

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет
автоматики та енергетики

Кафедра
електротехнічних
систем та енергетичного
менеджменту

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

*методичні рекомендації до виконання практичних робіт
для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі
спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка" (освітні програми "Електротехнічні
системи електроспоживання" та "Енергетичний
менеджмент")*

Кропивницький
2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет
автоматики та енергетики

Кафедра
електротехнічних
систем та енергетичного
менеджменту

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

*методичні рекомендації до виконання практичних робіт
для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі
спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка" (освітні програми "Електротехнічні
системи електроспоживання" та "Енергетичний
менеджмент")*

Затверджено
на засіданні кафедри
електротехнічних систем та
енергетичного менеджменту
Протокол № 3 від 16.09.2021 р.

Кропивницький
2021

Енергозберігаючі режими електропостачання: методичні рекомендації до виконання практичних робіт для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" (освітні програми "Електротехнічні системи електроспоживання" та "Енергетичний менеджмент") / [уклад.: К.Г. Петрова], Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2021. – 50 с.

Укладачі: К.Г. Петрова – доц., к.т.н., доц. каф. ЕТС та ЕМ

Рецензент: С. В.Серебренніков – к.т.н., проф.каф. ЕТС та ЕМ ЦНТУ

© Петрова К.Г., 2021
© Центральноукраїнський
національний технічний університет,
2021

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ	7
Практичне заняття № 1. Визначення зменшення втрат електричної енергії за рахунок вирівнювання графіка електричного навантаження.....	8
Практичне заняття № 2. Визначення економічно доцільного режиму роботи групи трансформаторів.....	11
Практичне заняття № 3. Вивчення методів заощадження електричної енергії шляхом компенсації реактивної потужності	15
Практичне заняття № 4. Оцінювання рентабельності заміни недовантажених асинхронних двигунів	25
Практичне заняття № 5. Заощадження електричної енергії за рахунок перемикання обмоток статора за схемою «трикутник» - «зірка».....	30
Практичне заняття № 6. Вивчення методів заощадження електричної енергії в дугових сталеплавильних печах	36
Практичне заняття № 7. Вивчення методів заощадження електричної енергії в печах опору	41
КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ	48
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	49

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АД	– асинхронний двигун
ГЕН	– графік електричних навантажень
ДСП	– дугові сталеплавильні печі
ЕЕ	– електрична енергія
ККД	– коефіцієнт корисної дії
ЛЕП	– лінія електропередач
СД	– синхронний двигун
ОЕС	– об'єднана енергосистема
ТЕС	– теплова електрична станція
ТЕЦ	– теплоелектроцентраль
ТП	– трансформаторна підстанція

ВСТУП

Згідно з навчальними планами та робочою програмою курсу «Енергозберігаючі режими електропостачання» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітні програми "Електротехнічні системи електроспоживання" та "Енергетичний менеджмент") денної форми навчання передбачено практичні заняття загальною кількістю 14 год.

У методичних рекомендаціях наведено сім практичних робіт, кожна з яких має: теоретичну частину, детальне викладення типових прикладів розв'язування задач, що забезпечує теоретичну та методичну основу для подальшого самостійного вирішення поставлених завдань та безпосередньо завдання для самостійного виконання згідно варіанту.

Метою виконання практичних завдань є закріплення та поглиблення теоретичних знань, отриманих здобувачами вищої освіти на лекційних заняттях з дисципліни «Енергозберігаючі режими електропостачання», а також набуття практичних навичок, зокрема, в таких питаннях як:

- визначення зменшення втрат електричної енергії за рахунок вирівнювання графіка електричного навантаження;
- визначення економічно доцільного режиму роботи групи трансформаторів;
- вивчення методів заощадження електричної енергії шляхом компенсації реактивної потужності;
- оцінювання рентабельності заміни недовантажених асинхронних двигунів;
- заощадження електричної енергії за рахунок перемикання обмоток статора за схемою «трикутник» - «зірка»;
- вивчення методів заощадження електричної енергії в дугових сталеплавильних печах;
- вивчення методів заощадження електричної енергії в печах опору.

ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ ТА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ

Зміст звітів з практичних робіт полягає в тому, що здобувачі вищої освіти на підставі наданих їм індивідуальних вихідних даних повинні виконати необхідні розрахунки практичних завдань.

Звіти з практичних робіт повинні мати:

- титульний аркуш;
- зміст;
- вступ (короткі теоретичні відомості);
- основну частину (завдання та його результати його виконання);
- висновки;
- список літератури (перелік посилань);
- додатки (за необхідності).

Приклад оформлення *титульного аркуша* наведено у додатку А.

У *вступі* доцільно навести короткі теоретичні відомості проблеми/питання, яке розглянуто у практичному завданні.

Основна частина містить виконання завдання згідно варіанту з необхідними розрахунками, поясненнями, графіками та обґрунтуванням прийнятих рішень.

У *висновках* повинні бути відображені підсумки виконання роботи.

Вимоги до оформлення. Звіт з практичної роботи друкують за допомогою ПК та принтера на одній сторінці аркуша білого паперу формату А4 (210х297мм). Обсяг роботи повинен становити до 10 сторінок.

Параметри друку звіту: міжрядковий інтервал - 1,0; шрифт – Times New Roman 13-14 пт; розмір абзацного відступу – 1,25-1,27 см; відступи: лівий – 25 мм, правий – 10 мм, верхній – 20 мм, нижній – 20 мм; кількість знаків у рядку – 70-80; рядків на сторінці – не більше 40.

Практичне заняття № 1. Визначення зменшення втрат електричної енергії за рахунок вирівнювання графіка електричного навантаження

Мета роботи: навчитись порівнювати рівень втрат електричної енергії в мережі за різних конфігурацій форми графіка електричного навантаження.

Теоретичні відомості

Однією з нагальних проблем електроенергетики України є нерівномірність електроспоживання впродовж доби. Характерною особливістю добового графіка електричного навантаження об'єднаної енергосистеми (ОЕС) є наявність двох піків – ранкового та вечірнього, а також зниження навантаження на 15 – 30 % у нічні години. Нерівномірність ГЕН ускладнює перманентне забезпечення балансу електроенергії та призводить до погіршення режимів роботи як ОЕС загалом, так і її складових (наприклад, обласних енергокомпаній). Розбалансування енергосистеми України внаслідок дефіциту палива та перебоїв з його транспортуванням, аварійних ситуацій на атомних електричних станціях призводить до введення в дію періодичних аварійних та «віялових» відімкнень споживачів, що спричиняє пошкодження виробничого устаткування, масове бракування продукції та значні економічні збитки від вимушених простоїв тощо.

За умов превалюючого розвитку базової атомної енергетики, дефіциту пікових потужностей високоманеврових ГЕС, високої вартості палива, що помітно обмежує можливості використання маневрового обладнання на основі потужних газомазутних енергоблоків ТЕС і ТЕЦ, обмежених статичних та динамічних показників маневровості ТЕС на твердому паливі, генерувальні потужності не спроможні в короткостроковому періоді адекватно реагувати на значні коливання попиту в часі. Вочевидь, безальтернативним є залучення споживачів електричної енергії до вирівнювання й стабілізації ГЕН.

Підтримання електроенергетичного балансу можна досягти нарощуванням високоманеврових генерувальних потужностей, об'єднанням енергосистем (обмін потоками електроенергії в різних часових зонах), корегуванням сезонного відліку часу, акумулюванням енергії (теплоакумулятори, електролізні установки тощо) або ж цілеспрямованим управлінням режимом електроспоживання в часі, що на сьогодні є раціональнішим.

До основних негативних наслідків, спричинених нерівномірністю графіка електричних навантажень у часі, потрібно зарахувати:

- перевитрати палива на генерувальних станціях у години пікових навантажень;
- вимкнення частини генерувальних станцій у разі спадів навантаження;
- зростання екологічно шкідливих викидів;
- погіршення умов експлуатації обладнання (зношення агрегатів, зростання витрат на їх ремонт тощо);

– погіршення показників якості електричної енергії та надійності електропостачання;

– збільшення втрат електричної енергії в електричних мережах тощо.

Водночас, вирівнювання добового графіка електричного навантаження дозволить отримати ряд позитивних ефектів (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Позитивні ефекти від вирівнювання графіка електричного навантаження

Об'єднана енергосистема	Енергопостачальні компанії	Споживачі	Суспільство
<ul style="list-style-type: none"> - зменшення ризику аварійних ситуацій; - підвищення коефіцієнта корисної дії електростанцій; - зменшення зношування основних енергогенеруючих фондів 	<ul style="list-style-type: none"> - зменшення витрат на купівлю електроенергії на оптовому ринку; - зменшення втрат електроенергії в лініях електропередачі 	<ul style="list-style-type: none"> - зниження тарифів та витрат на оплату електроенергії; - підвищення надійності електрозабезпечення; - покращення якості електроенергії 	<ul style="list-style-type: none"> - заощадження енергоресурсів; - покращення стану екології; - зменшення ступеня енергетичної залежності

До вирівнювання графіка електричного навантаження прагнуть насамперед виробники електричної енергії, натомість, споживачі більш за все зацікавлені у економії плати за неї. Для досягнення сукупності цих результатів введено в дію диференційовані у часі тарифи, які покликані спонукати до перерозподілу навантажень із зон піку та напівпіку – до нічної зони.

Вирівнювання графіка навантажень призводить до зміни коефіцієнта форми графіка, з огляду на значення якого можна визначити зниження втрат електричної енергії в лінії електропередачі:

$$\delta W = \Delta W_1 \cdot \left(1 - \frac{K_{\phi 2}^2}{K_{\phi 1}^2} \right), \quad (1.1)$$

де ΔW_1 – втрати енергії в мережі за початкового коефіцієнта форми $K_{\phi 1}$; $K_{\phi 2}$ – коефіцієнт форми графіка навантажень після його вирівнювання.

Коефіцієнт форми можна визначити із виразу:

$$K_{\phi} = \frac{1090}{T_{МАКС}} + 0,876, \quad (1.2)$$

де $T_{МАКС}$ – час використання максимального навантаження, год/рік.

Завдання:

Визначити, як зменшаться втрати електричної енергії в лінії за рахунок вирівнювання графіка електричних навантажень. Вирівнювання призвело до збільшення кількості годин використання максимальних навантажень зі значення $T_{МАКС1}$ до $T_{МАКС2}$. Втрати в лінії до вирівнювання графіка навантажень становлять ΔW_1 . Вихідні дані до розрахунків наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2. – Вихідні дані до розрахунків

№ з/п	$T_{МАКС1}$	$T_{МАКС2}$	ΔW_1 , тис. кВт·год
1	6200	6400	100
2	4200	4900	125
3	7100	7800	130
4	3770	4100	115
5	4345	4600	160
6	4140	4800	150
7	5300	5600	120
8	5320	5650	170
9	4860	5300	135
10	3080	3120	140

Приклад: Визначити, як зменшились втрати електричної енергії в лінії за рахунок вирівнювання графіка електричних навантажень. Вирівнювання призвело до збільшення кількості годин використання максимальних навантажень з 4000 до 4500. Втрати в лінії до вирівнювання графіка навантажень становлять 200 тис. кВт·год.

Розв'язок. 1) Визначаємо відношення квадратів коефіцієнтів форми до та після вирівнювання ГЕН:

$$\frac{K_{\phi 2}^2}{K_{\phi 1}^2} = \frac{\left(\frac{1090}{4500} + 0,876\right)^2}{\left(\frac{1090}{4000} + 0,876\right)^2} = 0,948.$$

2) Розраховуємо зменшення втрат електричної енергії за виразом (1.2):

$$\Delta W = 200 \cdot (1 - 0,948) = 10,4 \text{ тис. кВт}\cdot\text{год.}$$

Отже, втрати в лінії після вирівнювання ГЕН зменшилися на 10,4 тис. кВт·год.

Контрольні запитання:

1. Назвіть негативні наслідки, обумовлені нерівномірністю графіка електричного навантаження.
2. Назвіть позитивні ефекти від вирівнювання графіка електричного навантаження.
3. Наведіть вираз для визначення значення втрат електричної енергії в лінії за рахунок вирівнювання ГЕН.
4. За рахунок чого можна досягти зменшення втрат у разі вирівнювання графіка електричних навантажень мережі?
5. Охарактеризуйте поняття втрат активної та реактивної потужності.

Література: [1, с. 31–39; 4, с. 16–21; 6, с. 93–94; 7, с. 70–76; 9, с. 55–64].

Практичне заняття № 2. Визначення економічно доцільного режиму роботи групи трансформаторів

Мета роботи: вивчення засобів мінімізації втрат електричної енергії під час роботи групи трансформаторів.

Теоретичні відомості

Якщо на ТП є декілька трансформаторів доцільно визначити їх спільний економічно доцільний режим роботи. Такому режиму відповідає мінімум втрат електричної енергії в трансформаторах. Для підстанцій з двома трансформаторами коефіцієнт завантаження має бути на рівні 0,7–0,75 для максимального завантаження підстанції.

Втрати електричної енергії в трансформаторах можна мінімізувати за рахунок правильного вибору потужності та забезпечення раціонального режиму їхньої роботи на ТП. Крім того, можливе зменшення втрат електричної енергії шляхом усунення неробочого ходу трансформаторів у випадку малих навантажень (наприклад, для цехових трансформаторних підстанцій одно- чи двозмінних промислових підприємств). Необхідно також враховувати додаткові втрати

активної потужності, що виникають у системі електропостачання внаслідок передавання реактивної потужності.

Криві зведених втрат потужності із урахуванням втрат у системі електропостачання залежно від значення потужності навантаження S_H зображено на рис. 2.1. Крива 1 – залежність у випадку роботи першого трансформатора, крива 2 – другого трансформатора. У разі паралельної роботи двох трансформаторів різної потужності зведені втрати потужності залежно від навантаження визначаються кривою 3.

Розрахункова потужність, за якої доцільно здійснювати вимкнення (увімкнення) трансформаторів, можна знайти як графічно, так й аналітично. Якщо значення навантажень менші за S_{H1} – доцільніше залишити в роботі один трансформатор, втрати в якому відповідають кривій 1.

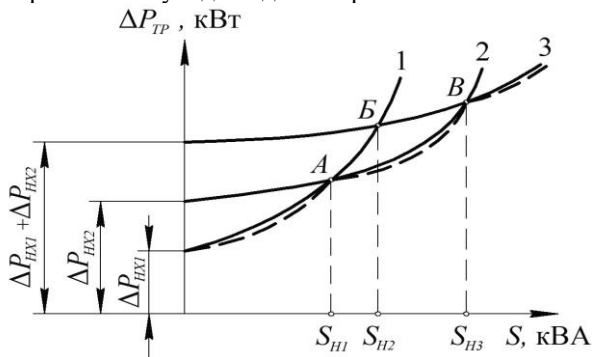


Рисунок 2.1 – Втрати в трансформаторах за різних значень навантажень

Якщо навантаження зростає до значення S_{H3} – раціональніше використовувати другий трансформатор (крива 2). Збільшення навантаження понад S_{H3} вимагає одночасної роботи двох встановлених трансформаторів.

Розрахункова потужність, за якої втрати в n однакових трансформаторах дорівнюють втратам у $(n-1)$ трансформаторах визначають за виразом:

$$S_{PO3I} = S_{HOM} \cdot \sqrt{n \cdot (n-1) \cdot \frac{\Delta P'_{HX}}{\Delta P'_{K3}}}, \quad (2.1)$$

де $\Delta P'_{HX}$, $\Delta P'_{K3}$ – зведені втрати потужності неробочого ходу та короткого замикання трансформатора, кВт.

Зі збереженням достатнього рівня точності у виразі (2.1) можна використовувати втрати потужності неробочого ходу та короткого замикання без урахування коефіцієнта підвищення втрат k_E .

Значення навантаження, за якого потрібно залишити в роботі $(n+1)$ трансформаторів визначають за виразом:

$$S_{PO3} \geq S_{НОМ} \cdot \sqrt{\frac{n+1}{n}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P'_{HX}}{\Delta P'_{K3}}} . \quad (2.2)$$

Значення навантаження, за якого доцільно вимкнути один трансформатор:

$$S_{PO3} \leq S_{НОМ} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P'_{HX}}{\Delta P'_{K3}}} . \quad (2.3)$$

Вираз для визначення зведених втрат потужності набуде вигляду:

$$\Delta P'_{TP} = \Delta P'_{HX} + \frac{\Delta P'_{K3}}{S_{TP}^2} \cdot S_{PO3}^2 . \quad (2.4)$$

Для спрощення розрахунків замінимо $\Delta P'_{HX} = a$, $\frac{\Delta P'_{K3}}{S_{TP}^2} = b$.

Тоді вираз (2.4) набуває вигляду:

$$\Delta P'_{TP} = a + b \cdot S_{PO3}^2 . \quad (2.5)$$

Визначимо розрахункову потужність S_{PO3} , за якої значення втрат в одному трансформаторі дорівнює втратам у двох однакових трансформаторах у випадку їх паралельної роботи:

$$a + b \cdot S_{PO3}^2 = 2 \cdot a + 2 \cdot b \cdot \frac{S_{PO3}^2}{4} . \quad (2.6)$$

Із цього виразу розрахункова потужність становить:

$$S_{PO3} = \sqrt{\frac{2 \cdot a}{b}} . \quad (2.7)$$

Залежність зведених втрат активної потужності в силових трансформаторах у разі роботи одного або паралельної роботи двох трансформаторів графічно зображено на рис. 2.2.

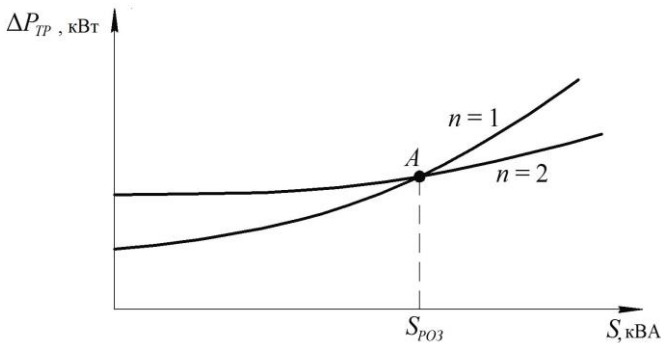


Рисунок 2.2 – Залежність зведених втрат активної потужності в силових трансформаторах у разі роботи одного та паралельної роботи двох трансформаторів однакової потужності

Завдання:

Визначити економічно доцільний режим роботи двох трансформаторів у ТП, параметри яких наведено в табл.2.1.

Таблиця 2.1. – Вихідні дані до розрахунків

№ з/п	ΔP_{HX} , кВт	ΔP_{K3} , кВт	U_{K3} , %	I_{HX} , %	$S_{НОМ}$, МВА	k_E , кВт/квар
1	0,5	1,9	6,5	2,6	0,1	0,05
2	0,7	2,6	6,5	2,4	0,16	0,05
3	1,0	3,7	6,5	2,3	0,25	0,05
4	1,9	7,6	6,5	2,0	0,4	0,05
5	2,7	11,6	6,5	1,5	0,63	0,05
6	3,6	16,5	6,5	1,4	1,0	0,05
7	5,1	23,5	6,5	1,1	1,6	0,05
8	5,1	23,5	6,5	1,1	2,5	0,05
9	6,7	33,5	7,5	1,0	4,0	0,05
10	9,2	46,5	7,5	0,9	6,3	0,05

Приклад: У цеховій підстанції встановлено два трансформатори типу ТМ–2500/10 із паспортними даними: $\Delta P_{HX} = 4,6$ кВт, $\Delta P_{K3} = 25$ кВт, $U_{K3} = 5,5$ %, $I_{HX} = 1,0$ %, $S_{НОМ} = 2500$ кВА. Визначити економічно доцільний режим роботи двох трансформаторів.

Розв'язок: 1) Розраховуємо значення реактивних втрат неробочого ходу

$$\Delta Q_{HX} = \frac{S_{НОМ} \cdot I_{HX}}{100} \text{ та короткого замикання } \Delta Q_{K3} = S_{НОМ} \cdot \frac{U_{K3}}{100} :$$

$$\Delta Q_{HX} = \frac{2500 \cdot 1}{100} = 25 \text{ квар; } \Delta Q_{K3} = 2500 \cdot \frac{5,5}{100} = 137,5 \text{ квар.}$$

2) Визначаємо втрати в трансформаторі, приймаючи значення коефіцієнта підвищення втрат $k_E = 0,05$ кВт/квар:

$$\Delta P'_{HX} = 4,6 + 0,05 \cdot 25 = 5,85 \text{ кВт;}$$

$$\Delta P_{K3} = 25 + 0,05 \cdot 137,5 = 31,875 \text{ кВт.}$$

3) Розраховуємо навантаження працюючого трансформатора ($n-1$), за якого доцільно долучати другий трансформатор, за виразом (2.2):

$$S_{PO3} \geq 2500 \cdot \sqrt{\frac{1+1}{1}} \cdot \sqrt{\frac{5,85}{31,875}} = 1515 \text{ кВА.}$$

Розраховуємо навантаження працюючих трансформаторів ($n = 2$), за якого доцільно вимкнути другий трансформатор, за виразом (2.3):

$$S_{PO3} \leq 2500 \cdot \sqrt{\frac{2-1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{5,85}{31,875}} = 1071 \text{ кВА.}$$

Контрольні запитання:

1. Як виконують розрахунок втрат електричної потужності та енергії в трансформаторах?
2. Охарактеризуйте поняття втрат активної та реактивної потужностей.
3. Чим спричинені втрати активної (реактивної) потужності в трансформаторі? За рахунок яких заходів можна мінімізувати втрати електричної енергії в трансформаторах?
4. Дайте визначення змісту коефіцієнта підвищення втрат активної потужності.
5. Умова вибору оптимального режиму роботи групи трансформаторів.

Література: [1, с. 61–80; 6, с. 94–96; 9, с. 38–48; 10, с. 24–31; 11, с. 258–262].

Практичне заняття № 3. Вивчення методів заощадження електричної енергії шляхом компенсації реактивної потужності

Мета роботи: вивчення методів компенсації реактивної потужності технологічних установок.

Теоретичні відомості

Компенсація реактивної потужності є складовою частиною комплексу організаційно-технічних заходів з регулювання режимів електроспоживання та обмеження максимумів навантаження, що дозволить створити енергоефективні режими роботи промислових підприємств.

Основними споживачами реактивної потужності на промислових підприємствах є:

- асинхронні двигуни (45 – 65 %);
- електропічні установки (8 %);
- вентильні перетворювачі (10 %);
- трансформатори (20 – 25 %).

Фізика процесу компенсації реактивної потужності. Струм, що проходить через котушку індуктивності, відстає від прикладеної напруги на 90° , а струм, що проходить через конденсатор, випереджає прикладену до нього напругу на 90° . Отже, ємнісний струм протилежний до індуктивного і реактивна потужність, спрямована на створення електричного поля, протилежна до реактивної потужності, спрямованої на створення магнітного поля. Таким чином, чисельно рівні реактивні потужності ємності та намагнічення взаємно компенсуються ($Q_C - Q_L=0$) і мережа розвантажується від протікання реактивної складової струму навантаження.

Принцип компенсації пояснює векторна діаграма на рис. 3.1.

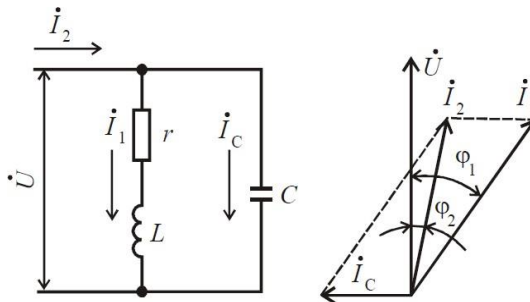


Рисунок 3.1 – Принцип компенсації реактивного струму навантаження

Ємність конденсатора C , під'єданого паралельно до навантаження з r і L , підбирають так, щоб струм \dot{I}_C , що проходить через конденсатор, був близьким за абсолютною величиною до намагнічувального струму \dot{I}_L . З векторної діаграми видно, що під'єднання конденсатора C дозволило зменшити кут зсуву фаз між струмом та напругою з φ_1 до φ_2 і, відповідно, підвищити коефіцієнт потужності навантаження ($\cos \varphi_2 > \cos \varphi_1$). Збільшуючи ємність, можна повністю компенсувати реактивну потужність навантаження і тоді $\varphi = 0$.

Батарей конденсаторів набули на промислових підприємствах найбільшого поширення як засіб компенсації реактивній потужності. Застосовують два способи включення конденсаторних батарей: шунтові, які під'єднують до шин підстанцій паралельно, і застосовують для генерації реактивної потужності у вузлах мережі й батарей конденсаторів, які вмикають в лінії послідовно для зменшення реактивного опору ліній. Батарей конденсаторів комплектують з окремих конденсаторів, сполучених послідовно й паралельно, однофазного та

трифазного виконання на номінальну напругу 0,22 – 10,5 кВ. У випадку трифазного виконання батареї конденсаторів можна вмикати з'єднанням «зірка» або «трикутник». У разі використання системи управління для перемикання батареї конденсаторів з «зірки» на «трикутник» та навпаки можливе ввімкнення батареї на напругу, яка перевищує номінальне значення в $\sqrt{3}$.

Основними перевагами конденсаторних батарей є: простота в експлуатації за рахунок відсутності обертових частин, простота монтажних робіт, за рахунок малої маси та незначні втрати активної потужності. Застосовують конденсаторні батареї як регульовані (керовані), так і нерегульовані. У нерегульованих батареях число конденсаторів незмінне, а значення реактивної потужності залежить лише від квадрата напруги. Сумарна потужність нерегульованих конденсаторних батарей не повинна перевищувати найменшого реактивного навантаження мережі. Але, якщо обрані компенсуючі пристрої постійно під'єднані до мережі, незалежно від режиму реактивних навантажень, то в періоди зниження навантаження надмірна реактивна потужність компенсуючих пристроїв передаватиметься від споживача в енергосистему (перекомпенсація). У такому випадку струмове навантаження в мережі зростає, збільшуються втрати потужності, напруга в мережі також збільшується і може досягти неприпустимих значень. У керованих батареях регулювання відбувається за рахунок зміни ступенів батарей, тобто збільшення включених секцій. При цьому змінюється ємність конденсаторних батарей і потужність, що збільшує вироблення реактивної потужності в мережі незалежно від рівня напруги. Недоліками керованих батарей є: при збільшенні кількості ступенів збільшуються затрати на пристрої перемикання та захисту, при підключенні конденсаторної батареї чутливі до струмів комутації; регулювання ступенів БК негативно впливає на контактну апаратуру.

Кожен синхронний двигун може бути джерелом реактивної потужності (квар), мінімальне значення якої визначають за виразом:

$$Q = P_{НОМ} \cdot k_3 \cdot \operatorname{tg} \varphi_{НОМ},$$

де $P_{НОМ}$ – номінальна активна потужність синхронного двигуна, кВт; k_3 – коефіцієнт завантаження двигуна за активною потужністю; $\operatorname{tg} \varphi_{НОМ}$ – відповідає номінальному коефіцієнту реактивної потужності $\cos \varphi_{НОМ}$.

Хоч питомі втрати на вироблення 1 квар реактивної потужності синхронними двигунами вищі, ніж конденсаторами, у випадку наявності на промисловому підприємстві синхронних двигунів за умовами технології, їх, насамперед, слід використовувати для компенсації реактивної потужності.

Якщо є необхідність компенсації реактивної потужності за напруги 10 (6) кВ, варто розглядати можливість отримання додаткової реактивної потужності від синхронних двигунів такої напруги, якщо їхній коефіцієнт завантаження $k_3 < 1$.

Якщо активна потужність синхронного двигуна дорівнює або більша від

значень, наведених у табл. 3.1, економічно доцільно повністю використати наявну реактивну потужність синхронного двигуна, яку визначають за виразом:

$$Q_{Дек} = k_{ПЕР} \cdot S_{СДном} = k_{ПЕР} \cdot \sqrt{P_{СДном}^2 + Q_{СДном}^2}, \quad (3.1)$$

де $k_{ПЕР}$ – коефіцієнт допустимого перевантаження синхронного двигуна за реактивною потужністю, що залежить від його завантаження за номінальною потужністю k_3 (визначають за номограмою рис. 3.2).

Таблиця 3.1 – Значення активної потужності синхронних двигунів

Кількість робочих змін	Номінальна активна потужність синхронного двигуна, кВт, з швидкістю обертання, об/хв							
	3000	1000	750	600	500	375	300	250
1	1000	1000	1600	1600	1600	2000	2000	2500
2	2500	5000	6300	5000	6300	–	–	–
3	2500	5000	6300	5000	6300	–	–	–

Так, наприклад, коефіцієнт завантаження синхронного двигуна становить $k_3 = 0,7$, коефіцієнт потужності – $\cos\varphi_{НОМ} = 0,9$. З графіка рис. 3.2 приймаємо $k_{ПЕР} = 0,56$.

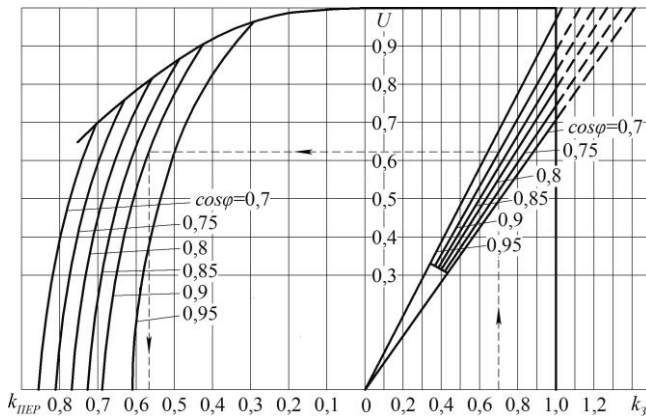


Рисунок 3.2 – Номограма визначення наявної реактивної потужності синхронних двигунів

Для синхронних двигунів номінальної активної потужності, меншої від зазначеної в табл. 3.1, приймають $Q_{СДек} = Q_{СД}$ ($Q_{СД} = P_{СДном} \cdot tg\varphi_{НОМ}$).

Завдання:

Визначити, який варіант є економічно доцільнішим: збільшення потужності синхронного двигуна з D_1 до D_2 або відповідне збільшення потужності конденсаторних батарей. Технічні характеристики двигунів для кожного варіанту наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Вихідні дані для розрахунку

№ вар.	Тип двигуна D_1	Тип двигуна D_2	$K_{ДВ1}$, грн	$K_{ДВ2}$, грн
1	СДН-14-59-6	СДН-15-30-6	65320	73968
2	СДН-15-30-6	СДН-15-49-6	73968	74630
3	СДН-14-46-8	СДН-14-59-8	55300	63200
4	СДН-14-59-8	СДН-15-30-8	63200	78932
5	СДН-15-30-8	СДН-15-49-8	78932	79325
6	СДН-15-49-8	СДН-15-64-8	79325	83766
7	СДН-15-39-6	СДН-15-49-6	62424	69458
8	СДН-15-49-6	СДН-15-64-6	69458	72582
9	СДН-15-64-6	СДН-15-76-6	72582	76721
10	СДН-16-39-8	СДН-16-44-8	74230	81127

Приклад: Визначити, який варіант є економічно доцільнішим: збільшення потужності синхронного двигуна типу СДН напругою 10 кВ (з 360 кВт та коефіцієнтом завантаження $k_{31} = 0,9$ на 450 кВт) або відповідне збільшення потужності конденсаторних батарей. Технічні дані двигунів: частота обертання 1000 об/хв, ККД $\eta = 0,93$, $\cos\varphi_{НОМ} = 0,8$ вартість синхронних двигунів становить відповідно $K_{ДВ1} = 65320$ грн, $K_{ДВ2} = 73968$ грн.

Розв’язок. Різницю в реактивній потужності зазначених синхронних двигунів розраховують за виразом:

$$Q_{СД} = k_{ПЕР2} \cdot \frac{P_{НОМ2} \cdot tg\varphi_{НОМ2}}{\eta_{02}} - k_{ПЕР1} \cdot \frac{P_{НОМ1} \cdot tg\varphi_{НОМ1}}{\eta_{01}}.$$

Фактична споживана потужність двигуна 360 кВт становить:

$$P_{\Phi} = P_{НОМ1} \cdot k_{31},$$

$$P_{\Phi} = 390 \cdot 0,9 = 324 \text{ кВт}.$$

Коефіцієнт завантаження двигуна 450 кВт дорівнює:

$$k_{32} = \frac{P_{\Phi}}{P_{НОМ2}},$$

$$k_{32} = \frac{324}{450} = 0,72.$$

Із табл.3.3 знаходимо значення коефіцієнтів перевантаження за реактивною потужністю $k_{ПЕР}$ для відповідних значень k_3 :

$$k_{ПЕР1} = 1,21;$$

$$k_{ПЕР2} = 1,31.$$

Таблиця 3.3 – Залежність коефіцієнта перевантаження за реактивною потужністю синхронних двигунів $k_{ПЕР}$ від напруги та коефіцієнта завантаження

Серія, номінальна напруга і частота обертання двигуна	Відносна напруга на затискачах двигуна	Коефіцієнт перевантаження за реактивною потужністю $k_{ПЕР}$ за коефіцієнта завантаження k_3		
		0,9	0,8	0,7
СДН, 6 і 10 кВ (для всіх частот обертання)	0,95	1,31	1,39	1,45
	1,0	1,21	1,27	1,33
	1,05	1,06	1,12	1,17
СДН, 6 кВ: 600 – 1000 об/хв	1,1	0,89	0,94	0,96
	370 – 500 об/хв	1,1	0,88	0,92
	187 – 300 об/хв	1,1	0,86	0,88
	100 – 167 об/хв	1,1	0,81	0,85
СДН, 10 кВ: 1000 об/хв	1,1	0,9	0,98	1,0
	250 – 750 об/хв	1,1	0,86	0,9
СТД, 6 і 10 кВ, 3000 об/хв	0,95	1,3	1,42	1,52
	1,0	1,23	1,34	1,43
	1,05	1,12	1,23	1,31
	1,1	0,9	1,08	1,16
СД і СДЗ, 380 В (для всіх частот обертання)	0,95	1,16	1,26	1,36
	1,0	1,15	1,24	1,32
	1,05	1,1	1,18	1,25
	1,1	0,9	1,06	1,15

Різниця в реактивній потужності двигунів становить:

$$Q_{CD} = 1,31 \cdot \frac{450 \cdot 0,75}{0,93} - 1,21 \cdot \frac{360 \cdot 0,75}{0,93} = 124,1 \text{ квар.}$$

Знаходимо коефіцієнти k_1, k_2 для розрахунку додаткових втрат активної потужності: для двигуна потужністю 360 кВт $k'_1 = 4,7$ кВт, $k'_2 = 4,1$ кВт; для двигуна потужністю 450 кВт $k''_1 = 5,5$ кВт, $k''_2 = 4,2$ кВт.

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики синхронних двигунів СДН

Тип двигуна	Номінальна потужність		ККД, %	Коефіцієнт, кВт	
	Активна, кВт	Реактивна, кВар		K_1	K_2
<i>$U_H=6кВ, \cos\varphi = 0,9$</i>					
<i>1000 об/хв</i>					
СДН-14-49-6	1000	511	95,37	5,09	3,99
СДН-14-59-6	1250	633	95,95	4,74	4,42
СДН-15-30-6	1600	812	95,75	6,65	6,8
СДН-15-49-6	2000	1010	96,06	8,06	7,53
<i>750 об/хв</i>					
СДН-14-46-8	800	407	94,86	4,9	4,57
СДН-14-59-8	1000	511	95,61	4,37	4,96
СДН-15-30-8	1250	637	94,84	7,73	7,29
СДН-15-49-8	1600	812	95,77	7,22	7,33
СДН-15-64-8	2000	1010	96,12	8,08	6,98
<i>$U_H=10 кВ, \cos\varphi = 0,9$</i>					
<i>1000 об/хв</i>					
СДН-15-39-6	1250	645	94,45	6,77	6,98
СДН-15-49-6	1600	817	95,08	7,58	7,56
СДН-15-64-6	2000	1010	95,73	8,39	7,2
СДН-15-76-6	2500	1265	96,07	9,2	8,93
<i>750 об/хв</i>					
СДН-16-39-8	1250	640	93,86	7,2	6,48
СДН-16-44-8	1600	815	94,58	8,3	8,12
СДН-16-54-8	2000	1020	95,04	9,48	9,83
СДН-16-71-8	2500	1265	95,80	8,81	8,23

У разі генерування максимальної реактивної потужності активні втрати у двигунах становитимуть:

$$\Delta P_1 = k_1' \cdot k_{ПЕР1} + k_2' \cdot k_{ПЕР1}^2,$$

$$\Delta P_1 = 4,7 \cdot 1,21 + 4,2 \cdot 1,31^2 = 11,69 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_2 = k_2'' \cdot k_{ПЕР2} + k_2'' \cdot k_{ПЕР2}^2,$$

$$\Delta P_2 = 5,5 \cdot 1,31 + 4,2 \cdot 1,31^2 = 14,41 \text{ кВт}.$$

Додаткові річні втрати електричної енергії у випадку заміни синхронного двигуна становлять:

$$\Delta W_{EH1} = (\Delta P_2 - \Delta P_1) \cdot t_{3M} \cdot T,$$

де t_{3M} – тривалість зміни, год/добу; $t_{3M} = 7$ год/добу; $T = 300$ діб/рік – річна кількість діб роботи підприємства, діб/рік.

З урахуванням тарифу на електричну енергію $C_0 = 1,68$ грн/(кВт·год), отримаємо вартість додаткових втрат електричної енергії:

$$B_{EH1} = 1,68 \cdot (14,4 - 11,7) \cdot 7 \cdot 300 = 9525,6 \text{ грн/рік}.$$

Капітальні витрати на заміну двигуна:

$$K_1 = K_{ДВ2} - K_{ЛІКДВ1},$$

де $K_{ДВ2}$ – вартість синхронного двигуна потужністю 450 кВт, $K_{ДВ2} = 73968$ грн; $K_{ЛІКДВ1}$ – ліквідна вартість синхронного двигуна потужністю 360 кВт; вважаємо, що ліквідна вартість становить 25 % вартості двигуна, $K_{ДВ1} = 65320$ грн.

Таким чином, капітальні витрати:

$$K_1 = 73960 - 0,25 \cdot 65320 = 57638 \text{ грн}.$$

Замість підвищення потужності синхронного двигуна можна встановити конденсатори КЕС2–10,5–150–2У1 реактивної потужності $Q_K = 150$ квар.

Для під'єднання конденсаторів треба встановлювати комплектний розподільний пристрій. Таким чином, капітальні витрати встановлення конденсаторів становлять:

$$K_2 = K_{\text{КОНД}} + K_{\text{РП}},$$

$$K_2 = 64841 + 84180 = 149021 \text{ грн.}$$

Додаткові річні втрати енергії конденсаторів для $\rho_0 = 0,002$ кВт/квар дорівнюють:

$$\Delta W_{EH2} = \rho_0 \cdot Q_K \cdot t_{3M} \cdot T.$$

Річні додаткові витрати:

$$B_{EH2} = 1,68 \cdot 0,002 \cdot 150 \cdot 7 \cdot 300 = 623 \text{ грн/рік.}$$

Експлуатаційні витрати за варіантами становлять:

$$B_{EK1} = 0,048 \cdot 57638 = 2767 \text{ грн/рік;}$$

$$B_{EK2} = 0,048 \cdot 149021 = 7153 \text{ грн/рік.}$$

Амортизаційні витрати за варіантами визначають як:

$$B_{AM1} = 0,044 \cdot 57638 = 2536 \text{ грн/рік;}$$

$$B_{AM2} = 0,044 \cdot 149021 = 6557 \text{ грн/рік.}$$

Плата за кредит дорівнює:

$$B_{KP1} = 0,1 \cdot 57638 = 5764 \text{ грн/рік;}$$

$$B_{KP2} = 0,1 \cdot 149021 = 14902 \text{ грн/рік.}$$

Зведені річні витрати за варіантами:

$$П_1 = 2767 + 2536 + 5764 + 9526 = 20593 \text{ грн/рік;}$$

$$П_2 = 7153 + 6557 + 14902 + 1058 = 29670 \text{ грн/рік.}$$

Очевидно, перевагу варто надати варіанту з меншими річними зведеними витратами, тобто встановленню синхронного двигуна більшої потужності.

Якщо на шинах 10 кВ, від яких живиться синхронний двигун, вже встановлено високовольтні конденсатори з комплектним розподільним пристроєм для їх приєднання, то в разі паралельного приєднання додаткових конденсаторів (або заміни на батарею більшої потужності) додатковий комплектний розподільний пристрій не потрібен.

Тоді капітальні витрати в другому варіанті становлять $K_2 = 64841$ грн.

Інші річні витрати становлять відповідно:

$$B_{EK2} = 0,048 \cdot 64841 = 3112 \text{ грн/рік};$$

$$B_{AM2} = 0,044 \cdot 64841 = 2853 \text{ грн/рік};$$

$$B_{KP2} = 0,1 \cdot 64841 = 6484 \text{ грн/рік}.$$

Тоді зведені річні витрати за другим варіантом становлять:

$$П_2 = 3112 + 2853 + 6484 + 1058 = 13507 \text{ грн/рік}.$$

У такому випадку економічно доцільнішим буде другий варіант з меншим значенням зведених витрат.

Контрольні запитання:

1. Охарактеризуйте фізику процесу компенсації реактивної потужності.
2. Вкажіть недоліки та переваги використання батарей конденсаторів для компенсації реактивної потужності.
3. За яким критерієм визначають економічно доцільне розташування джерел реактивної потужності на підстанціях розподільної мережі?
4. У яких випадках для компенсації реактивної потужності доцільно застосовувати синхронні компенсатори?
5. Що обумовлює зменшення втрат електричної енергії в елементах мережі у випадку встановлення компенсувальних пристроїв?

Література: [1, с. 80-99; 2, с. 132-136; 6, с. 198-201; 7, с. 97-98].

Практичне заняття № 4. Оцінювання рентабельності заміни недовантажених асинхронних двигунів

Мета роботи: ознайомлення з методикою визначення доцільності заміни недовантажених електричних двигунів двигунами меншої потужності.

Теоретичні відомості

Асинхронні електродвигуни (АД) споживають близько 60 % усієї реактивної потужності, яку використовують промислові підприємства, тому першочерговим завданням раціональної експлуатації АД є зниження реактивних навантажень та підвищення коефіцієнта потужності. Правильне розв'язання цього завдання дозволить знизити втрати енергії та призведе до її економії.

Чисельні дослідження показали, що в разі, коли середнє завантаження двигуна менше 45 % від номінальної потужності, то заміна його двигуном меншої потужності є доцільною, а перевірка за умови рентабельності не потрібна. У разі завантаження двигуна понад 70 % від номінальної потужності його заміна вважається недоцільною. У разі завантаження двигуна в межах 45-70 % доцільність визнають зменшенням сумарних втрат активної потужності в енергосистемі та у двигуні.

Реактивна потужність, яку споживає АД, залежить від його технічних даних та коефіцієнта навантаження. За номінальних значень навантаження та напруги АД споживає реактивну потужність, яка визначають за виразом:

$$Q_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\eta_D} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{НОМ}, \quad (4.1)$$

де $P_{НОМ}$ – номінальна потужність електродвигуна, кВт;

η_D – ККД у разі повного навантаження;

$\operatorname{tg} \varphi_{НОМ}$ – похідна від номінального коефіцієнта потужності електродвигуна.

Реактивну потужність, споживану АД з мережі у режимі неробочого ходу, визначають із виразу:

$$Q_{НХ} \approx \sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot I_{НХ}, \quad (4.2)$$

де $U_{НОМ}$ – значення номінальної напруги двигуна, В;

$I_{НХ}$ – струм неробочого ходу АД, А.

Для двигунів з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi_H = 0,91-0,93$ реактивна потужність неробочого ходу становить 50 % реактивної потужності під час номінального завантаження двигуна, а для двигунів з $\cos \varphi_H = 0,77-0,79$ – 70 %.

Збільшення споживання реактивної потужності під час повного завантаження двигуна порівняно зі споживанням неробочого ходу становить:

$$\Delta Q_{НОМ} = Q_{НОМ} - Q_{HX} = \frac{P_{НОМ}}{\eta_D} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{НОМ} - \sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot I_{HX}. \quad (4.3)$$

Для значень навантаження АД, менших за номінальне, приріст споживання реактивної потужності з приростом на неробочому ході пропорційні квадрату коефіцієнта навантаження двигуна:

$$\Delta Q = k_H^2 \cdot \Delta Q_{НОМ} - Q_{HX}. \quad (4.4)$$

де $k_H = \frac{P_{НОМ}}{\eta_D}$ – коефіцієнт навантаження АД.

Отже, реактивна потужність, яку споживає двигун у разі довільного навантаження, становить:

$$Q = Q_{HX} + k_H^2 \cdot \Delta Q_{НОМ}. \quad (4.5)$$

Коефіцієнт потужності АД у разі довільного навантаження з врахуванням (4.5) можна знайти із виразу:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_{HX} + k_H^2 \cdot \Delta Q_{НОМ}}{k_H \cdot P_{НОМ}} \right)^2}}. \quad (4.6)$$

З (4.6) видно, що коефіцієнт потужності двигуна зменшується зі зменшенням його завантаження. Наприклад, якщо для двигуна за 100-го завантаження $\cos \varphi_H = 0,8$, то за 50 %-му він дорівнює 0,65, а для 30 %-го – 0,51. Тобто, заміна систематично мало завантажених двигунів двигунами меншої потужності сприяє підвищенню коефіцієнта потужності промислових електроустановок.

Умови рентабельності потребують, щоб заміна двигуна супроводжувалась зменшенням сумарних втрат активної потужності як в енергосистемі, так і у споживача. Для визначення сумарних втрат використовують вираз:

$$\Delta P_{\Sigma} = k_E \cdot Q + \Delta P, \quad (4.7)$$

де ΔP – повні втрати активної потужності у двигуні, k_E – коефіцієнт підвищення втрат, кВт/кВАр.

Коефіцієнт підвищення втрат чисельно дорівнює питомому зниженню втрат активної потужності у всіх елементах системи електропостачання, який отримано зі зменшенням реактивної потужності, що передана підприємству.

Після відповідних перетворень (4.7) із врахуванням (4.3) та (4.5) отримаємо:

$$\Delta P_{\Sigma} = k_E \cdot \left[Q_{HX} \cdot (1 - k_H^2) + k_H^2 \cdot Q_{НОМ} \right] + \Delta P_{HX} + k_H^2 \cdot \Delta P_{A.H}, \quad (4.8)$$

де $\Delta P_{HX} = P_{НОМ} \left(\frac{1 - \eta_D}{\eta_D} \right) \cdot \frac{\gamma_{ДВ}}{1 + \gamma_{ДВ}}$ – втрати активної потужності у режимі

неробочого ходу АД, кВт;

$\Delta P_{A.H} = P_H \left(\frac{1 - \eta_D}{\eta_D} \right) \cdot \frac{1}{1 + \gamma_{ДВ}}$; – приріст втрат активної потужності у двигуні за

100%-го завантаження, кВт;

$\gamma_{ДВ} = \frac{\Delta P_{HX}, \%}{(100 - \eta, \%) - \Delta P_{HX}, \%}$ – розрахунковий коефіцієнт, що залежить від конструкції двигуна;

ΔP_{HX} – втрати активної потужності у режимі неробочого ходу у відсотках від активної потужності, яку споживає АД із завантаженням на 100 %.

Завдання:

1. Перевірити рентабельність заміни двигуна *АД1* двигуном *АД2*. Коефіцієнт підвищення втрат становить 0,02 та 0,1 кВт/кВАр. Параметри двигунів наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри асинхронних електродвигунів

№ вар.	Тип двигуна <i>АД1/ АД2</i>	$P_{НОМ}$, кВт	$U_{НОМ}$, В	I_{HX} , А	ΔP_{HX} , кВт	η_D , %	$\cos\phi_{НОМ}$	P , кВт
1	A92-2	125	380	71,0	4,4	92	0,92	70
	A82-2	75	380	42,6	3,2	91	0,92	
2	АО-73-8	14	380	13,8	0,65	87,5	0,81	9
	АО-72-6	10	380	13,3	0,39	87	0,8	
3	4АН225М4 У3	75	380	55,6	2,4	92,5	0,89	40
	4АН200М4 У3	45	380	42,2	2,0	91	0,89	
4	4А180М2У3	30	380	16,8	1,1	88,5	0,92	15
	4А160М2У3	18,5	380	25,4	1,65	90,5	0,9	
5	A280М2	132	380	74,2	4,5	94,6	0,9	85
	A250М2	90	380	52,1	3,3	94,5	0,91	

Продовження табл.4.1.

№ вар.	Тип двигуна	$P_{НОМ}$, кВт	$U_{НОМ}$, В	$I_{НХ}$, А	$\Delta P_{НХ}$, кВт	η_D , %	$\cos\varphi_{НОМ}$	P , кВт
6	АИР315М2	200	380	78,9	4,6	94,8	0,92	145
	АИР315S2	160	380	76,4	4,4	94,6	0,92	
7	АИР280М4	132	380	73,9	4,4	94,8	0,88	100
	5АМ280 S4	110	380	62,3	3,8	95,1	0,87	

Приклад: Перевірити рентабельність заміни двигуна типу А92-4 потужністю 100 кВт, який працює із завантаженням на валу 50 кВт, двигуном А82-4 потужністю 55 кВт. Коефіцієнт підвищення втрат становить 0,02 та 0,1 кВт/кВАр.

Параметри двигунів наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри двигунів А92-4 та А82-4

Тип двигуна	$P_{НОМ}$, кВт	$U_{НОМ}$, В	$I_{НХ}$, А	$\Delta P_{НХ}$, кВт	$\eta_{НОМ}$, %	$\cos\varphi_{НОМ}$
А92-4	100	380	57	3,5	92	0,89
А82-4	55	380	31,8	2,31	0,905	0,89

Розв'язок: Знаходимо реактивну потужність, яку споживає АД з мережі:

$$Q_{НХ} \approx \sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot I_{НХ} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,057 = 37,5 \text{ кВАр.}$$

Номінальна реактивна потужність:

$$Q_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\eta_D} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{НОМ} = \frac{100}{0,92} \cdot 0,515 = 56 \text{ кВАр.}$$

Коефіцієнт навантаження АД:

$$k_H = \frac{P}{P_{НОМ}} = \frac{50}{100} = 0,5;$$

$$\gamma_{ДВ} = \frac{\Delta P_{НХ}, \%}{(100 - \eta, \%) - \Delta P_{НХ}, \%} = \frac{3,5}{(100 - 92) - 3,5} = 0,778;$$

$$\Delta P_{А.Н} = P_{НОМ} \left(\frac{1 - \eta_D}{\eta_D} \right) \cdot \frac{1}{1 + \gamma_{ДВ}} = 100 \cdot \frac{1 - 0,92}{0,92} \cdot \frac{1}{1 + 0,778} = 4,89 \text{ кВт.}$$

Сумарні втрати активної потужності знаходимо, використовуючи вираз (4.8) для коефіцієнтів зміни втрат 0,02 та 0,1 відповідно:

$$\Delta P'_{\Sigma(0,02)} = 0,02 \cdot [37,5 \cdot (1 - 0,5^2) + 0,5^2 \cdot 56] + 3,5 + 0,5^2 \cdot 4,89 = 5,56 \text{ кВт};$$

$$\Delta P'_{\Sigma(0,1)} = 0,1 \cdot [37,5 \cdot (1 - 0,5^2) + 0,5^2 \cdot 56] + 3,5 + 0,5^2 \cdot 4,89 = 8,94 \text{ кВт}.$$

Розраховуємо відповідні параметри для двигуна, яким буде замінено недовантажений двигун:

$$Q_{HX} \approx \sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot I_{HX} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,0318 = 21 \text{ кВАр}.$$

$$Q_{НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\eta_D} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{НОМ} = \frac{55}{0,905} \cdot 0,515 = 31,3 \text{ кВАр}.$$

$$k_H = \frac{P}{P_{НОМ}} = \frac{50}{55} = 0,91;$$

$$\gamma_{ДВ} = \frac{\Delta P_{HX}, \%}{(100 - \eta, \%) - \Delta P_{HX}, \%} = \frac{4,2}{(100 - 90,5) - 4,2} = 0,793;$$

$$\Delta P_{A.H} = P_{НОМ} \left(\frac{1 - \eta_D}{\eta_D} \right) \cdot \frac{1}{1 + \gamma_{ДВ}} = 55 \cdot \frac{1 - 0,905}{0,905} \cdot \frac{1}{1 + 0,793} = 3,22 \text{ кВт}.$$

Сумарні втрати активної потужності для коефіцієнтів зміни втрат 0,02 та 0,1 відповідно:

$$\Delta P''_{\Sigma(0,02)} = 0,02 \cdot [21 \cdot (1 - 0,91^2) + 0,91^2 \cdot 31,3] + 2,31 + 0,91^2 \cdot 3,22 = 5,57 \text{ кВт};$$

$$\Delta P''_{\Sigma(0,1)} = 0,1 \cdot [21 \cdot (1 - 0,91^2) + 0,91^2 \cdot 31,3] + 2,31 + 0,91^2 \cdot 3,22 = 7,93 \text{ кВт}.$$

Визначаємо зниження втрат активної потужності в двигуні та електричних мережах у результаті його заміни:

$$\Delta P_{(0,02)} = \Delta P'_{\Sigma(0,02)} - \Delta P''_{\Sigma(0,02)} = 5,56 - 5,57 = -0,01 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{(0,1)} = \Delta P'_{\Sigma(0,1)} - \Delta P''_{\Sigma(0,1)} = 8,94 - 7,93 = 1,01 \text{ кВт.}$$

Отже, заміна двигуна для випадку $k_E=0,02$ не призводить до зменшення сумарних втрат активної потужності, а у разі $k_E=0,1$ становить 1,01 кВт.

Контрольні запитання:

1. Які існують способи зменшення споживання реактивної потужності асинхронним електроприводом?
2. Від яких показників залежить значення реактивної потужності, яку споживає АД?
3. Як розрахувати реактивну потужність, споживану двигуном, у разі довільного навантаження?
4. Як залежить коефіцієнт потужності двигуна від значення коефіцієнта навантаження?
5. Як визначають сумарні втрати активної потужності в АД у разі довільного навантаження?

Література: [1, с. 129-133; 6, с. 191–194].

Практичне заняття № 5. Заощадження електричної енергії за рахунок перемикання обмоток статора за схемою «трикутник» - «зірка»

Мета роботи: вивчення способу заощадження електричної енергії в технологічних установках енергоємних виробництв за рахунок перемикання обмоток статора асинхронного двигуна за схемою «трикутник - зірка».

Теоретичні відомості

Достатньо ефективним способом заощадження електричної енергії в асинхронних двигунах є зниження напруги, що підводиться до двигуна в режимах незначних навантажень або ж в режимі неробочого ходу. У такому випадку відбувається зменшення споживаної реактивної потужності, що обумовлює зменшення втрат в елементах системи електропостачання електропривода, а за певних коефіцієнтів навантаження і втрат потужності у двигуні. На практиці значного поширення набули два способи зниження напруги: за рахунок перемикання обмоток статора двигуна зі схеми «трикутник» на схему «зірка» та шляхом упровадження тиристорних регуляторів напруги.

Спосіб зниження напруги за рахунок перемикання обмоток статора двигуна зі схеми з'єднання «трикутник» на схему «зірка» можливий за однакових значень

номінальної фазної напруги обмотки статора двигуна та лінійної напруги мережі. За навантажень двигуна, близьких до номінального рівня, обмотки статора ввімкнені за схемою «трикутник» (Δ) і двигун працює з номінальним значенням напруги з повним магнітним потоком.

У разі зниження напруги обмотки двигуна перемикаються на схему «зірка» (Y). До обмоток підводиться знижена в $\sqrt{3}$ напруга, за рахунок чого знижують струм намагнічування, реактивна потужність та сумарні втрати в двигуні та в системі електропостачання. Необхідно зазначити, що втрати потужності у двигуні залежно від коефіцієнта навантаження можуть як зменшитись, так і збільшитись.

Залежність реактивної потужності асинхронного двигуна від напруги, що подається на статор, може бути виражена за виразом:

$$Q \approx k_U^2 \cdot Q_0 + \frac{k_H^2 \cdot \Delta Q_{НОМ}}{k_U^2}, \quad (5.1)$$

де k_U – коефіцієнт зниження напруги, що дорівнює 1 у разі з'єднання обмоток статора за схемою «трикутник» та $1/\sqrt{3}$ у випадку з'єднання обмоток в «зірку».

Залежність втрат активної потужності асинхронного двигуна від напруги, що подається на статор, може мати такий:

$$P \approx k_U^2 \cdot \Delta P_0 + \frac{k_H^2 \cdot \Delta P_{НОМ}}{k_U^2}, \quad (5.2)$$

де ΔP_0 – втрати активної потужності асинхронного двигуна в режимі неробочого ходу, що в подальшому приймаються рівними значенню постійних втрат K.

Підставивши у вирази (5.1) та (5.2) значення k_U для обох схем, можна визначити зниження реактивної потужності $\Delta Q_{\Delta-Y}$ у разі перемикання обмоток статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка»:

$$\Delta Q_{\Delta-Y} = Q_{\Delta} - \Delta Q_Y = 2 \cdot Q_0 / 3 - 2 \cdot k_H^2 \cdot \Delta Q_{НОМ}, \quad (5.3)$$

а також зниження втрат активної потужності $\Delta(\Delta P_{\Delta-Y})$ у разі перемикання обмоток:

$$\Delta(\Delta P_{\Delta-Y}) = \Delta P_{\Delta} - \Delta P_Y = 2 \cdot \Delta P_0 / 3 - 2 \cdot k_H^2 \cdot \Delta P_{НОМ}. \quad (5.4)$$

Аналізування співвідношення (5.3) у випадку найімовірніших значень $Q_0 = (0,60 \dots 0,75) \cdot Q_{НОМ}$ показує, що за коефіцієнта навантаження $k_H < 0,7$ реактивна потужність у схемі з'єднання «зірка» завжди менша, ніж для схеми

«трикутник». Аналізування співвідношення (5.4) за найімовірнішого співвідношення $\Delta P_0 \approx (0,30 \dots 0,35) \cdot \Delta P_{НОМ}$ показує, що зменшення втрат у двигуні в разі переходу на схему «зірка» відбуватиметься, починаючи із значень коефіцієнта навантаження двигуна $k_H < 0,4$.

Завдання:

Визначити доцільність перемикання обмоток зі схеми «трикутник» на схему «зірка» асинхронного двигуна, що працює із заданим коефіцієнтом навантаження $k_H = 0,3$ та частотою $f_{НОМ} = 50$ Гц. Номінальні параметри двигунів наведено в табл. 5.1 згідно варіанта.

Таблиця 5.1. – Вихідні дані до розрахунків

№ вар.	Двигун	$P_{НОМ}$, кВт	$U_{НОМ}$, В	p	$\eta_{НОМ}$, %	$\cos\varphi_{НОМ}$	λ_M	$s_{НОМ}$	$I_{НОМ}$, А
1	A355MLA12	110	380/660	6	94	0,75	2,2	0,014	136,7
2	5AM280S4	110	380/660	2	95,1	0,87	2	0,01	116,4
3	A280M2	132	380/660	1	94,6	0,90	3,5	0,012	135,7
4	AIP280 M4	132	380/660	2	94,8	0,88	2,2	0,013	138,6
5	AIP315 S2	160	380/660	1	94,6	0,92	2,2	0,008	161,0
6	A315S2	160	380/660	1	95,6	0,87	3,3	0,008	168,5
7	AIP315M2	200	380/660	1	94,8	0,92	2,2	0,008	200,8
8	AIC355MB6	200	380/660	3	95,4	0,88	2,9	0,01	208,6
9	5AM250M4	90	380/660	2	95	0,88	2,3	0,01	94,3
10	A250M2	90	380/660	1	94,5	0,91	4,0	0,013	91,7

Приклад: Визначити доцільність перемикання обмоток зі схеми «трикутник» на схему «зірка» двигуна АО3-315М-6УЗ, що працює з коефіцієнтом навантаження $k_H = 0,3$. Номінальні дані двигуна $P_{НОМ} = 132$ кВт; напруга $U_{НОМ} = 380/660$ В; ковзання $s_{НОМ} = 0,017$; кількість пар полюсів $p = 3$; струм статора $I_{НОМ} = 138$ А; ККД $\eta_{НОМ} = 93,5$ %; $\cos\varphi_{НОМ} = 0,9$; $\lambda_M = M_K / M_{НОМ} = 2,6$; $f_{НОМ} = 50$ Гц.

Розв'язок. 1. Визначаємо швидкість обертання поля статора, номінальну швидкість та момент двигуна АО3-315М-6УЗ:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,7 \text{ рад/с;}$$

$$\omega_{НОМ} = 104,7 \cdot (1 - 0,017) = 103 \text{ рад/с;}$$

$$M_{НОМ} = \frac{132000}{103} = 1282 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

2. Визначасмо номінальний зведений струм ротора:

$$I'_{2НОМ} \approx I_{1НОМ} \cdot \cos\varphi_{НОМ} \cdot$$

$$I'_{2НОМ} = 138 \cdot 0,9 = 124 \text{ А.}$$

3. Знаходимо струм намагнічування двигуна:

$$I_{\mu} \approx I_{1НОМ} \cdot \left(\sin\varphi - \frac{\cos\varphi}{\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}} \right);$$

$$I_{\mu} = 138 \cdot \left(0,44 - \frac{0,9}{2,6 + \sqrt{2,6^2 - 1}} \right) = 36 \text{ А.}$$

4. Використавши вираз для визначення втрат потужності в роторі $\Delta P'_{НОМ} = M_{НОМ} \cdot \omega_0 \cdot s_{НОМ} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2'$, записаний для номінального режиму, знаходимо зведений активний опір ротора:

$$R_2' = \frac{M_{НОМ} \cdot \omega_0 \cdot s_{НОМ}}{3 \cdot I_{2НОМ}'^2};$$

$$R_2' = \frac{1282 \cdot 104,7 \cdot 0,017}{3 \cdot 124^2} = 0,05 \text{ Ом.}$$

5. Розраховуємо реактивну потужність у номінальному режимі:

$$Q_{НОМ} = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{1НОМ} \cdot \sin\varphi_{НОМ};$$

$$Q_{НОМ} = 3 \cdot 380 \cdot 138 \cdot 0,44 = 69221 \text{ вар.}$$

6. Розрахуємо реактивну потужність режиму неробочого ходу:

$$Q_0 = \frac{m \cdot P_{НОМ}}{\eta_{НОМ}};$$

$$Q_0 = \frac{0,31 \cdot 132000}{0,935} = 43764 \text{ вар,}$$

де $m = 2,2 - 2,1 \cdot \cos\varphi_{НОМ} = 2,2 - 2,1 \cdot 0,9 = 0,31$.

7. Із виразів для номінальної реактивної потужності:

$$Q_{НОМ} = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\mu} + M_{НОМ} \cdot \omega_0 \cdot s_{НОМ} \cdot X_{K3} / R'_2 = Q_0 + \Delta Q_{НОМ}$$

знаходимо X_{K3} :

$$X_{K3} = \frac{R'_2 \cdot (Q_{НОМ} - Q_0)}{M_{НОМ} \cdot \omega_0 \cdot s_{НОМ}};$$

$$X_{K3} = \frac{0,05 \cdot (69221 - 43764)}{1282 \cdot 104,7 \cdot 0,0017} = 0,55 \text{ Ом.}$$

8. Визначаємо активний опір кола ротора, використовуючи формулу для критичного моменту асинхронного двигуна:

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{\Phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{K3}^2} \right)},$$

виразивши з неї $R_1 = \left(\left(\frac{3 \cdot U_{\Phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot M_K} \right)^2 - X_{K3}^2 \right) / 2 \cdot \left(\frac{3 \cdot U_{\Phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot M_K} \right);$

$$R_1 = \left(\left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 104,7 \cdot 2,6 \cdot 1282} \right)^2 - 0,55^2 \right) / 2 \cdot \left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 104,7 \cdot 2,6 \cdot 1282} \right) = 0,07 \text{ Ом.}$$

9. Визначаємо повні номінальні втрати:

$$\Delta P_{НОМ} = P_{НОМ} \cdot \frac{(1 - \eta_{НОМ})}{\eta_{НОМ}};$$

$$\Delta P_{НОМ} = 132000 \cdot \frac{1 - 0,935}{0,935} = 9176 \text{ Вт.}$$

10. Знаходимо змінні номінальні втрати:

$$\Delta P'_{НОМ} = \Delta P'_{1НОМ} + \Delta P'_{2НОМ} = 3 \cdot I_{НОМ}^2 \cdot R_1 + 3 \cdot I_{2НОМ}^2 \cdot R'_2;$$

$$\Delta P'_{НОМ} = 3 \cdot 138^2 \cdot 0,07 + 3 \cdot 124^2 \cdot 0,05 = 6306 \text{ Вт.}$$

11. Знаходимо постійні втрати потужності:

$$K = \Delta P_{НОМ} - \Delta P'_{НОМ};$$

$$K = 9176 - 6306 = 2870 \text{ Вт.}$$

12. Розраховуємо зменшення реактивної потужності $\Delta Q_{\Delta-Y}$ у разі перемикання обмоток статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка» за формулою (5.3):

$$\Delta Q_{\Delta-Y} = Q_{\Delta} - \Delta Q_Y = 2 \cdot Q_0 / 3 - 2 \cdot k_H^2 \cdot \Delta Q_{НОМ};$$

$$\Delta Q_{\Delta-Y} = 2 \cdot 43764 / 3 - 2 \cdot 0,3^2 \cdot 25456 = 24594 \text{ вар.}$$

13. Розраховуємо зменшення втрат активної потужності $\Delta P_{\Delta-Y}$ у разі перемикання обмоток статора зі схеми «трикутник» на схему «зірка» за формулою (5.4):

$$\Delta P_{\Delta-Y} = 2 \cdot 3859 / 3 - 2 \cdot 0,3^2 \cdot 9176 = 921 \text{ Вт.}$$

14. Загальне зменшення втрат потужності становитиме:

$$\Delta P_{ЕК} = k_E \cdot \Delta Q_{\Delta-Y} + \Delta P_{\Delta-Y};$$

$$\Delta P_{EK} = 0,1 \cdot 24594 + 921 = 3381 \text{ Вт,}$$

де k_E – коефіцієнт зменшення втрат потужності за рахунок зниження реактивної потужності Q , кВт/квар.

Контрольні запитання:

1. Охарактеризуйте заходи із заощадження електричної енергії в електричних двигунах?
2. Поясніть, як впровадження енергоощадних двигунів та заміна недовантажених двигунами меншої потужності дозволяє зменшити споживання електричної енергії?
3. За рахунок чого досягається заощадження електричної енергії у випадку перемикання обмоток статора за схемою «трикутник – зірка»?
4. Призначення автоматичних обмежувачів неробочого ходу.
5. В яких випадках є доцільним впровадження обмежувачів неробочого ходу двигунів?

Література: [1, с. 127–147; 6, с. 194–198].

Практичне заняття № 6. Вивчення методів заощадження електричної енергії в дугових сталеплавильних печах

Мета роботи: вивчення шляхів зменшення втрат електричної енергії в дугових сталеплавильних печах.

Теоретичні відомості

Дугові сталеплавильні печі є одними з найпотужніших споживачів електричної енергії, їхня потужність може перевищувати 100 МВ·А.

Процес плавлення сталі в дуговій печі поділяють на три різні за споживанням електричної енергії та технологічними ознаками періоди: розплавлення твердої шихти, окиснення (кипіння) та відновлення (рафінування).

У період розплавлення піч споживає найбільшу потужність, витрати електричної енергії за цей період становлять 50 – 60 % всієї енергії, витраченої за цикл плавлення. Період розплавлення характеризується значною кількістю коротких замикань, що може сягати значень понад 100 – у разі допустимої тривалості одного замикання до 2 – 8 с.

У період окиснення енергія витрачається на проведення хімічних реакцій та компенсацію теплових втрат; споживана потужність становить 70 – 75 % від

номінальної, напруга є зниженою. У зв'язку з кипінням металу можливі короткі замикання, довжина дуги становить декілька десятків міліметрів.

У період відновлення споживана потужність становить 0,4 – 0,5 від номінальної. Довжина дуги сягає декількох сантиметрів. Енергетичний режим порівняно спокійний. Графік потужності та напруги процесу плавлення показано на рис. 6.1.

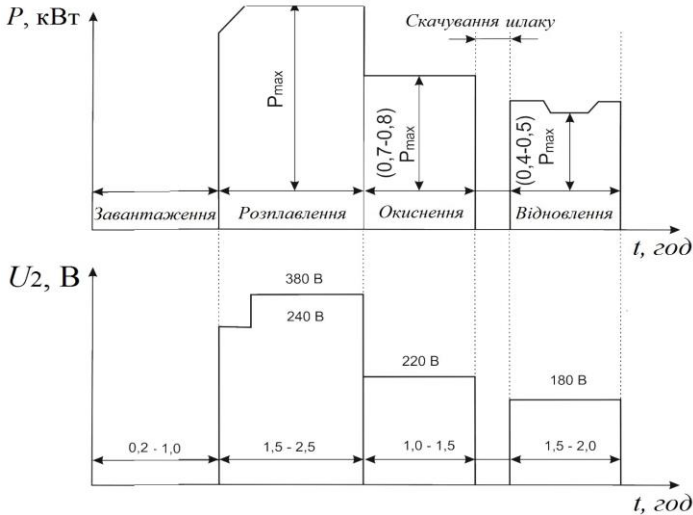


Рисунок 6.1 – Графік потужності та напруги процесу плавлення дугової печі

До основних заходів із заощадження електричної енергії в ДСП належать:

- утримання печі й усього устаткування (особливо автоматичного регулятора режиму роботи ДСП) у належному технічному стані; дотримання графіка планово-попереджувальних робіт;
- правильний вибір електричного режиму роботи печі: ступені напруги трансформатора і струму дуги;
- зменшення тривалості простоїв печі, мінімальний час знаходження ДСП із відкритим під час завантаження склепінням;
- оптимальне укладання шихти в завантажувальний кошик, підбір шихти за складом та розмірами;
- періодична перевірка інфрачервоним термометром стану контактних з'єднань;
- використання матеріалів високої якості для футерівки печі й електродів.

Оптимальні густини струму в елементах вторинного струмопроводу. На основі практичного досвіду роботи ДСП можна рекомендувати такі економічні густини струму в елементах вторинного струмопроводу:

- мідні шини з площею перерізу пакету на фазу до 5000 мм² – 1,5 – 2 А/мм², понад 5000 мм² – 1 – 1,5 А/мм²;
- мідні гнучкі кабелі з площею перерізу на фазу до 4000 мм² – 1,8 – 2,5 А/мм², понад 4000 мм² – 1,2 – 1,8 А/мм²;
- мідні водоохолоджувані труби – 4 – 6 А/мм².

Для вказаних у табл. 6.1 економічних густин струму втрати електричної енергії у відсотках до витрати енергії на плавлення наведено в табл. 6.2 [Error! Reference source not found.].

Таблиця 6.1 – Економічні густини струму в електродах

Діаметр електрода, мм	Вугільні електроди		Графітизовані електроди	
	Густина струму, А/мм ²	Струм навантаження, кА	Густина струму, А/мм ²	Струм навантаження, кА
100	–	–	0,3	1,7 – 2,9
150	0,12	2,1	0,25	3,2 – 5,3
200	0,11	3,4	0,22	5,3 – 9,1
250	0,1	4,0	0,2	7,8 – 12,2
300	0,10	7,0	0,18	11,3 – 16,9
350	0,10	9,6	0,17	15,4 – 20,2
400	0,09	11,3	0,16	18,8 – 23,8
450	–	–	0,15	23,8 – 28,6
500	0,09	17,7	0,14	27,5 – 33,3
550	–	–	0,14	28,4 – 38,0
600	0,07	25,0	–	–

У випадку збільшення густини струму в елементах вторинного струмопроводу зростають і втрати електричної енергії, а також питомі витрати на розплавлення. Для попередніх розрахунків орієнтовно можна користуватися умовними коефіцієнтами (табл. 6.2) збільшення втрат електричної енергії в елементах вторинного струмопроводу, зарахованих до 1 т виплавленого металу в разі збільшення густини струму понад економічне значення [3].

Додаткові втрати електричної енергії (ΔW , кВт·год/т), визначають з виразу:

$$\Delta W = k_{3B} \cdot \left(\frac{J_{\Phi}}{J_E} - 1 \right), \quad (6.1)$$

де k_{3B} – коефіцієнт збільшення втрат (з табл. 6.2); J_{Φ} – фактична густина струму, А/мм²; J_E – економічна густина струму, А/мм².

Таблиця 6.2 – Коефіцієнти збільшення втрат електричної енергії в елементах вторинного струмопроводу на 1 т виплавленого металу в разі збільшення густини струму

Елементи вторинного струмопроводу	Основний процес		Кислий процес	
	Фасонне лиття	Лиття злитків	Фасонне лиття	Лиття злитків
Печі місткістю 0,5 – 5 т				
Шини, кабелі й труби НН	25	28	23	26
Вугільні електроди	43,8	49	40,5	45,5
Графітовані електроди	28,1	31,5	25,8	29,3
Печі місткістю 8 – 20 т				
Шини, кабелі й труби НН, електроди	21,9	24,5	20,1	22,8

Завдання:

Визначити втрати електричної енергії для електричної печі заданої ємності, Параметри печі наведені в табл. 6.3 відповідно до варіанта.

Таблиця 6.3. – Вихідні дані до розрахунків

№ вар.	Місткість печі, т	Елементи вторинного струмопроводу	Тип процесу	Густина струму J_{ϕ} , А/мм ²
1	8	мідні водоохолоджувані труби	кислий процес фасонного лиття	2,2
2	10	мідні шини з площею перерізу на фазу понад 5000 А/мм ²	основний процес для виплавлення низьколегованої сталі в злитках	2,0
3	5	вугільні електроди діаметром 200 мм	основний процес для виплавлення низьколегованої сталі в злитках	0,2

Продовження табл. 6.3.

№ вар.	Місткість печі, т	Елементи вторинного струмопроводу	Тип процесу	Густина струму J_{Φ} , А/мм ²
4	3	графітовані електроди діаметром 300 мм	основний процес для виплавлення низьколегованої сталі в злитках	0,2
5	0,5	графітовані електроди діаметром 200 мм	основний процес фасонного лиття	0,3
6	5	вугільні електроди діаметром 300 мм	кислий процес фасонного лиття	0,14
7	15	мідні водоохолоджувані труби	кислий процес лиття злитків	5,1
8	18	мідні гнучкі кабелі з площею перерізу на фазу понад 4000 мм ²	основний процес лиття злитків	5,2
9	20	мідні шини з площею перерізу пакету на фазу понад 5000 мм ²	кислий процес фасонного лиття	5,5
10	1,5	графітовані електроди діаметром 200 мм	основний процес для виплавлення низьколегованої сталі в злитках	0,5

Приклад: Визначити втрати електричної енергії для електричної печі ємністю 5 т, що працює на основному процесі для виплавлення низьколегованої сталі в злитках. Густина струму становить $J_{\Phi} = 2,2$ А/мм² в мідних гнучких кабелях на стороні низької напруги.

Розв'язок. 1) Визначаємо економічну густину струму для мідних гнучких кабелів з площею перерізу на фазу до 4000 мм²: $J_E = 2$ А/мм². За даними табл.

6.2. визначаємо коефіцієнт збільшення втрат, що становить $k_{3B} = 28$.

2) Визначаємо втрати електричної енергії із виразу (6.1):

$$\Delta W = k_{3B} \cdot \left(\frac{J_{\Phi}}{J_E} - 1 \right) = 28 \cdot \left(\frac{2,2}{2} - 1 \right) = 2,8 \text{ кВт} \cdot \text{год/т.}$$

Контрольні запитання:

1. Охарактеризуйте заходи із заощадження електричної енергії в дугових сталеплавильних печах?
2. Які основні складові витрат електричної енергії в дугових сталеплавильних печах?
3. У чому полягає процес підготовки та попереднього підігрівання шихти?
4. Як зменшити електричні (теплові) втрати в дугових сталеплавильних печах?
5. Що належить до основних техніко-економічних показників дугових сталеплавильних печей?

Література: [1, с. 197–222; 10, с. 66–67].

Практичне заняття № 7. Вивчення методів заощадження електричної енергії в печах опору

Мета роботи: вивчення шляхів зменшення втрат електричної енергії в печах опору шляхом їх реконструкції.

Теоретичні відомості

Загальними елементами конструкцій печей опору є футерована камера нагрівання, нагрівні елементи, деталі та вузли для підтримання (пересування) виробів, які нагрівають.

Вогнетривкі матеріали призначені для виготовлення внутрішніх елементів камери печі. З цією метою, зазвичай використовують цеглу, фасонний камінь, шамот, магнезитові матеріали тощо.

Теплоізоляційні матеріали призначені для зменшення теплових втрат печі (кладка повинна мати значний тепловий опір), такими матеріалами можуть бути скло- чи мінеральна вата, скловолокно тощо.

Жаротривкі матеріали (наприклад, хромонікелеві сталі та спеціальні види чавуну) призначені для виготовлення подових плит, завантажувальних пристроїв, деталей транспортувальних пристроїв та кріплення різноманітних елементів.

Для виготовлення нагрівних елементів застосовують хромонікелеві (ніхроми), хромоалюмінієві та хромонікельалюмінієві сплави, тугоплавкі чисті метали (вольфрам, молібден, тантал, ніобій), неметалеві матеріали (карборунд, дисиліцид молібдену, графіт) тощо.

Встановлена потужність печі та відповідно споживана нею енергія залежать від температурного режиму обробки виробів, передбаченого технологічним процесом, тобто від циклу нагрівання виробу, який характеризує

режим роботи печі. Розрізняють три цикли нагрівання виробу: нагрівання без витримки, нагрівання з витримкою, нагрівання з витримкою із подальшим охолодженням (рис. 7.1). Охолодження виробу може відбуватися поза піччю.

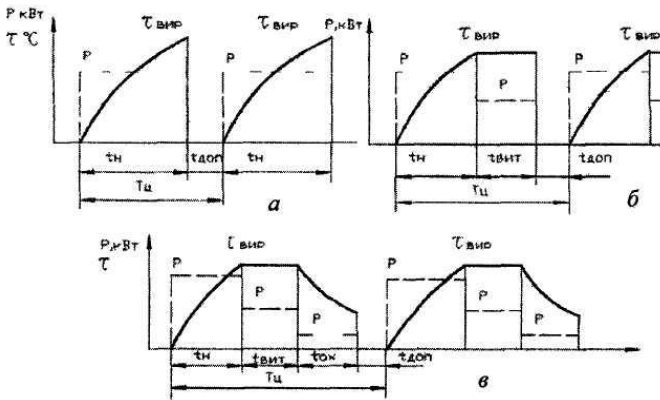


Рисунок 7.1 – Цикли роботи печей: а – нагрівання без витримки; б – нагрівання з витримкою; в – нагрівання з витримкою та подальшим охолодженням

Для печі періодичної дії витрата енергії за цикл роботи $Q_{Ц}$ (Дж) становитиме:

$$Q_{Ц} = Q_{КОР} + Q_{ДОП} + \sum Q_{ВТР} ,$$

де $Q_{КОР}$ – кількість теплоти, необхідна для нагрівання садки до потрібної температури, Дж; $Q_{ДОП}$ – кількість теплоти, необхідна для нагрівання допоміжних жаротривких пристроїв, Дж; $\sum Q_{ВТР}$ – сумарні теплові втрати печі за цикл роботи, Дж.

Споживану потужність печі (Вт) визначають з умови нагрівання завантаження:

$$P_{СПОЖ} = \frac{Q_H}{t_{Ц}} , \quad Q_H = Q_{КОР} + Q_{ДОП} + q_{ВТР} \cdot t_H ,$$

де t_H – тривалість періоду нагрівання завантаження, с; $q_{ВТР}$ – потужність теплових втрат через стінки печі за період нагрівання, Вт.

Тепловий ККД печі η_T (%) та питомі витрати електричної енергії w (кВт·год/кг) визначають виразами:

$$\eta_T = \frac{Q_{КОР}}{Q_H} \cdot 100 \% , \quad w = \frac{Q_H \cdot 10^{-6}}{3,6 \cdot G_3} ,$$

де G_3 – маса завантаження печі за один цикл, кг.

Для печей безперервної дії споживану потужність $P_{СПОЖ}$ (Вт) визначають:

$$P_{СПОЖ} = P_{КОР} + P_{ДОП} + k_B \cdot (\sum P_{ВТР.СТ} + P_{ВИПР}),$$

де $P_{КОР}$ – потужність, що витрачається на нагрівання виробів до потрібної (заданої) температури, Вт; $P_{ДОП}$ – потужність, що витрачається на нагрівання допоміжних пристроїв, Вт; $\sum P_{ВТР.СТ}$ – сумарна потужність теплових втрат через стінки печі, Вт; $P_{ВИПР}$ – потужність втрат випромінюванням через отвори печі, Вт; k_B – коефіцієнт неврахованих втрат, $k_B = 1,1 \div 1,3$.

Якщо піч має декілька зон, аналогічно визначають споживану потужність кожної зони, а результати підсумовуються. Тепловий ККД печі η_T (%) і питомі витрати електричної енергії w (кВт·год/кг) визначають виразами:

$$\eta_T = \frac{P_{КОР}}{P_{СПОЖ}} \cdot 100 \%, \quad w = \frac{P_{СПОЖ} \cdot 10^{-6}}{3,6 \cdot g},$$

де g – продуктивність печі, кг/год.

У більшості випадків печі опору непрямої дії отримують живлення від цехової мережі 380 В. До складу електрообладнання печі, окрім самої печі, як правило, входять допоміжні механізми з приводами, комплектні установки, давачі та виконавчі пристрої систем вимірювання і регулювання, а також трансформатори, якщо нагрівачі живляться регульованою напругою.

Повна витрата електричної енергії в печах опору складається із корисної витрати на нагрівання металу (або іншого матеріалу) та витрати на покриття втрат через стінки печі, під, кришку печі тощо:

$$W = a_0 \cdot t + a_1 \cdot G + a_2, \quad (7.1)$$

де a_0 – витрата енергії на покриття сумарних втрат тепла в середньому за одну годину, кВт; t – тривалість термообробки, год; a_1 – корисна витрата електричної енергії на 1 т садки, кВт·год; G – маса садки, т; a_2 – витрата електричної енергії на нагрівання тари, кВт·год.

Корисна витрата енергії на нагрівання виробів, кВт·год:

$$W_1 = c \cdot G \cdot (\tau_2 - \tau_1), \quad (7.2)$$

де c – питома теплоємність металу (змінюється залежно від температури, тому в розрахунках потрібно використовувати середні значення питомої теплоємності), кДж/(кг·К); G – маса металу, кг; τ_2 – кінцева температура нагрівання металу, К; τ_1 – температура повітря приміщення, де встановлена електропіч (початкова температура металу), К.

Тривалість нагрівання:

$$t = \frac{c \cdot G(\tau_2 - \tau_1)}{\alpha \cdot F(\tau_0 - \tau_2)}, \quad (7.3)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі стінки (внутрішньої поверхні), кДж/(м²·год·К); τ_0 – температура простору всередині печі, К; τ_2 – кінцева температура виробу, К; τ_1 – початкова температура виробу, К; F – активна поверхня виробів або тари, які обробляються, м².

Аналізуванню формул (7.1) – (7.3) показує, що можливими шляхами зниження питомих витрат електричної енергії на термічне оброблення в печах опору можуть бути:

- зниження теплових втрат шляхом покращення теплової ізоляції та герметичності печей;
- збільшення продуктивності печей;
- зменшення втрат на акумуляцію тепла та використання попереднього нагрівання виробів;
- раціоналізація електричних та технологічних режимів роботи печей.

Збільшення потужності печі. Збільшення потужності печі для виробів, процес термічного оброблення яких потребує нагрівання деталей до заданої температури (гартування, нормалізація, відпуск, нагрівання заготовок під кування або штампування), як правило, зменшує питомі витрати електричної енергії.

Продуктивність печі визначають з виразу, кг/год:

$$g = \frac{0,85 \cdot P_{ПЕЧИ} - P_{ВТР}}{w}, \quad (7.4)$$

де $P_{ПЕЧИ}$ – потужність печі, яку визначають за показами приладів, кВт; $P_{ВТР}$ – потужність теплових втрат печі (визначається за паспортними даними або дослідним шляхом), кВт; w – питомі витрати енергії, необхідні для нагрівання виробів до температури технологічного процесу, кВт·год/кг (рис. 7.2).

Питомі витрати електричної енергії на термічне оброблення виробів можна визначити із виразу, кВт·год/кг:

$$w = \frac{0,85 \cdot P_{ПЕЧИ}}{g} \quad (7.5)$$

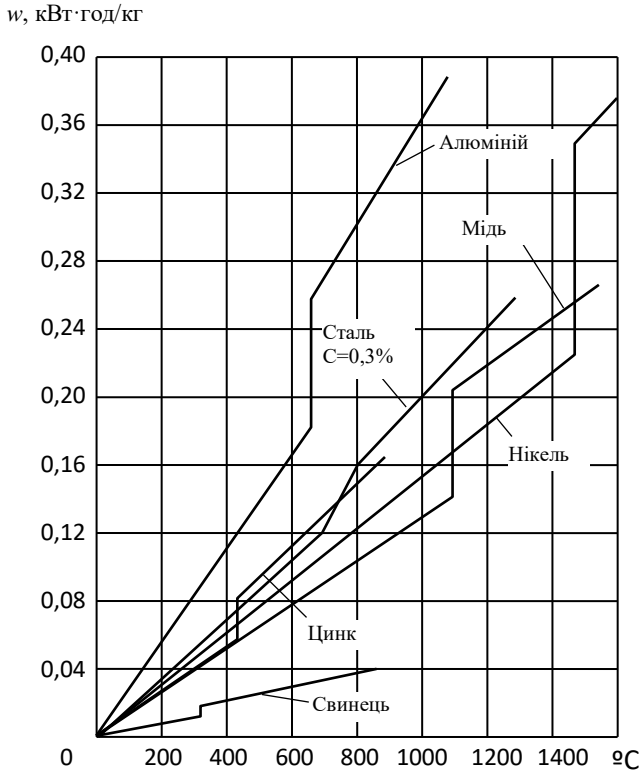


Рисунок 7.2 – Питомі витрати електричної енергії для нагрівання виробів до температури технологічного процесу

Завдання:

Визначити розмір заощадженої електричної енергії за рік у разі реконструкції печі для нагрівання сталевих виробів до температури t , °C шляхом збільшення її потужності з P_{n1} до P_{n2} (кВт). Потужність теплових втрат печі становить $P_{втр}$ (кВт), а річна продуктивність печі – G , т. Параметри печі наведені в табл. 7.1 відповідно до варіанта.

Таблиця 7.1. – Вихідні дані до розрахунків

№ вар.	Матеріал виробів	t , °C	P_{n1} , кВт	P_{n2} , кВт	$P_{втр}$, кВт	G , т
1	сталь	1000	35	42	11,5	750
2	нікель	900	25	35	11	670
3	свинець	720	24	31	6	910
4	мідь	850	22	32	9,5	810
5	алюміній	610	26	37	10,5	630
6	цинк	500	64	72	3	500
7	сталь	750	29	41	11,3	720
8	нікель	900	32	44	11,7	900
9	свинець	400	50	62	2	720
10	мідь	1250	43	55	11	840

Приклад: Визначити розмір заощадженої електричної енергії за рік у разі реконструкції печі для нагрівання сталевих виробів до температури 820°C шляхом збільшення її потужності з 30 до 42 кВт. Потужність теплових втрат печі становить 10 кВт, а річна продуктивність печі – 900 т.

Розв'язок. 1) За рис. 7.2 визначаємо питомі витрати енергії w , необхідні для нагрівання виробів до температури технологічного процесу 820°C та розраховуємо відповідну продуктивність печі за виразом (7.4):

$$g = \frac{0,85 \cdot 30 - 10}{0,162} = 95,7 \text{ кг/год.}$$

2) Розраховуємо питомі витрати електричної енергії відповідно до (7.5):

$$w_1 = \frac{0,85 \cdot 30}{95,7} = 0,266 \text{ кВт} \cdot \text{год/кг.}$$

3) Після реконструкції печі її продуктивність збільшиться до:

$$g = \frac{0,85 \cdot 42 - 10}{0,162} = 158 \text{ кг/год,}$$

а питома витрата становитиме:

$$w_2 = \frac{0,85 \cdot 42}{158} = 0,225 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{кг}.$$

4) Визначаємо значення річного заощадження електричної енергії у разі реконструкції печі:

$$\Delta W = 900 \cdot (w_1 - w_2) \cdot 10^3;$$

$$\Delta W = 900 \cdot (w_1 - w_2) \cdot 10^3 = 900 \cdot (0,266 - 0,225) \cdot 10^3 = 36,9 \text{ тис.кВт} \cdot \text{год}.$$

Контрольні запитання:

1. Які основні складові витрат електричної енергії в печах опору?
2. Як досягнути зниження теплових втрат в печах опору?
3. Як підвищити продуктивність електричних печей опору?
4. Які існують шляхи зменшення втрат електричної енергії на розігрівання печі?
5. Охарактеризуйте заходи із заощадження електричної енергії у печах опору.

Література: [1, с. 222–239; 3, с. 92–96; 4, с.16–21; 10, с. 65–66; 11, с. 238–242].

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАТЬ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Під час оцінювання знань здобувача вищої освіти враховується його робота впродовж семестру над практичними заняттями. Максимальну кількість балів здобувач вищої освіти може отримати за своєчасне виконання та захист практичних занять – 2 бали (максимум 14 балів):

2 бали – отримують здобувачі вищої освіти, які глибоко володіють матеріалом, чітко визначили його зміст; зробили глибокий системний аналіз, виявили нові ідеї та положення, що не були розглянуті, але суттєво впливають на зміст доповіді, надали власні аргументи щодо основних положень даної теми;

1 бал - отримують здобувачі вищої освіти, які виклали матеріал з обговорюваної теми, що доповнює зміст виступу, поглиблює знання з цієї теми та висловили власну думку.

0,5 балу - отримують здобувачі вищої освіти, які повністю виконали практичне завдання, але не надали ґрунтовних пояснень щодо проведених розрахунків.

Наявність виконаних та захищених практичних робіт є умовою допуску до підсумкового контролю з курсу "Енергозберігаючі режими електропостачання".

Отримані бали за практичні заняття є базовою складовою для формування загальної оцінки з дисципліни.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Соловей О.І. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П.Г. та ін. – М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.
2. Давидов О. Ю., Бялобржеський О. В. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського . – 2010. – № 3(62). – С. 132-136.
3. Канюк Г.І., Пугачова Т.М., Без'язичний В.Ф., Близниченко О.М., Шматков Д.І. Основи енерго- і ресурсозбереження: навчальний посібник. – Харків: друкарня «Мадрид», 2016. – 230 с.
4. Петрова К.Г. Комплексне регулювання режиму електронавантаження промислових споживачів / К.Г. Петрова, Б.С. Серебренніков // Промелектро. – 2014. – № 1. – С.16 – 21.
5. Соловей О. І. Промислові електротехнологічні установки: навч. посіб. / О. І. Соловей. – К.: Кондор, 2009. – 174 с.
6. Енергозбереження засобами промислового електропривода: навч. посібник / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
7. Разумний Ю.Т., Заїка В.Т., Степаненко Ю.В. Енергозбереження: Навч. посіб. - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. - 166 с.
8. Серебренніков Б.С. Управління режимом електроспоживання промислових споживачів з використанням технологічного ресурсу / Б.С. Серебренніков, К.Г. Петрова // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – № 1. – С. 70 – 76.
9. Олійник М. Й. Основи використання електричної енергії. Ч. I: навч. посіб. для студ. вузів: у 2 ч. / М. Й. Олійник, В. Г. Турковський. - Л.: Львівська політехніка. – 2008. – 168 с.
10. Олійник М. Й. Основи використання електричної енергії Ч. II: навч. посіб. для студ. вузів: у 2 ч. / М. Й. Олійник, В. Г. Турковський. – Л.: Львівська політехніка. – 2008. – 88 с.
11. Енергоефективність та енергозбереження: економічний, техніко-технологічний та екологічний аспекти: колективна монографія / Кол. авторів; за заг. ред. П. М. Макаренка, О. В. Калініченка, В. І. Аранчій. Полтава: ПП “Астра”, 2019. – 603 с.

ДОДАТОК. Титульний аркуш звіту з практичної роботи
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

ЗВІТ

з практичної роботи № 1

з курсу: **«Енергозберігаючі режими електропостачання»**
на тему: **«Визначення зменшення втрат електричної енергії за рахунок
вирівнювання графіка електричного навантаження»**

Виконав здобувач вищої освіти
групи ЕЕ-21 М спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Перевірила
к.т.н., доц. К. Петрова

Національна шкала _____

Кількість балів: _____

м. Кропивницький – 20__ рік