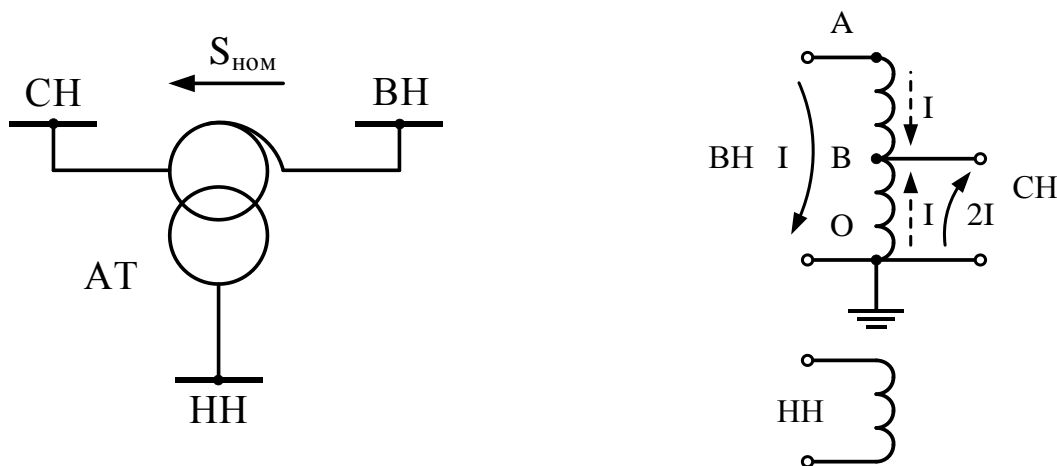


Рисунок 3.5 – Автотрансформаторний режим з передачею $S_{ном.}$ з мережі СН в мережу ВН та назад

2. Трансформаторний режим із передачею потужності генератора $S_{Г} = S_{тип.}$ в мережу ВН (рис. 3.6). Режим можливий, але не вигідний, оскільки автотрансформатор недовантажений, у загальній частині обмотки $I/2$. Передача $S_{тип.}$ з мережі низької напруги до мережі високої напруги: $НН \rightarrow ВН$, те ж

вийде при передачі потужності генератора в мережу середньої напруги:
 НН → СН.

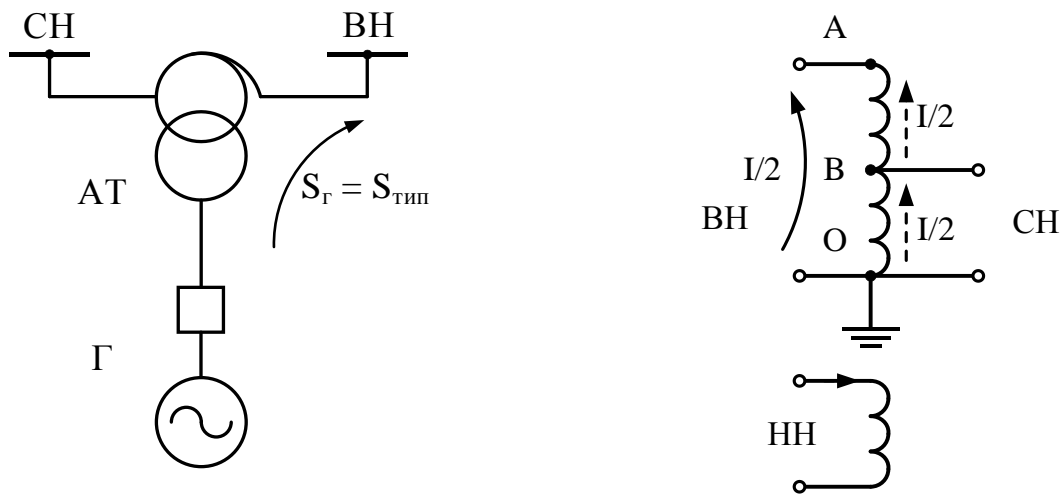


Рисунок 3.6 – Трансформаторний режим із передачею потужності генератора
 $S_{Г} = S_{тип.}$ в мережу ВН

3. Комбінований режим з передачею потужності з мереж НН та СН у мережу ВН (рис. 3.7). Трансформаторний режим із передачею потужності генератора $S_{Г} = S_{тип.}$ в мережу ВН. Режим становить найбільший інтерес. Потужність, яка передається порівну розподіляється між обмотками середньої та високої напруги: $(S_{ном.} - S_{тип.}) - СН \rightarrow ВН$, $S_{тип.} - НН \rightarrow ВН$. Режим допустимий, дуже вигідний, тому що втрати загальної частини обмотки відсутні.

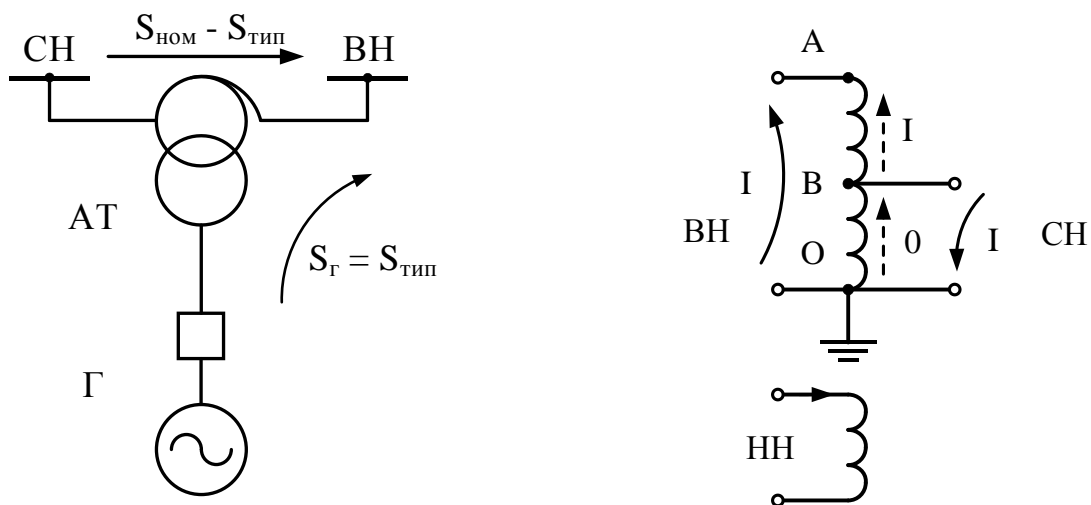


Рисунок 3.7 – Комбінований режим з передачею потужності з мереж НН та СН
 у мережу ВН

4. Комбінований режим з передачею потужності з мереж НН і ВН в мережу СН (рис. 3.8). Потужність, що передається, розподіляється між обмотками: $(S_{\text{ном.}} - S_{\text{тип.}}) - \text{ВН} \rightarrow \text{СН}$, $S_{\text{тип.}} - \text{НН} \rightarrow \text{СН}$. Загальна частина обмотки перевантажена $(1,5 \cdot I)$, режим недопустимий.

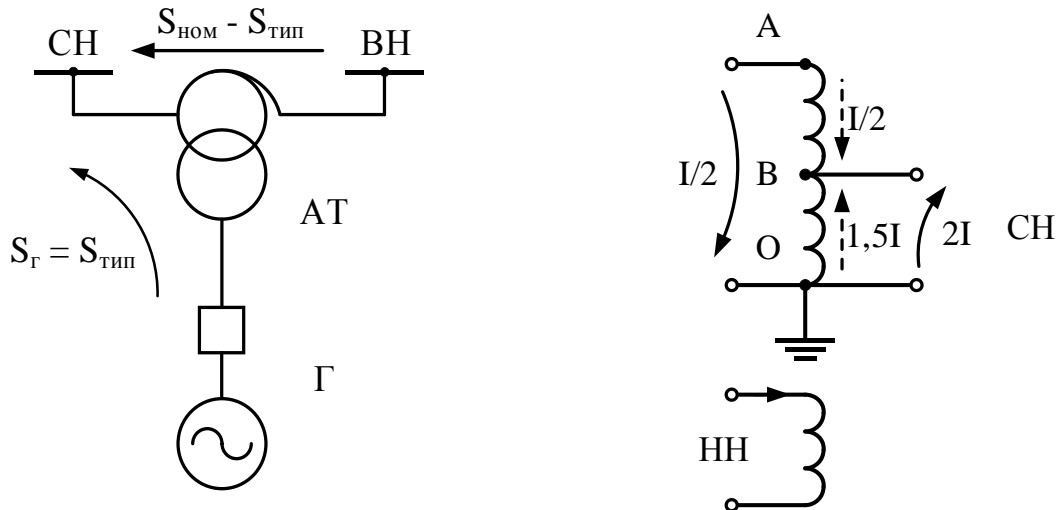


Рисунок 3.8 – Комбінований режим з передачею потужності з мереж НН і ВН в мережу СН

5. Комбінований режим на підстанції з передачею потужності з мережі ВН в мережу СН та НН (рис. 3.9). Режим аналогічний режиму 3 щодо розподілу струмів. Дуже вигідний.

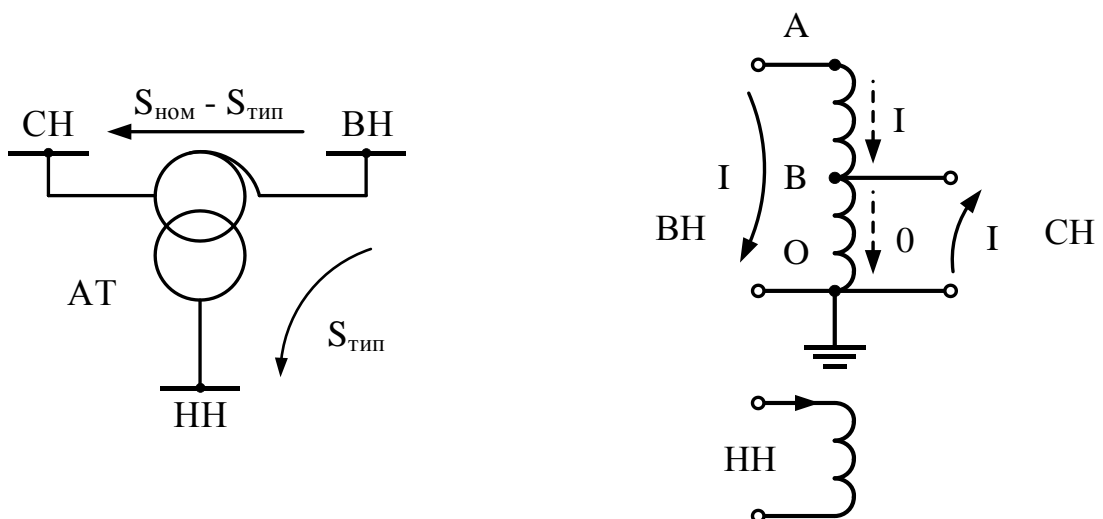


Рисунок 3.9 – Комбінований режим на підстанції з передачею потужності з мережі ВН в мережу СН та НН

3.3 Приклади типових задач

Приклад № 3.1 Автотрансформатор зв'язує мережу високої напруги $U_{\text{вн}} = 750 \text{ кВ}$ та мережу середньої напруги $U_{\text{сн}} = 330 \text{ кВ}$, нейтралі яких в нормальному режимі заземлені. Автотрансформатор працює в режимі передачі потужності із системи 330 кВ в систему 750 кВ. Персонал випадково роз'єднав нейтраль АТ та виникає замикання фази А на землю в мережі високої напруги. Визначити потенціал нейтралі, напруги на обмотках та потенціал непошкоджених фаз.

Розв'язок:

Потенціал нейтральної точки відносно землі:

$$U_{\text{аО}} = \frac{U_{\text{С}}}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{U_{\text{В}}}{U_{\text{В}} - U_{\text{С}}} \right) = \frac{330}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{750}{750 - 330} \right) = 340,224 \text{ (кВ)}.$$

Ізоляція нейтралі виконується на один клас напруги нижче лінійного вводу. У нашому випадку клас напруги лінійного вводу 750 кВ. В такому випадку ізоляція лінійного вводу розрахована на напругу 500 кВ. Величина потенціалу нейтралі цілком допустима.

Напруга на непошкоджених обмотках високої напруги відносно нейтралі:

$$U_{\text{вО}} = U_{\text{сО}} = \frac{U_{\text{В}}}{U_{\text{С}}} \cdot \sqrt{U_{\text{аО}}^2 + \frac{U_{\text{С}}^2}{3} + \frac{U_{\text{С}} \cdot U_{\text{аО}}}{\sqrt{3}}} = \\ = \frac{750}{330} \cdot \sqrt{(340,224)^2 + \frac{330^2}{3} + \frac{330 \cdot 340,224}{\sqrt{3}}} = 1058,402 \text{ (кВ)}.$$

Ця величина є недопустимою (в 1,41 рази вище за номінальну напругу).

Напруга на непошкоджених обмотках середньої напруги відносно нейтралі:

$$U_{\text{вО}} = U_{\text{сО}} = \sqrt{U_{\text{аО}}^2 + \frac{U_{\text{С}}^2}{3} + \frac{U_{\text{С}} \cdot U_{\text{аО}}}{\sqrt{3}}} = \\ = \sqrt{(340,224)^2 + \frac{330^2}{3} + \frac{330 \cdot 340,224}{\sqrt{3}}} = 465,697 \text{ (кВ)}.$$

Ця величина є недопустимою (в 1,41 рази вище за номінальну напругу).

Потенціали непошкоджених фаз мережі високої напруги відносно землі:

$$U_{ba} = U_{ca} = \frac{U_B - U_C}{U_B} \cdot \sqrt{U_{aO}^2 + \frac{U_C^2}{3} + \frac{U_C \cdot U_{aO}}{\sqrt{3}} + \frac{U_C}{\sqrt{3}}} =$$

$$= \frac{750 - 330}{330} \cdot \sqrt{(340,224)^2 + \frac{330^2}{3} + \frac{330 \cdot 340,224}{\sqrt{3}} + \frac{330}{\sqrt{3}}} = 783,231 \text{ (кВ)}.$$

Ця величина є допустимою (в 1,04 рази вище за номінальну напругу).

Висновок. У цьому режимі робота автотрансформатора недопустима.

Приклад № 3.2 Автотрансформатор зв'язує мережу високої напруги $U_{вн} = 750 \text{ кВ}$ та мережу середньої напруги $U_{сн} = 330 \text{ кВ}$, нейтралі яких в нормальному режимі заземлені. Автотрансформатор працює в режимі передачі потужності із системи 750 кВ в систему 330 кВ. Персонал випадково роз'єднав нейтраль АТ та виникає замикання фази А на землю в мережі середньої напруги. Визначити потенціал нейтралі, напруги на обмотках непошкоджених фаз.

Розв'язок:

Потенціал нейтральної точки відносно землі:

$$U_{aO} = \frac{U_B}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{U_C}{U_B - U_C} \right) = \frac{750}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{330}{750 - 330} \right) = 340,224 \text{ (кВ)}.$$

Ізоляція нейтралі виконується на один клас напруги нижче лінійного вводу. У нашому випадку клас напруги лінійного вводу 750 кВ. В такому випадку ізоляція лінійного вводу розрахована на напругу 500 кВ. Величина потенціалу нейтралі цілком допустима.

Напруга на непошкоджених обмотках високої напруги відносно нейтралі:

$$U_{bO} = U_{cO} = \sqrt{U_{aO}^2 + \frac{U_B^2}{3} - \frac{U_B \cdot U_{aO}}{\sqrt{3}}} =$$

$$= \sqrt{(340,224)^2 + \frac{750^2}{3} - \frac{750 \cdot 340,224}{\sqrt{3}}} = 394,881 \text{ (кВ)}.$$

Висновок. У цьому режимі робота автотрансформатора допустима.

Приклад № 3.3 Автотрансформатор АТДЦТН-125000/330/110 зв'язує мережу високої напруги ($U_{ВН} = 330$ кВ) та мережу середньої напруги $U_{СН} = 110$ кВ. Номінальна потужність автотрансформатора $S_{АТ\text{ ном.}} = 125$ МВ·А, номінальна напруга обмоток $U_{ВН} = 330$ кВ, $U_{СН} = 115$ кВ, $U_{НН} = 10,5$ кВ.

Коефіцієнт трансформації між сторонами ВН та СН:

$$k_{В-С} = \frac{330}{115} = 2,87.$$

Коефіцієнт вигідності:

$$k_{\text{тип.}} = 1 - \frac{1}{2,87} = 0,652.$$

Номінальна потужність обмотки НН:

$$S_{НН\text{ ном.}} = S_{\text{тип.}} = k_{\text{тип.}} \cdot S_{АТ\text{ ном.}} = 0,652 \cdot 125 = 81,5 \text{ (МВ} \cdot \text{А)}.$$

Коефіцієнти потужності обмоток ВН, СН, НН АТ приймаємо однаковими: $\cos \varphi_{ВН\text{ ном.}} = \cos \varphi_{СН\text{ ном.}} = \cos \varphi_{НН\text{ ном.}}$.

До обмотки НН АТ підключений турбогенератор ТВФ-60-2 з параметрами:

$$P_{Г\text{ ном.}} = 60 \text{ (МВт)},$$

$$\cos \varphi_{Г\text{ ном.}} = 0,80, S_{Г\text{ ном.}} = 75 \text{ (МВ} \cdot \text{А)}, U_{Г\text{ ном.}} = 10,5 \text{ (кВ)}.$$

На власні потреби йде 7 % від повної потужності генератора:

$$S_{СН\text{ max}} = 0,07 \cdot S_{Г\text{ ном.}} = 0,07 \cdot 75 = 5,25 \text{ (МВ} \cdot \text{А)}.$$

При цьому максимальна повна потужність, яку генератор видає до обмотки НН автотрансформатора, дорівнює:

$$S_{НН} = S_{Г\text{ ном.}} - S_{СН\text{ max}} = 75 - 5,25 = 69,75 \text{ (МВ} \cdot \text{А)}.$$

Потрібно визначити навантаження обмоток та допустимість роботи автотрансформатора в комбінованих режимах з видачею повної номінальної потужності турбогенератора та забезпеченням перетоків потужності між системами 330 кВ та 110 кВ.

Режим видачі потужності від генератора в мережу 110 кВ та додатково перетікання потужності з мережі 330 кВ в мережу 110 кВ.

Навантаження обмотки НН визначається величиною перетоку повної потужності від генератора.

Максимальна повна потужність, яку генератор видає до обмотки НН автотрансформатора, складає: 69,75 М·ВА. Ця величина менша за номінальну потужність обмотки ПН, яка дорівнює 81,5 МВ·А. Таким чином, при роботі генератора на номінальній потужності коефіцієнт навантаження обмотки НН АТ складе $69,75 / 81,5 = 0,86 \cdot S_{\text{тип.}}$.

Номінальна потужність загальної обмотки дорівнює типовій $S_{\text{тип.}} = 81,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. З боку НН передається 69,75 М·ВА. Так як ця потужність менше розрахункової потужності обмотки, то з боку ВН можна передати додаткову потужність в бік СН. Величина цього перетоку становить:

$$S_{\text{заг.}} = k_{\text{тип.}} \cdot S_{\text{В}} + S_{\text{НН}},$$

$$S_{\text{В}} = \frac{1}{k_{\text{тип.}}} \cdot (S_{\text{заг.}} - S_{\text{НН}}) = \frac{1}{0,652} \cdot (81,5 - 69,75) = 18,02 \text{ (МВ} \cdot \text{А)}.$$

Ця величина і визначає допустимий переток потужності із системи 330 кВ в систему 110 кВ при роботі генератора на номінальній потужності.

У цьому режимі навантаження обмоток складають: послідовної обмотки: 22,1 %, загальної обмотки: 100 %, обмотки НН: 86 %.

Отже, величини перетоку потужності між сторонами ВН і СН обмежені навантаженням загальної обмотки. Збільшення величини перетоку потужності між сторонами ВН та СН можливе лише при відповідному зниженні навантаження генератора.

Режим видачі повної потужності від генератора в мережу 330 кВ і додатковий переток потужності з мережі 110 кВ в мережу 330 кВ.

Навантаження обмотки НН становить $0,86 \cdot S_{\text{тип.}}$. Навантаження послідовної обмотки не повинно перевищувати $S_{\text{тип.}}$.

За умови рівності коефіцієнтів потужності $\cos \varphi_{ВН\text{ ном.}} = \cos \varphi_{СН\text{ ном.}} = \cos \varphi_{НН\text{ ном.}}$ визначаємо допустиму величину додаткової потужності, яка може бути передана з боку СН в бік ВН:

$$S_{\text{посл.}} = k_{\text{тип.}} \cdot (S_{\text{СН}} + S_{\text{НН}}) = 81,5 \text{ (МВ} \cdot \text{А)},$$

$$S_{\text{СН}} = \frac{81,5}{0,652} - 69,75 = 55,25 \text{ (МВ} \cdot \text{А)}.$$

Таким чином, в бік ВН з боку НН та сторони СН у цьому режимі сумарно може бути видано $81,5 + 55,25 = 125 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Ця величина дорівнює номінальній потужності АТ. При цьому навантаження послідовної обмотки дорівнюватиме її номінальній розрахунковій потужності, що дорівнює типовій.

Навантаження загальної обмотки:

$$\begin{aligned} S_{\text{заг.}} &= \left| k_{\text{тип.}} \cdot S_{\text{СН}} - \frac{1}{k_{\text{В-С}}} \cdot S_{\text{НН}} \right| = \left| 0,652 \cdot 55,25 - \frac{1}{2,87} \cdot 69,75 \right| = \\ &= |36,03 - 24,31| = 11,72 \text{ (МВ} \cdot \text{А)}. \end{aligned}$$

У даному режимі послідовна обмотка навантажена на номінальну потужність, в бік ВН видається повна номінальна потужність АТ, обмотка НН також навантажена практично повністю, а загальна обмотка майже повністю розвантажена.

Режим передачі потужності між сторонами ВН та СН та одночасно передача потужності в бік НН.

У цьому режимі між сторонами ВН і СН може бути передана потужність, що дорівнює номінальній потужності АТ, при цьому навантаження послідовної та загальної обмоток не будуть перевищувати їх номінальні розрахункові потужності, які рівні типовій.

Через обмотку НН може бути передана потужність трохи більше типової, що дорівнює $81,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

Режим видачі потужності від генератора в мережу 330 кВ та 110 кВ.

Обмотка НН навантажена на номінальну потужність генератора:

$$S_{\text{НН}} = S_{\text{Г ном.}} - S_{\text{СН max}} = 75 - 5,25 = 69,75 \text{ (МВ} \cdot \text{А)}.$$

Допустимо, в бік ВН видається 75 % потужності генератора (52,31 М·ВА), а на бік СН – решта 25 % (17,44 М·ВА).

Струм на стороні ВН:

$$I_{\text{В}} = \frac{52,31}{\sqrt{3} \cdot 330} = 0,091 \text{ (кА)}.$$

Струм у послідовній обмотці дорівнює цьому ж значенню $I_{\text{посл.}} = I_{\text{В}}$.

Навантаження послідовної обмотки:

$$S_{\text{посл.}} = \sqrt{3} \cdot (U_{\text{В}} - U_{\text{С}}) \cdot I_{\text{посл.}} = \sqrt{3} \cdot (330 - 115) \cdot 0,091 = 33,89 \text{ (МВ} \cdot \text{А)}.$$

Коефіцієнт навантаження послідовної обмотки: $33,89 / 81,5 = 0,42$.

Струм на стороні СН:

$$I_{\text{С}} = \frac{17,44}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,088 \text{ (кА)}.$$

У загальній обмотці струм дорівнює сумі струмів:

$$I_{\text{заг.}} = I_{\text{В}} + I_{\text{С}} = 0,091 + 0,088 = 0,179 \text{ (кА)}.$$

Навантаження загальної обмотки:

$$S_{\text{заг.}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{С}} \cdot I_{\text{заг.}} = \sqrt{3} \cdot 115 \cdot 0,179 = 35,65 \text{ (МВ} \cdot \text{А)}.$$

Коефіцієнт навантаження загальної обмотки: $33,65 / 81,5 = 0,41$.

У цьому режимі жодна з обмоток АТ не навантажена.

3.4 Задачі для самостійного розв'язання

Задача № 3.1 Автотрансформатор зв'язує мережу високої напруги $U_{\text{ВН}} = 330$ кВ та мережу середньої напруги $U_{\text{СН}} = 110$ кВ, нейтралі яких в нормальному режимі заземлені. Автотрансформатор працює в режимі передачі потужності із системи 110 кВ в систему 330 кВ. Персонал випадково роз'єднав нейтраль АТ та виникає замикання фази А на землю в мережі високої напруги. Визначити потенціал нейтралі, напруги на обмотках та потенціал непошкоджених фаз.

Задача № 3.2 Автотрансформатор зв'язує мережу високої напруги $U_{\text{ВН}} = 330$ кВ та мережу середньої напруги $U_{\text{СН}} = 110$ кВ, нейтралі яких в нормальному режимі заземлені. Автотрансформатор працює в режимі передачі потужності із системи 330 кВ в систему 110 кВ. Персонал випадково роз'єднав нейтраль АТ та виникає замикання фази А на землю в мережі середньої напруги. Визначити потенціал нейтралі, напруги на обмотках непошкоджених фаз.

Задача № 3.3 Автотрансформатор зв'язує мережу високої напруги $U_{\text{ВН}} = 220$ кВ та мережу середньої напруги $U_{\text{СН}} = 110$ кВ, нейтралі яких в нормальному режимі заземлені. Автотрансформатор працює в режимі передачі потужності із системи 110 кВ в систему 220 кВ. Персонал випадково роз'єднав нейтраль АТ та виникає замикання фази А на землю в мережі високої напруги. Визначити потенціал нейтралі, напруги на обмотках та потенціал непошкоджених фаз.

Задача № 3.4 Автотрансформатор зв'язує мережу високої напруги $U_{\text{ВН}} = 220$ кВ та мережу середньої напруги $U_{\text{СН}} = 110$ кВ, нейтралі яких в нормальному режимі заземлені. Автотрансформатор працює в режимі передачі потужності із системи 220 кВ в систему 110 кВ. Персонал випадково роз'єднав нейтраль АТ та виникає замикання фази А на землю в мережі середньої напруги. Визначити потенціал нейтралі, напруги на обмотках непошкоджених фаз.

Задача № 3.5 Автотрансформатор АТДЦТН-63000/330/110 зв'язує мережу високої напруги $U_{\text{ВН}} = 330$ кВ та мережу середньої напруги $U_{\text{СН}} = 110$ кВ. Номінальна потужність автотрансформатора $S_{\text{АТ ном.}} = 63$ МВ·А, номінальна напруга обмоток $U_{\text{ВН}} = 330$ кВ, $U_{\text{СН}} = 115$ кВ, $U_{\text{НН}} = 10,5$ кВ. Максимальна переток потужності з боку ВН до сторони СН дорівнює 30 МВ·А. Визначити коефіцієнти навантаження обмоток та допустимість режиму роботи. Класифікувати режим роботи АТ.

Задача № 3.6 Автотрансформатор АТДЦН-500000/500/220 зв'язує мережу високої напруги $U_{\text{ВН}} = 500$ кВ та мережу середньої напруги

$U_{\text{CH}} = 220$ кВ. Номінальна потужність автотрансформатора $S_{\text{АТ ном.}} = 500$ МВ·А, номінальна напруга обмоток $U_{\text{ВН}} = 500$ кВ, $U_{\text{CH}} = 230$ кВ, $U_{\text{НН}} = 18,0$ кВ. Максимальна переток потужності з боку СН до сторони ВН дорівнює 250 МВ·А. Визначити коефіцієнти навантаження обмоток та допустимість режиму роботи. Класифікувати режим роботи АТ.

Задача № 3.7 Автотрансформатор АТДЦТН-125000/330/220 зв'язує мережу високої напруги $U_{\text{ВН}} = 330$ кВ та мережу середньої напруги $U_{\text{CH}} = 220$ кВ. Номінальна потужність автотрансформатора $S_{\text{АТ ном.}} = 125$ МВ·А, номінальна напруга обмоток $U_{\text{ВН}} = 330$ кВ, $U_{\text{CH}} = 230$ кВ, $U_{\text{НН}} = 10,5$ кВ. Максимальна переток потужності з боку СН до сторони ВН дорівнює 60 МВ·А. Визначити коефіцієнти навантаження обмоток та допустимість режиму роботи. Класифікувати режим роботи АТ.

Задача № 3.8 Автотрансформатор АТДЦТН-125000/220/110 зв'язує мережу високої напруги $U_{\text{ВН}} = 220$ кВ та мережу середньої напруги $U_{\text{CH}} = 110$ кВ. Номінальна потужність автотрансформатора $S_{\text{АТ ном.}} = 125$ МВ·А, номінальна напруга обмоток $U_{\text{ВН}} = 220$ кВ, $U_{\text{CH}} = 115$ кВ, $U_{\text{НН}} = 10,5$ кВ. Максимальна переток потужності з боку СН до сторони ВН дорівнює 40 МВ·А. Визначити коефіцієнти навантаження обмоток та допустимість режиму роботи. Класифікувати режим роботи АТ.

Задача № 3.9 Автотрансформатор АТДЦТН-125000/500/110 зв'язує мережу високої напруги $U_{\text{ВН}} = 500$ кВ та мережу середньої напруги $U_{\text{CH}} = 110$ кВ. Номінальна потужність автотрансформатора $S_{\text{АТ ном.}} = 125$ МВ·А, номінальна напруга обмоток $U_{\text{ВН}} = 500$ кВ, $U_{\text{CH}} = 115$ кВ, $U_{\text{НН}} = 10,5$ кВ. Максимальна переток потужності з боку ВН до сторони СН дорівнює 50 МВ·А. Визначити коефіцієнти навантаження обмоток та допустимість режиму роботи. Класифікувати режим роботи АТ.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4

«ВКЛЮЧЕННЯ НА ПАРАЛЕЛЬНУ РОБОТУ І СИНХРОНІЗАЦІЯ З МЕРЕЖЕЮ ГЕНЕРАТОРІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ»

4.1 Мета та зміст заняття

Мета: Формування навичок та умінь аналізу процесу включення на паралельну роботу з мережею генераторів способом самосинхронізації та точної синхронізації.

Навчальні запитання:

1. Особливості способів включення на паралельну роботу з мережею генераторів.
2. Алгоритм розрахунку струму включення на паралельну роботу з мережею генераторів.
3. Аналіз отриманого значення струму включення на паралельну роботу з мережею генераторів.
4. Залежність відносного зносу і відносного терміну експлуатації ізоляції трансформатора від температури обмотки.
5. **Задача** – Визначення допустимості включення на паралельну роботу з мережею генераторів способом самосинхронізації та точної синхронізації.

4.2 Короткі теоретичні відомості

4.2.1 Спосіб точної синхронізації

На кожній електростанції зазвичай встановлено декілька ТГ, які включені на паралельну роботу в загальну мережу. Всі паралельно працюючі ТГ повинні віддавати в мережу струм однакової частоти. Вони повинні обертатися синхронно, їх швидкості обертання n_1 , n_2 , n_3 повинні бути обернено пропорційні числам пар полюсів:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p_1}; n_2 = \frac{60 \cdot f}{p_2}; n_3 = \frac{60 \cdot f}{p_3}.$$

При включенні на паралельну роботу з іншими ТГ необхідно уникати дуже великого стрибка струму та виникнення ударних електромагнітних моментів і сил, які можуть викликати пошкодження ТГ і іншого обладнання та системи. Тому необхідно відрегулювати режим роботи ТГ в режимі неробочого ходу перед його включенням на паралельну роботу і в визначений момент включити в мережу. Сукупність цих операцій називається синхронізацією ТГ.

Для виконання синхронізації використовують два способи: точну синхронізацію; самосинхронізацію [1, 6].

Заступна схема системи для реалізації процедури точної синхронізації наведена на рис. 4.1.

Умови точної синхронізації:

1. Частота генератора має збігатися з частотою мережі.
2. Напряга генератора має дорівнювати напрузі мережі.
3. Вектори напруг однойменних фаз генератора повинні збігатися за кутом з векторами напруг однойменних фаз мережі.

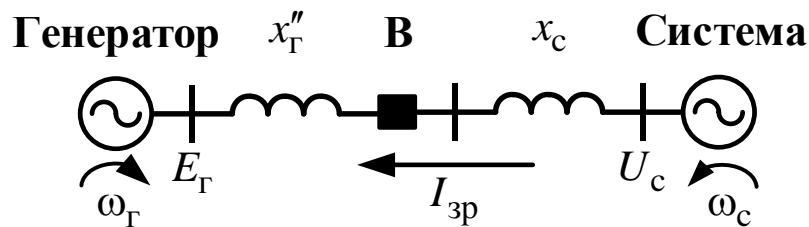
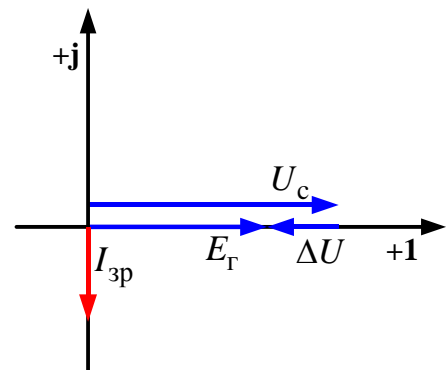


Рисунок 4.1 – Заступна схема при точній синхронізації

Розглянемо різні випадки можливого порушення умов точної синхронізації:

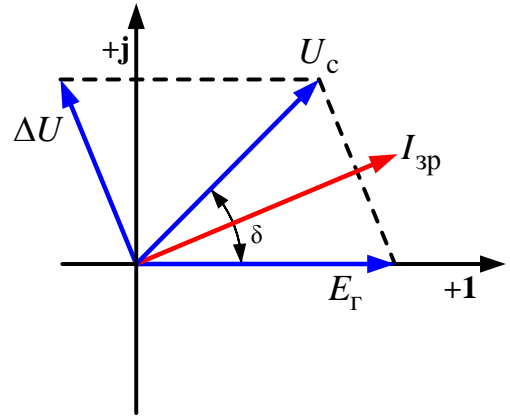
1. $U_c \neq E_G$; $\delta = 0$; $f_c = f_G$.

$$i_{zp} = \frac{\dot{U}_c - \dot{E}_G}{j \cdot x_{\Sigma}} = -j \frac{\Delta \dot{U}}{x_{\Sigma}}$$



$$2. U_c = E_r; \delta \neq 0; f_c = f_r; \dot{U}_c = \dot{U}_c \cdot e^{j \cdot \delta}.$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{3p} &= \frac{\Delta \dot{U}}{j \cdot x_{\Sigma}} = \frac{\dot{U}_c \cdot e^{j \cdot \delta} - \dot{E}_r}{j \cdot x_{\Sigma}} = \\ &= \frac{\dot{U}_c \cdot \cos \delta + j \cdot \dot{U}_c \cdot \sin \delta - \dot{E}_r}{j \cdot x_{\Sigma}} = \frac{\dot{U}_c \cdot \sin \delta}{x_{\Sigma}} + \\ &+ j \cdot \frac{(1 - \cos \delta) \cdot \dot{U}_c}{x_{\Sigma}} = \frac{\dot{U}_c}{x_{\Sigma}} \cdot (\sin \delta + j \cdot (1 - \cos \delta)), \\ \dot{I}_{3p} &= \frac{2 \cdot \dot{U}_c \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}{x_{\Sigma}}. \end{aligned}$$

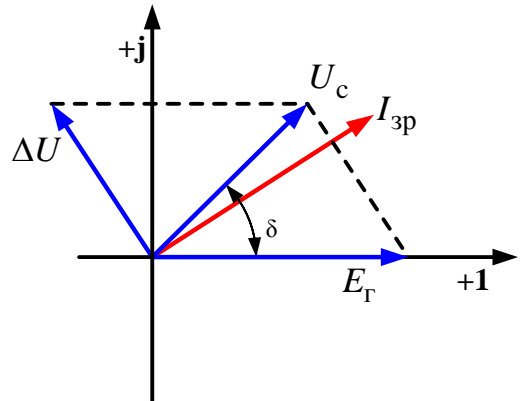


$$3. U_c \neq E_r; \delta \neq 0; f_c = f_r; \dot{U}_c = \dot{U}_c \cdot e^{j \cdot \delta}.$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{3p} &= \sqrt{\frac{\dot{U}_c^2}{x_{\Sigma}^2} \cdot \sin^2 \delta + \frac{\dot{E}_r^2}{x_{\Sigma}^2} + \frac{\dot{U}_c^2}{x_{\Sigma}^2} \cdot \cos^2 \delta - 2 \cdot \frac{\dot{E}_r \cdot \dot{U}_c}{x_{\Sigma}^2} \cdot \cos \delta} = \\ &= \sqrt{\frac{\dot{E}_r^2 + \dot{U}_c^2 - 2 \cdot \dot{E}_r \cdot \dot{U}_c \cdot \cos \delta}{x_{\Sigma}^2}}. \end{aligned}$$

Або

$$\begin{aligned} \dot{I}_{3p} &= \frac{\Delta \dot{U}}{j \cdot x_{\Sigma}} = \frac{\dot{U}_c \cdot e^{j \cdot \delta} - \dot{E}_r}{j \cdot x_{\Sigma}} = \\ &= \frac{\dot{U}_c \cdot \cos \delta + j \cdot \dot{U}_c \cdot \sin \delta - \dot{E}_r}{j \cdot x_{\Sigma}} = \\ &= \frac{\dot{U}_c \cdot \sin \delta}{x_{\Sigma}} + j \cdot \left(\frac{\dot{E}_r}{x_{\Sigma}} - \frac{\dot{U}_c \cdot \cos \delta}{x_{\Sigma}} \right). \end{aligned}$$



4. При різних частотах f_c і f_r , а також U_c і E_r різниця:

$$\Delta \dot{E} = \dot{U}_c - \dot{E}_r,$$

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_c \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) - \dot{E}_r \cdot \sin(\omega_2 \cdot t),$$

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1, \omega_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_2.$$

Якщо $U_c = E_r$:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_c \cdot (\sin(\omega_1 \cdot t) - \sin(\omega_2 \cdot t)) = 2 \cdot \dot{U}_c \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \cdot t\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \cdot t\right).$$

Крива амплітудних значень напруги биття обмежена штриховою лінією:

$$\dot{U}_s = 2 \cdot \dot{U}_c \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \cdot t\right) = 2 \cdot \dot{U}_c \cdot \left(\frac{\omega_s}{2} \cdot t\right).$$

де \dot{U}_s – значення кривої напруги биття в кожний момент t ; ω_s – різниця кутів швидкості.

$$\Delta \dot{E} = \dot{U}_c - \dot{E}_T, \Delta e = u_c - e_T, \delta = \omega_s \cdot t.$$

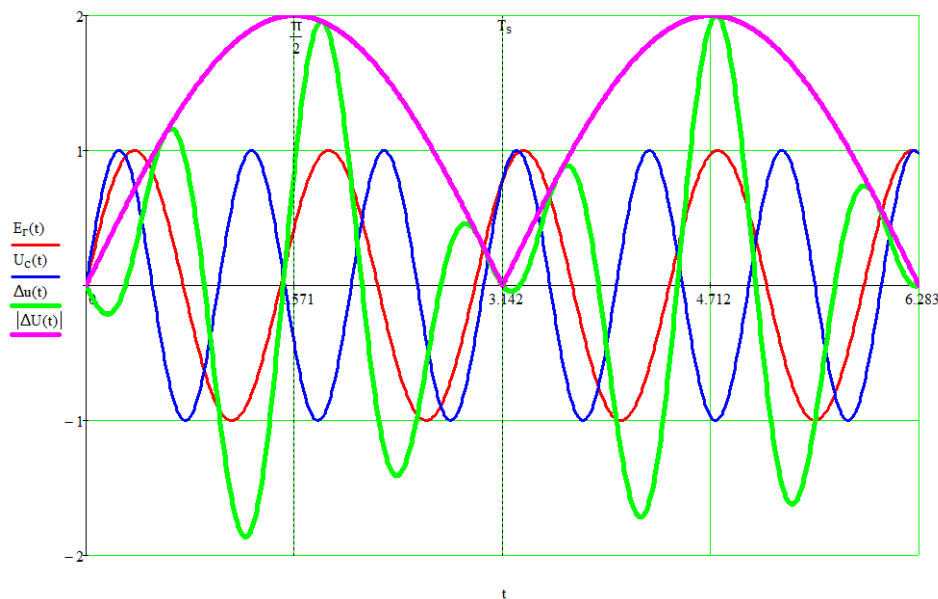


Рисунок 4.2 – Крива амплітудних значень напруги биття

Оптимальне значення коли δ проходить через 0.

Крива змінюється від 0 до $2 \cdot \dot{U}_c$. Час повного циклу зміни напруги биття від нуля через максимум до нуля, називається періодом ковзання

$$T_s = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_s} = \frac{1}{f_s}.$$

Точна синхронізація допускається при

$$|f_T - f_c| \leq 0,2 \div 0,3 \text{ (Гц)}; \frac{\Delta U_{\text{доп}}}{U_{\text{ст}}} = 0,1 \text{ (в.о.)}; t_{\text{доп}} = 0,1 \div 0,16 \text{ (сек.)}.$$

Синхронізація буде без стрибка зрівнювального струму, якщо вона виникає, коли крива биття $\dot{U} = 0$. Ця точка оптимуму.

4.2.2 Спосіб самосинхронізації

Описані вище способи включення в мережу синхронних генераторів відносно складні, потребують більшої точності і головне – затрати часу. Тому в енергосистемах використовують включення синхронних генераторів в мережу за методом самосинхронізації. Суть методу полягає в наступному: генератор приводиться в обертання двигуном приводу з швидкістю, яка може відрізняється від синхронної $(2 \div 3) \%$ і включається в мережу без збудження, причому обмотка ротора, для виключення перенапруги в момент включення, замикається накоротко або через невеликий опір; асинхронні моменти підтягують ТГ до малих ковзань після цього одразу ж після включення генератора в мережу при малих ковзаннях, подається збудження, і генератор втягується в синхронізм (виникає синхронний момент) [1, 7, 8].

Таким чином, при включенні генератора за методом самосинхронізації різниця ЕРС рівна напрузі мережі ($\Delta E = U_c - E_r = U_c$), а ротор генератора обертається з швидкістю, яка дещо відрізняється від синхронної швидкості, з якою обертається магнітне поле статора. В деяких умовах в статорі спостерігається стрибок струму, що в декілька разів перевищує номінальний струм, а на валу генератора виникають механічні зусилля, але останні невеликі і, як показує досвід, не створюють небезпеки для машин.

Випробування, що виконані в ряді енергосистем по включенню генераторів потужністю до 200 000 кВт методом самосинхронізації, показали, що включення за цим методом протікають успішно як у випадку неявнополюсних, так і явнополюсних генераторів може використовуватися і для синхронних компенсаторів. Час, за який струм статора знижується до свого номінального значення, коливається в межах 1-7 сек.

В момент включення незбудженої СМ в мережу має місце стрибок струму статора і зниження напруги в мережі:

$$I_{зр} = \frac{U_c}{x_d'' + x_c},$$

$$i_{зр} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot \frac{U_c}{x_d'' + x_c}.$$

Якщо ТГ включити на шини НП ($x_c'' = 0$), то

$$i_{зр} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot \frac{U_c}{x_d''}.$$

Однак струм і відповідна електродинамічна сила (вона рівна квадрату струму) менше чим при КЗ на виводах ТГ:

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot \frac{E_q''}{x_d''}.$$

Це пояснюється тим, що струм статора в момент включення визначається тільки напругою мережі $U_{ф.с}$ (параметр не збуджений і його ЕРС = 0), яке менше ЕРС нормального режиму і сумарними опорами мережі. Окрім того, запуск при самосинхронізації вільних періодичних складових струмів виникає швидше, чим при КЗ, так як ротор замкнутий на розрядний опір. Тому навіть помилкові включення машини в мережу з більшим ковзанням, коли тривалість дії підвищених струмів достатньо велика, не створює небезпеки.

Випробування показали, що обмотка статора в механічному відношенні не реагує на перший пік струму включення: деформація досягає найбільшого значення тільки через декілька періодів після включення. Оскільки вільні надперехідні складові струму статора швидко затухають, при оцінці допустимості самосинхронізації початкове значення періодичної складової струму $I_{п0}$ і початкове значення напруги на шинах ТГ визначає по перехідному опору:

$$I_{зр} = \frac{U_c}{x_d' + x_c}, U_{поч.} = \frac{U_c \cdot x_d'}{x_d' + x_c}.$$

Електродинамічні сили, що діють на обмотку статора, неявнополюсних машин мають відносно більшу потужну дію і менше реактивний опір, як визначають початкові значення струму.

Зниження U на шинах власних потреб електростанцій може досягати 50 % від номінального значення.

Застосування метода самосинхронізації значно спрощує процес включення. Такий спосіб включення ТГ на паралельну роботу має ряд переваг перед способом точної синхронізації:

1. Простота, виключає можливість яких-небудь помилок з сторони персоналу, і відсутність в зв'язку з цим вимог до високої кваліфікації персоналу, який виконує включення генератора.

2. Відсутність можливості пошкодження обмоток статорів при помилковому включенні генератора.

3. Простота автоматизації процесу включення генераторів.

4. Швидкість включення, так як час необхідний для включення генератора на паралельну роботу способом самосинхронізації, обмежується лише часом розвертання генератора і власними часами включення вимикача і АГП, що особливо важливо в аварійних ситуаціях.

5. Можливість включення генераторів на паралельну роботу при глибоких зменшеннях частоти і напруги.

До недоліків методу самосинхронізації відносяться:

1. Неминучий стрибок струму, що виникає в момент включення незбудженого генератора;

2. Короткочасне зниження напруги в момент включення.

Для потужних блочних електростанцій спосіб самосинхронізації допустимий, однак вигреш в часі у порівнянні з пуском блока малий. Тому в теперішній час в нормальних умовах на всіх електростанціях, як правило, застосовується спосіб точної синхронізації, а самосинхронізація може лише використовуватися в аварійних режимах (наприклад, при втраті збудження ТГ, при включенні резервних ТГ і т.д.).

4.3 Приклади типових задач

Приклад № 4.1 Генератор електростанції ТВФ-60-2 включається в мережу способом точної синхронізації. При неправильній дії синхронізуючого

пристрою виникло несинхронне включення генератора в мережу, коли кут δ між напругами генератора і мережі дорівнює 180° . Визначити зрівняльний струм $I_{зр}$, якщо зовнішній опір $x_{зов.}$ дорівнює 0,48 (в.о.), надперехідний опір генератора x_d'' дорівнює 0,22 (в.о.), а напруга системи $U_c = E_q'' = 1,05$ (в.о.).

Розв'язок:

Якщо кут $\delta = 180^\circ$ то зрівняльний струм визначається:

$$I_{зр} = \frac{U_c + E_q''}{x_d'' + x_{зов.}}$$

За умовою задачі: $x_d'' = 0,22$ (в.о.), $x_{зов.} = 0,48$ (в.о.), $U_c = E_q'' = 1,05$ (в.о.).

Тоді,

$$I_{зр} = \frac{2 \cdot 1,05}{0,22 + 0,48} = 3,0 \text{ (в.о.)}$$

Висновок. Зрівняльний струм при неправильній дії синхронізуючого пристрою становить 3,0 (в.о.).

Приклад № 4.2 Генератор ТВФ-100-2, що працює в блоці з трансформатором, вмикається в мережу способом самосинхронізації. Визначити зрівняльний струм $I_{зр}$, якщо опір генератора x_d'' дорівнює 0,20 (в.о.), напруга системи $U_c = 1,05$ (в.о.), а приведені до потужності генератора опір блочного трансформатора $x_{тр.}$ і еквівалентний опір системи x_c складають відповідно 0,08 і 0,04 (в.о.).

Розв'язок:

Зрівняльний струм при самосинхронізації визначається за формулою

$$I_{зр} = \frac{U_c}{x_d'' + x_{тр.} + x_c}$$

За умовою задачі: $x_d'' = 0,20$ (в.о.), $x_{тр.} = 0,08$ (в.о.), $x_c = 0,04$ (в.о.), $U_c = 1,05$ (в.о.).

Тоді:

$$I_{зр} = \frac{1,05}{0,20 + 0,08 + 0,04} = 3,28 \text{ (в.о.)}.$$

Висновок. Зрівняльний струм при включенні в мережу способом самосинхронізації становить 3,28 (в.о.).

Приклад № 4.3 Генератор ТВФ-100-2, що працює в блоці з трансформатором, вмикається в мережу способом самосинхронізації. Визначити залишкову напругу на його виводах $U_{зал.}$, якщо опір генератора x_d'' дорівнює 0,20 (в.о.), напруга системи $U_c = 1,05$ (в.о.), а приведені до потужності генератора опір блочного трансформатора $x_{тр.}$ і еквівалентний опір системи x_c складають відповідно 0,08 і 0,04 (в.о.).

Розв'язок:

Залишкова напруга на виводах генератора при його самосинхронізації з мережею (системою) визначається

$$U_{зал.} = I_{зр} \cdot x_d'',$$

$$I_{зр} = \frac{U_c}{x_d'' + x_{тр.} + x_c}.$$

За умовою задачі: $x_d'' = 0,20$ (в.о.), $x_{тр.} = 0,08$ (в.о.), $x_c = 0,04$ (в.о.), $U_c = 1,05$ (в.о.).

Тоді,

$$U_{зал.} = \frac{U_c}{x_d'' + x_{тр.} + x_c} \cdot x_d'' = \frac{1,05}{0,20 + 0,08 + 0,04} \cdot 0,20 = 0,656 \text{ (в.о.)}.$$

Висновок. Залишкова напруга на виводах генератора при його самосинхронізації з мережею (системою) становить 0,656 (в.о.).

Приклад № 4.4 Генератор ТВФ-100-2 блоку електростанції вмикається способом самосинхронізації. Визначити величину опору системи x_c при якому зрівняльний струм при самосинхронізації в три з половиною рази перевищує номінальний. В розрахунках прийняти, що над перехідний опір генератора x_d''

дорівнює 0,20 (в.о.), $U_c = 1,05$ (в.о.), а опір блочного трансформатора складає 0,06 (в.о.).

Розв'язок:

Зрівняльний струм при самосинхронізації визначається так

$$I_{зр} = \frac{U_c}{x_d'' + x_{тр.} + x_c}.$$

За умовою задачі: $x_d'' = 0,20$ (в.о.), $x_{тр.} = 0,06$ (в.о.), $U_c = 1,05$ (в.о.),
 $I_{зр} = 3,50$ (в.о.).

Тоді,

$$x_c = \frac{U_c}{I_{зр}} - x_d'' - x_{тр.} = \frac{1,05}{3,5} - 0,2 - 0,06 = 0,04 \text{ (в.о.)}.$$

Висновок. Величина опору системи має бути 0,04 (в.о.).

4.4 Задачі для самостійного розв'язання

Задача № 4.1 Генератор ТВФ-60-2, що працює в блоці з трансформатором, вмикається в мережу способом самосинхронізації. Визначити зрівняльний струм $I_{зр}$, якщо опір генератора x_d'' дорівнює 0,195 (в.о.), напруга системи $U_c = 1,05$ (в.о.), а приведені до потужності генератора опір блочного трансформатора $x_{тр.}$ і еквівалентний опір системи x_c складають відповідно 0,05 і 0,03 (в.о.).

Задача № 4.2 Генератор ТВФ-100-2, що працює в блоці з трансформатором, вмикається в мережу способом самосинхронізації. Визначити залишкову напругу на його виводах $U_{зал.}$, якщо опір генератора x_d'' дорівнює 0,191 (в.о.), напруга системи $U_c = 1,05$ (в.о.), а приведені до потужності генератора опір блочного трансформатора $x_{тр.}$ і еквівалентний опір системи x_c складають відповідно 0,07 і 0,05 (в.о.).

Задача № 4.3 Генератор електростанції ТГВ-300 включається в мережу способом точної синхронізації. При неправильній дії синхронізуючого

пристрою виникло несинхронне включення генератора в мережу, коли кут δ між напругами генератора і мережі дорівнює 180° . Визначити зрівняльний струм $I_{зр}$, якщо зовнішній опір $x_{зов.}$ дорівнює 0,50 (в.о.), надперехідний опір генератора x_d'' дорівнює 0,195 (в.о.), а напруга системи $U_c = E'' = 1,05$ (в.о.).

Задача № 4.4 Генератор електростанції ТВВ-320-2 включається в мережу способом точної синхронізації. При неправильній дії синхронізуючого пристрою виникло несинхронне включення генератора в мережу, коли кут δ між напругами генератора і мережі дорівнює 150° . Визначити зрівняльний струм $I_{зр}$, якщо зовнішній опір $x_{зов.}$ дорівнює 0,60 (в.о.), надперехідний опір генератора x_d'' дорівнює 0,173 (в.о.), напруга системи $U_c = 1,05$ (в.о.), надперехідна ЕРС генератора $E_q'' = 1,03$ (в.о.)

Задача № 4.5 Генератор електростанції ТВВ-220-2 включається в мережу способом точної синхронізації. При неправильній дії синхронізуючого пристрою виникло несинхронне включення генератора в мережу, коли кут δ між напругами генератора і мережі дорівнює 135° . Визначити зрівняльний струм $I_{зр}$, якщо зовнішній опір $x_{зов.}$ дорівнює 0,55 (в.о.), надперехідний опір генератора x_d'' дорівнює 0,200 (в.о.), напруга системи $U_c = 1,03$ (в.о.), надперехідна ЕРС генератора $E_q'' = 1,05$ (в.о.)

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 5

«ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОЇ ТРИВАЛОСТІ КОРОТКОЧАСНИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА»

5.1 Мета та зміст заняття

Мета: Формування навичок та умінь аналізу тривалості короточасних перевантажень.

Навчальні запитання:

1. Особливості тривалості короточасних перевантажень для синхронних генераторів.
2. Засоби усунення короточасних перевантажень.
3. Аналіз процесу короточасних перевантажень синхронних генераторів.
4. **Задача** – Розрахунок допустимої тривалості короточасних перевантажень.

5.2 Короткі теоретичні відомості

В процесі експлуатації ТГ періодично виникають значні короточасні перевантаження як по струму ротора, так і по струму статора. Причини перевантажень [1, 6, 7, 9]:

Раптовий вихід з ладу одного генератора станції і відключення його РЗ від одно- та багатофазних КЗ. При КЗ в мережі перевантаження визначається близькістю і видом КЗ, а також форсуванням збудження АРВ. Тривалість перевантаження при КЗ залежить від часу дії захисту і відновлення напруги після відключення КЗ. Великі періоди перевантаження генератора відбуваються при АР в енергосистемі або при асинхронних коливаннях. Вони можуть досягати за струмом 2-3-х кратних величин і тривати до спрацювання захисту від АР або подільної автоматики. Час спрацювання цих пристроїв встановлюється з урахуванням запобігання пошкодження обладнання (були випадки $z_{\text{авар.}} = 2-3$ (хв.)).

Відключення деяких генераторів станції ПА системою автоматикою. При відмові найбільш відповідальних і завантажених ЛЕП ПА діє для запобігання збільшенню перетоків і порушення стійкості на відключення частини генераторів станції. Однак при цьому відбувається перевантаження решти ТГ, і своєчасно усунути його повинен ОП, так як спеціальна автоматика для цього передбачається не завжди.

При відділенні дефіцитної енергосистеми від об'єднання або при виділенні частини енергосистеми з дефіцитом потужності частота падає і працює АЧР, відключаючи споживачів. Однак перевантаження генераторів дією АЧР часто не усувається і тому необхідно оперативне втручання персоналу.

Помилкові дії оперативного персоналу в процесі розрахунків роботи ТГ на рівнях диспетчерського графіка навантаження, коли потужність $S_{ТГ} > S_{доп.}$.

Збільшення одиниці потужності ТГ за рахунок підвищення щільності струму в обмотках статора і ротора, значно ускладнило проблему короткочасних перевантажень і вимагає їх зменшення як по величині так і за часом.

При аналізі режимів перевантаження важливо з'ясувати час, за який буде досягнутий граничний перегрів, і за який – буде досягнутий граничний нагрів, і який – представлятиме тривалість перевантаження.

При безпосередньому охолодженні (водяному) обмотки статора її нагрів при короткочасних перевантаженнях йде практично за ідентичним законом, істотно відхиляючись від адіабати тільки після збільшення температури до 80 % нового сталого значення. Тому рівняння теплового балансу [8, 9]:

$$\Delta P = c \cdot G \cdot \frac{d\Delta\theta}{dt}.$$

Рівняння можна записати:

$$\Delta P = \Delta I^2 \cdot R \cdot K_{\phi} = c \cdot G \cdot \frac{d\Delta\theta}{dt}. (1)$$

де R – опір обмотки постійного струму; ΔI – перевищення струму в обмотці; K_{ϕ} – коефіцієнт Фільда, що враховує збільшення активного опору обмотки через витіснення струму

Коефіцієнт K_{ϕ} дорівнює 1 для обмотки ротора і змінюється в широких межах для обмотки статора, де він вищий у верхньому стрижні, ніж у нижньому. При однакових розмірах верхнього і нижнього стрижнів і елементарних провідників в них, додаткові втрати в верхньому стрижні в 7 разів перевищують додаткові втрати в нижньому стрижні.

У ТГ з безпосередньою системою охолодження внаслідок більш ефективного відводу тепла K_{ϕ} більш, ніж ТГ з непрямою системою охолодження.

$K_{\phi} = 1,3$ – для ТГ з непрямою системою охолодження і

$K_{\phi} = 1,6 - 2,0$ – для ТГ безпосередньою системою охолодження.

$$K_{\phi n} = \frac{1}{4} \cdot (K_{\phi} - 1) + 1; K_{\phi v} = \frac{7}{4} \cdot (K_{\phi} - 1) + 1.$$

де K_{ϕ} – середнє значення коефіцієнта для всього паза.

Зміна перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища при адіабатному нагріванні як результат розв'язання рівняння(1) описується:

$$(\Delta\theta - \Delta\theta_0) = \left(\frac{d\Delta\theta}{dt} \right)_{\text{адіаб.}} \cdot t_{\text{доп.}} \cdot (2)$$

Якщо виходити з умови збереження однакового допустимого додаткового перевищення температури для різних короткочасних перевантажень обмотки, а саме

$$(\Delta\theta - \Delta\theta_0) = \left(\frac{d\Delta\theta}{dt} \right)_{\text{адіаб.}} \cdot t_{\text{доп.}} = \text{const.} \cdot (3)$$

то з (2) і (3) при відомому часу $t_{\text{доп.1}}$ для одного значення перевантаження K_{j1} для ТГ з непрямим охолодженням неважко визначити гранично допустимий час $t_{\text{доп.2}}$ для іншого значення перевантаження K_{j2} :

$$t_{\text{доп.2}} = t_{\text{доп.1}} \cdot \frac{(K_{j1})^2 - 1}{(K_{j2})^2 - 1}.$$

Цим простим співвідношенням користуються в практиці експлуатації для оперативної оцінки допустимих перевантажень обмоток машин.

Таблиця 5.1 – Допустима кратність і тривалість перевантаження ТГ по струму статора

Тривалість перевантаження, хв., не більше	Допустима кратність перевантаження по відношенню до $I_{\text{ном}}$		
	При непрямому охолодженні обмотки статора (серія ТВФ)	При безпосередньому охолодженні обмотки статора	
		водою	воднем
60	1,1	1,1	---
15	1,15	1,15	---
10	---	---	1,1
6	1,2	1,2	1,15
5	1,25	1,25	---
4	1,3	1,3	1,2
3	1,4	1,35	1,25
2	1,5	1,4	1,3
1	2	1,5	1,5

Таблиця 5.2 – Допустима кратність і тривалість перевантаження ТГ по струму ротора

Тривалість перевантаження, хв., не більше	Допустима кратність перевантаження по відношенню до $I_{\text{ном}}$	
	ТВФ, крім ТВФ-120-2	ТВФ-120-2, ТГВ, ТВВ (до 500 МВт включно)
60	1,06	1,06
10	1,1	1,1

4	1,2	1,2
1	1,7	1,5
1/2	2	---
1/3	---	2

Менша здатність навантаження ТГ з безпосереднім охолодженням порівняно з непрямим охолодженням пояснюється більш високими номінальною густиною струму в їх обмотках і нерівномірністю нагріву обмотки при перевантаженнях через підігрів охолоджувального середовища в каналах.

Знаючи по приладах або по запису аварійного осцилографа перевантаження, можна за допомогою наведеного виразу оцінити перегрів під час перевантаження.

Таблиця 5.3 – Постійні часу нагрівання обмоток ротора і статора ТГ, хв

Потужність ТГ, МВт	Обмотка ротора з безпосереднім охолодженням	Обмотка статора з безпосереднім охолодженням
	t_{cp}	t_{cp}
150	2,5	0,8
200	2	0,9
300	1,9	1
500	2,3	0,5

Крім вказівок ГКД 34.20.507-2003 використовуються дані ГОСТ 533-2000 які встановлюють, що ТГ з безпосереднім охолодженням обмоток статора без пошкодження та залишкових деформацій повинні витримувати в нагрітому стані перевищення струму статора на 50% протягом 1 хвилини і допускати дію двократних номінальних струмів збудження на час не більше 20 секунд для ТГ потужністю до 500 МВт включно, 15 секунд для ТГ потужністю 800 і 1000 МВт і не менше 10 секунд для ТГ потужністю 1200 МВт.

Для ТГ ТВВ-800-2 допускається перевищення струму статора в тих же межах, що в таблиці, кратність струму ротора зменшена: в 2 рази допускається в плинні 15 с; в 1,5 рази - 45 с; в 1,2 рази - 3 хв.; в 1,1 рази - 8 хв. 20 с; в 1,06 рази – тривалий період.

5.3 Приклади типових задач

Приклад № 5.1В енергосистемі, що містить ТЕЦ з генераторами типу ТВФ-60-2 виникло трифазне КЗ, що призвело до зростання струму статора генератора станції в 1,7 рази. Визначити гранично допустиму тривалість перевантаження струмом статора $t_{\text{доп.2}}$, якщо допустима тривалість 1,5 перевантаження генератора струмом статора $t_{\text{доп.1}}$ складає 60 сек.

Розв'язок:

Гранично допустима тривалість перевантаження струмом статора визначається за формулою

$$t_{\text{доп.2}} = t_{\text{доп.1}} \cdot \frac{(K_{j1})^2 - 1}{(K_{j2})^2 - 1}.$$

За умовою задачі $K_{j1} = 1,5$ (в.о.), $K_{j2} = 1,7$ (в.о.), $t_{\text{доп.1}} = 60$ (сек.).

Тоді,

$$t_{\text{доп.2}} = 60 \cdot \frac{(1,5)^2 - 1}{(1,7)^2 - 1} = 39,70 \text{ (сек.)}.$$

Висновок. Гранично допустима тривалість перевантаження струмом статора становить 39,70 сек.

Приклад № 5.2 В результаті переходу в асинхронний режим одного з генераторів ТЕЦ при втраті збудження напруга на виводах сусідніх генераторів суттєво знизилась, що привело до спрацювання форсування збудження генератора типу ТВФ-100-2 і відповідного зростання струму ротора в 1,8 рази. Визначити гранично допустиму тривалість перевантаження струмом ротора $t_{\text{доп.2}}$, якщо допустима тривалість двократного перевантаження ротора генератора $t_{\text{доп.1}}$ складає 30 сек.

Розв'язок:

Гранично допустима тривалість перевантаження струмом ротора визначається за формулою

$$t_{\text{доп.2}} = t_{\text{доп.1}} \cdot \frac{(K_{j1})^2 - 1}{(K_{j2})^2 - 1}.$$

За умовою задачі $K_{j1} = 2,0$ (в.о.), $K_{j2} = 1,8$ (в.о.), $t_{\text{доп.1}} = 30$ (сек.).

Тоді,

$$t_{\text{доп.2}} = 30 \cdot \frac{(2,0)^2 - 1}{(1,8)^2 - 1} = 40,18 \text{ (сек.)}.$$

Висновок. Гранично допустима тривалість перевантаження струмом ротора становить 40,18 сек.

Приклад № 5.3 При виділенні частини енергосистеми, що містить ТЕЦ з генераторами типу ТВФ на автономну роботу з дефіцитом активної потужності виникло перевантаження генераторів струмами статора, причому струм статора збільшився в 1,6 рази. Визначити гранично допустиму тривалість перевантаження струмом статора $t_{\text{доп.2}}$, якщо допустима тривалість $t_{\text{доп.1}}$ півтора кратного перевантаження струмом статора складає 60 сек.

Розв'язок:

Гранично допустима тривалість перевантаження струмом статора визначається за формулою

$$t_{\text{доп.2}} = t_{\text{доп.1}} \cdot \frac{(K_{j1})^2 - 1}{(K_{j2})^2 - 1}.$$

За умовою задачі $K_{j1} = 1,5$ (в.о.), $K_{j2} = 1,6$ (в.о.), $t_{\text{доп.1}} = 60$ (сек.).

Тоді,

$$t_{\text{доп.2}} = 60 \cdot \frac{(1,5)^2 - 1}{(1,6)^2 - 1} = 48,08 \text{ (сек.)}.$$

Висновок. Гранично допустима тривалість перевантаження струмом статора становить 48,08 сек.

Приклад № 5.4 При виділенні частини енергосистеми, що містить ТЕЦ з генераторами типу ТВФ на автономну роботу з дефіцитом реактивної потужності виникло перевантаження генераторів струмами ротора, причому струм ротора збільшився в 1,9 рази. Визначити гранично допустиму тривалість перевантаження струмом ротора $t_{\text{доп.2}}$, якщо допустима тривалість $t_{\text{доп.1}}$ двократного перевантаження струмом ротора становить 30 сек.

Розв'язок:

Гранично допустима тривалість перевантаження струмом ротора визначається за формулою

$$t_{\text{доп.2}} = t_{\text{доп.1}} \cdot \frac{(K_{j1})^2 - 1}{(K_{j2})^2 - 1}.$$

За умовою задачі $K_{j1} = 2,0$ (в.о.), $K_{j2} = 1,9$ (в.о.), $t_{\text{доп.1}} = 30$ (сек.).

Тоді,

$$t_{\text{доп.2}} = 30 \cdot \frac{(2,0)^2 - 1}{(1,9)^2 - 1} = 34,48 \text{ (сек.)}.$$

Висновок. Гранично допустима тривалість перевантаження струмом ротора становить 34,48 сек.

5.4 Задачі для самостійного розв'язання

Задача № 5.1В енергосистемі, що містить ТЕС з генераторами типу ТГВ, які вже відпрацювали граничний ресурс. Планується виконати їх заміну на більш сучасніші надійні генератори. Необхідно також змоделювати та перевірити гранично допустиму тривалість аварійних режимів експлуатації для правильного налаштування уставок спрацювання протиаварійної автоматики. Розглядаються наступні аварійні режими експлуатації при наступних умовах:

1. Трифазне КЗ, що призвело до зростання струму статора генератора станції в 1,6 рази, півторакратне перевантаження струмом статора становить $t_{\text{доп.1}} = 60$ (сек.);

2. Асинхронний режим одного з генераторів ТЕС при втраті збудження, напруга на виводах сусідніх генераторів суттєво знизилась, що спричинило спрацювання форсування збудження генератора і відповідного зростання струму ротора в 1,8 рази, допустима тривалість двократного перевантаження ротора генератора $t_{\text{доп.1}} = 20$ (сек.);

3. Виділення частини енергосистеми, що містить ТЕС з генераторами на автономну роботу з дефіцитом активної потужності спричинило перевантаження генераторів струмами статора, причому струм статора збільшився в 1,9 рази, допустима тривалість двократного перевантаження струмом статора становить $t_{\text{доп.1}} = 60$ (сек.).

4. Виділення частини енергосистеми, що містить ТЕС з генераторами на автономну роботу з дефіцитом реактивної потужності спричинило перевантаження генераторів струмами ротора, причому струм ротора збільшився в 1,4 рази, допустима тривалість півторакратного перевантаження струмом ротора становить $t_{\text{доп.1}} = 60$ (сек.).

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 6

«РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ»

6.1 Мета та зміст заняття

Мета: Формування навичок та умінь аналізу характеристик синхронних генераторів при несиметричних режимах роботи.

Навчальні запитання:

1. Особливості несиметричних режимів роботи синхронних генераторів синхронних генераторів.
2. Алгоритм розрахунку характеристик синхронних генераторів при несиметричних режимах роботи.
3. Аналіз отриманих характеристик синхронних генераторів при несиметричних режимах роботи.
4. **Задача** – Розрахунок характеристик синхронних генераторів при несиметричних режимах роботи.

6.2 Короткі теоретичні відомості

При експлуатації виникають короткочасні, а іноді й тривалі несиметричні режими. До короткочасних несиметричних режимів належать усі види несиметричних коротких замикань в енергосистемі [1, 2, 6, 7]. Тривалі несиметричні режими можуть існувати у випадку аварійного обриву проводів ошикування підстанцій або ліній електропередачі, відмов під час вмикання або вимикання однієї фази вимикачів, вимкнення однієї з фаз всередині трансформаторів, нерівномірного завантаження фаз однофазними струмоприймачами (електрична тяга, електричні печі і т. ін.).

У разі виникнення несиметричних режимів обмотками статора турбогенератора починають проходити струми зворотної послідовності. Сумарний магнітний потік статора у несиметричному режимі складається з двох потоків: потоку прямої послідовності, який обертається синхронно з

ротором генератора, і потоку зворотної послідовності, утвореного струмами зворотної послідовності, який обертається відносно ротора з подвійною кутовою швидкістю.

Магнітний потік зворотної послідовності перетинає обмотку, бочку, клини, бандажні кільця і наводить в них струми подвійної частоти. Оскільки індуковані струми мають частоту 100 Гц, вони проходять дуже тонким поверхневим шаром металу. Спричинені ними додаткові втрати потужності в роторних контурах створюють підвищене нагрівання поверхневого шару бочки ротора, кінцевих клинів обмотки ротора та інших елементів торцевих зон ротора.

Теплова дія струмів подвійної частоти найбільш небезпечна для турбогенераторів, оскільки їх ротор виконується з цільної поковки і має велику поверхню, тому наведені струми можуть бути великими. Додаткове нагрівання обмотки ротора в таких режимах небезпечно також для її ізоляції. Механічні напруження в турбогенераторах за тривалих несиметричних режимів незначні і майже не впливають на їх механічну міцність.

У гідрогенераторах унаслідок того, що немає масивних частин на роторі, струми подвійної частоти і відповідно нагрівання ротора менші, ніж у турбогенераторах. Але додаткові механічні напруження вібрації у гідрогенераторів більші, ніж у турбогенераторів.

Тривала робота генератора з різними струмами у фазах допустима, якщо жоден зі струмів не перевищує номінального струму статора. При цьому несиметрія струмів, що визначається коефіцієнтом несиметрії α , не повинна перевищувати деякого граничного значення. Якщо $I_A = I_C = I_{\text{ном.}}$, а $I_B < I_A$, то коефіцієнтом несиметрії α визначається так

$$\alpha = \frac{I_A - I_B}{I_A} \cdot 100 \%$$

Для турбогенераторів допускається тривала робота в несиметричному режимі, якщо коефіцієнт несиметрії $\alpha < 12 \%$, а для гідрогенераторів з непрямою системою охолодження потужністю до 125 МВ·А і синхронних

компенсаторів різниця струмів у фазах не повинна перевищувати 20 %. Для гідрогенераторів потужністю вищою ніж 125 МВ·А $\alpha < 15\%$, а для гідрогенераторів з безпосереднім водяним охолодженням обмотки статора різниця струмів у фазах не повинна перевищувати 10 %. У всіх випадках у жодній із фаз струм не повинен бути більшим від номінального. При цьому струм зворотної послідовності приблизно становитиме 7,5-10 % від струму прямої послідовності для гідрогенераторів з непрямою системою охолодження і 5-7 % для гідрогенераторів з безпосередньою системою охолодження і турбогенераторів усіх типів.

Більша величина несиметрії для гідрогенераторів і синхронних компенсаторів допускається, оскільки додаткові втрати в роторах з явновираженими полюсами менші, ніж у роторах турбогенераторів.

Крім тривало допустимих несиметричних режимів для практики в умовах експлуатації необхідно знати здатність генераторів витримувати короточасні теплові перевантаження ротора несиметричних режимах, що виникають (наприклад, для вибору уставок релейного захисту).

При виникненні несиметрії, наприклад, при несиметричних КЗ вище тривало допустимої обмежується час роботи ТГ, після якого він повинен бути відключений від мережі. Так як цей час залежить від фактичної несиметрії, то допустиме короточасне навантаження струмами зворотної послідовності характеризується добутком $I_{2*}^2 \cdot t_{\text{доп.}}$, який за умовами термічної стійкості елементів ротора не повинен перевищувати деякої встановленої величини [6, 7]

$$I_{2*}^2 \cdot t_{\text{доп.}} \leq T,$$

де $t_{\text{доп.}}$ – допустима тривалість проходження струму; I_{2*} – струм зворотної послідовності в частках від номінального; T – інтегральний критерій термічної стійкості турбогенератора, с.

Для роторів ТГ з непрямим охолодженням на підставі тривалого досвіду експлуатації і спеціально проведених експериментів було встановлено наступний критерій термічної стійкості при короточасному перевантаженні

$$I_{2*}: I_{2*}^2 \cdot t_{\text{доп.}} \leq 30.$$

При встановленні цього критерію виходили з граничного допустимого нагрівання елементів торцевої зони ротора 200 °С і при відсутності пошкодження цих елементів.

З переходом до безпосереднього охолодження обмоток і збільшенням лінійних струмових навантажень A_s при тих же відносних значеннях струму I_{2*} збільшуються абсолютні втрати в роторі, тобто збільшується енергія, яка виділяється в роторі. Так як ця остання пропорційна I_{2*}^2 , яка в свою чергу пов'язаний лінійно з A_s , то абсолютні втрати в роторі зростають пропорційно $(A_s)^2$. З іншого боку геометрія ротора і його термостійкість зі збільшенням A_s практично не змінюється. Отже, для збереження температури стосовно ТГ, які тривало використовуються потрібно праву частину критерію зменшити пропорційно квадрату збільшення A_s .

Відповідно до цього загальними міркуваннями в табл. 6.1 представлені інтегральні критерії термічної стійкості для ТГ різних типів.

Таблиця 6.1 – Інтегральні критерії термічної стійкості для ТГ різних типів

Тип турбогенератора	Лінійне навантаження, %	Інтегральний критерій, сек.
ТВ2	100	30
ТВФ	140	15
ТВВ та ТГВ	190	8

Для ТГ з безпосереднім охолодженням статора і ротора з $P < 800$ МВт $I_{2*}^2 \cdot t_{\text{доп.}} = 8$ (сек.), а для ТГ потужністю > 800 МВт $I_{2*}^2 \cdot t_{\text{доп.}} = 6$ (сек.).

Всі ТГ, що тривало використовуються забезпечені в даний час захистом від струмів зворотної послідовності з залежною характеристикою, яка у разі перевищення величини $I_{2*}^2 \cdot t_{\text{доп.}}$ зазначених вище значень повинна діяти на їх відключення.

Оскільки при досить тривалому протіканні I_2 його значення може коливатися в деяких межах, захист враховує середньоквадратичне значення цього струму

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{t} \cdot \int_0^t (I_2(t))^2 dt}.$$

Щоб уникнути зайвих відключень ТГ при виникненні відносно невеликий несиметрії, яка може бути усунена диспетчерськими заходами доцільно при спрацьовуванні цього захисту на сигнал оцінити значення I_2 і розвантажити ТГ, щоб струм $I_2 < 8\% \cdot I_{\text{ном.}}$.

Струм I_2 повинен бути розрахований для кожного конкретного випадку.

6.3 Приклади типових задач

Приклад № 6.1 Генератор енергоблоку електростанції потужністю 800 МВт несе навантаження. При експлуатації виникає неповнофазне вимикання блочним вимикачем В (вимикання вимикача двома фазами А і В). Струми в фазах генератора по показанням амперметрів дорівнюють: $I_A = 0$, $I_B = I_C = I_{\text{ном.}}$. Визначити допустиму тривалість роботи генератора в цьому несиметричному режимі, якщо блочний трансформатор має групу з'єднання Y_0/Δ , інтегральний критерій термічної стійкості ротора генератора T дорівнює 8 сек, а струм зворотної послідовності $I_{2*} = \frac{1}{\sqrt{3}}$.

Розв'язок:

Допустима тривалість роботи генератора в несиметричному режимі визначається за формулою

$$I_{2*}^2 \cdot t_{\text{доп.}} \leq T; I_{2*} = \frac{I_B}{I_{\text{ном.}} \cdot \sqrt{3}} = \frac{I_C}{I_{\text{ном.}} \cdot \sqrt{3}},$$

де $t_{\text{доп.}}$ – допустима тривалість проходження струму; I_{2*} – струм зворотної послідовності в частках від номінального; T – інтегральний критерій термічної стійкості турбогенератора, с.

За умовою задачі $T = 8$ сек.

Тоді,

$$I_{2*} = \frac{I_{\text{НОМ.}}}{I_{\text{НОМ.}} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}}; t_{\text{доп.}} = \frac{T}{I_{2*}^2} = \frac{8}{\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2} = 24 \text{ (сек.)}.$$

Висновок. Допустима тривалість роботи генератора в несиметричному режимі становить 24 сек.

Приклад № 6.2 Генератор блоку АЕС потужністю 1000 МВт несе навантаження. При експлуатації виникає неповнофазне вимикання вимикача В (вимикання вимикача однією фазою А). Струми в фазах генератора по показанням амперметрів дорівнюють: $I_B = I_{\text{НОМ.}}$, $I_A = I_C = 0,5 \cdot I_B$. Визначити допустимий час роботи генератора в несиметричному режимі, якщо інтегральний критерій термічної стійкості ротора генератора T дорівнює 6 сек, а струм зворотної послідовності $I_{2*} = 0,5$.

Розв'язок:

Допустима тривалість роботи генератора в несиметричному режимі визначається за формулою

$$I_{2*}^2 \cdot t_{\text{доп.}} \leq T; I_{2*} = \frac{0,5 \cdot I_B}{I_{\text{НОМ.}}},$$

де $t_{\text{доп.}}$ – допустима тривалість проходження струму; I_{2*} – струм зворотної послідовності в частках від номінального; T – інтегральний критерій термічної стійкості турбогенератора, с.

За умовою задачі $T = 6$ сек.

Тоді,

$$I_{2*} = \frac{0,5 \cdot I_{\text{НОМ.}}}{I_{\text{НОМ.}}} = 0,5; t_{\text{доп.}} = \frac{T}{I_{2*}^2} = \frac{6}{(0,5)^2} = 24 \text{ (сек.)}.$$

Висновок. Допустима тривалість роботи генератора в несиметричному режимі становить 24 сек.

Приклад № 6.3 Генератор ТЕЦ потужністю 60 МВт несе навантаження і підключений до шин генератора РП. При експлуатації виникає неповнофазний режим, викликаний обривом фази А статора генератора. Струми в фазах

статора генератора по показанням амперметрів дорівнюють $I_A = 0$, $I_B = I_C = I_{\text{ном.}}$. Визначити допустиму тривалість роботи генератора в цьому режимі, якщо інтегральний критерій термічної стійкості ротора генератора T дорівнює 15 сек, а струм зворотної послідовності $I_{2*} = \frac{1}{\sqrt{3}}$.

Розв'язок:

Допустима тривалість роботи генератора в несиметричному режимі визначається за формулою

$$I_{2*}^2 \cdot t_{\text{доп.}} \leq T; I_{2*} = \frac{I_B}{I_{\text{ном.}} \cdot \sqrt{3}} = \frac{I_C}{I_{\text{ном.}} \cdot \sqrt{3}},$$

де $t_{\text{доп.}}$ – допустима тривалість проходження струму; I_{2*} – струм зворотної послідовності в частках від номінального; T – інтегральний критерій термічної стійкості турбогенератора, с.

За умовою задачі $T = 15$ сек.

Тоді,

$$I_{2*} = \frac{I_{\text{ном.}}}{I_{\text{ном.}} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}}; t_{\text{доп.}} = \frac{T}{I_{2*}^2} = \frac{15}{\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2} = 45 \text{ (сек.)}.$$

Висновок. Допустима тривалість роботи генератора в несиметричному режимі становить 45 сек.

Приклад № 6.4 Генератор Г блоку несе навантаження. При експлуатації виник несиметричний режим в системі. Визначити допустиму тривалість роботи генератора в цьому режимі, якщо струм зворотної послідовності статора $I_{2*} = 0,5$, а інтегральний критерій термічної стійкості ротора $T = 10$ сек.

Розв'язок:

Допустима тривалість роботи генератора в несиметричному режимі визначається за формулою

$$I_{2*}^2 \cdot t_{\text{доп.}} \leq T,$$

де $t_{\text{доп.}}$ – допустима тривалість проходження струму; I_{2*} – струм зворотної послідовності в частках від номінального; T – інтегральний критерій термічної стійкості турбогенератора, с.

За умовою задачі $T = 10$ сек, $I_{2*} = 0,5$.

Тоді,

$$t_{\text{доп.}} = \frac{T}{I_{2*}^2} = \frac{10}{(0,5)^2} = 40 \text{ (сек.)}.$$

Висновок. Допустима тривалість роботи генератора в несиметричному режимі становить 45 сек.

Приклад № 6.5 Генератор ТВФ-100-2 блоку несе навантаження. При експлуатації виник несиметричний режим в системі 110 кВ. Схема з'єднання обмоток статора – зірка. Номінальний струм – 6475 А. Блочний трансформатор – ТДЦ-125000/110. Коефіцієнти завантаження фаз блочного трансформатора – $K_A = 0,5$; $K_B = 0,1$; $K_C = 0,6$. Схема з'єднання обмоток – Y_0/Δ -11. Нейтраль обмотки трансформатора заземлена. Визначити коефіцієнт несиметрії, допустимість тривалої роботи генератора при несиметричному режимі. Якщо тривала робота генератора неможлива то визначити допустиму тривалість роботи генератора в цьому режимі.

Розв'язок:

Номінальний струм на стороні ВН блочного трансформатора:

$$I_{\text{В ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{В ном}}} = \frac{125 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 121} = 596,4 \text{ (А)}.$$

Фазний коефіцієнт трансформації блочного трансформатора:

$$K_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{В ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Н ном}}} = \frac{121}{\sqrt{3} \cdot 11} = 6,35.$$

Струми в фазах на стороні ВН блочного трансформатора:

$$I_{\text{В А}} = K_A \cdot I_{\text{В ном}} = 0,5 \cdot 596,4 = 298,2 \text{ (А)},$$

$$I_{BB} = K_B \cdot I_{B_{\text{ном}}} = 0,1 \cdot 596,4 = 59,6 \text{ (A)},$$

$$I_{BC} = K_C \cdot I_{B_{\text{ном}}} = 0,6 \cdot 596,4 = 357,9 \text{ (A)}.$$

Струми в фазах на стороні НН блочного трансформатора:

$$I_{HA} = K_{\text{тр}} \cdot I_{BA} = 6,35 \cdot 298,2 = 1893,9 \text{ (A)},$$

$$I_{HB} = K_{\text{тр}} \cdot I_{BB} = 6,35 \cdot 59,6 = 378,8 \text{ (A)},$$

$$I_{HC} = K_{\text{тр}} \cdot I_{BC} = 6,35 \cdot 357,9 = 2272,7 \text{ (A)}.$$

Струми в фазах на стороні ВН блочного трансформатора в комплексному виді:

$$\dot{I}_{BA} = I_{BA} = 298,2 \text{ (A)},$$

$$\dot{I}_{BB} = I_{BB} \cdot a^2 = 59,6 \cdot e^{-j120} = -29,8 - j51,6 \text{ (A)},$$

$$\dot{I}_{BC} = I_{BC} \cdot a = 357,9 \cdot e^{j120} = -178,8 + j309,9 \text{ (A)}.$$

Струми в фазах на стороні НН блочного трансформатора в комплексному виді:

$$\dot{I}_{HA} = I_{HA} = 1893,9 \text{ (A)},$$

$$\dot{I}_{HB} = I_{HB} \cdot a^2 = 378,8 \cdot e^{-j120} = -189,4 - j328,1 \text{ (A)},$$

$$\dot{I}_{HC} = I_{HC} \cdot a = 2272,7 \cdot e^{j120} = -1136,4 + j1968,3 \text{ (A)}.$$

Фазні струми в обмотці статора генератора:

$$\dot{I}_{GA} = I_{HA} - I_{HB} = 1893,9 + 189,4 + j328,1 = 2083,3 + j328,1 \text{ (A)},$$

$$\dot{I}_{GB} = I_{HB} - I_{HC} = -189,4 - j328,1 + 1136,4 - j1968,3 = 946,9 - j2296,3 \text{ (A)},$$

$$\dot{I}_{GC} = I_{HC} - I_{HA} = -1136,4 + j1968,3 - 1893,9 = -3030,3 + j1968,3 \text{ (A)}.$$

$$I_{GA} = |\dot{I}_{GA}| = \sqrt{(2083,3)^2 + (328,1)^2} = 2109,1 \text{ (A)},$$

$$I_{GB} = |\dot{I}_{GB}| = \sqrt{(946,9)^2 + (2296,3)^2} = 2483,9 \text{ (A)},$$

$$I_{\Gamma C} = |\dot{I}_{\Gamma C}| = \sqrt{(3030,3)^2 + (1968,3)^2} = 3613,5 \text{ (A)}.$$

Симетричні складові фазних струмів генератора:

$$\dot{I}_{\Gamma A1} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_{\Gamma A} + a \cdot \dot{I}_{\Gamma B} + a^2 \cdot \dot{I}_{\Gamma C}),$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\Gamma A1} &= \frac{1}{3} \cdot (2083,3 + j328,1 + (946,9 - j2296,3) \cdot e^{j120} + (-3030,3 + j1968,3) \cdot e^{-j120}) = \\ &= 2272,7 + j1312,2 \text{ (A)}, \end{aligned}$$

$$I_{\Gamma A1} = |\dot{I}_{\Gamma A1}| = \sqrt{(2272,7)^2 + (1312,2)^2} = 2624,4 \text{ (A)},$$

$$\dot{I}_{\Gamma A2} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_{\Gamma A} + a^2 \cdot \dot{I}_{\Gamma B} + a \cdot \dot{I}_{\Gamma C}),$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\Gamma A2} &= \frac{1}{3} \cdot (2083,3 + j328,1 + (946,9 - j2296,3) \cdot e^{-j120} + (-3030,3 + j1968,3) \cdot e^{j120}) = \\ &= -189,4 - j984,2 \text{ (A)}, \end{aligned}$$

$$I_{\Gamma A2} = |\dot{I}_{\Gamma A2}| = \sqrt{(189,4)^2 + (984,2)^2} = 1002,2 \text{ (A)},$$

$$\dot{I}_{\Gamma A0} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_{\Gamma A} + \dot{I}_{\Gamma B} + \dot{I}_{\Gamma C}),$$

$$\dot{I}_{\Gamma A0} = \frac{1}{3} \cdot (2083,3 + j328,1 + 946,9 - j2296,3 - 3030,3 + j1968,3) = 0 \text{ (A)}.$$

Коефіцієнтом несиметрії α :

$$\alpha = \frac{I_{\phi.\text{макс.}} - I_{\phi.\text{мін.}}}{I_{\phi.\text{макс.}}} \cdot 100\% = \frac{3613,5 - 2109,1}{3613,5} \cdot 100\% = 41,6 (\%).$$

Тривала робота генератора в цьому режимі неможлива. Коефіцієнт несиметрії більше допустимого (12%), фазні струмі не перевищують номінальне значення (6475 А), струм зворотної послідовності складає 15,5% ($1002,2 / 6475 = 0,155$ в.о.), що більше допустимого значення (8%).

Допустима тривалість роботи генератора в несиметричному режимі визначається за формулою:

$$I_{2*}^2 \cdot t_{\text{доп.}} \leq T,$$

де $t_{\text{доп.}}$ – допустима тривалість проходження струму; I_{2*} – струм зворотної послідовності в частках від номінального; T – інтегральний критерій термічної стійкості турбогенератора, с.

Для генераторів типу ТВФ: $T = 15$ сек.

Тоді,

$$t_{\text{доп.}} = \frac{T}{I_{2*}^2} = \frac{15}{(0,155)^2} = 624,4 \text{ (сек.) або } 10,4 \text{ (хв.)}.$$

Висновок. Допустима тривалість роботи генератора в несиметричному режимі становить 624,4 сек. або 10,4 хв.

6.4 Задачі для самостійного розв’язання

Задача № 6.1 Генератор блоку АЕС потужністю 1000 МВт несе навантаження. При експлуатації виникає несиметричний режим.

1. Неповнофазне вимикання блочного вимикача (вимикання вимикача однією фазою А. Амперметри зареєстрували наступні значення фазних струмів генератора $I_B = I_{\text{ном.}}$, $I_A = I_C = 0,5 \cdot I_B$. Інтегральний критерій термічної стійкості ротора $T = 15$ сек., струм зворотної послідовності дорівнює $I_{2*} = 0,6$.

2. При експлуатації виникає неповнофазний режим, спричинений обривом фази А статора генератора. Струми в фазах статора генератора по показанням амперметрів дорівнюють $I_A = 0$, $I_B = I_C = I_{\text{ном.}}$. Інтегральний критерій термічної стійкості ротора $T = 6$ сек., струм зворотної послідовності дорівнює $I_{2*} = \frac{1}{\sqrt{3}}$.

3. При неповнофазному вимиканні блочним вимикачем В (вимиканні вимикача двома фазами А і В. Струми в фазах генератора по показанням амперметрів дорівнюють: $I_A = 0$, $I_B = I_C = I_{\text{ном.}}$. Блочний трансформатор має група з’єднання $Y_0/\Delta-11$. Інтегральний критерій термічної стійкості ротора $T = 6$ сек., струм зворотної послідовності дорівнює $I_{2*} = 0,4$.

Приклад № 6.2 Генератор ТВФ-100-2 блоку несе навантаження. При експлуатації виник несиметричний режим в системі 110 кВ. Схема з'єднання обмоток статора – зірка. Номінальний струм – 6475 А. Блочний трансформатор – ТДЦ-125000/110. Коефіцієнти завантаження фаз блочного трансформатора – $K_A = 0,3$; $K_B = 0,6$; $K_C = 0,4$. Схема з'єднання обмоток – Y_0/Δ -11. Нейтраль обмотки трансформатора заземлена. Визначити коефіцієнт несиметрії, допустимість тривалої роботи генератора при несиметричному режимі. Якщо тривала робота генератора неможлива то визначити допустиму тривалість роботи генератора в цьому режимі.

Задача № 6.3 Генератор ТГВ-200-2М блоку несе навантаження. При експлуатації виник несиметричний режим в системі 220 кВ. Схема з'єднання обмоток статора – зірка. Номінальний струм – 8625 А. Блочний трансформатор – ТДЦ-250000/220. Коефіцієнти завантаження фаз блочного трансформатора – $K_A = 0,6$; $K_B = 0,5$; $K_C = 0,1$. Схема з'єднання обмоток – Y_0/Δ -11. Нейтраль обмотки трансформатора заземлена. Визначити коефіцієнт несиметрії, допустимість тривалої роботи генератора при несиметричному режимі. Якщо тривала робота генератора неможлива то визначити допустиму тривалість роботи генератора в цьому режимі.

Задача № 6.4 Генератор ТВВ-320-2 блоку несе навантаження. При експлуатації виник несиметричний режим в системі 330 кВ. Схема з'єднання обмоток статора – зірка. Номінальний струм – 10868 А. Блочний трансформатор – ТДЦ-400000/330. Коефіцієнти завантаження фаз блочного трансформатора – $K_A = 0,1$; $K_B = 0,2$; $K_C = 0,5$. Схема з'єднання обмоток – Y_0/Δ -11. Нейтраль обмотки трансформатора заземлена. Визначити коефіцієнт несиметрії, допустимість тривалої роботи генератора при несиметричному режимі. Якщо тривала робота генератора неможлива то визначити допустиму тривалість роботи генератора в цьому режимі.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 7

«РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПРИ ВІДХИЛЕННІ НАПРУГИ, ЧАСТОТИ І НАВАНТАЖЕННЯ ВІД НОМІНАЛЬНИХ»

7.1 Мета та зміст заняття

Мета: Формування навичок та умінь розрахунку основних параметрів електродвигунів ВП електростанцій при відхиленні напруги, частоти і навантаження від номінальних.

Навчальні запитання:

1. Особливості режимів роботи електродвигунів ВП електростанцій при відхиленні напруги, частоти і навантаження від номінальних.

2. Алгоритм розрахунку основних параметрів електродвигунів ВП електростанцій при відхиленні напруги, частоти і навантаження від номінальних.

3. Аналіз основних параметрів електродвигунів ВП електростанцій при відхиленні напруги, частоти і навантаження від номінальних.

4. **Задача** – Розрахунок основних параметрів електродвигунів ВП електростанцій при відхиленні напруги, частоти і навантаження від номінальних.

7.2 Короткі теоретичні відомості

Робота електродвигунів ВП електростанцій при відхиленні навантаження на валу, напруги і частоти в мережі. У процесі експлуатації АД працюють із навантаженнями на валу від неробочого ходу до номінального. Напруга й частота на шинах АД можуть відхилятися від номінальних значень, відхиляються також параметри двигуна. Крім того в процесі експлуатації виникає несиметрія напруги та обрив однієї або двох фаз. Тому важливим з точки зору експлуатації є аналіз [7, 11]:

1. Робота АС і СД при відхиленнях напруги й частоти від номінальних значень.

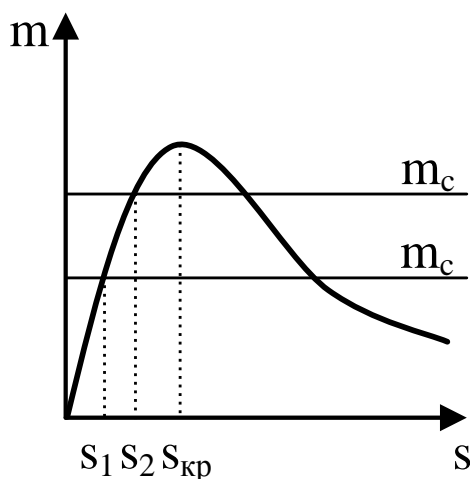
2. Несиметричні режими роботи АД.

Допускається робота двигуна при відхиленні напруги в мережі в межах від -5 до 10 %, а частоти змінного струму на $\pm 2,5$ % номінального значення. При одночасному відхиленні напруги й частоти від номінального значення, двигуни повинні зберігати номінальну потужність якщо сума абсолютних процентних значень цих відхилень не перевершує 10 % і кожні з відхилень не перевищує норми.

Навантажувальні властивості двигуна при відхиленнях напруги й частоти характеризуються зміною основних параметрів сталого режиму – $E, \Phi, m, s, f_P, I'_2, \Phi', I_\mu, I_1, \Phi_\Sigma$.

Розглянемо фізичні процеси в АД і загальний характер зміни перерахованих величин при відхиленнях від номінальних значень навантаження на валу (m_c), напруги й частоти живильної мережі.

Зміна навантаження на валу двигуна при номінальній напрузі й частоті живильної мереж. При збільшенні навантаження на валу кут швидкість ротора АД зменшується, а ковзання (s) зростає до такого значення при якому m двигуна врівноважує підвищений момент опору. При $s < s_{кр}$ опір статора становить лише невелику частку загального опору двигуна, $I \cdot U_{z1} \approx 0$ і



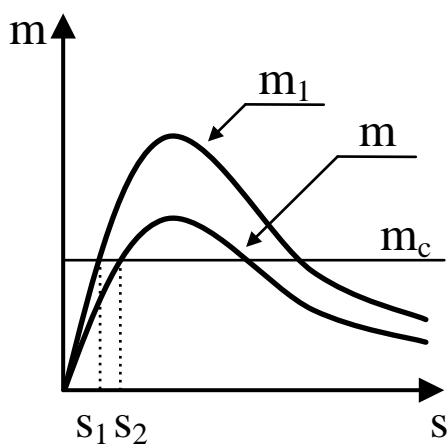
$U_1 \approx E'_2$, тобто E'_2, I_μ і Φ практично не змінилися при зміні навантаження. Збільшення m АД супроводжується збільшенням струму I'_2 .

Зі збільшенням s зростає фазний кут наведеного струму ротора Φ' , що приводить до зростання реактивного струму двигуна $I_{1P} = I_\mu + I'_{2P}$. При збільшенні реактивний і

активний струми статора I_1 також зростають. Збільшення струмів статора й ротора приводить до зростання втрат у міді обмоток.

При збільшенні реактивного струму АД та навантаження збільшується реактивна потужність, яка споживається з мережі.

Зміна напруги при номінальній частоті і навантаженні. Нехай напруга знижується, а $m_c = \text{const}$. При цьому E'_2 знижується і Φ також знижується. Обертовий момент АД пропорційний U_1^2 виявиться меншим при старому значенні s' , чим момент опору m_c . Ковзання двигуна s зросте до такого значення, при якому знову встановиться рівність $m = m_c$.



Зростання s приведе до збільшення I'_2 й збільшення кута φ' між наведеним струмом ротора I'_2 і U_1 . При зменшенні U струм I_μ , що намагнічує, зменшується, струм $|I_1| = \sqrt{I_\mu^2 + (I'_2)^2}$ статора залежно від завантаження й співвідношення між I_μ і I'_2 може або зростати або зменшиться.

Робота АД із $\Delta U \geq 5\%$ припустима тільки за умови, що навантаження АД менше номінального. Якщо це не дотримується - перегрів обмотки і її знос. Потужність АД залишається практично без змін, тому що кутова швидкість ротора змінюється незначно.

Зміна частоти при номінальній напрузі і навантаженні. Нехай $m_c = \text{const}$, $U = \text{const}$, $f < f_{\text{ном}}$. Зменшення частоти приведе до збільшення Φ і збільшення обертового моменту, тому що m_c залишається постійним s зменшується так, щоб зберегти рівновагу між обертовим моментом m АД й m_c при зниженій частоті. Внаслідок зростання Φ зменшиться струм ротора I'_2 , а струм I_μ збільшиться. Зниження f практично рівнозначно зростанню U .

Отже, якщо при зниженні f одночасно зменшити I_{μ} , то I_1 , I'_2 залишаться тими ж.

Однак істотною відмінністю зниження частоти від попередніх двох режимів буде істотна зміна кутової швидкості ротора АД $\omega \cong \omega_1$, а $\omega_1 \cong f$. Наприклад, для АД з $b_H = 2$, $s_{кр} = 0,1$ і $m_c = \text{const}$ при зниженні частоти f на 10 % приводить до зниження n на 9,8 %. При зниженні U на 10 % n знижується всього на 1 %.

7.3 Приклади типових задач

Приклад № 7.1 При роботі генератора ТВФ-60-2 ТЕЦ в асинхронному режимі без збудження середня напруга на шинах власних потреб зменшилась на 15 % відносно номінальної. Для асинхронного двигуна циркуляційного насосу визначити на скільки процентів відносно номінальної зміниться кратність максимального моменту b . Двигун ВДД-170/34 має такі паспортні параметри: $P_{\text{ном}} = 750$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $n_H = 295$ об/хв; $b_H = 2,0$; $M_{\text{пн}} = 1,0$.

Розв'язок: При змінюванні напруги і частоти кратність максимального моменту b визначається

$$b = b_H \cdot \left(\frac{K_U}{K_f} \right)^2,$$

де b_H – кратність максимального моменту двигуна в номінальному режимі, K_U , K_f – кратність змінювання напруги та частоти у мережі.

За умовою задачі $K_f = 1,00$ (в.о.), $K_U = 0,85$ (в.о.).

Тоді,

$$\frac{b}{b_H} = \left(\frac{K_U}{K_f} \right)^2 = \left(\frac{0,85}{1,00} \right)^2 = 0,7225 \text{ (в.о.)}.$$

тобто b зменшиться на 27,75 %.

Висновок. Кратність максимального моменту для асинхронного двигуна циркуляційного насосу ВДД-170/34 при зменшенні середньої напруги на шинах власних потреб на 15 % відносно номінальної зменшилась на 27,75 %.

Приклад № 7.2 При роботі генератора ТВФ-60-2 ТЕЦ в асинхронному режимі без збудження середня напруга на шинах власних потреб зменшилась на 15 % відносно номінальної. Для асинхронного двигуна циркуляційного насосу визначити на скільки процентів відносно номінальних зміниться кратність пускового моменту M_{Π} . Двигун ВДД-170/34 має такі паспортні параметри: $P_{\text{ном}} = 750$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $n_{\text{н}} = 295$ об/хв; $b_{\text{н}} = 2,0$; $M_{\text{пн}} = 1,0$.

Розв'язок: При змінюванні напруги і частоти кратність пускового моменту M_{Π} визначається

$$M_{\Pi} = M_{\text{н}} \cdot \frac{K_U^2}{K_f^3},$$

де $M_{\text{н}}$ – кратність пускового моменту в номінальному режимі, K_U – кратність змінювання напруги, K_f – кратність змінювання частоти мережі.

За умовою задачі: $K_f = 1,00$ (в.о.), $K_U = 0,85$ (в.о.).

Тоді,

$$\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{н}}} = \frac{K_U^2}{K_f^3} = \frac{(0,85)^2}{(1,00)^3} = 0,7225 \text{ (в.о.)}.$$

тобто M_{Π} зменшиться на 27,75 %.

Висновок. Кратність пускового моменту для асинхронного двигуна циркуляційного насосу ВДД-170/34 при зменшенні середньої напруги на шинах власних потреб на 15 % відносно номінальної зменшилась на 27,75 %.

Приклад № 7.3 Генератор ТЕЦ ТВФ-100-2 втратив збудження і перейшов в асинхронний режим. Середня напруга на шинах власних потреб зменшилась на 20 %. Для асинхронного двигуна власних потреб ТЕЦ АВ-15-36-8 конденсатного насосу визначити на скільки процентів відносно номінальних

зміниться ковзання s . Двигун АВ-15-36-8 має такі паспортні параметри: $P_{\text{ном}} = 1000$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $b_{\text{н}} = 2,4$; $M_{\text{пн}} = 1,22$; $n_{\text{н}} = 742,5$ об/хв; $n_{\text{с}} = 295$ об/хв.

Розв'язок: Ковзання s двигуна при змінюванні напруги та частоти мережі визначається за формулою

$$s = s_{\text{н}} \cdot \frac{K_f}{K_U^2},$$

де $s_{\text{н}}$ – номінальне ковзання асинхронного двигуна, K_U – кратність змінювання напруги, K_f – кратність змінювання частоти мережі.

За умовою задачі: $K_f = 1,00$ (в.о.), $K_U = 0,80$ (в.о.).

Тоді,

$$\frac{s}{s_{\text{н}}} = \frac{K_f}{K_U^2} = \frac{1,00}{(0,80)^2} = 1,5625 \text{ (в.о.)}.$$

тобто s збільшиться на 56,25 %.

Висновок. Ковзання для асинхронного двигуна власних потреб ТЕЦ АВ-15-36-8 конденсатного насосу при зменшенні середньої напруги на шинах власних потреб збільшиться на 56,25 %.

Приклад № 7.4 Визначити на скільки процентів від номінальної зміниться кратність максимального моменту b асинхронного електродвигуна головного циркуляційного насосу АЕС ВА3-215/109 при зменшенні частоти напруги на шинах власних потреб на 6 %. Двигун має такі параметри: $P_{\text{ном}} = 8000$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $M_{\text{пн}} = 1,55$; $b_{\text{н}} = 3,7$; $n_{\text{н}} = 995$ об/хв; $n_{\text{с}} = 1000$ об/хв.

Розв'язок: При змінюванні напруги і частоти кратність максимального моменту b у асинхронного двигуна визначається

$$b = b_{\text{н}} \cdot \left(\frac{K_U}{K_f} \right)^2,$$

де $b_{\text{н}}$ – кратність максимального моменту двигуна в номінальному режимі, K_U , K_f – кратність змінювання напруги та частоти у мережі.

За умовою задачі $K_f = 0,94$ (в.о.), $K_U = 1,00$ (в.о.).

Тоді,

$$\frac{b}{b_H} = \left(\frac{K_U}{K_f} \right)^2 = \left(\frac{1,00}{0,94} \right)^2 = 1,1317 \text{ (в.о.)}.$$

тобто b зменшиться на 13,17 %.

Висновок. Кратність максимального моменту асинхронного електродвигуна головного циркуляційного насосу АЕС ВА3-215/109 при зменшенні частоти напруги на шинах власних потреб на 6 % збільшиться на 13,17 %.

Приклад № 7.5 Визначити на скільки процентів від номінальної зміниться критичне ковзання $s_{кр}$ електродвигуна головного циркуляційного насосу АЕС ВА3-215/109 при зменшенні частоти напруги на шинах власних потреб на 6 %. Двигун має такі параметри: $P_{ном} = 8000$ кВт; $U_{ном} = 6$ кВ; $M_{п} = 1,55$; $b_H = 3,7$; $n_H = 995$ об/хв; $n_c = 1000$ об/хв.

Розв'язок: Величина критичного ковзання $s_{кр}$ асинхронного двигуна при змінюванні частоти мережі визначається за формулою

$$s_{кр} = s_{кр\ H} \cdot \frac{1}{K_f},$$

де $s_{кр\ H}$ – критичне ковзання в номінальному режимі, K_f – кратність змінювання частоти мережі.

За умовою задачі $K_f = 0,94$ (в.о.).

Тоді,

$$\frac{s_{кр}}{s_{кр\ H}} = \frac{1}{K_f} = \frac{1}{0,94} = 1,0638 \text{ (в.о.)}.$$

тобто $s_{кр}$ збільшиться на 6,38 %.

Висновок. Критичне ковзання електродвигуна головного циркуляційного насосу АЕС ВА3-215/109 при зменшенні частоти напруги на шинах власних потреб на 6 % збільшиться на 6,38 %.

Приклад № 7.6 При аварії в енергосистемі, яка супроводжувалась дефіцитом активної потужності, частота напруги на шинах власних потреб зменшилась на 6 % відносно номінального значення. Визначити на скільки процентів від номінальних зміниться кратність пускового моменту $M_{\text{п}}$ електродвигуна ГЦН ВА3-215/109. Двигун має такі параметри: $P_{\text{ном}} = 8000$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $m_{\text{п}} = 1,55$; $b_{\text{н}} = 3,7$; $n_{\text{н}} = 995$ об/хв; $n_{\text{с}} = 1000$ об/хв.

Розв'язок: При змінюванні частоти мережі кратність пускового моменту $M_{\text{п}}$ визначається

$$M_{\text{п}} = M_{\text{н}} \cdot \frac{K_U^2}{K_f^3},$$

де $M_{\text{н}}$ – кратність пускового моменту в номінальному режимі, K_U – кратність змінювання напруги, K_f – кратність змінювання частоти мережі.

За умовою задачі: $K_f = 0,94$ (в.о.), $K_U = 1,00$ (в.о.).

Тоді,

$$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}} = \frac{K_U^2}{K_f^3} = \frac{(1,00)^2}{(0,94)^3} = 1,2039 \text{ (в.о.)}.$$

тобто $M_{\text{п}}$ зменшиться на 20,39 %.

Висновок. Кратність пускового моменту електродвигуна ГЦН ВА3-215/109 при зменшенні частоти напруги на шинах власних потреб на 6 % відносно номінального значення збільшилась на 20,39 %.

Приклад № 7.7 Визначити на скільки процентів від номінального зміниться потужність на валу P_2 асинхронного двигуна головного циркуляційного насосу власних потреб АЕС при зниженні частоти на шинах ВП до 48 Гц. Двигун має такі параметри: $P_{\text{ном}} = 8000$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $M_{\text{п}} = 1,55$; $n_{\text{н}} = 995$ об/хв; $n_{\text{с}} = 1000$ об/хв.

Розв'язок: Потужність P_2 на валу асинхронного двигуна в режимі зниження частоти мережі можна визначити за формулою

$$P_2 = P_{2\text{н}} \cdot K_f,$$

де K_f – кратність змінювання частоти мережі, $P_{2н}$ – потужність на валу асинхронного двигуна в номінальному режимі.

$$\text{За умовою задачі: } K_f = \frac{48}{50} = 0,96 \text{ (в.о.)}.$$

Тоді,

$$\frac{P_2}{P_{2н}} = K_f = 0,96 \text{ (в.о.)}.$$

тобто P_2 зменшиться на 4 %.

Висновок. Потужність на валу асинхронного двигуна головного циркуляційного насосу власних потреб АЕС при зниженні частоти на шинах ВП до 48 Гц зменшиться на 4 %.

Приклад № 7.8 В енергосистемі, що містить ТЕС з блоками 300 МВт виник дефіцит активної і реактивної потужності, що призвело до одночасного зниження напруги і частоти ВП станції відповідно на 5 % і 5 %. Для асинхронного двигуна ВП ДВДА-260/99 циркуляційного насосу визначити на скільки процентів від номінального зміниться кратність максимального моменту в. Двигун має такі параметри: $P_{ном} = 2500$ кВт; $U_{ном} = 6$ кВ; $m_{п} = 1,05$; $b_{н} = 1,7$; $n_c = 750$ об/хв; $n_{н} = 742$ об/хв.

Розв'язок: При одночасному змінюванні напруги і частоти в системі при дефіциті потужності кратність максимального моменту b у асинхронного двигуна визначається

$$b = b_{н} \cdot \left(\frac{K_U}{K_f} \right)^2,$$

де $b_{н}$ – кратність максимального моменту двигуна в номінальному режимі, K_U , K_f – кратність змінювання напруги та частоти у мережі.

$$\text{За умовою задачі } K_f = 0,95 \text{ (в.о.)}, K_U = 0,95 \text{ (в.о.)}.$$

Тоді,

$$\frac{b}{b_H} = \left(\frac{K_U}{K_f} \right)^2 = \left(\frac{0,95}{0,95} \right)^2 = 1,00 \text{ (в.о.)}.$$

тобто b не зміниться.

Висновок. Кратність максимального моменту для асинхронного двигуна ВП ДВДА-260/99 при одночасному зниженні напруги і частоти ВП станції відповідно на 5 % і 5 % не зміниться.

Приклад № 7.9 Для асинхронного двигуна ВП ДВДА-260/99 циркуляційного насоса визначити на скільки процентів від номінального зміниться критичне ковзання $s_{кр}$ при одночасному зниженні напруги і частоти на шинах ВП станції на 5 % і 5 % відповідно. Двигун має такі параметри: $P_{ном} = 2500$ кВт; $U_{ном} = 6$ кВ; $M_{п} = 1,05$; $b_H = 1,7$; $n_c = 750$ об/хв; $n_H = 742$ об/хв.

Розв'язок: Величина критичного ковзання $s_{кр}$ асинхронного двигуна при одночасному змінюванні частоти та напруги мережі визначається за формулою

$$s_{кр} = s_{кр\ H} \cdot \frac{1}{K_f},$$

де $s_{кр\ H}$ – критичне ковзання в номінальному режимі, K_f – кратність змінювання частоти мережі.

За умовою задачі $K_f = 0,95$ (в.о.).

Тоді,

$$\frac{s_{кр}}{s_{кр\ H}} = \frac{1}{K_f} = \frac{1}{0,95} = 1,0526 \text{ (в.о.)}.$$

тобто $s_{кр}$ збільшиться на 5,26 %.

Висновок. Критичне ковзання для асинхронного двигуна ВП ДВДА-260/99 циркуляційного насоса при одночасному зниженні напруги і частоти на шинах ВП станції відповідно на 5 % і 5 % збільшиться на 5,26 %.

Приклад № 7.10 Визначити на скільки процентів від номінального зміниться кратність пускового моменту $M_{п}$ асинхронного двигуна ВП 2АЗМ-2500 живильного насосу ТЕЦ при одночасному зниженні напруги і частоти на

шинах ВП станції відповідно на 5 % і 5 %. Двигун має такі параметри: $P_{\text{ном}} = 2500$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $M_{\text{п}} = 0,9$; $b_{\text{н}} = 2,3$; $n_{\text{с}} = 2975$ об/хв; $n_{\text{н}} = 3000$ об/хв.

Розв'язок: При одночасному змінюванні частоти та напруги мережі кратність пускового моменту $M_{\text{п}}$ визначається

$$M_{\text{п}} = M_{\text{н}} \cdot \frac{K_U^2}{K_f^3},$$

де $M_{\text{н}}$ – кратність пускового моменту в номінальному режимі, K_U – кратність змінювання напруги, K_f – кратність змінювання частоти мережі.

За умовою задачі: $K_f = 0,95$ (в.о.), $K_U = 0,95$ (в.о.).

Тоді,

$$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}} = \frac{K_U^2}{K_f^3} = \frac{(0,95)^2}{(0,95)^3} = 1,0526 \text{ (в.о.)}.$$

тобто $M_{\text{п}}$ збільшиться на 5,26 %.

Висновок. Кратність пускового моменту асинхронного двигуна ВП 2АЗМ-2500 живильного насосу ТЕЦ при одночасному зниженні напруги і частоти на шинах ВП станції відповідно на 5 % і 5 % збільшиться на 5,26 %.

Приклад № 7.11 Визначити на скільки процентів від номінального зміниться продуктивність Q циркуляційного насосу турбін АЕС якщо оберти асинхронного двигуна власних потреб ДВДА-260/99 зменшилися на 7 %.

Розв'язок: При змінюванні обертів асинхронного двигуна n змінювання продуктивності циркуляційного насосу можна визначити так

$$Q = Q_{\text{н}} \cdot \frac{n}{n_{\text{н}}},$$

де $n_{\text{н}}$ – номінальні оберти системи двигун-механізм, $Q_{\text{н}}$ – номінальна продуктивність циркуляційного насосу.

За умовою задачі: $\frac{n}{n_{\text{н}}} = 0,93$ (в.о.).

Тоді,

$$\frac{Q}{Q_H} = \frac{n}{n_H} = \frac{0,93}{1,00} = 0,93 \text{ (в.о.)}.$$

тобто Q зменшиться на 7 %.

Висновок. Продуктивність циркуляційного насосу турбін АЕС при зменшенні обертів асинхронного двигуна власних потреб ДВДА-260/99 на 7 % зменшиться на 7 %.

Приклад № 7.12 Визначити на скільки процентів від номінального зміниться натиск H циркуляційного насосу турбін АЕС якщо оберти асинхронного двигуна власних потреб ДВДА-260/99 зменшились на 7 %.

Розв'язок: При змінюванні обертів асинхронного двигуна n змінювання натиску циркуляційного насосу можна визначити так

$$H = H_H \cdot \left(\frac{n}{n_H} \right)^2,$$

де n_H – номінальні оберти системи двигун-механізм, H_H – номінальний натиск циркуляційного насосу.

За умовою задачі: $\frac{n}{n_H} = 0,93 \text{ (в.о.)}$.

Тоді,

$$\frac{H}{H_H} = \left(\frac{n}{n_H} \right)^2 = \left(\frac{0,93}{1,00} \right)^2 = 0,865 \text{ (в.о.)}.$$

тобто H зменшиться на 13,5 %.

Висновок. Натиск циркуляційного насосу турбін АЕС при зменшенні обертів асинхронного двигуна власних потреб ДВДА-260/99 на 7 % зменшиться на 13,5 %.

7.4 Задачі для самостійного розв'язання

Задача № 7.1 Генератор ТЕЦ ТГВ-300-2 втратив збудження і перейшов в асинхронний режим. Середня напруга на шинах власних потреб зменшилась на 10 %. Для асинхронного двигуна власних потреб ТЕЦ АВ-114-4 конденсатного

насосу I ступеня визначити на скільки процентів відносно номінальних зміниться ковзання. Двигун АВ-114-4 має такі паспортні параметри: $P_{\text{ном}} = 320$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $b_{\text{н}} = 2,4$; $M_{\text{пн}} = 1,5$; $n_{\text{н}} = 1480$ об/хв; $n_{\text{с}} = 1500$ об/хв.

Задача № 7.2 При аварії в енергосистемі, яка супроводжувалась дефіцитом активної потужності, частота напруги на шинах власних потреб зменшилась на 5 % відносно номінального значення. Визначити на скільки процентів від номінальних зміниться кратність пускового моменту $M_{\text{п}}$ електродвигуна живильного насосу 4А3М-3200/6000. Двигун має такі параметри: $P_{\text{ном}} = 3200$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $m_{\text{п}} = 0,9$; $b_{\text{н}} = 2,1$; $n_{\text{н}} = 2985$ об/хв; $n_{\text{с}} = 3000$ об/хв.

Задача № 7.4 Визначити на скільки процентів від номінального зміниться продуктивність Q циркуляційного насосу турбін АЕС якщо оберти асинхронного двигуна власних потреб ДВДА-215/39-12-16 зменшились на 10 %.

Задача № 7.5 Визначити на скільки процентів від номінального зміниться натиск H циркуляційного насосу турбін АЕС якщо оберти асинхронного двигуна власних потреб ДВДА-260/99 зменшились на 10 %.

Задача № 7.6 Визначити на скільки процентів від номінального зміниться кратність пускового моменту $M_{\text{п}}$ асинхронного двигуна ВП 2А3М-2500 живильного насосу ТЕЦ при одночасному зниженні напруги і частоти на шинах ВП станції відповідно на 7 % і 4 %. Двигун має такі параметри: $P_{\text{ном}} = 2500$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $M_{\text{п}} = 0,9$; $b_{\text{н}} = 2,3$; $n_{\text{с}} = 2975$ об/хв; $n_{\text{н}} = 3000$ об/хв.

Задача № 7.7 Для асинхронного двигуна ВП ДВДА-260/99 циркуляційного насоса визначити на скільки процентів від номінального зміниться критичне ковзання $s_{\text{кр}}$ при одночасному зниженні напруги і частоти на шинах ВП станції на 7 % і 3 % відповідно. Двигун має такі параметри: $P_{\text{ном}} = 2500$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $M_{\text{п}} = 1,05$; $b_{\text{н}} = 1,7$; $n_{\text{с}} = 750$ об/хв; $n_{\text{н}} = 742$ об/хв.

Задача № 7.8 Визначити на скільки процентів від номінального зміниться потужність на валу P_2 асинхронного двигуна головного циркуляційного насоса власних потреб АЕС при зниженні частоти на шинах ВП до 47 Гц. Двигун має

такі параметри: $P_{\text{ном}} = 8000$ кВт; $U_{\text{ном}} = 6$ кВ; $M_{\text{п}} = 1,55$; $n_{\text{н}} = 995$ об/хв; $n_{\text{с}} = 1000$ об/хв.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 8

«ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕВИЩЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ В УСТАЛЕНИХ РЕЖИМАХ І В УМОВАХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ»

8.1 Мета та зміст заняття

Мета: Формування навичок та умінь аналізу розрахунку перевищення температури обмоток електродвигунів в усталених режимах і в умовах перевантажень.

Навчальні запитання:

1. Особливості роботи електродвигунів в усталених режимах і в умовах перевантажень.

2. Аналіз процесу зміни температури обмоток електродвигунів в усталених режимах і в умовах перевантажень.

3. **Задача** – Розрахунок перевищення температури обмоток електродвигунів в усталених режимах і в умовах перевантажень.

8.2 Короткі теоретичні відомості

Пуск електродвигунів. Процес включення обмотки статора під напругу мережі має той самий характер, що й раптове коротке замикання трансформатора. Так само як і струм включення холостого ходу, він має дві складові, з яких одна – періодична, а друга – аперіодична. Остання згасає дуже швидко і, як правило, її не враховують при розрахунку часу пуску. Аналіз процесу пуску асинхронних двигунів зводиться до дослідженню механічного перехідного процесу, тобто до вирішення рівняння руху [3, 4, 7, 11].

$$M_{\text{надл.}} = M_{\text{обер.}} - M_{\text{оп.}} = J_{\text{пр.}} \frac{d\omega}{dt},$$

де $M_{\text{надл.}}$ – обертовий момент електродвигуна, Н·м; $M_{\text{оп.}}$ – момент опору механізму, Н·м; $J_{\text{пр.}}$ – приведений момент інерції агрегату, кг·м²; $M_{\text{надл.}}$ – надлишковий момент, Н·м.

Приведений момент інерції дорівнює

$$J_{\text{пр.}} = J_{\text{двиг.}} + J_{\text{мех.}}$$

Якщо двигун і механізм мають рівні номінальні швидкості, і дорівнює

$$J_{\text{пр.}} = J_{\text{двиг.}} + J_{\text{мех.}} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{мех.}}}{\omega_{\text{двиг.}}} \right)^2$$

Замість моменту інерції часто використовують механічну сталу часу агрегату

$$T_j = J_{\text{пр.}} \cdot \frac{\omega_c}{M_{\text{ном.}}} = J_{\text{пр.}} \cdot \frac{\omega_c^2}{P_{\text{ном.}}}$$

де ω_c – синхронна швидкість двигуна.

Переходячи від кутової швидкості до ковзання, для надлишкового моменту (в.о.):

$$M_{\text{надл.*}} = M_{\text{обер.*}} - M_{\text{оп.*}} = -T_j \frac{ds}{dt}$$

Методика розв'язання рівняння руху визначається тим, наскільки складні вирази механічних характеристик двигуна і приводного механізму. Якщо ці параметри виражаються аналітично і мають форму, зручну для інтегрування, то рішення наводять аналітично. Інакше використовують методи графоаналітичного розв'язання.

В випадку, коли електродвигун пускається вхолосту, то, нехтуючи малим моментом тертя в підшипниках, рівняння можна подати у вигляді

$$\frac{2 \cdot b_n}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}} = -T_j \frac{ds}{dt}$$

З цього рівняння

$$dt = -\frac{T_j}{2 \cdot b_H} \cdot \left(\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} \right) ds.$$

Час розгону електродвигуна до заданого ковзання

$$t = \frac{T_j}{2 \cdot b_H} \cdot \left(\frac{1-s^2}{2 \cdot s_{кр}} + s_{кр} \cdot \ln \left(\frac{1}{s} \right) \right).$$

Повний час розгону електродвигуна до синхронної швидкості нескінченно великий. Тому пуск вважають пуск закінченим, якщо ковзання електродвигуна відрізняється від значення, що встановилося не більше ніж на 0,05. При цьому повний час пуску дорівнює

$$t_{пуск} = \frac{T_j}{2 \cdot b_H} \cdot \left(\frac{1-0,05^2}{2 \cdot s_{кр}} + s_{кр} \cdot \ln \left(\frac{1}{0,05} \right) \right) \approx \frac{T_j}{2 \cdot b_H} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot s_{кр}} + 3 \cdot s_{кр} \right).$$

Нагрів обмоток електродвигунів при пуску. Пуск електродвигуна супроводжуються швидким підвищенням температури обмоток статора і ротора, тому для агрегатів з великими значеннями механічної постійної часу номінальна потужність приводних електродвигунів часто визначається при пусках. Розрахунок нагріву обмоток електродвигунів при пуску можна вести без урахування тепловіддачі у навколишнє середовище

$$Pdt = c \cdot Gd\Delta\theta,$$

де P – втрати потужності в обмотці, кВт; c – питома теплоємність матеріалу обмоток $\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$; G – вага обмотки, кг; $\Delta\theta$ – перевищення температури обмотки над температурою навколишнього середовища, $^\circ\text{C}$

Розрахунок нагріву значно спрощується, якщо пускові струми, що змінюються в часі обмоток статора та ротора замінити незмінними еквівалентними струмами

$$I_{ек} = \sqrt{\frac{1}{t_{пуск}} \cdot \int_0^{t_{пуск}} I^2 dt}$$

Визначальним при пуску є нагрівання обмотки статора, втрати в якій при пуску та за номінальних умов пов'язані співвідношенням

$$P_1 = I_{1ек*}^2 \cdot P_{1н},$$

де $I_{1ек*}$ – кратність еквівалентного струму статора за час пуску по відношенню до номінального струму електродвигуна.

Тому температура обмотки статора до кінця пуску дорівнює

$$\Delta\theta_{1пуск} = \frac{P_{1н}}{c_1 \cdot G_1} \cdot I_{1ек*}^2 \cdot t_{пуск},$$

де c_1 , G_1 – теплоємність та маса обмотки статора. Замінюючи величини

$$P_{1н} = I_{1н}^2 \cdot \frac{\rho_1 \cdot l_1 \cdot K_\phi}{q_1} \text{ та } G_1 = \gamma_1 \cdot l_1 \cdot q_1.$$

Отримаємо:

$$\Delta\theta_{1пуск} = \frac{\rho_1 \cdot K_\phi}{c_1 \cdot \gamma_1} \cdot (j_{1н} \cdot I_{1ек*})^2 \cdot t_{пуск},$$

де K_ϕ – коефіцієнт, що враховує збільшення опору обмотки статора, внаслідок витіснення струму (коефіцієнт Фільда); q_1 – переріз обмоткового дроту, мм²; γ_1 – густина матеріалу обмотки г/см³; ρ_1 – питомий опір матеріалу обмотки, Ом·мм²/м; l_1 – довжина обмотки в метрах; $j_{1н}$ – номінальна щільність струму в А/мм².

У середньому для двигунів можна прийняти $j_{1н} = 4,5 - 6,5 \left(\frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \right)$. Для обмотки з міді $c_1 = 0,39 \left(\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{°C}} \right)$, $\gamma_1 = 8,9 \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$ і $\rho_1 = 0,0215 \left(\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right)$ (при температурі 75 °С).

З урахуванням цього значення

$$\Delta\theta_{1пуск} = \frac{K_\phi}{160} \cdot (j_{1н} \cdot I_{1ек*})^2 \cdot t_{пуск}.$$

У наближених розрахунках зазвичай приймають $I_{1ек*} = 0,93 \cdot I_{1к*}$, де $I_{1к*}$ – кратність періодичної складової струму статора електродвигуна на початку пуску, і $K_{\phi} = 1,15$, тоді

$$\Delta\theta_{1пуск} = \frac{(j_{1н} \cdot I_{1к*})^2}{175} \cdot t_{пуск} = \frac{j_{пуск}^2}{175} \cdot t_{пуск},$$

де $j_{пуск}$ – щільність струму статора на початку пуску.

8.3 Приклади типових задач

Приклад № 8.1 Визначити повний час пуску асинхронного двигуна АВ-15-36-8 власних потреб конденсатного насосу з режиму неробочого ходу, якщо кратність максимального моменту $b_H = 2,47$, механічна стала часу $T_j = 2,28$ сек., критичне ковзання $s_{кр} = 0,05$.

Розв'язок:

Повний час пуску двигуна $t_{пуск}$ з режиму неробочого ходу визначається

$$t_{пуск} = \frac{T_j}{2 \cdot b_H} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot s_{кр}} + 3 \cdot s_{кр} \right),$$

де T_j – механічна стала часу двигуна; b_H – кратність максимального моменту; $s_{кр}$ – критичне ковзання.

За умовою задачі: $T_j = 2,28$ сек., $b_H = 2,47$, $s_{кр} = 0,05$.

Тоді,

$$t_{пуск} = \frac{T_j}{2 \cdot b_H} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot s_{кр}} + 3 \cdot s_{кр} \right) = \frac{2,28}{2 \cdot 2,47} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot 0,05} + 3 \cdot 0,05 \right) = 4,68 \text{ (сек.)}.$$

Висновок. Повний час пуску асинхронного двигуна АВ-15-36-8 власних потреб конденсатного насосу з режиму неробочого ходу становить 4,68 сек.

Приклад № 8.2 Визначити якою повинна бути механічна стала часу T_j асинхронного двигуна циркуляційного насосу власних потреб типу ДВДА-260, щоб повний час його пуску $t_{пуск}$ без навантаження дорівнював 10 сек. Двигун

має такі параметри: кратність максимального моменту $b_H = 1,67$, критичне ковзання $s_{кр} = 0,0222$.

Розв'язок:

Повний час пуску двигуна $t_{пуск}$ з режиму неробочого ходу визначається

$$t_{пуск} = \frac{T_j}{2 \cdot b_H} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot s_{кр}} + 3 \cdot s_{кр} \right),$$

де T_j – механічна стала часу двигуна; b_H – кратність максимального моменту; $s_{кр}$ – критичне ковзання.

За умовою задачі: $t_{пуск} = 10,0$ сек., $b_H = 1,67$, $s_{кр} = 0,0222$.

Тоді,

$$T_j = \frac{2 \cdot b_H \cdot t_{пуск}}{\left(\frac{1}{2 \cdot s_{кр}} + 3 \cdot s_{кр} \right)} = \frac{2 \cdot 1,67 \cdot 10,0}{\left(\frac{1}{2 \cdot 0,0222} + 3 \cdot 0,0222 \right)} = 1,48 \text{ (сек.)}.$$

Висновок. Механічна стала часу асинхронного двигуна циркуляційного насосу власних потреб типу ДВДА-260 становить 1,48 сек.

Приклад № 8.3 Визначити якою повинна кратність максимального моменту b_H асинхронного двигуна А-13-59 циркуляційного насосу технічної води власних потреб АЕС, щоб тривалість його пуску без навантаження становила 5 сек. Двигун має такі паспортні параметри: механічна стала часу $T_j = 2,1$ сек., критичне ковзання $s_{кр} = 0,05$, $P_{ном} = 800$ кВт, $U_{ном} = 6$ кВ.

Розв'язок:

Кратність максимального моменту b_H можна визначити з виразу для повного часу пуску двигуна $t_{пуск}$ з режиму неробочого ходу

$$t_{пуск} = \frac{T_j}{2 \cdot b_H} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot s_{кр}} + 3 \cdot s_{кр} \right),$$

де T_j – механічна стала часу двигуна; b_H – кратність максимального моменту; $s_{кр}$ – критичне ковзання.

За умовою задачі: $t_{\text{пуск}} = 10,0$ сек., $T_j = 2,1$ сек., $s_{\text{кр}} = 0,0222$.

Тоді,

$$b_{\text{н}} = \frac{\left(\frac{1}{2 \cdot s_{\text{кр}}} + 3 \cdot s_{\text{кр}} \right) \cdot T_j}{2 \cdot t_{\text{пуск}}} = \frac{\left(\frac{1}{2 \cdot 0,05} + 3 \cdot 0,05 \right) \cdot 2,1}{2 \cdot 5,0} = 2,13 \text{ (в.о.)}.$$

Висновок. Кратність максимального моменту асинхронного двигуна А-13-59 циркуляційного насосу технічної води власних потреб АЕС становить 2,13 в.о.

Приклад № 8.4 Визначити перевищення температури обмотки статора з ізоляцією класу А над температурою оточуючого середовища $\Delta\theta_{1\text{пуск}}$ в кінці пуску електродвигуна власних потреб ТЕЦ з холодного стану, якщо час пуску складає $t_{\text{пуск}} = 10$ сек., номінальна густина струму в обмотці статора становить $j_{1\text{н}} = 5$ А/мм², а кратність періодичної складової струму статора $I_{1\text{к}^*}$ електродвигуна на початку пуску дорівнює 5.

Розв'язок:

Перевищення температури обмотки статора над температурою оточуючого середовища в кінці пуску $\Delta\theta_{1\text{пуск}}$ визначається з виразу

$$\Delta\theta_{1\text{пуск}} = \frac{(j_{1\text{н}} \cdot I_{1\text{к}^*})^2}{175} \cdot t_{\text{пуск}},$$

де $j_{1\text{н}}$ – номінальна густина струму в обмотці статора; $I_{1\text{к}^*}$ – кратність періодичної складової струму статора на початок пуску; $t_{\text{пуск}}$ – час пуску.

За умовою задачі: $j_{1\text{н}} = 5$ А/мм², $I_{1\text{к}^*} = 5$, $t_{\text{пуск}} = 10,0$ сек.

Тоді,

$$\Delta\theta_{1\text{пуск}} = \frac{(j_{1\text{н}} \cdot I_{1\text{к}^*})^2}{175} \cdot t_{\text{пуск}} = \frac{(5 \cdot 5)^2}{175} \cdot 10 = 35,71 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Висновок. В кінці пуску електродвигуна власних потреб ТЕЦ з холодного стану перевищення температури обмотки статора з ізоляцією класу А над температурою оточуючого середовища становить 35,71 °С.

Приклад № 8.5 Визначити допустимий по нагріванню обмотки статора час пуску електродвигуна з холодного стану, якщо номінальна густина струму в обмотці статора становить $j_{1н} = 4 \text{ А/мм}^2$, кратність періодичної складової на початку пуску дорівнює $I_{1к*} = 5$, а перевищення температури обмотки $\Delta\theta_{1пуск}$ статора над температурою оточуючого середовища в кінці пуску дорівнює $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язок:

Допустимий по нагріванню обмотки статора час пуску $t_{пуск}$ визначається з формули для визначення перевищення температури обмотки статора над температурою оточуючого середовища в кінці пуску $\Delta\theta_{1пуск}$ з виразу

$$\Delta\theta_{1пуск} = \frac{(j_{1н} \cdot I_{1к*})^2}{175} \cdot t_{пуск},$$

де $j_{1н}$ – номінальна густина струму в обмотці статора; $I_{1к*}$ – кратність періодичної складової струму статора на початок пуску; $t_{пуск}$ – час пуску.

За умовою задачі: $j_{1н} = 4 \text{ А/мм}^2$, $I_{1к*} = 5$, $\Delta\theta_{1пуск} = 30,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тоді,

$$t_{пуск} = \frac{175 \cdot \Delta\theta_{1пуск}}{(j_{1н} \cdot I_{1к*})^2} = \frac{175 \cdot 30,0}{(4 \cdot 5)^2} = 13,12 \text{ (сек.)}.$$

Висновок. Допустимий по нагріванню обмотки статора час пуску електродвигуна з холодного стану становить $13,12 \text{ сек}$.

Приклад № 8.6 Асинхронний двигун ВП електростанції, що пускається в хід з холодного стану досягає номінальних обертів через $t_{пуск} = 10 \text{ сек}$. Визначити яку кратність $I_{1к*}$ повинна мати періодична складова струму в обмотці статора на початку пуску двигуна, щоб перевищення температури обмотки статора $\Delta\theta_{1пуск}$ в кінці пуску дорівнювало $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Номінальна густина струму в обмотці статора $j_{1н}$ становить 5 А/мм^2 .

Розв'язок:

Кратність періодичної складової струму статора на початок пуску $I_{1к*}$ можна визначити з виразу для розрахунку перевищення температури обмотки статора над температурою оточуючого середовища в кінці пуску $\Delta\theta_{1пуск}$

$$\Delta\theta_{1пуск} = \frac{(j_{1н} \cdot I_{1к*})^2}{175} \cdot t_{пуск},$$

де $j_{1н}$ – номінальна густина струму в обмотці статора; $I_{1к*}$ – кратність періодичної складової струму статора на початок пуску; $t_{пуск}$ – час пуску.

За умовою задачі: $j_{1н} = 5 \text{ А/мм}^2$, $t_{пуск} = 10,0 \text{ сек}$, $\Delta\theta_{1пуск} = 25,0 \text{ }^\circ\text{С}$.

Тоді,

$$I_{1к*} = \sqrt{\frac{175 \cdot \Delta\theta_{1пуск}}{t_{пуск} \cdot j_{1н}^2}} = \sqrt{\frac{175 \cdot 25}{10 \cdot 5^2}} = 4,18 \text{ (в.о.)}.$$

Висновок. Кратність періодичної складової струму статора на початку пуску асинхронного двигуна ВП електростанції з холодного стану має бути 4,18 в.о.

Приклад № 8.7 Асинхронний двигун ВП електростанції, пускається в хід з холодного стану і досягає номінальних обертів через $t_{пуск} = 9 \text{ сек}$. Визначити, яка повинна бути номінальна густина струму статора $j_{1н}$, щоб перевищення температури обмотки статора в кінці пуску становило $\Delta\theta_{1пуск} = 30^\circ\text{С}$. Кратність періодичної складової струму в обмотці статора на початку пуску $I_{1к*}$ дорівнює 5.

Розв'язок:

Номінальна густина струму в обмотці статора асинхронного двигуна $j_{1н}$ можна визначити з формули для визначення перевищення температури обмотки статора над температурою оточуючого середовища в кінці пуску $\Delta\theta_{1пуск}$

$$\Delta\theta_{1пуск} = \frac{(j_{1н} \cdot I_{1к*})^2}{175} \cdot t_{пуск},$$

де $j_{1н}$ – номінальна густина струму в обмотці статора; $I_{1к*}$ – кратність періодичної складової струму статора на початок пуску; $t_{пуск}$ – час пуску.

За умовою задачі: $I_{1к*} = 5$, $t_{пуск} = 9,0 \text{ сек}$, $\Delta\theta_{1пуск} = 30,0 \text{ }^\circ\text{С}$.

Тоді,

$$j_{1н} = \sqrt{\frac{175 \cdot \Delta\theta_{1пуск}}{t_{пуск} \cdot I_{1к*}^2}} = \sqrt{\frac{175 \cdot 30}{9 \cdot 5^2}} = 4,83 \left(\frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \right).$$

Висновок. Номінальна густина струму статора асинхронного двигуна ВП електростанції при пуску в хід з холодного стану має бути 4,83 А/мм².

8.4 Задачі для самостійного розв'язання

Задача № 8.1 Визначити повний час пуску асинхронного двигуна А-13-59 циркуляційного насосу технічної води з режиму неробочого ходу, якщо кратність максимального моменту $b_n = 2,3$, механічна стала часу $T_j = 2,1$ сек, критичне ковзання $s_{кр} = 0,05$.

Задача № 8.2 Визначити якою повинна кратність максимального моменту b_n асинхронного двигуна АВ-15-36-8 власних потреб конденсатного насосу, щоб тривалість його пуску без навантаження становила 4 сек. Двигун має такі паспортні параметри: механічна стала часу $T_j = 2,1$ сек, критичне ковзання $s_{кр} = 0,058$, $P_{ном} = 1000$ кВт, $U_{ном} = 6$ кВ.

Задача № 8.3 Визначити перевищення температури обмотки статора з ізоляцією класу В над температурою оточуючого середовища $\Delta\theta_{1пуск}$ в кінці пуску електродвигуна власних потреб ТЕЦ з холодного стану, якщо час пуску складає $t_{пуск} = 9$ с, номінальна густина струму в обмотці статора становить $j_{1н} = 4$ А/мм², а кратність періодичної складової струму статора $I_{1к*}$ електродвигуна на початку пуску дорівнює 4.

Задача № 8.4 Визначити допустимий по нагріванню обмотки статора час пуску електродвигуна з холодного стану, якщо номінальна густина струму в обмотці статора становить $j_{1н} = 5$ А/мм², кратність періодичної складової на початку пуску дорівнює $I_{1к*} = 5$, а перевищення температури обмотки $\Delta\theta_{1пуск}$ статора над температурою оточуючого середовища в кінці пуску дорівнює 35 °С.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 9

«ПРОВЕДЕННЯ ОПЕРАТИВНИХ ПЕРЕМИКАНЬ В ГОЛОВНИХ СХЕМАХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В НОРМАЛЬНИХ РЕЖИМАХ І ПІД ЧАС ЛІКВІДАЦІЇ АВАРІЇ»

9.1 Мета та зміст заняття

Мета: Формування навичок та умінь виконання оперативних перемикачів в головних схемах в нормальному режимі та під час ліквідації аварії.

Навчальні запитання:

1. Особливості виконання оперативних перемикачів в головних схемах при нормальному режимі та під час ліквідації аварії.
2. Алгоритм виконання оперативних перемикачів в головних схемах при нормальному режимі та під час ліквідації аварії.
3. Аналіз правильності виконаних оперативних перемикачів в головних схемах в нормальному режимі та під час ліквідації аварії.
4. **Задача** – Вивід приєднання в ремонт.
5. **Задача** – Переключення навантаження до сусідньої секції шин у разі виникнення відмови своєї секції шин.

9.2 Короткі теоретичні відомості

У відповідності з [3, 4, 10] та чинним нормативним документом СОУ-НЕС 20.178.2008 у схемах електричних з'єднань розглядаються такі режими роботи:

нормальний режим роботи – режим роботи схеми електроустановки, усі приєднання якої знаходяться в робочому стані;

аварійний режим роботи – короткочасний наперед не передбачуваний режим, що настав внаслідок аварійного порушення нормальної роботи схеми ПС (РП, РУ) із виведенням мінімум одного приєднання РУ з робочого стану в результаті виходу із ладу будь-якого елемента приєднання;

післяаварійний режим роботи – відносно тривалий режим роботи схеми електроустановки після виведення із робочого стану аварійного приєднання, який дає змогу здійснювати функції ПС (РП, РУ) із зниженою проти нормального режиму надійністю;

ремонтний режим роботи – режим з наперед запланованим виведенням з робочого стану будь-якої частини РУ;

ремонтно-аварійний режим роботи – аварійний режим, який настає під час знаходження РУ в ремонт-ному режимі.

За вимогами до надійності роботи схеми встановлено граничну кількість вимикачів, які спрацьовують одночасно в межах РУ однієї напруги в разі ушкодження одного приєднання. Ця кількість повинна бути не більшою ніж:

- **два** – у разі ушкодження лінії;
- **три** – у разі ушкодження силового трансформатора напругою 750 кВ;
- **чотири** – у разі ушкодження силового трансформатора напругою до 500 кВ.

У післяаварійних режимах допустимо навіть зниження або навіть перерва транзиту потужності, обмеження електропостачання споживачів при наявності техніко-економічного обґрунтування з урахуванням витрат на збільшення пропускної спроможності схеми, яка виключає зазначені обмеження.

Схема з однією секціонованою системою збірних шин. Широке поширення на електричних станціях та підстанціях набула схема з однією системою збірних шин, секційована вимикачем (рис. 9.1).

Нормальний режим роботи. Джерела живлення Т1 і Т2 підключені до різних секцій збірних шин за допомогою вимикачів та роз'єднувачів. Секції можна з'єднати електрично за допомогою секційного вимикача. У нормальному режимі СВ увімкнено, що забезпечує паралельну роботу джерел живлення на загальне навантаження.

Ремонтний режим. Виведення в ремонт будь-якого з приєднань (лінія, трансформатор) не зустрічає будь-яких труднощів (рис. 9.2). При цьому жодних обмежень щодо режиму роботи схеми та пропускної здатності приєднань які

залишились в роботі немає. Також немає ніякої необхідності робити будь-які зміни в режимі роботи пристроїв релейного захисту та автоматики.

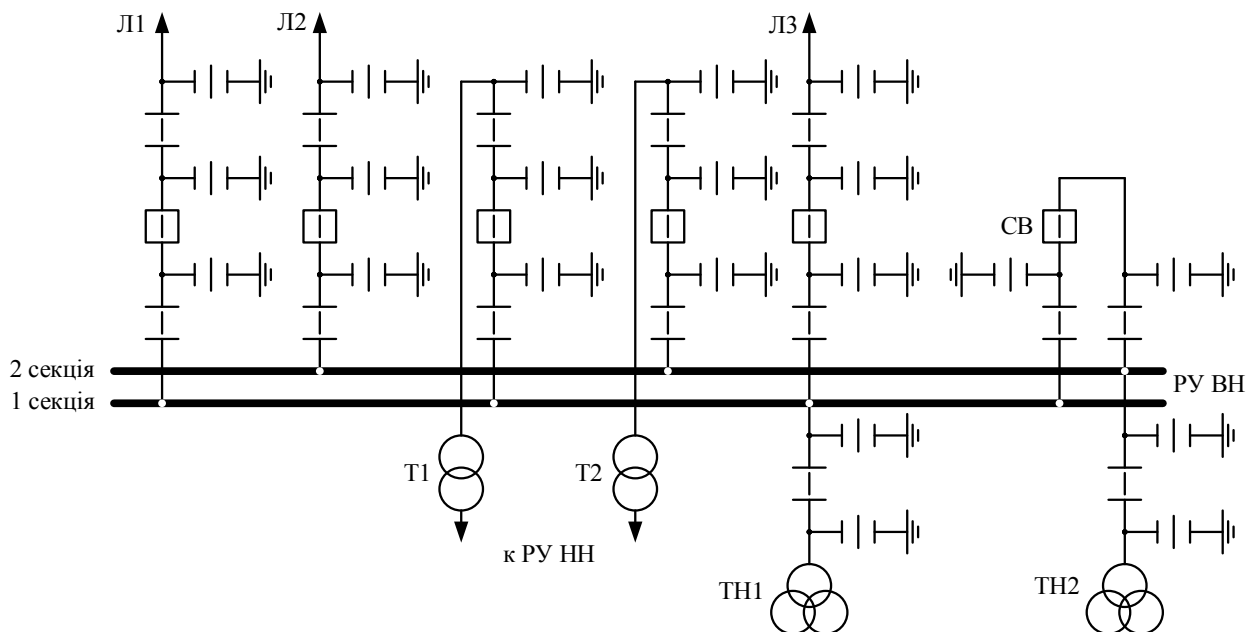


Рисунок 9.1 – Схема з однією секціонованою системою збірних шин

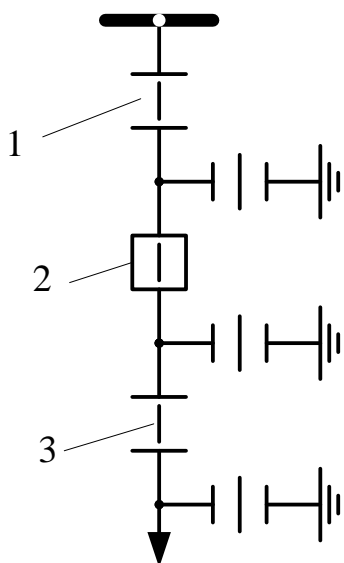


Рисунок 9.2 – Приєднання ЛЕП:

- 1 – шинний роз'єднувач;
- 2 – вимикач; 3 – лінійний роз'єднувач

Вимкнення:

- 1) вимикається вимикач;
- 2) перевіряється вимкнене положення вимикача;
- 3) вимикається лінійний роз'єднувач;
- 4) вимикається шинний роз'єднувач.

Ввімкнення:

- 1) перевіряється вимкнене положення вимикача
- 2) вмикається шинний роз'єднувач;
- 3) вмикається лінійний роз'єднувач;
- 4) вмикається вимикач.

Послідовність основних та перевірочних операцій при виводі в ремонт та вводі в роботу після ремонту секції шин (наприклад, 1 секції):

Виведення в ремонт:

- 1) переводиться навантаження з трансформатора Т1 на трансформатор Т2 в РУ низької напруги;
- 2) вимикається вимикач трансформатора Т1 з боку високої напруги, по приладах перевіряється відсутність навантаження на трансформаторі Т1;
- 3) знімається оперативний струм з приводу вимикача трансформатора Т1;
- 4) вимикається вимикач лінії Л1, за приладами перевіряється відсутність навантаження на Л1;
- 5) знімається оперативний струм з приводу вимикача лінії Л1;
- 6) вимикається вимикач лінії Л3, за приладами перевіряється відсутність навантаження на Л3;
- 7) знімається оперативний струм з приводу вимикача лінії Л3;
- 8) перевіряється за амперметром відсутність навантаження на СВ та вимикається СВ;
- 10) знімається оперативний струм з приводу СВ;
- 11) знімаються запобіжники (вимикаються автоматичні вимикачі) з боку низької напруги трансформатора напруги ТН1;
- 12) вимикається шинний роз'єднувач трансформатора напруги ТН1;
- 13) перевіряється на місці встановлення вимкнене положення вимикача трансформатора Т1 з боку високої напруги, вимикається його шинний роз'єднувач високої напруги;
- 14) перевіряється на місці встановлення вимкнене положення вимикача лінії Л1, вимикається її шинний роз'єднувач;
- 15) перевіряється на місці встановлення вимкнене положення вимикача лінії Л3, вимикається її шинний роз'єднувач; перевіряється його вимкнене положення;
- 16) перевіряється на місці встановлення вимкнене положення вимикача СВ, вимикається його шинний роз'єднувач 1 секції;
- 17) перевіряється відсутність напруги на шинному роз'єднувачі трансформатора напруги ТН1 в бік 1 секції. Вмикається ЗН на шинному роз'єднувачі трансформатора напруги ТН1 в бік 1 секції;

18) виконуються інші технічні заходи, які забезпечують безпечне виконання робіт;

19) подається оперативний струм на приводи вимикачів всіх приєднань 1 секції.

Введення в роботу:

Перед введенням у роботу секції шин після ремонту оперативний персонал: оглядає місце робіт; переконується у відсутності людей, і навіть сторонніх предметів на устаткуванні; знімає тимчасові огорожі та переносні плакати безпеки.

1) вмикається ЗН на шинному роз'єднувачі трансформатора напруги ТН1 у бік 1 секції;

2) знімається оперативний струм з приводів вимикачів всіх приєднань 1 секції;

3) перевіряється на місці встановлення вимкнене положення вимикача СВ, вмикається його шинний роз'єднувач 1 секції;

4) перевіряється на місці встановлення вимкнене положення вимикача лінії Л1, вмикається його шинний роз'єднувач;

5) перевіряється на місці встановлення вимкнене положення вимикача лінії Л3, вмикається його шинний роз'єднувач;

6) перевіряється на місці установки вимкнене положення вимикача трансформатора Т1 з боку високої напруги, вмикається шинний роз'єднувач трансформатора Т1 з боку високої напруги;

7) вмикається шинний роз'єднувач трансформатора напруги 1 секції та встановлюються запобіжники (вмикаються автоматичні вимикачі) з боку низької напруги;

8) вмикається захист СВ з уставками для режиму «Опробування»;

9) подається оперативний струм на приводи вимикачів всіх приєднань 1 секції;

10) вмикається СВ; перевіряється наявність напруги на 1 секції;

11) вмикається вимикач лінії Л1, приладами перевіряється наявність навантаження на Л1;

12) вмикається вимикач лінії Л3, приладами перевіряється наявність навантаження на Л3;

13) вмикається вимикач трансформатора Т1 з боку високої напруги;

14) відновлюється нормальна схема живлення навантаження між трансформаторами Т1 і Т2 в РУ низької напруги підстанції.

Післяаварійний режим. Найчастішим є режим після вимкнення пошкодженого приєднання. Пошкоджене приєднання вмикається своїм вимикачем, не викликаючи порушення режиму роботи та пропускну здатність інших непошкоджених приєднань.

Серйозніші післяаварійні наслідки виникають при вимкненні пошкодженого приєднання з відмовою його вимикача. В цьому випадку автоматика УРОВ вмикає всі вимикачі даної системи шин. Відбувається повне погашення всіх приєднань однієї секції. Для відновлення роботи неушкоджених приєднань необхідно вимкнути ШР пошкодженого приєднання та потім дистанційно ввімкнути вимикачі неушкоджених приєднань.

При короткому замиканні на збірних шинах вмикаються всі вимикачі даної системи шин, що призводить до знеструмлення лише однієї секції. Однак аварія у секційному вимикачі призводить до повного погашення схеми.

Схема з двома робочими та обхідною системою шин. Схеми з одним вимикачем на ланцюг застосовують у РУ напругою до 110, 220 кВ. При вищій напрузі пропускну здатність ліній збільшується, потужність джерела живлення більша. Для підвищення надійності таких схем застосовують більшу кількість вимикачів.

Нормальний режим роботи. Схема має два нормальні режими. У кожному режимі вимкнення будь-якого приєднання здійснюється одним вимикачем.

1-й режим. Одна система шин є робочою, інша – резервною. Шиноз'єднувальний вимикач нормально вимкнено. Всі приєднання вмикаються

на робочу систему збірних шин, резервна система збірних шин нормально вимкнена.

2-й режим. Обидві системи шин нормально є робочими. Цей режим переважно застосовуваним на практиці. Усі приєднання розподілені між обома системами шин. Шиноз'єднувальний вимикач нормально ввімкнутий. Розподіл приєднань між системами шин проводиться за принципом мінімуму перетоку через вимикач.

Ремонтний режим. *Послідовність основних та перевірочних операцій при переведенні всіх приєднань, які перебувають у роботі, з робочої системи шин на резервну за допомогою ШЗВ* (рис. 9.3).

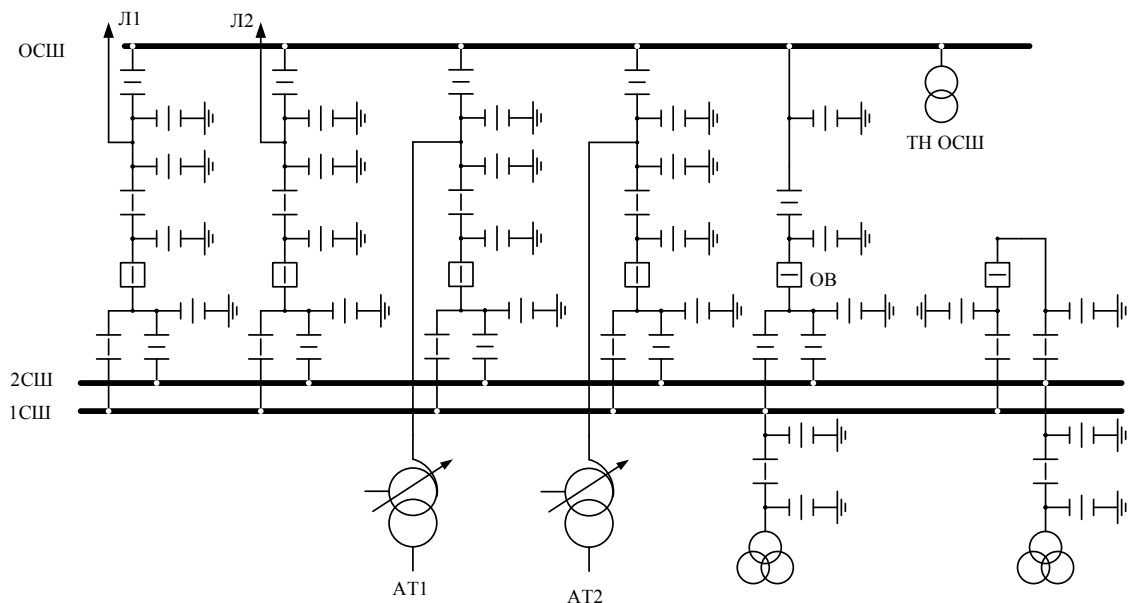


Рисунок 9.3 – Схема РУ при переведенні всіх приєднань з робочої системи шин на резервну за допомогою ШЗВ

- 1) перевіряється за приладами відсутність напруги на резервній системі шин;
- 2) перевіряється зовнішнім оглядом готовність резервної системи шин до вмикання під напругу;
- 3) вмикається ШЗВ та перевіряється по приладах наявність напруги на резервній системі шин;
- 4) знімається оперативний струм з приводу ШЗВ;
- 5) перевіряється на місці встановлення ввімкнене положення ШЗВ;

б) вмикаються шинні роз'єднувачі всіх приєднань, що переводяться на резервну систему шин;

7) вимикаються шинні роз'єднувачі всіх приєднань, які переводяться до системи шин, яка звільняється;

8) перемикається живлення ланцюгів напруги захистів, автоматики та вимірювальних приладів на трансформатор напруги резервної системи шин, якщо живлення ланцюгів не перемикається автоматично;

9) подається оперативний струм на привід ШЗВ;

10) перевіряється по амперметру відсутність навантаження на ШЗВ і вмикається ШЗВ;

11) перевіряється за приладами відсутність напруги на звільненій системі шин.

Послідовність основних та перевірочних операцій при переводі всіх приєднань, які перебувають у роботі, з однієї системи шин на іншу за допомогою ШЗВ в РУ з фіксованим розподілом приєднань по системах шин (рис. 9.5).

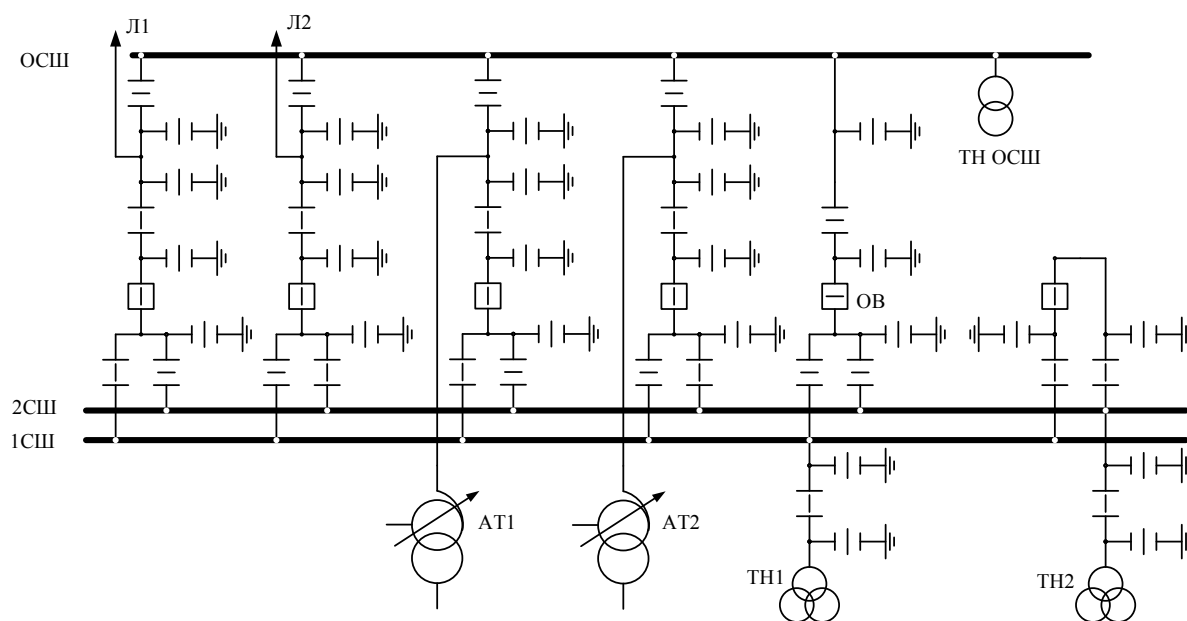


Рисунок 9.4 – Схема РУ з двома робочими та обхідною системою шин з одним вимикачем на ланцюг та фіксованим розподілом приєднань

1) вмикається ШЗВ (якщо він був вимкнутий);

2) знімається оперативний струм з приводу ШЗВ;

- 3) перевіряється на місці встановлення ввімкнуте положення ШЗВ;
- 4) вмикаються шинні роз'єднувачі всіх приєднань, що переводяться на ту систему шин, яка залишається в роботі;
- 5) вимикається шинні роз'єднувачі всіх приєднань, які переводяться до системи шин, яка звільняється;
- 6) перемикається живлення ланцюгів напруги захистів, автоматики та вимірювальних приладів на трансформатор напруги тієї системи шин, яка залишається в роботі, якщо живлення не перемикається автоматично;
- 7) подається оперативний струм на привід ШЗВ;
- 8) перевіряється по амперметру відсутність навантаження на ШЗВ та вимикається ШЗВ;
- 9) перевіряється за приладами відсутність напруги на звільненій системі шин.

Послідовність основних та перевірочних операцій при перемиканні приєднання з однієї системи шин на іншу без використання ШЗВ (рис. 9.4).

- 1) перевіряється допустимість режиму, який встановиться після вимкнення приєднання для перемикання його на іншу систему шин;
- 2) вимикається вимикач приєднання, знімається оперативний струм з приводу вимикача;
- 3) перевіряється на місці установки вимкнуте положення вимикача приєднання, яке перемикається;
- 4) вимикається шинний роз'єднувач приєднання, який перемикається;
- 5) вмикається шинний роз'єднувач приєднання, який перемикається, на ту систему шин, на яку він переводиться;
- 6) перемикається живлення ланцюгів напруги захистів, автоматики та вимірювальних приладів приєднання на трансформатор напруги тієї системи шин, на яку переводиться приєднання, якщо живлення не перемикається автоматично;

7) подається оперативний струм на привід вимикача, проводиться синхронізація, якщо вона потрібна, і вмикається вимикач приєднання, перевіряється наявність навантаження по амперметру.

Послідовність операцій та дій при виведенні в ремонт системи шин, яка перебуває у стані резерву (ШЗВ вимкнено) та введенні в резерв після ремонту (рис. 9.3).

Виведення в ремонт:

- 1) знімається оперативний струм з приводу ШЗВ;
- 2) перевіряється на місці встановлення вимкнуте положення ШЗВ, вмикається його шинний роз'єднувач резервної системи шин;
- 3) знімаються запобіжники (або вимикаються автоматичні вимикачі) з боку низької напруги ТН резервної системи шин;
- 4) вмикається шинний роз'єднувач трансформатора напруги резервної системи шин;
- 5) перевіряється вимкнуте положення шинних роз'єднувачів всіх інших приєднань від системи шин, яка виводиться в ремонт;
- 6) перевіряється відсутність напруги на струмовідних частинах, де мають бути накладені заземлення. Вмикається ЗН або накладаються переносні заземлення там, де немає ЗН;
- 7) виконуються інші технічні заходи, які забезпечують безпечне виконання робіт;
- 8) подається оперативний струм на привод ШЗВ.

Введення в роботу:

Перед введенням у резерв системи шин після ремонту оперативний персонал оглядає місце роботи, перевіряє, в якому положенні знаходяться (залишені ремонтним персоналом) шинні роз'єднувачі, ЗН приєднань після ремонту; переконується у відсутності людей, і навіть сторонніх предметів на устаткуванні; знімають тимчасові огорожі та переносні плакати безпеки.

- 1) знімається оперативний струм з приводу ШЗВ;

2) вимикається ЗН (знімаються переносні заземлення та розміщуються у місцях зберігання);

3) знімаються замки і плакати з приводів всіх шинних роз'єднувачів системи шин, яка вводиться в резерв;

4) вмикається шинний роз'єднувач трансформатора напруги системи шин, яка вводиться в резерв; встановлюються запобіжники (вмикаються автоматичні вимикачі) з боку низької напруги;

5) перевіряється на місці встановлення вимкнуте положення ШЗВ та вмикається роз'єднувач резервної системи шин ШЗВ;

6) на привід ШЗВ подається оперативний струм;

7) вмикається ШСВ, перевіряється по приладах наявність напруги на системі шин, яка опробується;

8) вимикається ШЗВ.

Послідовність операцій та дій при виводі в ремонт системи шин з переведенням всіх приєднань, які знаходяться в роботі, з однієї системи шин на іншу за допомогою ШЗВ в РУ з фіксованим розподілом приєднань по системах шин (рис. 9.4).

Виведення в ремонт:

1) вмикається ШЗВ (якщо він був вимкнений);

2) знімається оперативний струм з приводу ШЗВ;

3) перевіряється на місці встановлення вимкнуте положення ШЗВ;

4) вмикаються шинні роз'єднувачі всіх приєднань, які переводяться на ту систему шин яка залишається в роботі;

5) вимикаються шинні роз'єднувачі всіх приєднань, які переводяться від виводимої в ремонт системи шин;

6) перевіряється вимкнуте положення шинного роз'єднувача ОВ від виводимої в ремонт системи шин;

7) перемикається живлення ланцюгів напруги захистів, автоматики та вимірювальних приладів приєднання на трансформатор напруги тієї системи шин, яка залишається в роботі, якщо живлення не перемикається автоматично;

- 8) подається оперативний струм на його привод ШЗВ;
- 9) перевіряється по амперметру відсутність навантаження на ШЗВ і вимикається ШЗВ; перевіряється за приладами відсутність напруги на системі шин, яка виводиться в ремонт;
- 10) знімається оперативний струм з привода ШЗВ;
- 11) перевіряється на місці встановлення вимкнуте положення ШЗВ, вимикається його шинний роз'єднувач від системи шин, яка виводиться в ремонт;
- 12) знімаються запобіжники (або вимикаються автоматичні вимикачі) з боку низької напруги ТН системи шин, яка виводиться в ремонт;
- 13) вимикається шинний роз'єднувач трансформатора напруги системи шин, яка виводиться в ремонт; перевіряється відсутність напруги на струмовідних частинах, де мають бути накладені заземлення. Вмикається ЗН або накладаються переносні заземлення там, де немає ЗН;
- 14) виконуються інші технічні заходи, які забезпечують безпечне виконання робіт;
- 15) подається оперативний струм на привод ШЗВ.

Послідовність операцій та дій під час введення в роботу після ремонту системи шин та переведення частини приєднань з однієї системи шин на іншу за допомогою ШЗВ в РУ з фіксованим розподілом приєднань по системах шин (рис. 9.4).

Введення в роботу:

Перед введенням у роботу системи шин після ремонту оперативний персонал: оглядає місце робіт, перевіряє, в якому положенні знаходяться (залишені ремонтним персоналом) шинні роз'єднувачі приєднань після ремонту; переконується у відсутності людей, і навіть сторонніх предметів на устаткуванні; знімають тимчасові огорожі та переносні плакати безпеки.

- 1) знімається оперативний струм із приводу ШЗВ;
- 2) вимикаються ЗН (знімаються переносні заземлення та розміщуються у місцях зберігання);

3) знімаються замки і плакати з приводів всіх шинних роз'єднувачів приєднань системи шин, яка вводиться в роботу;

4) вмикаються шинний роз'єднувач трансформатора напруги системи шин, яка вводиться в роботу; встановлюються запобіжники (вмикаються автоматичні вимикачі) з боку низької напруги;

5) перевіряється на місці установки вимкнуте положення ШЗВ і вмикається шинний роз'єднувач системи шин ШЗВ, яка вводиться в роботу, перевіряється його включене положення;

6) на привід ШЗВ подається оперативний струм;

7) вмикається ШЗВ; перевіряється наявність напруги на системі шин, яка вводиться в роботу;

8) знімається оперативний струм з приводу ШЗВ;

9) перевіряється на місці встановлення ввмкнуте положення ШЗВ;

10) вмикаються шинні роз'єднувачі тих приєднань, фіксація яких здійснюється на систему шин, яка вмикається в роботу;

11) вимикаються шинні роз'єднувачі від системи шин, яка залишалась в роботі тих приєднань, перевод яких здійснюється на систему шин, що вмикається в роботу;

12) перемикається живлення ланцюгів напруги захисту, автоматики та вимірювальних приладів на відповідний трансформатор напруги, якщо живлення ланцюгів не перемикається автоматично;

13) подається оперативний струм на привід ШЗВ.

Послідовність основних та перевірочних операцій при виведенні в ремонт та введенні в роботу трансформатора напруги (наприклад ТН1) (з об'єднанням систем шин за допомогою ШЗВ) в РУ з фіксованим розподілом приєднань по системах шин (рис. 9.4).

Виведення в ремонт:

1) знімаються запобіжники (або вимикаються автоматичні вимикачі) з боку низької напруги трансформатора напруги ТН1;

2) вимикається шинний роз'єднувач трансформатора напруги ТН1;

3) перевіряється відсутність напруги на шинному роз'єднувачі ТН1 у бік ТН1. Вмикається ЗН на шинному роз'єднувачі ТН1 у бік ТН1 або накладаються переносні заземлення там, де немає ЗН;

4) виконуються інші технічні заходи, що забезпечують безпечно виконання робіт (вивішується плакат «Заземлено» на приводі вимкненого шинного роз'єднувача ТН1, відповідні плакати на робочому місці, встановлюються огорожі).

Введення в роботу:

Перед введенням у роботу трансформатора напруги ТН1 після ремонту оперативний персонал: оглядає місце робіт; переконується у відсутності людей, і навіть сторонніх предметів на устаткуванні; знімає тимчасові огорожі та переносні плакати безпеки.

1) вимикається ЗН на шинному роз'єднувачі ТН1 у бік ТН1 (знімаються переносні заземлення та розміщуються у місцях зберігання);

2) вмикається шинний роз'єднувач трансформатора напруги ТН1;

3) встановлюються запобіжники (вмикаються автоматичні вимикачі) з боку низької напруги трансформатора напруги ТН1;

4) переводяться ланцюги напруги приєднань, підключених до ІСШ, ТН1.

Послідовність операцій при перемиканнях з виведення в ремонт вимикача ЛЕП (наприклад, В1) з переведенням ЛЕП (наприклад, ПЛ 220 кВ А-Б) на обхідний вимикач (рис. 9.5).

Виведення в ремонт:

1) перевіряється вимкнуте положення ОВ за місцем встановлення;

2) вмикається шинний роз'єднувач ШР1 ОВ;

3) вмикається роз'єднувач Р-ОВ;

4) подається оперативний струм на привод ОВ;

5) вмикається ОВ (опробування ОСШ 220 кВ);

6) перевіряється наявність напруги на ОСШ 220 кВ за приладами;

7) вимикається ОВ;

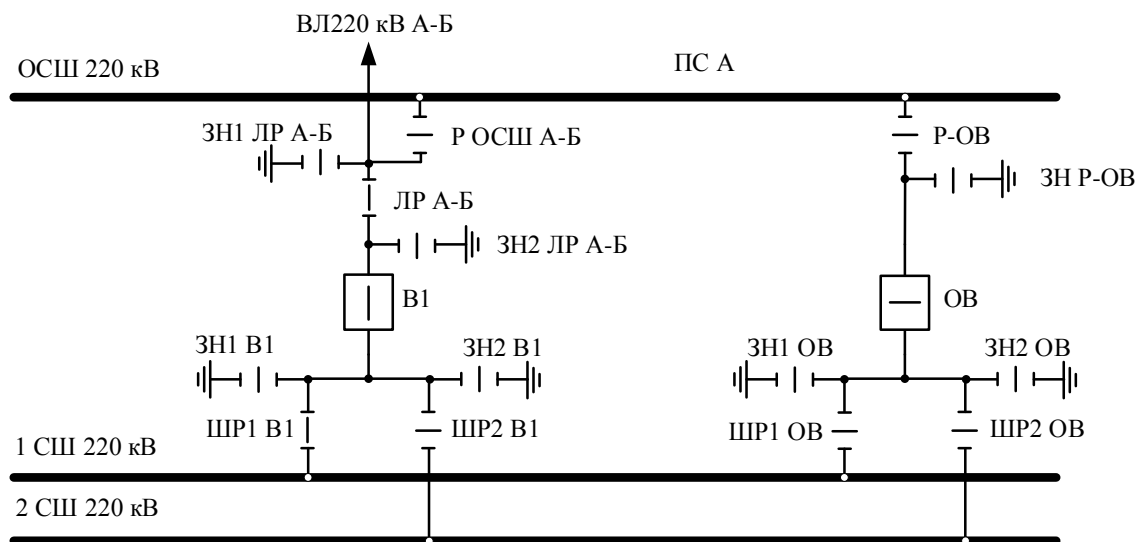


Рисунок 9.5 – Схема РУ з двома робочими та обхідною системою шин

- 8) знімається оперативний струм з приводу ОВ;
- 9) перевіряється ввімкнуте положення ОВ за місцем встановлення;
- 10) вмикається роз'єднувач Р ОСШ А-Б;
- 11) подається оперативний струм на привод ОВ;
- 12) вмикається ОВ;
- 13) перевіряється розподіл навантаження між ОВ та вимикачем В1 по приладах;
- 14) вмикається вимикач В1;
- 15) знімається оперативний струм з приводу вимикача В1;
- 16) перевіряється вимкнуте положення вимикача В1 за місцем встановлення;
- 17) вмикається лінійний роз'єднувач ЛР А-Б;
- 18) вмикається шинний роз'єднувач ШП1 В1;
- 19) перевіряється відсутність напруги між роз'єднувачем ШП1 В1 та вимикачем В1;
- 20) вмикається ЗН1 В1 (ЗН2 В1);
- 21) перевіряється відсутність напруги між роз'єднувачем ЛР А-Б та вимикачем В1;
- 22) вмикається ЗН2 ЛР А-Б.

Введення в роботу (з переведенням ПЛ 220 кВ А-Б з ОВ на власний вимикач):

- 1) вимикається ЗН2 ЛР А-Б;
- 2) перевіряється вимкнене положення ЗН2 ЛР А-Б;
- 3) вимикається ЗН1 В1 (ЗН2 В1);
- 4) перевіряється вимкнене положення ЗН2 В1 (ЗН1 В1);
- 5) перевіряється вимкнене положення вимикача В1 за місцем встановлення;
- 6) вмикається шинний роз'єднувач ШР1 В1;
- 7) вмикається лінійний роз'єднувач ЛР А-Б;
- 8) подається оперативний струм на привід вимикача В1;
- 9) вмикається вимикач В1;
- 10) перевіряється розподіл навантаження між ОВ та вимикачем В1 по приладах;
- 11) вимикається ОВ;
- 12) знімається оперативний струм з приводу ОВ;
- 13) перевіряється вимкнене положення ОВ за місцем встановлення;
- 14) вимикається роз'єднувач Р ОСШ А-Б;
- 15) вимикається роз'єднувач Р-ОВ;
- 16) вимикається шинний роз'єднувач ШР1 ОВ.

Післяаварійний режим. При пошкодженні приєднання воно вимикається своїм вимикачем, не викликаючи порушення режиму роботи та пропускної здатності інших неушкоджених приєднань. У післяаварійному режимі достатньо ізолювати пошкоджене приєднання його роз'єднувачем. У режимі «з фіксацією приєднань» буде порушено баланс потужностей між шинами.

У разі вимкнення пошкодженого приєднання з відмовою вимикача автоматика УРОВ вимикає всі вимикачі цієї системи шин. При роботі схеми за 1-м режимом відбувається повне погашення всіх приєднань. Для відновлення роботи неушкоджених приєднань необхідно вимкнуту ШР пошкодженого

приєднання і потім дистанційно увімкнути вимикачі непошкоджених приєднань. Якщо ж вихідним режимом схеми був режим «з фіксацією приєднань», то вимикається лише частина приєднань, що працюють від тієї ж системи шин, що й пошкоджене приєднання. Вимикається також і ШЗВ. У післяаварійному режимі для відновлення роботи неушкоджених приєднань необхідно перевести захист шин у режим «з порушенням фіксації», вимкнути роз'єднувачі пошкодженого приєднання та дистанційно увімкнути вимикачі неушкоджених приєднань.

Схема з двома системами збірних шин та трьома вимикачами на два приєднання. Капітальні вкладення у схему з двома вимикачами на приєднання можна зменшити, зберігши всі її основні переваги, якщо через три вимикачі до двох збірних шин підключити два приєднання. Схема з двома системами збірних шин і трьома вимикачами на два ланцюги, яка отримала назву «полупортна», застосовується в РУ 330, 500, 750 кВ.

Нормальний режим роботи. У нормальному режимі роботи кожне приєднання увімкнено через два вимикачі, обидві системи шин знаходяться під напругою. Усі комутаційні операції виконуються вимикачами. Роз'єднувачі служать лише зняття напруги з вимкнутої ділянки чи елемента схеми й для створення видимого розриву.

Розподіл приєднань та перетоки потужності по елементами схеми фіксовані. При виконанні будь-яких оперативних перемикачів заданий баланс потужності по елементам комірки порушується, що може спричинити помилкове спрацювання захисту та несанкціоноване вимкнення приєднань. Щоб уникнути цього перед виконанням оперативних перемикачів, попередньо слід зробити необхідні перемикачів в схемах вторинної комутації. Оскільки ці операції робляться на обладнанні, що працює, то є висока ймовірність оперативних помилок, що є великим недоліком цієї схеми при всіх її перевагах.

Ремонтний режим. Вивод в ремонт будь-якого елемента або ділянки схеми провадиться вимкненням відповідних вимикачів з подальшою ізоляцією

його роз'єднувачами. При цьому порушення роботи інших приєднань чи елементів схеми не виникає.

Послідовність основних та перевірочних операцій, дій при виведенні в ремонт та введенні в роботу після ремонту лінії електропередачі ПЛ51 при полоторній схемі електричних з'єднань (рис. 9.5).

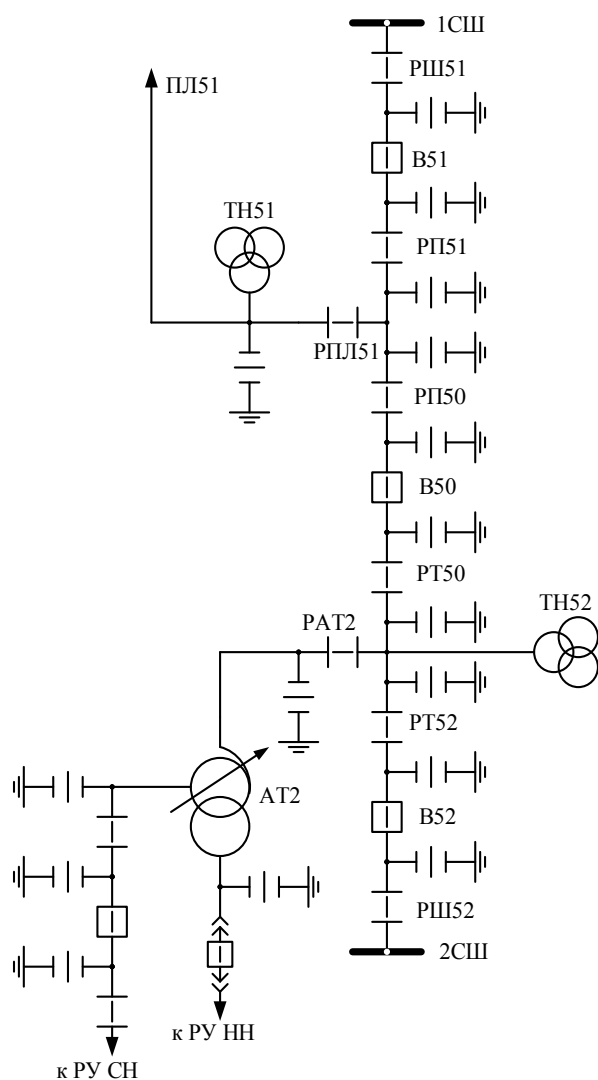


Рисунок 9.5 – Частина РУ 500 кВ к початку виконання операцій по виводу в ремонт ПЛ51 або АТ2, ввімкнених по полоторній схемі

Виведення в ремонт:

1) перевіряється допустимість вимкнення лінії ПЛ51 по навантаженню та схемі РУ; виконуються необхідні режимні заходи, у тому числі операції з пристроями протиаварійної автоматики, перекладаються ланцюги напруги лінії ПЛ51 трансформатора напруги ТН51 на трансформатор напруги ТН52;

2) вимикаються вимикачі В50 та В51; перевіряється відсутність навантаження на лінії ПЛ51; знімається оперативний струм з вимикачів В50 та В51;

3) перевіряється на місці установки вимкнене положення вимикачів В50 та В51;

4) вимикається лінійний роз'єднувач РПЛ51; знімаються запобіжники (вимикаються

автоматичні вимикачі, рубильники) в оперативних ланцюгах приводу роз'єднувача РПЛ51; вимикаються силові ланцюги приводу роз'єднувача РПЛ51;

5) знімаються запобіжники (вимикаються рубильники, автоматичні вимикачі) з боку низької напруги трансформатора напруги ТН51;

6) перевіряється відсутність напруги на лінії ПЛ51, вмикаються ЗН у роз'єднувача РПЛ51 у бік лінії ПЛ51;

7) подається оперативний струм та вмикаються вимикачі В51 та В50, перевіряється по приладах струм навантаження.

Введення в роботу:

1) перевіряється допустимість проведення операцій із вмикання лінії ПЛ51, виконуються необхідні режимні заходи, у тому числі операції з пристроями протиаварійної автоматики;

2) вимикається ЗН роз'єднувача РПЛ51 з боку лінії ПЛ51;

3) встановлюються запобіжники (вимикаються рубильники, автоматичні вимикачі) з боку низької напруги трансформатора напруги ТН51;

4) вимикаються вимикачі В50 та В51; перевіряється відсутність струму навантаження; знімається оперативний струм з вимикачів В50 та В51;

5) перевіряється на місці установки вимкнуте положення вимикачів В50 та В51;

6) встановлюються запобіжники (вимикаються автоматичні вимикачі, рубильники) в оперативних ланцюгах приводу роз'єднувача РПЛ51; подається напруга на силові кола приводу роз'єднувача; вмикається роз'єднувач РПЛ51;

7) подається оперативний струм і вмикаються вимикачі В51 та В50, перевіряється струм навантаження;

8) виконуються необхідні режимні заходи, у тому числі із пристроями протиаварійної автоматики, передбачені диспетчерськими програмами перемикачів.

Послідовність основних та перевірочних операцій при виведенні в ремонт та введенні в роботу після ремонту автотрансформатора АТ2 при полуторній схемі електричних з'єднань з повітряними вимикачами та електромагнітними ТН (рис. 9.5).

Виведення в ремонт:

1) перевіряється допустимість вимкнення автотрансформатора АТ2 по навантаженню та схемі РУ;

2) вимикаються вимикачі низької та середньої напруги автотрансформатора АТ2 (з попереднім вмиканням, при необхідності, резервних джерел живлення); перевіряється відсутність струму навантаження;

3) вимикаються вимикачі В50 та В52; перевіряється відсутність струму навантаження, знімається оперативний струм з приводів вимикачів В50 та В52;

4) перевіряється на місці установки вимкнене положення вимикачів В50 та В52;

5) вимикаються роз'єднувачі РТ50 та РТ52;

6) вимикається роз'єднувач РАТ2; знімаються запобіжники (вимикаються автоматичні вимикачі, рубильники) в оперативних ланцюгах приводу роз'єднувача РАТ2; вимикаються силові ланцюги приводу роз'єднувача РАТ2;

7) подається оперативний струм і вмикається вимикач В52; перевіряється його ввімкнене положення;

8) деблокується роз'єднувач РТ52 з вимикачем В52;

9) вмикається роз'єднувач РТ52;

10) вмикається роз'єднувач РТ50;

11) вживаються заходи щодо недопущення вмикання вимикачів В50 та В52 від захисту автотрансформатора АТ2;

12) подається оперативний струм і вмикається вимикач В50; перевіряється струм навантаження вимикачів В50 та В52.

Введення в роботу:

1) провадиться огляд місця робіт, перевіряється відсутність сторонніх предметів на устаткуванні; знімають тимчасові огорожі та знімаються плакати, вивішені на місці робіт;

2) вимикаються ЗН, знімаються всі переносні заземлення з приєднань автотрансформатора АТ2 та розміщуються у місцях зберігання;

3) вимикається вимикач В50; перевіряється відсутність у ньому струму навантаження; знімається оперативний струм з вимикача В50;

4) перевіряється на місці встановлення вимкнене положення вимикача В50; вмикається роз'єднувач РТ50;

5) деблокується роз'єднувач РТ52 з вимикачем В52, вмикається роз'єднувач РТ52;

6) вмикається вимикач В52 та знімається з нього оперативний струм;

7) встановлюються запобіжники (вмикаються автоматичні вимикачі, рубильники) у оперативних ланцюгах приводу роз'єднувача РАТ2; подається напруга на силові кола приводу роз'єднувача; вмикається роз'єднувач РАТ2;

8) перевіряється на місці установки вимкнене положення вимикачів В50 та В52, вмикаються роз'єднувачі РТ50 та РТ52;

9) відновлюється нормальний стан захистів автотрансформатора АТ2, яке змінювалося для недопущення вимкнення вимикачів В50 і В52, які залишаються в роботі, на час виведення автотрансформатора АТ2 зі схеми ПС;

10) подається оперативний струм і вмикаються вимикачі В52 та В50, перевіряється наявність на них навантаження;

11) вмикаються вимикачі з боку середньої та низької напруг автотрансформатора АТ2 (з подальшим вимиканням, при необхідності, резервних джерел живлення); перевіряється навантаження на вимикачі.

Виведення в ремонт будь-якої системи шин забезпечується вимкненням всіх вимикачів, приєднаних до даної системи шин і приєднаних до неї шинних роз'єднувачів. Порушення роботи приєднань у цьому випадку не відбувається.

Післяаварійний режим. Після вимкнення пошкодженого елемента, ділянки схеми або приєднання він ізолюється відповідними роз'єднувачами, після дистанційного вмикання вимикачів відновлюється робота неушкоджених ділянок. При короткому замиканні на збірних шинах релейним захистом буде вимкнуті вимикачі першого ряду, що викличе знеструмлення системи шин, але всі приєднання залишаться в роботі.

Схема не є абсолютно надійною, оскільки при накладенні деяких режимів можливі вимкнення приєднань (рис. 9.6). Наприклад, при ремонті В20, КЗ на ПЛ

500 кВ А-В та відмові в роботі В32 вимикаються вимикачі В30, В22, В12 внаслідок чого крім пошкодженої лінії буде вимкнено Т2.

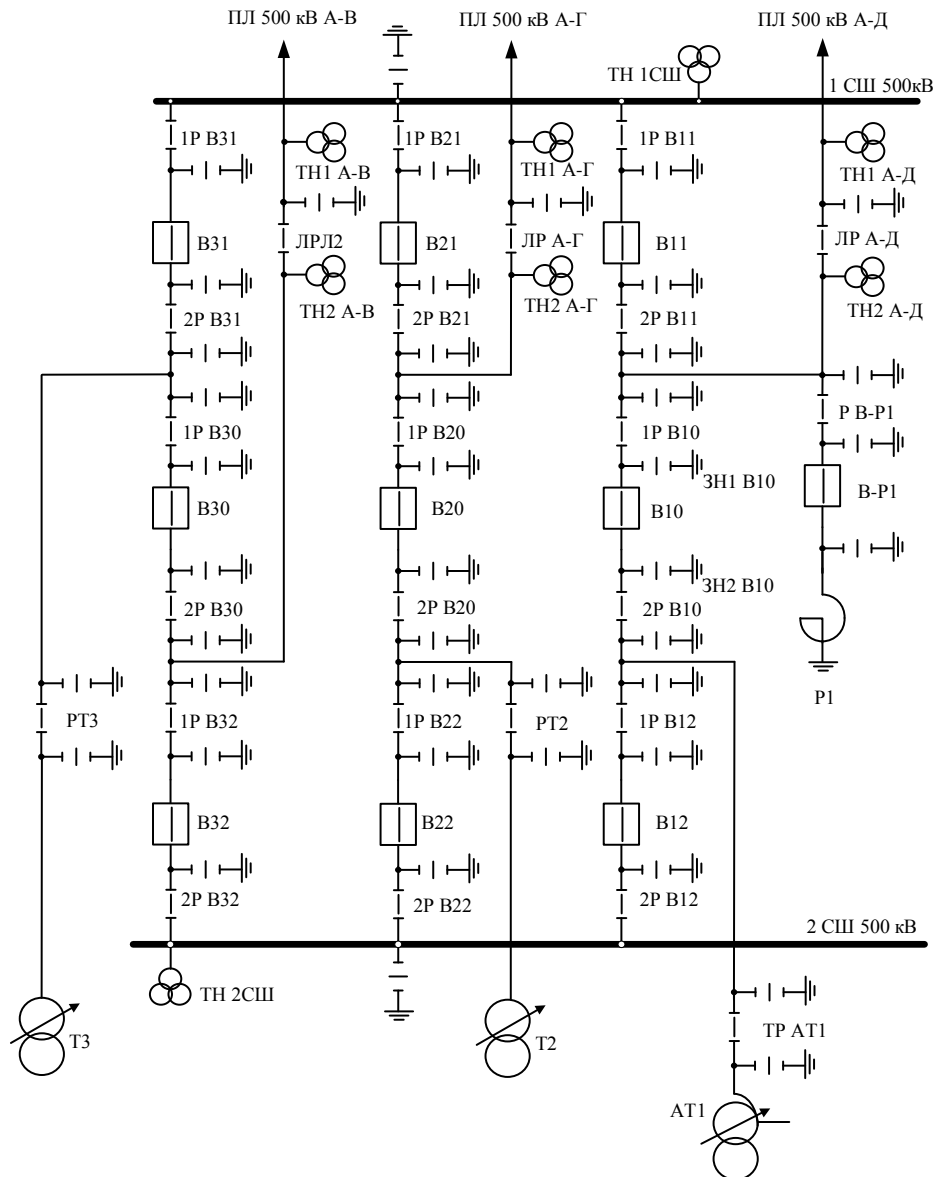


Рисунок 9.6 – Схема РУ 500 кВ

9.4 Задачі для самостійного розв'язання

Задача № 9.1 Накреслити схему з однією секціонованою системою збірних шин для двох трансформаторів та чотирьох ЛЕП. Позначити комутаційні апарати.

1. Як провести ремонт крайньої секції збірних шин?
2. Що відбудеться при КЗ на будь-якому приєднанні та відмові вимикача цього приєднання?
3. До чого призведе пошкодження секційного вимикача?

Задача № 9.2 Накреслити схему з двома робочими та обхідною системою шин для двох трансформаторів та чотирьох ЛЕП (з фіксованим розподілом приєднань). Позначити комутаційні апарати. Розглянути:

1. Нормальний режим.
2. Ремонт першої системи збірних шин;
3. Що станеться при КЗ на одній із систем збірних шин?;
4. Що станеться при пошкодженні шиноз'єднувального вимикача

Задача № 9.3 Накреслити схему з двома робочими та обхідною системою шин (одна робоча, друга резервна) для трьох трансформаторів та двох ЛЕП. Позначити комутаційні апарати. Розглянути:

1. Нормальний режим.
2. Вивести в ремонт робочу систему шин;
3. Вивести в ремонт шинний роз'єднувач трансформатора.

Задача № 9.4 Накреслити схему з двома робочими та обхідною системою шин (одна робоча, друга резервна) для трьох трансформаторів та шести ЛЕП. Позначити комутаційні апарати. Розглянути:

1. Нормальний режим.
2. Вивести в ремонт робочу систему шин;
3. Вивести в ремонт трансформатора напруги робочої системи шин;
4. Коротке замикання на робочій системі шин.

Задача № 9.5 Накреслити схему з однією секціонованою системою збірних шин для трьох трансформаторів та п'яти ЛЕП. Позначити комутаційні апарати.

1. Як провести ремонт однієї з секції збірних шин?
2. Що відбудеться при КЗ на будь-якому приєднанні?
3. До чого призведе пошкодження секційного вимикача?

Задача № 9.6 Накреслити схему з двома системами збірних шин та трьома вимикачами на два приєднання для трьох автотрансформаторів та трьох ЛЕП. Розглянути:

1. Нормальний режим.

2. Вивести в ремонт автотрансформатор;
3. Що відбудеться при КЗ на будь-якому приєднанні?

Задача № 9.7 Накреслити схему з двома системами збірних шин та трьома вимикачами на два приєднання для двох автотрансформаторів та двох ЛЕП.

Розглянути:

1. Нормальний режим.
2. Вивести в ремонт ЛЕП;
3. Що відбудеться при КЗ на будь-якій з шин?

Задача № 9.8 Накреслити схему з двома системами збірних шин та трьома вимикачами на два приєднання для двох автотрансформаторів та двох ЛЕП.

Розглянути:

1. Нормальний режим.
2. Вивести в ремонт автотрансформатор;
3. Що відбудеться при КЗ на будь-якій з шин з відмовою одного з шинних вимикачів?

Задача № 9.9 Накреслити схему з двома системами збірних шин та трьома вимикачами на два приєднання для трьох автотрансформаторів та трьох ЛЕП.

Розглянути:

1. Нормальний режим.
2. Вивести в ремонт автотрансформатор або ЛЕП;
3. Що відбудеться при КЗ на будь-якому приєднанні з відмовою одного з вимикачів приєднання?

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бардик Є. І. Електрична частина станцій та підстанцій. Основне електрообладнання: навчальний посібник / Є. І. Бардик, М. П. Лукаш.– Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 220 с.
2. Експлуатація і режими роботи електростанцій : Методичні вказівки до виконання курсової роботи / уклад.: Є. І. Бардик, П. Л. Денисюк. – Київ : НТУУ «КПІ», 2012. – 46 с.
3. Експлуатація електроустановок: навчальний посібник / Г. Г. Півняк, А. В. Журахівський, Г. А. Кігель, Б. М. Кінаш, А. Я. Рибалко, Ф. П. Шкрабець, З. М. Бахор: за ред. академіка НАН України Г. Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. – 445 с.
4. Лут М. Т., Мірошник О. В., Трунова І. М. Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання АПК: підручник для студентів ВНЗ. – Харків: Факт, 2008. – 438 с.
5. Mottershead G. Handbook of Large Hydro Generators: Operation and Maintenance, First Edition / G.Mottershead, S.Bomben, I.Kerszenbaum, G.Klempner. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2021. – 672p.
6. Klempner G. Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance, Third Edition / G. Klempner, I. Kerszenbaum. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2018. – 1032p.
7. Мотыгина С. А. Эксплуатация электрической части тепловых электростанций. – Москва: Энергия, 1979. – 551 с.
8. Эксплуатация турбогенераторов с непосредственным охлаждением / Под общ. ред. Л. С. Линдорфа и Л. Г. Мамиконянца. – Москва: Энергия, 1972. – 352 с.
9. Коган Л. Ф. Аномальные режимы мощных турбогенераторов. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.

10. Сибикин Ю. Д. Основы эксплуатации электрооборудования электростанций и подстанций: учебное пособие. – Москва : ИП Радио-Софт, 2017. – 448 с.

11. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.