

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до практичних занять
та самостійної роботи з дисципліни**

„СПОЖИВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ”

**для студентів денної та заочної форм навчання
спеціальностей „Енергетичний менеджмент”,
„Електротехнічні системи електропостачання”**

Дніпропетровськ
2010

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до практичних занять
та самостійної роботи з дисципліни**

„СПОЖИВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ”

**для студентів денної та заочної форм навчання
спеціальностей „Енергетичний менеджмент”,
„Електротехнічні системи електропостачання”**

Затверджено
на засіданні кафедри систем
електропостачання
Протокол №____
від „__” _____ 2010 р.

Дніпропетровськ
2010

Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з дисципліни „Споживачі електричної енергії” для студентів спеціальностей 7.000008 „Енергетичний менеджмент”, 7.090603 „Електротехнічні системи електропостачання”/ Упорядн. С.І. Випанасенко, Д.О. Посмітюха О.В. Бобров, С.В. Дибрін. – Дніпропетровськ: НГУ, 2010. – 20 с.

Упорядники:

С. І. Випанасенко, докт. техн. наук, проф.,

Д. О. Посмітюха, ас.,

О. В. Бобров, ас.,

С. В. Дибрін, ас.

Відповідальний за випуск – заступник завідувача кафедри „Систем електропостачання” С.І. Випанасенко, д-р. техн. наук, проф.

Розділ І. ЕЛЕКТРИЧНІ ПЕЧІ ОПОРУ

Задача 1.1

Визначити розміри дротового та стрічкового нагрівача печі опору, що здійснює нагрів у діапазоні середніх температур. Питомий опір матеріалу нагрівача $\rho = 3 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, питома поверхнева потужність $w = 10 \text{ Вт}/\text{см}^2$, активна потужність печі $P = 20 \text{ кВт}$, напруга живлення $U = 220 \text{ В}$.

Рішення

1. Опір нагрівача:

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow R = \frac{U^2}{P}.$$

2. Відношення довжини l нагрівача до площі S його поперечного перетину:

$$R = \rho \frac{l}{S} \Rightarrow \frac{l}{S} = \frac{R}{\rho} = \frac{U^2}{P \cdot \rho}.$$

3. Враховуючи, що:

а) у дротяного нагрівача $S = \pi \cdot d^2/4$, тоді його довжина

$$l_d = \frac{S \cdot U^2}{P \cdot \rho} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot U^2}{4 \cdot P \cdot \rho};$$

б) у стрічкового нагрівача $S = a \cdot b = a^2 m$, тоді його довжина

$$l_c = \frac{S \cdot U^2}{P \cdot \rho} = \frac{a^2 \cdot m \cdot U^2}{P \cdot \rho}.$$

4. Бічна площа провідника – площа випромінюючої поверхні нагрівача:

$$S_{\text{взл}} = \frac{P}{w}.$$

З іншого боку ця ж площа для:

а) дротяного нагрівача

$$S_{\text{взл}} = \pi \cdot d \cdot l_d,$$

де d – діаметр дроту; l – довжина нагрівача;

б) стрічкового нагрівача

$$S_{\text{взл}} = 2a(1+m) \cdot l_c,$$

де $m = b/a = 5 \div 15$; a – товщина стрічки; b – ширина стрічки.

5. Таким чином, для дротяного нагрівача визначаємо:

а) діаметр

$$S_{\text{взл}} = \frac{P}{w} = \pi \cdot d \cdot l_d = \pi \cdot d \cdot \frac{\pi \cdot d^2 \cdot U^2}{4 \cdot P \cdot \rho} = d^3 \frac{\pi^2 \cdot U^2}{4 \cdot P \cdot \rho},$$

$$d^3 = \frac{4 \cdot P^2 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot w} \Rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot P^2 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot w}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot (20 \cdot 10^3)^2 \cdot (3 \cdot 10^{-6})}{3,14^2 \cdot 220^2 \cdot (10 \cdot 10^4)}} = 4,651 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

б) довжину

$$l_d = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot U^2}{4 \cdot P \cdot \rho} = \frac{\pi \cdot U^2}{4 \cdot P \cdot \rho} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{4 \cdot P^2 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot w}\right)^2} = \sqrt[3]{\frac{P \cdot U^2}{4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot w^2}} =$$

$$= \sqrt[3]{\frac{(20 \cdot 10^3) \cdot 220^2}{4 \cdot 3,14 \cdot (3 \cdot 10^{-6}) \cdot (10 \cdot 10^4)^2}} = 13 \text{ м.}$$

6. Для стрічкового нагрівача визначаємо (прийmemo $m = b/a = 7$):

а) діаметр

$$S_{\text{изл}} = \frac{P}{w} = 2a(1+m) \cdot l_c = 2a(1+m) \cdot \frac{a^2 \cdot m \cdot U^2}{P \cdot \rho} = a^3 \frac{2 \cdot m \cdot (1+m) \cdot U^2}{P \cdot \rho},$$

$$a^3 = \frac{P^2 \cdot \rho}{2 \cdot m \cdot (1+m) \cdot U^2 \cdot w} \Rightarrow a = \sqrt[3]{\frac{P^2 \cdot \rho}{2 \cdot m \cdot (1+m) \cdot U^2 \cdot w}} =$$

$$= \sqrt[3]{\frac{(20 \cdot 10^3)^2 \cdot (3 \cdot 10^{-6})}{2 \cdot 7 \cdot (1+7) \cdot 220^2 \cdot (10 \cdot 10^4)}} = 1,303 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

б) довжину

$$l_a = \frac{P}{w \cdot 2 \cdot (1+m)} \cdot \frac{1}{a} = \frac{P}{w \cdot 2 \cdot (1+m)} \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot m \cdot (1+m) \cdot U^2 \cdot w}{P^2 \cdot \rho}} =$$

$$= \sqrt[3]{\frac{P \cdot U^2}{4 \cdot (1+m^{-1})^2 \cdot w^2 \cdot \rho}} = \sqrt[3]{\frac{(20 \cdot 10^3) \cdot 220^2}{4 \cdot (1+7^{-1})^2 \cdot (3 \cdot 10^{-6}) \cdot (10 \cdot 10^4)^2}} = 20,055 \text{ м.}$$

Задача 1.2

Визначити розміри дровового нагрівального елемента потужністю $P = 3$ кВт, виготовленого з провідникового сплаву високого опору Х25Н20. Питомий опір $\rho = 0,9 \cdot \text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, фазна напруга $U_\phi = 220$ В. Розрахунки провести для трифазної та однофазної мережі живлення.

Рішення

1. Визначимо струм у нагрівальному елементі для:

а) однофазної мережі

$$I = \frac{P}{U_\phi} = \frac{3 \cdot 10^3}{220} = 13,65 \text{ А;}$$

б) трифазної мережі

$$I_\phi = \frac{P}{\sqrt{3} U_\phi} = \frac{3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220} = 7,89 \text{ А.}$$

2. Визначимо площу поперечного перетину нагрівального елемента для:

а) однофазної мережі

$$S = \frac{I}{\delta} = \frac{13,63}{7} = 1,95 \text{ мм}^2 = 1,95 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

де $\delta = 4 \dots 10$ – допустима щільність струму в матеріалі нагрівача, А/мм² (у нашому випадку приймаємо рівною 7 А/мм²);

б) трифазної мережі

$$S = \frac{I}{\delta} = \frac{7,89}{7} = 1,127 \text{ мм}^2 = 1,127 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

3. Визначимо діаметр дроту, що забезпечує отриману площу перетину для:

а) однофазної мережі

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,95 \cdot 10^{-6}}{3,14}} = 1,58 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

б) трифазної мережі

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,127 \cdot 10^{-6}}{3,14}} = 1,198 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

4. З ряду стандартних розмірів дротів і стрічок вибираємо найближче більше значення відносно отриманого діаметру (див. табл. 1) для:

а) однофазної мережі

$$d' = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

б) трифазної мережі

$$d' = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Таблиця 1

Стандартні розміри дротів та стрічок

Діаметр дроту або товщина стрічки, м·10 ⁻ⁿ											
1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2
2,5	2,8	3,2	3,6	4,0	4,5	5,0	5,6	6,3	7,0	8,0	9,0
Ширина холоднокатаної стрічки, мм											
4	6	8	10	12	14	15	16	18	20		
25	30	32	36	40	45	50	60	80	100		

Примітка: n — ціле число, що може приймати значення 2, 3, 4.

5. Визначаємо площу перетину дроту із стандартним діаметром для:

а) однофазної мережі

$$S' = \frac{\pi (d')^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (1,6 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

б) трифазної мережі

$$S' = \frac{\pi (d')^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (1,2 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 1,130 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

6. Визначимо електричний опір нагрівального елемента для:

а) однофазної мережі

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{13,63} = 16,4 \text{ Ом};$$

б) трифазної мережі (з'єднання – „зірка”)

$$R = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}} = \frac{220}{7,89} = 27,88 \text{ Ом}.$$

7. Довжина нагрівального елемента для:

а) однофазної мережі

$$l = \frac{R \cdot S'}{\rho} = \frac{16,14 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{0,9 \cdot 10^{-6}} = 35,8 \text{ м};$$

б) трифазної мережі

$$l = \frac{R \cdot S'}{\rho} = \frac{27,88 \cdot 1,130 \cdot 10^{-6}}{0,9 \cdot 10^{-6}} = 35,00 \text{ м}.$$

Задача 1.3

Виконати розрахунок нагрівального елемента електричної печі для нагріву сталених заготовок сумарною масою 800 кг від початкової температури 293°K (20°С) до кінцевої 773°K (500°С) з середньою швидкістю 10°K за хвилину. ККД нагрівального пристрою – 0,7. Нагрівач стрічковий профільований з хромалюмінієвого сплаву ОХ23Ю5 і питомим опором $1,35 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Ефективна питома поверхнева потужність нагрівального елемента становить $1,74 \cdot 10^5$ Вт/м², коефіцієнт ефективності випромінювання – 0,6. Напруга мережі живлення – 380 В. Кількість фаз – три (по одному нагрівачу у фазі), з'єднання – „трикутник”. Розрахунки виконати для стрічкового та дротового нагрівачів.

Рішення

1. Визначимо кількість енергії, необхідної для нагріву, без урахування теплових втрат:

$$Q_{\text{кор}} = c \cdot m \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) = 0,5 \cdot 800 \cdot (773 - 293) = 192000 \text{ кДж},$$

де c – питома теплоємність матеріалу, кДж/кг·град. (для сталі $c = 0,5$ кДж/кг·град.); m – маса матеріалу, що нагрівається, кг; $t_{\text{н}}$, $t_{\text{к}}$ – початкова і кінцева температури нагріву, °K.

2. Загальна кількість енергії, необхідної для нагріву:

$$Q_{\text{з}} = \frac{Q_{\text{кор}}}{\eta} = \frac{192000}{0,7} = 274285,714 \text{ кДж},$$

де η – коефіцієнт корисної дії нагрівального пристрою.

3. Час, необхідний для нагріву:

$$T = \frac{t_{\text{к}} - t_{\text{н}}}{60 \cdot \nu} = \frac{773 - 293}{60 \cdot 10} = 0,8 \text{ години},$$

де ν – середня швидкість нагріву, град./хв.

4. Потужність нагрівального пристрою:

$$P = \frac{0,000278 \cdot k \cdot Q_{\text{з}}}{T} = \frac{0,000278 \cdot 1,2 \cdot 274285,714}{0,8} = 115,2 \text{ кВт} = 115,2 \cdot 10^3 \text{ Вт},$$

де $k = 1,1 \div 1,3$ – коефіцієнт запасу, що враховує зменшення напруги живлення, старіння нагрівальних елементів, збільшення теплоємності матеріалу, який нагрівається, при підвищенні температури; $278 \cdot 10^{-6}$ – коефіцієнт пропорційності між Дж і Вт·г (1 Дж = $278 \cdot 10^{-6}$ Вт·г).

5. При потужності нагрівача вище 5-10 кВт він виконується трифазним. Розрахуємо потужність нагрівального елемента:

$$P_n = \frac{P}{n \cdot r} = \frac{115,2}{3 \cdot 1} = 38,4 \text{ кВт} = 38,41 \text{ Вт},$$

де n – кількість фаз живлячої мережі; r – кількість нагрівальних елементів у фазі.

6. Розрахуємо допустиму питому поверхневу потужність випромінювання (потужність, що виділяється з одиниці зовнішньої поверхні нагрівального елемента):

$$w_{\text{дон}} = w_{\text{эф}} \cdot \alpha = 1,74 \cdot 10^5 \cdot 0,6 = 1,044 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2,$$

де $w_{\text{эф}}$ – ефективна питома поверхнева потужність нагрівального елемента (Вт/м²), залежна від температури теплопоглинального середовища і температури нагрівача; α – коефіцієнт випромінювання.

7. Розрахуємо діаметр d дрітного нагрівача і товщину a стрічкового:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho \cdot P_n^2}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot w_{\text{дон}}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot (38,4 \cdot 10^3)^2}{3,14^2 \cdot 380^2 \cdot 1,044 \cdot 10^5}} = 0,377 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 3,77 \text{ мм};$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{\rho \cdot P_n^2}{2m(m+1) \cdot U^2 \cdot w_{\text{дон}}}} = \sqrt[3]{\frac{1,35 \cdot 10^{-6} \cdot (38,4 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 10(10+1) \cdot 380^2 \cdot 1,044 \cdot 10^5}} = 0,844 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,844 \text{ мм},$$

де ρ – питомий опір матеріалу нагрівача, Ом·м; P_n – потужність нагрівального елемента, Вт; U – напруга живлячої мережі, В; $m = b/a = (5...15)$; b – ширина нагрівального елемента.

Слід зазначити, що для забезпечення надійної роботи печей з температурою вище 700°C не рекомендується застосовувати для нагрівачів дріт менше 5 мм діаметром і стрічки менше 1,5 мм завтовшки, оскільки при малих перетинах окислення матеріалу приводить до значного скорочення його терміну служби.

8. Визначимо найближчі більші до отриманих d і a стандартні розміри дротів та стрічок d' і a' відповідно (див. табл. 1):

$$d' = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4 \text{ мм};$$

$$a' = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,9 \text{ мм}.$$

9. Визначаємо стандартну ширину стрічки, для чого спочатку знаходимо ширину, відповідну стандартній товщині:

$$b = a' \cdot m = 0,9 \cdot 10 = 9 \text{ мм},$$

а потім з ряду стандартних значень (див. табл. 1) визначаємо найближче більше:

$$b' = 10 \text{ мм}.$$

10. Визначаємо перетин дрітного S_d і стрічкового S_a нагрівачів:

$$S_d = \frac{\pi (d')^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 4^2}{4} = 12,56 \text{ мм}^2.$$

$$S_a = a' \cdot b' = 0,9 \cdot 10 = 9 \text{ мм}^2.$$

11. Визначимо опір відповідно до потужності нагрівального елемента:

$$P_n = \frac{U^2}{R} \Rightarrow R = \frac{U^2}{P_n} = \frac{380^2}{38,4 \cdot 10^3} = 3,76 \text{ Ом}.$$

12. Розрахуємо довжину дроту l_d і стрічки l_a :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \Rightarrow l = \frac{R \cdot S}{\rho}, \text{ тобто:}$$

$$l_d = \frac{3,76 \cdot 12,56 \cdot 10^{-6}}{1,35 \cdot 10^{-6}} = 35 \text{ м};$$

$$l_a = \frac{3,76 \cdot 9 \cdot 10^{-6}}{1,35 \cdot 10^{-6}} = 25,1 \text{ м.}$$

13. Дротяний нагрівач може бути звитий у спіраль. Розрахуємо її розмір:

а) діаметр спіралі

$D \geq (4...6)d$ – для хромалюмінієвих сплавів;

$D \geq (7...10)d$ – для ніхромів.

Таким чином:

$$D \geq 5 \cdot d' = 5 \cdot 4 = 20 \text{ мм};$$

б) кількість витків спіралі

$$N = \frac{l}{\pi D} = \frac{l_d}{\pi D} = \frac{35 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 20} = 557;$$

в) мінімальна довжина спіралі (щоб не стикалися витки)

$$l_{\min} = (2,5...3) \cdot d \cdot N = 3 \cdot d' \cdot N = 3 \cdot 4 \cdot 557 = 6,68 \text{ м.}$$

Розділ II. УСТАНОВКИ ІНДУКЦІЙНОГО ТА ДІЕЛЕКТРИЧНОГО НАГРІВУ

Задача 2.1

Індукційний нагрів здійснюють в індукторі, обмотку якого виконано з міді ($\rho_m = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м). Питомий опір нагрівної сталюї заготовки $\rho_c = 9,71 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, відносна магнітна проникність $\mu_c = 16$.

У скільки разів збільшиться електричний ККД нагріву, якщо внутрішній діаметр індуктора D_e зменшити з 0,2 м до 0,11 м. Розрахувати також ступінь зниження електричного ККД нагріву при досягненні температури Кюрі (для сталі $t_K = 780^\circ\text{C}$), для індуктора з $D_e = 0,11$ м. Початкова температура заготовки $t_0 = 20^\circ\text{C}$, діаметр $D_3 = 0,1$ м. Урахувати, що нагрів відбувається на високих частотах з найвищим значенням електричного ККД. Температурний коефіцієнт опору для сталі $\alpha = 0,00126$ град.⁻¹.

Рішення

1. Визначаємо електричний ККД нагріву індуктора при $D_e = 0,2$:

$$\eta_{0,2} = \frac{1}{1 + \frac{D_e}{D_3} \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_c \cdot \mu_c}}} = \frac{1}{1 + \frac{0,2}{0,1} \sqrt{\frac{1,75 \cdot 10^{-8}}{9,71 \cdot 10^{-8} \cdot 16}}} = 0,825.$$

2. Визначаємо електричний ККД нагріву індуктора при $D_e = 0,11$:

$$\eta_{0,11} = \frac{1}{1 + \frac{0,11}{0,1} \sqrt{\frac{1,75 \cdot 10^{-8}}{9,71 \cdot 10^{-8} \cdot 16}}} = 0,895.$$

3. Порівнюємо, у скільки разів збільшилося ККД:

$$\frac{\eta_{0,11}}{\eta_{0,2}} = \frac{0,895}{0,825} = 1,0854.$$

4. Визначаємо ККД при $D_g = 0,11$ і температурі Кюрі:

$$\eta_K = \frac{1}{1 + \frac{D_g}{D_3} \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_c \cdot [1 + \alpha(t_K - t_0)]}}} = \frac{1}{1 + \frac{0,11}{0,1} \sqrt{\frac{1,75 \cdot 10^{-8}}{9,71 \cdot 10^{-8} \cdot [1 + 0,00126(780 - 20)]}}} = 0,75.$$

5. Розраховуємо ступінь зниження ККД при $D_g = 0,11$ і температурі Кюрі відносно ККД при меншій температурі:

$$\frac{\eta_{0,11}}{\eta_K} = \frac{0,895}{0,75} = 1,194.$$

Задача 2.2

В однофазну індукційну каналну піч (для плавки алюмінію) потужністю $P = 200$ кВт, ємністю $0,4$ т, з виробничою потужністю $0,5$ т/год., завантажили $m = 350$ кг алюмінієвої стружки з початковою температурою $t_n = 20^\circ\text{C}$. Температура плавлення алюмінію $t_{nl} = 660^\circ\text{C}$, питома теплоємність алюмінію $c_1 = 1005$ Дж/кг $^\circ\text{C}$. Температура перегріву $t_{nep} = 700^\circ\text{C}$, питома теплоємність при температурі перегріву $c_2 = 1045$ Дж/кг $^\circ\text{C}$. Теплота плавлення $q_{nl} = 386$ кДж/кг. Тривалість циклу плавки завантаженого матеріалу становить $\tau_n = 0,7$ години. Електромагнітна система печі складається з магнітопроводу й індуктора. Магнітопровід індуктора складається з $N = 4$ шихтованих пакетів об'ємом $V_{ухт} = 0,01$ м 3 кожний (гарячекатана електротехнічна сталь товщиною $0,35$ мм). Магнітна індукція в магнітопроводі $B = 1$ Тл, питома потужність втрат у сталі $\Delta P_c = 0,75$ Вт/кг, щільність електротехнічної сталі $\theta_c = 7550$ кг/м 3 . Індуктор печі містить $n = 10$ витків мідної трубки, що охолоджується водою. Питомий опір міді індуктора, враховуючи умови його роботи, становить $\rho_m = 4 \cdot 10^{-8}$ Ом $\cdot$ м. Щільність струму в індукторі $\delta_I = 10$ А/мм 2 , напруга на затискачах $U = 500$ В, $\cos\varphi = 0,4$. Середній діаметр індуктора $d_{cp} = 0,3$ м. Паралельно індуктору підключені компенсатори ($\tan\delta = 0,0025$), які повністю компенсують реактивну потужність індуктора. Індуктор з'єднано з живлячою мережею гнучким кабелем, що має активний опір $R_{п.т.} = 0,009$ Ом. Шамотна футерівка печі має площу $F = 6$ м 2 при середній товщині $\delta = 200$ мм. Коефіцієнт теплопровідності шамота $\lambda_{ш} = 1$ Вт/м $^\circ\text{C}$. Зовнішня температура кладки $t_{зовн} = 60^\circ\text{C}$. Витрати води в системі охолодження печі становить $q_{вод} = 1$ тонна/год. Питома теплоємність води $c_8 = 4,17$ Дж/кг $^\circ\text{C}$, температура води на вході установки $t_{вх} = 20^\circ\text{C}$, на виході $t_{вих} = 40^\circ\text{C}$.

Зробити нормалізований електробаланс для індукційної печі. Втратами тепла на випромінювання, а також втратами з газами знехтувати. Врахувати, що енергія екзотермічних реакцій становить 10% , енергії, витраченої на

технологічний процес плавлення алюмінію $W_{Т.П.}$. Привести схему електробалансу печі, розрахувати тепловий, електричний та повний ККД.

Рішення

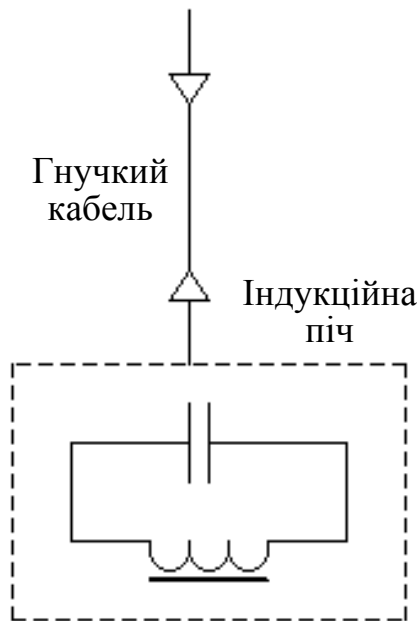


Рис. 2.2.1 Індукційна піч

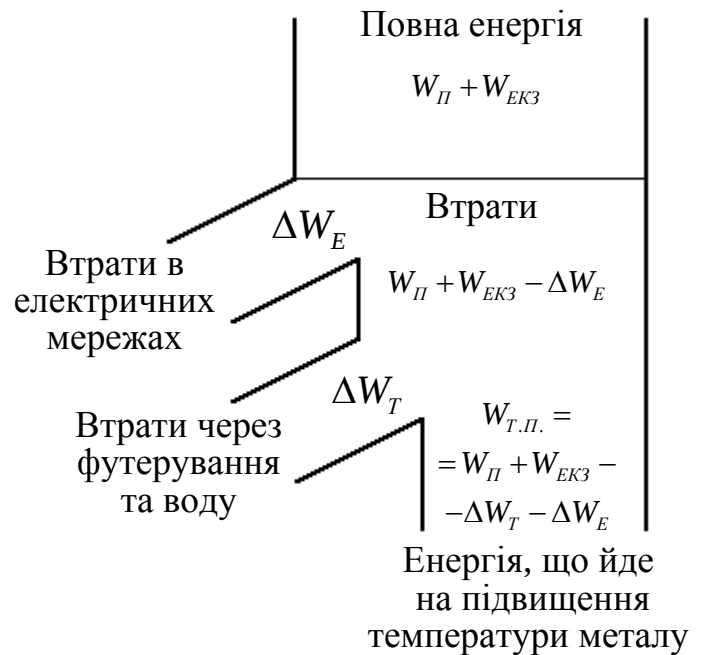


Рис. 2.2.2 Схема електробалансу каналної електропечі

1. Визначимо енергію, що витрачається на технологічний процес:

$$\begin{aligned} W_{Т.П.} &= [c_1(t_{нл} - t_n) + q_{нл} + c_2(t_{неп} - t_{нл})] \cdot m = \\ &= [1005(660 - 20) + 386 \cdot 10^3 + 1045(700 - 660)] \cdot 350 = \\ &= 374,8 \text{ МДж} = 374,8 / 3600 = 104,11 \text{ кВт} \cdot \text{год.}, \end{aligned}$$

де 3600 – коефіцієнт пропорційності (1 кВт·г = 3600 Дж).

2. Розрахуємо енергію екзотермічних реакцій:

$$W_{ЕКЗ} = 0,1 \cdot W_{Т.П.} = 0,1 \cdot 104,11 = 10,411 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

3. Розрахуємо теплові втрати (через футерівку та з водою):

а) втрати через футерівку

$$\Delta W_{\phi} = \tau_n \cdot \lambda_{ш} \cdot F \cdot \frac{t_{нл} - t_{зовн}}{\delta} = 0,7 \cdot 1 \cdot 6 \cdot \frac{660 - 60}{0,2} = 12,6 \text{ кВт} \cdot \text{год.};$$

б) втрати з водою

$$\begin{aligned} \Delta W_{\epsilon} &= q_{вод} \cdot c_{\epsilon} (t_{вих} - t_{вх}) \cdot \tau_n = 1000 \cdot 4,17 (40 - 20) \cdot 0,7 = \\ &= 0,05838 \text{ МДж} = \frac{0,05838}{3600} = 0,0162 \text{ кВт} \cdot \text{год.}; \end{aligned}$$

в) загальні теплові втрати

$$\Delta W_T = \Delta W_{\phi} + \Delta W_{\epsilon} = 12,6 + 0,0162 = 12,6162 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

4. Втрати електроенергії:

а) визначимо величину втрат у магнітопроводі

$$\Delta W_{\mathcal{M}} = N \cdot K_{\phi} \cdot V_{ухст} \cdot \Theta_c \cdot \Delta P_c \cdot \tau_n = 4 \cdot 1,5 \cdot 0,01 \cdot 7550 \cdot 0,75 \cdot 0,7 = 0,238 \text{ кВт} \cdot \text{год.},$$

де $K_0=1,1 \div 2$ – коефіцієнт додаткових втрат (приймаємо рівним 1,5);

б) розраховуємо втрати в індукторі

$$\Delta W_I = I_I^2 \cdot R_I \cdot \tau_n,$$

де $I_I = P / (U \cdot \cos \varphi)$ – струм індуктора, А; $R_I = \rho_m \cdot (\pi \cdot d_{cp} \cdot n / S_I)$ – опір індуктора, Ом; $S_I = I_I / \delta_I$ – активний перетин трубки індуктора, м². Таким чином:

$$\begin{aligned} \Delta W_I &= \left(\frac{P}{U \cdot \cos \varphi} \right)^2 \cdot \rho_m \cdot \frac{\pi \cdot d_{cp} \cdot n}{P} \tau_n = \frac{P \cdot \rho_m \cdot \pi \cdot d_{cp} \cdot n \cdot \delta_I}{U \cdot \cos \varphi} \tau_n = \\ &= \frac{200 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 0,3 \cdot 10 \cdot 10^7}{500 \cdot 0,4} \cdot 0,7 = 26,376 \cdot 10^2 \text{ Вт} \cdot \text{год.} = 2,64 \text{ кВт} \cdot \text{год.}; \end{aligned}$$

в) втрати у конденсаторах

$$\Delta W_K = Q_K \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \tau_n,$$

де $Q_K = Q_I = P \cdot \operatorname{tg} \varphi$ – реактивна потужність, що виробляється компенсуючими конденсаторами, рівна реактивній потужності індуктора. Таким чином:

$$\Delta W_K = P \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \tau_n = 200 \cdot 10^3 \cdot 2,29 \cdot 0,0025 \cdot 0,7 = 0,8 \text{ кВт} \cdot \text{год.},$$

$$\text{де } \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} (\arccos (\cos \varphi)) = \operatorname{tg} (\arccos (0,4));$$

г) визначимо втрати у перетворювачі тиристорному

$$\Delta W_{П.Т.} = I_{П.Т.}^2 \cdot R_{П.Т.} \cdot \tau_n = \left(\frac{P}{U} \right)^2 \cdot R_{П.Т.} \cdot \tau_n = \left(\frac{200 \cdot 10^3}{500} \right)^2 \cdot 0,009 \cdot 0,7 = 1,008 \text{ кВт} \cdot \text{год.};$$

д) загальні втрати електроенергії

$$\begin{aligned} \Delta W_E &= \Delta W_m + \Delta W_I + \Delta W_K + \Delta W_{П.Т.} = \\ &= 0,238 + 2,64 + 0,8 + 1,008 = 4,686 \text{ кВт} \cdot \text{ч.} \end{aligned}$$

5. Розрахуємо повну енергію:

$$W_{П.} = W_{Т.П.} - W_{ЕКЗ} + \Delta W_T + \Delta W_E = 104,11 - 10,11 + 12,6162 + 4,686 = 111,002 \text{ кВт} \cdot \text{год.}.$$

6. Визначаємо питому норму споживання електроенергії:

$$\frac{W_{П.}}{m} = \frac{111,002}{350} = 0,317 \text{ кВт} \cdot \text{год.} / \text{кг} = 317 \text{ кВт} \cdot \text{год.} / \text{т.}$$

7. Тепловий ККД:

$$\eta_T = \frac{W_{Т.П.}}{W_{П.} + W_{ЕКЗ} - \Delta W_E} = \frac{104,11}{111,002 + 10,41 - 4,686} = 0,892.$$

8. Електричний ККД:

$$\eta_{ЕЛ} = \frac{W_{П.} + W_{ЕКЗ} - \Delta W_E}{W_{П.} + W_{ЕКЗ}} = \frac{111,002 + 10,41 - 4,686}{111,002 + 10,41} = 0,961.$$

9. Повний ККД:

$$\eta = \eta_T \cdot \eta_{ЕЛ} = \frac{W_{Т.П.}}{W_{П.} + W_{ЕКЗ}} = \frac{104,11}{111,002 + 10,41} = 0,857.$$

Задача 2.3

В установці діелектричного нагріву матеріал помістили між обкладинками плоского конденсатора. Визначити аналітичну залежність питомої потужності P_0 , Вт/м³, діелектричного нагріву від частоти електричного поля f , Гц, його електричної напруженості E , В/м, відносної діелектричної проникності ε ,

тангенса кута діелектричних втрат δ . Виконати розрахунки P_0 при $f = 100 \cdot 10^5$ Гц, $E = 10 \cdot 10^3$, В/м, $\varepsilon = 10$, $\operatorname{tg} \delta = 0,005$.

Рішення

1. Активна потужність, що виділяється в діелектрику:

$$P = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

де $\omega = 2\pi f$ – циклічна частота.

2. Ємність плоского конденсатора:

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d},$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ – електрична постійна, Ф/м; S – площа обкладинок конденсатора, м²; d – товщина діелектрика, м.

3. Напруженість електричного поля, Н/кл або В/м:

$$E = \frac{U}{d}, \text{ звідки } U = E \cdot d.$$

4. Об'єм діелектрика:

$$V = S \cdot d \text{ м}^3.$$

5. Таким чином, питома потужність:

$$P_0 = \frac{P}{V} = \frac{2\pi f \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \cdot E^2 \cdot d^2 \cdot \operatorname{tg} \delta}{S \cdot d} = 2\pi f \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \text{ Вт/м}^3.$$

6. Визначимо шукані залежності:

а) залежність від частоти поля

$$P_0(f) = 2 \cdot 3,14 \cdot f \cdot 10 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (10^4)^2 \cdot 0,005 = 2,7789 \cdot 10^{-4} f \text{ Вт/м}^3;$$

б) залежність від напруженості поля

$$P_0(E) = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 10^5 \cdot 10 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot E \cdot 0,005 = 0,278 \cdot 10^{-4} E \text{ Вт/м}^3;$$

в) залежність від відносної діелектричної проникності

$$\begin{aligned} P_0(\varepsilon) &= 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (10^4)^2 \cdot 0,005 = \\ &= 0,2779 \cdot 10^3 \cdot \varepsilon = 277,9 \cdot \varepsilon \text{ Вт/м}^3; \end{aligned}$$

г) залежність від тангенса кута діелектричних втрат

$$P_0(\operatorname{tg} \delta) = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 10^5 \cdot 10 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (10^4)^2 \cdot \operatorname{tg} \delta = 55,578 \cdot 10^4 \operatorname{tg} \delta \text{ Вт/м}^3.$$

7. Розраховуємо P_0 :

$$P_0(f) = 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 10^5 \cdot 10 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (10^4)^2 \cdot 0,005 = 2778,9 \text{ Вт/м}^3.$$

Задача 2.4

В установку діелектричного нагріву між обкладинками плоского конденсатора (у відповідності до рис. 2.4) помістили два матеріали з різними факторами втрат ($\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$).

Визначити відношення питомих потужностей в матеріалах при різних варіантах їх розміщення (рис. 2.4,а та рис. 2.4,б), якщо $\varepsilon_1 = 100$, $\varepsilon_2 = 200$, $\operatorname{tg} \delta_1 = 0,005$, $\operatorname{tg} \delta_2 = 0,001$.

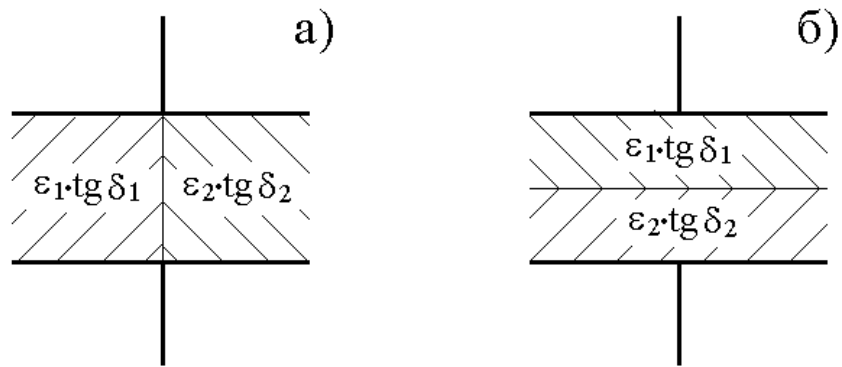


Рис. 2.4 Варіанти розташування діелектриків між обкладками конденсатору

Рішення

1. Питома потужність, що виділяється у діелектрику (див. попереднє завдання):

$$P_0 = 2\pi f \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \text{ Вт/м}^3.$$

2. Відношення питомих потужностей у матеріалах:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{2\pi f \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot E_1^2 \cdot \operatorname{tg} \delta_1}{2\pi f \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_0 \cdot E_2^2 \cdot \operatorname{tg} \delta_2} = \frac{\varepsilon_1 \cdot E_1^2 \cdot \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_2 \cdot E_2^2 \cdot \operatorname{tg} \delta_2}.$$

а) У першому випадку (рис. 2.4 а) $E_1 = E_2 = E$, тому відношення прийме вигляд

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\varepsilon_1 \cdot E_1^2 \cdot \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_2 \cdot E_2^2 \cdot \operatorname{tg} \delta_2} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_2 \cdot \operatorname{tg} \delta_2} = \frac{100 \cdot 0,005}{200 \cdot 0,001} = \frac{0,5}{0,2} = 2,5.$$

б) У другому випадку (рис. 2.4 б) $E_1/E_2 \approx \varepsilon_2/\varepsilon_1$, тому

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2^2 \cdot \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_2 \cdot \varepsilon_1^2 \cdot \operatorname{tg} \delta_2} = \frac{\varepsilon_2 \cdot \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_1 \cdot \operatorname{tg} \delta_2} = \frac{200 \cdot 0,005}{100 \cdot 0,001} = \frac{1}{0,1} = 10.$$

Задача 2.5

Методом діелектричного нагріву проводиться висушування деревини. Необхідно описати принцип діелектричного нагрівання і визначити потужність високочастотного генератора для живлення установки. ККД установки можна прийняти $\eta = 0,8$. Данні для розрахунку задачі наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Данні	Остання цифра шифру									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Об'єм дошок, V, м ³	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,5
Тангенс кута втрат, tgδ	0,2	0,22	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,3	0,35	0,4
Відносна діелектрична постійна, ε	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20
	Передостання цифра шифру									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Напруженість поля, E, В/см	300	250	220	200	150	140	120	100	80	50
Частота, F, МГц	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70

Рішення

1. Питома потужність, що виділяється в одиниці об'єму діелектрика:

$$\begin{aligned}P_0 &= 2\pi f \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot \operatorname{tg} \delta = \\&= 2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot \varepsilon \cdot E^2 \cdot \operatorname{tg} \delta = \\&= 55,578 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot \varepsilon \cdot E^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \text{ Вт/м}^3.\end{aligned}$$

2. Якщо напруженість $E=300 \text{ В/см} = 30000 \text{ В/м}$, тоді питома потужність дорівнює:

$$\begin{aligned}P_0 &= 55,578 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot \varepsilon \cdot E^2 \cdot \operatorname{tg} \delta = \\&= 55,578 \cdot 10^{-12} \cdot (0,25 \cdot 10^6) \cdot 10 \cdot (3 \cdot 10^4)^2 \cdot 0,2 = 25020 \text{ Вт/м}^3.\end{aligned}$$

3. Потужність генератора, необхідна для нагріву діелектрика об'ємом V , з урахуванням коефіцієнта корисної дії:

$$P = \frac{P_0 \cdot V}{\eta} = \frac{25020 \cdot 1}{0,8} = 31280 \text{ Вт}.$$

Розділ III. ДУГОВІ ЕЛЕКТРОПЕЧІ

Задача 3.1

Дугова сталеплавильна піч ДСП-6 (рис. 3.1) вмістом $m = 6 \text{ т}$ отримує живлення від пічного трансформатора з номінальною потужністю 2800 кВА ($\Delta P_{xx} = 5 \text{ кВт}$, $\Delta P_{кз} = 30 \text{ кВт}$). Номінальний струм на вторинній стороні $I_2 = 6,3 \text{ кА}$. Коефіцієнт завантаження під час розплавлення $\kappa_3 = 1,25$, тривалість періоду розплавлення $\tau_{II} = 2 \text{ год}$. Питома корисна енергія Q , яку необхідно виділити у печі під час розплавлення 1 т холодного металевго завантаження: на нагрів до 1510°C і власне розплавлення сталі $Q_{\text{розплав}} = 370000 \text{ Вт}\cdot\text{год./т}$; перегрів гладкого металу на 50°C $Q_{\text{перегр}} = 1160 \text{ Вт}\cdot\text{год./т}$; нагрів і розплав шлакоутворюючих матеріалів, а також на перегрів до $t_n = 1560^\circ\text{C}$ розплавленого шлаку з 6 т маси металевго загрузки печі $Q_{\text{шл}} = 35000 \text{ Вт}\cdot\text{год./т}$.

Футерівка печі має площу $F = 8 \text{ м}^2$. Товщина футерівки $\delta = 300 \text{ мм}$. Коефіцієнт її теплопровідності $\lambda = 1 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$. Зовнішня температура кладки $t_3 = 60^\circ\text{C}$. Витрати води в системі охолодження печі $q = 5 \text{ т/год}$. Температура води на вході установки $t_{\text{вх}} = 20^\circ\text{C}$, на виході $t_{\text{вих}} = 40^\circ\text{C}$. Питома теплоємність води $c_v = 4,17 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$. Теплові втрати випромінюванням через робоче вікно площею $F_v = 1 \text{ м}^2$ мають місце при коефіцієнті діафрагмування $\psi = 0,65$. Температура навколишнього середовища $T_2 = 320^\circ\text{K}$. Приведений коефіцієнт випромінювання $c = 4,62 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{K}^4$, час випромінювання $\tau_0 = 0,2 \text{ години}$. Маса повітря, що проходить через піч в одиницю часу, становить $G_2 = 80 \text{ кг/год}$. Середня питома теплоємність повітря $c_2 = 2,9 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$. Температура газу на виході печі $t = 600^\circ\text{C}$, на вході печі $t_0 = 60^\circ\text{C}$. Опір короткої мережі $R_{\text{к.м.}} = 1,26 \text{ мОм}$. Опір електрода $R_{\text{ел}} = 0,01 \text{ мОм}$.

Зробити нормалізований електробаланс для дугової печі (на період розплавлення). Розрахувати питомі витрати електроенергії для періоду розплавлення, ККД ДСП-6. Врахувати, що надходження енергії $W_{\text{ЕКЗ}}$ за рахунок

екзотермічних реакцій в період розплавлення становить 20 % енергії, витраченої на плавлення сталі.

Рішення

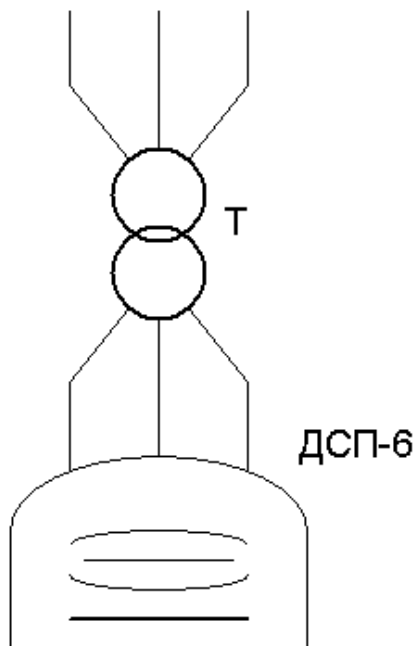


Рис. 3.1.1 ДСП - 6

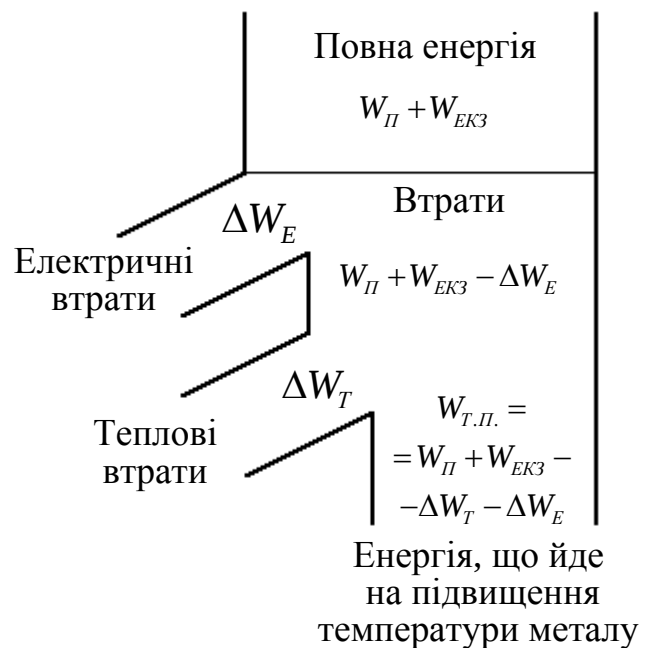


Рис. 3.1.2 Схема електробаланса дугової печі

1. Визначаємо енергію, що витрачається на технологічний процес:

$$W_{ТП} = Q \cdot m = (Q_{розплав} + Q_{перегр} + Q_{шл}) \cdot m =$$

$$= (370000 + 1160 + 3500) \cdot 6 = 2,43696 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

2. Екзотермічна енергія:

$$W_{ЕКЗ} = 0,2 \cdot W_{ТП} = 0,2 \cdot 2,437 \cdot 10^6 = 4,874 \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

3. Розраховуємо втрати термічної енергії:

- а) через футерівку

$$\Delta W_{\phi} = \tau_{II} \cdot \lambda \cdot F \cdot \frac{t_n - t_z}{\delta} = 2 \cdot 1 \cdot 8 \cdot \frac{1560 - 60}{0,3} = 8 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

- б) випромінюванням

$$\Delta W_{випр} = c \cdot F_{\epsilon} \cdot \psi \left[\left(\frac{1839}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \tau_0 =$$

$$= 4,62 \cdot 1 \cdot 0,65 \cdot \left[\left(\frac{1839}{100} \right)^4 - \left(\frac{320}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,2 = 6,862998 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

- в) на нагрів повітря

$$\Delta W_{Г} = G_z \cdot c_z \cdot (t - t_0) \cdot \tau_{II} = 80 \cdot 2,9 \cdot (600 - 60) \cdot 2$$

$$= 2,506 \cdot 10^5 \text{ Дж} = \frac{0,2506 \text{ МДж}}{36} = 70 \text{ Вт} \cdot \text{год.};$$

- г) на охолодження водою

$$\Delta W_B = q_6 \cdot c_6 (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}) \cdot \tau_n = 5000 \cdot 4,17 (40 - 20) \cdot 2 = \\ = 0,834 \text{ МДж} = \frac{0,834 \text{ МДж}}{3,6} = 232 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

д) загальні теплові втрати

$$\Delta W_T = \Delta W_\phi + \Delta W_{\text{вир}} + \Delta W_\Gamma + \Delta W_B = 80000 + 68629,98 + 70 + 232 = 148931,98 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

4. Електричні втрати:

а) у трансформаторі

$$\Delta W_{TP} = (\Delta P_{\text{хх}} + \Delta P_{\text{кз}} \cdot k_3^2) \cdot \tau_n = (5000 + 30000 \cdot 1,25^2) \cdot 2 = 103750 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

б) у короткій мережі й електроді

$$\Delta W_{\text{ЕЛ}} + \Delta W_{\text{к.м.}} = 3 \cdot I_2^2 \cdot (R_{\text{к.м.}} + R_{\text{ел}}) \cdot \tau_n = \\ = 3 \cdot (6,3 \cdot 10^3)^2 (1,26 + 0,01) \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 302437,8 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

в) загальні електричні втрати

$$\Delta W_E = \Delta W_{TP} + \Delta W_{\text{ЕЛ}} + \Delta W_{\text{к.м.}} = 302437,8 + 103750 = 406187,8 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

5. Повна енергія:

$$W_\Pi = W_{\text{ТП}} - W_{\text{ЕКЗ}} + \Delta W_T + \Delta W_E = \\ = 2436960 - 487400 + 406187,8 + 148931,98 = 2504687 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

6. Питома енергія:

$$\frac{W_\Pi}{m} = \frac{2504687}{6} = 417447,84 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{т}.$$

7. Термічний ККД:

$$\eta_T = \frac{W_{T.\Pi.}}{W_\Pi + W_{\text{ЕКЗ}} - \Delta W_E} = \frac{2436960}{2504687 + 487400 - 406187,8} = 0,942.$$

8. Електричний ККД:

$$\eta_{\text{ЕЛ}} = \frac{W_\Pi + W_{\text{ЕКЗ}} - \Delta W_E}{W_\Pi + W_{\text{ЕКЗ}}} = \frac{2504687 + 487400 - 406187,8}{2504687 + 487400} = 0,864.$$

9. Повний ККД дугової електричної печі:

$$\eta = \eta_T \cdot \eta_E = \frac{W_{T.\Pi.}}{W_\Pi + W_{\text{ЕКЗ}}} = \frac{2436960}{2504687 + 487400} = 0,814.$$

Задача 3.2

Розрахувати електричні параметри та побудувати кругову діаграму для ДСП-6, якщо фазна вторинна напруга $U_{2\phi} = 257 \text{ В}$, активна складова опору печі $r = 1,06 \text{ мОм}$, реактивна складова опору печі $x = 4,24 \text{ мОм}$, робочий струм $I_{2н} = 6,3 \text{ кА}$.

Рішення

Вважаючи ДСП симетричною трифазною системою, для спрощення при побудові кругової діаграми розглядати будемо тільки одну фазу.

1. При короткому замиканні (опір дуги $R_d = 0$) струм дорівнює:

$$I_{2\kappa} = \frac{U_{2\phi}}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{257}{\sqrt{(1,06 \cdot 10^{-3})^2 + (4,24 \cdot 10^{-3})^2}} = 58,8 \text{ кА}.$$

2. Знаючи r і x , можна побудувати трикутник напруги короткого замикання. Для цього:

- а) розраховуємо реактивне падіння напруги

$$U_{2p} = I_{2\kappa} \cdot x = 58,8 \cdot 10^3 \cdot 4,24 \cdot 10^{-3} = 249,3 \text{ В};$$

- б) відкладаємо горизонтальний відрізок ОА довільної довжини (це наше реактивне падіння напруги) (див. рис. 3.2.);

- в) розраховуємо масштабний коефіцієнт по напрузі:

$$M_U = \frac{U_{2p}}{OA} = \frac{249,3}{10} = 24,93 \text{ В/см};$$

- г) розраховуємо активне падіння напруги:

$$U_{2a} = I_{2\kappa} \cdot r = 58,8 \cdot 10^3 \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} = 62,328 \text{ В};$$

- д) з точки А відкладаємо вертикальний відрізок АВ (наше активне падіння напруги)

$$AB = \frac{U_{2a}}{M_U} = \frac{62,328}{24,93} = 2,5 \text{ см}.$$

На отриманому рисунку: φ_κ – кут зсуву фаз струму і напруги печі при короткому замиканні; сторона-гіпотенуза ОВ – фазна напруга $U_{2\phi}$.

3. Оскільки при всіх інших режимах сума активних й індуктивних напруг у схемі повинна дорівнювати $U_{2\phi}$, гіпотенузи (вектори ОВ, ОД і т.д.) трикутників усіх інших режимів будуть дорівнювати радіусу ОВ дуги LM окружності з центром у точці О. Проводимо дугу LM.
4. Індуктивний опір x практично незмінний, таким чином падіння напруги на ньому $I_2 x$ пропорційне струму I_2 . Отже, можна відкласти по осі абсцис значення струму I_2 відрізком, рівним відрізку ОА. Тоді масштабний коефіцієнт по струму буде:

$$M_I = \frac{I_{2\kappa}}{OA} = \frac{58,8}{10} = 5,88 \text{ кА/см}.$$

5. Розрахуємо параметри робочого режиму:

- а) для струму I_2 розрахуємо довжину відрізка ОС і відкладемо його на осі абсцис

$$OC = \frac{I_2}{M_I} = \frac{6,3}{5,88} = 1,07 \text{ см};$$

- б) побудувавши перпендикуляр з точки С до перетину з дугою LM, отримаємо:

- падіння напруги на опорі r – відрізок ЕС ($I_2 r$)

$$U'_{2a} = EC \cdot M_U = 0,27 \cdot 24,93 = 6,7 \text{ В};$$

- падіння напруги на опорі x – відрізок ОС ($I_2 x$)

$$U'_{2p} = OC \cdot M_U = 1,07 \cdot 24,93 = 26,67 \text{ В};$$

- напруга на дузі ($U_\delta = I_2 \cdot R_\delta$)

$$U'_o = E_D \cdot M_U = 10 \cdot 24,93 = 249,3 \text{ В};$$

- по рисунку визначаємо кут зсуву фаз між струмом і напругою $\varphi = 6^\circ$.
Побудова кругової діаграми відображає зв'язок струму I_2 з напругою на дузі. При розділенні відрізка ОА ($I_{2к}$) на фрагменти (до 5) такий зв'язок дає можливість побудувати електричні та робочі характеристики.

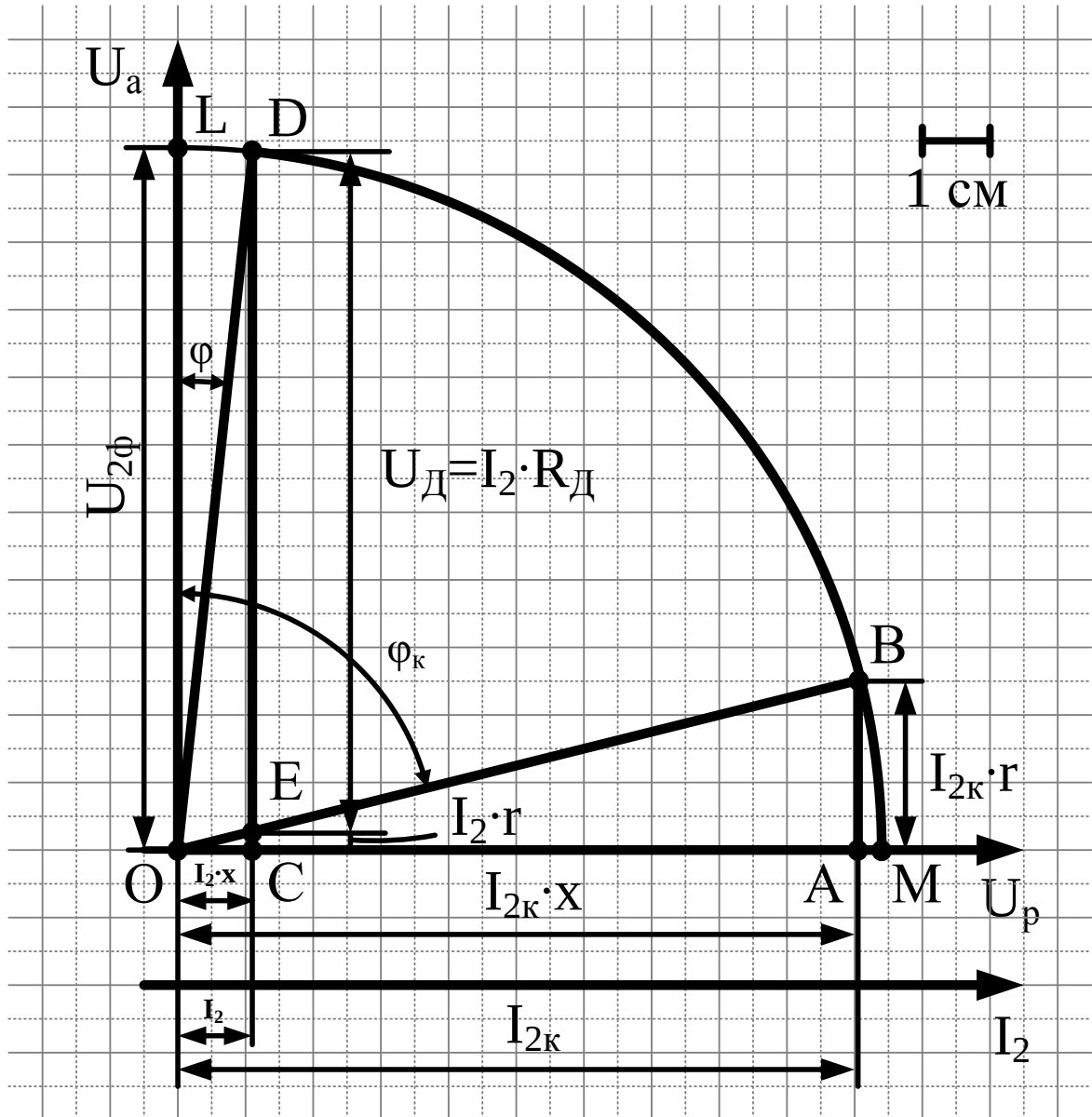


Рис. 3.2 Кругова діаграма ДСП

Задача 3.3

Побудувати електричні та робочі характеристики для ДСП-6, якщо фазна вторинна напруга $U_{2\phi} = 257 \text{ В}$, активна складова опору печі $r = 1,06 \text{ мОм}$, реактивна складова опору печі $x = 4,24 \text{ мОм}$, робочий струм $I_{2н} = 6,3 \text{ кА}$.

Рішення

1. Будуємо кругову діаграму для печі.

2. Задаємося декількома значеннями робочого струму I_2 на відрізок $0 - I_{2к}$ (див. перший рядок табл. 3.3. Від кількості узятих значень I_2 залежить точність побудованих графіків).

Таблиця 3.3

Данні для розрахунку характеристик ДСП-6

	Номери точок побудови характеристик				
	1	2	3	4	5
Робочий струм I_2 , кА					
Падіння напруги на дузі U_0 , В					
Опір дуги R_d , мОм					
Електричні та теплові характеристики пічної установки					
Потужність електричних втрат установки, $P_{ел}$					
Активна потужність установки, $P_{акт}$					
Потужність, що виділяється в дузі, P_d					
Потужність теплових втрат, $P_{тп}$					
Електричний ККД установки, $\eta_{ел}$					
Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$					
Робочі характеристики печі					
Годинна продуктивність печі, g					
Питома витрата електроенергії, w					
Час плавлення 1 тонни сталі, t					
Повний ККД печі, η					

3. Для кожного значення струму I_2 по круговій діаграмі визначаємо значення відповідних падінь напруги на дузі U_0 (див. другий рядок табл. 3.3).
4. Розраховуємо величину опору дуги (див. третій рядок табл. 3.3):

$$U_0 = I_2 \cdot R_0 \Rightarrow R_0 = U_0 / I_2.$$

5. Для кожного стовпця значень табл. 3.3 розраховуємо електричні характеристики пічної установки:

- а) потужність електричних втрат

$$P_{ел} = 3I_2^2 \cdot r = 3 \cdot (10 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} = 318 \cdot 10^3 \text{ Вт};$$

- б) активну потужність

$$P_{акт} = 3I_2^2 (R_0 + r) = 3 \left[I_2 \sqrt{U_{2\phi}^2 - (I_2 x)^2} \right] =$$

$$= 3(10 \cdot 10^3)^2 (24,6 \cdot 10^{-3} + 1,6 \cdot 10^{-3}) = 7,698 \cdot 10^6 \text{ Вт};$$

- в) потужність, що виділяється в дузі (корисну електричну потужність)

$$P_d = P_{ел.кор.} = P_{акт} - P_{ел} = 3I_2^2 R_0 = 3 \left[I_2 \sqrt{U_{2\phi}^2 - (I_2 x)^2} - I_2^2 x \right] =$$

$$= 7,7 \cdot 10^6 - 318 \cdot 10^3 = 7382 \cdot 10^3 \text{ Вт};$$

г) потужність теплових втрат (дана величина відмінна для кожної окремої печі і може варіюватися від 5 % корисної електричної потужності $P_{\text{ЕЛ.КОР.}}$ при $I_{2н}$ для печей великої ємності (порядка 200 тонн) до 35 % $P_{\text{ЕЛ.КОР.}}$ при $I_{2н}$ для печей невеликої ємності (порядка 5 тонн). Наша піч ДСП-6 має ємність 6 тонн, отже приймаємо потужність теплових втрат приблизно 34 % від корисної електричної потужності):

$$P_{\text{ТП}} = 0,34 \cdot P_{\text{ЕЛ.КОР.}} = 2509,9 \cdot 10^3 \text{ Вт};$$

д) електричний ККД установки

$$\eta_{\text{ЕЛ}} = \frac{P_{\text{Д}}}{P_{\text{АКТ}}} = \frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{д}} + r} = \frac{U_{\text{д}}}{I_2 (R_{\text{д}} + r)} = \frac{7,382 \cdot 10^3}{7,7 \cdot 10^6} = 0,96;$$

е) коефіцієнт потужності

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= P_{\text{АКТ}} / S = P_{\text{АКТ}} / (3U_{2\phi} I_2) = \frac{I_2 (R_{\text{д}} + r)}{U_{2\phi}} = \\ &= \frac{10 \cdot 10^3 (24,6 + 1,06) \cdot 10^{-3}}{257} = \frac{256,6}{257} = 0,998, \end{aligned}$$

де $S = 3U_{2\phi} I_2$ – повна потужність установки, ВА.

6. Робочі характеристики печей будуються для точнішого визначення раціонального режиму роботи ДСП. Ці показники будують для періоду розплавлення, оскільки в періоди окислення і рафінування тепловий та електричний режими визначаються вимогами технології. Крім того, у ці періоди залежно від марки сталі витрачається 15-30 % всієї витраченої за плавку електроенергії, тоді як на період розплавлення – 85-70 %. Розрахуємо робочі величини для кожного стовпця табл. 3 2:

а) годинну продуктивність печі

$$g = \frac{P_{\text{КОР}}}{340} = \frac{P_{\text{Д}} - P_{\text{ТП}}}{340} = \frac{7382 \cdot 10^3 - 2509,9 \cdot 10^3}{340 \cdot 10^3} = 14,329 \text{ т/год.},$$

де $P_{\text{КОР}} = P_{\text{Д}} - P_{\text{ТП}}$ – корисна потужність, що витрачається на розплавлення, Вт; 340 кВт·год./т – теоретична кількість електроенергії, необхідна для розплавлення однієї тонни сталі;

б) питому витрату електроенергії

$$w = \frac{P_{\text{АКТ}}}{g} = \frac{7698 \cdot 10^3}{14,329} = 537,23 \text{ кВт·год./т};$$

в) час плавлення 1 тонни сталі

$$t = \frac{1}{g} = \frac{340}{P_{\text{Д}} - P_{\text{ТП}}} = \frac{1}{14,323} = 0,0698 \text{ год./т};$$

г) повний ККД печі

$$\eta = \eta_{\text{ЕЛ}} \cdot \eta_{\text{Т}} = \frac{340}{w} = \frac{340 \cdot g}{P_{\text{АКТ}}} = \frac{340}{537,23} = 0,632876.$$

7. За отриманими величинами, відповідними значенням I_2 з табл. 3.3, будуємо електричні та робочі характеристики.

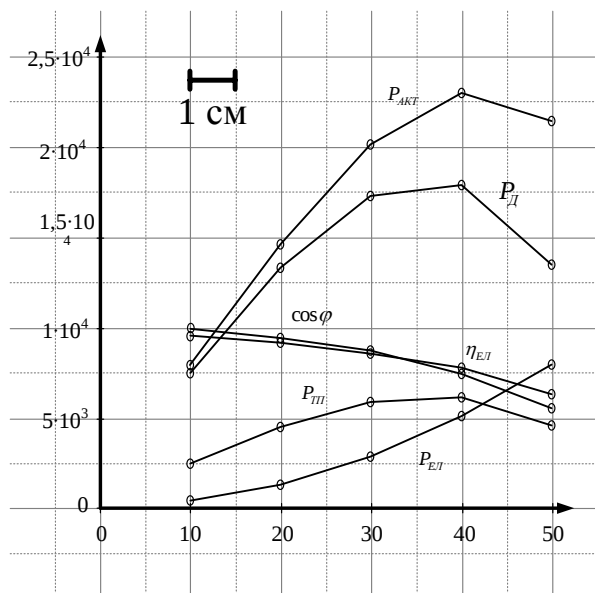


Рис. 3.3.1 Електричні та теплові характеристики пічної установки

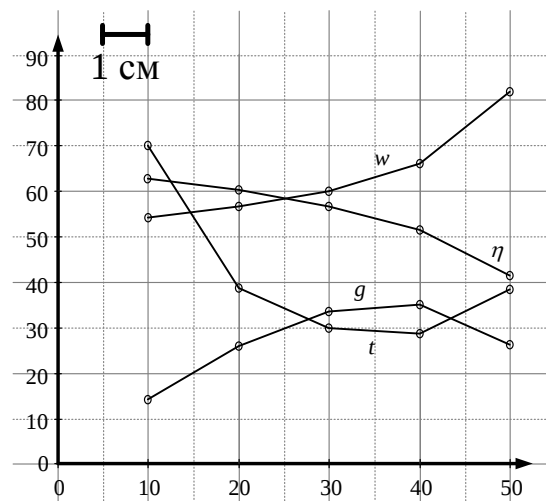


Рис. 3.3.2 Робочі характеристики печі

Розділ IV. УСТАНОВКИ ДУГОВОГО ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ

Задача 4.1

Вольт-амперну характеристику дуги в діапазоні зміни струму зварювальної установки від 10 до 200 А представлено залежністю $U_d = 200/\sqrt{I}$. Напруга холостого ходу на вторинній обмотці зварювального трансформатора $U_{xx} = 70$ В, активний опір вторинної обмотки $r = 0,2$ Ом.

Послідовно з вторинною обмоткою трансформатора включено струмообмежуючий реактор з індуктивним опором x . Робота зварювальної установки відповідає еквівалентній схемі, приведеній на рис. 4.1.1.

Визначити вольт-амперну характеристику зварювального трансформатора $U_m(I)$. Враховуючи, що при зварюванні $U_m = U_d$, визначити індуктивності реактора, які забезпечують струми дуги $I = 100$ А та $I = 150$ А. Довести, що при $I = 150$ А забезпечується стійкість горіння дуги установки. Побудувати вольт-амперну характеристику.

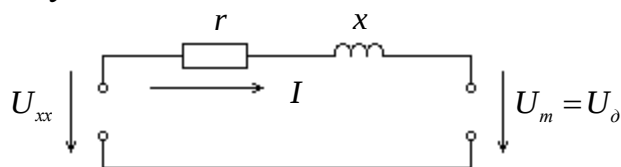


Рис. 4.1.1 Еквівалентна схема зварювального трансформатора

Рішення

1. Визначимо вольт-амперну характеристику (ВАХ) зварювального трансформатора:

а) побудуємо векторну діаграму згідно з еквівалентною схемою зварювального трансформатора (рис. 4.1.2);

б) відповідно до діаграми

$$\begin{aligned} |\bar{U}_{xx}|^2 &= |\bar{U}_r + \bar{U}_m|^2 + |\bar{U}_x|^2, \text{ т.ч.} \\ U_{xx}^2 &= (I \cdot r + U_m)^2 + (I \cdot x)^2, \\ U_{xx}^2 &= I^2 \cdot r^2 + 2 \cdot I \cdot r \cdot U_m + U_m^2 + I^2 \cdot x^2 = \\ &= I^2 \cdot (r^2 + x^2) + 2 \cdot I \cdot r \cdot U_m + U_m^2, \\ U_{xx} &= \sqrt{I^2 \cdot (r^2 + x^2) + 2 \cdot I \cdot r \cdot U_m + U_m^2}; \end{aligned}$$

в) вирішимо одержане рівняння відносно U_m і отримаємо два корені

$$U_m = \pm \sqrt{U_{xx}^2 - I^2 \cdot x^2} - I \cdot r.$$

Оскільки з боку навантаження в ланцюг трансформатора енергія не передається, єдиним правильним рішенням буде вираз:

$$U_m = \sqrt{U_{xx}^2 - I^2 \cdot x^2} - I \cdot r.$$

2. Знайдемо індуктивності реактора, що забезпечують струми 100 А і 150 А, для чого:

а) враховуючи, що згідно з умовою напруга дуги описується виразом $U_o = 200/\sqrt{I}$ і під час зварювання $U_m = U_o$,

$$\sqrt{U_{xx}^2 - I^2 \cdot x^2} - I \cdot r = 200/\sqrt{I};$$

б) знайдемо x з отриманого виразу

$$x = \pm \sqrt{\frac{U_{xx}^2 - (200/\sqrt{I} + I \cdot r)^2}{I^2}}.$$

Оскільки опір не може бути негативним, єдине вірне рішення:

$$x = \frac{\sqrt{U_{xx}^2 - (200/\sqrt{I} + I \cdot r)^2}}{I};$$

в) розраховуємо значення x , відповідні токам 100 А і 150 А

$$\begin{aligned} x &= \frac{\sqrt{70^2 - (200/\sqrt{100} + 100 \cdot 0,2)^2}}{100} = 0,575 \text{ Ом}, \\ x &= \frac{\sqrt{70^2 - (200/\sqrt{150} + 150 \cdot 0,2)^2}}{150} = 0,35 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

г) визначимо значення індуктивностей

$$x = \omega L = 2\pi fL \Rightarrow L = \frac{x}{2\pi f},$$

де f – частота струму, Гц. Таким чином:

$$\begin{aligned} L_{100} &= \frac{0,575}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1,831 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, \\ L_{150} &= \frac{0,35}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1,115 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \end{aligned}$$

3. Доведемо, що при 150 А забезпечується стійке горіння дуги:

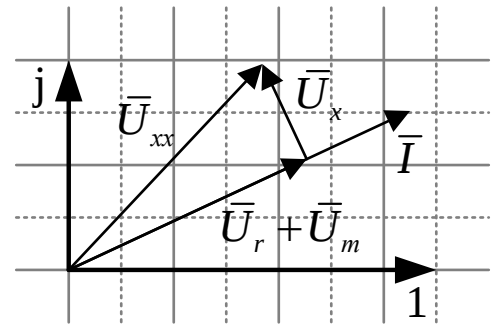


Рис. 4.1.2. Векторна діаграма зварювального трансформатора

а) знайдемо похідну dU_m/dI

$$U'_m(I) = \frac{dU_m}{dI} = \frac{d(\sqrt{U_{xx}^2 - I^2 \cdot x^2} - I \cdot r)}{dI} = -r - \frac{I \cdot x^2}{\sqrt{U_{xx}^2 - I^2 \cdot x^2}};$$

б) знайдемо похідну dU_o/dI

$$U'_o(I) = \frac{dU_o}{dI} = \frac{d(200/\sqrt{I})}{dI} = \frac{100}{\sqrt{I^3}};$$

в) умова стійкості горіння дуги

$$\left| \frac{dU_m}{dI} \right| > \left| \frac{dU_o}{dI} \right|.$$

Таким чином, для струму 150 А:

$$U'_m(150) = -0,2 - \frac{150 \cdot 0,35^2}{\sqrt{70^2 - 150^2 \cdot 0,35^2}} = -0,597,$$

$$U'_o(150) = 100/\sqrt{150^3} = 0,054,$$

тобто

$$\left| \frac{dU_m}{dI} \right| = 0,597 > 0,054 = \left| \frac{dU_o}{dI} \right|,$$

що підтверджує стійкість горіння дуги при 150 А.

4. Скориставшись виразом для U_m , будемо ВАХ зварювальної установки для x_{100} і x_{150} :

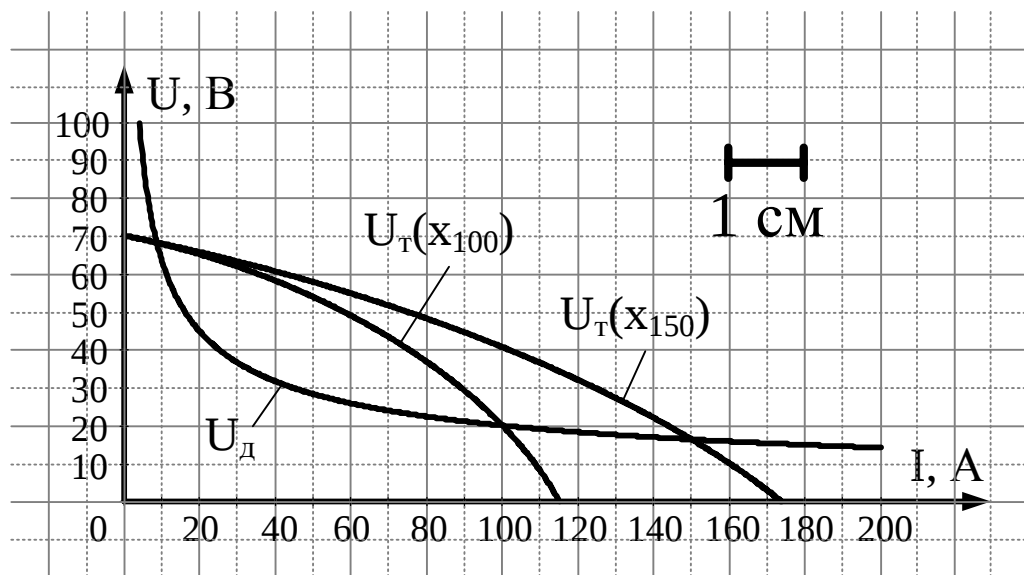


Рис. 4.1.3 ВАХ зварювальної установки

Задача 4.2

Встановити номери гармонік, які генеруються зварювальною установкою постійного струму при пульсності схеми випрямлення $m = 6$ та визначити коефіцієнт викривлення синусоїдальності форми кривої напруги на шинах 0,4 кВ для заданої схеми електропостачання. Перехідний опір з боку напруги 380 В – 0,01 Ом.

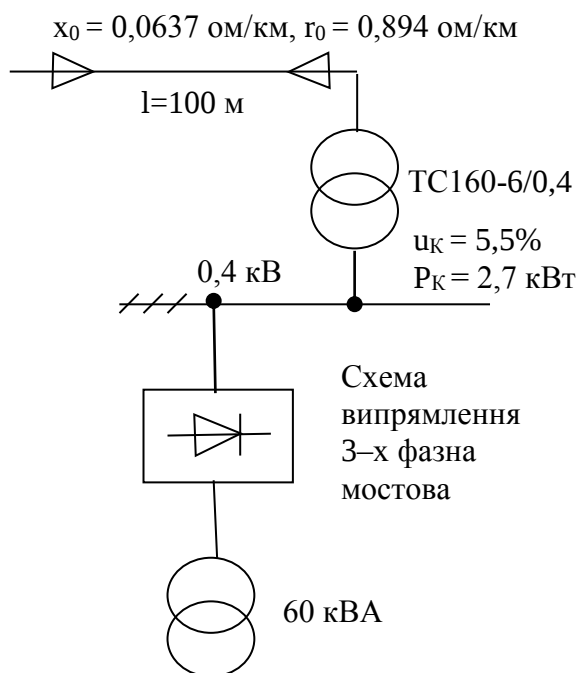


Рис. 4.2. Схема електропостачання зварювальної установки

Методичні вказівки

Для перетворювальних та зварювальних установок на постійному струмі номери гармонік визначаються формулою:

$$v = km \pm 1,$$

де $k = 1; 2; 3; \dots; m$ – пульсність схеми випрямлення.

Для одиничних зварювальних установок на постійному струмі рекомендується враховувати до 13-ї гармоніки включно. Коефіцієнт викривлення синусоїдальності форми кривої напруги:

$$k_{nc} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_1},$$

де U_1 – діюче значення напруги основної гармоніки. В інженерних

розрахунках це значення може бути прийняте рівним номінальній напрузі мережі живлення; U_v – діюче значення напруги гармоніки з номером v ; n – номер найвищої гармоніки, яка враховується при визначенні k_{nc} .

Напруга v -ї гармоніки (діюче значення) $U_v = I_v Z_v$, де I_v – діюче значення струму v -ї гармоніки; Z_v – результуючий опір секції (системи шин) для v -ї гармоніки.

Діюче значення струму v -ї гармоніки для дугового електрозварювання на постійному струмі $I_v = \frac{I_1}{v}$, де I_1 – номінальне діюче значення струму установки з боку мережі живлення.

$$I_1 = \frac{S_{зв}}{\sqrt{3} U} [A], \text{ або } I_1 = \frac{U_{xx} \cdot I_{ном}}{\sqrt{3} U \cos \phi_{зв} \eta_{зв}} [A],$$

де $S_{зв}$ – номінальна потужність зварювальної установки ВА; U – напруга мережі живлення, В; U_{xx} – напруга холостого ходу зварювального трансформатора, В; $I_{ном}$ – номінальний зварювальний струм, А; $\cos \phi$ – коефіцієнт потужності установки; $\eta_{зв}$ – к.к.д. зварювальної установки.

Результуючий опір секції (системи шин) для v -ї гармоніки визначається на основі схеми заміщення та її параметрів для першої гармоніки. Схема складається за загальними правилами. В мережах напругою вище 1000 всі елементи схеми заміщення, як правило мають індуктивний характер, а активний опір елементів ураховується, якщо $r_{екв} \geq \frac{x_{екв}}{3}$, де $r_{екв}$, $x_{екв}$ – відповідно еквівалентний активний та індуктивний опір схеми заміщення.

В мережах напругою до 1000 В необхідно враховувати активний опір елементів схеми, а також перехідний опір контактів комутаційних пристроїв.

Якщо джерелом вищих гармонік є установки напругою до 1000 В та їх потужність не перевищує 20% потужності трансформатора ГЗП, то розрахункову схему можна скласти лише до шин напругою 6...10 кВ джерела живлення. При розрахунках визначаються параметри схеми заміщення для основної гармоніки (окрім гілки із зварювальним навантаженням). Схема заміщення для вищих гармонійних складових включає джерело гармонік, яке зображається у вигляді джерела струму, вільні кінці схеми заміщення об'єднуються, індуктивний опір x_i елементів схеми замінюється на добуток $jx_i \cdot v$, а активний r_i на $r_i \cdot \sqrt{v}$. Для кожної гармоніки виконується перетворення схеми заміщення до найпростішої – з однією гілкою (гілка з зварювальною установкою в перетвореннях участі не бере) та розраховується результуючий опір Z_v .

Рішення

1. Визначимо номери гармонік:

$$\begin{aligned} \text{Для } k=1, \quad k=2, \\ v = k \cdot m + 1 = 7 \quad v = k \cdot m + 1 = 13 \\ v = k \cdot m - 1 = 5 \quad v = k \cdot m - 1 = 11 \end{aligned}$$

2. Номінальне діюче значення струму установки з боку джерела гармонік:

$$I_1 = \frac{S_m}{\sqrt{3} \cdot U_{nm}} = \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 91,161 \text{ А.}$$

3. Знаходимо діюче значення струму для кожної гармоніки:

$$\begin{aligned} \text{Для } v = 5 \quad I_{v5} = \frac{I_1}{v} = \frac{91,161}{5} = 18,232 \text{ А. Для } v = 7 \quad I_{v7} = \frac{I_1}{v} = \frac{91,161}{7} = 13,023 \text{ А,} \\ \text{Для } v = 11 \quad I_{v11} = \frac{I_1}{v} = \frac{91,161}{11} = 8,287 \text{ А. Для } v = 13 \quad I_{v13} = \frac{I_1}{v} = \frac{91,161}{13} = 7,012 \text{ А.} \end{aligned}$$

4. Далі необхідно визначити опори кабельної лінії та силового трансформатора:

$$\begin{aligned} R_k = r_0 \cdot l = 0,894 \cdot 0,1 = 0,089 \text{ Ом; } X_k = x_0 \cdot l = 0,0637 \cdot 0,1 = 0,0064 \text{ Ом;} \\ R_t = \frac{P_k \cdot U_{нв}^2}{S_t^2} = \frac{2,7 \cdot 6^2 \cdot 1000}{160^2} = 3,797 \text{ Ом; } X_t = \frac{U_k \cdot U_{нв}^2}{S_t} = \frac{0,055 \cdot 6^2 \cdot 1000}{160} = 12,375 \text{ Ом;} \\ R = R_k + R_t = 0,089 + 3,797 = 3,886 \text{ Ом; } X = X_k + X_t = 0,0064 + 12,375 = 12,381 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

5. Необхідно привести значення опорів на стороні 6 кВ до напруги 0,4 кВ, та виконати перевірку, чи потрібно враховувати активний опір:

$$\begin{aligned} \frac{X}{3} = \frac{12,381}{3} = 4,127 \approx R = 3,886 \text{ Ом;} \\ R_{np} = R \cdot \frac{U_{nn}^2}{U_{нв}^2} = 3,886 \cdot \frac{0,4^2}{6,3^2} = 0,016 \text{ Ом; } X_{np} = X \cdot \frac{U_{nn}^2}{U_{нв}^2} = 12,381 \cdot \frac{0,4^2}{6,3^2} = 0,05 \text{ Ом;} \\ R_{\Sigma} = R_{np} + 0,01 = 0,016 + 0,01 = 0,026 \text{ Ом; } X_{\Sigma} = X_{np} = 0,05 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

6. Для кожної гармонічної складової опір буде дорівнювати:

Для $v = 5$:

$$R_{v5} = R_{\Sigma} \cdot \sqrt{v} = 0,026 \cdot \sqrt{5} = 0,057 \text{ Ом; } X_{v5} = X_{\Sigma} \cdot v = 0,05 \cdot 5 = 0,25 \text{ Ом.}$$

Для $\nu = 7$:

$$R_{\nu 7} = R_{\Sigma} \cdot \sqrt{\nu} = 0,026 \cdot \sqrt{7} = 0,068 \text{ Ом}; \quad X_{\nu 7} = X_{\Sigma} \cdot \nu = 0,05 \cdot 7 = 0,349 \text{ Ом}.$$

Для $\nu = 11$:

$$R_{\nu 11} = R_{\Sigma} \cdot \sqrt{\nu} = 0,026 \cdot \sqrt{11} = 0,085 \text{ Ом}; \quad X_{\nu 11} = X_{\Sigma} \cdot \nu = 0,05 \cdot 11 = 0,549 \text{ Ом}.$$

Для $\nu = 13$:

$$R_{\nu 13} = R_{\Sigma} \cdot \sqrt{\nu} = 0,026 \cdot \sqrt{13} = 0,093 \text{ Ом}; \quad X_{\nu 13} = X_{\Sigma} \cdot \nu = 0,05 \cdot 13 = 0,649 \text{ Ом}.$$

7. З попередніх розрахунків можна визначити напругу кожної гармонічної складової, та коефіцієнт викривлення синусоїдальності форми кривої напруги на шинах 0,4 кВ для заданої схеми електропостачання:

$$U_{\nu 5} = I_{\nu 5} \cdot Z_{\nu 5} = 18,232 \cdot 0,256 = 4,669 \text{ В}; \quad U_{\nu 7} = I_{\nu 7} \cdot Z_{\nu 7} = 13,023 \cdot 0,356 = 4,635 \text{ В};$$

$$U_{\nu 11} = I_{\nu 11} \cdot Z_{\nu 11} = 8,287 \cdot 0,556 = 4,604 \text{ В}; \quad U_{\nu 13} = I_{\nu 13} \cdot Z_{\nu 13} = 7,012 \cdot 0,655 = 4,596 \text{ В}.$$

$$K_{нс} = \frac{100 \cdot \sqrt{U_{\nu 5}^2 + U_{\nu 7}^2 + U_{\nu 11}^2 + U_{\nu 13}^2}}{U_{нв}} = \frac{100 \cdot \sqrt{4,669^2 + 4,635^2 + 4,604^2 + 4,596^2}}{380} = 2,4348 \text{ \%}.$$

РОЗДІЛ V. Теплопередача та ультразвукова обробка

Задача 5.1

Визначити щільність потоку променевої енергії [Вт/м²] при теплообміні між двома тілами з нескінченно великими плоскими паралельними поверхнями, що мають відносні температури $T_1 = 2000$ [К], $T_2 = 1000$ [К] та коефіцієнти чорноти $\varepsilon_1 = 0,4$, $\varepsilon_2 = 0,6$.

В скільки разів збільшиться ця щільність, якщо T_1 збільшиться в два рази.

Методичні вказівки

Щільність енергії визначається із формули:

$$\phi = \frac{C_s}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ де } C_s = 5,76 \text{ – коефіцієнт Стілонса.}$$

Рішення

1. Щільність енергії визначається за формулою:

$$\phi_1 = \frac{C_s}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \frac{5,76}{\frac{1}{0,4} + \frac{1}{0,6} - 1} \cdot \left[\left(\frac{2000}{100} \right)^4 - \left(\frac{1000}{100} \right)^4 \right] = 2,728 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

2. Якщо T_1 збільшити в 2 рази:

$$\phi_2 = \frac{C_s}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \frac{5,76}{\frac{1}{0,4} + \frac{1}{0,6} - 1} \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot 2000}{100} \right)^4 - \left(\frac{1000}{100} \right)^4 \right] = 4,638 \cdot 10^6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

3. Тобто щільність збільшиться в 17 разів.

$$\frac{\phi_2}{\phi_1} = 17$$

Задача 5.2

В рідині енергія від джерела механічних коливань частотою $f = 3 \cdot 10^4 \text{ [с}^{-1}\text{]}$ розповсюджується у вигляді плоскої бігучої хвилі із швидкістю $C = 1,5 \text{ [км/с]}$ у напрямку Х. Знайти залежність зміщення ε рідини від часу на відстані $x = 200 \text{ [м]}$ та $x = 700 \text{ [м]}$, якщо амплітудне значення $\varepsilon_m = 0,001 \text{ [м]}$. Написати рівняння щільності енергії $E(t)$ на цих відстанях та визначити інтенсивність звуку I , якщо густина рідини $\rho = 1000 \text{ [кг/м}^3\text{]}$. Побудувати залежності $\varepsilon(t)$, $E(t)$ для цих точок.

Методичні вказівки

$$\text{Рівняння плоскої бігучої хвилі } \varepsilon = \varepsilon_m \cdot \sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{C}\right)\right),$$

$$\text{щільність енергії } E = \rho \cdot \varepsilon_m^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos^2\left(\omega\left(t - \frac{x}{C}\right)\right),$$

$$\text{інтенсивність звуку } I = E_{cp} \cdot C = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \varepsilon_m^2 \cdot \omega^2 \cdot C.$$

Рішення

1. Запишемо інтенсивність звуку:

$$I = E_{cp} \cdot C = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \varepsilon_m^2 \cdot \omega^2 \cdot C = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 0,001^2 \cdot (1,885 \cdot 10^5)^2 \cdot 1500 = 2,665 \cdot 10^{10} \frac{\text{кг}}{\text{с}^2}.$$

2. Рівняння щільності енергії:

$$E_1 = \rho \cdot \varepsilon_m^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos^2\left(\omega\left(t - \frac{x_1}{C}\right)\right) = 1000 \cdot (0,001)^2 \cdot (1,885 \cdot 10^5)^2 \cdot \left[\cos(1,885 \cdot 10^5 \cdot (t - \frac{200}{1500}))\right]^2$$

$$E_2 = \rho \cdot \varepsilon_m^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos^2\left(\omega\left(t - \frac{x_2}{C}\right)\right) = 1000 \cdot (0,001)^2 \cdot (1,885 \cdot 10^5)^2 \cdot \left[\cos(1,885 \cdot 10^5 \cdot (t - \frac{700}{1500}))\right]^2$$

3. Рівняння плоскої бігучої хвилі:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_m \cdot \sin\left(\omega\left(t - \frac{x_1}{C}\right)\right) = 0,001 \cdot \sin(1,885 \cdot 10^5 \cdot (t - \frac{200}{1500}))$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_m \cdot \sin\left(\omega\left(t - \frac{x_2}{C}\right)\right) = 0,001 \cdot \sin(1,885 \cdot 10^5 \cdot (t - \frac{700}{1500}))$$

4. Далі побудуємо графічні залежності рівнянь плоскої бігучої хвилі та щільності енергії, при заданому часі від 1 до 10 секунд.

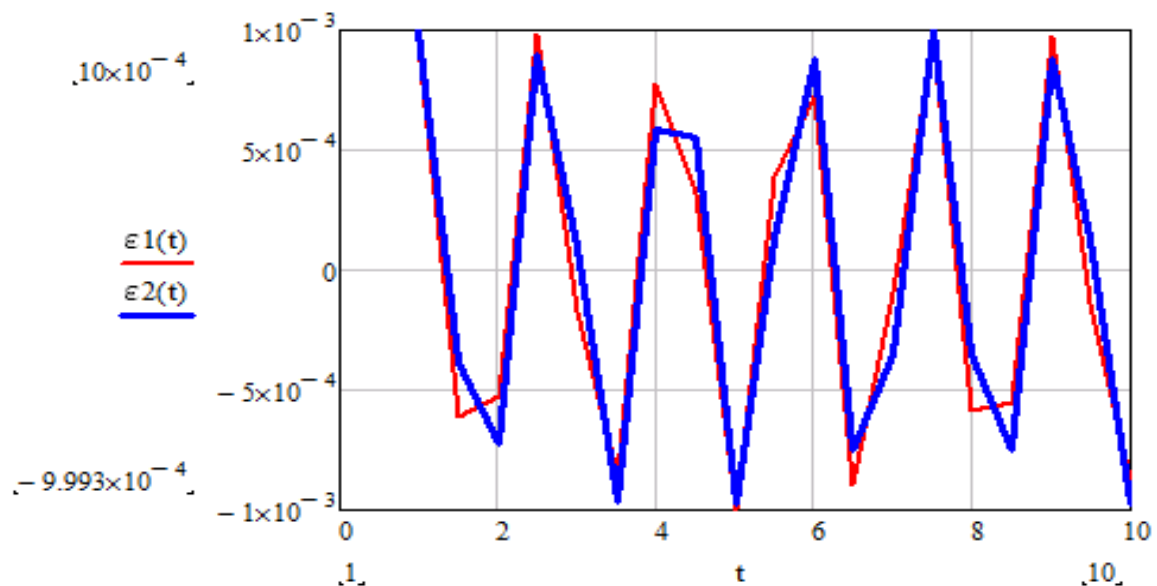


Рис. 5.2.1. Графічні залежності рівнянь плоскої бігучої хвилі

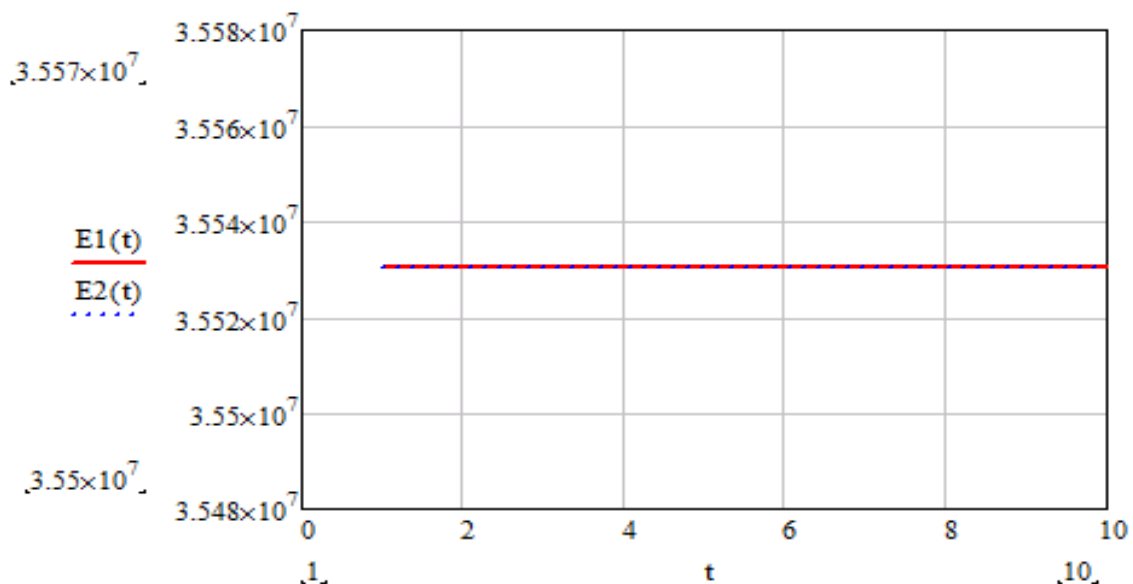


Рис. 5.2.2. Графічні залежності рівнянь щільності енергії

РОЗДІЛ VI. Якість електроенергії

Задача 6.1

Визначити коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги на шинах 6 кВ рис. 6.1, якщо до шин підключений вентильний нерегульований перетворювач (m – фазна схема випрямлення), а також асинхронний двигун потужністю $S_{\text{дв}}$, $\cos\varphi=0,85$. Опір енергосистеми при частоті 50 Гц – X_c . Номінальний струм перетворювача I_n . Урахувати канонічні гармоніки струму до 13-ї включно.

Розрахувати коефіцієнт викривлення синусоїдальності напруги й додаткові втрати в двигуні, що обумовлені несинусоїдальністю, а також ККД двигуна,

якщо значення останнього при відсутності несинусоїдальності напруги $\eta_{дв}=0.9$.
Розрахунки виконати для 3-х варіантів табл.1

Таблиця 6.1 Варіанти даних

Варіант	m	$X_c, \Omega m$	I_H, A	U_H, kV	$S_{дв}, kVA$
1	6	0.2	100	6	100
2	12	0.1	100	6	200
3	6	0.5	100	6	300

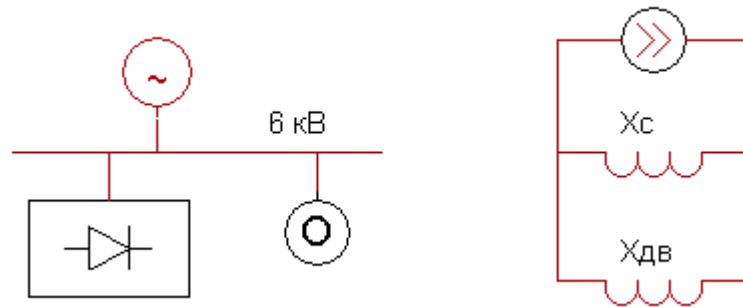


Рис. 6.1 Схеми системи електропостачання

Методичні вказівки

Номера гармонік, що генерує перетворювач $n = k \cdot m \pm 1, k = 1, 2, 3 \dots$;

Діючі значення струмів для кожного номеру гармоніки $I_N = \frac{I_{НОМ}}{3 \cdot n}$;

Опір живлячої системи $X_{сн}$ та двигуна $X_{двн}$ (для n – ої гармоніки)

$$X_{c_n} = X_c \cdot n, \quad X_{дв.n} = \frac{6 \cdot n \cdot 10^3}{S_{дв} [kBm]} ;$$

Сумарний опір двигуна та системи (для n –ої гармоніки)

$$\frac{1}{X_{сум.n}} = \frac{1}{X_{дв.n}} + \frac{1}{X_{c.n}} ;$$

Коефіцієнт викривлення синусоїдальності напруги

$$K_{H.C.} = \frac{100 \cdot \sqrt{\sum_{n=km \pm 1}^2 (I_N \cdot X_{сум.n})^2}}{U_H} ;$$

Додаткові втрати в асинхронному двигуні $\Delta P_{АД} = 2\kappa_d \cdot P_H \cdot \sum_{n=km \pm 1}^2 \frac{U_H^2}{n\sqrt{n}}$;

при $P_H > 100$ кВт; $\kappa_d = 1 \div 0,4$; при $P_H = 5 \div 100$ кВт; $\kappa_d = 3 \div 1$

Коефіцієнт корисної дії $\eta = \frac{P_H \cdot \eta_{дв}}{P_H + \Delta P_{АД}}$

Рішення

Варіант №1.

1. Номера гармонік, що генерує перетворювач:

$$k_1 = 1 \quad k_2 = 2$$

$$n_1 = k_1 \cdot m_1 - 1 = 1 \cdot 6 - 1 = 5$$

$$n_2 = k_1 \cdot m_1 + 1 = 1 \cdot 6 + 1 = 7$$

$$n_3 = k_2 \cdot m_1 - 1 = 2 \cdot 6 - 1 = 11$$

$$n_4 = k_2 \cdot m_1 + 1 = 2 \cdot 6 + 1 = 13$$

2. Діючі значення струмів для кожного номеру гармоніки:

$$I_{N1} = \frac{I_H}{3 \cdot n_1} = \frac{100}{3 \cdot 5} = 6,667 \text{ А.} \quad I_{N3} = \frac{I_H}{3 \cdot n_3} = \frac{100}{3 \cdot 11} = 3,03 \text{ А.}$$

$$I_{N2} = \frac{I_H}{3 \cdot n_2} = \frac{100}{3 \cdot 7} = 4,762 \text{ А.} \quad I_{N4} = \frac{I_H}{3 \cdot n_4} = \frac{100}{3 \cdot 13} = 2,564 \text{ А.}$$

3. Опір живлячої системи для n-ої гармоніки:

$$X_{cn1} = X_{c1} \cdot n_1 = 0,2 \cdot 5 = 1 \text{ Ом.}$$

$$X_{cn2} = X_{c1} \cdot n_2 = 0,2 \cdot 7 = 1,4 \text{ Ом.}$$

$$X_{cn3} = X_{c1} \cdot n_3 = 0,2 \cdot 11 = 2,2 \text{ Ом.}$$

$$X_{cn4} = X_{c1} \cdot n_4 = 0,2 \cdot 13 = 2,6 \text{ Ом.}$$

4. Опір двигуна для n-ої гармоніки:

$$X_{ДВn1} = \frac{6 \cdot n_1 \cdot 10^3}{S_{ДВ1}} = \frac{6 \cdot 5 \cdot 10^3}{100} = 300 \text{ Ом.} \quad X_{ДВn3} = \frac{6 \cdot n_3 \cdot 10^3}{S_{ДВ1}} = \frac{6 \cdot 11 \cdot 10^3}{100} = 660 \text{ Ом.}$$

$$X_{ДВn2} = \frac{6 \cdot n_2 \cdot 10^3}{S_{ДВ1}} = \frac{6 \cdot 7 \cdot 10^3}{100} = 420 \text{ Ом.} \quad X_{ДВn4} = \frac{6 \cdot n_4 \cdot 10^3}{S_{ДВ1}} = \frac{6 \cdot 13 \cdot 10^3}{100} = 780 \text{ Ом.}$$

5. Сумарний опір двигуна та системи (для n-ої гармоніки):

$$X_1 = \frac{1}{X_{ДВn1}} + \frac{1}{X_{cn1}} = \frac{1}{300} + \frac{1}{1} = 1,003 \text{ Ом.} \quad X_{сумn1} = \frac{1}{X_1} = \frac{1}{1,003} = 0,997 \text{ Ом.}$$

$$X_2 = \frac{1}{X_{ДВn2}} + \frac{1}{X_{cn2}} = \frac{1}{420} + \frac{1}{1,4} = 0,717 \text{ Ом.} \quad X_{сумn2} = \frac{1}{X_2} = \frac{1}{0,717} = 1,395 \text{ Ом.}$$

$$X_3 = \frac{1}{X_{ДВn3}} + \frac{1}{X_{cn3}} = \frac{1}{660} + \frac{1}{2,2} = 0,456 \text{ Ом.} \quad X_{сумn3} = \frac{1}{X_3} = \frac{1}{0,456} = 2,193 \text{ Ом.}$$

$$X_4 = \frac{1}{X_{ДВn4}} + \frac{1}{X_{cn4}} = \frac{1}{780} + \frac{1}{2,6} = 0,386 \text{ Ом.} \quad X_{сумn4} = \frac{1}{X_4} = \frac{1}{0,386} = 2,591 \text{ Ом.}$$

6. Коефіцієнт викривлення синусоїдальності напруги:

$$K_{нс} = \frac{100 \cdot \sqrt{(I_{N1} \cdot X_{сумn1})^2 + (I_{N2} \cdot X_{сумn2})^2 + (I_{N3} \cdot X_{сумn3})^2 + (I_{N4} \cdot X_{сумn4})^2}}{U_H} =$$

$$= \frac{100 \cdot \sqrt{(6,667 \cdot 0,997)^2 + (4,762 \cdot 1,395)^2 + (3,03 \cdot 2,193)^2 + (2,564 \cdot 2,591)^2}}{6000} = 0,221$$

7. Додаткові втрати в асинхронному двигуні, при $K_d=3$:

$$P_{н1} = S_{\partial\partial1} \cdot \cos \phi = 100 \cdot 0,85 = 85 \text{ кВт.}$$

$$\Delta P_{\partial\partial1} = 2 \cdot K_{\partial} \cdot P_{н1} \cdot \left(\frac{U_1^2}{n_1 \cdot \sqrt{n_1}} + \frac{U_2^2}{n_2 \cdot \sqrt{n_2}} + \frac{U_3^2}{n_3 \cdot \sqrt{n_3}} + \frac{U_4^2}{n_4 \cdot \sqrt{n_4}} \right) =$$

$$2 \cdot 3 \cdot 85 \cdot \left(\frac{0,0011^2}{5 \cdot \sqrt{5}} + \frac{0,0011^2}{7 \cdot \sqrt{7}} + \frac{0,0011^2}{11 \cdot \sqrt{11}} + \frac{0,0011^2}{13 \cdot \sqrt{13}} \right) = 0,00012 \text{ кВт.}$$

8. Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta_1 = \frac{P_{н1} \cdot \eta_{\partial\partial}}{P_{н1} + \Delta P_{\partial\partial1}} = \frac{85 \cdot 0,9}{85 + 0,00012} = 0,9$$

Варіант №2.

1. Номера гармонік, що генерує перетворювач:

$$k_1 = 1$$

$$n_1 = k_1 \cdot m_2 - 1 = 1 \cdot 12 - 1 = 11$$

$$n_2 = k_1 \cdot m_2 + 1 = 1 \cdot 12 + 1 = 13$$

2. Діючі значення струмів для кожного номеру гармоніки:

$$I_{N1} = \frac{I_n}{3 \cdot n_1} = \frac{100}{3 \cdot 11} = 3,03 \text{ А.} \quad I_{N2} = \frac{I_n}{3 \cdot n_2} = \frac{100}{3 \cdot 13} = 2,564 \text{ А.}$$

3. Опір живлячої системи для n-ої гармоніки:

$$X_{cn1} = X_{c1} \cdot n_1 = 0,1 \cdot 11 = 1,1 \text{ Ом,}$$

$$X_{cn2} = X_{c1} \cdot n_2 = 0,1 \cdot 13 = 1,3 \text{ Ом.}$$

4. Опір двигуна для n-ої гармоніки:

$$X_{ДВn1} = \frac{6 \cdot n_1 \cdot 10^3}{S_{ДВ2}} = \frac{6 \cdot 11 \cdot 10^3}{200} = 330 \text{ Ом.} \quad X_{ДВn2} = \frac{6 \cdot n_2 \cdot 10^3}{S_{ДВ2}} = \frac{6 \cdot 13 \cdot 10^3}{200} = 390 \text{ Ом.}$$

5. Сумарний опір двигуна та системи (для n-ої гармоніки):

$$X_1 = \frac{1}{X_{ДВn1}} + \frac{1}{X_{cn1}} = \frac{1}{330} + \frac{1}{1,1} = 0,912 \text{ Ом.} \quad X_{сум1} = \frac{1}{X_1} = \frac{1}{0,912} = 1,096 \text{ Ом.}$$

$$X_2 = \frac{1}{X_{ДВn2}} + \frac{1}{X_{cn2}} = \frac{1}{390} + \frac{1}{1,3} = 0,772 \text{ Ом.} \quad X_{сум2} = \frac{1}{X_2} = \frac{1}{0,772} = 1,296 \text{ Ом.}$$

6. Коефіцієнт викривлення синусоїдальності напруги:

$$K_{нс} = \frac{100 \cdot \sqrt{(I_{N1} \cdot X_{сум1})^2 + (I_{N2} \cdot X_{сум2})^2}}{U_n} =$$

$$= \frac{100 \cdot \sqrt{(3,03 \cdot 1,096)^2 + (2,564 \cdot 1,296)^2}}{6000} = 0,078$$

7. Додаткові втрати в асинхронному двигуні, при $K_d=0,25$:

$$P_{н2} = S_{\partial\partial2} \cdot \cos \phi = 200 \cdot 0,85 = 170 \text{ кВт.}$$

$$\Delta P_{\partial\partial2} = 2 \cdot K_{\partial} \cdot P_{н2} \cdot \left(\frac{U_1^2}{n_1 \cdot \sqrt{n_1}} + \frac{U_n}{n_2 \cdot \sqrt{n_2}} \right) = 2 \cdot 0,25 \cdot 170 \cdot \left(\frac{0,554^2}{11 \cdot \sqrt{11}} + \frac{0,554^2}{13 \cdot \sqrt{13}} \right) = 1,27 \text{ кВт.}$$

8. Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta_2 = \frac{P_{н2} \cdot \eta_{дв}}{P_{н2} + \Delta P_{ад2}} = \frac{170 \cdot 0,9}{170 + 1,27} = 0,893.$$

Варіант №3.

1. Номера гармонік, що генерує перетворювач:

$$k_1 = 1 \quad k_2 = 2$$

$$n_1 = k_1 \cdot m_3 - 1 = 1 \cdot 6 - 1 = 5$$

$$n_2 = k_1 \cdot m_3 + 1 = 1 \cdot 6 + 1 = 7$$

$$n_3 = k_2 \cdot m_3 - 1 = 2 \cdot 6 - 1 = 11$$

$$n_4 = k_2 \cdot m_3 + 1 = 2 \cdot 6 + 1 = 13$$

2. Діючі значення струмів для кожного номеру гармоніки:

$$I_{N1} = \frac{I_{н}}{3 \cdot n_1} = \frac{100}{3 \cdot 5} = 6,667 \text{ А.} \quad I_{N3} = \frac{I_{н}}{3 \cdot n_3} = \frac{100}{3 \cdot 11} = 3,03 \text{ А.}$$

$$I_{N2} = \frac{I_{н}}{3 \cdot n_2} = \frac{100}{3 \cdot 7} = 4,762 \text{ А.} \quad I_{N4} = \frac{I_{н}}{3 \cdot n_4} = \frac{100}{3 \cdot 13} = 2,564 \text{ А.}$$

3. Опір живлячої системи для n-ої гармоніки:

$$X_{cn1} = X_{c3} \cdot n_1 = 0,5 \cdot 5 = 2,5 \text{ Ом.}$$

$$X_{cn2} = X_{c3} \cdot n_2 = 0,5 \cdot 7 = 3,5 \text{ Ом.}$$

$$X_{cn3} = X_{c3} \cdot n_3 = 0,5 \cdot 11 = 5,5 \text{ Ом.}$$

$$X_{cn4} = X_{c3} \cdot n_4 = 0,5 \cdot 13 = 6,5 \text{ Ом.}$$

4. Опір двигуна для n-ої гармоніки:

$$X_{двn1} = \frac{6 \cdot n_1 \cdot 10^3}{S_{дв3}} = \frac{6 \cdot 5 \cdot 10^3}{300} = 100 \text{ Ом.} \quad X_{двn3} = \frac{6 \cdot n_3 \cdot 10^3}{S_{дв3}} = \frac{6 \cdot 11 \cdot 10^3}{300} = 220 \text{ Ом.}$$

$$X_{двn2} = \frac{6 \cdot n_2 \cdot 10^3}{S_{дв3}} = \frac{6 \cdot 7 \cdot 10^3}{300} = 140 \text{ Ом.} \quad X_{двn4} = \frac{6 \cdot n_4 \cdot 10^3}{S_{дв3}} = \frac{6 \cdot 13 \cdot 10^3}{300} = 260 \text{ Ом.}$$

5. Сумарний опір двигуна та системи (для n-ої гармоніки):

$$X_1 = \frac{1}{X_{двn1}} + \frac{1}{X_{cn1}} = \frac{1}{100} + \frac{1}{2,5} = 0,41 \text{ Ом.} \quad X_{сумn1} = \frac{1}{X_1} = \frac{1}{0,41} = 2,439 \text{ Ом.}$$

$$X_2 = \frac{1}{X_{двn2}} + \frac{1}{X_{cn2}} = \frac{1}{140} + \frac{1}{3,5} = 0,293 \text{ Ом.} \quad X_{сумn2} = \frac{1}{X_2} = \frac{1}{0,293} = 3,415 \text{ Ом.}$$

$$X_3 = \frac{1}{X_{двn3}} + \frac{1}{X_{cn3}} = \frac{1}{220} + \frac{1}{5,5} = 0,186 \text{ Ом.} \quad X_{сумn3} = \frac{1}{X_3} = \frac{1}{0,186} = 5,366 \text{ Ом.}$$

$$X_4 = \frac{1}{X_{двn4}} + \frac{1}{X_{cn4}} = \frac{1}{260} + \frac{1}{6,5} = 0,158 \text{ Ом.} \quad X_{сумn4} = \frac{1}{X_4} = \frac{1}{0,158} = 6,341 \text{ Ом.}$$

6. Коефіцієнт викривлення синусоїдальності напруги:

$$K_{nc} = \frac{100 \cdot \sqrt{(I_{N1} \cdot X_{сумп1})^2 + (I_{N2} \cdot X_{сумп2})^2 + (I_{N3} \cdot X_{сумп3})^2 + (I_{N4} \cdot X_{сумп4})^2}}{U_H} =$$

$$= \frac{100 \cdot \sqrt{(6,667 \cdot 2,439)^2 + (4,762 \cdot 3,415)^2 + (3,03 \cdot 5,366)^2 + (2,564 \cdot 6,341)^2}}{6000} = 0,542$$

7. Додаткові втрати в асинхронному двигуні, при $K_d=0,25$:

$$P_{н3} = S_{\delta\delta 3} \cdot \cos \phi = 300 \cdot 0,85 = 255 \text{ кВт.}$$

$$\Delta P_{\alpha\delta 3} = 2 \cdot K_d \cdot P_{н3} \cdot \left(\frac{U_1^2}{n_1 \cdot \sqrt{n_1}} + \frac{U_2^2}{n_2 \cdot \sqrt{n_2}} + \frac{U_3^2}{n_3 \cdot \sqrt{n_3}} + \frac{U_4^2}{n_4 \cdot \sqrt{n_4}} \right) =$$

$$2 \cdot 0,25 \cdot 255 \cdot \left(\frac{2,71^2}{5 \cdot \sqrt{5}} + \frac{2,71^2}{7 \cdot \sqrt{7}} + \frac{2,71^2}{11 \cdot \sqrt{11}} + \frac{2,71^2}{13 \cdot \sqrt{13}} \right) = 179,958 \text{ кВт.}$$

8. Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta_3 = \frac{P_{н3} \cdot \eta_{\delta\delta}}{P_{н3} + \Delta P_{\alpha\delta 3}} = \frac{255 \cdot 0,9}{255 + 179,958} = 0,528.$$

Задача 6.2

Визначити коефіцієнт викривлення синусоїдальності напруги на секціях 10 та 110 та кВ. Тиристорний перетворювач з'єднаний по 6 – ти (12 - ти) фазній схемі.

Система: $S_{к2}=2000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

Трансформатор T_1 : $40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{кВН-НН}=10,5\%$;

Синхронний двигун Д: $12 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $x''_d=0,15$ відн. од.;

Трансформатор перетворювача T_2 : $24 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{кВН-НН}=14\%$;

Навантаження перетворювача: $25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\cos \phi=0,8$;

Потужність на шинах 10 кВ: $S_{к1}=405 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

Методичні вказівки

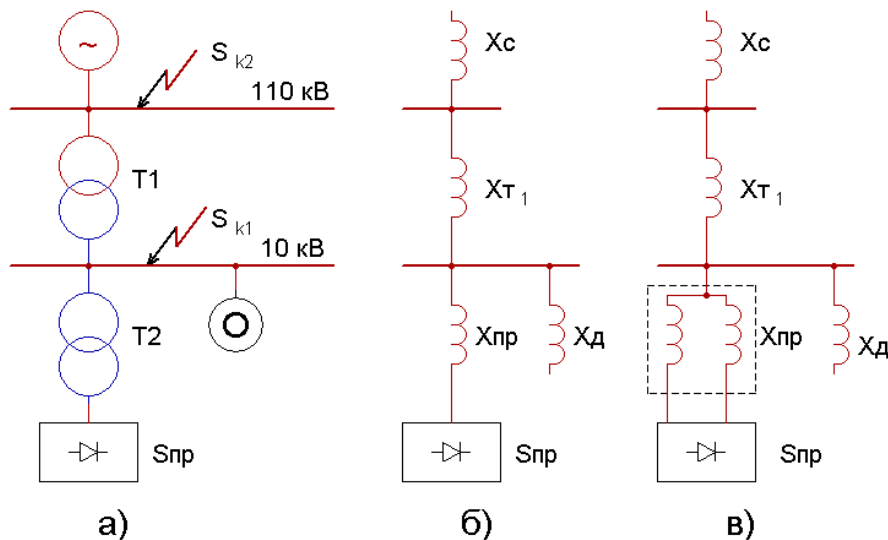


Рис. 6.2 а) однолінійна схема;
б) схема заміщення ($K_p=0$); в) схема заміщення ($K_p=4$).

Всі опори елементів мережі приводять до розрахункової потужності перетворювача $S_{\text{ПР}}=25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Якщо тиристорний перетворювач з'єднаний по 6 – ти фазній схемі – $K_p=0$; тиристорний перетворювач з'єднаний по 12 – ти фазній схемі – $K_p=4$

$$\text{Опір системи } x_{\text{СИСТ}} = \frac{S_{\text{ПР}}}{S_{K2}}, \text{ опір трансформатора } T_1 x_{T1} = \frac{u_{K_BH-HH}}{100} \cdot \frac{S_{\text{ПР}}}{S_{\text{НОМ.}T1}},$$

$$\text{сумарний опір } x_C = \frac{(x_{\text{СИСТ}} + x_{T1}) \cdot x_D}{x_{\text{СИСТ}} + x_{T1} + x_D} \text{ або } x_C = \frac{S_{\text{ПР}}}{S_{K1}},$$

$$\text{опір перетворювача } x_{\text{ПР}} = x_{T2} = \frac{u_{K_BH-HH}}{100} \cdot \left(1 + \frac{K_p}{4}\right) \cdot \frac{S_{\text{ПР}}}{S_{\text{НОМ.}T2}},$$

коефіцієнт несинусоїдальності на секції 10 кВ

$$K_{\text{НС},T1} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \cdot \frac{3 \cdot x_C^2 \cdot \sin \phi}{x_C + x_{\text{ПР}}} - \frac{9 \cdot x_C}{\pi^2}}$$

$$\text{коефіцієнт несинусоїдальності на секції 110 кВ, } K_{\text{НС},T2} = K_{\text{НС},T1} \cdot \frac{x_{\text{СИСТ}}}{x_{\text{СИСТ}} + x_C}.$$

Рішення

1. Опір системи:

$$x_{\text{СИСТ}} = \frac{S_{\text{ПР}}}{S_{K2}} = \frac{25}{2000} = 0,013$$

2. Опір трансформатора T1:

$$x_{T1} = \frac{u_{KBH1}}{100} \cdot \frac{S_{\text{ПР}}}{S_{T1}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{25}{40} = 0,066$$

3. Сумарний опір:

$$x_C = \frac{S_{\text{ПР}}}{S_{K1}} = \frac{25}{405} = 0,062$$

4. Опір перетворювача:

$K_{p1}=0$ – для 6-ти фазної схеми з'єднання;

$K_{p1}=4$ – для 12-ти фазної схеми з'єднання.

а) Для 6-ти фазної схеми з'єднання:

$$x_{\text{ПР1}} = \frac{u_{KBH2}}{100} \cdot \left(1 + \frac{K_{p1}}{4}\right) \cdot \frac{S_{\text{ПР}}}{S_{T2}} = \frac{14}{100} \cdot \left(1 + \frac{0}{4}\right) \cdot \frac{25}{24} = 0,146$$

б) Для 12-ти фазної схеми з'єднання:

$$x_{\text{ПР2}} = \frac{u_{KBH2}}{100} \cdot \left(1 + \frac{K_{p2}}{4}\right) \cdot \frac{S_{\text{ПР}}}{S_{T2}} = \frac{14}{100} \cdot \left(1 + \frac{4}{4}\right) \cdot \frac{25}{24} = 0,292$$

5. Коефіцієнт несинусоїдальності на секції 10 кВ:

а) для 6-ти фазної схеми з'єднання:

$$K_{\text{НС}T1} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \cdot \frac{3 \cdot X_C^2 \cdot \sin \phi}{X_C + X_{\text{ПР1}}} - \frac{9 \cdot X_C}{\pi^2}} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \cdot \frac{3 \cdot 0,062^2 \cdot 0,597}{0,062 + 0,146} - \frac{9 \cdot 0,062}{\pi^2}} = 0,016$$

б) для 12-ти фазної схеми з'єднання:

$$K_{HCT2} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \cdot \frac{3 \cdot X_C^2 \cdot \sin \phi}{X_C + X_{IP2}} - \frac{9 \cdot X_C}{\pi^2}} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \cdot \frac{3 \cdot 0,062^2 \cdot 0,597}{0,062 + 0,292} - \frac{9 \cdot 0,062}{\pi^2}} = 0,013$$

6. Коефіцієнт несинусоїдальності на секції 110 кВ:

а) для 6-ти фазної схеми з'єднання:

$$K_{HCT12} = K_{HCT1} \cdot \frac{X_{СИСТ}}{X_{СИСТ} + X_C} = 0,016 \cdot \frac{0,013}{0,013 + 0,062} = 2,766 \cdot 10^{-3}$$

б) для 12-ти фазної схеми з'єднання:

$$K_{HCT22} = K_{HCT2} \cdot \frac{X_{СИСТ}}{X_{СИСТ} + X_C} = 0,013 \cdot \frac{0,013}{0,013 + 0,062} = 2,108 \cdot 10^{-3}$$

Задача 6.3

Обрати фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКП) для підстанції цеху електролізу. Вихідні дані: потужність короткого замикання на шинах підстанції S_k становить 217 МВ·А, потужність перетворювача $S_{\Pi} = 17$ МВ·А, кількість пульсів схеми випрямлення $m = 12$. Напруга на шинах підстанції $U_{\text{ном}} = 10$ кВ. Оптимальне значення реактивної потужності компенсуючого пристрою Q_0 складає 3000 кВАр. Відносне значення напруги гармонік $U_{11*} = 5,4\%$, $U_{13*} = 4,1\%$. Коефіцієнт викривлення синусоїдальності форми кривої напруги $k_{\text{нс}}$ дорівнює 7%. Номінальна напруга конденсаторів – 6,6 кВ.

Методичні вказівки

В системах електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами встановлюються ФКП кількість та частота настроювання котрих залежить від кількості пульсів випрямлення та відносного значення потужності батареї конденсаторів (БК) ФКП.

$$k_p = \frac{Q_p}{S_k}, \text{ де } Q_p - \text{потужність БК, якими комплектуються ФКП.}$$

При $k_p \leq 2 \cdot 10^{-2}$ та шестипульсних схемах випрямлення можливо встановлення ФКП 5-ї та 7-ї гармонік. Якщо при цьому не забезпечується зниження коефіцієнту викривлення форми кривої напруги потребується встановлення ФКП ще й на 11-у гармоніку. При $k_p \leq 2,5 \cdot 10^{-2}$ достатньо встановити тільки ФКП 5-ї гармоніки.

В мережах з 12-пульсними перетворювачами встановлюються ФКП 11-ї гармоніки. В деяких випадках можуть використатись ненастроєні ФКП (НФКП) – ФКП на частоту 7...9 гармоніки або подрібненої частоти.

Потужність БК ФКП приймається: $Q_p = Q_0$, кВАр.

$$\text{Струм вищих гармонік перетворювача } I_v = \frac{S_p}{\sqrt{3} U_{ш} \nu}, \text{ А.}$$

Доля струму гармоніки з номером v_q , яка проходить через ФКП або НФКП v_p -ї гармоніки ($q > p$) при наявності одного ФКП $\sigma_{vq*} = \frac{1}{\frac{1}{k_p v_p^2} (1 - v_{q*}^2) + 1}$, де $v_{q*} = \frac{v_p}{v_q}$,

для $q = p$ приймається $\sigma_{vq*} = 1$.

Для двох ФКУ або НФКП $\sigma_{vq*}^{(1\phi)} = \frac{1}{\frac{1}{k_{p1} v_{p1}^2} (1 - v_{q1*}^2) + \frac{k_{p2} v_{p2}^2 (1 - v_{q1*}^2)}{k_{p1} v_{p1}^2 (1 - v_{q2*}^2)} + 1}$;

$$\sigma_{vq*}^{(2\phi)} = \frac{1}{\frac{1}{k_{p2} v_{p2}^2} (1 - v_{q2*}^2) + \frac{k_{p1} v_{p1}^2 (1 - v_{q2*}^2)}{k_{p2} v_{p2}^2 (1 - v_{q1*}^2)} + 1},$$

де $v_{q1*} = \frac{v_{p1}}{v_q}$; $v_{q2*} = \frac{v_{p2}}{v_q}$; $k_{p1} = \frac{Q_{p1}}{S_k}$; $k_{p2} = \frac{Q_{p2}}{S_k}$.

При використанні ФКУ або НФКУ спільно з окремою КБ

$$\sigma_{vq*} = \frac{1}{\frac{1}{k_p v_p^2} (1 - v_{q*}^2) + \frac{k_{\delta}}{k_p} \left(1 - \frac{1}{v_{q*}^2}\right)^2 + 1}; \quad \sigma_{vq*}^{(\delta)} = \frac{1}{1 - \frac{k_p (2v_{q*}^2 - v_{q*}^4)}{k_{\delta} (1 - v_{q*}^2)}},$$

де $k_{\delta} = \frac{Q_{\delta}}{S_k}$.

Відносне значення напруги вищих гармонік при встановленні ФКП $U_{v*}^{(p)} = U_{v*} (1 - \sigma_{vq*})$.

Коефіцієнт викривлення синусоїдальності форми кривої напруги після встановлення ФКП $k_{nc} = \sqrt{\sum (U_{v*}^{(p)})^2}$

Якщо потрібна потужність БК ФКП Q_p перевищує оптимальну Q_0 , фільтр треба настроїти на частоту гармоніки порядку $v_p = \frac{Q_0}{Q_p}$

Обрана БК ФКП повинна задовольняти співвідношенню відсутності перевантаження струмом гармонік $Q_p \geq 1,2 \cdot k_c \cdot U_{ном} I_{v\Sigma}$, де $k_c = \sqrt{3}$ або 3 при з'єднанні конденсаторів відповідно у зірку або трикутник; $U_{ном}$ – номінальна напруга мережі; $I_{v\Sigma}^{(p)} = \sqrt{\sum (I_v \sigma_{vq*})^2}$.

Перевірка БК на відсутність перевантаження по потужності та за напругою: $k k_q a_p k_u \leq \sqrt{1 - \frac{0,7}{v_p}}$, де $k_q = 1 + k_p$; $a_p = \frac{v_p^2}{v_p^2 - 1}$; $k_u = \frac{U_m}{U_{н.р}}$; U_m – найбільша лінійна напруга, яка можлива в експлуатації на шинах підстанції ($U_m = 1,05 U_{ном}$); $U_{н.р}$ – номінальна лінійна напруга БК.

Рішення

1. Потужність БК ФКП $Q_p = Q_0$

$$k_p = \frac{Q_p}{S_k \cdot 10^3} = \frac{3000}{217 \cdot 10^3} = 0,014$$

2. Так, як $k_p \leq 2 \cdot 10^{-2}$, то при шестипульсних схемах випрямлення можливо встановлення ФКП 5-ї та 7-ї гармонік. Якщо при цьому не забезпечується зниження коефіцієнту викривлення форми кривої напруги потребується встановлення ФКП ще й на 11-у гармоніку. Для шестипульсної схеми $v = 5, 7, (11)$. В мережах з 12-пульсними перетворювачами встановлюються ФКП 11-ї гармоніки, тому:

$$v_p = 11 \quad v_q = 13;$$

3. Струм вищих гармонік перетворювача:

$$I_{v1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_m \cdot v_p} = \frac{17}{\sqrt{3} \cdot 1,05 \cdot 10 \cdot 11} = 84,978 \text{ А.}$$

$$I_{v2} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_m \cdot v_q} = \frac{17}{\sqrt{3} \cdot 1,05 \cdot 10 \cdot 13} = 71,904 \text{ А.}$$

$$\text{де } v_{q*} = \frac{v_p}{v_q} = \frac{11}{13} = 0,846; \quad k_p = 0,014.$$

Приймаємо конденсатори типу КС-75-6,3 ; схема з'єднання – зірка.

4. Знайдемо частку струму 13-ї гармоніки, який проходить через ФКП, за формулою:

$$\sigma_{vq*} = \frac{1}{\frac{1}{k_p \cdot v_p^2} (1 - v_{q*}^2) + 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,014 \cdot 11^2} (1 - 0,846^2) + 1} = 0,855$$

5. Струм гармонік у ланцюзі БК:

$$I_{v\Sigma} = \sqrt{I_{v1}^2 + (I_{v2} \cdot \sigma_{vq*})^2} = \sqrt{84,978^2 + (71,904 \cdot 0,855)^2} = 104,879 \text{ А.}$$

6. Потужність БК-фільтра на 3 фази:

$$Q_{p1} = 1,2 \cdot K_c \cdot U_{\text{БК}} \cdot I_{v\Sigma} = 1,2 \cdot 3 \cdot 6,3 \cdot 104,879 = 2379 \text{ кВАр} \leq 3000 \text{ кВАр},$$

де $U_{\text{БК}}$ – номінальна напруга на БК; $I_{v\Sigma}$ – діюче значення гармонік струму, який проходить через ФКП; $K_c = \sqrt{3}$ - при з'єднанні конденсаторів у трикутник; $K_c = 3$ - при з'єднанні конденсаторів у зірку. Це підтверджує допустимість встановленої потужності БК $Q_p = 3000$ кВАр.

7. Перевіримо БК на відсутність перевантаження по потужності та перевищення напруги:

$$\frac{10,5 \cdot U_n}{K_c \cdot U_{\text{БК}}} \cdot \frac{v_p^2}{v_p^2 - 1} = \frac{10,5 \cdot 10}{\sqrt{3} \cdot 6,3} \cdot \frac{11^2}{11^2 - 1} = 0,97 < 1,$$

що підтверджує вірність вибору по вказаним параметрам.

8. Знайдемо опір фази реакторів:

$$X_p = \frac{3 \cdot U_{\text{БК}}^2}{v_p^2 \cdot Q_p} = \frac{3 \cdot 6,3^2 \cdot 1000}{11^2 \cdot 3000} = 0,328 \text{ Ом.}$$

9. Після встановлення обраного фільтра остаточна напруга гармонік:

$$\Delta U_{11*} = 0; \quad \Delta U_{13*} = U_{13*} \cdot (1 - \sigma_{vq*}) = 4,1 \cdot (1 - 0,855) = 0,595 \%$$

11. При встановленні ФКП 11-ї та 13-ї гармонік потужність БК-фільтра:

$$Q_{p2} = 3 \cdot K_c \cdot U_{\text{ок}} \cdot (I_{v1} + I_{v2}) = 3 \cdot 1,2 \cdot 6,3 \cdot (84,978 + 71,904) = 3558 \text{ кВАр} > 3000 \text{ кВАр}$$

буде значно більше ніж повинно бути для покриття дефіциту реактивної потужності.

12. ФКП 12-ї гармоніки при $K_p = 0,014$ буде завантажено струмами 11-ї та 13-ї гармонік:

$$\sigma_{11} = \frac{1}{\frac{1}{k_p \cdot v_{12}^2} \left(1 - \left(\frac{v_{12}}{v_p} \right)^2 \right) + 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,014 \cdot 12^2} \left(1 - \left(\frac{12}{11} \right)^2 \right) + 1} = 1,106$$

$$\sigma_{13} = \frac{1}{\frac{1}{k_p \cdot v_{12}^2} \left(1 - \left(\frac{v_{12}}{v_q} \right)^2 \right) + 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,014 \cdot 12^2} \left(1 - \left(\frac{12}{13} \right)^2 \right) + 1} = 0,931$$

13. Струм гармонік через фільтр дорівнює:

$$I_{v\Sigma} = \sqrt{(I_{v1} \cdot \sigma_{11})^2 + (I_{v2} \cdot \sigma_{12})^2} = \sqrt{(84,978 \cdot 1,106)^2 + (71,904 \cdot 0,931)^2} = 115,352 \text{ А.}$$

14. Потужність батарей фільтра:

$$Q_{p3} = 3 \cdot K_c \cdot U_{\text{ок}} \cdot I_{v\Sigma} = 3 \cdot 1,2 \cdot 6,3 \cdot 115,352 = 2616 \text{ кВАр} < 3000 \text{ кВАр},$$

Таким чином, також можливо встановити ФКП, налаштованого на частоту 12-ї гармоніки.

15. Залишкова напруга гармонік та коефіцієнт викривлення синусоїдальності:

$$\Delta U_{11*} = U_{11*} \cdot (1 - \sigma_{11}) = 5,4 \cdot (1 - 1,106) = -0,57 \%$$

$$\Delta U_{13*} = U_{13*} \cdot (1 - \sigma_{13}) = 4,1 \cdot (1 - 0,931) = 0,284 \%$$

$$k_{nc} = \sqrt{\Delta U_{11*}^2 + \Delta U_{13*}^2} = \sqrt{(-0,57)^2 + 0,284^2} = 0,637 \%$$

Задача 6.4

Для вузла з несиметричним навантаженням визначити коефіцієнт несиметричності напруги по зворотній послідовності та при необхідності вибрати симетруючий пристрій.

Вихідні дані: однофазна установка індукційного нагріву потужністю $S_{н.о} = 2400 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ з природним коефіцієнтом потужності $\cos \phi_{н.о} = 0,46$ підключена до мережі 6 кВ цеху, який живиться від районної підстанції енергосистеми. Додатково від цієї ж мережі живиться трифазне симетричне навантаження загальною потужністю $S_n = 5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ при $\cos \phi_{н.с} = 0,77$. Потужність КЗ у вузлі підключення $S_k = 150 \text{ МВ} \cdot \text{А}$

Методичні вказівки

Активна та реактивна складова навантаження:

– однофазного $P_{н.о} = S_{н.о} \cos \phi_{н.о}$ $Q_{н.о} = P_{н.о} \tan \phi_{н.о}$

– симетричного $P_{н.с} = S_{н.с} \cos \phi_{н.с}$ $Q_{н.с} = P_{н.с} \tan \phi_{н.с}$

– симетричного, яке приходить на одну фазу

$$P_\phi = \frac{P_{н.с}}{3}; \quad Q_\phi = \frac{Q_{н.с}}{3}; \quad S = \sqrt{P_\phi^2 + Q_\phi^2}.$$

Коефіцієнт несиметричності напруги по зворотній послідовності при наявності симетричних та несиметричних навантажень розраховується по спрощеній формулі, виходячи з того, що однофазне навантаження підключено

до фаз В та С. Значення коефіцієнту не повинно перевищувати нормально допустимого значення $\varepsilon_{\text{доп}} = 2\%$

$$\varepsilon = \frac{(1 + \delta u) \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{S_k} 100\% \leq \varepsilon_{\text{доп}} = 2\%,$$

де δu – відхилення напруги у вузлі навантаження;

$$\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}(P_{AB} - P_{CA}) - \frac{1}{2}(Q_{AB} + Q_{CA}) + Q_{BC}; \quad \beta = -\frac{1}{2}(P_{AB} + P_{CA}) - \frac{\sqrt{3}}{2}(Q_{AB} - Q_{CA}) + Q_{BC}.$$

Коефіцієнт несиметричності при наявності тільки несиметричного навантаження та при відсутності відхилення напруги у вузлі навантаження може бути обчислювано за спрощеним виразом: $\varepsilon \approx \frac{S_{н.о}}{S_k} 100\%$,

Навантаження між двома сусідніми фазами при змішаному навантаженні

$$\begin{aligned} P_{AB} &= P_{CA} = P_{\phi}; & P_{BC} &= P_{\phi} + P_{н.о}; \\ Q_{AB} &= Q_{CA} = Q_{\phi}; & Q_{BC} &= Q_{\phi} + Q_{н.о}. \end{aligned}$$

Якщо несиметричних навантажень декілька, то їх підключають таким чином, щоб несиметричність була мінімальною а навантаження між сусідніми фазами повинні враховувати навантаження, які підключені до них. Якщо $\varepsilon > 2\%$ необхідно встановлювати симетруючий пристрій, реактивна потужність якого, як правило, дорівнює потужності, яка потребується по умовам компенсації реактивної потужності у вузлі навантаження $Q_{с.н} = Q_{к.у}$

Значення $Q_{к.у}$ розраховується виходячи з граничного коефіцієнту потужності, який встановлює зону нечутливості. Для промислових та прирівнюваних до них споживачів, залізничного та міського електротранспорту $\text{tg}\varphi_{\Gamma} = 0,25$ [1]

$$Q_{к.у} = P_{\Sigma} \text{tg}\phi_{\varepsilon} - Q_{\Sigma},$$

$$\text{де } P_{\Sigma} = P_{н.о} + P_{н.с}; \quad Q_{\Sigma} = Q_{н.о} + Q_{н.с}.$$

Реактивні потужності елементів симетруючого пристрою

$$Q_{AB} = \frac{1}{3} [\sqrt{3}C - D - Q_{с.н} (1 - A - \sqrt{3}B)]; \quad Q_{BC} = -\frac{1}{3} [2D - Q_{с.н} (1 + 2A)];$$

$$Q_{CA} = \frac{1}{2} [\sqrt{3}C + D + Q_{с.н} (1 - A + \sqrt{3}B)], \text{ де } A = \varepsilon_{\text{доп}} \cos \psi_u / (1 + \delta U_{\text{доп}});$$

$$B = \varepsilon_{\text{доп}} \sin \psi_u / (1 + \delta U_{\text{доп}});$$

$$C = BS_k + S_{AB} \cos(60^\circ - \phi_{AB}) - P_{BC} + S_{CA} \cos(60^\circ + \phi_{CA});$$

$$D = -AS_k + S_{AB} \sin(60^\circ - \phi_{AB}) + Q_{BC} - S_{CA} \sin(60^\circ + \phi_{CA});$$

$$\psi_u = \begin{cases} \arctg \frac{\beta}{\alpha} \text{ npi} & \alpha > 0 \quad \beta > 0; \\ -\arctg \frac{\beta}{\alpha} \text{ npi} & \alpha > 0 \quad \beta < 0; \\ 180^\circ - \arctg \frac{\beta}{\alpha} \text{ npi} & \alpha < 0 \quad \beta > 0; \\ \left(\arctg \frac{\beta}{\alpha} \right) - 180^\circ \text{ npi} & \alpha < 0 \quad \beta < 0; \end{cases};$$

$$\phi_{AB} = \arctg \frac{P_{AB}}{Q_{AB}}; \quad \phi_{CA} = \arctg \frac{P_{CA}}{Q_{CA}}; \quad S_{AB} = \sqrt{P_{AB}^2 + Q_{AB}^2}; \quad S_{CA} = \sqrt{P_{CA}^2 + Q_{CA}^2}.$$

Позитивні значення реактивної потужності елементів симетруючого пристрою означають, що вони мають індуктивний характер, негативні – ємнісний характер.

При правильних розрахунках $Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA} \approx Q_{c,n} = Q_{к,y}$.

Рішення

1. Активна та реактивна складова навантаження:

- однофазного:

$$P_{но} = S_{но} \cdot \cos \varphi_{но} = 2400 \cdot 0,46 = 1104 \text{ кВт}$$

$$Q_{но} = P_{но} \cdot \tg \varphi_{но} = 1104 \cdot 1,93 = 2131 \text{ кВАр}$$

- симетричного:

$$P_{нс} = S_{нс} \cdot \cos \varphi_{нс} = 5000 \cdot 0,77 = 3850 \text{ кВт}$$

$$Q_{нс} = P_{нс} \cdot \tg \varphi_{нс} = 3850 \cdot 0,82 = 3157 \text{ кВАр}$$

- симетричного, яке приходить на одну фазу:

$$P_{\phi} = \frac{P_{нс}}{3} = \frac{3850}{3} = 1283 \text{ кВт}$$

$$Q_{\phi} = \frac{Q_{нс}}{3} = \frac{3157}{3} = 1052 \text{ кВАр}$$

$$S_{\phi} = \sqrt{P_{нс}^2 + Q_{нс}^2} = \sqrt{1283^2 + 1052^2} = 1659,6 \text{ кВА}$$

2. При наявності тільки несиметричного навантаження:

$$\varepsilon = \frac{S_{но}}{S_{к}} = \frac{2400}{150000} = 0,016$$

3. Між двома сусідніми фазами при змішаному навантаженні:

$$P_{ab} = P_{ca} = P_{\phi} = 1283 \text{ кВт}$$

$$Q_{ab} = Q_{ca} = Q_{\phi} = 1052 \text{ кВАр}$$

$$P_{bc} = P_{\phi} + P_{но} = 1283 + 1104 = 2387 \text{ кВт}$$

$$Q_{bc} = Q_{\phi} + Q_{но} = 1052 + 2131 = 3183 \text{ кВАр}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (P_{ab} - P_{ca}) - \frac{1}{2} \cdot (Q_{ab} + Q_{ca}) + Q_{bc} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (1283 - 1283) - \frac{1}{2} \cdot (1052 + 1052) + 3183 = 2131$$

$$\beta = -\frac{1}{2} \cdot (P_{ab} + P_{ca}) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (Q_{ab} - Q_{ca}) + Q_{bc} = -\frac{1}{2} \cdot (1283 + 1283) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (1052 - 1052) + 3183 = 1899$$

$$P_{\Sigma} = P_{но} + P_{нс} = 1104 + 3850 = 4954 \text{ кВт}$$

$$Q_{\Sigma} = Q_{но} + Q_{нс} = 2131 + 3157 = 5288 \text{ кВАр}$$

$$Q_{кy} = P_{\Sigma} \cdot \tg \varphi_2 - Q_{\Sigma} = 4954 \cdot 0,25 - 5288 = 4049 \text{ кВАр}$$

де $\tg \varphi_2$ для промислових та прирівнюваних до них споживачів.

ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ

(подано значення, які треба підставити в умови задач для вирішення свого варіанту)

№ Вар.	Задача №																																	
	1.1		1.2		1.3		2.1		2.2		2.3		2.4		3.1		3.2, 3.3		4.1		4.2		5.1		5.2		6.1		6.2		6.3		6.4	
1	P (кВт)=	15	P (кВт)=	2	m·10 (кг)=	40	μс=	10	m (кг)=	200	f·10 ⁵ (Гн)	80	ε1 =	50	m (т)=	4,0	I _{2n} (кА)=	2,8	U _{xx} (В)=	55	L (км)=	0,2	T ₁ ·10 (К)=	150	f·10 ⁴ (Гн)=	1,0	X _{c1} ·10 ⁻¹ =	2,25	S _{k2} =	1700	S _k ·10 (МВА)=	19	S _{но} ·10 (МВА)	200
2		16		2,5		45		10,5		225		85		55		4,1		3		57		0,3		155		1,5		2,5		1725		20		210
3		17		3,5		50		11		250		90		60		4,2		3,2		59		0,4		160		2,0		2,75		1750		21		220
4		18		4		55		11,5		275		95		65		4,3		3,4		61		0,5		165		2,5		3		1775		22		230
5		19		4,5		60		12		300		105		70		4,4		3,6		63		0,6		170		9,0		3,25		1800		23		250
6		21		5		65		12,5		325		110		75		4,5		3,8		65		0,7		175		3,5		3,5		1825		24		260
7		22		5,5		70		13		375		115		80		4,6		4		67		0,8		180		4,0		3,75		1850		25		270
8		23		6		75		13,5		400		120		85		4,7		4,2		69		0,9		185		4,5		4		1875		26		280
9		24		6,5		85		14		425		125		90		4,8		4,4		71		1,0		190		5,0		4,25		1900		27		290
10		25		7		90		14,5		450		130		95		4,9		4,6		73		1,1		195		5,5		4,5		1925		28		300
11	26	7,5	95	15	475	135	175	5,0	4,8	75	1,2	205	6,0	4,75	1950	29	90																	
12	27	8	100	15,5	500	140	105	5,1	5	77	1,3	210	6,5	5	1975	30	100																	
13	28	8,5	105	16	525	145	110	5,2	5,2	79	1,4	215	7,0	5,25	2025	4,1	110																	
14	29	9	110	16,5	550	150	115	5,3	5,4	81	1,5	220	7,5	5,5	2050	4,2	120																	
15	30	9,5	115	17	575	155	120	5,4	5,8	83	1,6	225	8,0	5,75	2075	4,3	130																	
16	31	10	120	17,5	600	160	125	5,5	6	85	1,7	230	8,5	6	2100	4,4	140																	
17	32	10,5	125	18	150	2	130	5,6	6,2	87	1,8	235	9,5	1,25	2125	4,5	160																	
18	33	11	130	18,5	175	3	135	5,7	6,4	89	1,9	240	10	1,5	2150	4,6	170																	
19	34	11,5	135	19	225	4	140	5,8	6,6	91	2,0	245	1,0	1,75	2175	4,7	180																	
20	35	12	140	19,5	250	5	145	5,9	6,8	93	2,1	250	1,1	2	2200	4,8	190																	
21	36	12,5	145	20	275	6	150	6,9	7	95	2,2	255	1,2	2,25	2225	4,9	200																	
22	37	13	150	20,5	300	7	155	6,1	7,2	97	2,3	260	1,3	2,5	2250	5,0	210																	

ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ (продовження)

(подано значення, які треба підставити в умови задач для вирішення свого варіанту)

№ Вар.	Задача №																													
	1.1	1.2		1.3	2.1	2.2		2.3	2.4		3.1	3.2, 3.3	4.1	4.2		5.1	5.2		6.1	6.2	6.3		6.4							
23	P (кВт)= P (кВт)	38	13,5	v (К/хв)=	5	P (кВт)=	325	E·10³ (В/м)=	8	ε₁ =	160	m (т)=	6,2	U _{xx} (В)=	99	L (км)=	2,4	C (км/с)=	1,4	X _{c2} ·10 ⁻¹ =	2,75	S _{k2} =	2275	U _{11*} (%) =	5,1	S _k (МВА)=	220			
24		39	14		5,5		4,5		350		9		165		6,3		3,1		101		2,5		270		1,6		3	2300	5,2	230
25		40	14,5		6		5,0		375		11		170		6,4		3,2		103		2,6		275		1,7		3,25	2325	5,5	240
26		41	15		6,5		5,5		400		12		210		6,5		3,3		105		2,7		280		1,8		3,5	2350	5,2	250
27		42	15,5		7		6,0		3,75		13		215		6,6		3,4		107		2,8		285		1,9		3,75	2375	5,7	260
28		43	16		7,5		6,5		4,00		14		220		6,7		3,5		109		2,9		290		2,0		4	2400	5,8	270
29		44	16,5		8		7,0		4,25		15		225		6,8		3,6		111		3,0		295		0,7		4,25	2425	5,9	280
30		45	17		8,5		7,5		4,50		16		230		7,0		3,7		113		2,6		300		0,75		4,5	2450	6,0	3,00
31		46	17,5		9		8,0		4,75		17		235		7,1		3,8		0,50		2,5		80		0,8		4,75	2475	6,1	3,25
32		47	18		9,5		8,5		5,00		18		240		7,2		3,9		0,48		2,4		85		0,85		5	2500	6,2	3,50
33	48	18,5	10,5	9,0	5,25	19	245	7,3	4,0	0,46	2,3	90	0,9	5,25	2525	6,3	3,75													
34	49	19	11	9,5	5,50	20	250	7,4	4,1	0,44	2,2	95	0,95	5,25	2550	4,3	4,00													
35	50	19,5	11,5	10,0	5,75	ε =	6	255	7,5	4,3	0,42	2,1	105	1,05	5,5	2575	4,4	4,25												
36	5	20	12	10,5	6,25		7	260	7,6	4,4	0,40	2,0	110	1,15	5,75	2600	4,5	4,50												
37	6	1	12,5	11,0	6,50		8	265	7,7	4,5	0,38	1,9	115	1,2	6	2625	4,6	4,75												
38	7	2	13	11,5	6,75		9	270	7,8	4,6	0,36	1,8	120	1,25	6,25	2650	4,7	5,25												
39	8	3	13,5	12,0	7,00		11	275	7,9	4,7	0,34	1,7	125	1,3	6,5	2675	4,8	5,50												
40	9	4	14	12,5	7,25		9	280	8,0	4,8	0,32	1,6	130	1,35	6,75	2700	4,9	5,75												
41	11	5	14,5	13,0	7,50		8	285	8,1	4,9	0,30	1,5	135	1,4	7	2725	5,0	6,00												
42	12	6	15	13,5	7,75		7	290	8,2	5,0	0,28	1,4	140	1,45	7,25	2750	5,1	6,25												
43	13	7	15,5	14,0	8,00		6	295	8,3	5,1	0,26	1,3	145	1,5	7,5	2775	5,2	6,50												

ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ (закінчення)

(подано значення, які треба підставити в умови задач для вирішення свого варіанту)

№ Вар.	Задача №																																	
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2, 3.3	4.1	4.2	5.1	5.2	6.1	6.2	6.3	6.4																	
44	w (Вт/см ²)	14	ρ (Ом·мм ² /м)=	8	v (К/хВ)=	16	ρ _c ·10 ⁻⁸ (Ом·м)=	14,5	F (м ²)=	8,25	tg(δ)·10 ⁻³ =	11	ε ₂ =	300	m (т)=	8,4	U _{2φ} ·10 (В)=	21	r (Ом)=	0,24	U _к (%)=	5,4	T ₂ ·10 (К)=	150	ρ·10 ³ (кг/м ³)=	1,55	X _{c3} ·10 ⁻¹ =	7,75	S _{k1} =	325	U _{13*} (%)=	5,3	S _н (МВА)=	6,75
45		15		9		16,5		15,0		8,50		4		305		8,5		22		0,22		5,3		155		1,6		8		350		5,4		7,00
46		16		10		17		15,5		8,75		3		310		8,6		23		0,18		5,2		160		1,65		8,25		375		5,5		7,25
47		17		11		17,5		16,0		9,00		2		315		8,7		24		0,16		5,1		165		1,7		8,5		425		5,6		7,50
48		18		12		18		16,5		9,25		1		320		8,8		25		0,14		5,0		170		1,75		8,75		450		5,7		7,75
49	19	13	18,5	17,0	9,50	90	325	8,9	27	0,12	4,9	175	1,8	9	475	5,8	8,00																	
50	20	14	19	17,5	9,75	1,1	330	9,0	28	0,10	4,8	180	1,85	9,25	50	5,9	8,25																	

ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ЕЛЕКТРИЧНІ ПЕЧІ ОПОРУ	3
Задача 1.1	3
Задача 1.2	4
Задача 1.3	6
РОЗДІЛ II. УСТАНОВКИ ІНДУКЦІЙНОГО ТА ДІЕЛЕКТРИЧНОГО НАГРІВУ	8
Задача 2.1	8
Задача 2.2	9
Задача 2.3	11
Задача 2.4	12
Задача 2.5	13
РОЗДІЛ III. ДУГОВІ ЕЛЕКТРОПЕЧІ	14
Задача 3.1	14
Задача 3.2	16
Задача 3.3	18
РОЗДІЛ IV. УСТАНОВКИ ДУГОВОГО ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ	21
Задача 4.1	21
Задача 4.2	23
РОЗДІЛ V. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ТА УЛЬТРАЗВУКОВА ОБРОБКА	26
Задача 5.1	26
Задача 5.2	27
РОЗДІЛ VI. ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	28
Задача 6.1	28
Задача 6.2	33
Задача 6.3	35
Задача 6.4	38
ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ	41
ЗМІСТ	44

Упорядники:
Випанасенко Станіслав Іванович
Посмітюха Дмитро Олександрович
Бобров Олексій Володимирович
Дибрін Сергій Володимирович

Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи
з дисципліни
„СПОЖИВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ”
для студентів спеціальностей
7.000008 „ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ” та
7.090603 „ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ”

Друкується в редакції упорядників

Підписано до друку _____.06. Формат 30х42/4.
Папір Pollux. Ризографія. Умовн.-друк. арк. ____.
Обліково-видавн. арк. _____. Тираж ____ прим.
Зам. № _____.

НГУ
49600 м. Дніпропетровськ–27, просп. К. Маркса, 19.