



Національний Міністерство освіти і науки України  
Національний університет водного господарства та  
природокористування

Навчально-науковий інститут автоматики, кібернетики  
та обчислювальної техніки

Кафедра автоматизації, електротехнічних  
та комп'ютерно-інтегрованих технологій

**04-03-270М**

### **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни

#### **«ОСНОВИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ»**

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за  
освітньо-професійною програмою «Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології» спеціальності 151 «Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології»  
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-  
методичною радою з якості  
ННІАКОТ  
Протокол № 4 від 11.02.2021 р.

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Основи енергетичного менеджменту» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Давиденко Н.В. – Рівне : НУВГП, 2021. – 21 с.

**Укладач:**

Давиденко Н. В., кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**Відповідальний за випуск:** Древецький В. В., доктор технічних наук, професор, зав. кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

**Керівник групи забезпечення** освітньо-професійної програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Клепач М. М., кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

UNICHECK ID 1006581614 від 18.02.2021

© Н. В. Давиденко, 2021

© НУВГП, 2021



	Стор.
ВСТУП .....	4
Тема 1. Аналіз ефективності енергоспоживання та енерговитрат промислових об'єктів .....	5
1.1 Енергетичний баланс та його аналіз .....	5
1.2 Розрахунок витрат на електроенергію .....	6
1.3 Аналіз тенденцій щодо ефективності енергоспоживання .....	7
1.4 Практичні завдання .....	8
Тема 2. Основи забезпечення ефективного енергопостачання .....	12
2.1 Підвищення ефективності режимів електропостачання .....	12
2.2 Практичні завдання .....	13
Тема 3. Забезпечення ефективного енергоспоживання в електротехнічних та енерготехнологічних установках .....	15
3.1 Забезпечення ефективного споживання електричної енергії у двигунах .....	15
3.2 Практичні завдання .....	17
Тема 4. Вибір енергозберігаючого обладнання і технологій .....	18
4.1 Обґрунтування рішень про вибір обладнання .....	18
4.2 Практичні завдання .....	20
Перелік літератури .....	21



## Вступ

Метою вивчення дисципліни є підготовка висококваліфікованого фахівця, який досконало володіє методами енергетичного обстеження та управління енергоспоживанням в умовах промислових та непромислових об'єктів, необхідними для розв'язку сучасних задач раціонального використання енергоресурсів та зниження кінцевого енергоспоживання.

Предметом вивчення навчальної дисципліни є теоретичне уявлення про методи та способи управління енергоспоживанням промислових та непромислових об'єктів.

Основні завдання навчальної дисципліни полягають у формуванні знань про використання методів виявлення перевитрат енергії з метою застосування сучасних енергозберігаючих режимів та технологій; здобутті навичок у застосуванні набутих знань при вирішенні практичних завдань управління енергоспоживанням в реальних умовах.

Одним з основних завдань виконання практичних робіт є закріплення у студентів знань теоретичного курсу та здобуття навичок їх застосування для вирішення практичних завдань. Крім того, вирішення практичних завдань дає змогу краще зрозуміти принципи планування та аналізу енергоспоживання об'єкту, планування енергозберігаючих заходів та оцінки їх ефективності.

### 1.1 Енергетичний баланс та його аналіз

Для організації робіт з економії енергії необхідно знати її розподіл як по підприємству так і по окремих технологіях та агрегатах.

Енергобаланс – система показників, що відображають кількісну відповідність між надходженням та витратою всіх видів енергетичних ресурсів на об'єктах.

Енергобаланс складається з двох частин: прихідної та витратної. В прихідній частині енергобалансу вказується енергія або потужність, що надходить в систему. У витратній частині вказуються корисні витрати енергії і втрати енергії (механічні і електричні) за окремими видами споживання або з розшифруванням окремих витрат.

Електробаланс відображає відповідність надходжень та витрат в частині використання електричної енергії. Електробаланс дозволяє виявити втрати та оцінити ефективність того чи іншого заходу з економії електроенергії.

Існують кілька видів енергобалансів: фактичні, нормалізовані та перспективні. Фактичні відображають виробничі умови на об'єкті. Нормалізовані враховують оптимальні умови роботи обладнання з мінімальними механічними та електричними втратами та розраховуються на основі питомих норм витрат енергії. Перспективні складаються на основі планованого на перспективу розвитку виробництва, його якісних змін і впровадження нової техніки та технологій.

Для побудови фактичного електробалансу враховують втрати електроенергії в трансформаторах та лініях електропередачі.

Методика побудови нормалізованого електробалансу передбачає урахування генерування реактивної електроенергії, що включає генерування батареями конденсаторів 0,4 кВ, 10 кВ, високовольтними синхронними двигунами 10 кВ, а також реактивну енергію, спожиту з енергосистеми. Нормалізований баланс електроенергії має враховувати втрати активної електроенергії в пристроях компенсації.

Енергобаланс представляють у вигляді таблиць, діаграм та графіків.

Енергетичний баланс у вигляді таблиць дає змогу одночасно порівнювати його складові, як у іменованих одиницях так і у процентах.

Графічне зображення енергетичних балансів у вигляді діаграм дозволяє здійснювати наочне відображення частки споживання енергії у відсотках. Для порівняння частки споживання кількох енергоносіїв одним об'єктом за певний проміжок часу використовують колові

секторні діаграми; односмугові діаграми; стовпчикові діаграми. Для порівняння частки споживання за призначенням одного виду енергоносія окремими об'єктами або підприємством загалом - балансові діаграми; колові секторні діаграми; односмугові діаграми; стовпчикові діаграми.

Для складання карти потоків електроенергії на підприємстві потрібно визначити споживання електроенергії його окремими підрозділами. Річне споживання електроенергії цехом [1]:

$$W_i = P_i \cdot T_{\max}, \quad (1)$$

$$V_i = Q_i \cdot T_{\max}, \quad (2)$$

де  $P_i$  та  $Q_i$  – відповідно активна і реактивна потужності, які споживають цехи або підрозділи, кВт та кВАр;  $T_{\max}$  – кількість годин використання максимуму навантаження, год.

## 1.2 Розрахунок витрат на електроенергію

У випадку розрахунку за спожиту електричну енергію згідно одноставкового тарифу:

$$\Pi = \left[ \sum_{i=1}^n P_i \cdot T \right] \cdot \alpha \quad (3)$$

$$\Pi = W_a \cdot \alpha \quad (4)$$

де  $P_1$  – спожита потужність, кВт;  $\alpha$  - тариф за електричну енергію, грн/(кВт·год);  $W_a$  – спожита електроенергія, кВт·год.

У випадку розрахунку за спожиту електричну енергію згідно одноставкового тарифу, диференційованого по зонах доби:

$$\Pi = \left[ \sum_{i=1}^n P_{i1} \cdot T_1 \right] \cdot \beta_1 + \left[ \sum_{i=1}^m P_{i2} \cdot T_2 \right] \cdot \beta_2 + \left[ \sum_{i=1}^k P_{i3} \cdot T_3 \right] \cdot \beta_3 \quad (5)$$

$$\Pi = W_1 \cdot \beta_1 + W_2 \cdot \beta_2 + W_3 \cdot \beta_3 \quad (6)$$

де  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – тарифи за електричну енергію відповідно в пікову, напівпікову та нічні зони, грн/(кВт·год);  $P_1, P_2, P_3$  – потужність, яка споживається відповідно в пікову, напівпікову та нічну зони, кВт;  $T_1, T_2, T_3$  – час роботи установок відповідно в пікову, напівпікову та нічну зони, год. Тривалість пікової, напівпікової та нічної зон протягом доби становить:  $T_1 = 8$  годин (з 23.00 до 7.00),  $T_2 = 11$  годин (з 7.00 до 8.00; з 11.00 до 20.00; з 22.00 до 23.00),  $T_3 = 5$  годин (з 8.00 до 11.00; з 20.00 до 22.00).

### 1.3 Аналіз тенденцій щодо ефективності енергоспоживання

Для оцінки ефективності електроспоживання визначають різницю фактичних  $y_n$  і планових  $\hat{y}_{n(g)}$  його значень:

$$\Delta y_{n(g)} = y_n - \hat{y}_{n(g)}. \quad (7)$$

Рівень перевитрат (або економії) виражають у відсотках [2]:

$$\delta = \frac{\Delta y_{n(g)}}{\hat{y}_{n(g)}} \cdot 100 \quad (8)$$

Виявлення не випадковості варіації рівня ефективності енергоспоживання забезпечують методи статистичного контролю якості, зокрема, контрольні карти кумулятивних сум (CUSUM) або Шухарта.

Аналіз ефективності енергоспоживання за допомогою графіка CUSUM ґрунтується на поступовому визначенні та накопиченні відхилень між фактичними та плановими обсягами електроспоживання на об'єкті - кумулятивної суми відхилень  $\Sigma \Delta y_{n(g)}$ , розрахованих протягом контрольного періоду з урахуванням знаку окремих складових (економія або перевитрата електроенергії).

Контрольна карта Шухарта має центральну лінію (CL), що відповідає опорному значенню контролюваного показника, в якості якого використовують середнє арифметичне статистичного показника [3, 4], а також дві статистично визначені (за правилом «трьох сігм») контрольні межі: верхню ( $U_{CL}$ ) і нижню ( $L_{CL}$ ), розташовані по обидва боки від центральної лінії на відстані  $3\sigma$ , де  $\sigma$  - стандартне відхилення

Вибіркова середня - середнє арифметичне значення ознаки вибіркової сукупності:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i x_i}{n}. \quad (9)$$

Вибіркова дисперсія - середнє арифметичне квадратів відхилення спостережуваних значень ознаки від їх середнього значення:

$$D(x) = \sigma^2(x) = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2}{n}. \quad (10)$$

Вибіркове середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)}. \quad (11)$$

Межі на відстані  $\pm 3\sigma$  від центральної лінії показують, що приблизно 99,7% значень статистики потраплять в ці межі за умови, що процес знаходиться в статистично керованому стані [3, 4]. Додатково для попередження про наближення виходу процесу зі стану статистичної

керованості на контрольній карті встановлюють межі на відстані  $\pm 2\sigma$  (попереджувальні).

## 1.4 Практичні завдання

### Задача 1.

Скласти карту потоків електроенергії промислового підприємства. Число годин роботи обладнання – 3659 год.

Таблиця 1

Вихідні дані

№ п/п	Назва підрозділу	$P_p$ , кВт	$Q_p$ , кВАр
1	Інструментальний цех	548,41	383,31
2	Термічний цех	1928,4	1124,45
3	Механічний цех	172,61	166,05
4	Експериментальний цех	387,11	378,79
5	Ремонтний цех	279,11	18,79
6	Склад	72,61	516,05
7	Адміністративний корпус	48,41	38,31

### Задача 2.

Скласти балансну діаграму електроспоживання офісної будівлі

Таблиця 2

Вихідні дані

Найменування обладнання	Встановлена потужність одиниці обладнання, кВт	Кількість одиниць, шт.	Тривалість роботи, год/міс
<b>Освітлення</b>			
лампи денного світла	0,04	4408	105
лампи денного світла	0,02	304	105
лампи розжарювання	0,075	34	105
лампи розжарювання	0,06	91	105
<b>Офісна техніка</b>			
комп'ютери	0,5	132	84
принтер	0,1	25	16
ксерокс	0,5	12	40
сканер	0,1	3	12
<b>Побутові прилади</b>			
кондиціонери	1	14	0
електричні обігрівачі	1	10	21
холодильник	0,25	12	410
мікрохвильова піч	0,5	4	8



**Задача 3.**

Скласти фактичний енергобаланс офісної будівлі

Таблиця 3

Вихідні дані

Найменування обладнання	Загальне електроспоживання	
	Грудень	Червень
освітлення	6082,02	2432,808
Офісна техніка	2986,88	2293,88
Побутові прилади	1334	784,4
Лабораторні стенди	940,8	940,8
АТС	1860	1800

У трансформаторному пункті, від якого живиться будівля, знаходяться 2 трансформатори ТМ 630/10 з наступними параметрами:  $S_n = 630$  кВА  $U_{вн} = 10$  кВ  $U_{нн} = 0,4$  кВ,  $P_x = 1100$  Вт  $P_k = 8100$  Вт  $U_k = 5,5\%$   $I_x = 1,5\%$ . Фактичне навантаження об'єкту  $P = 150,4$  кВт.

**Задача 4.**

Скласти електробаланс зварювальної дільниці механічного цеху, що складається із 4-х зварювальних трансформаторів: ТС-500 – 1 шт; СТН-700 – 1 шт; СТЭ-24 – 2 шт. Середньодобові витрати електродів складають 85 кг. Вторинна напруга  $U_2 = 30$  В. Зварювання відбувається електродами типу АНО-1, з коефіцієнтом на плавки  $\alpha_n = 15$  г/А.г, втрати електродного проводу складають 2%. Норма витрат електроенергії при ручному дуговому зварюванні змінним струмом складають 3 кВт.г/кг.

Технічні характеристики і час роботи протягом доби зварювальних трансформаторів зведені в таблицю.

Таблиця 4

Вихідні дані

Тип трансформатора	$I_{зв}$	$U_2$	$\Delta P_{xx}$	Час роботи протягом доби, год.	
				В холосту	під навантаженням
ТС-500	200	30	0,74	3,2	5,0
СТН-700	200	30	1,08	2,5	3,5
СТЭ-24	300	30	0,19	8,5	8,2

**Задача 5.**

Виконати графічний аналіз динаміки енергоспоживання об'єкту.



Вихідні дані

Вид енергоносія	Річне споживання, нат.од				
	Рік 1	Рік 1	Рік 1	Рік 1	Рік 1
Електроенергія, кВт/год	13198177	12581340	11993794	11881340	11293794
Газ побутовий, тис.м.куб	3609	3491	3457	3441	3357
Газ технологічний, тис.м.куб	1595	1213	677	613	607
Вода, м.куб	129622	124687	107743	104687	101743

**Задача 6.**

Для промислового підприємства, що належить до II класу напруги, визначити доцільність переходу з однозонного тарифу на тризонний. Добовий графік навантаження промислового підприємства наведено в таблиці.

Таблиця 6

Добовий графік навантаження промислового підприємства

Години доби	Активна потужність, кВт	Зона тарифу	Години доби	Активна потужність, кВт	Зона тарифу
0.00–1:00	6600	Нічний час	12.00–13:00	8600	
1:00–2:00	5350		13.00–14:00	9850	
2.00–3:00	6700		14.00–15:00	8130	
3.00–4:00	6760		15.00–16:00	8290	
4.00–5:00	6670		16.00–17:00	4900	
5.00–6:00	6380		17.00–18:00	11940	
6.00–7:00	5850		18.00–19:00	8500	
7.00–8:00	5360	Напівпік	19.00–20:00	8030	Пік
8.00–9:00	4370	Пік	20.00–21:00	5300	
9.00–10:00	7210		21.00–22:00	7560	
10.00–11:00	7670		22.00–23:00	3220	
11.00–12:00	8350	Напівпік	23.00–24:00	8150	Нічний час

**Задача 7.**

Виконати порівняльну характеристику енерговитрат з урахуванням різних тарифів на електроенергію

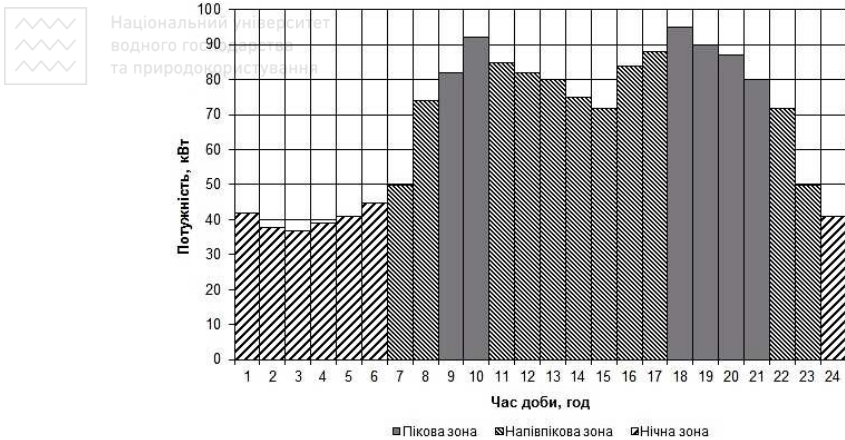


Рис. 1 - Добовий графік споживання активної потужності

### Задача 8.

Виконати характеристику тенденції зміни у часі (накопичення) результатів енергоощадження, фактично досягнутих на об'єкті, використовуючи контрольну карту кумулятивних сум.

Таблиця 8

#### Вихідні дані

№ доби	$W_{\text{факт}}$ , кВт·год/добу	$W_{\text{пр}}$ , кВт·год/добу	$\Delta W$ , кВт·год/добу
1	817	955,15	-138,15
2	983	979,69	3,31
3	1101	987,87	113,13
4	1156	1004,23	151,77
5	947	1020,59	-73,59
6	1152	1045,13	106,87
7	890	1053,31	-163,31

### Задача 9.

Розрахувати контрольні та попереджувальні межі діапазону допустимих значень енергоспоживання шахтним конвеєром за даними вимірювань (табл. 9). Номінальне значення витрати енергії  $a=1$  кВт·год/(т·км), імовірність появи помилки  $\alpha=0,01$ .

Таблиця 9

#### Витрати енергії шахтним конвеєром

Номер проби	1	2	3	4	5	6	7
Витрати енергії, кВт·год/(т·км)	0,98	1,1	1,2	1,15	0,88	1,03	1,05



## Тема 2. Основи забезпечення ефективного енергопостачання

водного господарства  
та природокористування

### 2.1 Підвищення ефективності режимів електропостачання

При роботі одного трансформатора при навантаженні  $S$  втрати в трансформаторі [5, 6]:

$$\Delta P_1 = \Delta P_{x.x.} + \Delta P_{к.з.} \frac{S^2}{S_H^2}, \quad (12)$$

де  $\Delta P_x$  – втрати холостого ходу, кВт;  $\Delta P_k$  – втрати короткого замикання, кВт.

Втрати при тому ж навантаженні  $S$ , але при роботі на двох трансформаторах:

$$P_2 = 2\Delta P_x + 2\Delta P_k \left(\frac{S}{2}\right)^2 \frac{1}{S_H^2}. \quad (13)$$

Критичне навантаження при якому втрати в обох випадках будуть рівні:

$$S_{кр} = S_H \sqrt{2 \frac{\Delta P_x}{\Delta P_k}}. \quad (14)$$

При  $S > S_{кр}$  доцільною є робота двох трансформаторів, а при  $S < S_{кр}$  – одного.

При роботі одного трансформатора при загальному навантаженні в межах від  $S_{кр} < S < S_{ном}$  збільшення втрат потужності:

$$\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = 0,5\Delta P_k \left(\frac{S}{S_H}\right)^2 - \Delta P_x \quad (15)$$

і втрат електроенергії:

$$\Delta W = \left[ 0,5\Delta P_k \left(\frac{S}{S_H}\right)^2 - \Delta P_x \right] t, \quad (16)$$

де  $t$  – час роботи в нееконічному режимі, год.

При роботі двох трансформаторів при загальному навантаженні в межах від  $0 < S < S_{кр}$  [5, 6]:

$$\Delta P = \Delta P_2 - \Delta P_1 = \Delta P_x - 0,5\Delta P_k \left(\frac{S}{S_H}\right)^2; \quad (17)$$

$$\Delta W = \left[ \Delta P_x - 0,5\Delta P_k \left(\frac{S}{S_H}\right)^2 \right] t. \quad (18)$$

При передачі потужності  $S$  по одному блоку лінія - трансформатор втрати в ньому:

$$\Delta P_1 = \Delta P_x + \Delta P_k \left( \frac{S}{S_n} \right)^2 + \frac{r_0 l}{U^2} \cdot 10^3 \cdot S^2, \quad (19)$$

де  $\Delta P_x$  и  $\Delta P_k$  – втрати холостого ходу і короткого замикання в трансформаторах, кВт;  $S_n$  – номінальна потужність трансформатора, МВА;  $S$  – потужність навантаження, МВА;  $r_0$  – питомий опір лінії, Ом/км;  $l$  – довжина лінії, км;  $U$  – номінальна напруга лінії, кВ.

При передачі тієї ж потужності по двох блоках лінія-трансформатор втрати:

$$\Delta P_2 = 2\Delta P_x + 2\Delta P_k \left( \frac{S}{2S_n} \right)^2 + 2 \frac{r_0 l}{U^2} \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{S}{2} \right)^2. \quad (20)$$

Позначимо

$$a = \frac{r_0 l}{U^2} \cdot 10^3. \quad (21)$$

Тоді, критичне навантаження:

$$S'_{кр} = S_n \sqrt{2 \frac{\Delta P_x}{\Delta P_k + a S_n^2}}, \quad (22)$$

При  $S > S'_{кр}$  доцільною є робота двох блоках лінія-трансформатор, при  $S < S'_{кр}$  – на одному.

Інакше при відключенні другого блоку лінія-трансформатор втрати потужності збільшаться на величину:

$$\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = 0,5\Delta P_k \left( \frac{S}{S_n} \right)^2 + 0,5aS^2 - \Delta P_x \quad (23)$$

Втрати електроенергії зростуть на величину

$$\Delta W = \left[ 0,5\Delta P_k \left( \frac{S}{S_n} \right)^2 + 0,5aS^2 - \Delta P_x \right] t. \quad (24)$$

## 2.2 Практичні завдання

### Задача 10.

У цеховій підстанції встановлено два трансформатори типу ТМ–2500/10 із паспортними даними:  $\Delta P_x = 6,4$ кВт,  $\Delta P_k = 25$ кВт,  $u_k = 5,5\%$ ,  $I_x$ .

$= 0,1 \%$ ,  $S_n = 2500$  кВА. Визначити економічно доцільний режим роботи двох трансформаторів.

### Задача 11.

На ПС 35/10 встановлено два трансформатори номінальною потужністю 10 МВА кожен з параметрами:  $\Delta P_x = 5,14$  кВт,  $\Delta P_k = 65$  кВт,  $u_k = 5,7 \%$ ,  $I_x = 8,0 \%$ . Графік споживання активної потужності має два рівні: 10 МВт – 2000 год ( $T_1$ ) та 5 МВт – 6760 год ( $T_2$ ). Коефіцієнт потужності постійний та становить 0,9. Визначити потужність споживання, за якої доцільно вимикати один трансформатор (без урахування додаткових втрат за передавання реактивної потужності), та економічний ефект від вимкнення одного трансформатора в період спаду навантаження.

### Задача 12.

На головній понижувальній підстанції промислового підприємства встановлено два силових трансформатора номінальною потужністю  $S_{ном}$ , які включені за схемою, наведеною на рис. 2.

Підприємство працює за тризмінним графіком. У зимовий період навантаження підприємства протягом 8 год. на добу не перевищує  $S_z$ , а в літній період навантаження протягом 8 год. на добу не перевищує  $S_l$ . Визначити оптимальний режим роботи силових трансформаторів в зимовий і літній періоди. Знайти збільшення втрат потужності та електроенергії в трансформаторах при відхиленні від оптимального режиму роботи.

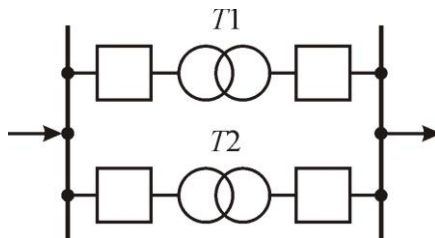


Рис.2 - Паралельна робота трансформаторів ГПП

Визначити оптимальні режими роботи трансформаторів та збільшення втрат потужності та електроенергії в них при відхиленні від оптимального режиму роботи стосовно зазначеного навантаження при включенні їх за схемою блоків лінія - трансформатор (рис. 3). Лінії електропередачі на напругу 110 кВ протяжністю  $l$  виконані проводом марки АС.

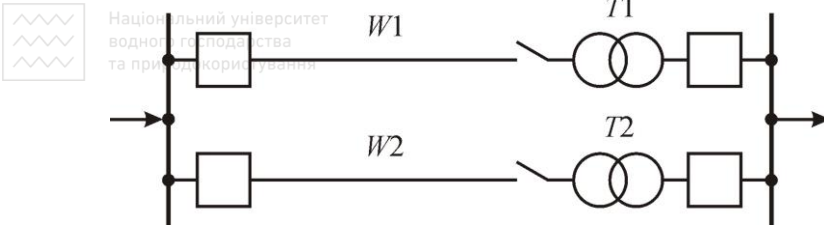


Рис. 3 - Паралельна робота блоків лінії – трансформатор

Таблиця 10

Вихідні дані

$S_{н},$ МВА	$\Delta P_{х},$ кВт	$\Delta P_{к},$ кВт	$S_{з},$ МВА	$S_{л},$ МВА	$l,$ км	$r_0,$ Ом/км
6,3	10	44	5	3	45	0,428

### Тема 3. Забезпечення ефективного енергоспоживання в електротехнічних та енерготехнологічних установках

#### 3.1 Забезпечення ефективного споживання електричної енергії у двигунах

##### Впровадження енергоефективних двигунів

В енергоефективних двигунах за рахунок збільшення маси активних матеріалів (міді, сталі) та застосування високоякісної ізоляції, а також оптимізації конструкції зменшуються втрати електричної енергії, що обумовлює збільшення їх ККД.

ККД енергоефективних двигунів [5]:

$$\eta_{\text{еф}} = \frac{\eta_{\text{ст}}}{1 - e(1 - \eta_{\text{ст}})}, \quad (25)$$

де  $e$  – відносне зниження сумарних втрат у двигуні;  $\eta_{\text{ст}}$  – ККД стандартного двигуна.

Відносне зниження сумарних втрат у двигуні

$$e = \frac{\Delta P_{\text{ст}} - \Delta P_{\text{еф}}}{\Delta P_{\text{ст}}}, \quad (26)$$

де  $\Delta P_{\text{ст}}$ ,  $\Delta P_{\text{еф}}$  – втрати потужності відповідно в стандартному та енергоефективному двигунах.

Значення заощадженої електроенергії у разі використання енергоефективного двигуна, що працює зі змінним навантаженням:

$$\Delta W = \left( \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\eta_{i,\text{ст}}} - \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\eta_{i,\text{еф}}} \right) \cdot t_i, \quad (27)$$

де  $P_i$  – потужність двигуна на  $i$ -й ділянці роботи, кВт;  $\eta_{iCT}$ ,  $\eta_{iEФ}$  – ККД стандартного та енергоефективного двигуна відповідно, %;  $t_i$  – тривалість роботи двигуна з потужністю  $P_i$ , год;  $n$  – кількість ділянок роботи електропривода з різним навантаженням.

Заміна малозавантажених асинхронних двигунів електродвигунами меншої номінальної потужності

Споживання реактивної потужності асинхронним двигуном [5, 6]:

$$Q_{\text{Ад}} = Q_x + k_3^2 \Delta Q_n, \quad (28)$$

де  $Q_x$  – реактивна потужність, що споживається в режимі холостого ходу, кВАр:

$$Q_x \approx \sqrt{3} U_n I_x; \quad (29)$$

$k_3 = P/P_n$  – коефіцієнт завантаження двигуна по активній потужності;  $\Delta Q_n$  – збільшення споживання реактивної потужності при повному завантаженні двигуна в порівнянні зі споживанням при холостому ході, кВАр:

$$\Delta Q_n = Q_n - Q_x \approx \frac{P_n}{\eta} \operatorname{tg} \varphi_n - \sqrt{3} U_n I_x, \quad (30)$$

де  $P_n$  – номінальна потужність двигуна, кВт;  $\eta$  – ККД двигуна при повному завантаженні;  $\operatorname{tg} \varphi_n$  – номінальний коефіцієнт реактивної потужності двигуна;  $U_n$  – номінальна напруга, В;  $I_x$  – струм холостого ходу асинхронного двигуна, А.

Умови рентабельності вимагають, щоб заміна двигуна спричиняла зменшення сумарних втрат активної потужності:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P + k_Q Q_{\text{Ад}}, \quad (31)$$

де  $\Delta P$  – втрати активної потужності в двигуні, кВт;  $k_Q$  – коефіцієнт зміни втрат, кВт/кВАр (приймають  $k_Q = 0,1$  кВт/кВАр).

Втрати активної потужності в асинхронному двигуні:

$$\Delta P = \Delta P_x + k_3^2 \Delta P_n, \quad (32)$$

де  $\Delta P_x$  – втрати активної потужності на холостому ході двигуна, кВт:

$$\Delta P_x = P_n \frac{1-\eta}{\eta} \frac{\gamma}{1+\gamma}; \quad (33)$$

$\Delta P_n$  – втрати активної потужності в двигуні при завантаженні 100 %, кВт:

$$\Delta P_n = P_n \frac{1-\eta}{\eta} \frac{1}{1+\gamma}; \quad (34)$$



$\gamma$  — розрахунковий коефіцієнт, що залежить від конструкції двигуна.

$$\gamma = \frac{\Delta P_x}{\Delta P_n} \frac{\Delta P_x \%}{(100 - \eta) - \Delta P_x \%}, \quad (35)$$

де  $\Delta P_x \%$  – втрати холостого ходу в процентах від активної потужності, споживаної двигуном при завантаженні 100%.

Сумарні втрати активної потужності в двигуні:

$$\Delta P_\Sigma = (\Delta P_x + k_3^2 \Delta P_n) + k_Q [Q_x (1 - k_3^2) + k_3^2 Q_n]. \quad (36)$$

Якщо середнє двигуна завантаження становить менше 45% номінальної потужності, то заміна електродвигунів менш потужними є доцільною. При завантаженні асинхронних двигунів понад 70% номінальної потужності можна вважати, що заміна в загальному випадку недоцільна. У тому випадку, якщо середнє завантаження електродвигунів складає 45-70% номінальної потужності, то доцільність їх заміни повинна бути підтверджена техніко-економічним розрахунком.

## 3.2 Практичні завдання

### Задача 13.

Оцінити економічну доцільність впровадження енергоефективного двигуна для випадку стандартного двигуна типу 5AM315S6e з номінальною потужністю  $P_{\text{НОМ}} = 110$  кВт та  $\epsilon = 0,2$  для електроприводу, що працює в номінальному режимі  $T_p = 1500$  год упродовж року. Номінальне значення ККД стандартного двигуна становить  $\eta_{\text{СТ}} = 95$  %. Прийняти тариф на електричну енергію  $C_0 = 1,68$  грн/(кВт·год).

### Задача 14.

Визначити оптимальне навантаження двигуна типу 4A180S4 та навантаження, за якого економічно доцільна його заміна на двигун меншої потужності. Двигун 4A180S4 має такі номінальними дані: потужність  $P_{\text{НОМ}} = 22$  кВт; напруга 380/220 В; ковзання  $s_{\text{НОМ}} = 0,02$ ; кількість пар полюсів  $p = 2$ ; струм статора  $I_{1\text{НОМ}} = 41,5$  А; ККД  $\eta_{\text{НОМ}} = 90\%$ ;  $\cos \phi_{\text{НОМ}} = 0,87$ ; активний опір обмоток статора  $R_1 = 0,219$  Ом та приведений ротора  $R'_1 = 0,112$  Ом. Розрахунки виконати для значень коефіцієнта навантажень  $k_n = 0,2; 0,5; 0,75$ .

### Задача 15.

Визначити доцільність перемикання обмоток зі схеми «трикутник» на схему «зірка» двигуна АО3-315М-6У3, 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  $\eta_{НОМ} = 93,5$  %;  $\cos \phi_{НОМ} = 0,9$ ;  $\lambda_M = M_K / M_{НОМ} = 2,6$ ;  $f_{НОМ} = 50$  Гц.

### Задача 16.

Визначити граничне значення тривалості неробочого ходу двигуна, у разі перевищення якого вимкнення двигуна буде доцільним з погляду енергоефективності. Двигун 4А180S4 з номінальними даними: потужність  $P_{НОМ} = 22$  кВт; напруга 380/220 В; ковзання  $s_{НОМ} = 0,02$ ; кількість пар полюсів  $p = 2$ ; ККД  $\eta_{НОМ} = 90$  %; активний опір обмоток статора  $R_l = 0,219$  Ом та зведений активний опір ротора  $R'I = 0,112$  Ом. Момент інерції ротора  $J_{РОТ} = 0,19$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_{ЗВ} = 1,2 \cdot 0,19 = 0,23$  кг·м<sup>2</sup>; кратності критичного  $\lambda_{КР} = 2,3$  та пускового  $\lambda_{ПУСК} = 1,4$  моментів. Моментом неробочого ходу  $M_{НХ}$  знехтувати.

**Задача 17.** До розподільного пункту трансформаторної підстанції промислового підприємства підключений асинхронний електродвигун серії 4А основного виконання номінальною потужністю  $P_{1н}$ , що працює з навантаженням  $P_1$  при номінальній напрузі  $U_{1н}$ . Визначити технічну доцільність його заміни двигуном меншої номінальної потужності. Варіанти для виконання завдання наведені в табл. 11.

Таблица 11

Вихідні дані		
Номінальна потужність $P_{1н}$ , кВт	Номінальна напруга $U_{1н}$ , В	Потужність навантаження $P_1$ , кВт
5,5	220	2,5

## Тема 4. Вибір енергозберігаючого обладнання і технологій

### 4.1 Обґрунтування рішень про вибір обладнання

Для вибору енергозберігаючих заходів враховуються всі можливі критерії вибору. На першій стадії експерти виділяють кілька найбільш раціональних варіантів, серед яких, на їх думку, знаходиться найкращий, а також критерії, за якими дані варіанти будуть порівнюватися. На другій стадії проводиться детальна оцінка виділених варіантів, в результаті якої визначається найкращий варіант. Для оцінки виділених варіантів застосовується метод аналізу ієрархій (МАІ) [7], який полягає в декомпозиції задачі вибору і базується на парних порівняннях. Для порівняння об'єктів в МАІ використовується шкала відносної важливості (таблиця 12).



Шкала відносної важливості [7]

Відносна важливість	Визначення	Пояснення
1	Однакова важливість	Однаковий внесок двох видів діяльності в досягненні мети
3	Помірна перевага одного над іншим	Досвід дає легку перевагу одному виду діяльності над іншим
5	Суттєва або сильна перевага	Досвід дає сильну перевагу одному виду діяльності над іншим
7	Значна перевага	Одному виду діяльності надається настільки сильна перевага, що вона стає практично значною
9	Дуже сильна перевага	Очевидність переваги одного виду діяльності над іншим підтверджується найбільш сильно
2, 4, 6, 8	Проміжні рішення між двома сусідніми висновками	Застосовується в компромісному випадку

Величина геометричного середнього визначається за формулою

$$b_i = \sqrt[n]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot \dots \cdot a_{in}}, \quad (37)$$

де  $b_i$  – геометричне середнє  $i$ -ого рядка матриці парних порівнянь;  
 $a_{in}$  –  $n$ -ий член  $i$ -ого рядка матриці парних порівнянь;  $n$  – кількість порівнюваних об'єктів (критеріїв, варіантів).

Величина вектора пріоритетів:

$$X_i = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^n b_i}, \quad (38)$$

Значення сум членів по стовпцям матриці парних порівнянь  $Y_j$ :

$$Y_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}, \quad (39)$$

де  $a_{ij}$  –  $i$ -ий член  $j$ -ого рядка матриці парних порівнянь.

Значення власного вектора матриці парних порівнянь:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \left( X_i \cdot Y_j \right), \quad (40)$$

де  $\lambda_{\max}$  – величина власного вектора матриці парних порівнянь;  $Y_j$  – сума членів  $j$ -ого стовпця матриці парних порівнянь.



Індекс узгодженості думок:

водного господарства  
та природокористування

$$I_y = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (41)$$

Величина відношення узгодженості:

$$B_y = \frac{I_y}{C_y}, \quad (42)$$

де  $I_y$  – індекс узгодженості;  $C_y$  – середня узгодженість, визначається в залежності від розміру матриці парних порівнянь  $n$ .

Величина вектору глобального пріоритету альтернативи  $A_j$  :

$$S_{A_j} = \sum_{i=1}^n (X_i \cdot x_{ij}) \quad (43)$$

де  $X_i$  – вектори пріоритетів, отримані при парному порівнянні критеріїв;  $x_{ij}$  – вектори пріоритетів, отримані при порівнянні альтернативи  $A_j$  окремо по кожному з критеріїв  $K_1, K_2, \dots, K_n$ .

## 4.2 Практичні завдання

### Задача 18

За розрахованими продуктивністю та напором підібрали три можливих варіанти:  $A_1$  - ЕЦВ 10-63-150;  $A_2$  - SP 46-19;  $A_3$  - SP 60-17.

Вибрати насос для подачі води на насосній станції за трьома альтернативами з урахуванням шести критеріїв вибору. Три альтернативи  $A_1 - A_3$  повинні бути оцінені стосовно критеріїв  $K_1 - K_6$ . Параметри (критерії) вибраних варіантів наведені в таблиці 13.

Таблиця 13

Вихідні дані

Номер критерію	Назва критерію (характеристики)	Один. виміру	Тип насосу		
			ЕЦВ 10-63-150	SP 46-19	SP 60-17
	Продуктивність	м <sup>3</sup> /год	50	50	50
	Напір	м	150	150	160
1	Виробник	-	Буча	Grundfos	Grundfos
2	Гарантія	міс.	3	12	12
3	Вартість насосу	тис. грн	4	12,3	11,8
4	Матеріал виготовлення	-	чавун	нерж. сталь	нерж. сталь
5	Потужність	кВт	45	30	37
6	Наробіток до відмови	тис. год	18	25	25



1. Плешков П. Г., Серебренніков С. В., Сіріков О. І., Савеленко І. В. Енергетичний інжиніринг та менеджмент : в 3-х ч. Ч. 1. Проектування ефективних енергетичних систем. Кропивницький : ЦНТУ, 2018. 156 с.
2. Півняк Г. Г., Випанасенко С. У., Хованська О. І. та ін. Системи енергоменеджменту та їх математичне забезпечення. Донецьк : НГУ, 2013. 214 с.
3. Захожай В. Б., Чорний А.Ю. Статистичне забезпечення управління якістю. К. : Центр навчальної літератури, 2005. 340 с.
4. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Е., Лук'яненко Ю. В. Основи теорії планування експерименту. Вінниця : ВНТУ, 2006. 167 с.
5. Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П. Г. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посіб. Черкаси : видавець Чабаненко Ю., 2015. 316 с.
6. Ефременко В. М., Беляевский Р. В., Савинкина О. А. Энергосбережение в СЭС промышленных предприятий. Кемерово : ГУ КузГТУ, 2010. 44 с.
7. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М. : Радио и связь, 1993.