

МІНІСТРЕСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт з дисципліни
**“Енергозбереження в технологічних установках
енергоємних виробництв”**

для студентів спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка” (освітня програма
Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв)
денної форми навчання

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни “Енергозбереження в технологічних установках енергоємних виробництв” для студентів спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” (освітня програма – Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв) денної форми навчання / Укл.: В.В. Василевський. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 28 с.

Укладач: В.В. Василевський, к. т. н., старший викладач

Рецензент: М.О. Поляков, к. т. н., доцент

Відповідальний

за випуск: В.В. Василевський, к. т. н., старший викладач

Затверджено на засіданні
Кафедри «Електричні та
електронні апарати»
Протокол № 3 від 11.11.2019 р.

Рекомендовано до видання
НМК ЕТФ.
Протокол №4
від 21 листопада 2019 р.

ЗМІСТ

Практична робота № 1 Вибір оптимального режиму роботи трансформаторів.....	4
1.1 Короткі теоретичні відомості.....	4
1.2 Завдання.....	5
1.3 Контрольні запитання.....	8
Практична робота № 2 Вивчення методів заощадження електричної енергії в дугових сталеплавильних печах та печах опору.....	8
2.1 Короткі теоретичні відомості.....	8
2.2 Завдання 1.....	10
2.3 Завдання 2.....	11
2.4 Довідкова інформація для розрахунку	13
2.5 Контрольні запитання.....	14
Практична робота № 3 Вивчення методів заощадження електричної енергії шляхом компенсації реактивної потужності	15
3.1 Короткі теоретичні відомості.....	15
3.2 Завдання.....	17
3.3 Довідкова інформація для розрахунку.....	20
3.4 Контрольні запитання.....	22
Практична робота № 4 Заощадження електричної енергії за рахунок перемикання обмоток статора асинхронного двигуна за схемою «трикутник – зірка».....	23
1.1 Короткі теоретичні відомості.....	23
1.2 Завдання.....	24
1.3 Контрольні запитання.....	27
Рекомендована література.....	28

ПРАКТИЧНА РОБОТА №1

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Мета роботи : вивчення засобів мінімізації втрат електроенергії у трансформаторах шляхом правильного вибору потужності та забезпечення раціонального режиму їх роботи на підстанції.

1.1 Короткі теоретичні відомості

Силловий трансформатор – електростатичний пристрій, який є одним з найважливіших елементів систем електропостачання. При проектуванні та в умовах експлуатації передбачається економічно доцільний режим роботи трансформаторів, який полягає в наступному. За наявності на підстанції декількох трансформаторів, кількість працюючих трансформаторів визначається умовою мінімуму втрат потужності в цих трансформаторах при їх роботі за заданим графіком навантаження. При цьому є необхідним враховувати не тільки втрати активної потужності в самих трансформаторах, але і втрати реактивної потужності, які виникають в системі електропостачання від генераторів електростанцій, до трансформаторів, що розглядаються.

Криві зведених втрат потужності $\Delta P'_T$ залежно від значення потужності навантаження S_{HT} зображено на рис. 1.1.

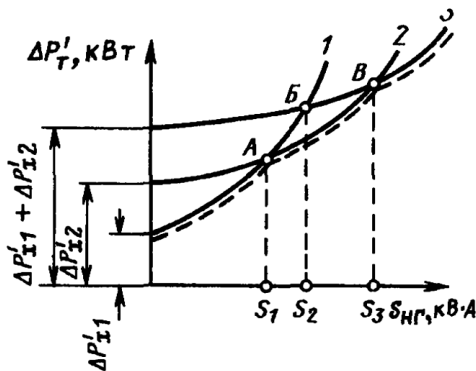


Рисунок 1.1 – Залежність зведених втрат активної потужності $\Delta P'_T$ в силових трансформаторах від зміни навантаження S_{HT}

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. $\Delta P'_{x1}$ і $\Delta P'_{x2}$ – зведені втрати неробочого ходу в трансформаторах 1 і 2.

1.2 Завдання

На підстанції встановлено два трансформатори, параметри яких наведено в табл. 1.1. Графік споживання потужності має два рівні (T_1 і T_2). Визначити значення заощадженої електричної енергії у разі вимкнення одного трансформатора в період спаду навантаження. Розрахувати значення реактивних втрат холостого ходу та короткого замикання.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані до розрахунку

№	ΔP_{HX} КВт	ΔP_{K3} КВт	I_{HX} %	T_1	T_2	k	$S_{НОМ}$ МВА	U_{K3}
1	13	55	0,8	10 МВт– 2000 год	4 МВт– 6760год	0,9	15	8
2	16	65	1.0	12МВт– 2000 год	6 МВт– 6760год	0,9	10	7.5
3	15	70	1,0	15 МВт– 2000 год	8 МВт– 6760год	0,9	15	9
4	15,5	25	0,8	16 МВт– 2000 год	4 МВт– 6760год	0,9	10	8.5
5	15	70	1,0	15 МВт– 2000 год	6 МВт– 6760год	0,9	10	7,5
6	13	55	0,8	10 МВт– 2000 год	4 МВт– 6760год	0,9	15	8
7	16	65	1.0	12МВт– 2000 год	6 МВт– 6760год	0,9	10	7.5
8	15	70	1,0	15 МВт– 2000 год	8 МВт– 6760год	0,9	15	9

Продовження табл. 1.1

9	15,5	25	0,8	16 МВт– 2000 год	4 МВт– 6760год	0,9	10	8.5
10	15	70	1,0	15 МВт– 2000 год	6 МВт– 6760год	0,9	10	7,5

1. Визначаємо потужність навантаження, за якою втрати в одному та двох трансформаторах є однаковими:

$$S_{PO31} = S_{НОМ} \cdot \sqrt{n \cdot (n-1) \cdot \frac{\Delta P'_{HX}}{\Delta P'_{K3}}}, MBA \quad (1.1)$$

де $\Delta P'_{HX}$ – зведені втрати потужності неробочого ходу трансформатора, кВт;

$\Delta P'_{K3}$ – зведені втрати потужності короткого замикання трансформатора, кВт.

2. Найбільше навантаження підстанції (на рівні з максимальним споживанням активної потужності) становить:

на першому рівні:

$$S_1 = \frac{T_1}{k}, MBA \quad (1.2)$$

де k – коефіцієнт потужності.

на другому рівні:

$$S_2 = \frac{T_2}{k}, MBA \quad (1.3)$$

Зробити висновок, щодо доцільності роботи лише одного трансформатора з двох за навантаженням на першому або другому рівні шляхом порівняння результатів (1.2) і (1.3) з (1.1).

3. Втрати короткого замикання в обмотках обох трансформаторів:

– за навантаженням на першому рівні:

$$\Delta P_{OB1} = \frac{\Delta P_{K3}}{n} \cdot \left(\frac{S_1}{S_{HOM}} \right)^2, \text{кВт} \quad (1.4)$$

– за навантаженням на другому рівні:

$$\Delta P_{OB2} = \frac{\Delta P_{K3}}{n} \cdot \left(\frac{S_2}{S_{HOM}} \right)^2, \text{кВт} \quad (1.5)$$

– за навантаження на другому рівні в одному трансформаторі:

$$\Delta P_{OB3} = \Delta P_{K3} \cdot \left(\frac{S_2}{S_{HOM}} \right)^2, \text{кВт} \quad (1.6)$$

4. Втрати електричної енергії в разі паралельної роботи двох трансформаторів на протязі року:

$$\Delta W_1 = \Delta P_{OB1} \cdot T_1 + \Delta P_{OB2} \cdot T_2 + n \cdot \Delta P_{HX} \cdot (T_1 + T_2), \text{кВт} \cdot \text{рік}$$

5. Втрати електричної енергії впродовж року в разі вимкнення одного трансформатору на час спаду навантаження:

$$\Delta W_2 = \Delta P_{OB2} \cdot T_1 + \Delta P_{OB3} \cdot T_2 + n \cdot \Delta P_{HX} \cdot T_1 + \Delta P_{HX} \cdot T_2, \text{кВт} \cdot \text{рік}$$

6. Значення заощадженої електричної енергії становить:

$$\Delta W = \Delta W_1 - \Delta W_2, \text{кВт} \cdot \text{рік}$$

7. Значення реактивних втрат неробочого ходу та короткого замикання:

$$\Delta Q_{HX} = \frac{S_{НОМ} \cdot I_{HX}}{100}, \text{кВар}$$

$$\Delta Q_{KЗ} = S_{НОМ} \cdot \frac{U_{KЗ}}{100}, \text{кВар}$$

1.3 Контрольні запитання

1.3.1 За рахунок чого можна мінімізувати втрати електричної енергії в трансформаторах?

1.3.2 Охарактеризуйте поняття втрат активної та реактивної потужності?

1.3.3 Охарактеризуйте поняття "коефіцієнт підвищення втрат"?

ПРАКТИЧНА РОБОТА №2 ВИВЧЕННЯ МЕТОДІВ ЗАОЩАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧАХ ТА ПЕЧАХ ОПОРУ

Мета роботи : вивчення засобів заощадження електричної енергії в дугових сталеплавильних печах та печах опору

2.1 Короткі 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.

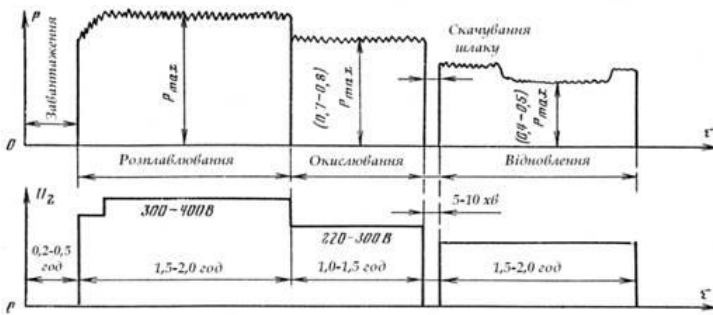


Рисунок 2.1 – Приблизний графік потужності й напруги печі в період плавлення при виплавці сталі основним процесом з повним окислюванням

Заходи щодо економії електроенергії в ДСП:

- Утримання печі й усього устаткування (особливо автоматичного регулятора режиму роботи ДСП) у справному технічному стані. Дотримання графіка ППР.
- Правильний вибір електричного режиму роботи печі: ступені напруги трансформатора і струму дуги.
- Скорочення простоїв печі, мінімальний час знаходження ДСП із відкритим при завантаженні склепінням.
- Оптимальне укладання шихти в завантажувальний кошик, підбір шихти за складом і розмірами.
- Періодична перевірка інфрачервоним термометром стану контактних з'єднань.
- Використання матеріалів високої якості для футерівки печі й електродів.

1. Підвищення коефіцієнта потужності і якості електроенергії шляхом використання конденсаторних батарей і фільтрів вищих гармонічних складових.

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

можливими шляхами зниження питомих витрат електричної енергії на термообробку в печах опору можуть бути:

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

2.2 Завдання 1

Варіант 1. 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 НН.

Варіант 2. Визначити втрати електричної енергії для електричної печі ємністю 2 т, що працює на кислому процесі для фасонного лиття. Густина струму становить $J_{\phi} = 2,5$ А/мм² у вугільних електродах діаметром 300 мм.

Варіант 3. Визначити втрати електричної енергії для електричної печі ємністю 10 т, що працює на основному процесі для виплавлення низьколегованої сталі в злитках. Густина струму становить $J_{\phi} = 2$ А/мм² у мідних шинах з площею перерізу на фазу понад 5000 А/мм².

Варіант 4. Визначити втрати електричної енергії для електричної печі ємністю 5 т, що працює на кислому процесі для виплавлення низьколегованої сталі в злитках. Густина струму становить $J_{\phi} = 0,5$ А/мм² у вугільних електродах діаметром 200 мм.

Варіант 5. Визначити втрати електричної енергії для електричної печі ємністю 5 т, що працює на основному процесі для виплавлення низьколегованої сталі в злитках. Густина струму становить $J_{\phi} = 1$ А/мм² у графітизованих електродах діаметром 300 мм.

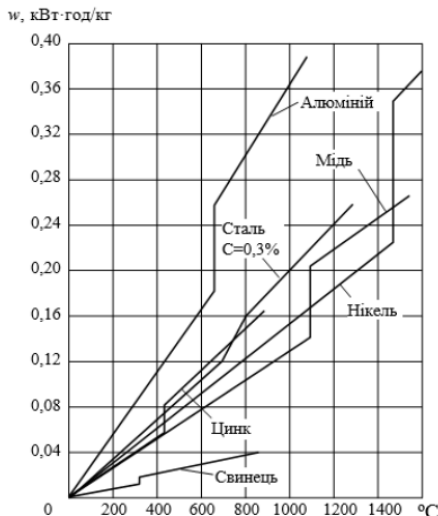


Рисунок 2.2 – Питомі витрати електричної енергії для нагрівання виробів до температури технологічного процесу

2.3. Завдання 2

Варіант 1. Визначити розмір заощадженої електричної енергії за рік у разі реконструкції печі опору для нагрівання сталевих виробів до температури 820 °C шляхом збільшення її потужності з 30 до 42 кВт. Потужність теплових втрат печі становить 12 кВт, а річна продуктивність печі – 900 т.

Варіант 2. Визначити розмір заощадженої електричної енергії за рік у разі реконструкції печі опору для нагрівання нікелевих виробів до температури 1200 °C шляхом збільшення її потужності з 30 до 42 кВт. Потужність теплових втрат печі становить 10 кВт, а річна продуктивність печі – 900 т.

Варіант 3. Визначити розмір заощадженої електричної енергії за рік у разі реконструкції печі опору для нагрівання сталевих свинцевих до 450 °C шляхом збільшення її потужності з 30 до 42 кВт. Потужність теплових втрат печі становить 8 кВт, а річна продуктивність печі – 900 т.

Варіант 4. Визначити розмір заощадженої електричної енергії за рік у разі реконструкції печі опору для нагрівання сталевих виробів

до температури 1000 °С шляхом збільшення її потужності з 30 до 42 кВт. Потужність теплових втрат печі становить 8 кВт, а річна продуктивність печі – 900 т.

Варіант 5. Визначити розмір заощадженої електричної енергії за рік у разі реконструкції печі опору для нагрівання алюмінієвих виробів до температури 850 °С шляхом збільшення її потужності з 30 до 42 кВт. Потужність теплових втрат печі становить 10 кВт, а річна продуктивність печі – 900 т.

За рис. 2.2 визначаємо питомі витрати енергії w необхідні для нагрівання виробів то температури технологічного процесу та розраховуємо відповідну продуктивність печі

$$g = \frac{0.85 \cdot P_{ПЕЧИ} - P_{ВТР}}{w} \quad (2.1)$$

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

Розраховуємо питомі втрати електричної енергії

$$w_1 = \frac{0.85 \cdot P_{ПЕЧИ}}{g} \quad (2.2)$$

Розраховуємо продуктивність печі і питомі втрати печі w_2 після її реконструкції за (2.1) і (2.2).

Визначаємо значення річного заощадження електричної енергії у разі реконструкції печі

$$\Delta w = 900 \cdot (w_1 - w_2) \cdot 10^3 \quad (2.3)$$

2.4 Довідкова інформація для розрахунку

Додаткові втрати електричної енергії визначаються з виразу

$$\Delta W = k_{зв} \cdot \left(\frac{J_{\phi}}{J_E} - 1 \right) \quad (2.4)$$

де $k_{зв}$ – коефіцієнт збільшення втрат;

J_{ϕ} – фактична густина струму, А/мм²;

J_E – економічна густина струму, А/мм².

На основі практичного досвіду роботи дугових сталеплавильних печей 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.

Таблиця 2.1 – Економічні густини струму в електродах

Діаметр електрода, мм	Вугільні електрооди		Графітізовані електрооди	
	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	–	–

Таблиця 2.2 – Коефіцієнти збільшення втрат електричної енергії в елементах вторинного струмопроводу на 1 т виплавленого металу в разі збільшення густини струму

Елементи вто- ринного 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 елект- роди	43,8	49	40,5	45,5
Графітовані еле- ктроди	28,1	31,5	25,8	29,3
Печі місткістю 8 – 20 т				
Шини, кабелі й труби НН, елект- роди	21,9	24,5	20,1	22,8

2.5 Контрольні запитання

2.7.1 Охарактеризуйте заходи з економії електроенергії у дуго-
вих сталеплавильних печах?

2.7.2 Охарактеризуйте заходи з економії електроенергії у печах
опору?

2.7.3 На які періоди з точки зору енергоспоживання поділяють
процес виплавки у дуговій печі?

ПРАКТИЧНА РОБОТА №3

ВИВЧЕННЯ МЕТОДІВ ЗАОЩАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ШЛЯХОМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Мета роботи: вивчення методів компенсації реактивної потужності у технологічних установках енергоємних виробництв

3.1 Короткі 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 технологічних установок енергоємних виробництв.

Основними споживачами реактивної потужності на підприємствах є:

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

Фізика процесу компенсації реактивної потужності:

Фаза струму, що проходить через котушку індуктивності, відстає від фази прикладеної напруги на 90° , а фаза струму, що проходить через конденсатор, випереджає фазу прикладеної до нього напруги 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.

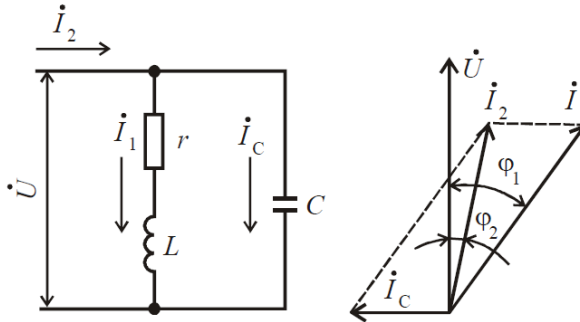


Рисунок 3.1 – Принцип компенсації реактивного струму навантаження

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 $\varphi = 0$.

Батареї конденсаторів набули на промислових підприємствах найбільшого поширення як засіб компенсації реактивній потужності. Застосовують два способи включення конденсаторних батарей: шунтові, які підключаються до шин підстанцій паралельно, і застосовуються для генерації реактивної потужності у вузлах мережі і батареї конденсаторів, які включають в лінії послідовно для зменшення реактивного опору ліній. Батареї конденсаторів комплектуються з окремих конденсаторів, сполучених послідовно і паралельно, в однофазному і трифазному виконання на номінальну напругу 0,22 – 10,5 кВ. В трифазному виконанні батареї конденсаторів можна включати сполученням «зірка» або «трикутник». При використанні системи управління для переключення батарей конденсаторів з «зірки» на «трикутник» та навпаки можливо включення батарей на напругу, яка перевищує номінальне значення в $\sqrt{3}$.

Перевагами конденсаторних батарей є простота в експлуатації за рахунок відсутності обертових частин, простота монтажних робіт,

за рахунок малої маси, малі втрати активної потужності. Застосовують конденсаторні батареї як регульовані (керовані) так і нерегульовані. У нерегульованих батареях число конденсаторів незмінне, а величина реактивної потужності залежить тільки від квадрата напруги. Сумарна потужність нерегульованих конденсаторних батарей не повинна перевищувати найменшого реактивного навантаження мережі. Але якщо вибрані компенсуючі пристрої постійно підключені до мережі, незалежно від режиму реактивних навантажень, то в періоди пониження навантажень надмірна реактивна потужність компенсуючих пристроїв, що виробляється, передаватиметься від споживача в енергосистему (перекомпенсація). При цьому 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 конденсаторні батареї чутливі до струмів комутації; регулювання ступенів БК негативно впливає на контактну апаратуру.

3.2 Завдання

Визначити, який варіант є економічно доцільнішим: збільшення потужності синхронного двигуна з Д1 до Д2 або відповідне збільшення потужності конденсаторних батарей. Технічні характеристики двигунів для кожного варіанту наведені в табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Завдання для розрахунку

№ варіанту	Тип двигуна Д1	Тип двигуна Д2	k_{31}	$K_{ДВ1}$, грн	$K_{ДВ2}$, грн
1	СДН-14-59-6	СДН-15-30-6	0,9	65320	73968
2	СДН-14-49-6	СДН-14-59-6	0,9	63880	75950
3	СДН-14-46-8	СДН-15-30-8	0,9	55300	68200
4	СДН-14-59-8	СДН-15-49-8	0,9	63200	77250

Продовження табл. 3.1

5	СДН-15-49-6	СДН-15-64-6	0,9	64920	72582
6	СДН-14-59-6	СДН-15-30-6	0,9	66845	74968
7	СДН-14-49-6	СДН-14-59-6	0,9	59325	65856
8	СДН-14-46-8	СДН-15-30-8	0,9	64852	78932
9	СДН-14-59-8	СДН-15-49-8	0,9	68236	79325
10	СДН-15-49-6	СДН-15-64-6	0,9	69458	75368

1. Різницю в реактивній потужності зазначених синхронних двигунів отримуємо з виразу:

$$Q_{CD} = k_{ПЕР2} \cdot \frac{P_{НОМ2} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{НОМ2}}{\eta_{\partial 2}} - k_{ПЕР1} \cdot \frac{P_{НОМ1} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{НОМ1}}{\eta_{\partial 1}} \quad (3.1)$$

Фактична споживана потужність двигуна 360 кВт становить:

$$P_{\phi} = P_{НОМ1} \cdot k_{31}, \kappa Bm, \quad (3.2)$$

Коефіцієнт завантаження двигуна:

$$k_{32} = \frac{P_{\phi}}{P_{НОМ2}}, \quad (3.3)$$

Активні втрати у двигунах:

$$\Delta P_1 = k_1' \cdot k_{ПЕР1} + k_2' \cdot k_{ПЕР1}^2, \kappa Bm \quad (3.4)$$

$$\Delta P_2 = k_2'' \cdot k_{ПЕР2} + k_2'' \cdot k_{ПЕР2}^2, \kappa Bm \quad (3.5)$$

Додаткові річні втрати електричної енергії у випадку заміни синхронного двигуна становлять

$$\Delta W_{ЕН1} = C_0 \cdot (\Delta P_2 - \Delta P_1) \cdot t_{3M} \cdot T, \text{ грн/рік} \quad (3.6)$$

де t_{3M} – тривалість зміни, год/добу, $t_{3M} = 7$ год/добу;

T – річна кількість діб роботи підприємства, діб/рік, $T = 300$ діб/рік;

C_0 – тарифу на електричну енергію $C_0 = 1,68$ грн/(кВт·год).

Капітальні витрати на заміну двигуна

$$K_1 = K_{ДВ2} - K_{ЛКДВ1}, \text{ грн}$$

де $K_{ЛКДВ1}$ – ліквідна вартість синхронного двигуна Д1 (25% від вартості двигуна Д1 $K_{ДВ1}$)

Замість підвищення потужності синхронного двигуна можна встановити конденсатори (табл. 3.4). Для під'єднання конденсаторів треба встановлювати комплектний розподільний пристрій. Таким чином, капітальні витрати встановлення конденсаторів становлять

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

Додаткові річні втрати енергії конденсаторів для $\rho_0 = 0,002 \text{ кВт} / \text{кВар}$ дорівнюють

$$\Delta W_{ЕН2} = \rho_0 \cdot Q_K \cdot t_{3М} \cdot T, \text{ грн/рік}$$

Експлуатаційні витрати за варіантами:

$$W_{ЕК1} = 0,048 \cdot K_1, \text{ грн/рік}$$

$$W_{ЕК2} = 0,048 \cdot K_2, \text{ грн/рік}$$

Амортизаційні витрати за варіантами:

$$W_{АМ1} = 0,044 \cdot K_1, \text{ грн/рік}$$

$$W_{АМ2} = 0,044 \cdot K_2, \text{ грн/рік}$$

Плата за кредит:

$$W_{KP1} = 0,1 \cdot K_1, \text{ грн/ рік}$$

$$W_{KP2} = 0,1 \cdot K_2, \text{ грн/ рік}$$

Зведені річні витрати за варіантами:

$$\Pi_1 = W_{EK1} + W_{AM1} + W_{KP1} + \Delta W_{EH1}, \text{ грн/ рік}$$

$$\Pi_2 = W_{EK2} + W_{AM2} + W_{KP2} + \Delta W_{EH2}, \text{ грн/ рік}$$

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

3.3 Довідкова інформація для розрахунку

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики синхронних двигунів СДН

Тип двигуна	Номінальна потужність		КПД, %	Коефіцієнт, кВт	
	Активна, кВт	Реактивна кВар		K_1	K_2
$U_H=6кВ, \cos\varphi = 0,9$					
1000 об/хв					
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
750 об/хв					
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

Продовження табл. 3.2

$U_H=10 \text{ кВ}, \cos\varphi = 0,9$					
1000 об/хв					
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
750 об/хв					
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

Таблиця 3.3 – Залежність коефіцієнта перевантаження за реактивною потужністю синхронних двигунів $k_{\text{ПЕР}}$ від напруги та коефіцієнта завантаження k_3

Серія, номінальна напруга і частота обертання двигуна	Відносна напруга на затискачах двигуна	Коефіцієнт перевантаження за реактивною потужністю $k_{\text{ПЕР}}$ 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	0,94
187 – 300 об/хв	1,1	0,86	0,88	0,9
100 – 167 об/хв	1,1	0,81	0,85	0,87
СДН, 10 кВ: 1000 об/хв	1,1	0,9	0,98	1,0
250 – 750 об/хв	1,1	0,86	0,9	0,92

Продовження табл. 3.3

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

Таблиця 3.4 – Блоки конденсаторів

Найменування блоку конденсаторів	$K_{\text{конд}}$, грн	$K_{\text{рп}}$, грн
БКЭ–1,05–252 У1	54258	88962
БК–1,05–500 У1	65922	88962
БК–2,1–500 У1	75222	88962
БК–1,05–750 У1	65852	88962
БК–2,1–750 У1	49255	88962

3.4 Контрольні запитання

3.6.1 Вкажіть недоліки та переваги використання блоків конденсаторів для компенсації реактивної потужності?

3.6.2 Охарактеризуйте фізику процесу компенсації реактивної потужності?

3.6.3 Охарактеризуйте принцип дії обертового компенсатору? Які переваги та недоліки має цей спосіб компенсації?

ПРАКТИЧНА РОБОТА №4

ЗАОЩАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗА РАХУНОК ПЕРЕМИКАННЯ ОБМОТОК СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА СХЕМОЮ «ТРИКУТНИК – ЗІРКА»

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

4.1 Загальні 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 у разі 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.

4.2 Завдання

Визначити доцільність перемикання зі схеми «трикутник» на схему «зірка» асинхронного двигуна, що працює з коефіцієнтом навантаження k_n . Номінальні данні двигуна наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні данні для розрахунків

Двигун	k_i	$P_{НОМ}$ кВт	$U_{НОМ}$ В	p	$\eta_{НОМ}$ %	$\cos \varphi$	$\lambda_M =$ $= M_K / M_{НОМ}$	f_1 Гц	n , об/хв	$\frac{R_1}{R_2}$
A355ML A12	0,3	110	380/ 660	6	0,94	0,75	2,2	50	493	1.95
5AM280 S4	0,3	110	380/ 660	2	0,951	0,87	2	50	1485	1.9
A280M2	0,3	132	380/ 660	1	0,946	0,90	3,5	50	2964	1.93
AIP280 M4	0,3	132	380/ 660	2	0,948	0,88	2,2	50	1480	1.85
AIP315 S2	0,3	160	380/ 660	1	0,946	0,92	2,2	50	2975	1.95
A315S2	0,3	160	380/ 660	1	0,956	0,87	3,3	50	2977	1.8
AIP315 M2	0,3	200	380/ 660	1	0,948	0,92	2,2	50	2975	1.9
AIC355 MB6	0,3	200	380/ 660	3	0,954	0,88	2,9	50	990	2
5AM250 M4	0,3	90	380/ 660	2	0,95	0,88	2,3	50	1485	1.97
A250M2	0,3	90	380/ 660	1	0,945	0,91	4,0	50	2960	1.88

1. Визначаємо номінальний струм двигуна, ковзання, швидкість обертання поля статора, номінальну швидкість та момент:

$$I_{1НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \eta_{НОМ} \cdot \cos \varphi_{НОМ}}, A$$

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (4.1)$$

$$S_{HOM} = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (4.2)$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p}, \text{ рад} / \text{с}$$

$$\omega_{HOM} = \omega_0 \cdot (1 - S_{HOM}), \text{ рад} / \text{с} \quad (4.3)$$

$$M_{HOM} = \frac{P_{HOM}}{\omega_{HOM}}, H \cdot \text{м} \quad (4.4)$$

2. Знаходимо струм намагнічування двигуна:

$$I_{\mu} = I_{1HOM} \cdot \left(\sin \varphi - \frac{\cos \varphi}{\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}} \right), A \quad (4.5)$$

3. Знаходимо повні, змінні та постійні витрати для номінального режиму роботи двигуна:

$$\Delta P_{HOM} = P_{HOM} \cdot \frac{1 - \eta_{HOM}}{\eta_{HOM}}, Bm \quad (4.6)$$

$$\Delta P'_{HOM} = M_{HOM} \cdot \omega_0 \cdot S_{HOM} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \right), Bm \quad (4.7)$$

$$K = \Delta P_{HOM} - \Delta P'_{HOM}, Bm \quad (4.8)$$

4. Розраховуємо реактивну потужність у номінальному режимі та в режимі неробочого ходу:

$$Q_{HOM} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{1HOM} \cdot \sin \varphi_{HOM}, \text{Var} \quad (4.9)$$

$$Q_0 = \frac{m \cdot P_{HOM}}{\eta_{HOM}}, \text{Var} \quad (4.10)$$

$$\text{де } m = 2,2 - 2,1 \cdot \cos \varphi_{HOM} = 0,31$$

5. Зменшення реактивної потужності $\Delta Q_{\Delta-Y}$ у разі перемикавання обмоток статора зі схеми "трикутник" на схему "зірка":

$$\Delta Q_{\Delta-Y} = Q_{\Delta} - \Delta Q_Y = 2 \cdot Q_0 / 3 - 2 \cdot k_H^2 \cdot \Delta Q_{HOM}, \text{Var}$$

6. Зменшення втрат активної потужності $\Delta P_{\Delta-Y}$ у разі перемикавання обмоток статора зі схеми "трикутник" до схеми "зірка":

$$\Delta P_{\Delta-Y} = \Delta P_{\Delta} - \Delta P_Y = 2 \cdot \Delta P_0 / 3 - 2 \cdot k_H^2 \cdot \Delta P_{HOM}, \text{Watt}$$

7. Загальне зменшення втрат потужності становитиме

$$\Delta P_{EK} = k_E \cdot \Delta Q_{\Delta-Y} + \Delta P_{\Delta-Y}, 3381, \text{Watt}$$

де k_E – коефіцієнт зменшення втрат потужності за рахунок зниження реактивної потужності.

8. Розраховуємо ККД двигуна η з відомим коефіцієнтом навантаження k :

$$\eta = \frac{k \cdot P_{HOM}}{k \cdot P_{HOM} + K + k^2 \cdot \Delta P'_{HOM}}.$$

За результатами розрахунку η для значень коефіцієнтів навантаження, наведених в табл. 4.2 побудувати залежність $\eta=f(k)$.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунків

k	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
$\eta, \%$							

9. Знайдемо значення коефіцієнту навантаження двигуна, за якого ККД має максимальне значення:

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{K}{\Delta P'_{ном}}}$$

4.3 Контрольні запитання

4.5.1 Охарактеризуйте заходи з економії електроенергії в двигунах?

4.5.2 За рахунок чого відбувається економія електроенергії при перемиканні обмоток двигуна?

4.5.3 Призначення автоматичних обмежувачів неробочого ходу двигунів?

Рекомендована література

1. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию / под общ. редакцией А.А. Федорова, Т.2 Электрооборудование . –М.: Энергоатомиздат, 1987. – 592 с.
2. 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.
3. Энергозбереження засобами промислового електропривода: навч. посібник / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
4. Копытов Ю. В. Экономия электроэнергии в промышленности: справочник / Ю. В. Копытов, Б. А. Чуланов. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 112 с.
5. Климова Г.Н. Элементы энергосбережения в электроснабжении промышленных предприятий: учебное пособие / Г.Н. Климова, А.В. Кабышев. – Томск: Изд–во Томского политехнического университета, 2008. – 185 с.
6. Вагин Г.Я. Экономия энергии в промышленности: Учеб. пособие / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов. – Нижегород. гос. техн. ун–т., НИИЦЭ. Н. Новгород, 1998. 220 с.
7. 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.
8. Електропостачання та електроспоживання – Енергозбереження в дугових електропечах [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.patriot-nrg.ua/ukr/savings/view/17/>.