

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять

з дисципліни **«Енергоменджмент і енергоаудит»**

для студентів, які навчаються за програмою магістрів

спеціальності **141 «Електроенергетика,**

електротехніка та електромеханіка»

освітньо-професійної програми

«Електротехнічні системи електроспоживання»

всіх форм навчання

2019

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Енергоменджмент і енергоаудит» для студентів, які навчаються за програмою магістрів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми «Електротехнічні системи електроспоживання» всіх форм навчання /Укл.: В.В. Попов, В.В. Дьяченко – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 28 с.

Укладачі: В.В. Попов, доцент, канд. техн. наук,
В.В. Дьяченко, доцент, канд. техн. наук

Рецензент: О.М. Климко, доцент, канд. техн. наук

Відповідальний
за випуск : О. А. Шрам, доцент, канд. техн. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
електропостачання промислових
підприємств
протокол № 1 від 05.09.2019 р.

Рекомендовано до видання
на засіданні НМК
електротехнічного факультету
протокол № 2 від 19.10.2019 р.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	4
1 Оцінка структури електроспоживання промислового підприємства	5
2 Визначення додаткових втрат активної потужності та електроенергії в елементах мережі від струмів вищих гармонік	11
3 Визначення додаткових втрат активної потужності та електроенергії для мережі з несиметричними навантаженням	16
4 Складання електробалансу підприємства	20
5 Розрахунок економії електроенергії від використання компенсуючих пристроїв	25
Рекомендованна література	28

ВСТУП

Енергетичний аудит – це вид діяльності, спрямований на зменшення споживання енергетичних ресурсів суб'єктами господарювання за рахунок підвищення ефективності їх використання. Енергетичний аудит проводять незалежні особи (енергоаудитори) чи фірми, уповноважені на це суб'єктами господарювання. Енергетичний аудит призначений для вирішення таких головних завдань: обстеження стану використання енергетичних ресурсів на об'єкті; розроблення організаційно – технічних заходів, спрямованих на зниження енергетичних витрат; визначення потенціалу заощадження енергії; економічне обґрунтування організаційно – технічних заходів.

Підсумковим документом енергоаудиту є звіт, що містить підсумки вивчення стану споживання енергії та енергоносіїв на об'єкті, опис об'єкта та рекомендації з ефективного енерговикористання. Завдання розділу звіту про вивчення стану енерговикористання є визначення кількості енергії й енергоносіїв, що використовується різними споживачами обстежуваного об'єкту, а також їх вартості. Крім того, проводиться порівняння фактичного споживання енергії на об'єкті з прийнятими нормативами. В результаті створюється база для аналізу енергоспоживання, яка дає можливість виявити ділянки об'єкта, в яких скеровані на енергоощадність інвестиції дадуть найбільший економічний ефект.

Опис об'єкту і його будівель характеризує наявні на об'єкті установки і обладнання, режим їх роботи, продуктивність, а також оцінює ефективність виробничого обладнання. Наприклад, опис котельні містить інформацію про кількість і тип котлів, спосіб керування їх режимами, параметри пари та продуктивність котлів.

Рекомендаційна частина звіту містить пропозиції стосовно ефективного використання енергії, які розроблені під час проведення обстеження. Пропоновані практичні проекти повинні обґрунтуватись техніко–економічними розрахунками. Опис заходів з заощадження енергії містить такі ключові моменти: що потрібно робити, щоб заощадити енергію; як ці дії приведуть до заощадження енергії: співвідношення потенційних заощаджень з інвестиціями на реалізацію заходів.

1 ОЦІНКА СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

Структура електроспоживання є важливою ланкою для проведення енергоаудита промислового підприємства, тут визначаються:

- споживання активної електроенергії споживачами з напругою 0,4 кВ;
- те ж для споживання з напругою 6 – 10 кВ;
- витрати електроенергії на освітлення;
- витрати електроенергії на електроспоживання сторонніх споживачів;
- втрати електроенергії у елементах мережі електропостачання промислових підприємств.

Структура електроспоживання дає змогу визначити ділянки в схемі електропостачання на яких втрати електроенергії є найбільшими і розробити відповідні заходи з енергозбереження. Також визначення витрати електроенергії безпосередньо на виробництво дозволяє провести нормування витрати електроенергії на одиницю продукції, що дозволяє оцінити енергоефективність виробничого процесу в порівнянні з прийнятими нормами і з найкращими зарубіжними аналогами виробничого процесу.

Визначення структури споживання електроенергії проводиться за такою методикою.

Вихідними даними є розрахункові потужності споживачів, розрахункові потужності освітлення, дані елементів електричної мережі.

Сумарне споживання електроенергії визначається за формулою, МВт·год:

$$W = W_{cn0,4} + W_{cn10} + W_{осв.} + \Delta W_{\Sigma} , \quad (1.1)$$

де $W_{cn0,4}$ – витрати електроенергії на живлення споживачів з напругою 0,4 кВ;

W_{cn10} – витрати електроенергії на живлення споживачів з напругою 10 кВ;

$W_{осв.}$ – витрати електроенергії на освітлення;

ΔW_{Σ} - сумарні втрати електроенергії в елементах електричної мережі.

$$W_{cn0,4} = P_{розр.0,4} \cdot T_M, \quad (1.2)$$

де $P_{розр.0,4}$ – сумарна розрахункова потужність споживачів з напругою 0,4 кВ;

T_M – число годин вокористання максимуму навантаження.

$$W_{cn10} = P_{розр.10} \cdot T_M, \quad (1.3)$$

де $P_{розр.10}$ – сумарна розрахункова потужність споживачів з напругою 10 кВ.

$$W_{осв.} = P_{розр.осв.} \cdot T_{осв.}, \quad (1.4)$$

де $P_{розр.осв.}$ – розрахункова активна потужність освітлення;

$T_{осв.}$ – число годин використання освітлення для заданого режиму роботи підприємства.

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_T + \sum \Delta W_{КТПi} + \sum \Delta W_{КЛi} + \sum \Delta W_{ЦЕХi}, \quad (1.5)$$

де ΔW_T – втрати електроенергії у трансформаторах ГЗП;

$\sum \Delta W_{КТПi}$ – сумарні втрати електроенергії у трансформаторах цехових ТП;

$\sum \Delta W_{КЛi}$ – сумарні втрати електроенергії у кабельних лініях розподільної мережі вище 1000 В;

$\sum \Delta W_{ЦЕХi}$ – сумарні втрати електроенергії у цехових мережах споживачів.

$$\Delta W_T = n_T \cdot \left(\Delta P_X \cdot 8760 + K_{32}^2 \cdot \Delta P_K \cdot \tau_M \right) \cdot 10^{-3}, \text{ МВт} \cdot \text{год} \quad (1.6)$$

де $\Delta P_X, \Delta P_K$ – каталожні дані трансформаторів;

n_T – число трансформаторів.

$$K_{зг} = \frac{S_P}{n_T \cdot S_{номТ}} , \quad (1.7)$$

де $K_{зг}$ – коефіцієнт завантаження трансформаторів ГЗП.

$$\tau_M = \left(0,124 + \frac{T_M}{10000} \right) \cdot 8760 , \quad (1.8)$$

де τ_M – число годин максимальних втрат.

Величина $\Delta W_{КЛі}$ визначається аналогічно.

$$\Delta W_{КЛі} = n_{КЛі} \cdot I_{КЛі}^2 \cdot r_0 \cdot l_{КЛі} \cdot \tau_M \cdot 10^{-6} , \text{ МВт}\cdot\text{год} \quad (1.9)$$

де $n_{КЛі}$ – число кабелів у кабельній лінії;

r_0 – питомий опір і-ї кабельної лінії;

$l_{КЛі}$ – довжина і-ї кабельної лінії, км.

$$I_{КЛі} = \frac{S_{PKЛі}}{n_{КЛі} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{КЛ}} , \quad (1.10)$$

$I_{КЛі}$ – розрахунковий струм і-ї кабельної лінії.

$$\Delta W_{ЦЕХі} = I_{Pi}^2 \cdot R_e \cdot \tau_M \cdot 10^{-6} , \quad (1.11)$$

де $I_{Pi} = \frac{S_{Pi}}{\sqrt{3} \cdot U_{HH}}$ – розрахунковий струм;

R_e – еквівалентний опір цехової мережі.

$$R_e = R_{жсл} \cdot \left(1 + \frac{\sum R_i \cdot K_{3i}^2}{(\sum K_{3i}^2) \cdot R_{жсл}} \right), \quad (1.12)$$

де $R_{жсл}$ – активний опір живлячої лінії;

R_i – активний опір i -ї ділянки цехової мережі;

$K_{3i} = \frac{P_i}{P_1}$ – коефіцієнт завантаження i -ої ділянки відносно

найбільш завантаженої ділянки, прийнятої за P_1 .

Приклад визначення структури електроспоживання машинобудівного заводу.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані

Найменування споживача	P_p , кВт	Q_p , кВАр	$Q_{нкв}$, кВАр	Номін. потужн. й кільк. тр-рів	ΔP_x , кВт	ΔP_k , кВт	ΔQ_m , кВАр	S_p , кВА	$K_{зз}$	$n_{кл}$	I_p , А	r_o , Ом/км	l , км
Цех №1	1200	1300	900	2×1000	1,9	10,8	75	1290	0,645	2	37,3	0,894	0,1
Цех №2	2400	2100	1800	2×1600	2,65	16,5	125	2437	0,76	2	70,4	0,625	0,2
Цех №3	1300	700	600	2×1000	1,9	10,8	75	1311,7	0,655	2	37,9	0,894	0,3
Цех №4	800	900	600	2×630	1,36	7,6	55	875	0,695	2	25,3	0,894	0,1
Насосна	500	400	300	2×400	0,95	5,5	35	517,9	0,65	2	15	0,894	0,6
СД 2×630кВт	1080	-317,1	-	-	-	-	-	700	-	2	40,4	0,894	0,6

На ГЗП 2 трансформатора ТМН 6300/110

$\Delta P_x = 5,6$ кВт, $\Delta P_k = 33,5$ кВт.

Для $T_M = 5000$ год, $\tau_M = \left(0,124 + \frac{5000}{10000} \right) \cdot 8760 = 341$ год/рік,

$P_{розр.осв.} = 248$ кВт, $T_{осв.} = 3600$ год,

$W_{осв.} = P_{розр.осв.} \cdot T_{осв.} = 248 \cdot 3600 \cdot 10^{-3} = 892,8$ МВт·год.

Визначаємо споживання електроенергії

$$P_{cn0,4\Sigma} = K_{pm} \cdot \sum P_{cn0,4} = 0,9 \cdot 6200 = 5580 \text{ кВт},$$

$$W_{cn0,4} = 5580 \cdot 5000 \cdot 10^{-3} = 27900 \text{ МВт}\cdot\text{год},$$

$$W_{cd} = P_{pcd} \cdot T_M = 1008 \cdot 5000 \cdot 10^{-3} = 5040 \text{ МВт}\cdot\text{год},$$

$$P_{p\Sigma} = (1,02 \cdot \sum P_{cn0,4} + P_{pcd}) \cdot K_{pm} = (1,02 \cdot 6200 + 1008) \cdot 0,9 = 6598,8 \text{ кВт},$$

$$Q_{\varphi 1} = P_{p\Sigma} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{онт.}} = 6598,8 \cdot 0,3 = 1979,6 \text{ кВАр},$$

$$S_{P\Sigma} = \sqrt{P_{P\Sigma}^2 + Q_{\varphi 1}^2} = \sqrt{6598,8^2 + 1979,6^2} = 6889,1 \text{ кВА},$$

$$K_{\text{зг}} = \frac{S_P}{2 \cdot S_{\text{номТ}}} = \frac{6889,1}{2 \cdot 6300} = 0,55,$$

$$\Delta W_T = n_T \cdot \left(\Delta P_X \cdot 8760 + K_{\text{зг}}^2 \cdot \Delta P_K \cdot \tau_M \right) \cdot 10^{-3} =$$

$$= 2 \cdot (5,6 \cdot 8760 + 0,55^2 \cdot 33,5 \cdot 3411) \cdot 10^{-3} = 167,2 \text{ МВт}\cdot\text{год}.$$

Таблиця 1.2 – Визначення втрат електроенергії у елементах мережі

Споживач	S_p , кВА	Тип трансформатора	ΔP_X , кВт	ΔP_K , кВт	$K_{\text{зг}}$	$\Delta W_{\text{конт}}$, МВт·год	I_p , А	r_0 , Ом/км	l , км	$n_{\text{кл}}$	$\Delta W_{\text{кл}}$, МВт·год	I_p , А	$R_{\text{св}} 10^{-3}$, Ом	$\Delta W_{\text{кл}}$, МВт·год
Цех №1	1290	2×1000	1,9	10,8	0,645	63,9	37,3	0,894	0,1	2	0,8	37,3	14,7	61,6
Цех №2	2437	2×1600	2,65	16,5	0,76	132	70,4	0,625	0,2	2	3,7	70,4	2,3	103,9
Цех №3	1311	2×1000	1,9	10,8	0,655	64,9	37,9	0,894	0,3	2	2,4	37,9	6,16	83,6
Цех №4	875	2×630	1,36	7,6	0,695	48,9	25,3	0,894	0,1	2	0,3	25,3	1,42	48,5
Насосна	517,9	2×400	0,95	5,5	0,65	32,5	15	0,894	0,6	2	0,7	15	1,92	40,6
СД 2×630кВт	-	-	-	-	-	-	40,4	0,894	0,6	2	5,3	40,4	-	-
Усього						342,2					13,2			344,2

$$\Delta W_{\Sigma} = 699,6 \text{ МВт}\cdot\text{год}.$$

Результати розрахунку зводяться у таблицю 1.3.

Таблиця 1.3 – Результати розрахунків

Найменування показника	Позначення	Одиниця виміру	Величина
Витрати електроенергії на живлення:			<u>27900</u>
➤ споживачі за напругою 0,4 кВ	$W_{сп\ 0,4}$	МВт·год / %	80,79
			<u>5040</u>
➤ споживачі за напругою 10 кВ	$W_{сд}$	МВт·год / %	14,59
Витрати електроенергії на освітлення	$W_{осв.}$	МВт·год / %	<u>892,8</u>
			2,58
Втрати електроенергії елементах мережі	ΔW_{Σ}	МВт·год / %	<u>699,6</u>
			2,03
Усього	W_{Σ}	МВт·год / %	<u>34532,4</u>
			100

2 ВИЗНАЧЕННЯ ДОДАТКОВИХ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕМЕНТАХ МЕРЕЖІ ВІД СТРУМІВ ВИЩІХ ГАРМОНІК

При наявності в системах електропостачання нелінійних елементів виникають несинусоїдальні струми і напруги, що приводять до додаткових втрат потужності і електроенергії від струмів вищих гармонік, які протікають через елементи мережі.

Додаткові втрати активної потужності і електроенергії визначаються розрахунковим шляхом і обумовлені:

- необхідністю визначення додаткових втрат за певний період;
- необхідністю визначення додаткових втрат при аналізі їх зміни при впровадженні технічних засобів для зменшення коефіцієнта несинусоїдальності.

Збільшення втрат активної потужності і електроенергії від струмів вищих гармонік необхідно врахувати у загальному балансі підприємства незалежно від причин їх виникнення.

Втрати електроенергії у будь-якому елементі мережі при врахування струмів вищих гармонік визначаються за формулою:

$$\Delta W_i = \Delta W_0 + \Delta W_{nc} \quad , \quad (2.1)$$

де ΔW_0 – втрати електроенергії у i -му елементі для струма основної частоти;

ΔW_{nc} – втрати електроенергії від струмів вищих гармонік.

$$\Delta W_{nc} = 3 \cdot T_p \cdot \sum_{v=3}^n K_{\phi v}^2 \cdot I_{Cv}^2 \cdot R_v \quad , \quad (2.2)$$

де T_p – число годин роботи i -го елемента;

$K_{\phi v}$ – коефіцієнт форми графіка навантаження для i -ої гармоніки;

I_{Cv} – середній струм i -ої гармоніки;

R_v – активний опір елемента мережі для струмів вищих гармонік;

n – порядковий номер гармонік, які враховуються.

$$K_{\phi v} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot v}, \quad (2.3)$$

$$I_{Cv} = \frac{I_1}{v \cdot K_{\phi v}}, \quad (2.4)$$

де I_i – струм i -ої гармоніки.

Врахування опорів ліній електропередачі здійснюється за формулою:

$$r = r_0' \cdot l, \quad (2.5)$$

де r_0' – зведений питомий опір.

$$r_0' = r_0 \cdot \chi \cdot K_n, \quad (2.6)$$

$\chi = 1,002 \div 1,03$ – коефіцієнт укрутки;

$K_n = 1,01 \div 1,04$ – коефіцієнт підвищення опору.

Додаткові втрати потужності в основних елементах мережі:

- для синхронних машин

$$\Delta P_{нс см} = \Delta P_{н см} + \Delta P_{нс сг} + \Delta P_{н сг}, \quad (2.7)$$

де $\Delta P_{н см}$, $\Delta P_{нс сг}$ – додаткові втрати від струмів вищих гармонік у металі обмотки і у сталі відповідно;

$\Delta P_{н сг}$ – потужність гальмівного момента від струмів вищих гармонік.

$$\Delta P_{НСМ} = 3 \cdot \sum_{v=3}^n (I_v^2 \cdot R_{1v} + I_v^2 \cdot R'_{2ev}), \quad (2.8)$$

де $R_{1\nu}, R'_{2e\nu}$ – активний опір обмотки статора і еквівалентний опір обмотки ротора для ν -ої гармоніки.

$$\Delta P_{HC\ CГ} = P_{нo.m} \cdot \sum \frac{\left(\frac{U_{\nu}}{U_{нo.m}} \right)}{\nu^{0,7}},$$

$$\Delta P_{HC\ Г} = P_{нo.m} \cdot \frac{\left(\frac{U_{\nu}}{U_{нo.m}} \right)^2 \cdot K_n}{\nu^2 \cdot \sqrt{\nu \pm 1}}; \quad (2.9)$$

- для асинхронного двигуна

-

$$\Delta P_{HC\ M} = 3 \cdot \sum_{\nu=3}^n I_{\nu}^2 \cdot (R_{1\nu} + R'_{2\nu}), \quad (2.10)$$

$$R_{1\nu} = R_1 \cdot \sqrt{\nu}, \quad (2.11)$$

$$R'_{2\nu} = R'_2 \cdot \sqrt{\nu \pm 1}; \quad (2.12)$$

- для силових трансформаторів, повітряних і кабельних ліній

$$\Delta P_{HC} = 3 \cdot \sum_{\nu=3}^n I_{\nu}^2 \cdot R_{\nu}. \quad (2.13)$$

Приклад розрахунку додаткових втрат для заданої схеми електропостачання.

Вихідні дані:

- синхронні двигуни $S_{\text{ном}} = 600$ кВА;
 - нагрівальні установки $P = 50$ кВт; освітлення $S = 100$ кВА;
- Реактори: $X = 0,28$ Ом; $M = 0,54$; $\Delta P = 43$ кВт; $R_2 = 0,0035$ Ом;
- Синхронний двигун: $S_{\text{ном}} = 20000$ кВА; $R_2 = 0,08$ Ом; $X_2 = 0,95$ Ом;
- Повітряна лінія: АС-300; $l = 4$ км; $r_0 = 0,105$ Ом/км; $x_0 = 0,4$ Ом/км.

Таблиця 2.1 – Дані кабельних ліній

№ КЛ	Марка і переріз КЛ	$I_{\text{кл}}$, км	$n_{\text{кл}}$	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км
КЛ1	АСБГ (3×70)	0,1	1	0,443	0,086
КЛ2	АСБГ (3×185)	0,12	3	0,167	0,077
КЛ3	АСБГ (3×70)	0,06	1	0,443	0,086
КЛ4	АСБГ (3×185)	0,6	5	0,167	0,077
КЛ5	АСБГ (3×185)	0,8	2	0,167	0,077

Таблиця 2.2 – Дані трансформаторів

№ Т	$S_{\text{ном}}$, МВА	U_k , %	ΔP_k	R_2 , Ом	X_2 , Ом
T ₁	63	10,5	31,5	0,0079	0,167
T ₂	1	5,5	12,2	1,22	5,5
T ₃	0,63	5,5	8,5	2,14	8,73
T ₄	6750	9	71	0,0455	0,72

Навантаження вентильного перетворювача $S_{\text{пр.}} = 10$ МВА. Кут регулювання $\alpha = 30^\circ$, кут комуатації $\gamma = 8^\circ$.

Струм i -ої гармоніки перетворювача

$$I_1 = \frac{S_{\text{ПР}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 578 \text{ А.}$$

За номограмами визначасмо

$$\frac{I_5}{I_1} = 0,19; \quad \frac{I_7}{I_1} = 0,13; \quad \frac{I_{11}}{I_1} = 0,08.$$

$$I_5 = 110 \text{ А}; \quad I_7 = 75 \text{ А}; \quad I_{11} = 46 \text{ А.}$$

Таблиця 2.3 – Результати розрахунків

№ гармоніки	Струми вищих гармонік I_v , А							
	T_1	T_2	T_3	T_4	Реактор		СД	Лінія ЛІ
					I_c	II_c		
5	98,91	1,845	110	0,323	108,3	9,363	9,156	99,11
7	67,65	1,301	75	0,216	73,79	6,174	6,098	67,87
11	41,65	0,833	40	0,132	43,26	3,64	3,708	41,99
	ΔP_{MC} , кВт							
5	0,523	0,049	3,385	$0,9 \cdot 10^{-3}$	0,103	0,077	0,045	14,56
7	0,287	0,0287	2,029	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,053	0,037	0,024	7,58
11	0,137	0,0148	0,957	$0,22 \cdot 10^{-3}$	0,024	0,015	0,011	3,44
Усього	0,947	0,0925	6,371	$0,162 \cdot 10^{-3}$	0,18	0,129	0,08	25,573

3 ВИЗНАЧЕННЯ ДОДАТКОВИХ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ МЕРЕЖІ З НЕСИМЕТРИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

За умови несиметрії струмів і напруг в елементах систем електропостачання виникають додаткові втрати потужності і електроенергії, обумовленні системою струмів зворотної і нульової послідовності. Для будь-якого елемента трифазної мережі без нульового проводу, додаткові втрати визначаються за формулою:

$$\Delta W_{нс м} = \sum T_i \cdot \Delta P_{2i}, \quad (3.1)$$

де ΔP_{2i} – втрати активної потужності у i -му елементі системи електропостачання;

T_i – час роботи i -го вида обладнання за певний період.

Втрати активної потужності визначаються за використанням функції коефіцієнта несиметрії \mathcal{E}_u у вузлі підключення навантаження.

Для асинхронних двигунів:

$$\Delta P_{2АД} = 2,41 \cdot \Delta P_{м ном} \cdot I_n \cdot \mathcal{E}_u^2. \quad (3.2)$$

Використання формули (3.1) при великій кількості двигунів пов'язане з певними труднощами, тому визначення додаткових втрат здійснюється за спрощеною формулою:

$$\Delta P_{2АД} = 2,41 \cdot K_{АД} \cdot P_{АД ном} \cdot \mathcal{E}_u^2 \quad (3.3)$$

де $K_{АД}$ – коефіцієнт втрат АД:

$$K_{АД} = 3 \div 4,5$$

для АД з $P_{ном} < 5$ кВт;

$$K_{АД} = 1 \div 3$$

для АД з $5 \text{ кВт} \leq P_{ном} \leq 100$ кВт;

$$K_{АД} = 0,4 \div 1$$

для АД з $P_{ном} > 100$ кВт.

$$K_{AD} = K_{AD}^H + \frac{(K_{AD}^B - K_{AD}^H) \cdot (P_{ном}^B - P_{ном}^H)}{P_{ном}^B - P_{ном}^H}, \quad (3.4)$$

де K_{AD}^H, K_{AD}^B – нижня і верхня границі діапазона K_{AD} ;

$P_{ном}^B, P_{ном}^H$ – нижня і верхня границі діапазона $P_{ном}$.

Синхронні машини:

$$\Delta P_{2CM} = \Delta P_{\partial n} \cdot \frac{I_2^2}{I_{ном}^2}, \quad (3.5)$$

де $\Delta P_{\partial n}$ – додаткові втрати при струмі зворотної послідовності, який дорівнює номінальному;

I_2 – струм зворотної послідовності;

$I_{ном}$ – номінальний струм СМ.

$$\Delta P_{2CM} = K_{CM} \cdot P_{ном} \cdot \varepsilon_u^2, \quad (3.6)$$

де K_{CM} – розрахунковий коефіцієнт для СМ.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнта K_{CM}

Турбогенератори	Явнополюсні генератори та двигуни		Синхронні компенсатори
	з демферною обмоткою	без демферною обмоткою	
1,856	0,681	0,273	1,31

Трансформатори:

$$\Delta P_{2T} = \frac{\Delta P_{\kappa}}{\left(\frac{U_{\kappa}}{100} + \frac{S_{НОМ}}{S_{\kappa}} \right)} \cdot \varepsilon_u^2, \quad (3.7)$$

де ΔP_{2T} – втрати короткого замикання;

U_{κ} – напруга КЗ;

S_{κ} – потужність КЗ в точці підключення.

Для цехових трансформаторів КТП:

$$\Delta P_{2ЦТ} = 6,4 \cdot \Delta P_{\kappa} \cdot \varepsilon_u^2. \quad (3.8)$$

Конденсаторні батареї:

$$\Delta P_{2КБ} = Q_{НОМ} \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \varepsilon_u^2, \quad (3.9)$$

де $Q_{НОМ}$ – номінальна реактивна потужність КБ;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат для основної частоти.

Електрична мережа:

для нерозгалуженої лінії із концентрованим навантаженням у кінці додаткові втрати визначаються за формулою:

$$\Delta P_{2C} = \varepsilon_u^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^m \frac{\Delta P_i}{X_{2АДi}} + \sum_{j=1}^n \frac{\Delta P_j}{X_{2СМj}} + \sum_{\kappa=1}^l \Delta P_{\kappa} \right), \quad (3.10)$$

де ΔP_i , ΔP_j , ΔP_{κ} – активні втрати у лінії при симетричному режимі і номінальному навантаженні i -го АД, j -ої СМ, κ -го лінійного навантаження;

$X_{2АД}$, $X_{2СМ}$ – опори зворотньої послідовності АД і СМ.

При відсутності каталожних даних $X_{2СМ} = 0,24$; $X_{2АД} = 1/K_n$.

Приклад розрахунку додаткових втрат для мережі з несиметричним навантаженням.

Вихідні дані: коефіцієнт несиметрії $\varepsilon_u = 0,04$, потужність КЗ енергосистеми $S_k = 1000$ МВА.

Дані ділянки системи електропостачання наведені у таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Дані ділянки системи електропостачання

Електрообладнання	Кількість	Номін. напруга	$P_{\text{ном}} (S_{\text{ном}})$ кВт (кВА)	Час роботи	Додаткові параметри
Трансформатори зв'язку з енергосистемою	1	110/6	80000	8500	$\Delta P_k = 310$ кВт $U_k = 10,5\%$
Цехові трансформатори	12	6/0,4	1600	8000	$\Delta P_k = 18$ кВт $U_k = 5,5\%$
—//—//—//—	2	6,04	2500	8000	$\Delta P_k = 25$ кВт $U_k = 5,5\%$
Синхронні двигуни	4	6	2500	8000	-
Асинхронні двигуни	15	6	1000	7000	-
Конденсаторні батареї	2	6	5400	8700	$\text{tg}\delta = 0,035$

Для трансформаторів зв'язку:

$$\Delta W_{2T} = \frac{8500 \cdot 310 \cdot 0,04^2}{\left(0,105 + \frac{80}{1000}\right)^2} \cdot 10^{-3} = 123,184 \text{ МВт} \cdot \text{год.}$$

Для цехових трансформаторів:

$$\Delta W_{2ЦТ} = (8000 \cdot 12 \cdot 18 \cdot 0,04^2 \cdot 6,4 + 8000 \cdot 2 \cdot 25 \cdot 0,04^2 \cdot 6,4) \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta W_{2ЦТ} = 21,792 \text{ МВт} \cdot \text{год.}$$

Для СМ:

$$\Delta W_{2СМ} = (8000 \cdot 4 \cdot 0,681 \cdot 2500 \cdot 0,04^2) \cdot 10^{-3} = 87,168 \text{ МВт} \cdot \text{год.}$$

Для АД:

$$\Delta W_{2АД} = (7000 \cdot 1,5 \cdot 2,41 \cdot 0,4 \cdot 1000 \cdot 0,04^2) \cdot 10^{-3} = 161,952 \text{ МВт} \cdot \text{год.}$$

Для КБ: $\Delta W_{2КБ} = (8700 \cdot 5400 \cdot 0,035 \cdot 0,04^2) \cdot 10^{-3} = 0,263 \text{ МВт} \cdot \text{год.}$

$$\Delta W_{2\Sigma} = 394,359 \text{ МВт} \cdot \text{год.}$$

4 СКЛАДАННЯ ЕЛЕКТРОБАЛАНСУ ПІДПРИЄМСТВА

Електробаланс промислового підприємства включає в себе приходну і витратну частину, які визначаються за даними лічильників електроенергії, встановлених у розрахункових точках мережі.

До приходної частини електробалансу влючається електроенергія, яка надходить від енергосистеми, а також електроенергія вироблена електричними установками підприємства.

Витратна частина електробаланса розділена на статті:

- прямі витрати електроенергії на основний технологічний процес;
- непрямі витрати електроенергії на основний технологічний процес внаслідок його недосконалості;
- витрати електроенергії на допоміжні потреби (вентиляція, цеховий транспорт, освітлення і тд.)
- втрати електроенергії в елементах системи електропостачання;
- електроенергія, що відпущена стороннім споживачам.

Задачами составлення електробаланса є:

- виділення витрати електроенергії на основну продукцію підприємства з метою нормування витрати електроенергії;
- виявлення можливості скорочення непродуктивної витрати електроенергії і зменшення витрати електроенергії на випуск основної продукції.

При відсутності даних лічильників електроенергії, електробаланс може бути складений на основі розрахунків, методика яких наведена у розглянутому нижче прикладі складання електробаланса.

Приклад складання електробаланса для сортопркатного неревсивного стана горячої прокатки.

Вихідні дані: час прокатки $T_p = 18$ год, час х.х. $T_x = 4$ год. Головний привод складається з 2-х АД, які сидять на одному валу, і живиться від цехової ПС по КЛ з $U_{ном} = 2$ кВ, на якій встановлено лічильник електроенергії.

Витрата електроенергії:

- допоміжне обладнання споживає 18,5% електроенергії від загального споживання;

- витрата електроенергії приводними двигунами по лічильнику $W_{nd} = 19700$ кВт·год;
- витрата електроенергії для цеха по лічильнику $W_{\psi} = 21550$ кВт·год.

Таблиця 4.1 – Дані двигунів

№ двигу- на	$P_{ном},$ кВт	$n,$ об/хв	$U,$ кВ	$U_{2K},$ В	$I_{1ном},$ А	$I_{2ном},$ А	$r_1, \cdot 10^{-3}$ Ом	$r_2, \cdot 10^{-3}$ Ом	$r_2', \cdot 10^{-3}$ Ом
N1	900	885	2	950	300	575	28,5	10,7	47,4
N2	530	985	2	840	181,5	380	82	11,8	52,4

Витрати електроенергії на допоміжне обладнання:

$$W_e = 0,185 \cdot W_{\psi} = 0,185 \cdot 21550 = 4000 \text{ кВт·год},$$

$W_{\Sigma} = W_{nd} + W_e = 19700 + 4000 = 23700$ кВт·год.
що складає 16,9 %.

Електричні втрати у КЛ, яка живить приводні двигуни:

$$I_{CP} = \frac{W_{нд}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot T_P \cdot \cos \varphi} = \frac{19700}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 22 \cdot 0,81} = 320 \text{ А},$$

де $\cos \varphi = 0,81$ - для $tg \varphi = \frac{W_P}{W_P} = \frac{52000}{71000} = 0,735$.

$$\Delta W_L = 3 \cdot K_{\phi}^2 \cdot I_{CP}^2 \cdot R_e \cdot T_P$$

де $K_{\phi} = 1,05$ – коефіцієнт форми;

$$R_e = r_0 \cdot l = 0,0615 \cdot 0,208 = 0,0127 \text{ Ом}.$$

За добу:

$$\Delta W^L = 3 \cdot 1,05^2 \cdot 320^2 \cdot 0,0127 \cdot 22 \cdot 10^{-3} = 94,5 \text{ кВт (0,4\%)}.$$

За час х.х.:

$$\Delta W_X^{\text{II}} = 3 \cdot (I_{X1} + I_{X2})^2 \cdot R_e \cdot T_X = 3 \cdot (94,5 + 83)^2 \cdot 0,0127 \cdot 4 = 4,8 \text{ кВт},$$

(0,02%)

За час прокатки:

$$\Delta W_{\text{II}}^{\text{II}} = \Delta W^{\text{II}} - \Delta W_X^{\text{II}} = 94,5 - 4,8 = 89,7 \text{ кВт} (0,88\%).$$

Втрати у металі обмоток приводних двигунів:
за добу

$$\Delta W^M = 3 \cdot K_\phi^2 \cdot I_{CP}^2 \cdot (r_1 + r_2') \cdot T_P$$

$$I_{CP1} = I_{CP} \cdot \frac{P_{\text{ном1}}}{P_{\text{ном1}} + P_{\text{ном2}}} = 320 \cdot \frac{900}{900 + 530} = 201 \text{ А},$$

$$I_{CP2} = I_{CP} \cdot \frac{P_{\text{ном2}}}{P_{\text{ном1}} + P_{\text{ном2}}} = 320 \cdot \frac{530}{900 + 530} = 119 \text{ А},$$

$$\Delta W_1^M = 3 \cdot 1,02^2 \cdot 201^2 \cdot (0,0285 + 0,0474) \cdot 22 = 207 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

$$\Delta W_2^M = 3 \cdot 1,02^2 \cdot 119^2 \cdot (0,082 + 0,0524) \cdot 22 = 128 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

$$\Delta W^M = \Delta W_1^M + \Delta W_2^M = 207 + 128 = 335 \text{ кВт} \cdot \text{год} (1,41\%);$$

за х.х. стану:

$$\Delta W_X^M = 3 \cdot I_X^2 \cdot (r_1 + r_2')$$

$$\Delta W_{X1}^M = 3 \cdot 94,5^2 \cdot (0,0285 + 0,0474) \cdot 4 = 8,12 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

$$\Delta W_{X2}^M = 3 \cdot 83^2 \cdot (0,082 + 0,0524) \cdot 4 = 11,1 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

$$\Delta W_X^M = \Delta W_{X1}^M + \Delta W_{X2}^M = 8,12 + 11,1 = 19,22 \text{ кВт} \cdot \text{год} (0,08\%);$$

за час прокатки:

$$\Delta W_{\text{II}}^M = \Delta W^M - \Delta W_X^M = 335 - 19,22 = 315,78 \text{ кВт} \cdot \text{год} (1,33\%);$$

Механічні втрати потужності втрат х.х. прокатного стану і приводних двигуна є постійною і дорівнює механічним втратам х.х.

$P_{x\text{ мех.}} = 109,8$ кВт – потужність втрат х.х. прокатного агрегата, визначена методом вільного вибігу.

За добу:

$$\Delta W_{x\text{ мех.}}^{\text{мех}} = P_{x\text{ мех.}} \cdot T_P = 109,8 \cdot 22 = 2410 \text{ кВт}\cdot\text{год} (10,16\%).$$

За час х.х.:

$$\Delta W_X^{\text{мех}} = P_{x\text{ мех.}} \cdot T_X = 109,8 \cdot 4 = 440 \text{ кВт}\cdot\text{год} (1,86\%).$$

За час прокатки:

$$\Delta W_{\text{ПП}}^{\text{мех}} = P_{x\text{ мех.}} \cdot T_{\text{ПП}} = 109,8 \cdot 18 = 1970 \text{ кВт}\cdot\text{год} (8,3\%).$$

Електричні втрати у стані приводних двигунів:

За добу:

$$\Delta W^C = (P_X - 3 \cdot I_X^2 \cdot (r_1 + r_2') - P_{x\text{ мех.}}) \cdot T$$

$$\Delta W_1^C = (119,8 - 3 \cdot 94,5^2 \cdot (0,0285 + 0,0474) \cdot 10^{-3} - 109,8) \cdot 22$$

$$\Delta W_1^C = 176 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

$$\Delta W_2^C = (120,8 - 3 \cdot 83^2 \cdot (0,082 + 0,0524) \cdot 10^{-3} - 109,8) \cdot 22$$

$$\Delta W_2^C = 180 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

$$\Delta W^C = 22 \cdot 16,2 = 356 \text{ кВт}\cdot\text{год} (1,5\%).$$

$P_{x1} = 119,8$ кВт; $P_{x2} = 120,8$ кВт – потужність х.х. двигунів, визначені за прикладами.

За час х.х. стану:

$$\Delta W_X^C = 16,2 \cdot 4 = 64,8 \text{ кВт}\cdot\text{год} (0,27\%).$$

За час прокатки:

$$\Delta W_{\text{ПП}}^C = 16,2 \cdot 18 = 291 \text{ кВт}\cdot\text{год} (1,23\%).$$

Дані розрахунку наведені у таблиці 4.2

Таблиця 4.2 – Електробаланс прокатного стану за добу

Витрата ел. енергії на про- катку	Втрати електроенергії, кВт·год/%								Усього втрат, кВт·год %	W _в , кВт· год %	W _Σ , кВт· год %
	за час прокатки				за час х.х.						
	в лініях	у двиг.	механ. в стані	усього	в лініях	у двиг.	механ. в стані	усього			
16505 кВт·год	89,7	607	1970	2666,7	4,8	84	440	528,8	3195,5	4000	23700
69,6%	0,38	8,3	8,3	11,24	0,02	0,355	1,86	2,23	13,47	16,9	100

5 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІД ВИКОРИСТАННЯ КОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

Економія електроенергії від використання компенсуючи пристроїв (КП) визначається як різниця між втратами електроенергії для варіантів без використання і з використанням КП, що обчислюється за формулами:

$$\Delta W^I = \sum \Delta W_T^I + \sum \Delta W_L^I, \quad (5.1)$$

де $\sum \Delta W_T^I$ – сумарні втрати електроенергії у трансформаторах для I варіанта (без використання КП);

$\sum \Delta W_L^I$ – сумарні втрати електроенергії у лініях для варіанта I.

$$\Delta W^{II} = \sum \Delta W_T^{II} + \sum \Delta W_L^{II} + \Delta W_{КП} \quad (5.2)$$

де $\Delta W_T^{II}, \Delta W_L^{II}$ – сумарні втрати електроенергії у лініях і трансформаторах для варіанта II (з використанням КП);

$\Delta W_{КП}$ – втрати електроенергії у КП.

$$\Delta W_{Ti} = n_T \cdot \Delta P_X \cdot 8760 + \frac{1}{n_T} \cdot \frac{S^2_{розр}}{S^2} \cdot \Delta P_X \cdot \tau_M, \quad (5.3)$$

де $S^2_{розр}$ – розрахункова потужність, яка визначається без урахування КП (I варіант) і з урахуванням КП (II варіант);

τ_M – число годин використання максимального навантаження.

$$\tau_M = \left(0,124 + \frac{T}{10000} \right) \cdot 8760, \quad (5.4)$$

$$\Delta W_{\text{Лл}} = \frac{S^2}{U_{\text{Л}}^2} \cdot \Delta P_{\text{Лл}} \cdot \tau_{\text{М}} \quad (5.5)$$

Втрати електроенергії у КП визначаються за формулою:

$$\Delta W_{\text{КП}} = \Delta P_{\text{оКП}} \cdot Q_{\text{КП}} \cdot \tau_{\text{М}}, \quad (5.6)$$

де $\Delta P_{\text{оКП}}$ – питомі втрати активної потужності у КП;
 $\Delta P_{\text{оКП}} = 0,003$ кВт/кВАр для КП у мережі 10 кВ;
 $\Delta P_{\text{оКП}} = 0,0045$ кВт/кВАр для КП у мережі 0,4 кВ.

Визначити економію електроенергії для мережі силового трансформатора ТДН 16000/110 та КЛ-10кВ (сумарна довжина $l_{\Sigma} = 1,2$ км, $R_e = 2,5$ Ом), сумарне навантаження $P_{\text{н}\Sigma} = 10,7$ МВт, $\cos\varphi = 0,8$, $T_{\text{М}} = 5000$ год., від застосування КП.

Рішення

1. Визначаємо економічно доцільну реактивну потужність, яка передається з енергосистеми

$$Q_{e1} = P_{\text{H}\Sigma} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{онм}} = 10,7 \cdot 0,3 = 3,21 \text{ МВАр},$$

$$S = \sqrt{P_{\text{H}\Sigma}^2 + Q_{e1}^2} = \sqrt{10,7^2 + 3,21^2} = 11,17 \text{ МВА}.$$

2. Визначаємо втрати реактивної потужності у трансформаторі

$$\Delta Q_{\text{T}} = \frac{I_{\text{X}} \cdot S_{\text{ном}}}{100} + \frac{S_{\text{розр}}^2}{S_{\text{номТ}}^2} \cdot \frac{U_{\text{к}} \cdot S_{\text{ном}}}{100}$$

$$\Delta Q_{\text{T}} = \frac{0,7 \cdot 16000}{100} + \frac{11,17^2}{16^2} \cdot \frac{10,5 \cdot 16000}{100} = 930,795 \text{ кВАр}.$$

3. Визначаємо потужність пристроїв компенсації реактивної потужності

$$Q = P_{\text{H}} \cdot \text{tg}\varphi + \Delta Q_{\text{T}} - Q_{e1} = 10,7 \cdot 0,75 + 0,93 - 3,21$$

$$Q = 5,75 \text{ МВАр.}$$

Приймаємо 2 УКЛ–10,5–1800У3 і 2 УКЛ–10,5–13500У3

$$Q_{КП} = 6,3 \text{ МВАр}$$

4. Розрахункова потужність

I варіант

$$S = \sqrt{P_{розр}^2 + (Q_{розр} + \Delta Q_T)^2} = \sqrt{10,7^2 + (8,03 + 0,931)^2}$$

$$S = 13,95 \text{ МВА.}$$

II варіант

$$S = \sqrt{P_{розр}^2 + (Q_{розр} + \Delta Q_T - Q_{КП})^2} = \sqrt{10,7^2 + (8,03 + 0,931 - 6,3)^2}$$

$$S = 11,03 \text{ МВАр.}$$

5. Втрати електроенергії

$$\tau_M = \left(0,124 + \frac{5000}{10000}\right) \cdot 8760 = 3411 \text{ год,}$$

$$\Delta W_T^I = \left(18 \cdot 8760 + \frac{13,95^2}{10^2} \cdot 85 \cdot 3411\right) \cdot 10^{-3} = 378,1 \text{ МВт·год,}$$

$$\Delta W_T^{II} = \left(18 \cdot 8760 + \frac{11,02^2}{10^2} \cdot 85 \cdot 3411\right) \cdot 10^{-3} = 295,2 \text{ МВт·год,}$$

$$\Delta W_{Л}^I = \frac{S_{розр}^I{}^2}{U_{Л}^2} \cdot R_{Л} \cdot \tau_M = \frac{13,95^2}{10^2} \cdot 12,5 \cdot 3411 \cdot 10 = 83 \text{ МВт·год,}$$

$$\Delta W_{Л}^{II} = \frac{S_{розр}^{II}{}^2}{U_{Л}^2} \cdot R_{Л} \cdot \tau_M = \frac{11,02^2}{10^2} \cdot 12,5 \cdot 3411 \cdot 10 = 52 \text{ МВт·год,}$$

$$\Delta W_{КП}^{II} = 0,003 \cdot 6,3 \cdot 3411 = 64,5 \text{ МВт·год.}$$

6. Економія електроенергії

$$\delta W = 378,1 + 83 - 295,2 - 52 - 64,5 = 49,4 \text{ МВт·год.}$$

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Праховнік А.В. Енергетичний менеджмент: Навчальний посібник [Текст] / Праховнік А.В., Розін В.П. та інші–К.:Нат. фізики–1999–184с.
2. Овчаренко А.С., Розинский Д.И. Підвищення ефективності електропостачання промислових підприємств. - К.: Техніка, 1989.
3. Федоров А.А. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию в двух томах: [Текст] /Под ред. А.А.Федорова. Т1. Электроснабжение. Т2. Электрооборудование–М.:Энергоатом издат. 1987–591с.
4. Праховнік А.В. Енергетичний менеджмент: Навчальний посібник [Текст] / Праховнік А.В., Розін В.П. та інші–К.:Нат. фізики–1999–184с.
5. Попов В.В. Розробка методу вибору пристроїв компенсації реактивної потужності за умови мінімальних зведених витрат /В.В. попов. Д.І. Комарічина // Електротехніка та електроенергетика: науковий журнал. – Запоріжжя. 2013. – Вип. 1. – С.77 – 82.