

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ

“ ____ ” _____ 2026 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ
ВИЩОЇ ОСВІТИ
на тему:
«Розробка системи електропостачання зернопереробного
комбінату з впровадженням енергозберігаючих рішень
Development of a power supply system for a grain processing plant
with the implementation of energy-saving solutions»**

Виконав здобувач IV курсу групи ЕЕ-22
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____ Дмитро БУГЕРА

« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи
викладач

_____ Світлана ДУБЕНКО

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент

м. Кропивницький

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Освітній ступінь бакалавр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ *Петро ПЛЕСШКОВ*

«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Бугери Дмитра Миколайовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) **Розробка системи електропостачання**
зернопереробного комбінату з впровадженням енергозберігаючих рішень

2. Керівник роботи (проекту) *Дубенко Світлана Вячеславівна, викладач*

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 02.06.2026 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) _____

Вступ; Розрахунок електричних навантажень; Побудова картограми
електричних навантажень і визначення розташування елементів системи
електропостачання; Обґрунтування вибору напруги та схеми електропостачання
підприємства ; Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір
компенсуючих пристроїв; Вибір кількості та номінальної потужності
трансформаторів; Розрахунок струмів коротких замикань та вибір
високовольтного обладнання; Наукове обґрунтування та впровадження
енергоефективних рішень у системі електропостачання зернопереробного
комбінату; Висновки

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Спеціальний розділ</i>	<i>к.т.н, доцент Гарасьова Н.Ю.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	1.05.26	
2	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	5.05.26	
3	<i>Побудова картограми електричних навантажень і визначення розташування елементів системи електропостачання</i>	8.05.26	
4	<i>Обґрунтування вибору напруги та схеми електропостачання підприємства</i>	15.05.26	
5	<i>Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір компенсуючих пристроїв</i>	19. 05.26	
6	<i>Вибір кількості та номінальної потужності трансформаторів</i>	22.05.26	
7	<i>Розрахунок струмів коротких замикань та вибір високовольтного обладнання</i>	25. 05.26	
8	<i>Наукове обґрунтування та впровадження енергоефективних рішень у системі електропостачання зернопереробного комбінату</i>	27. 05.26	
9	<i>Висновки</i>	30. 05.26	
10	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	01.06.26	
11	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	02.06.26	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2026 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 80 с.; 22 рис.; 13 табл.; 11 джерел.

Бугера Д.М. Розробка системи електропостачання зернопереробного комбінату з впровадженням енергозберігаючих рішень – Рукопис.

Кваліфікаційна робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026 рік.

У кваліфікаційній роботі виконано розробку системи електропостачання зернопереробного комбінату з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності, надійності та економічності. Проведено розрахунок електричних навантажень підприємства, на основі чого визначено загальну потужність та сформовано структуру системи електропостачання.

Особливу увагу приділено питанням енергозбереження. Запропоновано застосування компенсуючих пристроїв для зменшення перетоків реактивної потужності та підвищення коефіцієнта потужності. Обґрунтовано доцільність використання частотно-керованого електроприводу для основного технологічного обладнання, що дозволяє оптимізувати режими роботи та знизити споживання електроенергії.

Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні та модернізації систем електропостачання промислових підприємств, зокрема зернопереробної галузі.

Ключові слова: електричні навантаження, трансформаторна підстанція, кабельні лінії, реактивна потужність, компенсація, коефіцієнт потужності, енергоефективність, частотне регулювання, електропривод

ABSTRACT

Qualification work: 80 p.; 22 fig.; 13 tables; 11 sources.

Buhera D.M. Development of a power supply system for a grain processing plant with the introduction of energy-saving solutions – Manuscript.

Qualification work in specialty 141 “Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics”, OPP “Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics”. – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

In the qualification work, the development of a power supply system for a grain processing plant was carried out, taking into account modern requirements for energy efficiency, reliability and economy. The calculation of the electrical loads of the enterprise was carried out, on the basis of which the total capacity was determined and the structure of the power supply system was formed.

Particular attention is paid to energy saving issues. The use of compensating devices is proposed to reduce reactive power flows and increase the power factor. The feasibility of using a frequency-controlled electric drive for the main technological equipment is substantiated, which allows optimizing operating modes and reducing electricity consumption.

The results obtained can be used in the design and modernization of power supply systems of industrial enterprises, in particular the grain processing industry.

Keywords: electrical loads, transformer substation, cable lines, reactive power, compensation, power factor, energy efficiency, frequency control, electric drive

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	8
1.1. Методика розрахунку електричних навантажень до 1000 В.....	8
1.2. Розрахунок освітлювальних навантажень.....	9
1.3. Розрахунок навантажень вище 1000 В.....	9
1.4. Формування графіків електричних навантажень підприємства	21
2 ПОБУДОВА КАРТОГРАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ І ВИЗНАЧЕННЯ РОЗТАШУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	24
3 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАПРУГИ ТА СХЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА	26
4 РОЗРАХУНОК БАЛАНСУ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР КОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ	31
5 ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА НОМІНАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ	34
6 РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ	36
6.1. Розрахунок струмів короткого замикання.....	36
6.2. Вибір високовольтного обладнання.....	40
7 НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЕРНОПЕРЕРОБНОГО КОМБІНАТУ	43
7.1. Компенсація реактивної потужності як метод енергозбереження системи електропостачання	43
7.2. Енергозбереження в електроприводах зернопереробного обладнання шляхом застосування частотного регулювання	61
ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА			
					Розробка системи електропостачання зернопереробного комбінату з впровадженням енергозберігаючих рішень	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб	Бугера Д.М.							
Перевірів	Дубенко С.В.							
Н.контр.								
Затв.	Плещков П.Г							
						ЦНТУ, зр.ЕЕ-22		

ВСТУП

В сучасних умовах розвитку промисловості особливого значення набуває підвищення ефективності використання електричної енергії. Зростання тарифів на електроенергію, збільшення енергоспоживання та необхідність забезпечення стабільної роботи технологічного обладнання обумовлюють актуальність удосконалення систем електропостачання промислових підприємств.

Зернопереробні підприємства характеризуються значною кількістю електроприймачів, серед яких переважають асинхронні електродвигуни, транспортні механізми, вентиляційні установки та інше технологічне обладнання. Як показано у спеціальному розділі, такі електроприймачі споживають значну кількість реактивної потужності та часто працюють у змінних режимах навантаження, що призводить до підвищених втрат електроенергії та зниження ефективності системи електропостачання.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває впровадження енергозберігаючих заходів, зокрема компенсації реактивної потужності та застосування частотно-керованого електроприводу, що дозволяє оптимізувати режими роботи обладнання та зменшити споживання електроенергії.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка ефективної системи електропостачання зернопереробного комбінату з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності та надійності.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі основні завдання:

- визначення електричних навантажень підприємства;
- виконання техніко-економічного порівняння варіантів електропостачання;
- вибір трансформаторних підстанцій та основного електрообладнання;
- вибір кабельних ліній та комутаційної апаратури;
- розробка заходів з підвищення енергоефективності системи.

						Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

1.1 Методика розрахунку електричних навантажень до 1000 В

Розрахунок електричних навантажень виконується з метою визначення розрахункових активних, реактивних та повних потужностей електроприймачів і їх груп для подальшого вибору електрообладнання та елементів системи електропостачання.

Розрахунок виконувався методом впорядкованих діаграм відповідно [2].

Розрахунок для електроприймача - автоматизовані фасувально-пакувальні модулі

Встановлена потужність

$$\sum P_H = n \cdot P_{H.од} = 7 \cdot 0,10 = 0,70 \approx 0,69 \text{ кВт}$$

Розрахункова активна потужність

$$P_p = \sum P_H K_B = 0,69 \cdot 0,38 = 0,26 \text{ кВт}$$

Розрахункова реактивна потужність

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 0,26 \cdot 0,96 = 0,25 \text{ квар}$$

Так, для групи електроприймачів рахуємо так, як у таблиці:

$$m = \frac{P_{H.max}}{P_{H.min}} = \frac{3,90}{0,10} = 39,00$$

$$K_B = \frac{P_{3M}}{\sum P_H} = \frac{22,50}{37,07} = 0,61$$

$$P_{3M} = \sum P_H \cdot K_B = 37,07 \cdot 0,61 = 22,50 \text{ кВт}$$

$$Q_{3M} = P_{3M} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 22,50 \cdot 0,85 = 19,07 \text{ квар}$$

$$n_e = 18,00$$

$$K_p = 1,38$$

$$P_p = K_p \cdot P_{3M} = 1,38 \cdot 22,50 = 31,05 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_{3M} = 19,07 \text{ квар}$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{31,05^2 + 19,07^2} = 36,44 \text{ кВА}$$

Навантаження по цехам зведені в табл.1.1.

						Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Розрахунок освітлювальних навантажень

Розрахунок освітлювального навантаження виконується для визначення потужності освітлювальних установок цехів і дільниць підприємства. Основними вихідними даними є площа приміщення, питома потужність освітлення та коефіцієнти, які враховують умови експлуатації освітлювальної мережі.

Розрахунок для дільниці підготовки круп

$$P_{\text{вст}} = 1000F \cdot p_0 = 1000 \cdot 1385 \cdot 8 = 11,1 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{р.осв}} = P_{\text{вст}} \cdot K_{\Pi} = 11,1 \cdot 0,96 = 10,6 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{р.осв}} = P_{\text{р.осв}} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 10,6 \cdot 1,7 = 18,3 \text{ квар}$$

$$S_{\text{р.осв}} = \sqrt{P_{\text{р.осв}}^2 + Q_{\text{р.осв}}^2} = \sqrt{10,6^2 + 18,3^2} = 21,2 \text{ кВА}$$

Освітлювальні навантаження по цехам зведені в табл.1.2.

1.3 Розрахунок навантажень вище 1000 В

Розрахунок електричних навантажень напругою вище 1000 В виконується на основі попередньо розрахованих навантажень до 1000 В (силових і освітлювальних). Його метою являється визначення сумарних навантажень цехів і підприємства в цілому для подальшого вибору трансформаторів, кабельних ліній, комутаційної апаратури та перевірки режимів роботи енергосистеми.

Розрахунок для дільниці підготовки круп

Силове навантаження

$$P_{\text{зм}} = \sum P_{\text{н}} \cdot K_{\text{в}} = 850,44 \cdot 0,5263 = 447,61 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{зм}} = P_{\text{зм}} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 447,61 \cdot 0,89 = 438,29 \text{ квар}$$

$$P_{\text{р.сил}} = K_{\text{р}} \cdot P_{\text{см}} = 1,1 \cdot 447,61 = 492,37 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{р.сил}} = Q_{\text{зм}} = 438,29 \text{ квар}$$

$$S_{\text{р.сил}} = \sqrt{P_{\text{р.сил}}^2 + Q_{\text{р.сил}}^2} = \sqrt{492,37^2 + 438,29^2} = 659,19 \text{ кВА}$$

					Арк.
					9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Освітлювальне навантаження

$$P_{p.осв} = 10,6 \text{ кВт}$$

$$Q_{p.осв} = 18,3 \text{ квар}$$

$$S_{p.осв} = \sqrt{10,6^2 + 18,3^2} = 21,16 \text{ кВА}$$

Всього по цеху

$$P_{p.ц} = P_{p.сил} + P_{p.осв} = 492,37 + 10,6 = 503,01 \text{ кВт}$$

$$Q_{p.ц} = Q_{p.сил} + Q_{p.осв} = 438,29 + 18,3 = 456,58 \text{ квар}$$

$$S_{p.ц} = \sqrt{P_{p.ц}^2 + Q_{p.ц}^2} = \sqrt{503,01^2 + 456,58^2} = 679,33 \text{ кВА}$$

Навантаження по решті цехів і по ТП зведено в табл.1.3

						Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Розрахунок силових навантажень до 1000В.

№ п/п	Назва підрозділу	п	Р од. кВт				m	Кв	Cos φ	tg φ	Середнє		пс	Км	Розрахункове		
			min	-	max	Р сум					Рср, кВт	Qср, кВар			Рр, кВт	Qр, кВар	Sp, кВА
1	2	3	4				6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Зернопереробний комбінат																	
Борошномельний корпус №1																	
Дільниця переробки побічних продуктів																	
	Автоматизовані фасувально-пакувальні модулі	7	0,10	-	0,10	0,69	1,00	0,38	0,72	0,96	0,26	0,25					
	Лінії термозварювання та зап	3	0,31	-	0,31	1,03	1,00	0,51	0,69	1,05	0,53	0,55					
	Стрічкові транспортери з енергоефективними приводами	6	3,10	-	3,10	15,75	1,00	0,52	0,71	0,99	8,19	8,12					
	Радіальні вентилятори аспірації	4	3,90	-	3,90	19,60	1,00	0,69	0,80	0,75	13,52	10,14					
	Всього по дільниці	20	0,10	-	3,90	37,07	39,00	0,61	0,85	0,61	22,50	19,07	18,00	1,38	31,05	19,07	36,44
Дільниця підготовки круп																	
	Декові лушпильні машини	15	7,60	-	7,70	107,10	1,01	0,70	0,78	0,80	74,97	60,15					
	Планситери електронного ко	8	33,60	-	36,10	305,55	1,07	0,58	0,72	0,96	177,22	170,81					
	Шлюзові живильники дозування	15	13,60	-	13,60	216,32	1,00	0,41	0,69	1,05	88,69	93,04					
	Скребокві транспортери	5	5,70	-	5,70	31,68	1,00	0,52	0,71	0,99	16,47	16,34					
	Шнекові транспортери	13	9,80	-	9,80	123,60	1,00	0,49	0,70	1,02	60,56	61,79					
	Модульні стрічкові конвесери	5	2,80	-	2,90	17,64	1,04	0,60	0,68	1,08	10,58	11,41					
	Пневмосепаратори	11	1,44	-	4,10	29,40	2,85	0,38	0,62	1,27	11,17	14,14					
	Оптичні зерноочисні сепаратори	3	2,70	-	2,70	10,61	1,00	0,41	0,59	1,37	4,35	5,95					
	Сортувальні машини з ЧРП	5	2,30	-	2,30	8,54	1,00	0,42	0,61	1,30	3,59	4,66					
	Всього по дільниці	80	1,44	-	36,10	850,44	25,07	0,53	0,75	0,89	447,61	438,29	42,00	1,10	492,37	438,29	659,19
Лінія виробництва кормових сумішей																	
	Падді-сепаратори	3	2,20	-	2,20	9,15	1,00	0,39	0,50	1,73	3,57	6,18					
	Трісріні блоки	5	5,30	-	5,30	19,97	1,00	0,30	0,48	1,83	5,99	10,95					
	Пропарювачі зерна з автоматикою	3	4,90	-	5,30	21,01	1,08	0,38	0,62	1,27	7,98	10,10					
	Вентилятори технологічної аспірації	7	46,40	-	46,40	289,80	1,00	0,61	0,79	0,78	176,78	137,19					
	Привідні вентиляторні агрега	7	7,30	-	14,60	82,32	2,00	0,72	0,91	0,46	59,27	27,00					
	Каменеуловлювачі	6	1,47	-	1,47	7,65	1,00	0,29	0,50	1,73	2,22	3,84					
	Насосна станція пожежогасін	3	10,10	-	15,30	53,35	1,51	0,60	0,68	1,08	32,01	34,51					

Продовження табл.1.1

1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Гвинтові компресори	7	4,80	-	10,30	57,20	2,15	0,68	0,92	0,43	38,90	16,57					
	Всього по дільниці	41	1,47	-	46,40	540,45	31,56	0,60	0,84	0,64	326,72	246,36	17,00	1,18	385,53	246,36	457,52
	Всього по корпусу №1	141	0,10	-	46,40	1427,96	464,0	0,56	0,75	0,88	796,83	703,72	55,00	1,00	796,83	703,72	1063,09
	Борошномельний корпус №2																
	Основний крупочех																
	Зерношліфувальні агрегати	16	18,40	-	18,40	259,20	1,00	0,81	0,79	0,78	209,95	162,94					
	Машини попереднього очищення	7	5,70	-	7,80	43,26	1,37	0,82	0,81	0,72	35,47	25,68					
	Плющильні установки	1	39,20	-	39,20	42,00	1,00	0,69	0,80	0,75	28,98	21,74					
	Повіродувні станції	4	45,50	-	45,90	132,30	1,01	0,50	0,68	1,08	66,15	71,33					
	Вентиляційні агрегати	5	11,50	-	12,40	73,44	1,08	0,68	0,82	0,70	49,94	34,86					
	Всього по крупочеху	33	5,70	-	45,90	550,20	8,05	0,71	0,80	0,75	390,49	316,54	39,00	1,08	421,73	316,54	527,31
	Дільниця розфасування																
	Автоматичні фасувальні машини	4	7,70	-	7,70	21,82	1,00	0,51	0,69	1,05	11,13	11,67					
	Пакувальні автомати поздовжнього шва	4	5,70	-	5,70	28,60	1,00	0,52	0,81	0,72	14,87	10,77					
	Контрольні пакувальні модулі	4	7,30	-	7,30	21,60	1,00	0,39	0,70	1,02	8,42	8,59					
	Всього по дільниці	12	5,70	-	7,70	72,02	1,35	0,48	0,91	0,46	34,42	31,03	4,00	1,95	67,13	31,03	73,95
	Склад готової продукції																
	Стрічкові транспортні лінії	2	4,00	-	4,10	12,36	1,02	0,50	0,68	1,08	6,18	6,66					
	Конвеєри палетної подачі	5	3,80	-	4,10	16,80	1,08	0,48	0,82	0,70	8,06	5,63					
	Вентилятори складу	2	4,10	-	4,10	11,76	1,00	0,41	0,69	1,05	4,82	5,06					
	Всього по складу	9	3,80	-	4,10	40,92	1,08	0,47	0,92	0,43	19,07	17,35	2,00	2,12	40,42	17,35	43,99
	Лінія сухих зернових сумішей																
	Сортувальний модуль	5	1,56	-	5,70	17,34	3,65	0,62	0,81	0,72	10,75	7,78					
	Охолоджувальні секції	5	1,47	-	1,47	8,73	1,00	0,59	0,70	1,02	5,15	5,25					
	Місцеві вентиляційні установки	28	1,52	-	3,10	56,16	2,04	0,50	0,68	1,08	28,08	30,28					
	Магнітний сепаратор	3	4,30	-	4,60	17,28	1,07	0,48	0,72	0,96	8,29	7,99					

Продовження табл.1.1

1	2	3	4		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
	Змішувачі зернових сумішей	1	1,53	-	1,53	1,54	1,00	0,61	0,79	0,78	0,94	0,73					
	Відцентрові сепаратори	3	0,62	-	3,10	2,52	5,00	0,52	0,71	0,99	1,31	1,30					
	Повітряні завіси воріт	5	2,20	-	2,20	8,62	1,00	0,49	0,70	1,02	4,22	4,31					
	Основні змішувачі продукту	3	10,10	-	10,20	40,80	1,01	0,60	0,78	0,80	24,48	19,64					
	Система гідроподачі компонентів	6	17,90	-	19,60	92,15	1,09	0,48	0,72	0,96	44,23	42,63					
	Рециркуляційний вентиляційний агрегат	1	0,41	-	2,90	3,16	7,07	0,61	0,79	0,78	1,93	1,50					
	Автоматизований привід воріт	3	0,42	-	0,83	0,12	1,98	0,52	0,71	0,99	0,06	0,06					
	Локальна витяжна шафа	1	2,40	-	2,40	2,47	1,00	0,49	0,70	1,02	1,21	1,23					
	Холодильні шафи	5	0,61	-	1,02	3,21	1,67	0,60	0,78	0,80	1,93	1,55					
	Сушильні шафи	8	0,67	-	6,20	11,76	9,25	0,48	0,72	0,96	5,64	5,44					
	Термостатичні камери	3	0,77	-	0,77	1,53	1,00	0,51	0,69	1,05	0,78	0,82					
	Мінітранспортери подачі	3	1,35	-	1,35	5,04	1,00	0,62	0,81	0,72	3,12	2,26					
	Етикетувальні апарати	3	1,18	-	1,18	2,50	1,00	0,59	0,80	0,75	1,48	1,11					
	Електрична таль	1	1,01	-	1,02	0,96	1,01	0,50	0,68	1,08	0,48	0,52					
	Інфрачервоні нагрівачі	1	0,72	-	0,77	97,85	1,07	0,48	0,72	0,96	46,97	45,27					
	Пакувальні автомати	3	10,20	-	10,20	42,00	1,00	0,61	0,79	0,78	25,62	19,88					
	Всього по дільниці	91	0,41	-	19,60	415,74	47,80	0,52	0,76	0,84	216,68	199,56	51,00	1,09	236,18	199,56	309,20
	Всього по корпусу №2	145	0,41	-	45,90	1078,88	111,95	0,61	0,79	0,78	660,66	564,48	48,00	1,09	720,12	564,48	915,00
	Склад зерна №1																
	Вентилятори силосної галереї	5	4,20	-	10,40	33,32	2,48	0,62	0,81	0,72	20,66	14,96					
	Кран-балка з ПВ=25%	7	9,80	-	9,80	81,60	1,00	0,19	0,50	1,73	15,50	26,85					
	Транспортери завантаження	5	2,00	-	10,20	32,98	5,10	0,50	0,68	1,08	16,49	17,78					
	Всього по складу	17	2,00	-	10,40	147,90	5,20	0,36	0,70	1,03	52,65	59,59	8,00	1,10	57,92	59,59	83,10
	Склад зерна №2																
	Вентилятори силосної галереї	3	3,80	-	10,30	35,36	2,71	0,58	0,82	0,70	20,51	14,32					
	Кран-балка з ПВ=25%	7	10,20	-	10,20	57,60	1,00	0,21	0,49	1,78	12,10	21,52					
	Транспортери завантаження	4	2,10	-	10,40	46,35	4,95	0,52	0,71	0,99	24,10	23,91					
	Всього по складу	14	2,10	-	10,40	139,31	4,95	0,41	0,72	0,96	56,71	59,74	8,00	1,10	62,38	59,74	86,37
	Склад зерна №3																
	Вентилятори силосної галереї	5	3,90	-	9,60	35,70	2,46	0,59	0,80	0,75	21,06	15,80					
	Кран-балка з ПВ=25%	6	10,10	-	10,20	68,60	1,01	0,20	0,48	1,83	13,72	25,08					
	Транспортери завантаження	5	1,92	-	10,30	34,68	5,36	0,48	0,72	0,96	16,65	16,04					
	Всього по складу	16	1,92	-	10,30	138,98	5,36	0,37	0,70	1,01	51,43	56,92	8,00	1,10	56,57	56,92	80,25
	Склад зерна №4																
	Вентилятори силосної галереї	3	4,10	-	9,70	32,98	2,37	0,61	0,79	0,78	20,12	15,61					
	Кран-балка з ПВ=25%	8	10,40	-	10,40	72,80	1,00	0,22	0,51	1,69	16,02	27,01					

Продовження табл.1.1

1	2	3	4		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Склад зерна №3															
	Вентилятори силосної галереї	5	3,90	-	9,60	35,70	2,46	0,59	0,80	0,75	21,06	15,80				
	Кран-балка з ПВ=25%	6	10,10	-	10,20	68,60	1,01	0,20	0,48	1,83	13,72	25,08				
	Транспортери завантаження	5	1,92	-	10,30	34,68	5,36	0,48	0,72	0,96	16,65	16,04				
	Всього по складу	16	1,92	-	10,30	138,98	5,36	0,37	0,70	1,01	51,43	56,92	8,00	1,10	56,57	80,25
	Склад зерна №4															
	Вентилятори силосної галереї	3	4,10	-	9,70	32,98	2,37	0,61	0,79	0,78	20,12	15,61				
	Кран-балка з ПВ=25%	8	10,40	-	10,40	72,80	1,00	0,22	0,51	1,69	16,02	27,01				
	Транспортери завантаження	4	1,96	-	9,60	43,20	4,90	0,49	0,70	1,02	21,17	21,60				
	Всього по складу	15	1,96	-	10,40	148,98	5,31	0,38	0,70	1,02	57,30	64,22	8,00	1,10	63,03	89,99
	Склад зерна №5															
	Вентилятори силосної галереї	5	4,00	-	10,20	35,02	2,55	0,60	0,78	0,80	21,01	16,86				
	Кран-балка з ПВ=25%	5	9,60	-	10,30	63,00	1,07	0,18	0,52	1,64	11,34	18,63				
	Транспортери завантаження	5	2,00	-	9,70	27,44	4,85	0,51	0,69	1,05	13,99	14,68				
	Всього по складу	15	2,00	-	10,30	125,46	5,15	0,37	0,71	0,98	46,35	50,17	8,00	1,10	50,98	71,52
	Ремонтно-механічна дільниця															
	Вентиляційні установки	2	1,04	-	5,20	9,18	5,00	0,72	0,81	0,72	6,61	4,79				
	Циркуляційні насоси	3	2,90	-	4,80	7,76	1,66	0,69	0,80	0,75	5,35	4,02				
	Інверторний зварювальний пост	1	1,01	-	10,20	11,44	10,10	0,30	0,40	2,29	3,43	7,86				
	Токарні верстати з ЧПУ	4	4,80	-	5,20	14,40	1,08	0,28	0,72	0,96	4,03	3,89				
	Зарядні станції навантажувач	2	1,02	-	4,80	11,33	4,71	0,31	0,69	1,05	3,51	3,68				
	Всього по ремонтній дільниці	12	1,01	-	10,20	54,11	10,10	0,42	0,75	0,87	22,94	24,24	15,00	1,21	27,76	36,85
	Побутово-харчовий блок															
	Індукційні плити	5	5,20	-	41,60	157,50	8,00	0,62	0,81	0,72	97,65	70,70				
	Кухонні вентиляційні установки	2	0,98	-	2,90	7,84	2,96	0,69	0,80	0,75	5,41	4,06				
	Морозильні камери	3	1,01	-	5,10	10,20	5,05	0,60	0,68	1,08	6,12	6,60				
	Технологічна лінія приготування	1	0,96	-	5,20	9,70	5,42	0,58	0,82	0,70	5,63	3,93				
	Всього по побутово-харчовому блоку	11	0,96	-	41,60	185,24	43,33	0,62	0,86	0,60	114,81	85,28	9,00	1,24	142,36	165,95

Продовження табл.1.1

1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Автотранспортна майстерня																
	Вентиляційні установки	6	1,02	-	4,80	16,64	4,71	0,71	0,79	0,78	11,81	9,17					
	Повітряні компресори	1	10,40	-	15,60	19,20	1,50	0,72	0,81	0,72	13,82	10,01					
	Зварювальний пост	4	0,98	-	14,40	41,20	14,69	0,29	0,40	2,29	11,95	27,38					
	Металообробні верстати	2	10,10	-	14,30	24,15	1,42	0,30	0,68	1,08	7,25	7,81					
	Шліфувальні верстати	3	0,96	-	5,20	9,80	5,42	0,28	0,72	0,96	2,74	2,64					
	Всього по майстерні	16	0,96	-	15,60	110,99	16,25	0,43	0,71	0,99	47,58	57,01	15,00	1,21	57,57	57,01	81,02
	Котельня																
	Технологічні насоси	11	3,10	-	38,80	76,50	12,52	0,71	0,79	0,78	54,32	42,15					
	Димососи з частотним регулюванням	3	1,04	-	52,00	48,50	50,00	0,67	0,81	0,72	32,50	23,53					
	Живильні насоси	1	4,90	-	96,00	88,40	19,59	0,36	0,80	0,75	31,82	23,87					
	Вентилятори подавання повітря	6	2,00	-	5,10	37,44	2,55	0,40	0,78	0,80	14,98	12,01					
	Всього по котельні	21	1,04	-	96,00	250,84	92,31	0,53	0,84	0,65	133,61	101,56	5,00	1,17	156,32	101,56	186,42
	Адміністративно-побутовий корпус	19	1,92	-	24,70	453,20	12,86	0,63	0,82	0,70	285,52	199,29	21,00	1,08	308,36	199,29	367,15
	Елеваторний комплекс																
	Приводи барабанів транспортних ліній	8	4,10	-	4,10	29,40	1,00	0,80	0,73	0,94	23,52	22,02					
	Шнеки пиловидалення	5	0,57	-	0,57	2,94	1,00	0,81	0,77	0,83	2,38	1,97					
	Шлюзові затвори	5	0,73	-	0,73	3,06	1,00	0,78	0,73	0,94	2,39	2,23					
	Норійні підйомники	3	20,20	-	40,80	116,40	2,02	0,68	0,80	0,75	79,15	59,36					
	Аспіраційні установки	7	4,80	-	7,70	33,28	1,60	0,66	0,77	0,83	21,96	18,20					
	Вентилятори елеватора	6	22,40	-	22,40	147,84	1,00	0,80	0,78	0,80	118,27	94,89					
	Поворотні круги транспортних ліній	7	1,04	-	5,20	25,75	5,00	0,13	0,66	1,14	3,35	3,81					
	Компресорна установка	1	2,20	-	2,90	5,25	1,32	0,39	0,77	0,83	2,05	1,70					
	Ланцюговий транспортер відходів	6	2,20	-	3,10	10,78	1,41	0,83	0,67	1,11	8,95	9,91					
	Всього по елеваторному комплексу	48	0,57	-	40,80	374,70	71,58	0,70	0,81	0,72	262,02	214,10	20,00	1,14	298,70	214,10	367,51
	Всього по зернопереробному комбінату	490	0,10	-	96,00	4636,55	960,00	0,56	0,77	0,83	2588,40	2240,32	79,00	1,04	2691,93	2240,32	3502,22

Таблиця 1.2 – Розрахунок освітлювальних навантажень

№ п/п	Найменування обладнання	F, м2	P ₀ , Вт/м2	P _y , кВт	Q _y , кВАр	K _c	tg φ	Розрахункове		
								P _p , кВт	Q _p ,кВАр	S _p ,кВА
1	2	3	4	5	6	7	9	11	12	13
1	Дільниця переробки побічних продуктів	1480	10	14,8	24,9	0,94	1,7	13,9	23,4	27,2
2	Дільниця підготовки круп	1385	8	11,1	19,1	0,96	1,7	10,6	18,3	21,2
3	Лінія виробництва кормових сумішей	2240	10	22,4	37,9	0,95	1,7	21,3	36,0	41,8
4	Основний крупоцех	2260	8	18,1	30,9	0,94	1,7	17,0	29,1	33,7
5	Склад готової продукції	1940	10	19,4	32,6	0,96	1,7	18,6	31,3	36,4
6	Дільниця розфасування	1280	12	15,4	26,1	0,95	1,7	14,6	24,8	28,8
7	Лінія сухих зернових сумішей	1535	12	18,4	31,1	0,94	1,7	17,3	29,3	34,0
8	Склад зерна №1	3210	6	19,3	32,7	0,95	1,7	18,3	31,1	36,1
9	Склад зерна №2	2935	6	17,6	29,6	0,96	1,7	16,9	28,4	33,1
10	Склад зерна №3	3660	6	22,0	37,6	0,95	1,7	20,9	35,7	41,3
11	Склад зерна №4	3725	6	22,4	37,8	0,94	1,7	21,0	35,5	41,3
12	Склад зерна №5	2985	6	17,9	30,4	0,96	1,7	17,2	29,2	33,9
13	Ремонтно-механічна дільниця	1185	8	9,5	15,9	0,95	1,7	9,0	15,1	17,6
14	Побутово-харчовий блок	1420	14	19,9	33,6	0,94	1,7	18,7	31,6	36,7
15	Автотранспортна майстерня	1465	8	11,7	19,9	0,95	1,7	11,1	18,9	22,0
16	Котельня	980	6	5,9	2,9	0,82	0,5	4,8	2,4	5,4
17	Адміністративно-побутовий корпус	1030	18	18,5	9,3	0,94	0,5	17,4	8,7	19,5
18	Елеваторний комплекс	4325	8,0	34,6	58,5	1,0	1,7	33,2	56,1	65,2
19	Освітлення території комбінату	156900	0,3	47,1	68,3	0,8	1,5	38,1	55,3	67,2
	Всього по зернопереробному комбінату:	195940		365,8	579,0			340,0	540,1	638,3

Таблиця 1.3 – Розрахунок силових навантажень вище 1000 В

[illegible]

Продовження табл.1.2

1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Втрати п-ті в т-рах ТП-1,2														23,46	99,8	
	Всього на шинах 10 кВ ТП-1,2														1476,0	1275,4	1950,7
	ТП-3(2х1000 кВА)																
1	<i>Дільниця розфасування</i>																
	Силове навантаження	12	5,7	-	7,7	72,02	1,35	0,48	0,91	0,46	34,424	31,03	4	1,95	67,12719	31,03	73,95
	Освітлювальне нав.										15,36	26,112			14,6	24,806	28,78
	Всього по дільниці										49,784	57,1468			81,71919	55,84121	98,976
2	<i>Лінія сухих зернових сумішей</i>																
	Силове навантаження	91	0,41	-	19,6	415,7	47,8	0,52	0,76	0,84	216,68	199,56	51	1,09	236,18196	199,56	309,20
	Освітлювальне нав.										18,42	31,1298			17,315	29,262	34,001
	Всього по цеху										235,1	230,688			253,4968	228,8198	341,5
3	<i>Ремонтно-механічна дільниця</i>																
	Силове навантаження	12	1,01	-	10,2	54,11	10,1	0,42	0,75	0,87	22,94	24,24	15	1,21	27,757763	24,24	36,85
	Освітлювальне нав.										9,48	15,9264			9,006	15,130	17,608
	Всього по цеху										32,42	40,1618			36,764	39,366	53,863
4	<i>Побутово-харчовий блок</i>																
	Силове навантаження	11	0,96	-	41,6	185,2	43,3	0,62	0,86	0,60	114,81	85,28	9	1,24	142,35894	85,28	165,95
	Освітлювальне нав.										19,88	33,5972			18,687	31,581	36,696
	Всього по блоку										134,69	118,878			161,0461	116,8618	198,98
6	<i>Адміністративно-побутовий корпус</i>																
	Силове навантаження	19	1,92	-	24,7	453,2	12,9	0,63	0,82	0,70	285,52	199,29	21	1,08	308,35728	199,29	367,15
	Освітлювальне нав.										18,54	9,27			17,428	8,714	19,485
	Всього по цеху										304,06	208,561			325,7849	208,0052	386,53
	Всього по ТП-3																
	Силове навантаження	145	0,41	-	41,6	1180	101	0,6	0,78	0,80	674,37	539,40	20	1	781,7831	539,3999	949,81
	Освітлювальне нав.										81,68	116,035			77,028	109,49	133,87
	Всього										756,05	655,435			858,8	648,8935	1076,4
	КУ-0,4 кВ															-660	
	Навантаження 0,4 кВ з										756,05	655,435			858,8	648,9	
	Втрати п-ті в т-рах ТП-3														12,7	54,8	
	Всього на шинах 10 кВ ТП-3														871,5	703,7	1120,1

Продовження табл.1.2

1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ТП-4 (2х1000 кВА)																	
5	Котельня																
	Силове навантаження	21	1,04	-	96	250,8	92,3	0,5	0,84	0,65	133,61	101,562	5	1,2	156,324	101,562	186,42
	Освітлювальне нав.										5,88	2,94			4,8216	2,4108	5,3907
	Всього по котельні										139,49	104,502			161,145	103,9728	191,78
1	Склад зерна №1																
	Силове навантаження	17	2	-	10,4	147,9	5,2	0,4	0,7	1,03	52,652	59,5905	8	1,1	57,918	59,591	83,099
	Освітлювальне нав.										19,26	32,742			18,297	31,1049	36,087
	Всього по складу №1										71,912	92,3325			76,215	90,695	118,47
2	Склад зерна №2																
	Силове навантаження	14	2,1	-	10,4	139,3	4,95	0,4	0,72	0,96	56,707	59,7395	8	1,1	62,4	59,739	86,37
	Освітлювальне нав.										17,61	29,5848			16,9056	28,40141	33,052
	Всього по складу №2										74,317	89,3243			79,28308	88,1409	118,55
3	Склад зерна №3																
	Силове навантаження	16	1,92	-	10,3	139	5,36	0,4	0,7	1,01	51,43	56,9	8	1,1	56,572	56,917	80,25
	Освітлювальне нав.										21,96	37,5516			20,862	35,67402	41,326
	Всього по складу №3										73,39	94,4516			77,434	92,59121	120,7
4	Склад зерна №4																
	Силове навантаження	15	1,96	-	10,4	149	5,31	0,4	0,7	1,02	57,302	64,2216	8	1,1	63,032	64,222	89,986
	Освітлювальне нав.										22,35	37,7715			21,009	35,50521	41,255
	Всього по складу №4										79,652	101,993			84,04098	99,72685	130,42
5	Склад зерна №5																
	Силове навантаження	15	2	-	10,3	125,5	5,15	0,4	0,71	0,98	46,346	50,165	8	1,1	51,0	50,165	71,523
	Освітлювальне нав.										17,91	30,447			17,1936	29,22912	33,911
	Всього по складу №5										64,256	80,612			68,17464	79,39417	104,65
6	Автотранспортна майстерня																
	Силове навантаження	16	0,96	-	15,6	111	16,3	0,4	0,71	0,99	47,575	57,0104	15	1,2	57,566	57,010	81,019
	Освітлювальне нав.										11,72	19,924			11,134	18,9278	21,96
	Всього по майстерні										59,295	76,9344			68,70023	75,93824	102,4

Продовження табл.1.2

1	2	3	4			5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
7	Елеваторний комплекс																
	Силове навантаження	48	0,57	-	40,8	374,7	71,6	0,7	0,81	0,72	262,02	214,101	20	1,1	298,7	214,101	367,51
	Освітлювальне нав.										34,6	58,474			33,216	56,13504	65,226
	Всього по комплексу										296,62	272,575			331,9181	270,2359	428,02
	Освітлення території комбінату										47,07	68,2515			38,1267	55,28372	67,156
	Всього по ТП-4																
	Силове навантаження	162	0,57	-	96	1437	168	0,5	0,73	0,94	707,64	663,29	10	1	803,4722	663,307	1041,9
	Освітлювальне нав.										198,36	317,686			181,566	292,672	344,42
	Всього										906	980,976			985,0377	955,979	1372,7
	КУ-0,4 кВ															-900	
	Навантаження 0,4 кВ з										906	980,976			985,0377	955,9792	
	Втрати п-ті в т-рах ТП-4														18,1	76,5	
	Всього по ТП-4 на шинах 10 кВ														1003,1	1032,5	1439,5
	Всього по зернопереробному комбінату на шинах 10 кВ																
	Силове навантаження	490	0,1	-	96	4637	960	0,6	0,76	0,87	2588,4	2240,30	18	1	2956,4	2240,3	3709,3
	Освітлювальне нав.										365,8	579,008			340,0	540,1	638,27
	Всього										2954,2	2819,31			3350,7	3011,6	4505,2
	БСК															-2560	
	Всього по зернопереробному підприємству														3350,7	451,6	3381

1.4. Формування графіків електричних навантажень підприємства.

Визначення характеру електроспоживання підприємства здійснюється шляхом побудови часових залежностей зміни активної, реактивної та повної потужностей $P(t)$, $Q(t)$, $S(t)$. Такі графіки формуються окремо для зимового та літнього періодів і враховують відмінності між режимами роботи у робочі та вихідні дні.

Графічні залежності зміни активної та реактивної потужностей для різних режимів роботи підприємства, а також річна крива тривалості навантаження наведені нижче.

Результати розрахунків, що використовуються для побудови добових графіків навантаження, зведені у таблицю 1.4.

Таблиця 1.4 – Вихідні дані для формування добових графіків електричного навантаження.

№	Рзим, кВт	Qзим	Sзим	Рв их(зим)	Qвих (зим)	Свих (зим)	Рліт	Qліт	Сліт	Рвих (літ)	Qвих (літ)	Свих (літ)
1	1675	203	1687	1273	271	1302	1424	173	1434	1082	230	1106
2	1675	203	1687	1273	271	1302	1424	173	1434	1082	230	1106
3	1675	203	1687	1273	271	1302	1424	173	1434	1082	230	1106
4	1675	203	1687	1273	271	1302	1424	173	1434	1082	230	1106
5	1675	203	1687	1273	271	1302	1424	173	1434	1082	230	1106
6	1675	203	1687	1273	271	1302	1424	173	1434	1082	230	1106
7	2681	294	2697	1273	271	1302	2278	250	2292	1082	230	1106
8	3351	339	3368	1273	271	1302	2848	288	2863	1082	230	1106
9	3351	452	3381	905	226	933	2848	384	2874	769	192	793
10	3351	452	3381	905	226	933	2848	384	2874	769	192	793
11	3016	339	3035	905	226	933	2563	288	2579	769	192	793
12	2681	294	2697	905	226	933	2278	250	2292	769	192	793
13	3016	339	3035	905	226	933	2563	288	2579	769	192	793
14	3016	339	3035	905	226	933	2563	288	2579	769	192	793
15	3351	361	3370	905	226	933	2848	307	2864	769	192	793
16	3351	361	3370	905	226	933	2848	307	2864	769	192	793
17	3016	339	3035	905	226	933	2563	288	2579	769	192	793
18	2681	294	2697	1273	271	1302	2278	250	2292	1082	230	1106
19	2010	226	2023	1273	271	1302	1709	192	1720	1082	230	1106
20	2010	226	2023	1273	271	1302	1709	192	1720	1082	230	1106
21	1675	203	1687	1273	271	1302	1424	173	1434	1082	230	1106
22	1675	203	1687	1273	271	1302	1424	173	1434	1082	230	1106
23	1675	203	1687	1273	271	1302	1424	173	1434	1082	230	1106
24	1500	190	1520	1273	271	1302	1282	161	1292	1082	230	1106

					Арк.	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	21	

На підставі побудованого річного графіка визначається загальне річне споживання активної та реактивної електроенергії підприємства.

Річні витрати активної та реактивної енергії обчислюються як сума добутків потужностей на тривалість їх дії:

$$W_p = \sum P_i T_i = 16457613 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

$$Q_p = \sum Q_i T_i = 2221533 \text{ квар} \cdot \text{год}$$

Показник тривалості використання максимального навантаження:

$$T_{\max} = \frac{\sqrt{W_p^2 + Q_p^2}}{P_p} = \frac{\sqrt{16457613^2 + 2221533^2}}{3350,7} = 4911,829 \text{ год}$$

Еквівалентний річний час повних втрат електроенергії визначається за емпіричною залежністю:

$$\tau = (0,124 + \frac{4911,829}{10^4})^2 \cdot 8760 = 3315,2 \text{ год}$$

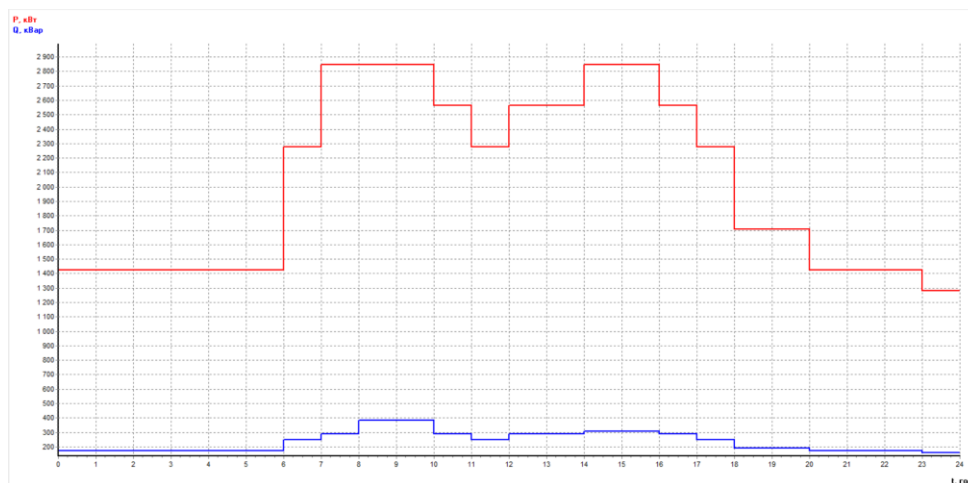


Рисунок 1.1 – Активне та реактивне навантаження літнього робочого дня

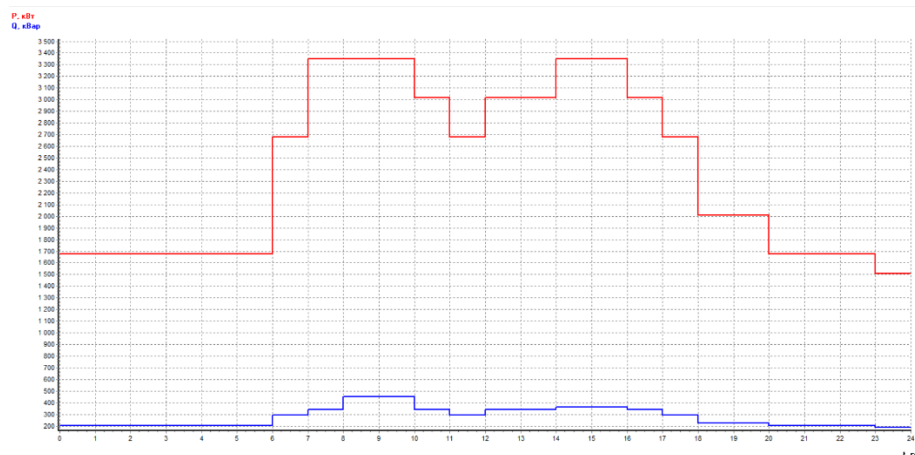


Рисунок 1.2 – Активне та реактивне навантаження зимового робочого дня

						Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

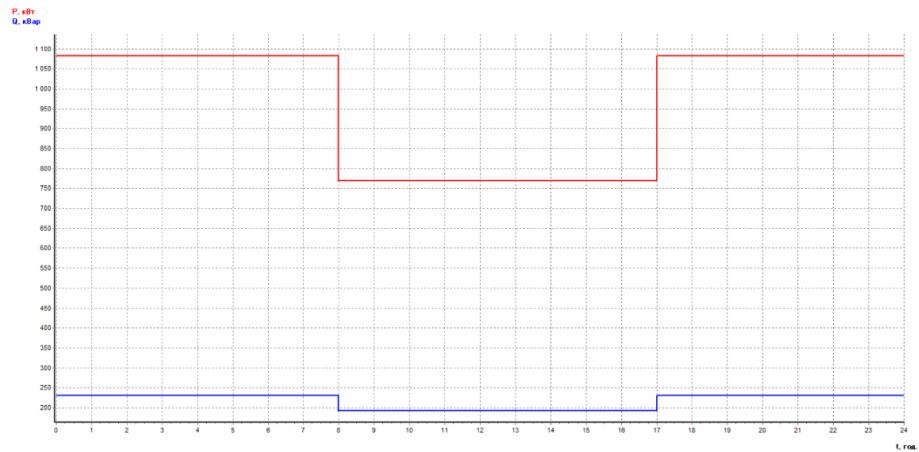


Рисунок 1.3 – Активне та реактивне навантаження літнього вихідного дня

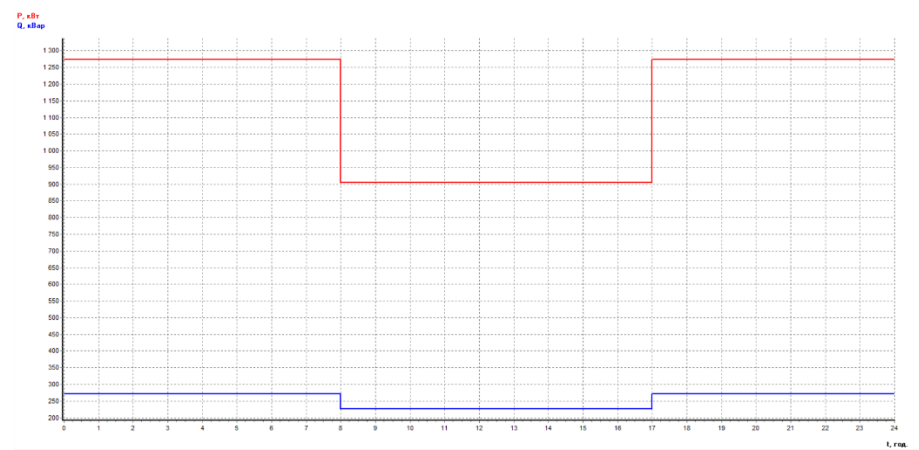


Рисунок 1.4 – Активне та реактивне навантаження зимового вихідного дня

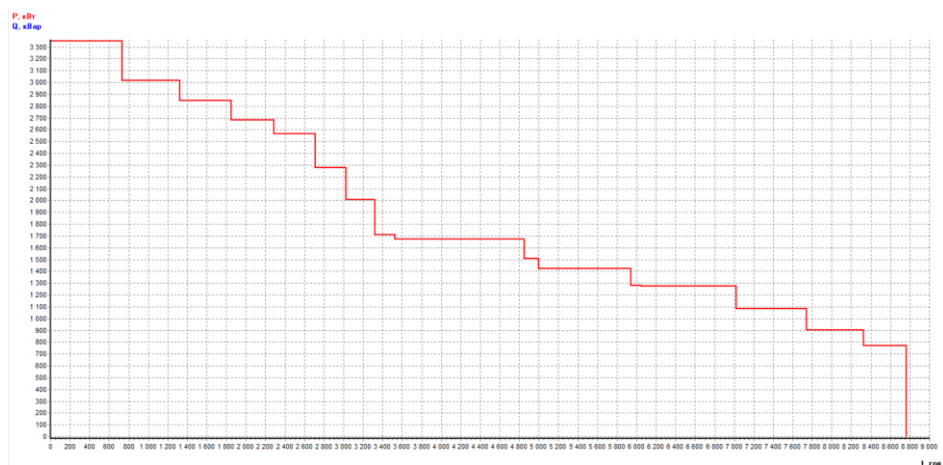


Рисунок 1.5 – Річний графік повного навантаження за тривалістю

						Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПОБУДОВА КАРТОГРАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ І ВИЗНАЧЕННЯ РОЗТАШУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Для обґрунтованого вибору місця встановлення головної знижувальної підстанції (ГЗП), центрального розподільчого пристрою (ЦРП), розподільчих пунктів (РП), а також компенсуючих установок застосовується графічний метод - побудова картограми електричних навантажень.

Картограма являє собою графічне відображення навантажень окремих цехів на генеральному плані підприємства. При цьому кожному підрозділу відповідає коло, площа якого в заданому масштабі пропорційна його розрахунковій повній потужності.

Приведемо приклад розрахунку для ділянки підготовки круп:

Загальне навантаження цеху

$$P = P_{\text{сил}} + P_{\text{осв}} = 492,37 + 10,64 = 503,01 \text{ кВт}$$

Для кожного цеху визначається радіус кола, який відповідає його навантаженню. Зв'язок між потужністю та геометричними параметрами кола задається залежністю:

$$R = \sqrt{\frac{P}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{503,01}{3,14 \cdot 0,2}} = 28,30 \text{ мм}$$

Визначення кута сектора освітлювального навантаження

$$\alpha = \frac{P_{\text{осв}}}{\pi R^2} \cdot 360^\circ = \frac{10,64}{\pi R^2} \cdot 360^\circ = 1,52$$

Координати ЦЕН:

$$X = \frac{\sum P_i \cdot X_i}{\sum P_i} = \frac{779057,1}{3258,28} = 239,1$$

$$Y = \frac{\sum P_i \cdot Y_i}{\sum P_i} = \frac{411488,5}{3258,28} = 126,3$$

						Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Показники розміщення інших цехів представлені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Розрахунок картограми навантажень

№ п/п	Назва групи споживачів	Pp, кВт	Pосв, кВт	R, мм	α , °	x_i	y_i	$P\Sigma$	$P_i^*x_i$	$P_i^*y_i$
1	Дільниця переробки побічних продуктів	31,05	13,91	8,46	22,28	330	78	44,96	14836,8	3506,9
2	Дільниця підготовки круп	492,37	10,64	28,30	1,52	214	78	503,01	107644,1	39234,8
3	Лінія виробництва кормових сумішей	385,53	21,28	25,45	3,77	282	78	406,81	114720,4	31731,2
4	Основний крупоцех	421,73	17,00	26,43	2,79	292	132	438,73	128109,2	57912,4
5	Склад готової продукції	40,42	18,62	9,70	22,71	422	130	59,04	24914,9	7675,2
6	Дільниця розфасування	67,13	14,59	11,41	12,85	362	125	81,72	29582,6	10215,0
7	Лінія сухих зернових сумішей	236,18	17,31	20,09	4,92	332	165	253,49	84158,7	41825,9
8	Склад зерна №1	57,92	18,30	11,02	17,29	190	325	76,22	14481,8	24771,5
9	Склад зерна №2	62,38	16,91	11,24	15,36	295	275	79,29	23390,6	21804,8
10	Склад зерна №3	56,57	20,86	11,10	19,40	285	225	77,43	22067,6	17421,8
11	Склад зерна №4	63,03	21,01	11,57	18,00	135	225	84,04	11345,4	18909,0
12	Склад зерна №5	50,98	17,19	10,42	18,16	235	165	68,17	16020,0	11248,1
13	Ремонтно-механічна дільниця	27,76	9,01	7,65	17,64	245	115	36,77	9008,7	4228,6
14	Побутово-харчовий блок	142,36	18,69	16,01	8,36	195	55	161,05	31404,8	8857,8
15	Автотранспортна майстерня	57,57	11,13	10,46	11,66	145	135	68,70	9961,5	9274,5
16	Котельня	156,32	4,82	16,02	2,15	375	42	161,14	60427,5	6767,9
17	Адміністративно-побутовий корпус	308,36	17,43	22,78	3,85	112	25	325,79	36488,5	8144,8
18	Елеваторний комплекс	298,70	33,22	22,99	7,21	122	265	331,92	40494,2	87958,8
						239,1	126,3	3258,28	779057,1	411488,5

										Арк.
										25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

3 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАПРУГИ ТА СХЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

Рациональне проектування системи електропостачання підприємства значною мірою визначається обґрунтованим вибором рівня напруги та конфігурації електричної мережі. Прийняті рішення безпосередньо впливають як на технічні характеристики системи, так і на її економічну доцільність, що зумовлює необхідність проведення техніко-економічного аналізу можливих варіантів.

У даному проекті розглядаються два можливі варіанти підключення підприємства:

- варіант 1 - напруга 10 кВ;
- варіант 2 - напруга 35 кВ.

Вибір оптимального рішення здійснюється шляхом порівняння зведених річних витрат.

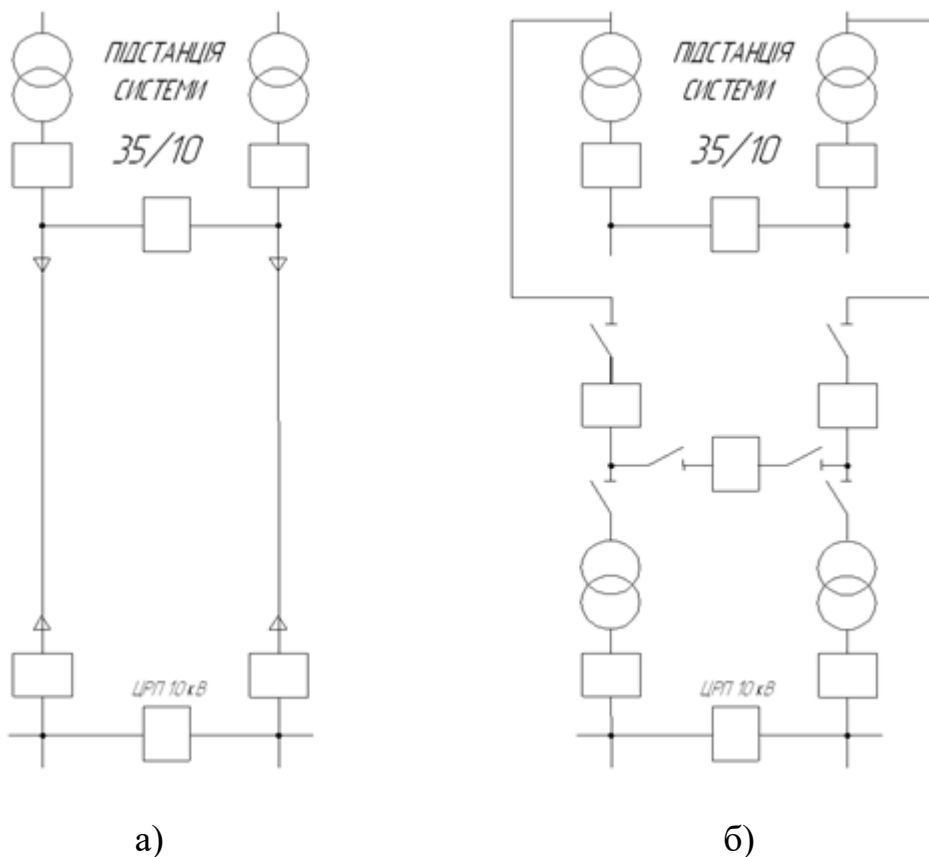


Рисунок 3.1 -Схеми зовнішнього електропостачання

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

1. Варіант 1 - живлення підприємства напругою 10 кВ

Розрахунковий струм лінії визначаємо за повною потужністю підприємства:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{4505,2}{2 \cdot 1,732 \cdot 10} = 130,05 \text{ А}$$

Приймаємо дві кабельні лінії АС-10 3×150 мм².

Коефіцієнт завантаження кабелю в нормальному режимі:

$$K_3 = \frac{I_{\text{л}}}{I_{\text{доп}}} = \frac{130,05}{246} = 0,53$$

Перевіряємо кабель в аварійному режимі, коли один ланцюг вимкнений:

$$I_{\text{доп.ав}} = I_{\text{доп}} \cdot K_{\text{ав}} = 246 \cdot 1,3 = 319,8 \text{ А}$$

$$K_{\text{ав}} = \frac{I_p}{I_{\text{доп.ав}}} = \frac{130,05}{319,8} = 0,41 < 1$$

Отже, кабель 3×120 мм² забезпечує роботу як у нормальному, так і в аварійному режимі.

Для кабелю приймаємо активний опір:

$$r_0 = 0,206 \text{ Ом/км}$$

Втрати активної потужності у двох кабельних лініях:

$$\Delta P_{\text{л}} = 2 \cdot 3 \cdot I_{\text{л}}^2 \cdot r_0 \cdot l \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 3 \cdot 130,05^2 \cdot 0,206 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 31,35 \text{ кВт}$$

Річні втрати електроенергії:

$$\Delta W_{\text{л}} = \Delta P_{\text{л}} \cdot \tau = 31,35 \cdot 3315,2 = 103951,3 \text{ кВт·год}$$

Вартість втрат:

$$C_{\text{втр}} = \Delta W_{\text{л}} \cdot c_0 \cdot 10^{-3} = 103951,3 \cdot 8,7 \cdot 10^{-3} = 904,37 \text{ тис. грн/рік}$$

Варіант 2 - живлення підприємства напругою 35 кВ

Розрахунковий струм лінії 35 кВ:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{4505,2}{1,732 \cdot 35} = 74,32 \text{ А}$$

Оскільки повітряна лінія дволанцюгова:

						Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{\text{л}} = \frac{I_p}{2} = \frac{74,32}{2} = 37,16 \text{ А}$$

Приймаємо провід АС-70/11.

Для проводу приймаємо:

$$r_0 = 0,4218 \text{ Ом/км}$$

Втрати активної потужності у двох ланцюгах ПЛ 35 кВ:

$$\Delta P_{\text{л}} = 2 \cdot 3 \cdot I_{\text{л}}^2 \cdot r_0 \cdot l \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 3 \cdot 37,16^2 \cdot 0,4218 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 5,24 \text{ кВт}$$

Річні втрати електроенергії в лінії:

$$\Delta W_{\text{л}} = \Delta P_{\text{л}} \cdot \tau = 5,24 \cdot 3315,2 = 17376,79 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

На ГЗП приймаємо два трансформатори ТМН-4000/35/10.

Коефіцієнт завантаження трансформаторів у нормальному режимі:

$$K_{\text{з.т}} = \frac{S_p}{2 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{4505,2}{2 \cdot 4000} = 0,56$$

Перевірка аварійного режиму, коли один трансформатор вимкнений:

$$K_{\text{з.ав}} = \frac{S_p}{S_{\text{ном}}} = \frac{4505,2}{4000} = 1,13 < 1,4$$

Отже, трансформатори забезпечують живлення підприємства в аварійному режимі.

Приймаємо втрати трансформатора:

$$\Delta P_{\text{х}} = 6,7 \text{ кВт}; \Delta P_{\text{к}} = 33,5 \text{ кВт}$$

Втрати електроенергії у двох трансформаторах:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{т}} &= 2(\Delta P_{\text{х}} \cdot t + \Delta P_{\text{к}} \cdot K_{\text{з.т}}^2 \cdot \tau) = 2(6,7 \cdot 8760 + 33,5 \cdot 0,56^2 \cdot 3315,2) \\ &= 187826,17 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned}$$

Сумарні втрати електроенергії у варіанті 35 кВ:

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_{\text{л}} + \Delta W_{\text{т}} = 17376,79 + 187826,17 = 205202,96 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вартість втрат:

$$C_{\text{втр}} = \Delta W_{\Sigma} \cdot c_0 \cdot 10^{-3} = 205202,96 \cdot 8,7 \cdot 10^{-3} = 1785,27 \text{ тис. грн/рік}$$

						Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 - Розрахунок капітальних вкладень

№ вар.	Найменування елемента схеми	Одиниця	Кількість	Вартість одиниці, тис. грн	Всього, тис. грн
1	Комірка КРУ 10 кВ з вакуумним вимикачем	шт.	2	128,08	256,16
	Кабель АС 3×150 мм ²	км	3,0	2450,44	7351,32
	Прокладання кабелю в траншеї	км	1,5	800,00	1200,00
	Всього за варіантом 1				8807,48
2	Вимикачі 35 кВ на підстанції енергосистеми	шт.	5	900,00	4500,00
	Дволанцюгова ПЛ 35 кВ з проводом АС-70/11	км	1,5	3500,00	5250,00
	ВРП 35 кВ	компл.	1	3000,00	3000,00
	Трансформатори ТМН-4000/35/10	шт.	2	2900,00	5800,00
	Всього за варіантом 2				18550,00

Таблиця 3.2 - Розрахунок поточних витрат

№ вар.	Найменування елемента схеми	К, тис. грн	Р _а , %	С _а , тис. грн	Р _е , %	С _е , тис. грн	С, тис. грн
1	Кабельна лінія з урахуванням траншеї	8551,32	5	427,57	5	427,57	855,13
	Комірки КРУ 10 кВ	256,16	15	38,42	5	12,81	51,23
	Всього за варіантом 1	8807,48					906,36
2	Вимикачі 35 кВ	4500,00	15	675,00	5	225,00	900,00
	Дволанцюгова ПЛ 35 кВ	5250,00	5	262,50	5	262,50	525,00
	ВРП 35 кВ	3000,00	15	450,00	5	150,00	600,00
	Трансформатори ГЗП 35/10 кВ	5800,00	15	870,00	5	290,00	1160,00
	Всього за варіантом 2	18550,00					3185,00

Зведені витрати визначаються за формулою:

$$З = E_n \cdot K + C + C_{\text{втр}}$$

де $E_n=0,12$ – нормативний коефіцієнт

						Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.3 - Техніко-економічне порівняння варіантів

Показник	Варіант 1, 10 кВ	Варіант 2, 35 кВ
Капітальні вкладення K , тис. грн	8807,48	18550,00
Нормативна складова $E_n \cdot K$, тис. грн/рік	1056,90	2226,00
Поточні витрати C , тис. грн/рік	906,36	3185,00
Втрати електроенергії ΔW , кВт·год/рік	103951,3	205202,96
Вартість втрат $C_{втр}$, тис. грн/рік	904,37	1785,27
Зведені витрати Z, тис. грн/рік	2867,63	7196,27

За результатами техніко-економічного порівняння встановлено, що варіант живлення підприємства напругою 10 кВ є економічно доцільнішим. Для нього зведені витрати становлять 2867,63 тис. грн, тоді як для варіанта з напругою 35 кВ - 7196,27 тис. грн.

Хоча при напрузі 35 кВ струм у лінії менший, цей варіант потребує встановлення двох трансформаторів ГЗП 35/10 кВ та додаткового обладнання 35 кВ. Це збільшує капітальні вкладення, експлуатаційні витрати та сумарні втрати електроенергії за рахунок втрат в трансформаторах.

						Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРАХУНОК БАЛАНСУ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ВИБІР КОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

Більшість електроприймачів підприємства споживає не лише активну, а й реактивну потужність. Її передача через трансформатори та мережі збільшує струми, втрати електроенергії та погіршує рівень напруги. Тому в системі електропостачання передбачають встановлення компенсуючих пристроїв, які зменшують перетоки реактивної потужності з енергосистеми.

Вихідні дані $P_H=3350,7$ кВт; $Q_H=3011,6$ квар; $S_{H,тр}=1000$ кВА;

Економічно допустима реактивна потужність, яка може надходити з енергосистеми:

$$Q_e = P_H \cdot \operatorname{tg} \varphi = 3350,7 \cdot 0,15 = 502,6 \text{ квар}$$

Необхідна сумарна потужність компенсації:

$$Q_{кп} = Q_H - Q_e = 3011,6 - 502,6 = 2509,0 \text{ квар}$$

Мінімальна кількість трансформаторів за умовою завантаження:

$$N_{min} = \frac{P_H}{K_3 \cdot S_{H,тр}} = \frac{3350,7}{0,65 \cdot 1000} = 5,15$$

За розрахунком мінімально можливе число трансформаторів становить 6 шт., однак для підвищення гнучкості роботи, резервування та зручнішого розподілу навантаження приймаємо до порівняння варіанти $N=6$; $N=7$; $N=8$.

Розглянемо варіант із 7 трансформаторами

Приймаємо до встановлення $N=7$ шт.

Перевіряємо активне завантаження трансформаторів:

$$K_{з.ф} = \frac{P_H}{N \cdot S_{H,тр}} = \frac{3350,7}{7 \cdot 1000} = 0,48$$

Отримане значення не перевищує допустимого, тому кількість трансформаторів приймається обґрунтованою.

Максимальна реактивна потужність, яка може передаватися через трансформатори без перевантаження:

						Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_1 = \sqrt{(N \cdot K_3 \cdot S_{н.тр})^2 - P_H^2} = \sqrt{(7 \cdot 0,65 \cdot 1000)^2 - 3350,7^2} = 3078,2 \text{ квар}$$

Оскільки $Q_1=3078,2 > Q_H=3011,6$, трансформатори можуть пропустити наявне реактивне навантаження без перевантаження. Проте для зменшення втрат у мережі 0,4 кВ та наближення до нормативного значення $\text{tg}\varphi=0,15$ приймаємо компенсацію на стороні 0,4 кВ.

Вибираємо сумарну потужність низьковольтних компенсуючих пристроїв $Q_{кн}=2500$ квар

Після компенсації залишкова реактивна потужність:

$$Q_{\text{зал}} = Q_H - Q_{кн} = 3011,6 - 2500 = 511,6 \text{ квар}$$

Перевіряємо відповідність економічно допустимому значенню:

$$Q_{\text{зал}}=511,6 \approx Q_e=502,6 \text{ квар}$$

Різниця є незначною, тому прийнята компенсація вважається достатньою.

Коефіцієнт реактивної потужності після компенсації:

$$\text{tg}\varphi_{\text{після}} = \frac{Q_{\text{зал}}}{P_H} = \frac{511,6}{3350,7} = 0,153$$

Коефіцієнт потужності після компенсації:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,153^2}} = 0,989$$

Отже, після встановлення КУ коефіцієнт потужності підвищується майже до 0,99, що є добрим результатом для промислової мережі.

Вибір конденсаторних установок

Для компенсації приймаємо автоматичні установки компенсації реактивної потужності 0,4 кВ. Приймаємо до встановлення:

$$Q_{кн}=4 \times 600 + 1 \times 100 = 2500 \text{ квар}$$

Високовольтні компенсуючі пристрої 10 кВ не встановлюємо:

$$Q_{кв}=Q_H - Q_{кн} - Q_e = 3011,6 - 2500 - 502,6 = 9,0 \approx 0 \text{ квар}$$

Тобто залишкова потреба в компенсації на стороні 10 кВ практично відсутня.

						Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Втрати активної потужності в КУ

Для низьковольтних конденсаторних установок питомі втрати приймаємо $P_{\text{пит}}=4,5$ кВт/Мвар

Втрати активної потужності в низьковольтних КП:

$$\Delta P_{\text{кн}} = P_{\text{пит}} \cdot Q_{\text{кн}} = 4,5 \cdot 2,5 = 11,25 \text{ кВт}$$

Оскільки високовольтні компенсуючі пристрої не передбачені

$$\Delta P_{\text{кв}} = 0 \text{ кВт}$$

Втрати активної потужності при передачі залишкової реактивної потужності через трансформатори:

$$\Delta P_{\text{тп}} = \Delta P_{\text{к}} \cdot \frac{Q_{\text{зал}}^2}{N \cdot S_{\text{н.тр}}^2} = 10,8 \cdot \frac{511,6^2}{7 \cdot 1000^2} = 0,40 \text{ кВт}$$

Сумарні додаткові втрати активної потужності:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{кн}} + \Delta P_{\text{кв}} + \Delta P_{\text{тп}} = 11,25 + 0 + 0,40 = 11,65 \text{ кВт}$$

Річна вартість втрат:

$$C_{\text{втр}} = \Delta P_{\Sigma} \cdot \tau \cdot c_0 \cdot 10^{-3} = 11,65 \cdot 3315,2 \cdot 8,7 \cdot 10^{-3} = 336,12 \text{ тис. грн/рік}$$

Таблиця 4.1 — Порівняння варіантів компенсації

Показник	Варіант N=6	Варіант N=7	Варіант N=8
Потужність КП 0,4 кВ, квар	1000	2500	2500
Потужність КП 10 кВ, квар	1800	0	0
Реактивна потужність після компенсації, квар	2011,6	511,6	511,6
Втрати в КП 0,4 кВ, кВт	4,50	11,25	11,25
Втрати в КП 10 кВ, кВт	5,40	0	0
Втрати в трансформаторах від реактивного навантаження, кВт	7,28	0,40	0,35
Сумарні втрати, кВт	17,18	11,65	11,60
Вартість обладнання, тис. грн	4150,55	1632,14	1752,14
Вартість втрат, тис. грн/рік	495,62	336,12	334,67
Зведені витрати, тис. грн/рік	993,68	531,98	544,92

За результатами порівняння найдоцільнішим є варіант із встановленням 7 трансформаторів потужністю по 1000 кВА та компенсуючих пристроїв на стороні 0,4 кВ: 4хКРМ-0,4-600 та 1хКРМ-0,4-100 сумарною потужністю $Q_{\text{кн}}=2500$ квар. Після компенсації залишкова реактивна потужність становить $Q_{\text{зал}}=511,6$ квар, що практично відповідає економічно допустимому значенню $Q_{\text{е}}=502,6$ квар.

						Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 ВИБІР КІЛЬКОСТІ ТА НОМІНАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Проектування трансформаторних підстанцій передбачає обґрунтований вибір кількості, типу та номінальної потужності силових трансформаторів. При цьому враховуються як електричні параметри навантаження, так і вимоги до надійності та умов експлуатації обладнання.

До основних факторів, що впливають на вибір трансформаторів, належать:

- величина розрахункового навантаження споживачів;
- категорія надійності електропостачання;
- допустимий рівень завантаження трансформаторів у нормальному та аварійному режимах;
- кліматичні та виробничі умови експлуатації;
- наявність і рівень компенсації реактивної потужності.

У виробничих системах електропостачання найбільш поширеним рішенням є використання комплектних трансформаторних підстанцій з одним або двома трансформаторами. Використання двотрансформаторних підстанцій є найбільш доцільним у випадках, коли потрібно забезпечити підвищену надійність електропостачання. Така ж схема дозволяє у разі відмови одного трансформатора забезпечити живлення основних споживачів за рахунок другого.

Номінальна потужність трансформаторів визначається з урахуванням розрахункового навантаження та припустимого коефіцієнта завантаження. Для забезпечення надійної роботи у нормальному та аварійному режимах використовується співвідношення:

$$S_{\text{тр}} = \frac{(1,4 \cdot S_p)}{n}$$

де S_p - розрахункова потужність підстанції, кВА;

n - кількість трансформаторів.

						Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок для ТПЗ

Для даної підстанції приймається схема з двома трансформаторами (n=2):

$$S_{\text{тр}} = \frac{(1,4 \cdot 1120,1)}{2} = 784,07 \text{ кВА}$$

Приймаємо найближче більше стандартне значення $S_{\text{тр}}=1000 \text{ кВА}$

Тип трансформатора: ТМ-1000/10

Фактичний коефіцієнт завантаження трансформаторів у нормальному режимі:

$$K_3 = \frac{S_p}{(n \cdot S_{\text{тр}})} = \frac{1120,1}{(2 \cdot 1000)} = 0,6$$

Отримане значення знаходиться в допустимих межах, що свідчить про нормальний режим роботи трансформаторів без перевантаження.

У разі відключення одного з трансформаторів другий приймає на себе основне навантаження. При цьому допускається короткочасне перевантаження трансформатора, а для зниження навантаження передбачається відключення споживачів III категорії надійності.

Аналогічні розрахунки виконуються для інших трансформаторних підстанцій підприємства. Отримані результати зводяться в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 - Вибір трансформаторних підстанцій

№ ТП	К.-ть	S_p ,кВА	Марка тр-ра	K_3	$S_{\text{ном}} > S_p/K_1$	$S_{\text{ном}} > S_p/K_2$	Тип КТП
1,2	3	1950,70	ТМ-1000-10/0,4	0,65	1806	1393	Вбудована
3	2	1120,10	ТМ-1000-10/0,4	0,56	1037	800	Вбудована
4	2	1439,50	ТМ-1000-10/0,4	0,72	1333	1028	Вбудована

6 РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТА ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

6.1 Розрахунок струмів короткого замикання

Для визначення струмів короткого замикання складається розрахункова схема електропостачання підприємства. У розрахунок включаються джерело живлення, кабельна лінія 10 кВ, розподільчий пристрій та кабельні лінії до трансформаторних підстанцій.

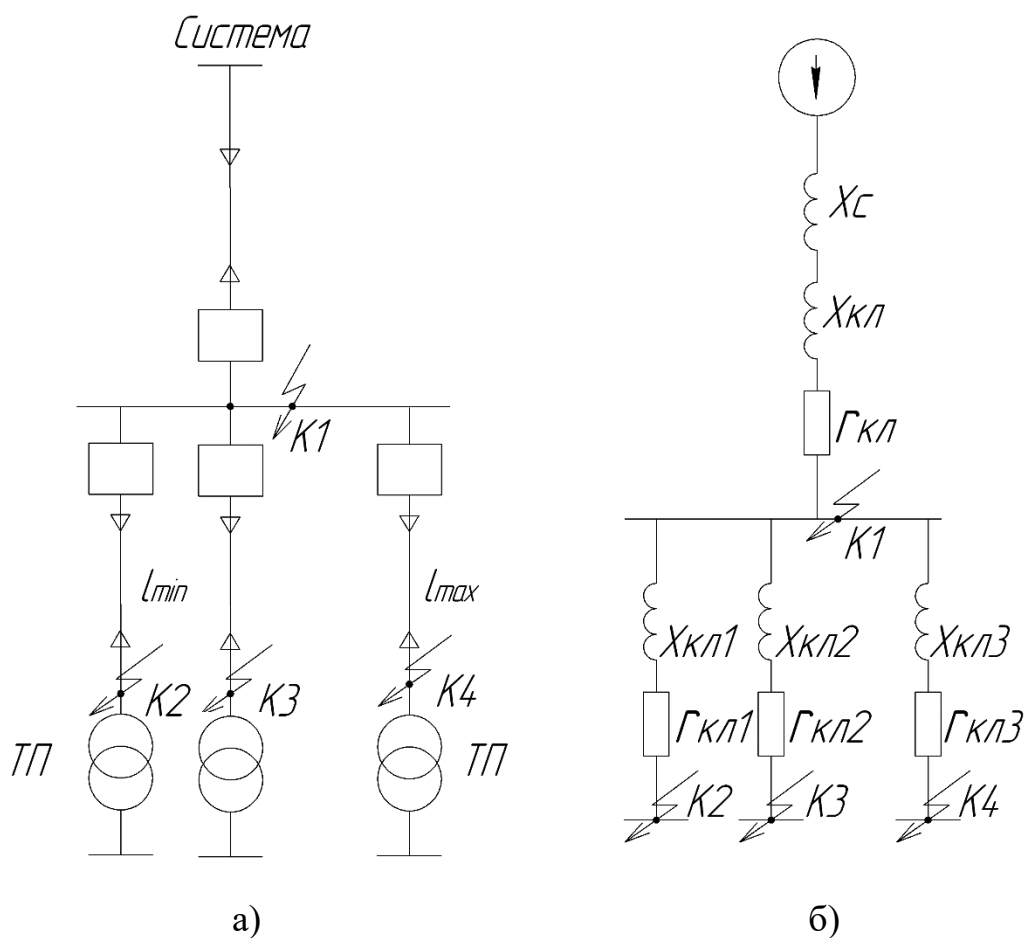


Рисунок 6.1 – Схеми для розрахунку струмів кз:

а) - розрахункова схема, б) - схема заміщення.

Приймаємо базисні величини:

$S_6=100$ МВА; $U_6=10,5$ кВ

Базисний струм:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{100}{1,732 \cdot 10,5} = 5,50 \text{ кА}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Опір енергосистеми приймаємо:

$$X_c = 0,25 \text{ в.о.}$$

Для живлення підприємства прийнято дволанцюгову кабельну лінію 10 кВ з кабелем ААШВ-(3×120). Оскільки лінії працюють паралельно, еквівалентний опір приймається вдвічі меншим.

Індуктивний опір живильної кабельної лінії:

$$X_{кл} = \frac{x_0 \cdot l \cdot S_6}{U_6^2 \cdot 2} = \frac{0,09 \cdot 1,5 \cdot 100}{10,5^2 \cdot 2} = 0,061 \text{ в.о.}$$

Активний опір живильної кабельної лінії:

$$R_{кл} = \frac{r_0 \cdot l \cdot S_6}{U_6^2 \cdot 2} = \frac{0,253 \cdot 1,5 \cdot 100}{10,5^2 \cdot 2} = 0,172 \text{ в.о.}$$

Результуючий опір у точці К1:

$$X_{K1} = X_c + X_{кл} = 0,25 + 0,061 = 0,311 \text{ в.о.}$$

$$Z_{K1} = \sqrt{X_{K1}^2 + R_{K1}^2} = \sqrt{0,311^2 + 0,172^2} = 0,356 \text{ в.о.}$$

Струм короткого замикання в точці К1:

$$I''_{K1} = \frac{I_6}{Z_{K1}} = \frac{5,50}{0,356} = 15,46 \text{ кА}$$

Ударний струм у точці К1:

$$i_{уд.К1} = 1,8\sqrt{2} \cdot I''_{K1} = 1,8 \cdot 1,414 \cdot 15,46 = 39,36 \text{ кА}$$

Розрахунок точки К2 — ТП1,2

Для ТП1,2:

$$S_{рТП1,2} = 1950,7 \text{ кВА}$$

Приймаємо кабель до ТП1,2 ААШВ-(3×120), довжина лінії — 0,150 км

Опір кабелю до ТП1,2:

$$X_{кл1} = \frac{x_0 \cdot l \cdot S_6}{U_6^2} = \frac{0,09 \cdot 0,150 \cdot 100}{10,5^2} = 0,012 \text{ в.о.}$$

$$R_{кл1} = \frac{r_0 \cdot l \cdot S_6}{U_6^2} = \frac{0,253 \cdot 0,150 \cdot 100}{10,5^2} = 0,034 \text{ в.о.}$$

						Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результуючий опір до точки К2:

$$Z_{K2} = \sqrt{(0,311 + 0,012)^2 + (0,172 + 0,034)^2} = 0,384 \text{ в.о.}$$

Струм К3 у точці К2:

$$I''_{K2} = \frac{I_6}{Z_{K2}} = \frac{5,50}{0,384} = 14,33 \text{ кА}$$

Ударний струм у точці К2:

$$i_{уд.К2} = 1,8\sqrt{2} \cdot I''_{K2} = 1,8 \cdot 1,414 \cdot 14,33 = 36,47 \text{ кА}$$

Розрахунок точки К3 — ТП3

Для ТП3:

$$S_{рТП3} = 1120,1 \text{ кВА}$$

Приймаємо кабель до ТП3 ААШВ-(3×95), довжина лінії — 0,280 км

Опір кабелю до ТП3:

$$X_{кл2} = \frac{0,09 \cdot 0,280 \cdot 100}{10,5^2} = 0,023 \text{ в.о.}$$

$$R_{кл2} = \frac{0,320 \cdot 0,280 \cdot 100}{10,5^2} = 0,081 \text{ в.о.}$$

Результуючий опір до точки К3:

$$Z_{K3} = \sqrt{(0,311 + 0,023)^2 + (0,172 + 0,081)^2} = 0,419 \text{ в.о.}$$

Струм К3 у точці К3:

$$I''_{K3} = \frac{5,50}{0,419} = 13,11 \text{ кА}$$

Ударний струм у точці К3:

$$i_{уд.К3} = 1,8\sqrt{2} \cdot 13,11 = 33,38 \text{ кА}$$

Розрахунок точки К4 — ТП4

Для ТП4 задано:

$$S_{рТП4} = 1439,5 \text{ кВА}$$

Приймаємо кабель до ТП4 ААШВ-(3×70), довжина лінії — 0,712 км

Опір кабелю до ТП4:

						Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$X_{\text{кл3}} = \frac{0,09 \cdot 0,712 \cdot 100}{10,5^2} = 0,058 \text{ в.о.}$$

$$R_{\text{кл3}} = \frac{0,443 \cdot 0,712 \cdot 100}{10,5^2} = 0,286 \text{ в.о.}$$

Результуючий опір до точки К4:

$$Z_{\text{К4}} = \sqrt{(0,311 + 0,058)^2 + (0,172 + 0,286)^2} = 0,589 \text{ в.о.}$$

Струм К3 у точці К4:

$$I''_{\text{К4}} = \frac{5,50}{0,589} = 9,34 \text{ кА}$$

Ударний струм у точці К4:

$$i_{\text{уд.К4}} = 1,8\sqrt{2} \cdot 9,34 = 23,78 \text{ кА}$$

Таблиця 6.1 - Підсумкова таблиця струмів короткого замикання

Точка КЗ	Місце КЗ	Z_{Σ} , в.о.	$I''_{\text{К}}$, кА	$i_{\text{уд}}$, кА
К1	Шини 10 кВ РП	0,356	15,46	39,36
К2	Ввід ТП1,2	0,384	14,33	36,47
К3	Ввід ТП3	0,419	13,11	33,38
К4	Ввід ТП4	0,589	9,34	23,78

6.2 Вибір кабельних ліній 10 кВ

Переріз кабелю попередньо визначається за економічною густиною струму:

$$F_{\text{ек}} = \frac{I_{\text{р}}}{J_{\text{ек}}}$$

Приймаємо:

$$J_{\text{ек}} = 1,4 \text{ А/мм}^2$$

Лінія до ТП3

Розрахунковий струм:

$$I_{\text{р}} = \frac{1120,1}{2 \cdot 1,732 \cdot 10} = 32,33 \text{ А}$$

Економічний переріз:

$$F_{\text{ек}} = \frac{32,33}{1,4} = 23,10 \text{ мм}^2$$

Термічно стійкий переріз:

$$F_{\text{тер}} = \frac{13,11 \cdot 1000 \cdot \sqrt{1,06}}{143} = 94,42 \text{ мм}^2$$

Приймаємо кабель ААШв – 10 (3 × 95)

Розрахунки для кабелів до ТП1,2 та ТП4 зведено в таблицю 6.2.

Таблиця 6.2 — Вибір кабельних ліній 10 кВ

Лінія	S _p , кВА	I _p , А	F _{ек} , мм ²	F _{тер} , мм ²	Прийнятий кабель
РП–ТП1,2	1950,7	56,31	40,22	103,15	ААШв-10 (3×120)
РП–ТП3	1120,1	32,33	23,10	94,42	ААШв-10 (3×95)
РП–ТП4	1439,5	41,55	29,68	67,27	ААШв-10 (3×70)

6.3 Вибір високовольтного обладнання

Вибір вимикача

Для встановлення у комірках 10 кВ приймаємо вакуумний вимикач:

ВВ/TEL–10–20/630

Основні параметри: $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$; $I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}$; $I_{\text{відкл}} = 20 \text{ кА}$

$$t_{\text{тер}} = 3 \text{ с}; \quad i_{\text{дин}} = 52 \text{ кА}$$

Перевірка виконується за найбільшим струмом КЗ у точці К1.

Робочий струм вводу 10 кВ:

$$I_{\text{роб}} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{4505,2}{1,732 \cdot 10} = 260,11 \text{ А}$$

Перевірка за номінальним струмом:

$$I_{\text{роб}} \leq I_{\text{ном}} = 260,11 \leq 630$$

Перевірка за відключаючою здатністю:

$$I''_{\text{К1}} \leq I_{\text{відкл}} = 15,46 \leq 20$$

Перевірка за динамічною стійкістю:

$$i_{\text{уд.К1}} \leq i_{\text{дин}} = 39,36 \leq 52$$

						Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тепловий імпульс КЗ:

$$B_k = I_{k1}^2 \cdot t = 15,46^2 \cdot 1,06 = 253,4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Допустимий тепловий імпульс вимикача:

$$B_{\text{доп}} = I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Перевірка за термічною стійкістю:

$$B_k \leq B_{\text{доп}} = 253,4 \leq 1200$$

Отже, вимикач ВВ/TEL-10-20/630 відповідає умовам роботи в даній мережі.

Таблиця 6.3 — Перевірка вимикача 10 кВ

Параметр	Умова вибору	Розрахунок
Номінальна напруга	$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$	$10 \leq 10$
Номінальний струм	$I_{\text{роб}} \leq I_{\text{ном}}$	$260,11 \leq 630$
Струм відключення	$I''_k \leq I_{\text{відкл}}$	$15,46 \leq 20$
Динамічна стійкість	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$	$39,36 \leq 52$
Термічна стійкість	$B_k \leq I_{\text{тер}}^2 t_{\text{тер}}$	$253,4 \leq 1200$

Вибір роз'єднувачів, трансформаторів струму та обмежувачів перенапруги

Роз'єднувач

Для комутації та створення видимого розриву в мережі приймаємо роз'єднувач РВЗ–10/630. Його параметри відповідають умовам:

$$U_{\text{ном}}=10 \text{ кВ}; I_{\text{ном}}=630 \text{ А}$$

Трансформатор напруги

Для даної схеми приймаємо трансформатор напруги НАМИ–10

Основні параметри $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}; U_2 = 100 \text{ В}$

$$K_{\text{тр}} = \frac{10000}{100} = 100$$

Перевірка виконується за напругою $U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}} \Rightarrow 10 \leq 10$, тобто трансформатор відповідає умовам роботи.

						Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Трансформатор струму

Для вимірювання та захисту приймаємо трансформатори струму ТПЛ–10 300/5. Коефіцієнт трансформації обрано з урахуванням робочого струму вводу $I_{\text{роб}}=260,11 \text{ A} < 300 \text{ A}$

Обмежувач перенапруги

Для захисту обладнання від атмосферних і комутаційних перенапруг приймаємо обмежувач перенапруги ОПН–10

Такі пристрої встановлюються на вводах трансформаторних підстанцій і приєднуються до заземлювального контуру найкоротшим шляхом.

						Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7 НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗЕРНОПЕРЕРОБНОГО КОМБІНАТУ

7.1. Компенсація реактивної потужності як метод енергозбереження системи електропостачання

Передача реактивної потужності супроводжується додатковими втратами потужності та електроенергії в елементах системи електропостачання. Це пояснюється тим, що збільшення реактивної складової навантаження призводить до зростання струмів у мережі, що, у свою чергу, викликає підвищення втрат. Крім того, завантаження ліній електропередачі та силових трансформаторів реактивною потужністю знижує їх пропускну здатність і потребує збільшення перерізів провідників, а також підвищення номінальної потужності або кількості трансформаторів. Передача реактивної потужності також спричиняє додаткові втрати напруги в елементах електричної мережі.

З метою зменшення перетоків реактивної потужності в електричних мережах необхідно здійснювати її компенсацію. У загальному випадку під компенсацією реактивної потужності розуміють зменшення обсягу реактивної потужності, що циркулює між джерелом електроенергії та електроприймачами. Реалізація заходів компенсації дозволяє забезпечити баланс реактивної потужності, знизити втрати активної потужності та електроенергії в мережі, а також створює умови для ефективного регулювання напруги шляхом використання компенсуючих пристроїв.

Слід зазначити, що компенсація реактивної потужності є одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності систем електропостачання, оскільки вона забезпечує зменшення втрат, підвищення пропускну здатності мережі та стабілізацію рівнів напруги в її вузлах.

Заходи з компенсації реактивної потужності доцільно поділяти на дві основні групи: організаційні та технічні. Організаційні заходи пов'язані з

						Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

природним зменшенням споживання реактивної потужності електроприймачами і, як правило, не потребують застосування спеціальних компенсуючих пристроїв. Вони базуються на раціоналізації режимів роботи обладнання, підвищенні коефіцієнта потужності існуючих установок та оптимізації технологічних процесів.

Технічні заходи передбачають встановлення спеціальних компенсуючих пристроїв у відповідних точках системи електропостачання. До таких пристроїв належать конденсаторні установки, синхронні компенсатори, статичні тиристорні компенсатори та інші засоби регулювання реактивної потужності.

Суттєвий економічний ефект від компенсації реактивної потужності досягається за умови раціонального поєднання різних заходів, які повинні бути технічно обґрунтованими та економічно доцільними. Це дозволяє забезпечити мінімізацію втрат електроенергії, підвищення ефективності роботи електричних мереж і оптимізацію режимів їх функціонування.

7.1.1 Споживання реактивної потужності асинхронними двигунами та силовими трансформаторами

Асинхронні двигуни та силові трансформатори є основними споживачами реактивної потужності в системах електропостачання, на частку яких припадає близько 60–80 % її загального споживання.

Розглянемо особливості споживання реактивної потужності цими електроприймачами на основі їхніх схем заміщення. Схеми заміщення асинхронного двигуна та трансформатора мають подібну структуру і відрізняються лише гілкою, що моделює навантаження. У зв'язку з цим для аналізу доцільно використовувати узагальнену Г-подібну схему заміщення, яка наведена на рис. 7.1.

						Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

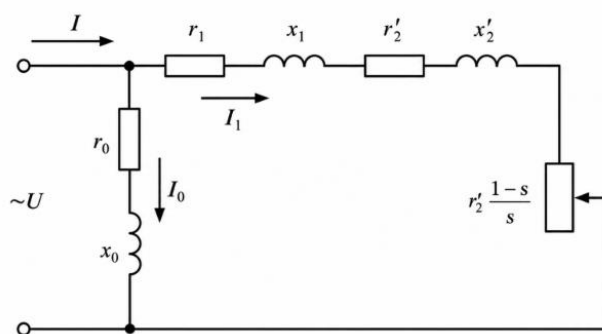


Рисунок 7.1 – Схема заміщення асинхронного двигуна

В загальному випадку реактивна складова струму навантаження визначається як сума складових:

$$I_p = I_{0p} + I_{1p}$$

де I_0 - струм холостого ходу.

Відповідно споживана реактивна потужність визначається як:

$$Q = Q_0 + Q_p$$

або у розгорнутому вигляді:

$$Q = 3 I_0^2 x_0 + 3 I_1^2 (x_1 + x_2)$$

де: Q_0 - реактивна потужність холостого ходу (намагнічування);

Q_p - реактивна потужність розсіювання (короткого замикання);

x_0 - реактивний опір намагнічувальної гілки;

x_1, x_2 - індуктивні опори обмоток.

Реактивна потужність холостого ходу Q_0 практично не залежить від навантаження, тоді як реактивна складова Q_p змінюється пропорційно квадрату навантаження:

- для асинхронних двигунів - квадрату активної потужності;
- для трансформаторів - квадрату повної потужності.

Таким чином, реактивна потужність асинхронного двигуна складається з двох складових: потужності намагнічування та потужності полів розсіювання, і визначається залежністю:

$$Q_{\text{АД}} = Q_0 + Q_{\text{ном}} \cdot k_z^2$$

де $Q_{\text{ном}}$ - реактивна потужність розсіювання при номінальному навантаженні;

$k_z = \frac{P}{P_{\text{ном}}}$ - коефіцієнт завантаження двигуна за активною потужністю.

Наведена залежність показує, що навіть при малому навантаженні асинхронний двигун споживає значну реактивну потужність за рахунок складової намагнічування. Це обумовлює низький коефіцієнт потужності при недовантаженні двигунів і підтверджує доцільність застосування компенсації реактивної потужності.

При номінальному завантаженні асинхронного двигуна значення обох складових реактивної потужності є приблизно однаковими, тобто $Q_0 \approx Q_p$, унаслідок чого $Q_{\text{АД}} \approx 2Q_0$.

При нульовому завантаженні ($k_z=0$) реактивна потужність двигуна визначається лише складовою намагнічування:

$$Q_{\text{АД}} = Q_0.$$

Асинхронні двигуни споживають значну частину реактивної потужності в промисловості, яка становить близько 40 % від загального обсягу. Режими їх роботи істотно впливають на сумарне споживання реактивної потужності промисловими підприємствами.

З метою зменшення споживання реактивної потужності асинхронними двигунами застосовують оптимізацію режимів їх експлуатації. Зокрема, доцільно обирати електродвигуни з мінімально необхідним запасом потужності, уникати їх тривалої роботи в режимі холостого ходу, а також використовувати перемикання обмоток статора зі схеми «трикутник» на «зірку» при зниженні навантаження приблизно нижче 45 % від номінального. Це дозволяє зменшити струм і, відповідно, реактивну складову потужності, що споживається з мережі.

						Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7.1.2 Споживання реактивної потужності силовими трансформаторами

Реактивна потужність, що споживається силовими трансформаторами, також складається з двох складових: потужності намагнічування та потужності полів розсіювання.

Для визначення цих складових Q_0 та Q_p використовують паспортні дані трансформатора. Загальна реактивна потужність трансформатора визначається як:

$$Q_m = Q_0 + Q_p$$

де складові обчислюються за виразами:

$$Q_0 = S_{\text{ном.т}} \cdot \frac{I_0}{100}$$

$$Q_p = S_{\text{ном.т}} \cdot \frac{u_k}{100} \cdot \beta^2$$

Отже, повна реактивна потужність:

$$Q_T = S_{\text{ном.т}} \left(\frac{I_0}{100} + \frac{u_k}{100} \cdot \beta^2 \right)$$

де $S_{\text{ном.т}}$ - номінальна потужність трансформатора;

I_0 - струм холостого ходу, %;

u_k - напруга короткого замикання, %;

$\beta = \frac{S}{S_{\text{ном.т}}}$ - коефіцієнт завантаження трансформатора за повною потужністю.

Для триобмоткових трансформаторів реактивна потужність визначається з урахуванням параметрів кожної обмотки:

$$Q_T = Q_0 + \sum_{i=1}^3 Q_{\text{ном.і}} \cdot \beta_i^2$$

де β_i - коефіцієнт завантаження відповідної обмотки.

Порівняно з асинхронними двигунами, силові трансформатори споживають меншу реактивну потужність на одиницю потужності. Це

						Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пояснюється відсутністю повітряного зазору в їх магнітному колі, що забезпечує менші значення намагнічувального струму та, відповідно, реактивної потужності Q_0 .

Разом із тим загальне споживання реактивної потужності трансформаторами є суттєвим і становить близько 30 % від загального обсягу в промисловості. Це пов'язано з тим, що сумарна встановлена потужність трансформаторів, як правило, значно перевищує потужність асинхронних двигунів.

При цьому основна частина реактивної потужності трансформаторів витрачається саме на процес намагнічування.

З метою зменшення втрат реактивної потужності в силових трансформаторах доцільно оптимізувати режими їх експлуатації. Зокрема, рекомендується виводити в резерв трансформатори, ступінь завантаження яких становить менше ніж 30 % від номінальної потужності.

Крім того, ефективним заходом є перерозподіл навантаження між трансформаторами з метою підвищення коефіцієнта їх використання, а також заміна малозавантажених трансформаторів на обладнання з меншою номінальною потужністю.

Реалізація зазначених заходів дозволяє зменшити споживання реактивної потужності, знизити втрати електроенергії та підвищити ефективність роботи системи електропостачання.

7.1.3 Втрати реактивної потужності в лініях електропередачі

У лініях електропередачі та розподільчих мережах, поряд із втратами активної потужності, мають місце також втрати реактивної складової.

Під втратами реактивної потужності в даному випадку умовно розуміють ту її частину, яка витрачається на створення змінного магнітного поля навколо провідників під час передачі електричної енергії.

Втрати реактивної потужності в лініях електропередачі визначаються за виразом:

						Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_{\text{л}} = \frac{P^2 + Q^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot x_{\text{л}}$$

де: P - активна потужність, що передається по лінії;

Q - реактивна потужність;

$U_{\text{ном}}$ - номінальна напруга лінії;

$x_{\text{л}}$ - реактивний опір лінії.

Отже, величина втрат реактивної потужності в лініях електропередачі залежить від навантаження електроприймачів, рівня напруги в мережі, реактивного опору лінії, а також від обсягу реактивної потужності, що передається.

Разом із тим слід враховувати, що в лініях електропередачі має місце також генерація реактивної потужності, зумовлена їх ємнісною провідністю. Загальна ємнісна провідність лінії визначається як:

$$b_{\text{л}} = b_0 \cdot l$$

де b_0 - питома ємнісна провідність лінії, l - її довжина.

Зарядна (ємнісна) потужність лінії визначається за формулою:

$$Q_{\text{с}} = U_{\text{ном}}^2 \cdot b_{\text{л}}$$

Таким чином, хоча втрати реактивної потужності в лініях електропередачі становлять у середньому близько 5 % від загального її споживання, наявність зарядної потужності частково компенсує ці втрати, що необхідно враховувати при аналізі режимів роботи електричних мереж.

7.1.4 Вплив реактивної потужності на режим напруги та якість електроенергії

Як було встановлено раніше, активна та реактивна потужності в електричній мережі, що живить електроприймачі, залежать від частоти та рівня напруги на їх затискачах.

Хоча в реальних умовах між частотою в енергосистемі та рівнем напруги в її вузлах існує певний взаємозв'язок, для спрощення подальшого аналізу

						Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

доцільно прийняти, що частота є сталою величиною і дорівнює номінальному значенню:

$$f=50 \text{ Гц}$$

При цьому вважається, що функціональна залежність між частотою та напругою відсутня.

На рис. 7.2 наведені залежності $P=f(U)$, $Q=f(U)$ для окремого вузла енергосистеми. Зазначені залежності називаються статичними характеристиками навантаження за напругою.

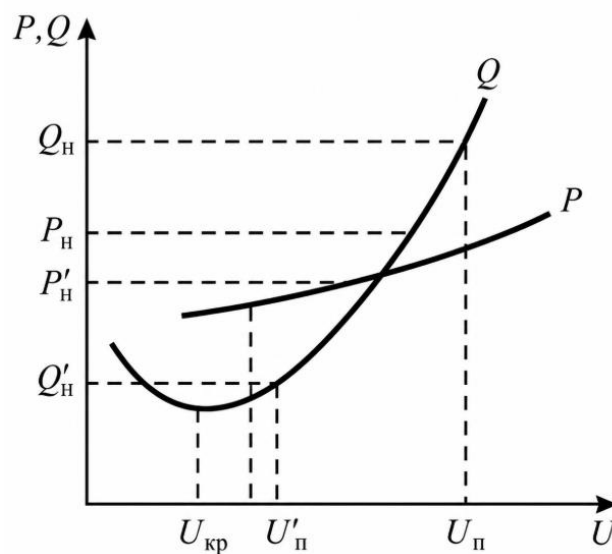


Рисунок 7.2 - Статичні характеристики навантаження за напругою

Характер залежностей $P=f(U)$ та $Q=f(U)$ визначається типами електроприймачів, підключених до відповідного вузла енергосистеми, а також режимами їх роботи. Залежності, наведені на рис. 7.2, відповідають змішаному навантаженню, що складається переважно із силових електроприймачів (головним чином асинхронних двигунів) та освітлювальних установок. Із рисунка видно, що в області нормальних значень напруги, розташованих праворуч від критичної напруги $U_{кр}$, кожному значенню напруги відповідає лише одне визначене значення навантаження.

Оскільки процеси виробництва та споживання електричної енергії відбуваються одночасно, генерована в кожний момент часу потужність жорстко визначається її споживанням, і навпаки. Це означає, що в усталеному

					Арк.
					50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

режимі в енергосистемі не може існувати небалансу між сумарною генерованою та сумарною споживаною потужністю з урахуванням втрат у мережі. Водночас у кожний момент часу активна та реактивна потужності, що генеруються в енергосистемі, визначаються значеннями частоти та напруги на затискачах електроприймачів.

Якщо на рис. 7.2 горизонтальна пряма P_H характеризує потужність, що надходить у розглянутий вузол енергосистеми, то точка її перетину з характеристикою навантаження $P=f(U)$ визначає рівень напруги U_H , який може встановитися за наявності джерел, здатних забезпечити в цьому вузлі необхідну реактивну потужність Q_H . За відсутності таких джерел заданий рівень напруги U_H у вузлі мережі не може бути досягнутий.

Отже, рівень напруги у вузлі навантаження безпосередньо залежить від наявності в мережі достатніх джерел реактивної потужності. У випадку, коли їх потужність є недостатньою для забезпечення навантаження при заданому рівні напруги, відбувається зниження напруги. При цьому, відповідно до статичних характеристик навантаження, зменшуються і значення споживаної потужності до рівня, який може забезпечити джерело.

Відповідність між реактивною потужністю, необхідною для підтримання певного рівня напруги, та потужністю наявних джерел визначається на основі рівняння балансу реактивної потужності.

Кожному конкретному значенню величин, що входять до цього рівняння, відповідає певне значення напруги (в межах, близьких до номінального). Це пояснюється тим, що баланс реактивної потужності безпосередньо визначає режим напруги в електричній мережі.

Пояснюється це наступним чином.

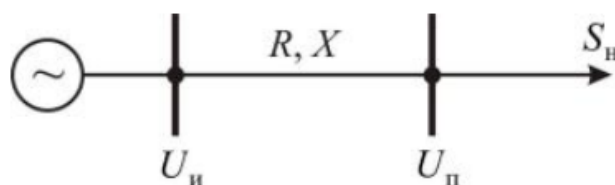


Рисунок 7.3 – Схема електричної мережі

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Нехай задана мережа, зображена на рис. 7.3. У деякому усталеному режимі в системі має місце баланс реактивної потужності, якому відповідає напруга в точці приєднання навантаження U_{Π} .

Цьому значенню напруги, відповідно до статичних характеристик (рис. 7.2), відповідає повна потужність навантаження:

$$S_{\Pi} = \sqrt{P_{\Pi}^2 + Q_{\Pi}^2}$$

Напруга джерела при цьому дорівнює $U_{\text{дж}}$, причому між напругою джерела та напругою в точці навантаження існує залежність:

$$U_{\Pi} = U_{\text{дж}} - \Delta U$$

де падіння напруги в мережі визначається як:

$$\Delta U = \frac{P_{\Pi} R + Q_{\Pi} X}{U_{\Pi}}$$

Отже, остаточно маємо:

$$U_{\Pi} = U_{\text{дж}} - \frac{P_{\Pi} R + Q_{\Pi} X}{U_{\Pi}}$$

де R і X - відповідно активний та реактивний опори мережі.

Розглянемо зміну режиму. При зменшенні уставки регулятора збудження генератора напруга джерела знижується до $U'_{\text{дж}}$, а напруга в точці приєднання навантаження - до U'_{Π} .

Відповідно до статичних характеристик, зменшується і потужність навантаження:

$$S'_{\Pi} = \sqrt{(P'_{\Pi})^2 + (Q'_{\Pi})^2}$$

Для нового режиму виконується аналогічне співвідношення:

$$U'_{\Pi} = U'_{\text{дж}} - \frac{P'_{\Pi} R + Q'_{\Pi} X}{U'_{\Pi}}$$

де $\Delta U'$ - падіння напруги при нових значеннях навантаження та напруги.

						Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, наведений аналіз показує, що рівень напруги у вузлі навантаження визначається як параметрами джерела, так і величинами навантаження та параметрами мережі. Особливо істотний вплив має реактивна складова потужності, оскільки доданок $Q_n X$ безпосередньо визначає величину падіння напруги, що обґрунтовує необхідність компенсації реактивної потужності для забезпечення стабільного режиму роботи електричних мереж.

Зміна напруги на навантаженні відбувається під впливом двох основних факторів: зниження напруги на джерелі живлення та зміни падіння напруги в електричній мережі.

При цьому зміна напруги в точці приєднання споживача є меншою, ніж зміна напруги джерела, тобто $\Delta U_{\text{п}} < \Delta U_{\text{дж}}$, що пояснюється нелінійним характером залежностей $P = f(U)$ та $Q = f(U)$. Іншими словами, внаслідок зміни навантаження відбувається саморегулювання напруги $U_{\text{п}}$ відповідно до статичних характеристик споживачів. Це явище називається регулювальним ефектом навантаження за напругою. У результаті цього ефекту новим значенням напруг $U_{\text{дж}}$ та $U_{\text{п}}$ відповідають нові значення в рівнянні балансу реактивної потужності.

Аналіз статичних характеристик показує, що найбільшим регулювальним ефектом володіє реактивна складова навантаження, оскільки залежність $Q=f(U)$ є значно крутішою, ніж залежність $P=f(U)$. Для енергосистеми в цілому зміна напруги на 1 % викликає зміну активного навантаження в межах від 0,6 % до 2 % залежно від структури споживачів, тоді як реактивне навантаження змінюється в межах 2–5 %.

Разом із тим регулювальний ефект проявляється лише до певного рівня напруги, який називається критичним $U_{\text{кр}}$. Для промислових систем електропостачання значення критичної напруги становить приблизно 0,75–0,85 від номінального рівня.

У випадку, коли напруга в точці навантаження стає меншою за критичну ($U_{\text{п}} < U_{\text{кр}}$), подальше її зниження призводить до зростання споживання реактивної потужності. Це, у свою чергу, спричиняє збільшення падіння

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

напруги в мережі, що викликає додаткове зниження напруги. Такий взаємопов'язаний процес має лавиноподібний характер і супроводжується швидким, протягом кількох секунд, зниженням напруги. Це явище отримало назву лавини напруги, при якій порушується баланс реактивної потужності.

Наслідком такого режиму є втрата стійкості навантаження, що проявляється у зупинці та відключенні електродвигунів,

Зупинка електродвигуна відбувається у випадку, коли обертальний момент на його валу стає меншим за момент опору механізму, який приводиться в дію. Для асинхронного двигуна обертальний момент має квадратичну залежність від напруги живлення, тобто $M \sim U^2$.

Тому значне зниження напруги призводить до ще більш суттєвого зменшення обертального моменту. У разі досягнення критичного рівня напруги двигун втрачає здатність підтримувати обертання та зупиняється.

При зупинці електродвигунів різко зростає споживаний ними реактивний струм, що спричиняє спрацювання захисних пристроїв і їх автоматичне відключення від мережі. Після відключення навантаження напруга в мережі відновлюється до нормального рівня.

7.1.5 Вплив реактивної потужності на втрати потужності та електроенергії і пропускну здатність електричних мереж

Окрім забезпечення балансу реактивної потужності в енергосистемі, реалізація заходів з її компенсації забезпечує значний техніко-економічний ефект. Він проявляється у зниженні втрат потужності та електроенергії, зменшенні втрат напруги в існуючих електричних мережах, а також у більш ефективному використанні основного електрообладнання. У нових або реконструйованих мережах це дозволяє зменшити кількість або номінальну потужність силових трансформаторів, знизити необхідні перерізи ліній електропередачі та зменшити габарити обладнання розподільчих пристроїв підстанцій.

						Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При передачі активної потужності P і реактивної потужності Q через елемент системи електропостачання з активним опором R та реактивним опором X втрати потужності визначаються виразами:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R$$

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot X$$

З наведених залежностей видно, що втрати потужності залежать від повної потужності, тобто включають вплив як активної, так і реактивної складових. Збільшення реактивної потужності призводить до зростання струму в мережі, що, у свою чергу, викликає додаткові втрати активної енергії.

Установлення компенсуючих пристроїв безпосередньо у споживача дозволяє зменшити перетоки реактивної потужності в мережі. Це призводить до зниження струмів у лініях, а відповідно - до зменшення втрат потужності та електроенергії, а також до підвищення пропускної здатності електричних мереж.

Покращення використання основного електрообладнання внаслідок впровадження заходів з компенсації реактивної потужності полягає у зменшенні навантаження мережевих елементів реактивним струмом та підвищенні пропускної здатності електричних мереж. Це створює умови для роботи обладнання в більш економічних режимах, а також забезпечує можливість його додаткового завантаження активною потужністю.

Під час передачі реактивної потужності по мережі виникають додаткові втрати напруги, які визначаються виразом:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U}$$

де P і Q - відповідно активна та реактивна потужності, що передаються; R і X - активний та реактивний опори елемента мережі; U - напруга.

Ефект компенсації реактивної потужності, який полягає у зниженні втрат напруги, а отже, і підвищенні рівня напруги у електроприймачів, є

						Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

особливо важливим для навантажених мереж. Навіть за умови підтримання належного рівня напруги у центрі живлення, у віддалених точках мережі напруга може знижуватися до недопустимих значень. Перевищення допустимих відхилень напруги призводить до зниження продуктивності обладнання, погіршення якості продукції та інших небажаних наслідків.

Наявність у споживача компенсуючих пристроїв із регульованою реактивною потужністю дозволяє не лише здійснювати компенсацію реактивної складової, але й виконувати локальне регулювання напруги. Це досягається за рахунок зміни втрат напруги в розподільчій мережі на ділянці від трансформаторів з регулюванням під навантаженням до електроприймачів.

Для мінімізації перетоків реактивної потужності компенсуючі пристрої доцільно розміщувати безпосередньо поблизу місць її споживання. Ефективність такого підходу можна проілюструвати на прикладі зміни струмів і потужностей у лінії.

До встановлення компенсуючих пристроїв струм у лінії визначається як:

$$I_{\text{н}} = I_{\text{на}} + jI_{\text{нр}}$$

де $I_{\text{на}}$ - активна складова струму, $I_{\text{нр}}$ - реактивна складова.

Повна потужність навантаження дорівнює:

$$S_{\text{н}} = P_{\text{н}} + jQ_{\text{н}}$$

Після встановлення компенсуючих пристроїв потужністю $Q_{\text{к}}$ реактивна складова струму та реактивна потужність у лінії зменшуються. Струм у лінії набуває вигляду:

$$I_{\text{л}} = I_{\text{на}} + j(I_{\text{нр}} - I_{\text{к}})$$

а потужність, що передається по лінії, визначається як:

$$S_{\text{л}} = P_{\text{н}} + j(Q_{\text{н}} - Q_{\text{к}})$$

Наведені залежності показують, що компенсація реактивної потужності призводить до зменшення реактивної складової струму, зниження повного

						Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струму в лінії та відповідного зменшення втрат потужності і напруги, що підвищує ефективність функціонування електричної мережі.

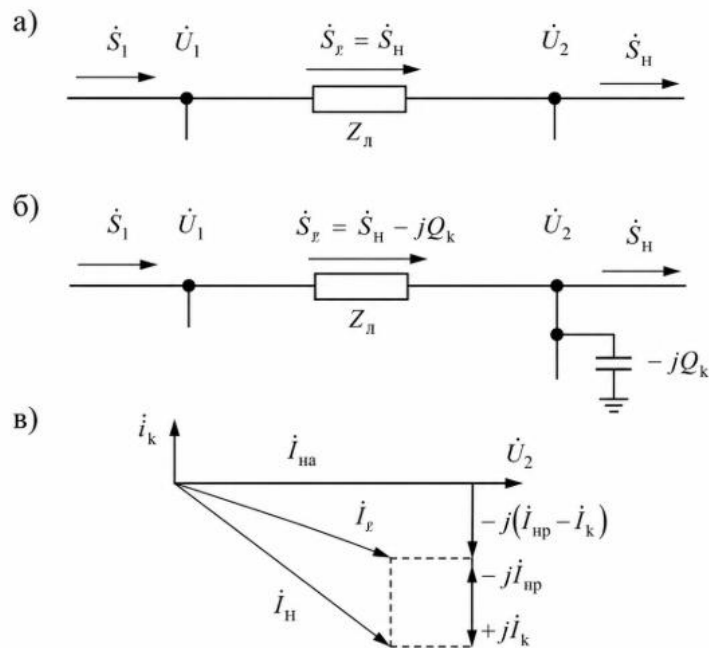


Рисунок 7.4 - Пояснення ефекту встановлення компенсуючих пристроїв: а, б - схеми заміщення лінії електропередачі з навантаженням на приймальному кінці до та після компенсації реактивної потужності; в - векторна діаграма струмів.

Таким чином, після встановлення компенсуючих пристроїв реактивний струм і реактивна потужність у лінії зменшуються, тобто відбувається її розвантаження за реактивною складовою.

В результаті цього зменшуються втрати потужності в лінії, які визначаються як:

$$\Delta P = \frac{P_H^2 + (Q_H - Q_K)^2}{U^2} \cdot R_L$$

де Q_K - потужність компенсуючого пристрою.

Крім того, зменшуються втрати напруги в лінії:

$$\Delta U = \frac{P_H R_L + (Q_H - Q_K) X_L}{U}$$

Отже, компенсація реактивної потужності забезпечує зниження струмового навантаження мережі, що призводить до зменшення втрат

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	57

потужності та напруги, а також підвищення ефективності роботи електричних мереж.

Потужність компенсуючих пристроїв повинна визначатися з урахуванням забезпечення максимальної економічної ефективності при одночасному виконанні ряду технічних обмежень. Зокрема, у всіх вузлах електричної мережі має забезпечуватися баланс реактивної потужності, а рівень напруги не повинен виходити за встановлені допустимі межі. Крім того, струмове навантаження кожного елемента мережі не повинно перевищувати його допустимих значень, а параметри джерел реактивної потужності мають залишатися в межах установлених мінімальних і максимальних значень.

Таким чином, компенсація реактивної потужності має важливе практичне значення, оскільки забезпечує суттєвий техніко-економічний ефект. Реалізація відповідних заходів дозволяє значно зменшити втрати електроенергії, підвищити ефективність використання електрообладнання та оптимізувати режими роботи електричних мереж. В масштабах промислових підприємств і енергосистем це може забезпечувати значну економію ресурсів у процесі експлуатації.

7.1.6 Розрахунок зниження втрат після компенсації реактивної потужності

Вихідні дані: $P, \cos\varphi_1, \cos\varphi_2, U, t$

де P - активна потужність, кВт;

$\cos\varphi_1$ - початковий коефіцієнт потужності;

$\cos\varphi_2$ - бажаний коефіцієнт потужності після компенсації;

U - напруга мережі;

t - час роботи, год/рік.

Потужність компенсуючої установки:

$$Q_c = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)$$

$$\text{де } \operatorname{tg}\varphi = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1}$$

						Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приклад розрахунку.

Припустимо, що $P=100$ кВт, $\cos \varphi_1=0,75$, $\cos \varphi_2=0,95$

Тоді $\operatorname{tg} \varphi_1=0,88$, $\operatorname{tg} \varphi_2=0,33$, $Q_c=100(0,88-0,33)=55$ квар

Отже, потрібна батарея конденсаторів приблизно:

$Q_c \approx 55$ квар

Зниження струму і потужності

До компенсації $S_1 = \frac{P}{\cos \varphi_1} = \frac{100}{0,75} = 133,3$ кВА

Після компенсації $S_2 = \frac{100}{0,95} = 105,3$ кВА

Зменшення повної потужності:

$\Delta S = 133,3 - 105,3 = 28$ кВА

Зменшення втрат у мережі

Втрати потужності в лінії пропорційні квадрату струму:

$$\Delta P \sim I^2 R$$

Тому відносне зменшення втрат:

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 = \left(\frac{105,3}{133,3} \right)^2 = 0,624$$

Тобто втрати після компенсації становлять приблизно 62,4% від початкових.

Зниження втрат: $100 - 62,4 = 37,6\%$

Підвищення коефіцієнта потужності з 0,75 до 0,95 за активної потужності 100 кВт потребує встановлення компенсуючої установки приблизно 55 квар. Це дозволяє зменшити струмове навантаження мережі та скоротити втрати активної потужності орієнтовно на 37,6%.

7.2.4 Організаційні заходи з компенсації реактивної потужності

Організаційні заходи з компенсації реактивної потужності пов'язані з природним зменшенням її споживання електроприймачами та не потребують застосування спеціальних компенсуючих пристроїв. У зв'язку з цим при вирішенні задачі компенсації реактивної потужності такі заходи доцільно

						Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розглядати насамперед, оскільки їх реалізація, як правило, не потребує значних капітальних витрат.

Оскільки основними споживачами реактивної потужності в промисловості є асинхронні двигуни, силові трансформатори та перетворювальні установки, першочергове значення має зниження реактивної потужності, що споживається саме цими електроприймачами.

Досягнення цієї мети забезпечується шляхом реалізації комплексу організаційних заходів, спрямованих на оптимізацію режимів роботи обладнання та раціональне використання його параметрів. Зокрема, важливим є правильний вибір електродвигунів за номінальною потужністю та типом, що дозволяє уникнути їх недовантаження. У випадках тривалої роботи двигунів із низьким рівнем завантаження доцільною є їх заміна на електродвигуни меншої номінальної потужності.

Ефективним заходом є також зниження напруги на обмотках асинхронних двигунів, які систематично працюють при малих навантаженнях, що дозволяє зменшити споживання реактивної потужності. Важливе значення має обмеження тривалості роботи двигунів у режимі холостого ходу, оскільки в цьому режимі вони споживають значну реактивну потужність при мінімальній корисній віддачі.

Підвищення якості ремонту електродвигунів сприяє відновленню їх номінальних характеристик і зменшенню втрат. У частині експлуатації силових трансформаторів доцільно здійснювати їх відключення або заміну в періоди низького навантаження, що дозволяє зменшити споживання реактивної потужності на намагнічування.

Крім того, важливим напрямом є вибір раціональних схем силових з'єднань і систем керування вентильними перетворювачами, що дозволяє мінімізувати споживання реактивної потужності такими установками.

						Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7.2 Енергозбереження в електроприводах зернопереробного обладнання шляхом застосування частотного регулювання

7.2.1 Особливості функціонування електроприводів у зернопереробних установках

Сучасні підприємства зернопереробної галузі характеризуються значним рівнем електроспоживання, що обумовлено широким використанням електроприводів у технологічних процесах транспортування, очищення, подрібнення та сушіння зерна. Основними споживачами електроенергії є приводи норій, стрічкових і шнекових транспортерів, вентиляторів аспіраційних систем, а також дробарок і млинів.

У більшості випадків електроприводи працюють у нерегульованому режимі з постійною швидкістю обертання, що не відповідає змінному характеру технологічного навантаження. Це призводить до:

- перевитрат електроенергії;
- зниження коефіцієнта корисної дії (ККД);
- збільшення механічних втрат;
- підвищеного зносу обладнання.

Одним із найбільш ефективних способів зниження енергоспоживання є впровадження частотно-керованого електроприводу на базі сучасних перетворювачів частоти.

Електроприводи, що застосовуються у зернопереробному обладнанні, характеризуються специфічними умовами експлуатації, які визначаються змінним характером технологічного навантаження. У процесі роботи спостерігається нерівномірність подачі зернової маси, що призводить до періодичних перевантажень або, навпаки, до роботи в режимах недовантаження. Крім того, для таких систем характерна наявність холостих режимів, часті пуски та зупинки, що негативно впливає на енергетичні показники та ресурс обладнання.

Однією з основних проблем є недовантаження електродвигунів, оскільки вони часто працюють лише на 40–60% від номінальної потужності,

						Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що спричиняє зниження їх коефіцієнта корисної дії. Значні втрати електроенергії виникають також у режимі холостого ходу, коли обладнання продовжує функціонувати за відсутності технологічного матеріалу. Важливим фактором є і високі пускові струми, які при прямому пуску можуть перевищувати номінальні значення у 5–7 разів, що створює додаткове навантаження на електричну мережу. Окрім цього, постійна швидкість обертання викликає підвищені механічні втрати, пов'язані з тертям у вузлах машин та зносом елементів конструкції.

7.2.2 Енергозберігаючі механізми при використанні частотно-керованого електроприводу

1) Узгодження швидкості з навантаженням

Використання частотних перетворювачів дозволяє змінювати швидкість обертання електроприводу залежно від фактичної подачі зерна. Такий підхід забезпечує більш точне узгодження режиму роботи обладнання з технологічними потребами процесу. У результаті виключається перевиробництво, знижується споживання електричної енергії та підвищується загальна ефективність функціонування системи.

2) Зниження втрат у режимах холостого ходу

У випадках відсутності матеріалу частотно-керований електропривід дає змогу зменшувати швидкість обертання або переводити систему в енергозберігаючий режим. У деяких випадках реалізується автоматичне вимкнення приводу, що дозволяє суттєво скоротити непродуктивні витрати електроенергії.

3) Плавний пуск та зупинка

Застосування частотних перетворювачів забезпечує реалізацію режимів плавного пуску та гальмування. Це сприяє значному зменшенню пускових струмів, зниженню навантаження на електричну мережу та підвищенню надійності роботи обладнання. Крім того, зменшується механічне навантаження на вузли машин, що позитивно впливає на їх довговічність.

						Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4) Підвищення ефективності роботи електродвигуна

Частотне регулювання створює умови для роботи електродвигуна у режимах, близьких до оптимальних. Це дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії, зменшити втрати електроенергії в обмотках та магнітопроводах, а також знизити рівень нагріву двигуна. У сукупності це забезпечує підвищення енергетичної ефективності та надійності електроприводу.

7.2.3 Застосування частотного регулювання у зернопереробному обладнанні

– Стрічкові та шнекові транспортери. У транспортних системах зернопереробних підприємств частотне регулювання дозволяє змінювати швидкість переміщення матеріалу залежно від його потоку. Такий підхід забезпечує раціональне використання електроенергії, що дає змогу досягати економії на рівні 15–30%. Одночасно зменшується знос стрічок, підшипників та інших механічних елементів, а також підвищується стабільність технологічного процесу.

– Норії (ковшові елеватори). У ковшових елеваторах застосування частотного регулювання дозволяє реалізувати плавний пуск без ударних навантажень, що суттєво знижує динамічні зусилля у механізмах. Зменшення пікових струмів позитивно впливає на стан електромережі, а можливість регулювання швидкості обертання забезпечує адаптацію роботи обладнання до фактичної продуктивності.

– Вентилятори аспіраційних систем. Для вентиляторів характерна залежність споживаної потужності від швидкості обертання, яка має кубічний характер.

$$P \sim n^3$$

Це означає, що навіть незначне зниження швидкості призводить до істотного зменшення споживаної потужності, що робить частотне регулювання особливо ефективним в системах аспірації.

						Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Дробарки та млини. У дробарках і млинах використання частотного регулювання сприяє стабілізації навантаження на електропривід, що дозволяє уникнути перевантажень і аварійних режимів роботи. Крім того, забезпечується більш рівномірний процес подрібнення, що позитивно впливає на якість кінцевого продукту.

7.2.4 Принцип дії частотного регулювання електроприводу

Частотне регулювання базується на зміні частоти та напруги живлення асинхронного двигуна, що дозволяє керувати його швидкістю обертання.

Основна залежність швидкості двигуна:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

де n - швидкість обертання, об/хв;

f - частота живлення, Гц;

p - число пар полюсів.

Зміна частоти дозволяє плавно регулювати швидкість електроприводу в широкому діапазоні без значних втрат енергії.

Частотний перетворювач виконує такі функції:

- перетворення змінного струму в постійний;
- формування змінної частоти та напруги;
- реалізація алгоритмів керування двигуном.

Частотне керування асинхронними двигунами є одним із найбільш ефективних способів регулювання швидкості в порівнянні з іншими методами. Основним обмеженням його широкого застосування тривалий час залишалася відносно висока вартість частотних перетворювачів, однак у сучасних умовах цей фактор поступово втрачає визначальне значення. Застосування такого способу дозволяє забезпечити плавну зміну швидкості обертання в широкому діапазоні, включаючи роботу як у зоні постійного моменту, так і у зоні постійної потужності. При цьому механічні характеристики електроприводу

						Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відзначаються високою жорсткістю, що є важливою перевагою для технологічних процесів.

Суттєвою особливістю частотного регулювання є збереження практично сталого ковзання при зміні швидкості, на відміну від реостатних методів керування. За таких умов втрати потужності в роторному колі залишаються незначними і можуть бути оцінені залежністю

$$\Delta P = P_1 \cdot s$$

де P_1 - підведена до двигуна потужність,

s - ковзання.

Це свідчить про високий рівень енергоефективності частотно-керованого електроприводу.

Для забезпечення оптимального використання асинхронного двигуна та досягнення високих енергетичних показників, зокрема коефіцієнта потужності $\cos\varphi$, коефіцієнта корисної дії та перевантажувальної здатності, необхідно одночасно змінювати не лише частоту живлення f_1 , але й напругу U_1 . Закон зміни напруги визначається характером навантаження, який задається функціональною залежністю моменту опору від швидкості обертання $M_c = f(\omega)$.

На практиці для забезпечення стабільної роботи приводу часто дотримуються умови підтримання сталої перевантажувальної здатності двигуна, що характеризується відношенням максимального моменту до моменту навантаження:

$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_c} = const$$

де λ - коефіцієнт перевантажувальної здатності.

Максимальний електромагнітний момент асинхронного двигуна може бути поданий у вигляді

$$M_{max} = \frac{A \cdot U_1^2}{\omega_0 \cdot X_k}$$

						Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

A - коефіцієнт, що враховує конструктивні параметри двигуна;

ω_0 - синхронна кутова швидкість;

X_k - повний індуктивний опір короткого замикання, який визначається як сума реактивних опорів статора і ротора.

Оскільки синхронна швидкість ω_0 та індуктивний опір X_k залежать від частоти живлення, максимальний момент двигуна обернено пропорційний квадрату частоти:

$$M_{max} \sim \frac{1}{f_1^2}$$

Ця залежність визначає необхідність відповідного коригування напруги при зміні частоти, що реалізується у вигляді закону $U/f = \text{const}$ у зоні номінальних режимів.

Якщо припустити, що початковий момент зрушення робочої машини дорівнює нулю, то момент опору на валу можна описати степеневою залежністю:

$$M_c = M_{c.\text{НОМ}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{НОМ}}} \right)^x$$

Оскільки при частотному регулюванні кутова швидкість приблизно пропорційна частоті живлення, тобто

$$\frac{\omega}{\omega_{\text{НОМ}}} \approx \frac{f_1}{f_{\text{НОМ}}},$$

момент опору можна записати так:

$$M_c = M_{c.\text{НОМ}} \left(\frac{f_1}{f_{\text{НОМ}}} \right)^x$$

Підставивши цей вираз в умову сталої перевантажувальної здатності, отримаємо:

						Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{AU_1^2}{f_1^2 \cdot M_{с.ном} \left(\frac{f_1}{f_{ном}} \right)^x} = const$$

Звідси закон зміни напруги при частотному регулюванні має вигляд:

$$U_1 = B f_1^{\frac{x+2}{2}}$$

де B - коефіцієнт пропорційності, який залежить від параметрів двигуна, номінальної частоти, номінального моменту навантаження та прийнятої перевантажувальної здатності.

Це рівняння показує, за яким законом необхідно змінювати напругу живлення двигуна при зміні частоти, щоб зберігати сталість перевантажувальної здатності електроприводу.

Для робочих машин з постійним моментом навантаження, до яких належать підйомники, лебідки, конвеєри та частина зернотранспортного обладнання, показник степеня дорівнює: $x=0$

Тоді закон регулювання напруги набуває вигляду:

$$U_1 = B f_1$$

Отже, для механізмів з постійним моментом навантаження необхідно підтримувати співвідношення:

$$\frac{U_1}{f_1} = const$$

Для вентиляторного типу навантаження, характерного для вентиляторів аспіраційних систем, показник степеня становить $x=2$

У цьому випадку закон зміни напруги записується як:

$$U_1 = B f_1^2$$

Така залежність є доцільною для механізмів, у яких момент опору зростає пропорційно квадрату швидкості обертання.

Для механізмів, у яких потужність залишається приблизно сталою, наприклад для деяких металообробних верстатів, показник степеня має значення $x=-1$

						Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді закон зміни напруги має вигляд:

$$U_1 = B\sqrt{f_1}$$

У загальному вигляді механічна характеристика робочої машини може бути описана формулою:

$$M_c = M_{c.0} + (M_{c.\text{НОМ}} - M_{c.0}) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{НОМ}}} \right)^x$$

де $M_{c.0}$ - момент навантаження на початку руху при $\omega=0$;

$M_{c.\text{НОМ}}$ - номінальний момент опору при номінальній швидкості;

ω - поточне значення кутової швидкості;

$\omega_{\text{НОМ}}$ - номінальна кутова швидкість; x - показник степеня, що характеризує тип механічного навантаження.

Закон зміни напруги при частотному керуванні асинхронним двигуном залежить від характеру навантаження робочої машини. Для зернопереробного обладнання найбільш характерними є режими з постійним моментом, що відповідає транспортерам, норіям і шнекам, а також вентиляторний тип навантаження, властивий аспіраційним системам. Тому при виборі алгоритму керування електроприводом необхідно враховувати конкретний тип обладнання та його механічну характеристику.

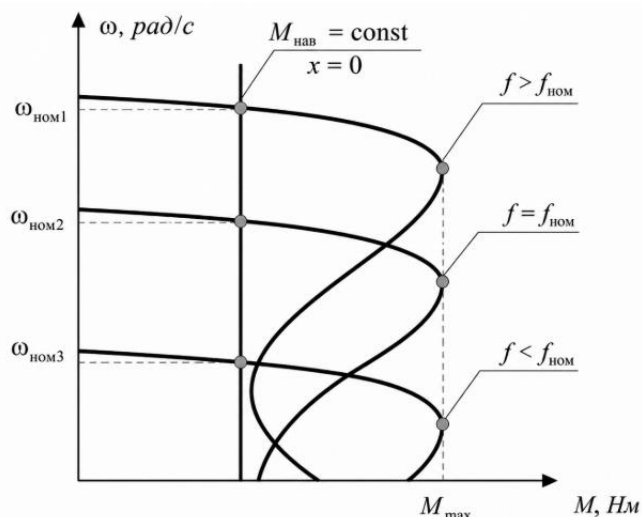


Рисунок 7.5 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному керуванні для робочої машини з постійним моментом навантаження ($x = 0$)

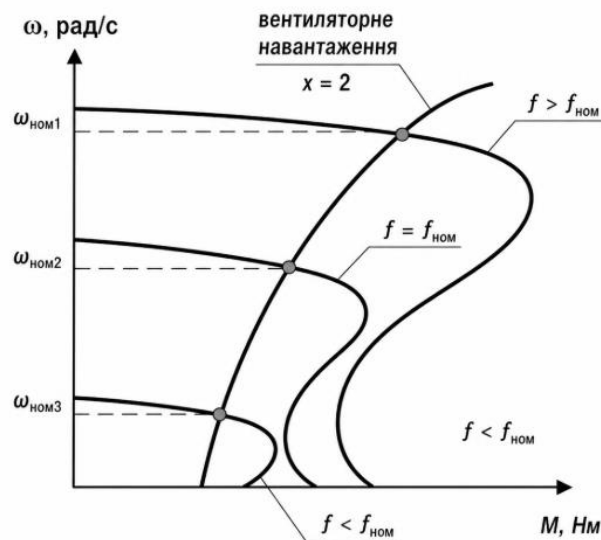


Рисунок 7.6 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному керуванні для робочої машини вентиляторного типу ($x = 2$)

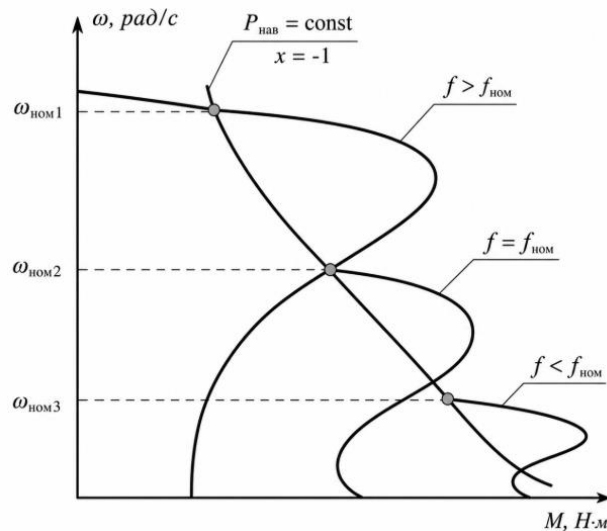


Рисунок 7.7 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному керуванні для робочої машини з гіперболічною залежністю навантаження ($x = -1$)

На рисунку 7.8 наведено залежності зміни кратності максимального моменту асинхронного двигуна при зменшенні відносної частоти живлення $f_1/f_{ном}$ для двигунів різної номінальної потужності. Розглядається режим регулювання швидкості вниз від номінального значення.

Припустимо, що перевантажувальна здатність двигуна при зниженні частоти допускається на рівні 0,8 від значення природної механічної характеристики. Це обмеження графічно відповідає горизонтальній лінії, що

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	69

перетинає наведені залежності. У цьому випадку для двигунів різної потужності визначаються граничні значення відносної частоти.

За умови збереження перевантажувальної здатності на рівні $\lambda=0,8$ це відповідає таким діапазонам регулювання швидкості:

$$D = \frac{f_{\text{ном}}}{f_1}$$

$D=5:1$ для 55 кВт, $D=2,5:1$ для 5,5 кВт, $D=1,9:1$ для 0,55 кВт

Загальний характер залежностей для двигунів різної потужності є подібним, проте зі зменшенням потужності асинхронного двигуна спостерігається зменшення крутизни кривих у області низьких частот. Це призводить до звуження діапазону регулювання швидкості. Така особливість пояснюється зростанням відносної частки активного опору статора R_1 , який істотно впливає на електромеханічні процеси при малих частотах.

Слід зазначити, що діапазон регулювання визначається не лише умовою збереження перевантажувальної здатності двигуна, але й вимогами до жорсткості його механічних характеристик. Для електродвигунів потужністю понад 1–2 кВт зниження жорсткості механічної характеристики в діапазоні регулювання $D=10:1$ становить приблизно 7–10%, що у більшості випадків є допустимим для практичних застосувань.

У випадках, коли необхідно забезпечити більшу жорсткість механічних характеристик або розширити діапазон регулювання швидкості, застосовуються замкнені системи частотного керування. Такі системи дозволяють компенсувати падіння напруги на активному опорі статора та підтримувати стабільні електромагнітні параметри двигуна у широкому діапазоні частот. При цьому реалізується режим керування зі збереженням магнітних потоків:

$$\psi_1 = \text{const}, \psi_2 = \text{const}, \psi_\mu = \text{const}$$

де ψ_1 - потокозчеплення статора, ψ_2 - потокозчеплення ротора, ψ_μ - основний магнітний потік.

						Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

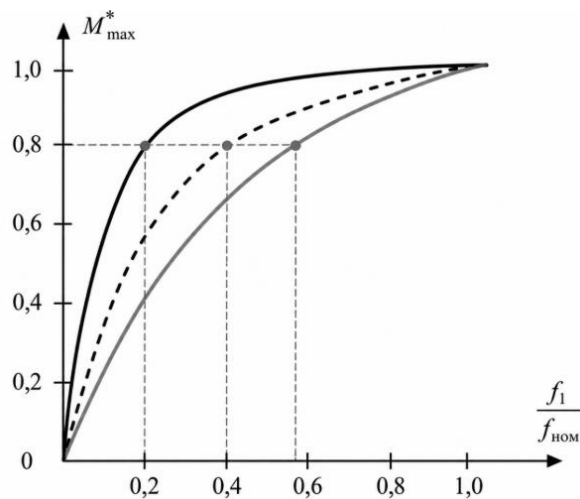


Рисунок 7.8 – Залежність відносної кратності максимального моменту асинхронного двигуна від відносної частоти живлення для двигунів різної номінальної потужності

Таким чином, використання замкнених систем частотного регулювання дозволяє підвищити якість керування електроприводом, забезпечити необхідну жорсткість механічних характеристик та розширити ефективний діапазон регулювання швидкості асинхронного двигуна.

7.2.2 Розрахунок втрат та економії електроенергії в електроприводі з використанням частотного регулювання

Загальні втрати потужності в електроприводі можна подати як суму основних складових:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{дв}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{пер}} + \Delta P_{\text{мер}}$$

де ΔP_{Σ} - сумарні втрати потужності, кВт;

$\Delta P_{\text{дв}}$ - втрати в електродвигуні;

$\Delta P_{\text{мех}}$ - механічні втрати в передачах, підшипниках, робочих органах;

$\Delta P_{\text{пер}}$ - втрати у частотному перетворювачі;

$\Delta P_{\text{мер}}$ - втрати в електричній мережі.

Втрати в електродвигуні

Втрати в електродвигуні визначаються як різниця між спожитою електричною потужністю та корисною механічною потужністю на валу:

$$\Delta P_{\text{дв}} = P_1 - P_2$$

де P_1 - електрична потужність, споживана двигуном з мережі, кВт;

P_2 - корисна механічна потужність на валу двигуна, кВт.

Якщо відомий ККД двигуна:

$$P_2 = P_1 \cdot \eta_{\text{дв}}$$

тоді $\Delta P_{\text{дв}} = P_1 (1 - \eta_{\text{дв}})$

або

$$\Delta P_{\text{дв}} = P_2 \left(\frac{1}{\eta_{\text{дв}}} - 1 \right)$$

Втрати у статорній та роторній обмотках

Електричні втрати в обмотках залежать від струму навантаження:

$$\Delta P_{\text{Cu}} = 3I^2 R$$

де I - фазний струм двигуна, А;

R - активний опір фази обмотки, Ом.

Для статорної обмотки:

$$\Delta P_{\text{Cu1}} = 3I_1^2 R_1$$

для роторної обмотки:

$$\Delta P_{\text{Cu2}} = 3I_2^2 R_2$$

Зменшення струму при частотному регулюванні знижує ці втрати, оскільки вони пропорційні квадрату струму.

Втрати в електричній мережі

Втрати потужності в кабельній лінії живлення визначаються за формулою:

$$\Delta P_{\text{мер}} = 3I^2 R_{\text{л}}$$

де $R_{\text{л}}$ - активний опір однієї фази лінії, Ом.

Опір кабельної лінії можна знайти так:

						Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_{\text{л}} = \rho \frac{l}{S}$$

де ρ - питомий опір провідника, Ом·мм²/м;

l - довжина лінії, м;

S - площа перерізу провідника, мм².

Втрати у частотному перетворювачі

Частотний перетворювач також має власні втрати. Їх можна оцінити через ККД перетворювача:

$$\Delta P_{\text{пер}} = P_{\text{вх}}(1 - \eta_{\text{пер}})$$

де $P_{\text{вх}}$ - потужність на вході перетворювача, кВт;

$\eta_{\text{пер}}$ - ККД частотного перетворювача.

Зазвичай ККД сучасних частотних перетворювачів становить приблизно:

$$\eta_{\text{пер}} = 0,96 \dots 0,98$$

Механічні втрати

Механічні втрати виникають у підшипниках, редукторах, ремінних передачах, шнеках, транспортерах, норіях та інших робочих органах. Їх можна визначити через ККД механічної передачі:

$$\Delta P_{\text{мех}} = P_2(1 - \eta_{\text{мех}})$$

де $\eta_{\text{мех}}$ - ККД механічної передачі або робочого механізму.

Якщо привод має кілька механічних ланок, загальний ККД визначається як добуток:

$$\eta_{\text{мех}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \dots \eta_n$$

7.2.2 Розрахунок економії електроенергії при частотному регулюванні

Електроенергія, спожита приводом за певний період роботи:

$$W = P \cdot t$$

						Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де W - спожита електроенергія, кВт·год;

P - споживана потужність, кВт;

t - час роботи, год.

Економія електроенергії після встановлення частотного перетворювача:

$$W = W_{\text{до}} - W_{\text{після}}$$

або:

$$\Delta W = (P_{\text{до}} - P_{\text{після}}) \cdot t$$

Відносна економія:

$$E = \frac{W_{\text{до}} - W_{\text{після}}}{W_{\text{до}}} \cdot 100\%$$

Для вентиляторів аспіраційних систем

Для вентиляторів потужність залежить від швидкості обертання приблизно за кубічним законом:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$$

де P_1 - потужність до регулювання;

P_2 - потужність після зменшення швидкості;

n_1, n_2 - швидкість обертання до і після регулювання.

Наприклад, якщо швидкість вентилятора зменшити до 80%:

$$P_2 = P_1 \cdot 0,8^3 = 0,512P_1$$

Тобто споживання електроенергії зменшується майже на 49%.

Для транспортерів, шнеків і норій

Для зернотранспортного обладнання залежність потужності від швидкості не завжди кубічна, тому її доцільно подавати у спрощеному вигляді:

$$P = P_{\text{хх}} + P_{\text{н}}$$

де $P_{\text{хх}}$ - потужність холостого ходу, кВт;

$P_{\text{н}}$ - потужність, пов'язана з переміщенням зерна, кВт.

						Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після частотного регулювання:

$$P_{\text{після}} = P_{\text{хх}} \cdot k_{\text{хх}} + P_{\text{н}} \cdot k_{\text{з}}$$

де $k_{\text{хх}}$ - коефіцієнт зменшення втрат холостого ходу;

$k_{\text{з}}$ - коефіцієнт зміни навантаження залежно від подачі зерна.

Економія:

$$\Delta P = P_{\text{до}} - P_{\text{після}}$$

$$\Delta W = \Delta P \cdot t$$

Втрати при холостому ході

Втрати електроенергії під час роботи обладнання без зерна:

$$W_{\text{хх}} = P_{\text{хх}} \cdot t_{\text{хх}}$$

де $P_{\text{хх}}$ - потужність холостого ходу, кВт;

$t_{\text{хх}}$ - тривалість холостої роботи, год.

Після впровадження частотного регулювання або автоматичного вимкнення:

$$W_{\text{хх.після}} = P_{\text{хх.після}} \cdot t_{\text{хх.після}}$$

Економія на холостому ході:

$$\Delta W_{\text{хх}} = W_{\text{хх}} - W_{\text{хх.після}}$$

Втрати через пускові струми

Під час прямого пуску асинхронного двигуна пусковий струм може бути значно більшим за номінальний:

$$I_{\text{пуск}} = k_{\text{п}} I_{\text{н}}$$

де $k_{\text{п}}=5...7$ - кратність пускового струму;

$I_{\text{н}}$ - номінальний струм двигуна.

Втрати в мережі під час пуску:

$$\Delta P_{\text{пуск}} = 3I_{\text{пуск}}^2 R_{\text{л}}$$

При частотному пуску струм значно менший:

$$I_{\text{пуск.чрп}} = k_{\text{чрп}} I_{\text{н}}$$

						Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $k_{\text{чрп}}=1,2...1,5$.

Тоді зниження втрат під час пуску:

$$\Delta P_{\text{ек.пуск}} = 3R_{\text{л}}(I_{\text{пуск}}^2 - I_{\text{пуск.чрп}}^2)$$

Загальна річна економія електроенергії

Для зернопереробного обладнання загальну економію можна визначити так:

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_{\text{рег}} + \Delta W_{\text{хх}} + \Delta W_{\text{пуск}} + \Delta W_{\text{мех}}$$

де $\Delta W_{\text{рег}}$ - економія від регулювання швидкості;

$\Delta W_{\text{хх}}$ - економія від зменшення холостого ходу;

$\Delta W_{\text{пуск}}$ - економія за рахунок плавного пуску;

$\Delta W_{\text{мех}}$ - економія через зменшення механічних втрат.

Річна економія коштів:

$$C_{\text{ек}} = \Delta W_{\Sigma} \cdot T$$

де T - тариф на електроенергію, грн/кВт·год.

Строк окупності частотного перетворювача:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{C_{\text{ек}}}$$

де K - капітальні витрати на придбання, монтаж і налаштування частотного перетворювача, грн.

Приклад розрахунку економії електроенергії

Розглянемо транспортер з двигуном потужністю 15 кВт.

Без ЧРП:

- 1) робота на 100% потужності;
- 2) споживання: $P_1=15$ кВт.

З ЧРП:

- 1) середня швидкість: 70%;
- 2) потужність приблизно: $P_2=P_1 \cdot k^3=15 \cdot 0,73=5,15$ кВт,

						Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Економія потужності:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 15 - 5,15 = 9,85 \text{ кВт}$$

Відносна економія становить

$$E = \frac{\Delta P}{P_1} \cdot 100 = \frac{9,85}{15} \cdot 100 = 65,7\%$$

Річна економія електроенергії при тривалості роботи $t=4000$ год становитиме

$$\Delta W = \Delta P \cdot t = 9,85 \cdot 4000 = 39400 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Таким чином, застосування частотного регулювання електроприводів у зернопереробному обладнанні є ефективним заходом енергозбереження. Воно дозволяє адаптувати режим роботи електроприводів до змінних технологічних умов, зменшити втрати електроенергії та підвищити загальну ефективність виробництва.

До додаткових переваг впровадження ЧРП відноситься:

- зменшення аварійності;
- зниження витрат на ремонт;
- підвищення автоматизації;
- інтеграція з системами керування (SCADA).

Найбільший ефект досягається при використанні частотних перетворювачів в системах з нерівномірним навантаженням, таких як транспортери, вентилятори та елеватори. Очікувана економія електроенергії може становити від 20% до 60% залежно від типу обладнання та режиму роботи.

						Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В процесі виконання бакалаврської роботи було розроблено систему електропостачання зернопереробного комбінату з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності, надійності та економічності.

На першому етапі виконано розрахунок електричних навантажень підприємства, включаючи силові та освітлювальні споживачі. Отримані значення дозволили визначити загальну потужність навантаження та сформувати основу для подальших розрахунків.

В результаті техніко-економічного порівняння варіантів електропостачання визначено оптимальну схему, яка забезпечує мінімальні приведені витрати та раціональне використання електроенергії.

На основі розрахованих навантажень здійснено вибір трансформаторних підстанцій, визначено їх кількість і номінальну потужність. Прийняті рішення забезпечують допустимий рівень завантаження трансформаторів як у нормальному, так і в аварійному режимах.

Виконано розрахунок струмів короткого замикання, що дозволило обґрунтовано підібрати комутаційне обладнання, кабельні лінії та апаратуру захисту. Проведена перевірка показала відповідність обраного обладнання умовам термічної та електродинамічної стійкості.

Особливу увагу в роботі приділено питанням енергозбереження. Як показано у спеціальному розділі, значну частину втрат електроенергії спричиняє передача реактивної потужності та нераціональні режими роботи електроприводів. У зв'язку з цим обґрунтовано доцільність застосування компенсації реактивної потужності, частотно-керованого електроприводу для основного технологічного обладнання.

Реалізація зазначених заходів дозволяє зменшити втрати електроенергії, підвищити коефіцієнт потужності, знизити струмове навантаження мережі; підвищити надійність роботи обладнання, забезпечити економію електроенергії.

						Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота бакалавра : метод. рекомендації до структури та оформлення випускної кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. : П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш, О. І. Сіріков, О. А. Козловський] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2023. – 80 с.

2. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П. Г., Зінзура В. В., Гарасьова Н. Ю., Котиш А. І., Величко Т. В., Плешков С. П.]; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова П. Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2021.– 209 с.

3. Конспект лекцій з курсу «Ефективне використання електроенергії в системах енергопостачання»: для здобувач. вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / уклад. П. Г. Плешков; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький: ЦНТУ, 2023. - 266 с.

4. Енергетичний менеджмент та аудит : конспект лекцій : для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спец. 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" ОПП "Енергетичний менеджмент" / [уклад. : П. Г. Плешков, С. В. Серебренніков, О. І. Сіріков, С. В. Дубенко] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 78 с.

5. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П. Г., Зінзура В. В., Гарасьова Н. Ю., Котиш А. І., Величко Т. В., Плешков С. П.]; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова П. Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. –Кропивницький : ЦНТУ, 2021.– 209 с.

						Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Енергетичний інжиніринг та менеджмент : в 3-х ч. Ч. 1. Проектування ефективних енергетичних систем / П.Г. Плешков, С.В. Серебренніков, О.І. Сіріков, І.В. Савеленко; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова П.Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2018.– 156 с.

7. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.

8. 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. – Кіровоград : КНТУ, 2015. – 287 с. ISBN 978-966-402-076-0

9. Лежнюк П. Д. Формування умов оптимальності компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів і енергопостачальних компаній : монографія / П. Д. Лежнюк, О. М. Нанака. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 148 с.

10. Регульований електропривод: Підручник / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Л.С. Червінський, Д.А. Абдураманов, А.В. Торопов, О.В. Санченко; За ред. І.М. Голодного. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. – 509 с.

11. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода: навч. посібник / М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А. П. Калінов, А. І. Гладир, В. Г. Ковальчук. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – Харків: Видавництво «Точка», 2017. – 206 с.

						Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		