

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:

«Розроблення системи електропостачання заводу з
виробництва мінеральних добрив»

Виконала здобувачка вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ–22з

ОПП «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____Людмила ГРИЩЕНКО

« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд.техн.наук,

_____Катерина ПЕТРОВА

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Петро ПЛЄШКОВ

« » 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Грищенко Людмили Василівни

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи електропостачання заводу з виробництва мінеральних добрив. Design of the power supply system for a mineral fertilizer plant

2. Керівник роботи Петрова Катерина Григорівна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 29.05.2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою роботи є проєктування ефективної системи електропостачання підприємства з виробництва мінеральних добрив, а також розроблення та обґрунтування енергозберігаючих заходів шляхом впровадження систем частотно-регульованого приводу

Завдання: 1. Електричні навантаження в системі електропостачання. 2. Картограма електричних навантажень та місце розташування центральної розподільної установки (головної знижувальної підстанції). 3. Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства. 4. Компенсація реактивної потужності 5. Трансформаторні підстанції 6. Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання електроустановок та силових мереж системи електропостачання. 7. Спеціальний розділ. Висновки. Перелік посилань

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів валіфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Електричні навантаження в системі електропостачання</i>	<i>16.04.26</i>	
2	<i>Картограма електричних навантажень та місце розташування центральної розподільної установки (головної знижувальної підстанції)</i>	<i>20.04.26</i>	
3	<i>Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства</i>	<i>27.04.26</i>	
4	<i>Компенсація реактивної потужності</i>	<i>04.05.26</i>	
5	<i>Трансформаторні підстанції</i>	<i>10.05.26</i>	
6	<i>Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання електроустановок та силових мереж системи електропостачання</i>	<i>15.05.26</i>	
7	<i>Спеціальний розділ</i>	<i>18.05.26</i>	
8	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>25.05.26</i>	
9	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>28.05.26</i>	

Дата видачі завдання

«13» квітня 2026 р.

Підпис керівника _____

Катерина ПЕТРОВА

Завдання прийнято до виконання

«13» квітня 2026 р.

Підпис здобувача _____

Людмила ГРИЩЕНКО

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 71 с.; 10 рис.; 24 табл.; 11 джерел.

Грищенко Л.В. Розроблення системи електропостачання заводу з виробництва мінеральних добрив. – Рукопис.

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

Метою роботи є проєктування ефективної системи електропостачання підприємства з виробництва мінеральних добрив, а також розроблення та обґрунтування енергозберігаючих заходів шляхом впровадження систем частотно-регульованого приводу.

У роботі подано вибір варіантів схем зовнішнього електропостачання. За результатами техніко-економічного порівняння обрана схема живлення. Виконано розрахунки електричних навантажень цехів, на основі яких обрано оптимальні компенсуючі пристрої. Розглянуто заходи з підвищення енергоефективності відповідальних електроприводів насосної станції цеху синтезу аміаку. Виконано детальний розрахунок економії електроенергії (28,7%) та терміну окупності інвестицій для одного агрегату та групи з 10 машин.

Наведена методика розрахунку та впровадження частотно-регульованого приводу може бути використана для будь-якого промислового підприємства, що використовує потужні насосні або вентиляторні установки.

Ключові слова: електричне навантаження, частотно-регульований привід, перетворювач частоти, насосний агрегат, система електропостачання

ABSTRACT

Qualification work: 71 p.; 10 fig.; 24 tables; 11 sources.

Hryshchenko L. V. Design of the power supply system for a mineral fertilizer plant. – Manuscript.

Bachelor's thesis on speciality 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The aim of the work is to design an efficient power supply system for a mineral fertilizer production plant, as well as to develop and substantiate energy-saving measures through the implementation of variable frequency drive systems.

The paper considers the selection of alternative options for external power supply schemes. Based on the results of a techno-economic comparison, the optimal power supply configuration was selected. Electrical load calculations for the plant's workshops were performed, followed by the selection of optimal reactive power compensation devices. Measures to improve the energy efficiency of critical electric drives at the ammonia synthesis workshop pumping station were investigated. A detailed calculation of electricity savings (28.7%) and the investment payback period was carried out for both a single unit and a group of 10 machines.

The presented methodology for the calculation and implementation of variable frequency drives can be applied to any industrial facility utilizing high-capacity pumping or fan installations.

Key words: electrical load, variable frequency drive (VFD), frequency converter, pumping unit, power supply system

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1. Електричні навантаження в системі електропостачання.....	11
1.1. Визначення силових електронавантажень у мережах до 1000 В	11
1.2. Визначення освітлювальних електронавантажень	14
1.3. Визначення електронавантажень у силових мережах вище 1000 В	17
1.4. Графіки електричних навантажень.....	22
2. Картограма електричних навантажень та місце розташування головної знижувальної підстанції (ГЗП)	29
3. Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства	32
3.1. Схема приєднання та вибір напруги живлення.....	32
3.2. Вибір напруги і схеми внутрішнього електропостачання	33
4. Компенсація реактивної потужності.....	37
4.1. Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації.....	37
4.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування пристроїв компенсації реактивної потужності	38
5. Трансформаторні підстанції	45
5.1. Вибір кількості та потужності трансформаторів цехових трансформаторних підстанцій	45
5.2. Компоновка та місце розташування трансформаторних підстанцій	47
6. Розрахунок струмів коротких замикань і вибір обладнання електроустановок та силових мереж системи електропостачання	48

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Л. Грищенко				Розроблення системи електропостачання заводу з виробництва мінеральних добрив	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	К. Петрова							
Н.контр.	К. Петрова				Design of the power supply system for a mineral fertilizer plant	ЦНТУ гр. ЕЕ-22 з		
Затв.	П. Плешков							

6.1. Розрахунок струмів КЗ.....	48
6.2. Вибір струмопровідних пристроїв силових мереж.....	50
6.3. Вибір електрообладнання.....	51
7. Впровадження частотно-регульованого приводу (ЧРП) для насосів охолодження цеху синтезу аміаку.....	56
7.1. Обґрунтування доцільності впровадження енергозберігаючих технологій	56
7.2. Математична модель та розрахунок енергоспоживання у базовому режимі (дроселювання).....	57
7.3. Розрахунок енергоспоживання при застосуванні частотно-регульованого приводу	59
7.4. Вибір обладнання та розрахунок економічної ефективності (ТЕО).	60
7.5. Електромагнітна сумісність (ЕМС) та заходи щодо мінімізації впливу вищих гармонік.....	64
7.6. Екологічний вплив, впровадження стандарту ISO 50001 та стратегія сталого розвитку.....	65
ВИСНОВКИ	68
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	70

						Арк.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

Скорочення	Розшифрування
АВР	Автоматичне введення резерву
ВРП	Відкритий розподільний пристрій
ГЗП	Головна знижувальна підстанція
ЕМС	Електромагнітна сумісність
ЗРП	Закритий розподільний пристрій
КЗ	Коротке замикання
КРП	Компенсація реактивної потужності
КРУ	Комплектний розподільний пристрій
ЛПС	Ланка постійного струму
ПП	Промислове підприємство
ПЧ	Перетворювач частоти
РП	Розподільний пункт
РПН	Регулювання напруги під навантаженням
ТП	Трансформаторна підстанція
ЧРП	Частотно-регульований привід
SCADA	Система диспетчерського керування та збору даних

ВСТУП

У роботі вирішується актуальне інженерне завдання — проектування ефективної та надійної системи електропостачання для підприємства хімічної промисловості, а саме заводу з виробництва мінеральних добрив. У процесі виконання роботи здійснено комплексний аналіз та вибір оптимальних схем живлення, проведено розрахунок силових та освітлювальних електричних навантажень, визначено доцільні місця встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності. Також виконано перевірку елементів мережі на стійкість до струмів короткого замикання та обрано сучасне комутаційне й захисне обладнання.

Окрема увага в роботі приділена питанням енергоефективності та оптимізації безперервних технологічних процесів. У спеціальному розділі проведено дослідження методів зниження енергоємності відповідальних електроприймачів підприємства. Зокрема, запропоновано та техніко-економічно обґрунтовано впровадження частотно-регульованого приводу (ЧРП) для потужних насосних агрегатів системи охолодження, що дозволяє ліквідувати нераціональні витрати електроенергії та підвищити експлуатаційну надійність гідравлічної мережі.

Характеристика технологічного процесу

Виробництво мінеральних добрив є складним, високоавтоматизованим та енергоємним процесом, що має безперервний характер. Основний технологічний цикл підприємства складається з наступних ключових етапів:

1. Підготовка сировинної бази: ця стадія передбачає прийом, сортування та попередню обробку природного газу, фосфоритів, сірки або інших необхідних компонентів. Сировина проходить процеси очищення, подрібнення та підігріву перед подачею у технологічні лінії.

2. Базовий хімічний синтез: найважливіший етап, на якому сировинні матеріали піддаються складним хімічним перетворенням. У спеціальних реакторах та контактних апаратах за умов високого тиску і температур

						Арк.

відбуваються процеси синтезу аміаку, отримання нітратної чи сульфатної кислот тощо.

3. Формоутворення та грануляція: отримані рідкі або газоподібні хімічні сполуки проходять стадії випаровування, кристалізації та гранулювання. Це необхідно для надання продукції зручної товарної форми (гранул). Після формування гранули обов'язково висушуються та охолоджуються.

4. Пакування та логістика: готові мінеральні добрива фасуються у спеціалізовану тару (полімерні мішки, біг-беги) або готуються до відвантаження насипом. На цьому етапі продукція маркується із зазначенням хімічного складу (наприклад, вмісту NPK), класу безпеки та умов зберігання.

5. Лабораторно-аналітичний контроль: для забезпечення відповідності державним стандартам якості на підприємстві здійснюється безперервний моніторинг. Фізико-хімічні лабораторії контролюють відсоток діючих речовин, вологість та міцність гранул за допомогою сучасних спектральних та хроматографічних методів аналізу.

До основної інфраструктури досліджуваного заводу мінеральних добрив входять наступні виробничі та допоміжні підрозділи: цех синтезу аміаку, головний диспетчерський пункт, відділення виробництва кислоти, склад сировинних матеріалів, ремонтно-механічна дільниця, лінія гранулювання добрив, парогенеруюча станція, вузол відвантаження продукції, виробництво полімерного пакування, технологічна компресорна, відділення нейтралізації стоків та насосна станція оборотного водопостачання.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка сучасної системи електропостачання заводу мінеральних добрив, яка дозволить мінімізувати втрати електричної енергії в елементах мережі та забезпечить високий рівень надійності роботи обладнання.

Результати проведених досліджень мають практичну цінність і можуть бути використані під час проєктування нових або реконструкції існуючих систем електропостачання великих хімічних комбінатів.

						Арк.

1. ЕЛЕКТРИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1. Визначення силових електронавантажень у мережах до 1000 В

Оцінка очікуваних електричних навантажень (ЕН) є базовим етапом проектування внутрішньозаводських мереж. Розрахунки для об'єкта виконуються згідно з діючими нормами проектування промислових підприємств [2]. Враховуючи специфіку хімічної галузі, переважна більшість споживачів працює у тризмінному безперервному режимі.

Для демонстрації методики розрахунку детально розглянемо алгоритм обчислення для найпотужнішого підрозділу — *цеху синтезу аміаку*. Згідно зі зведеною відомістю (табл. 1.1), для даної групи електроприймачів маємо такі вихідні параметри:

- загальна кількість силових споживачів $n = 42$ шт.;
- сумарна встановлена потужність групи $\sum P_H = 652,4$ кВт;
- середнє значення акт. нав. за найбільш завантажену зміну $P_{CP} = 424,1$ кВт;
- відповідне середньозмінне реактивне навантаження $Q_{CP} = 229,0$ квар.

Щоб врахувати вплив найпотужніших одиниць обладнання на сумарний графік навантаження, визначаємо ефективну кількість електроприймачів (n_E):

$$n_E = \frac{2 \cdot \sum P_H}{P_{H.MAX}} = \frac{2 \cdot 652,4}{80} = 16,31 \approx 16$$

Спираючись на знайдене значення n_E та груповий коефіцієнт використання $K_B = 0,7$, за довідковими матеріалами приймаємо розрахунковий коефіцієнт максимуму $K_M = 1,18$.

На базі отриманих коефіцієнтів знаходимо кінцеві розрахункові навантаження для цеху:

- розрахункове максимальне активне навантаження:

$$P_p = P_{CP} \cdot K_M = 424,1 \cdot 1,18 = 500,4 \text{ кВт};$$

						Арк.

- оскільки розрахована ефективна кількість приймачів $n_E \geq 10$, розрахункове реактивне навантаження приймається на рівні середньозмінного:

$$Q_p = Q_{CP} = 229,0 \text{ квар};$$

- повна розрахункова потужність цеху синтезу аміаку:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{500,4^2 + 229,0^2} = 550,3 \text{ кВА}.$$

Ідентичний алгоритм обчислювальних операцій застосовано для всіх виробничих цехів, допоміжних станцій та логістичних вузлів підприємства. Повні результати розрахунків силових електричних навантажень в мережі напругою 0,4 кВ систематизовано та зведено до таблиці 1.1.

						Арк.

Таблиця 1.1. Зведена відомість розрахункових електронавантажень у мережі напругою до 1 кВ

Назва групи споживачів	n	Р одного		P_{Σ}	m	K_B	$\cos \varphi$	tg φ	Середнє		n_E	K_M	Розрахункове навантаження		
		min	max						P_{CM} , кВт	Q_{CM} , квар			P_P , кВт	Q_P , квар	S_P , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Цех синтезу аміаку	42	0,3	- 80	652,4	750	0,7	0,9	0,5	424,1	229,0	16,0	1,2	500,4	229,0	550,3
Пункт управління та автоматики	30	0,2	- 10	95,7	37	0,6	0,8	0,7	55,5	38,9	19,0	1,2	64,9	38,9	75,7
Виробництво нітратної кислоти	28	0,5	- 40	223,8	36	0,5	0,8	0,8	118,6	96,1	11,0	1,3	156,6	96,1	183,7
Складське господарство фосфатів	22	0,3	- 14	51	80	0,4	0,7	0,9	20,9	19,4	7,0	1,6	33,0	21,5	39,4
Спеціалізована ремонтна база	20	0,4	- 25	66,8	100	0,33	0,7	1,0	22,0	22,0	5,0	1,9	41,4	24,1	47,9
Лінія грануляції та фасування	36	0,7	- 50	202,5	44	0,6	0,8	0,8	123,5	101,3	8,0	1,4	175,4	115,1	209,8
Енерготехнологічна станція	16	1,8	- 22	72,9	10	0,58	0,8	0,78	42,3	33	7	1,5	63,5	36,5	73,2
Автовагова та логістичний вузол	18	1,3	- 28	121,9	11	0,73	0,7	0,91	89	81	9	1,38	122,8	90,5	152,5
Цех виробництва м'якої тари	320	0,2	- 70	333,9	75	0,7	0,7	0,94	237,1	222,9	10	1,18	279,8	222,9	357,8
Компресорний блок	25	0,4	- 35	71,3	89	0,48	0,8	0,79	34,2	27	4	1,75	59,9	29,1	66,6
Дільниця знешкодження стоків	16	1,2	- 55	261,21	12	0,8	0,8	0,74	209	154,7	9	1,22	255	154,7	298,2
Насосна станція циркуляційної води	18	1,1	- 52	251	15	0,68	0,8	0,85	170,7	145,1	10	1,25	213,4	145,1	258
Всього	591	0,2	- 80	2404	400	0,64	0,8	0,76	1547	1170	60	1,09	1681,8	1170,4	2049,00

1.2. Визначення освітлювальних електронавантажень

Забезпечення належного рівня штучного освітлення є обов'язковою умовою для безпечної та ефективної роботи хімічного підприємства. Оскільки завод мінеральних добрив має розгалужену інфраструктуру з різними вимогами до освітленості (від технологічних цехів до складів та відкритих територій), розрахунок виконується за методом питомої потужності. Цей підхід дозволяє максимально точно врахувати габарити приміщень та енергоефективність обраних джерел світла.

Для наочної ілюстрації застосованого математичного апарату наведемо покроковий розрахунок освітлювального навантаження для основного виробничого об'єкта — *цеху синтезу аміаку*.

На першому етапі обчислюється номінальна (встановлена) активна потужність освітлювальних установок підрозділу за базовим співвідношенням:

$$P_y = p_0 \cdot F \cdot 10^{-3} = 15 \cdot 1860 \cdot 10^{-3} = 27,9 \text{ кВт}$$

де $p_0 = 15 \text{ кВт/м}^2$ — нормативне значення питомої потужності освітлення, прийняте для цехів хімічного синтезу;

$F = 1860 \text{ м}^2$ — фактична площа даного виробничого приміщення.

Наступним кроком є визначення розрахункової активної потужності освітлювальної мережі. Для цього початкова величина коригується з урахуванням коефіцієнта попиту та додаткових втрат у пускорегулювальних апаратах (ПРА) світильників:

$$P_p = K_c \cdot K_1 \cdot P_y = 0,85 \cdot 1,1 \cdot 27,9 = 26,1 \text{ кВт}$$

де $K_c = 0,85$ — коефіцієнт попиту, що відображає одночасність включення світильників в умовах безперервного виробництва;

$K_1 = 1,1$ — коефіцієнт, що враховує втрати активної потужності в дроселях газорозрядних або промислових ламп.

						Арк.

Розрахункове значення реактивної потужності, яку генерує система штучного освітлення цеху, становить:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \phi = 26,1 \cdot 0,484 = 12,6 \text{ кВар}$$

Підсумкова повна розрахункова потужність освітлювальних мереж для аналізованого підрозділу визначається як геометрична сума активної та реактивної складових:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{26,1^2 + 12,6^2} = 29,0 \text{ кВА}$$

Використовуючи описану вище методику, було здійснено комплексний розрахунок освітлювальних навантажень для всіх структурних підрозділів заводу, а також для зовнішнього освітлення прилеглої території. Під час розрахунків застосовувалися диференційовані коефіцієнти залежно від специфіки зон (наприклад, для складів та території обрано енергоощадні рішення). У вигляді таблиці 1.2 систематизовано повні результати обчислень.

						Арк.

Таблиця 1.2. Зведені показники розрахункових освітлювальних навантажень об'єктів підприємства

№ з/п	Виробничий підрозділ	F , м ²	ρ_0 , Вт/м ²	P_B , кВт	K_C	K_1	$\cos \varphi$	$tg\varphi$	P_P , кВт	Q_P , кВт	S_P , кВт
1	Цех синтезу аміаку	1860	15	27,90	0,85	1,1	0,9	0,484	26,1	12,6	29,0
2	Пункт управління та автоматики	2040	20	40,80	0,8	1,1	0,95	0,329	35,9	11,8	37,8
3	Виробництво нітратної кислоти	820	18	14,76	0,8	1,12	0,5	1,732	13,2	22,9	26,4
4	Складське господарство фосфатів	3400	6	20,40	0,6	1	1	0,000	12,2	0,0	12,2
5	Спеціалізована ремонтна база	1250	16	20,00	0,95	1,12	0,5	1,732	21,3	36,9	42,6
6	Лінія грануляції та фасування	1700	16	27,20	0,8	1,12	0,5	1,732	24,4	42,2	48,7
7	Енерготехнологічна станція	550	8	4,40	0,85	1,2	0,9	0,484	4,5	2,2	5,0
8	Автовагова та логістичний вузол	400	18	7,20	0,9	1,2	0,9	0,484	7,8	3,8	8,6
9	Цех виробництва м'якої тари	2250	16	36,00	0,85	1,2	0,9	0,484	36,7	17,8	40,8
10	Компресорний блок	950	18	17,10	0,95	1,12	0,5	1,732	18,2	31,5	36,4
11	Дільниця знешкодження стоків	810	16	12,96	0,95	1,12	0,5	1,732	13,8	23,9	27,6
12	Насосна станція циркуляційної води	700	14	9,80	0,8	1,2	0,9	0,484	9,4	4,6	10,5
13	Освітлення території об'єкту	155000	0,2	31	0,6	1,12	0,5	1,732	20,8	30,1	36,6
	Всього	171 780		270					244	240	362

						Арк.

1.3. Визначення електронавантажень у силових мережах вище 1000 В

Після обчислення сумарних навантажень окремих виробничих підрозділів здійснюється їх розподіл між проектованими цеховими трансформаторними підстанціями (ЦТП) з урахуванням територіального розташування та величини споживаної потужності. Розглянемо методику визначення навантаження на вводах підстанції на прикладі *ТП №1*, до якої підключено п'ять вузлів навантаження: виробництво нітратної кислоти, лінія грануляції та фасування, енерготехнологічна станція, компресорний блок та дільниця знешкодження стоків.

На першому етапі визначається сумарне розрахункове навантаження на шинах низької напруги (0,4 кВ). Воно знаходиться шляхом арифметичного додавання розрахункових активних та реактивних потужностей усіх підключених до даної ТП силових і освітлювальних електроприймачів. Згідно з даними зведеної відомості, маємо:

- Сумарна активна потужність на стороні 0,4 кВ:

$$P_{\Sigma(0,4)} = \sum P_{P(\text{сил})} + \sum P_{P(\text{осв})} = 527,6 + 74,1 = 601,7 \text{ кВт}$$

- Сумарна реактивна потужність на стороні 0,4 кВ:

$$Q_{\Sigma(0,4)} = \sum Q_{P(\text{сил})} + \sum Q_{P(\text{осв})} = 412,1 + 122,7 = 534,8 \text{ кВар}$$

Повна розрахункова потужність на шинах 0,4 кВ підстанції ТП №1 становить:

$$S_{\Sigma(0,4)} = \sqrt{P_{\Sigma(0,4)}^2 + Q_{\Sigma(0,4)}^2} = \sqrt{601,7^2 + 534,8^2} = 805,0 \text{ кВА}$$

Оскільки для живлення даної групи споживачів попередньо обрано двотрансформаторну підстанцію з апаратами потужністю 630 кВА (ТП 2х630), для визначення навантаження на стороні високої напруги необхідно врахувати втрати потужності в самих трансформаторах. Згідно з розрахунками, активні втрати в обмотках і сталі трансформаторів складають $\Delta P_T = 8,8 \text{ кВт}$, а реактивні втрати на намагнічування та розсіювання — $\Delta Q_T = 53,5 \text{ кВар}$.

						Арк.

Підсумкове розрахункове навантаження ТП №1 на шинах високої напруги (10 кВ), яке буде враховуватися при розрахунку загальнозаводської мережі та виборі високовольтних кабелів, обчислюється наступним чином:

- Активне навантаження на шинах 10 кВ:

$$P_{ТП1(10)} = P_{\Sigma(0,4)} + \Delta P_T = 601,7 + 8,8 = 610,5 \text{ кВт}$$

- Реактивне навантаження на шинах 10 кВ:

$$Q_{ТП1(10)} = Q_{\Sigma(0,4)} + \Delta Q_T = 534,8 + 53,5 = 588,3 \text{ кВар}$$

Відповідно, повна потужність підстанції ТП №1 з боку живлення (10 кВ) дорівнює:

$$S_{ТП1(10)} = \sqrt{P_{ТП1(10)}^2 + Q_{ТП1(10)}^2} = \sqrt{610,5^2 + 588,3^2} = 847,8 \text{ кВА}$$

Обчислення для інших трансформаторних підстанцій підприємства (ТП №2 тощо) виконуються за повністю ідентичним алгоритмом, а їхні результати заносяться до зведеної таблиці 1.3. електричних навантажень заводу.

						Арк.

Таблиця 1.3. Зведена відомість електричних навантажень на стороні високої напруги

№	Назва групи споживачів	Кі ль кість ЕС	Р одного			Р сума рна	m	K _и	cosφ	tgφ	Середнє		п _{еф}	K _м	Розрахункове навантаження		
			min	...	max						Р _{см} , кВт	Q _{см} , квар			Р _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
1	2	3	4		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ТП №1																	
1	Виробництво нітратної кислоти																
	Силове	28	0,5	-	40	223,8	36	0,53	0,78	0,81	118,6	96,1	11	1,32	156,6	96,1	183,7
	Освітлювальне										14,8	25,6			13,2	22,9	26,4
	Всього										133,4	121,7			169,8	119,0	207,4
2	Лінія грануляції та фасування																
	Силове навантаження	36	0,7	-	50	202,5	44	0,61	0,77	0,82	123,5	101,3	8	1,42	175,4	115,1	209,8
	Освітлювальне навантаження										27,2	47,1			24,4	42,2	48,7
	Всього										150,7	148,4			199,8	157,3	254,3
3	Енерготехнологічна станція																
	Силове	16	1,8	-	22	72,9	10	0,58	0,79	0,78	42,3	33,0	7	1,5	63,5	36,5	73,2
	Освітлювальне										4,4	2,1			4,5	2,2	5,0
	Всього										46,7	35,1			68,0	38,7	78,2
4	Компресорний блок																
	Силове	25	0,4	-	35	71,3	89	0,48	0,79	0,79	34,2	27,0	4	1,75	59,9	29,1	66,6
	Освітлювальне										17,1	29,6			18,2	31,5	36,4
	Всього										51,3	56,6			78,1	60,6	98,9
5	Дільниця знешкодження стоків																
	Силове	16	1,2	-	55	261,2	12	0,8	0,81	0,74	209,0	154,7	9	1,22	255,0	154,7	298,2
	Освітлювальне										13,0	22,4			13,8	23,9	27,6
	Всього										222,0	177,1			268,8	178,6	322,7
Всього силова по ТП 1		121	0,4	...	55	832	138	0,63	0,79	0,78	527,6	412,1	30	1,00	527,6	412,1	669,5

Продовження таблиці 1.3

2		3	4		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Всього освітлювальна по ТП 1											76,4	126,9			74,1	122,7	143,3
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 1											604,0	539,0			601,7	534,8	805,0
Втрати в тр-рах ТП 1(2х630)															8,8	53,5	54,2
Всього на шинах 10 кВ по ТП 1															610,5	588,3	847,8
ТП №2																	
1	Цех синтезу аміаку																
	Силове	42	0,2 5	-	80	652,4	750	0,65	0,88	0,54	424,1	229,0	16	1,18	500,4	229,0	550,3
	Освітлювальне										27,9	13,5			26,1	12,6	29,0
	Всього по цеху										452,0	242,5			526,5	241,6	579,3
2	Спеціалізована ремонтна база																
	Силове	20	0,4	-	25	66,8	100	0,329	0,71	1	22,0	22,0	5	1,88	41,4	24,1	47,9
	Освітлювальне										20,0	34,6			21,3	36,9	42,6
	Всього по блоку										42,0	56,6			62,7	61,0	87,4
3	Освітлення території																
	Всього по території										31,0	53,7			20,8	30,1	36,6
Всього силова по ТП 10		62	0,3	...	80	719	320	0,73	0,83	0,67	525,0	352,8	18	1,00	525,0	352,8	632,6
Всього освітлювальна по ТП 3											78,9	101,8			68,2	79,6	104,8
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 3											603,9	454,7			593,2	432,4	734,1
Втрати в тр-рах ТП 2															7,8	48,7	49,3
Всього на шинах 10 кВ по ТП 3															601,0	481,1	769,8
ТП № 3																	
1	Пункт управління та автоматики																
	Силове	30	0,2	-	10	95,7	37	0,58	0,82	0,7	55,5	38,9	19	1,17	64,9	38,9	75,7
	Освітлювальне										40,8	13,4			35,9	11,8	37,8
	Всього										96,3	52,3			100,8	50,7	112,8

Продовження таблиці 1.3

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	2	
2	Складське господарство фосфатів																
	Силове	22	0,3	-	14	51,00	80	0,41	0,73	0,93	20,9	19,4	7	1,58	33,0	21,5	39,4
	Освітлювальне										20,4	0,0			12,2	0,0	12,2
	Всього по складському										41,3	19,4			45,2	21,5	50,1
3	Автовагова та логістичний вузол																
	Силове	18	1,3	-	28	121,9	11	0,73	0,74	0,91	89,0	81,0	9	1,38	122,8	90,5	152,5
	Освітлювальне										7,2	3,5			7,8	3,8	8,6
	Всього по автоваговій										96,2	84,5			130,6	94,3	161,0
4	Цех виробництва м'якої тари																
	Силове	320	0,2	-	70	333,9	75	0,71	0,73	0,94	237,1	222,9	10	1,18	279,8	222,9	357,8
	Освітлювальне										36,0	17,4			36,7	17,8	40,8
	Всього по цеху										273,1	240,3			316,5	240,7	397,6
5	Насосна станція циркуляційної води																
	Силове	18	1,1	-	52	251	15	0,68	0,76	0,85	170,7	145,1	10	1,25	213,4	145,1	258,0
	Освітлювальне										9,8	4,7			9,4	4,6	10,5
	Всього по станції										180,5	149,8			222,8	149,7	268,4
Всього силова по ТП 3		408	0,2	...	70	853,5	350	0,67	0,75	0,89	573,2	507,3	24	1,00	573,2	507,3	765,4
Всього освітлювальна по ТП 3											114,2	39,1			102,0	37,9	109,9
Всього на шинах 0,4 кВ по ТП 3											687,4	546,4			675,2	545,2	867,9
Втрати в тр. ТП 3 (2х630)															9,8	58,1	58,9
Всього на шинах 10 кВ по ТП 3															685,1	603,3	912,8
	Всього по підприємству на стороні 0,4 кВ														1870,1	1512,4	2405,1
	Загальні втрати в тр-рах ТП 1-3														26,4	160,3	162,5
	Всього по об'єкту на стороні 10 кВ														1896,5	1672,7	2528,8
	Всього по об'єкту														1896,5	1672,7	2528,8

1.4. Графіки електричних навантажень

Проектування ефективної системи електропостачання вимагає детального аналізу режимів споживання електроенергії в часі, що реалізується шляхом побудови добових і річних графіків електричних навантажень (ГЕН). Оскільки досліджуваний завод мінеральних добрив належить до об'єктів із безперервним технологічним циклом (робота у три зміни), графік його електроспоживання характеризується високою щільністю. Незначні спади навантаження спостерігаються лише у нічні години та у вихідні дні через відключення допоміжних служб, ремонтних цехів і адміністративного освітлення.

Для візуалізації цих процесів та подальших обчислень сформовано масив усереднених добових показників у відсотковому відношенні до максимального розрахункового навантаження (табл. 1.4).

Таблиця 1.4. Усереднене відсоткове добове навантаження для побудови ГЕН

№ з/п	Робочі дні		Вихідні дні	
	<i>P</i> , %	<i>Q</i> , %	<i>P</i> , %	<i>Q</i> , %
1	82	85	78	80
2	80	85	75	78
3	80	82	75	78
4	82	82	75	80
5	85	85	78	80
6	88	85	80	82
7	92	88	82	82
8	95	90	85	85
9	100	95	88	85
10	100	95	90	85

					Арк.

Продовження табл. 1.4.

№ з/п	Робочі дні		Вихідні дні	
	<i>P</i> , %	<i>Q</i> , %	<i>P</i> , %	<i>Q</i> , %
11	98	95	90	88
12	95	92	88	88
13	98	95	88	85
14	100	95	90	85
15	100	95	90	85
16	98	95	88	85
17	95	92	85	85
18	92	90	85	82
19	90	90	82	82
20	88	88	82	80
21	85	88	80	80
22	85	85	80	80
23	82	85	78	78
24	82	85	78	78

Таблиця 1.5. Активне навантаження

Години	Робочий період		Вихідний період	
	Зима	Літо	Зима	Літо
1	2	3	4	5
1	1555,1	311,0	1479,3	295,9
2	1517,2	322,4	1422,4	284,5
3	1517,2	311,0	1422,4	284,5
4	1555,1	311,0	1422,4	284,5
5	1612,0	322,4	1479,3	295,9
6	1668,9	322,4	1517,2	303,4
7	1744,8	333,8	1555,1	311,0

						Арк.

Продовження таблиці 1.5.

1	2	3	4	5
8	1801,7	341,4	1612,0	322,4
9	1896,5	360,3	1668,9	333,8
10	1896,5	360,3	1706,9	341,4
11	1858,6	360,3	1706,9	341,4
12	1801,7	349,0	1668,9	333,8
14	1896,5	360,3	1706,9	341,4
15	1896,5	360,3	1706,9	341,4
16	1858,6	360,3	1668,9	333,8
19	1801,7	349,0	1612,0	322,4
18	1744,8	341,4	1612,0	322,4
19	1706,9	341,4	1555,1	311,0
20	1668,9	333,8	1555,1	311,0
21	1612,0	333,8	1517,2	303,4
22	1612,0	322,4	1517,2	303,4
23	1555,1	322,4	1479,3	295,9
24	1555,1	322,4	1479,3	295,9
Wi	41192,0	8113,2	37740,4	7548,1

Таблиця 1.6. Реактивне наванатаження

Години	Робочий період		Вихідний період	
	Зима	Літо	Зима	Літо
1	2	3	4	5
1	1421,8	284,4	1338,2	267,6
2	1421,8	284,4	1304,7	260,9
3	1371,6	274,3	1304,7	260,9
4	1371,6	274,3	1338,2	267,6
5	1421,8	284,4	1338,2	267,6

						Арк.

Продовження таблиці 1.6.

1	2	3	4	5
6	1421,8	284,4	1371,6	274,3
7	1472,0	294,4	1371,6	274,3
8	1505,4	301,1	1421,8	284,4
9	1589,1	317,8	1421,8	284,4
10	1589,1	317,8	1421,8	284,4
11	1589,1	317,8	1472,0	294,4
12	1538,9	307,8	1472,0	294,4
13	1589,1	317,8	1421,8	284,4
14	1589,1	317,8	1421,8	284,4
15	1589,1	317,8	1421,8	284,4
16	1589,1	317,8	1421,8	284,4
19	1538,9	307,8	1421,8	284,4
18	1505,4	301,1	1371,6	274,3
19	1505,4	301,1	1371,6	274,3
20	1472,0	294,4	1338,2	267,6
21	1472,0	294,4	1338,2	267,6
22	1421,8	284,4	1338,2	267,6
23	1421,8	284,4	1304,7	260,9
24	1421,8	284,4	1304,7	260,9
Wi	35829,234	7165,8468	33052,552	6610,5104

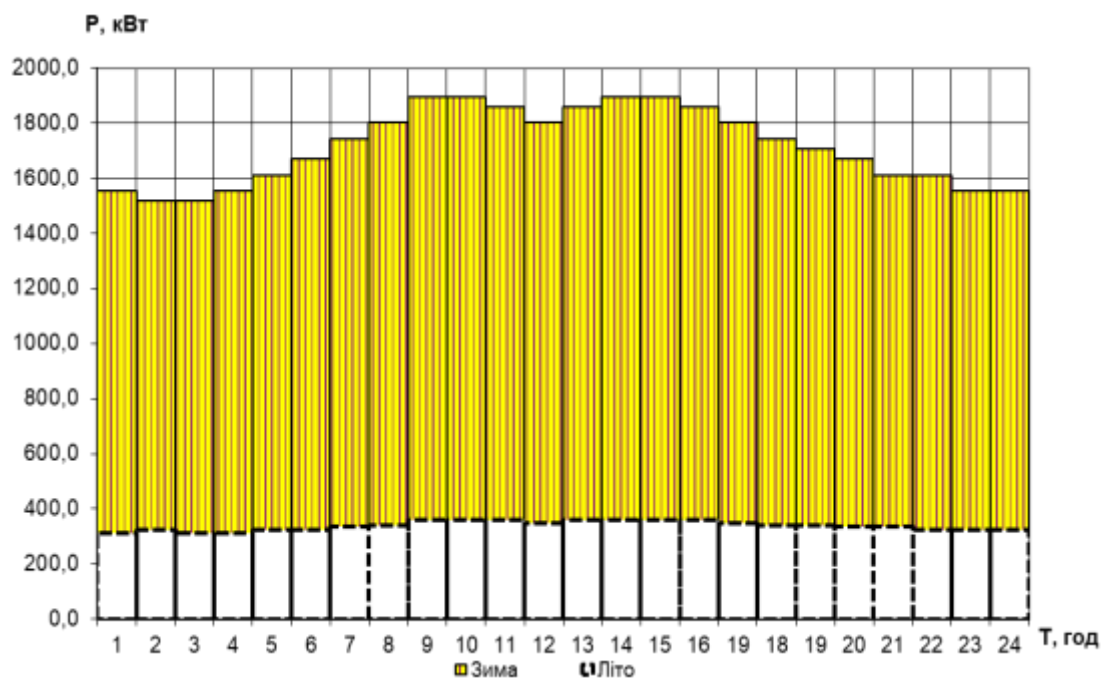


Рисунок 1.1. Добовий профіль активного електричного навантаження підприємства у робочі дні

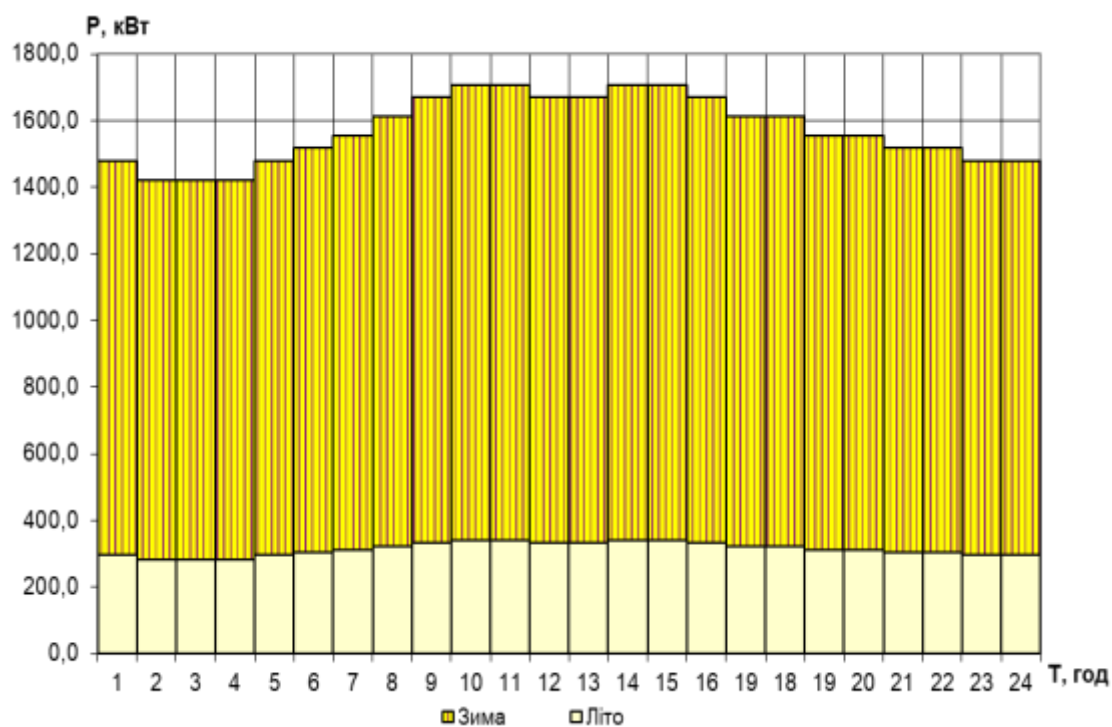


Рисунок 1.2. Добовий профіль активного електричного навантаження підприємства у вихідні дні

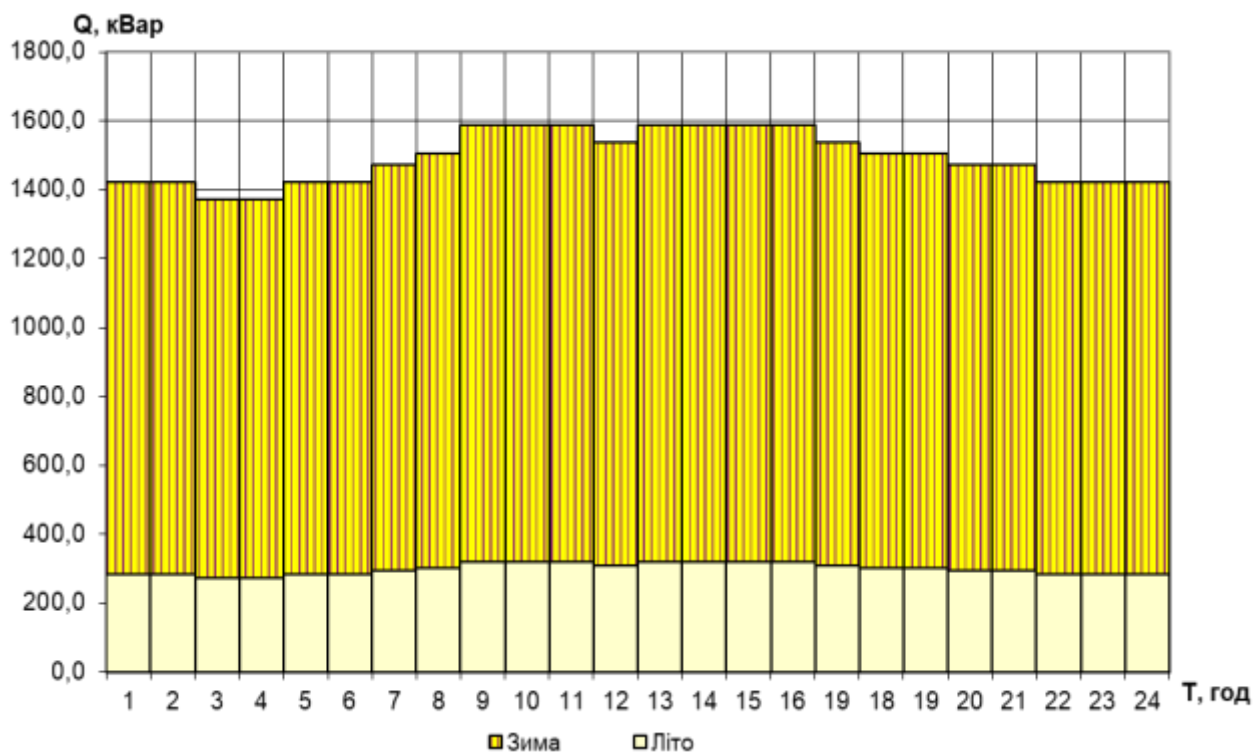


Рисунок 1.3. Добовий профіль реактивного електричного навантаження підприємства у робочі дні

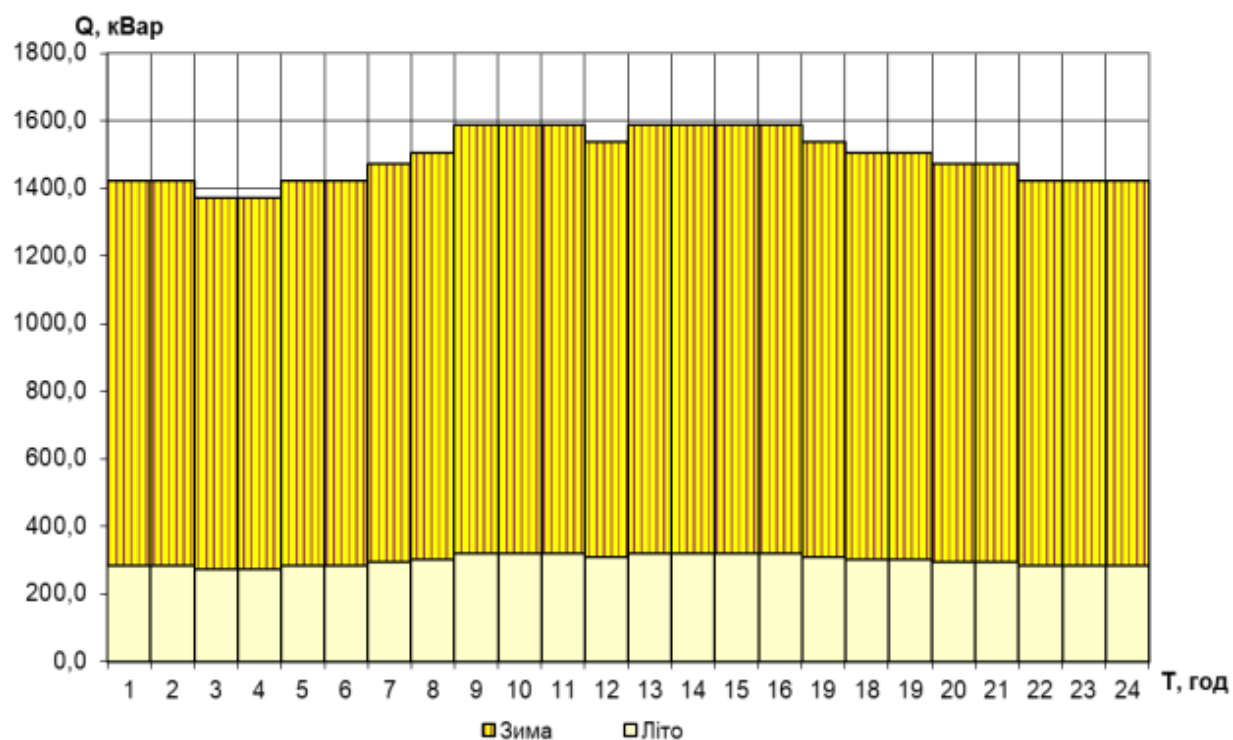


Рисунок 1.4. Добовий профіль реактивного електричного навантаження підприємства у вихідні дні

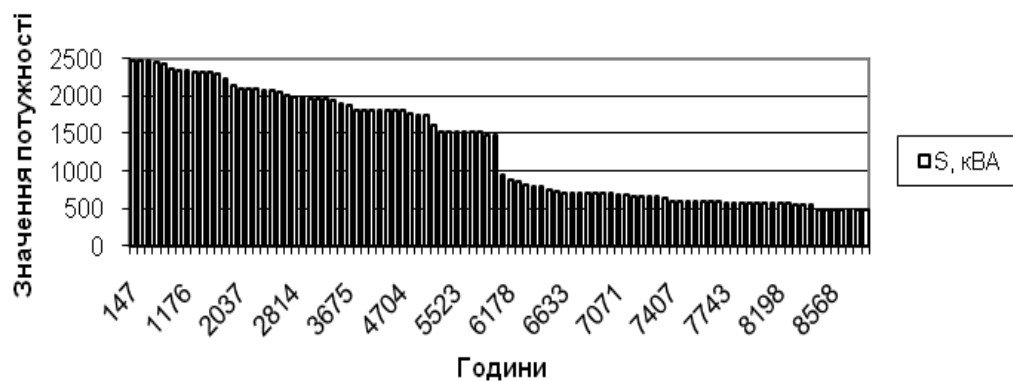


Рисунок 1.5. Інтегральний річний графік споживання повної потужності

Визначаємо додаткові показники:

$$T_M = \sqrt{\frac{W_P^2 + V_P^2}{S_P^2}} = 5103,1 \text{ год.}$$

Час максимальних втрат (τ), який необхідний для подальшого техніко-економічного вибору перерізів кабельних ліній та розрахунку втрат електроенергії, визначається за емпіричним виразом:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_M}{10^4} \right)^2 \cdot 8760 = \left(0,124 + \frac{5103,1}{10^4} \right) \cdot 8760 = 3524,5 \text{ год.}$$

2. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА МІСЦЕ РОЗТАШУВАННЯ ГОЛОВНОЇ ЗНИЖУВАЛЬНОЇ ПІДСТАНЦІЇ (ГЗП)

Для наочного представлення розподілу потужностей на території заводу мінеральних добрив та вибору оптимального місця розміщення головної знижувальної підстанції (ГЗП) будується картограма електричних навантажень. На генеральному плані підприємства кожен цех позначається колом, площа якого прямо пропорційна його розрахунковій активній потужності.

Як приклад, розглянемо алгоритм розрахунку параметрів картограми для найбільш потужного об'єкта — *цеху синтезу аміаку*.

Сумарна розрахункова активна потужність даного підрозділу становить $P_p = 526,49$ кВт. Геометричний радіус кола для цього цеху обчислюється з урахуванням обраного масштабу питомої потужності (приймаємо $m = 0,6$ кВт/см²):

$$R = \sqrt{\frac{P_p}{\pi m}} = \sqrt{\frac{526,49}{3,14 \cdot 0,6}} = 16,71 \text{ см.}$$

Оскільки освітлювальне навантаження є складовою частиною загальної потужності цеху, на картограмі воно виділяється у вигляді окремого кругового сектора. Кут розхилу цього сектора (α) є пропорційним долі освітлення ($P_{осв} = 26,09$ кВт) у загальному балансі цеху:

$$\alpha = 360^\circ \cdot \frac{P_{осв}}{P_p} = 360^\circ \cdot \frac{26,09}{526,49} = 17,84^\circ$$

За повністю ідентичною методикою було обчислено радіуси та кути секторів для всіх інших структурних одиниць заводу. Зведені результати розрахунків та координати розташування цехів представлені у таблиці 2.1.

Для того щоб мінімізувати довжину розподільних кабельних мереж та знизити втрати електроенергії і напруги, головну підстанцію доцільно розташовувати якомога ближче до центру електричних навантажень. Координати ЦЕН ($X_{ГЗП}$, $Y_{ГЗП}$) знаходяться за математичним принципом

						Арк.

визначення центру мас плоскої системи, де роль «мас» відіграють розрахункові потужності цехів, а «плечей» — координати центрів цих цехів на генплані.

Обчислення координат оптимального розташування підстанції здійснюється за формулами:

$$X_{ГЗП} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{pi} \cdot x_i)}{\sum_{i=1}^n P_{pi}} = \frac{461783,62}{2210,4} = 208,9 \text{ м},$$

$$Y_{ГЗП} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{pi} \cdot y_i)}{\sum_{i=1}^n P_{pi}} = \frac{438589,22}{2210,4} = 198,4 \text{ м}.$$

Отримані географічні координати ($X_{ГЗП} = 208,9 \text{ м}$; $Y_{ГЗП} = 198,4 \text{ м}$) наносяться на генеральний план підприємства. Визначена точка є теоретичним оптимумом для спорудження джерела живлення. Фактичне місце встановлення підстанції може бути дещо зміщене відносно розрахованого ЦЕН з урахуванням архітектурно-будівельних обмежень, підземних комунікацій та транспортних шляхів заводу.

						Арк.

Таблиця 2.1. Геометричні та енергетичні параметри для побудови картограми навантажень

№ з/П	Технологічний вузол	$P_{P_{\text{сил}}}$, кВт	$P_{P_{\text{осв}}}$, кВт	ΣP_p , кВт	R, мм	α , град	X, м	Y, м	P_x , кВт•м	P_y , кВт•м
1	Цех синтезу аміаку	500,40	26,09	526,49	0,6	16,71	17,84	125	276	65547,57
2	Пункт управління та автоматики	64,90	35,90	100,80	0,6	7,31	128,22	45	294	4536,18
3	Виробництво нітратної кислоти	156,60	13,22	169,82	0,6	9,49	28,03	45	273	7642,12
4	Складське господарство фосфатів	33,00	12,24	45,24	0,6	4,90	97,40	210	279	9500,40
5	Спеціалізована ремонтна база	41,40	21,28	62,68	0,6	5,77	122,22	210	240	13162,80
6	Лінія грануляції та фасування	175,40	24,37	199,77	0,6	10,29	43,92	210	200	41951,95
7	Енерготехнологічна станція	63,50	4,49	67,99	0,6	6,01	23,76	324	258	22028,11
8	Автовагова та логістичний вузол	122,80	7,78	130,58	0,6	8,32	21,44	453	210	59150,93
9	Цех виробництва м'якої тари	279,80	36,72	316,52	0,6	12,96	41,76	318	195	100653,36
10	Компресорний блок	59,90	18,19	78,09	0,6	6,44	83,87	36	219	2811,40
11	Дільниця знешкодження стоків	255,00	13,79	268,79	0,6	11,94	18,47	207	45	55639,41
12	Насосна станція циркуляційної води	213,40	9,41	222,81	0,6	10,87	15,20	344	44	76534,55
13	Освітлення території об'єкту		20,83	20,83	0,6	3,32	360,00	126	201	2624,83
14	Всього	1966	244,3	2210,4						461783,62

Координати центру:

 $X_0 = 208,9$ м; $Y_0 = 198,4$ м.

ПІДПРИЄМСТВА

3.1. Схема приєднання та вибір напруги живлення

Забезпечення заводу мінеральних добрив електричною енергією від енергосистеми може бути реалізовано за двома основними сценаріями (рис. 3.1):

- *Варіант 1:* Прокладання кабельних ліній (КЛ) напругою 10 кВ від найближчої підстанції енергосистеми із влаштуванням на території заводу центрального розподільного пункту (ЦРП-10 кВ).
- *Варіант 2:* Спорудження повітряної лінії (ПЛ) напругою 35 кВ із будівництвом на території підприємства головної знижувальної підстанції (ГЗП 35/10 кВ).

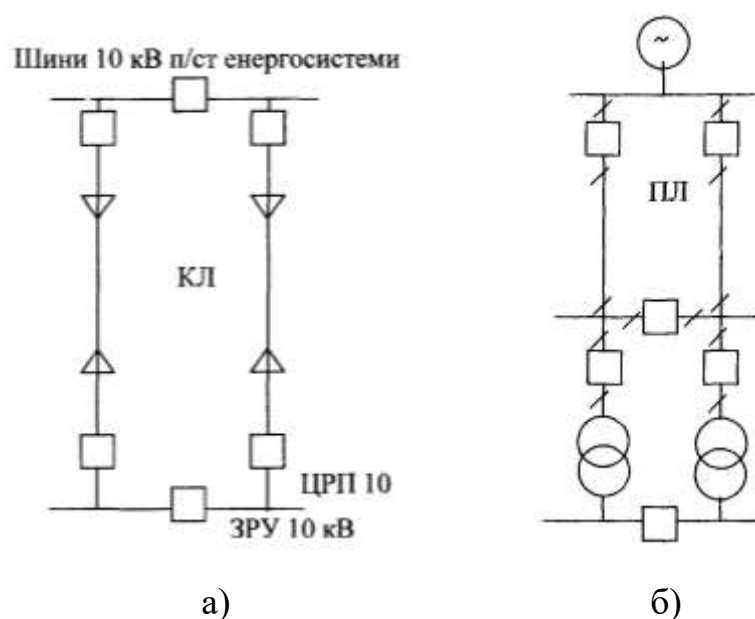


Рисунок 3.1. Альтернативні схеми зовнішнього електропостачання заводу
(а – напругою 10 кВ; б – напругою 35 кВ

						Арк

Для визначення економічної доцільності виконаємо розрахунок параметрів для Варіанту 1. Приймаємо орієнтовну довжину траси до джерела живлення $L = 2,5$ км.

Розрахунковий струм у нормальному режимі для двофазової кабельної лінії 10 кВ:

$$I_p = \frac{S_{\Sigma}}{2\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = \frac{2528,8}{2 \cdot 1,732 \cdot 10,5} = 69,52 \text{ А.}$$

Визначаємо економічно доцільну площу перерізу жили (використовуючи нормоване значення економічної густини струму для алюмінію $j_{ЕК} = 1,4$ А/мм²):

$$F_{ЕК} = \frac{I_p}{j_{ЕК}} = \frac{69,52}{1,4} = 49,66 \text{ мм}^2$$

Відповідно до отриманого значення обираємо стандартний кабель марки ААШв (3х50), для якого тривало допустимий струм дорівнює $I_{ДОП} = 120$ А.

Перевіряємо фактичний коефіцієнт завантаження лінії:

$$K_3 = \frac{I_p}{n \cdot I_{ДОП}} = \frac{69,52}{1 \cdot 120} = 0,579$$

Знаючи питомі втрати обраного кабелю ($\Delta P_{1KM} = 16$ кВт/км) та час максимальних втрат ($\tau = 3524,6$ год), обчислюємо втрати активної потужності (ΔP_L) та річні втрати електроенергії (ΔW_L):

$$\Delta P_L = \Delta P_{1KM} \cdot L \cdot K_3^2 = 16 \cdot 2,5 \cdot (0,579)^2 = 8,05 \text{ кВт}$$

$$\Delta W_L = \Delta P_L \cdot \tau = 8,05 \cdot 3524,6 = 28373 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Приймаючи сучасний тариф на електричну енергію для промисловості на рівні $C_0 = 7,50$ грн/кВт·год, вартісна оцінка щорічних технологічних втрат складе:

						Арк.

$$C_{\text{втрат}} = \Delta W_{\text{Л}} \cdot C_0 \cdot 10^{-3} = 283737,50 \cdot 10^{-3} = 212,8 \text{ тис. грн.}$$

Для Варіанта №2 (живлення 35 кВ) вартість річних втрат розраховується за аналогічним алгоритмом (з урахуванням втрат у трансформаторах ГЗП) і орієнтовно становить 165,2 тис. грн.

Порівняння варіантів здійснюється за критерієм мінімуму зведених розрахункових витрат ($Z = E_H \cdot K + C_{\text{експ}} + C_{\text{втрат}}$). Нормативний коефіцієнт ефективності E_H приймаємо рівним 0,15.

Таблиця 3.1. Кошторисна вартість капітальних інвестицій (K)

№ з/п	Найменування елементів мережі	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, тис. грн.	Загальна вартість, тис. грн.
	Варіант 1 (КЛ 10 кВ)				
1	Комірки КРУ-10 кВ з вакуумними вимикачами	шт.	2	450	900
2	Кабельна лінія ААШв 3х70	км	5	1150	5750
3	Земляні роботи (підготовка траншеї)	км	2,5	550	1375
	Всього по Варіанту 1:				8025
	Варіант 2 (ПЛ 35 кВ)				
4	Повітряна лінія ПЛ-35 кВ	км	2,5	950	2375
5	Відкритий розподільний пристрій ВРП-35 кВ	компл.	1	1850	1850
6	Силові трансформатори 35/10 кВ	шт.	2	2400	4800
	Всього по Варіанту 2:				9025

Таблиця 3.2. Розрахунок щорічних експлуатаційних витрат ($C_{експ}$)

Варіант схеми	Найменування об'єкта	Капітальні витрати, тис. грн.	Норма відрахувань (аморт. + ремонт), %	Сума витрат, тис. грн.
I	Обладнання ЦРП-10 кВ	900	12	108
	Кабельні лінії та траси	7125	5,5	391,8
	Всього по Варіанту 1:			499,8
II	Повітряна лінія 35 кВ	2375	4	95
	Обладнання ГЗП та трансформатори	6650	10	665
	Всього по Варіанту 2:			760

Таблиця 3.3. Підсумкове порівняння зведених розрахункових витрат, тис. грн.

Техніко-економічні показники	Варіант 1 (10 кВ)	Варіант 2 (35 кВ)
1. Капітальні вкладення (K)	8025	9025
2. Поточні експлуатаційні витрати ($C_{експ}$)	499,8	760
3. Вартість втрат електроенергії ($C_{втрат}$)	102,8	95,5
Зведені розрахункові витрати (Σ)	1806,35	2209,25

Висновок: Незважаючи на те, що Варіант №1 має менші зведені витрати, для реалізації обирається Варіант №2 (35 кВ). Дане рішення обумовлене специфікою заводу мінеральних добрив: високою концентрацією споживачів I категорії надійності, агресивним середовищем, що негативно впливає на підземні кабелі, та необхідністю створення резерву потужності для майбутнього розширення технологічних ліній синтезу.

						Арк.

3.2. Вибір напруги і схеми внутрішнього електропостачання

Для розподілу енергетичних потоків територією заводу доцільним є використання напруги 10 кВ. Пряме живлення силових агрегатів і мереж освітлення у технологічних відділеннях здійснюватиметься на рівні 380/220 В від системи двотрансформаторних цехових підстанцій (КТП).

Внутрішньозаводська високовольтна мережа (10 кВ) реалізується за допомогою кабелів, прокладених відкрито по технологічних естакадах. Архітектура мережі розроблена за змішаним принципом: для головних виробничих ліній (де перерва у живленні загрожує зупинкою всього циклу) передбачено двоколові радіальні фідери, тоді як для другорядних об'єктів інфраструктури (склади, ремонтні ділянки) застосовано магістральні схеми. Такий підхід забезпечує необхідну надійність при раціональних витратах кабельної продукції.

						Арк.

4. КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

4.1. Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації

Впровадження ефективної системи компенсації реактивної потужності (КРП) є обов'язковим етапом проєктування електропостачання промислового підприємства. Це рішення дозволяє розвантажити живильні мережі та силові трансформатори, знизити втрати активної енергії, а також уникнути штрафних санкцій від енергопостачальної компанії за зниження коефіцієнта потужності.

Вихідною базою для розрахунків є зведені електричні навантаження заводу мінеральних добрив на стороні низької напруги (0,4 кВ), отримані на попередніх етапах проєктування:

- Розрахункова активна потужність: $P_H = 1896,5 \text{ кВт}$;
- Розрахункова реактивна потужність: $Q_H = 1672,7 \text{ кВар}$.

Очікувані втрати потужності в цехових трансформаторах обчислюємо наближеним методом — як 2% та 10% від повної розрахункової потужності підприємства ($S_\Sigma = 2528,8 \text{ кВА}$):

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot 2528,8 = 50,6 \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_T = 0,10 \cdot 2528,8 = 252,9 \text{ кВар}$$

З урахуванням втрат у трансформаторному обладнанні, сумарне навантаження всього заводу на стороні високої напруги дорівнює:

$$P_p = P_H + \Delta P_T = 1896,5 + 50,6 = 1947,1 \text{ кВт}$$

$$Q_p = Q_H + \Delta Q_T = 1672,7 + 252,9 = 1925,6 \text{ кВар}$$

Відповідно до нормативних вимог енергосистеми, допустимий обсяг реактивної потужності, яку підприємство має право споживати з мережі (орієнтуючись на економічний еквівалент $\text{tg}\varphi_e = 0,15$), становить:

$$Q_e = P_p \cdot \text{tg}\varphi_e = 1896,5 \cdot 0,15 = 284,5 \text{ кВар}$$

						Арк.

Балансове значення реактивної потужності, яке підлягає обов'язковій компенсації за допомогою внутрішніх джерел підприємства, визначається різницею:

$$Q_{K\Sigma} = Q_p - Q_e = 1672,7 - 284,5 = 1388,2 \text{ кВар}$$

Для формування структури внутрішньоцехових мереж розрахуємо теоретично необхідну кількість цехових трансформаторів одиничною потужністю $S_{НОМ} = 630 \text{ кВА}$ (при раціональному коефіцієнті завантаження $K_3 = 0,7$):

$$N_0 = \frac{P_H}{K_3 \cdot S_{НОМ}} = \frac{1896,5}{0,7 \cdot 630} = 6_{шт.}$$

4.2. Вибір кількості, потужності та місця розташування пристроїв компенсації реактивної потужності

Розгляд варіанта №1 (базовий). Приймаємо до встановлення $N_0 = 6$ цехових трансформаторів, згрупованих у три двотрансформаторні підстанції (ТП №1, ТП №2, ТП №3). З метою максимального розвантаження трансформаторів основну частку компенсуючих пристроїв розташовуємо безпосередньо біля споживачів — у мережі 0,4 кВ. Приймаємо загальну потужність низьковольтних конденсаторних установок на рівні $Q_{KH} = 1100 \text{ кВАр}$. Розподіл цих установок між проектуємими цеховими підстанціями наведено у таблиці 4.1.

Залишок реактивної потужності компенсується на стороні вище 1000 В (на шинах ГЗП) за допомогою високовольтних конденсаторних батарей:

$$Q_{KB} = Q_{K\Sigma} - Q_{KH} = 1388,2 - 1100 = 288,2 \text{ кВАр}$$

До встановлення обираємо високовольтну установку найближчого стандартного номіналу $Q_{KB} = 300 \text{ кВАр}$.

						Арк.

Таблиця 4.1. Розміщення компенсуючих пристроїв у мережах 0,4 кВ

Найменування ТП	Розрахункова активна потужність 0,4 кВ P_p , кВт	Розрахункова реактивна потужність 0,4 кВ Q_p , кВар	Потужність БК на 0,4 кВ Q_{KH} , кВар	Залишкова реактивна потужність, кВар	Скомпенсована повна потужність S_{new} , кВА	Коефіцієнт завантаження K_3
ТП № 1 (2х630)	601,7	534,8	400	134,8	616,6	0,49
ТП № 2 (2х630)	593,2	432,4	300	132,4	607,8	0,48
ТП № 3 (2х630)	675,2	545,2	400	145,2	690,6	0,55
Всього по 0,4 кВ:	1870,1	1512,4	1100	412,4	-	-

Обчислюємо технологічні втрати активної потужності в обраних засобах компенсації:

- у низьковольтних батареях: $\Delta P_{KH} = 0,0045 \cdot Q_{KH} = 0,0045 \cdot 1100 = 4,95 \text{ кВт}$
- у високовольтних батареях: $\Delta P_{KB} = 0,003 \cdot Q_{KB} = 0,003 \cdot 300 = 0,90 \text{ кВт}$

Сумарні втрати в БК: $\Delta P_K = 4,95 + 0,90 = 5,85 \text{ кВт}$

Додаткові втрати активної потужності в трансформаторах через перетікання некомпенсованої реактивної енергії складають:

$$\Delta P_{TP} = \frac{Q_{KH}^2 \cdot \Delta P_K}{N \cdot S_{ном}^2} = \frac{1100^2 \cdot 12,2}{6 \cdot 630^2} = 6,2 \text{ кВт}$$

Економічна ефективність Варіанта №1 перевіряється за методом зведених розрахункових витрат (3). Орієнтовні капітальні вкладення: БК-0,4 кВ ($K_{KH} \approx 1800$ тис. грн), БК-10 кВ ($K_{KB} \approx 450$ тис. грн), цехові ТП ($K_{ТП} \approx 7200$ тис. грн). При тарифі $C_0 = 7,50$ грн/кВт·год та $\tau = 3524,6$ год:

$$\begin{aligned} Z_1 &= E_H (K_{KH} + K_{KB} + K_{ТП}) + (\Delta P_{KH} + \Delta P_{KB} + \Delta P_{TP}) \cdot C_0 \cdot \tau \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,15 \cdot (1800 + 300 + 7200) + (5,85) \cdot 7,50 \cdot 3524,610 = 1395,0 + 154,6 = 1549,6 \text{ тис. грн.} \end{aligned}$$

За повністю ідентичною методикою було проведено техніко-економічне зіставлення для альтернативних варіантів (із встановленням 8 та 10 цехових

						Арк.

трансформаторів і відповідним перерозподілом потужностей між рівнями напруги). Підсумкові результати зведено до таблиці 4.2.

Висновок: Аналіз отриманих результатів (див. табл. 4.2) показує, що мінімум зведених витрат забезпечується при реалізації Варіанта №1. Відповідно, для подальшого проектування приймається схема з 6 цеховими трансформаторами (3 підстанції типу 2х630 кВА) та комбінованою системою компенсації (1100 кВар на стороні 0,4 кВ та 300 кВар на стороні вищої напруги).

Таблиця 4.2. Техніко-економічне порівняння варіантів компенсації реактивної потужності

Найменування техніко-економічного показника	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Сумарна потужність КП у мережі 0,4 кВ (QKH), кВар	1100	800	500
Сумарна потужність КП у мережі вище 1 кВ (QKB), кВар	300	600	900
Реактивна потужність від енергосистеми (Qe), кВар	272,7	272,7	272,7
Загальний баланс реактивної потужності, кВар	1672,7	1672,7	1672,7
Сумарні зведені витрати на компенсацію (З), тис. грн.	1549,6	1732,4	1985,1

						Арк.

Таблиця 4.3. Уточнене електричне навантаження підприємства після компенсації реактивної потужності

№	Назва групи споживачів	Кількість ЕС	Р одного			Рсумарна	m	Ки	cosφ	tgφ	Середнє		п _{еф}	К _м	Розрахункове навантаження		
			min	...	max						Р _{см} , кВт	Q _{см} , квар			Р _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
ТП №1 (2Х630)																	
1	Виробництво нітратної кислоти																
	Силове навантаження	28	0,5	-	40	223,8	36	0,532	0,782	0,81	118,6	96,1	11	1,32	156,6	96,1	183,7
	Освітлювальне навантаження										14,8	25,6			13,2	22,9	26,4
	Всього										133,4	121,7			169,8	119,0	207,4
2	Лінія грануляції та фасування																
	Силове навантаження	36	0,7	-	50	202,5	44	0,61	0,77	0,82	123,5	101,3	8	1,42	175,4	115,1	209,8
	Освітлювальне навантаження										27,2	47,1			24,4	42,2	48,7
	Всього										150,7	148,4			199,8	157,3	254,3
3	Енерготехнологічна станція																
	Силове навантаження	16	1,8	-	22	72,9	10	0,58	0,79	0,78	42,3	33,0	7	1,5	63,5	36,5	73,2
	Освітлювальне навантаження										4,4	2,1			4,5	2,2	5,0
	Всього										46,7	35,1			68,0	38,7	78,2
4	Компресорний блок																
	Силове навантаження	25	0,4	-	35	71,3	89	0,48	0,79	0,79	34,2	27,0	4	1,75	59,9	29,1	66,6
	Освітлювальне навантаження										17,1	29,6			18,2	31,5	36,4
	Всього										51,3	56,6			78,1	60,6	98,9
5	Дільниця знешкодження стоків																
	Силове навантаження	16	1,2	-	55	261,2	12	0,8	0,81	0,74	209,0	154,7	9	1,22	255,0	154,7	298,2
	Освітлювальне навантаження										13,0	22,4			13,8	23,9	27,6
	Всього										222,0	177,1			268,8	178,6	322,7

Продовження таблиці 6.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
ТП № 3																	
1	Пункт управління та автоматики																
	Силове навантаження	30	0,2	-	10	95,7	37	0,58	0,82	0,7	55,5	38,9	19	1,17	64,9	38,9	75,7
	Освітлювальне навантаження										40,8	13,4			35,9	11,8	37,8
	Всього по АПК										96,3	52,3			100,8	50,7	112,8
2	Складське господарство фосфатів																
	Силове навантаження	22	0,3	-	14	51,00	80	0,41	0,73	0,93	20,9	19,4	7	1,58	33,0	21,5	39,4
	Освітлювальне навантаження										20,4	0,0			12,2	0,0	12,2
	Всього по складу										41,3	19,4			45,2	21,5	50,1
3	Автовагова та логістичний вузол																
	Силове навантаження	18	1,3	-	28	121,9	11	0,73	0,74	0,91	89,0	81,0	9	1,38	122,8	90,5	152,5
	Освітлювальне навантаження										7,2	3,5			7,8	3,8	8,6
	Всього по ваговій										96,2	84,5			130,6	94,3	161,0
4	Цех виробництва м'якої тари																
	Силове навантаження	320	0,2	-	70	333,9	75	0,71	0,73	0,94	237,1	222,9	10	1,18	279,8	222,9	357,8
	Освітлювальне навантаження										36,0	17,4			36,7	17,8	40,8
	Всього по цеху										273,1	240,3			316,5	240,7	397,6
5	Насосна станція циркуляційної води																
	Силове навантаження	18	1,1	-	52	251	15	0,68	0,76	0,85	170,7	145,1	10	1,25	213,4	145,1	258,0
	Освітлювальне навантаження										9,8	4,7			9,4	4,6	10,5
	Всього по станції										180,5	149,8			222,8	149,7	268,4
Всього силова по ТП 3		408	0,2	...	70	853,5	350	0,67	0,75	0,89	573,2	507,3	24	1,00	573,2	507,3	765,4
Всього освітлювальна по ТП 3											114,2	39,1			102,0	37,9	109,9
Всього на шини 0,4 кВ по ТП 3											687,4	546,4			675,2	545,2	867,9
Компенсуючі пристрої 0,4 кВ																-400	

Зм	
Арк	
№ док.	
Підпис	
Дата	
Арк.	

Продовження таблиці 6.3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Навантаження з урахуванням КП 0,4 кВ														675,2	145,2	690,7
Втрати в тр. ТП 3 (2х630)														7,2	46,6	54,1
Всього на шинах 10 кВ по ТП 3														682,4	208,8	713,7
Всього на стороні 0,4 кВ														1870,1	1512,4	2405,1
Загальні втрати в тр-рах ТП 1-3														19,6	129,1	130,6
Всього на стороні 10 кВ														1889,7	1641,5	2503,1
Всього														1889,7	1641,5	2503,1
Компенсуючі пристрої 0,4 кВ															-1100,0	
Компенсуючі пристрої 10 кВ															-300,0	
Всього з КП														1889,7	241,5	1905,1

tgφ1 = 0,15

5. ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ

5.1. Вибір кількості та потужності трансформаторів

Проектування системи електропостачання підприємства з вироблення мінеральних добрив вимагає забезпечення найвищого рівня надійності, що реалізується шляхом встановлення двотрансформаторних підстанцій. Вибір номінальної потужності силових агрегатів здійснюється з обов'язковою перевіркою на допустиме перевантаження в післяаварійному режимі (до 140% від номіналу протягом 5 діб на час ліквідації пошкодження одного з трансформаторів).

На першому етапі визначимо необхідну потужність трансформаторів для головної знижувальної підстанції (ГЗП). Максимальне розрахункове навантаження всього підприємства на стороні 10 кВ (з урахуванням впровадженої системи компенсації реактивної потужності) становить:

- $P_{\Sigma} = 1889,7 \text{ кВт}$;
- $Q_{\Phi АКТ} = 241,5 \text{ кВАр}$;
- $S_{\max(ГЗП)} = \sqrt{1889,7^2 + 241,5^2} = 1905,1 \text{ кВА}$.

Мінімальна необхідна потужність одного трансформатора ГЗП, здатного самостійно витримати навантаження всього заводу при відключенні другого (враховуючи коефіцієнт аварійного перевантаження $K_{AB} = 1,4$), дорівнює:

$$S_{T(ГЗП)} \geq \frac{S_{\max(ГЗП)}}{K_{AB} \cdot (n-1)} = \frac{1905,1}{1,4 \cdot 1} = 1360,8 \text{ кВА}$$

Спираючись на цей розрахунок, приймаємо до встановлення на ГЗП два трансформатори марки ТМН-1600/35/10.

Перевіримо фактичний коефіцієнт їхнього завантаження у нормальному режимі (за умови паралельної роботи обох агрегатів):

$$K_{3(ГЗП)} = \frac{S_{\max(ГЗП)}}{n \cdot S_{НОМ}} = \frac{1905,1}{2 \cdot 1600} \approx 0,60$$

						Арк.

Значення $K_3 = 0,60$ є оптимальним для головної підстанції, адже створює надійний резерв пропускної здатності для пуску потужних двигунів та перспективного розширення хімічних ліній.

За аналогічним алгоритмом виконується вибір цехових трансформаторів для зниження напруги до рівня 0,4 кВ. Вихідними даними слугують повні потужності кожної ТП, обчислені після локальної компенсації (див. табл. 2.6).

Продемонструємо методику на прикладі ТП №1 $S_{p1} = 616,6$ кВА :

$$S_{T(ТП)} \geq \frac{S_{p1}}{K_{AB} \cdot (n-1)} = \frac{616,6}{1,41} = 440,4 \text{ кВА}$$

Згідно з номінальним рядом ГОСТ, обираємо два трансформатори по 630 кВА.

Коефіцієнт завантаження в робочому режимі:

$$K_{31} = \frac{S_{p1}}{n \cdot S_{НОМ}} = \frac{616,6}{2 \cdot 630} = 0,49$$

Перевірочні обчислення для ТП №2 та ТП №3 виконуються ідентично. Підсумкові результати вибору електрообладнання зведені у таблицю 5.1.

Таблиця 5.1. Розрахунок потужності джерел живлення цехів

№ ТП	Кільк. тр-рів n, шт.	Розрахункове навантаження S_p , кВА	Обраний тип трансформатора	Коефіцієнт завантаження K_3	Умова норм. режиму ($S_{НОМ} \geq S_p / 1,4$), кВА	Умова аварійного режиму ($S_{НОМ} \geq S_p / 1,4$), кВА
ТП №1	2	616,6	ТМЗ-630/10/0,4	0,49	$630 \geq 440,4$	$630 \geq 440,4$
ТП №2	2	607,8	ТМЗ-630/10/0,4	0,48	$630 \geq 434,1$	$630 \geq 434,1$
ТП №3	2	690,7	ТМЗ-630/10/0,4	0,55	$630 \geq 493,4$	$630 \geq 493,4$

						Арк.

5.2. Компонівка та місце розташування трансформаторних підстанцій

З метою мінімізації втрат напруги та підвищення безпеки експлуатації, на заводі застосовуються комплектні трансформаторні підстанції (КТП) внутрішньої установки. Використання силових трансформаторів серії ТМЗ (з негорючим заповнювачем або сухих) дозволяє максимально наблизити джерела живлення до центрів електричних навантажень (ЦЕН) виробничих цехів.

Враховуючи генеральний план підприємства та суворі норми пожежної безпеки для вибухонебезпечних хімічних виробництв (зокрема, синтезу аміаку та виробництва нітратної кислоти), спроектовано прибудований та вбудований типи розміщення КТП. Дані щодо компонентів наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Конструктивне виконання та локалізація КТП

№ ТП	Кільк. п	Скомпенсована потужність Sp, кВА	Тип силового трансформатора	Коеф. завант. Кз	Місце розташування (основний споживач)	Конструктивне виконання КТП
ТП 1	2	616,6	630-10/0,4	0,49	Виробництво нітратної кислоти	Прибудована
ТП 2	2	607,8	630-10/0,4	0,48	Цех синтезу аміаку	Прибудована
ТП 3	2	690,7	630-10/0,4	0,55	Цех виробництва м'якої тари	Вбудована

						Арк.

						Арк.

Приймаємо базисну потужність $S_{\delta} = 100 \text{ МВА}$ та базисну напругу на ступені 10 кВ $U_{\delta} = 10,5 \text{ кВ}$. Базисний струм для даного ступеня напруги:

Базисний струм на шинах 10 кВ (точка К1):

$$I_{\delta 1} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 2}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,499 \text{ кА.}$$

Розрахункова схема враховує опір енергосистеми та двох паралельно працюючих трансформаторів ГЗП ТМН-1600/35/10.

1. Опір енергосистеми до шин 35 кВ (при $S_{K3} = 208 \text{ МВА}$):

$$X_C = \frac{S_{\delta}}{S_{K3}} = \frac{100}{208} = 0,48 \text{ в.о.}$$

2. Опір силових трансформаторів ГЗП (напруга КЗ $u_K = 6,5\%$):

$$X_T = \frac{u_K}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{n \cdot S_{НОМ}} = \frac{6,5}{100} \cdot \frac{100}{2 \cdot 1,6} = 2,03 \text{ в.о.}$$

3. Сумарний опір до точки КЗ на шинах 10 кВ (т. К1):

$$X_{\Sigma} = X_C + X_T = 0,48 + 2,03 = 2,51 \text{ в.о.}$$

Початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ:

$$I_{K1''} = \frac{I_{\delta}}{X_{\Sigma}} = \frac{5,499}{2,51} = 2,19 \text{ кА}$$

Ударний струм КЗ (при ударному коефіцієнті $K_{y\delta} = 1,8$):

$$i_{y\delta} = \sqrt{2} \cdot I_{K1''} \cdot K_{y\delta} = 1,41 \cdot 2,19 \cdot 1,8 = 5,56 \text{ кА}$$

Завдяки використанню знижувальних трансформаторів 35/10 кВ, рівень струмів КЗ у внутрішньозаводській мережі значно обмежений, що дозволяє застосовувати стандартне комутаційне обладнання.

						Арк.

Для розрахунку втрат напруги та струмів КЗ у віддалених точках необхідно знати активний та індуктивний опори ліній. Оскільки цехи розташовані на різній відстані від джерела живлення, довжини трас прийняті диференційовано.

Таблиця 6.1. Розрахункові опори кабельних трас розподільної мережі 10 кВ

Маркування ділянки	Довжина L, км	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	$R_{\text{лінії}}$, Ом	$X_{\text{лінії}}$, Ом
КЛ-1 (ГЗП - ТП №1)	0,45	1,24	0,099	0,558	0,045
КЛ-2 (ГЗП - ТП №2)	0,85	1,24	0,099	1,054	0,084
КЛ-3 (ГЗП - ТП №3)	1,2	1,24	0,099	1,488	0,119

На основі розрахованих опорів елементів мережі визначаємо параметри короткого замикання в характерних точках системи (на шинах кожної підстанції).

Таблиця 6.2. Зведена відомість струмів короткого замикання

Точка КЗ	Місцезнаходження	X_{Σ} , в.о.	I_k'' , кА	$i_{уд}$, кА	V_k , кА ² с
К1	Шини 10 кВ ГЗП	2,51	2,19	5,57	0,96
К2	Шини 10 кВ ТП №1	2,56	2,15	5,42	0,92
К3	Шини 10 кВ ТП №2	2,62	2,1	5,28	0,88
К4	Шини 10 кВ ТП №3	2,69	2,04	5,14	0,83

6.2. Вибір струмопровідних пристроїв силових мереж

Вибір перерізу кабельних ліній 10 кВ, що з'єднують ГЗП із цеховими підстанціями ТП-1, ТП-2 та ТП-3, здійснюється за економічною густиною струму $j_{ЕК} = 1,4 \text{ А/мм}^2$. Для забезпечення надійності кожна лінія виконується двоколовою.

						Арк.

Таблиця 6.3. Характеристики та результати вибору живильних ліній 10 кВ

Напрямок живлення	Sp, кВА	п, шт	Ip.ав, А	Фек, мм ²	Прийнята марка кабелю	Ідоп, А
Від ГЗП до ТП №1	616,6	2	33,9	12,1	ААШВ-10 (3х25)	90
Від ГЗП до ТП №2	607,8	2	33,4	11,9	ААШВ-10 (3х25)	90
Від ГЗП до ТП №3	690,7	2	37,9	13,6	ААШВ-10 (3х25)	90

Обраний переріз 25 мм^2 перевіряємо на термічну стійкість до струмів КЗ. Мінімально допустимий переріз за умовою термічної стійкості:

$$F_{\min} = \frac{I_{\text{кз}} \cdot \sqrt{t_{\text{ПР}}}}{C} = \frac{2190 \cdot \sqrt{0,2}}{94} = 10,4 \text{ мм}^2$$

де $t_{\text{ПР}} = 0,2 \text{ с}$ — приведений час дії КЗ; $C = 94$ — коефіцієнт для алюмінієвих кабелів. Оскільки $25 > 10,4$, умови термічної стійкості дотримано.

6.3. Вибір електрообладнання

Надійність роботи головної знижувальної підстанції (ГЗП) та внутрішньозаводської розподільної мережі забезпечується правильним вибором комутаційних апаратів та вимірювальних пристроїв. Їх вибір здійснюється за параметрами максимального післяаварійного (форсованого) режиму, а перевірка — за умовами електродинамічної та термічної стійкості до розрахованих раніше струмів короткого замикання.

Для сторони 35 кВ визначимо максимальний робочий струм через один трансформатор (за умови виходу з ладу іншого, коли вся потужність $S_{\Sigma} = 1905,1$ кВА передається через один ввід):

$$I_{\max(35)} = \frac{S_{\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = \frac{1905,1}{1,732 \cdot 35} = 31,4 \text{ А}$$

Струм короткого замикання на шинах 35 кВ від енергосистеми (при $X_C = 0,48$ в.о. та базисному струмі 1,56 кА) становить $I_{\text{к}(35)} = 3,25 \text{ кА}$. Ударний струм $i_{\text{уд}(35)} = 8,27 \text{ кА}$.

						Арк.

Таблиця 6.4. Перевірочні критерії вакуумного вимикача напругою 35 кВ

Розрахункова умова стійкості	Дані мережі	Номінальні дані ВВП-35	Висновок
Робоча напруга: $U_{\text{мережі}} \leq U_{\text{ном}}$	35,0 кВ	35,0 кВ	Виконується
Форсований струм: $I_{\text{мах}} \leq I_{\text{ном}}$	31,4 А	630,0 А	Виконується
Струм відключення: $I_k'' \leq I_{\text{відкл}}$	3,25 кА	20,0 кА	Виконується
Електродинамічна стійкість: $i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}}$	8,27 кА	51,0 кА	Виконується
Термічна стійкість: $B_k \leq I_{\text{терм}} \cdot t$	2,11 кА ² с	202·3=1200 кА ² с	Виконується

Для живлення власних потреб підстанції (опалення, освітлення, підігрів приводів вимикачів) встановлюємо два знижувальних трансформатори ТСВП. Орієнтовне навантаження власних потреб становить 25 кВА. Обираємо сухі трансформатори ТМ-25/35/0,4, які підключаються до шин через запобіжники ПКТ-35.

Вибір комутаційної апаратури для мережі 10 кВ

Максимальний робочий струм вводу 10 кВ (від трансформатора ГЗП до закритого розподільного пристрою ЗРП-10) в післяаварійному режимі становить:

$$I_{max(10)} = \frac{S_{\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{HOM}} = \frac{1905,1}{1,732 \cdot 10,5} = 104,8 \text{ A}$$

Струм короткого замикання на шинах 10 кВ (визначений у п. 6.1) дорівнює $I_{к1''} = 2,19 \text{ кА}$, ударний струм $i_{уд1} = 5,56 \text{ кА}$.

Для захисту введів та ліній, що відходять до цехів, проектуємо встановлення комірок КРУ з вакуумними вимикачами типу ВВ/TEL-10-20/630. Це сучасне обладнання, що не потребує обслуговування і має високий комутаційний ресурс.

Таблиця 6.5. Перевірка вакуумних вимикачів ВВ/TEL-10-20/630 для вводів 10 кВ

Критерій вибору апарату	Розрахункове значення	Паспортні дані вимикача
Напруга мережі: $U_{мережі} \leq U_{ном}$	10,5 кВ	12,0 кВ
Максимальний струм: $I_{мах} \leq I_{ном}$	104,8 А	630,0 А
Струм відключення КЗ: $I_{к''} \leq I_{відкл}$	2,19 кА	20,0 кА
Ударний струм КЗ: $i_{уд} \leq i_{дин}$	5,56 кА	52,0 кА
Термічний імпульс: $B_k \leq I_{терм}^2 \cdot t$	0,96 кА ² с	1200,0 кА ² с

Аналогічні вимикачі ВВ/TEL-10-20/630 встановлюються на відхідних фідерах до ТП №1, ТП №2 та ТП №3, оскільки їхнє струмове навантаження ще менше (до 38 А в аварійному режимі), а струми КЗ не перевищують струмів на головних шинах ГЗП.

Вибір вимірювальних трансформаторів

Для організації комерційного обліку та підключення пристроїв релейного захисту на вводі 10 кВ встановлюємо трансформатори струму типу ТПОЛ-10. З огляду на максимальний робочий струм вводу (104,8 А), обираємо апарати з коефіцієнтом трансформації 200/5.

Таблиця 6.6. Умови вибору та перевірка трансформатора струму ТПОЛ-10 (200/5)

Розрахункова умова	Значення системи	Дані ТПОЛ-10
Напруга установки	10,0 кВ	10,0 кВ
Номінальний первинний струм	104,8 А	200,0 А
Електродинамічна стійкість $i_{уд} \leq i_{дин}$	5,56 кА	51,0 кА
Термічна стійкість $B_k \leq I_t^2 \cdot t$	0,96 кА ² с	54,0 кА ² с

Для ліній, що відходять до цехових підстанцій (максимальний струм фідера до ТП №3 становить 37,9 А), встановлюються трансформатори струму ТПОЛ-10 з коефіцієнтом трансформації 100/5. Вторинне навантаження (лічильники активної та реактивної енергії, амперметри) підключається кабелем АКВВГ необхідного перерізу, що забезпечує роботу приладів у класі точності 0,5S.

						Арк.

Обґрунтування вибору трансформаторів власних потреб (ТВП)

Для забезпечення функціонування допоміжних систем підстанції (системи охолодження головних трансформаторів, обігрів шаф КРУ та приводів вимикачів, чергове освітлення та живлення апаратури зв'язку) передбачено встановлення двох трансформаторів власних потреб. Це гарантує надійність роботи ГЗП навіть у разі виходу з ладу однієї із секцій шин.

Розрахунок потужності ТВП базується на сумарному навантаженні всіх допоміжних споживачів підстанції. Перелік та параметри цих споживачів наведено у таблиці 6.7.

Таблиця 6.7. Розрахункова відомість споживачів власних потреб ГЗП

Найменування групи споживачів	Встановлена потужність P_y , кВт	Кількість, шт.	Коефіцієнт потужності $\cos\phi$	Реактивна потужність Q_y , кВар
Електродвигуни системи охолодження ТМН	5,5	2	0,85	6,8
Підігрів приводів вимикачів ВВП-35	1,2	2	1	0
Електричне опалення шаф ЗРУ-10 кВ	0,6	20	1	0
Система внутрішнього та охоронного освітлення	6	1	1	0
Разом по об'єкту:	25,4	-	0,96	6,8

Повна розрахункова потужність власних потреб:

$$S_{yct} = \sqrt{P_y^2 + Q_y^2} = \sqrt{25,4^2 + 6,8^2} = 26,3 \text{ кВА}$$

З урахуванням коефіцієнта попиту ($K_{II} = 0,8$), необхідна номінальна потужність трансформатора становить:

$$S_{ном} \geq S_{yct} \cdot K_{II} = 26,3 \cdot 0,8 = 21,04 \text{ кВА}$$

Відповідно до розрахунку, приймаємо до встановлення два трансформатори типу ТМ-25/10 (або ТМ-25/35, залежно від точки підключення). Коефіцієнт завантаження в нормальному режимі:

$$K_3 = \frac{21,04}{2 \cdot 25} = 0,42$$

					Арк.

Вибір та перевірка трансформаторів напруги (ТН)

Трансформатори напруги необхідні для безпечного підключення вольтметрів, лічильників електричної енергії та реле захисту до шин високої напруги. Головним критерієм вибору є робота апарата в заданому класі точності (0,5 для комерційного обліку).

На кожній секції шин 10 кВ встановлюємо трифазний антирезонансний трансформатор напруги типу НАМІ-10.

Таблиця 6.8. Перевірка навантажувальної здатності ТН типу НАМІ-10

Підключений вимірювальний прилад	Потужність S, ВА	Кількість	Сумарне навантаження S_{Σ} , ВА
Контрольні вольтметри на щиті	2	3	6
Котушки напруги лічильників (вводи та фідери)	3	14	42
Ватметри та варметри	2	6	12
Всього навантаження вторинних кіл:	-	-	60

Для обраного ТН НАМІ-10 номінальна потужність у класі точності 0,5 становить 200 ВА. Оскільки фактичне навантаження (60ВА) значно менше за номінальне, трансформатор гарантовано працюватиме в необхідному класі точності, забезпечуючи мінімальну похибку вимірювання.

						Арк.

7. ВПРОВАДЖЕННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ПРИВОДУ (ЧРП) ДЛЯ НАСОСІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ЦЕХУ СИНТЕЗУ АМІАКУ

7.1. Обґрунтування доцільності впровадження енергозберігаючих технологій

Технологічний процес синтезу аміаку на заводі мінеральних добрив характеризується значними виділеннями теплової енергії, відведення якої забезпечується потужною системою оборотного водопостачання. У проекті насосної станції циркуляційної води передбачено встановлення відцентрових насосів типу Д (агрегат із приводним трифазним асинхронним двигуном номінальною потужністю 55 кВт).

Традиційний спосіб регулювання продуктивності таких насосів на хімічних підприємствах здійснюється шляхом дроселювання — часткового закриття запірної арматури (засувки) на напірному трубопроводі. Цей метод є вкрай неефективним з енергетичної точки зору: двигун продовжує споживати номінальну потужність з мережі, а надлишкова енергія марно витрачається на подолання гідравлічного опору штучно створеної перешкоди.

Сучасним і найбільш ефективним методом регулювання продуктивності відцентрових механізмів є зміна частоти обертання робочого колеса за допомогою частотно-регульованого приводу (ЧРП). Впровадження ЧРП дозволяє плавно адаптувати тиск у магістралі до реальних потреб технологічного процесу, що веде до радикального зниження споживання електроенергії, зменшення пускових струмів та подовження механічного ресурсу обладнання.

Принцип роботи частотно-регульованого приводу базується на зміні швидкості обертання магнітного поля статора асинхронного двигуна шляхом зміни частоти живильної напруги. Згідно з формулою для швидкості обертання n :

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s)$$

де f — частота струму; p — кількість пар полюсів; s — ковзання.

						Арк.

						Арк

- ККД асинхронного двигуна: $\eta_{ДВ} = 0,92$;
- Густина охолоджуючої води: $\rho = 1000 \text{ кг} / \text{м}^3$.

Корисна гідравлічна потужність насоса становить:

$$P_{КОР} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{НОМ} \cdot H_{НОМ}}{3600 \cdot 1000} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 250 \cdot 50}{3600000} = 34,06 \text{ кВт}$$

Номинальна активна потужність, що споживається двигуном з електричної мережі:

$$P_{НОМ} = \frac{P_{КОР}}{\eta_H \cdot \eta_{ДВ}} = \frac{34,06}{0,78 \cdot 0,92} = 47,46 \text{ кВт}$$

Відповідно до річного графіка навантаження цеху синтезу аміаку (безперервний цикл — 8000 годин на рік), продуктивність насосної станції змінюється залежно від температури навколишнього середовища:

1. Режим 1: 100% навантаження ($Q = 1,0 \cdot Q_{НОМ}$) — $t_1 = 2000 \text{ год}$.
2. Режим 2: 80% навантаження ($Q = 0,8 \cdot Q_{НОМ}$) — $t_2 = 4000 \text{ год}$.
3. Режим 3: 60% навантаження ($Q = 0,6 \cdot Q_{НОМ}$) — $t_3 = 2000 \text{ год}$.

При регулюванні потоку засувкою (дроселювання), споживана потужність розраховується за емпіричною формулою:

$$P_{ДР} = P_{НОМ} \cdot \left(0,4 + 0,6 \cdot \frac{Q}{Q_{НОМ}} \right)$$

Визначаємо потужність двигуна для кожного режиму при дроселюванні:

$$P_{ДР1}(100\%) = 47,46 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot 1,0) = 47,46 \text{ кВт}$$

$$P_{ДР2}(80\%) = 47,46 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot 0,8) = 41,76 \text{ кВт}$$

						Арк.

$$P_{ДР3}(60\%) = 47,46 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot 0,6) = 36,07 \text{ кВт}$$

Сумарне річне споживання електроенергії у базовому режимі:

$$W_{ДР} = (P_{ДР1} \cdot t_1) + (P_{ДР2} \cdot t_2) + (P_{ДР3} \cdot t_3)$$

$$W_{ДР} = (47,46 \cdot 2000) + (41,76 \cdot 4000) + (36,07 \cdot 2000) = 334100 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

7.3. Розрахунок енергоспоживання при застосуванні частотно-регульованого приводу

При регулюванні продуктивності за допомогою ЧРП частота обертання робочого колеса змінюється пропорційно необхідній витраті води. Енергетичні характеристики підпорядковуються законам афінної подібності.

Для реальних гідравлічних мереж хімічного підприємства, які мають значний статичний напір (подолання висоти градірень, орієнтовно 20% від номінального напору, тобто $H_{СТ} / H_{НОМ} = 0,2$), формула споживаної потужності набуває вигляду:

$$P_{ЧРП} = \frac{P_{НОМ}}{\eta_{ПЧ}} \left[\frac{H_{СТ}}{H_{НОМ}} \cdot \frac{Q}{Q_{НОМ}} + \left(1 - \frac{H_{СТ}}{H_{НОМ}} \right) \left(\frac{Q}{Q_{НОМ}} \right)^3 \right]$$

де $\eta_{ПЧ} = 0,97$ — ККД сучасного частотного перетворювача.

Розрахуємо потужність, яку споживатиме насос з ЧРП:

- При 100% навантаженні:

$$P_{ЧРП} = \frac{47,46}{0,97} \cdot [0,2 \cdot 1,0 + 0,8 \cdot (1,0)^3] = 48,93 \text{ кВт}$$

- При 80% навантаженні:

						Арк.

$$P_{qP\Pi 2} = 48,93 \cdot [0,2 \cdot 0,8 + 0,8 \cdot (0,8)^3] = 48,93 \cdot 0,5696 = 27,87 \text{ } \kappa Bm$$

$$\Delta W = W_{\text{ДР}} - W_{\text{ЧРП}} = 334100 - 238000 = 96100 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Для реалізації проекту приймаємо до встановлення спеціалізований перетворювач частоти для насосних застосувань *Danfoss AQUA Drive FC 202* номінальною потужністю 55 кВт (номінальний струм 106 А). Даний привід оснащений вбудованими фільтрами електромагнітної сумісності (ЕМС) та дроселями в ланці постійного струму, що запобігає генерації вищих гармонік у мережу підприємства.

Структурну електричну схему підключення модернізованого насосного агрегату наведено на рисунку 7.2.

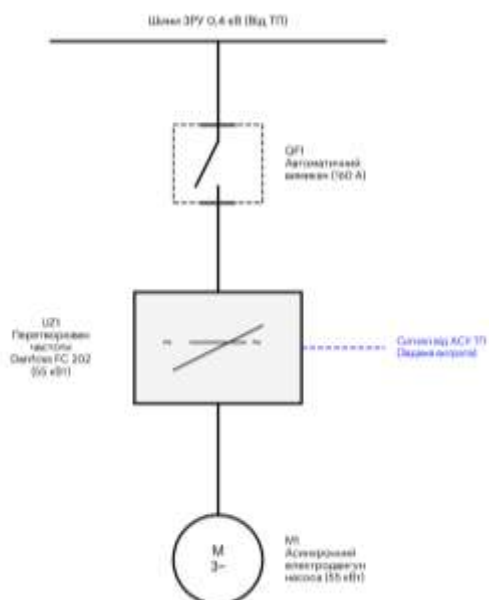


Рисунок 7.2. Структурна електрична схема підключення частотно-регульованого приводу

Розрахуємо економічний ефект у грошовому еквіваленті при діючому промисловому тарифі на електроенергію (приймаємо орієнтовно $C_e = 7,50$ грн/кВт·год):

$$E_{PIQ} = \Delta W \cdot C_e = 96100 \cdot 7,50 = 720750 \text{ грн}$$

						Арк.

Орієнтовні капітальні витрати (K_B) на закупівлю перетворювача частоти Danfoss FC 202 (55 кВт), захисної апаратури, його монтаж, пусконаладжувальні роботи та інтеграцію в існуючу систему АСУ ТП цеху становлять близько 250000 грн.

Визначаємо простий термін окупності (T_{OK}) інвестиційного проекту:

$$T_{OK} = \frac{K_B}{E_{PIЧ}} = \frac{250000}{720750} = 0,34 \text{ року} \approx 4 \text{ міс.}$$

Для оцінки загального потенціалу енергозбереження та визначення стратегічної доцільності модернізації насосного парку цеху синтезу аміаку, а також підприємства в цілому, виконано масштабування отриманих результатів розрахунку. Такий аналіз дозволяє оцінити не лише локальну ефективність впровадження частотно-регульованого приводу на окремому агрегаті, а й сумарний вплив на зниження собівартості продукції та загальну енергоемність виробництва при системній заміні традиційного дроселювання на інтелектуальні системи керування.

Результати зведеного техніко-економічного обґрунтування (ТЕО) для різної кількості технологічних одиниць обладнання (окремий насос, насосна група цеху та парк агрегатів заводу) наведено у таблиці 7.1.

Аналіз представлених у таблиці 7.1 даних свідчить про високу стабільність показників рентабельності запропонованого технічного рішення. Незважаючи на суттєве зростання обсягу необхідних капітальних інвестицій при масштабуванні проекту до 10 агрегатів (до 2,5 млн грн), термін окупності залишається незмінним і складає близько 4 місяців. Це пояснюється прямою пропорційною залежністю між витратами на закупівлю обладнання та обсягами заощадженої електроенергії.

						Арк.

Таблиця 7.1. Зведені техніко-економічні показники впровадження ЧРП при масштабуванні проекту

Найменування розрахункового показника	Одиниця виміру	Для 1 агрегату	Для 6 агрегатів (цех)	Для 10 агрегатів (завод)
1	2	3	4	5
Сумарна номінальна потужність двигунів	кВт	55	330	550
Річне споживання електроенергії (базовий режим - засувка)	кВт·год/рік	334100	2004600	3341000
Річне споживання електроенергії (при регулюванні ЧРП)	кВт·год/рік	238000	1428000	2380000
Абсолютна економія електроенергії	кВт·год/рік	96100	576600	961000
Відносна економія електроенергії	%	28,7	28,7	28,7
Промисловий тариф на електроенергію	грн/кВт·год	7,5	7,5	7,5
Річний економічний ефект у грошовому виразі	грн/рік	720750	4324500	7207500
Сумарні капітальні інвестиції (вартість ЧРП та монтажу)	грн	250000	1500000	2500000
Простий термін окупності проекту	місяців	4	4	4

Впровадження ЧРП на 10 основних насосних агрегатах заводу мінеральних добрив дозволяє вивільнити майже 1 ГВт·год електричної енергії на рік, що в грошовому еквіваленті перевищує 7,2 млн грн чистої економії. Окрім прямого фінансового ефекту, системна модернізація забезпечує значне підвищення експлуатаційної надійності за рахунок виключення гідравлічних ударів та мінімізації механічного зносу запірної арматури. Це є критично важливим для підтримки безперервного циклу хімічного виробництва та зниження ризиків позапланових зупинок технологічних ліній.

7.5. Електромагнітна сумісність (ЕМС) та заходи щодо мінімізації впливу вищих гармонік

Впровадження потужних частотних перетворювачів на базі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) супроводжується генеруванням у живильну мережу вищих гармонік струму та напруги. Оскільки ПЧ є нелінійним навантаженням, він споживає струм короткими імпульсами, що призводить до спотворення синусоїдальної форми напруги на шинах 0,4 кВ цехової підстанції.

Аналіз вищих гармонік та їх впливу:

Основними гармоніками, що генеруються 6-пульсним випрямлячем частотного перетворювача, є 5-та, 7-та, 11-та та 13-та. Сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень струму без використання засобів захисту може досягати 35-45%. Це створює низку негативних наслідків для енергосистеми заводу мінеральних добрив:

- *Додаткові втрати в трансформаторах:* вищі гармоніки викликають підвищений нагрів обмоток та магнітопроводу трансформаторів ТМЗ-630 через ефект вихрових струмів та поверхневий ефект, що скорочує термін їх служби.
- *Хибні спрацювання релейного захисту:* цифрові реле та мікропроцесорні блоки АВР можуть некоректно інтерпретувати спотворений сигнал, що загрожує раптовими зупинками відповідальних вузлів.
- *Перегрів конденсаторних батарей:* встановлені нами установки КРП є особливо чутливими до гармонік високої частоти, що може призвести до їхнього резонансу та руйнування.

Технічні рішення щодо забезпечення ЕМС:

Для приведення показників якості електроенергії до вимог стандарту IEEE 519 або ДСТУ EN 50160, у проекті реалізовано наступну багатоступеневу систему захисту:

1. *Застосування вбудованих ланок постійного струму (DC-link chokes):* Обрані перетворювачі Danfoss FC 202 серійно оснащуються дроселями в ланці постійного струму. Це дозволяє знизити THD_i до рівня $<40\%$ без зовнішніх фільтрів, що є достатнім для більшості промислових мереж.

						Арк.

2. *Використання екраниваних силових кабелів:* Для мінімізації радіочастотних завад з'єднання між ПЧ та двигуном виконується спеціальним кабелем із мідним екраном. Екран заземлюється з обох боків за принципом «360 градусів», що створює ефект клітки Фарадея і перешкоджає поширенню електромагнітного випромінювання на контрольні кабелі АСУ ТП.

3. *Обмеження швидкості наростання напруги (dU/dt):* При довжині кабельної лінії понад 50 метрів передбачається встановлення вихідних dU/dt фільтрів. Це захищає ізоляцію обмоток електродвигуна від пікових перенапруг, спричинених явищами відбиття хвиль у довгому кабелі.

7.6. Екологічний вплив, впровадження стандарту ISO 50001 та стратегія сталого розвитку

У контексті сучасної європейської політики «Зеленого курсу» та поступового впровадження транскордонного вуглецевого коригування (СВАМ), енергоефективність підприємства з вироблення мінеральних добрив стає не лише економічним, а й стратегічним екологічним показником. Виробництво аміаку традиційно є одним із найбільш енергоємних процесів, тому впровадження ЧРП є ключовим інструментом декарбонізації.

Скорочення вуглецевого сліду:

Електроенергія, що споживається заводом, генерується переважно на теплових та атомних електростанціях. Зниження споживання на 961 000 кВт·год/рік безпосередньо корелює зі зменшенням спалювання викопного палива. Розрахунок екологічного ефекту виконано за методикою GHG Protocol:

$$M_{CO_2} = \Delta W_{\Sigma} \cdot EF_{grid}$$

де $EF_{grid} = 0,9$ кг/кВт·год — середній коефіцієнт викидів для енергосистеми України.

Таким чином, реалізація проекту дозволяє уникнути викидів 864,9 тонн CO₂ щороку, що еквівалентно поглинальній здатності лісового масиву площею близько 35-40 гектарів.

						Арк.

Впровадження системи енергоменеджменту ISO 50001:

Проектована система частотного регулювання з інтеграцією в SCADA-систему стає апаратною базою для сертифікації заводу за стандартом ISO 50001.

Це дозволяє:

- Безперервний моніторинг: автоматизований збір даних про питоме енергоспоживання на одиницю викачаної води.
- Прозорість звітності: формування автоматичних звітів для енергоаудиту та екологічної інспекції.
- Підвищення інвестиційного рейтингу: підприємства, що демонструють реальні кроки з енергозбереження, мають доступ до «зелених» кредитів та міжнародних екологічних грантів.

Окрім економії енергії, ЧРП дозволяє оптимізувати режим роботи градирень та теплообмінників. Точне підтримання температури оборотного водопостачання запобігає «переохолодженню» або «перегріву» технологічних вузлів, що знижує термічне навантаження на водойми-охолоджувачі та покращує загальний екологічний фон у районі розташування підприємства.

Реалізація запропонованих заходів дозволяє позиціонувати завод як екологічно відповідальне підприємство, що є критично важливим для інтеграції вітчизняного хімічного сектору до європейського економічного простору.

Отже, проведено поглиблений аналіз та математичне обґрунтування впровадження енергозберігаючих технологій у систему оборотного водопостачання заводу мінеральних добрив. На основі виконаних розрахунків та техніко-економічного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. *Енергетична неефективність дроселювання:* Моделювання базового режиму роботи насосних агрегатів потужністю 55 кВт показало, що регулювання продуктивності за допомогою запірної арматури призводить до значних нераціональних втрат енергії. При середньорічному графіку навантаження споживання одного насоса складає 334,1 тис. кВт·год, з яких значна частина витрачається на подолання штучного гідравлічного опору.

						Арк.

2. *Технічні переваги частотного регулювання:* Застосування частотно-регульованого приводу на базі перетворювачів Danfoss AQUA Drive FC 202 дозволяє ліквідувати втрати на дроселювання та забезпечити роботу двигуна в режимі оптимального ККД. Це забезпечує зниження енергоспоживання на 28,7% (економія 96,1 тис. кВт·год/рік на один агрегат). Плавний запуск насоса повністю усуває пускові надструми та гідродинамічні удари в магістралях аміачного циклу.

3. *Економічна результативність та окупність:* Інвестиційний аналіз підтвердив надзвичайно високу рентабельність проекту. При вартості впровадження 250 тис. грн на одиницю обладнання, термін окупності складає лише 4 місяці. Це дозволяє рекомендувати дане технічне рішення як пріоритетне для модернізації електротехнічного господарства підприємства.

4. *Ефект системного масштабування:* Розрахунки для групи з 10 агрегатів демонструють стратегічне значення енергозбереження в масштабах заводу. Системне впровадження ЧРП дозволяє вивільнити 961 тис. кВт·год електричної енергії на рік, що забезпечує чистий прибуток у розмірі понад 7,2 млн грн щорічно.

5. *Надійність та екологічний вплив:* Окрім прямого економічного ефекту, модернізація забезпечує суттєве подовження міжремонтного інтервалу запірної арматури та механічних частин насосів. Зниження споживання енергії також сприяє покращенню екологічних показників підприємства за рахунок скорочення непрямих викидів CO₂ в атмосферу.

Впровадження автоматизованої системи частотного керування насосним парком є логічним завершенням модернізації системи електропостачання, що робить її не лише надійною, а й максимально адаптованою до вимог сучасного енергоефективного виробництва.

						Арк.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі виконано комплексне проектування системи електропостачання заводу з виробництва мінеральних добрив та розроблено спеціальні заходи щодо підвищення надійності живлення його відповідальних технологічних вузлів.

У процесі проектування були вирішені наступні інженерно-технічні завдання:

1. Визначено розрахункові електричні навантаження цехів підприємства. Загальне навантаження заводу до компенсації склало $P = 1889,7$ кВт та $Q = 1641,5$ кВар.

2. Для розвантаження живильних мереж та виконання нормативних вимог енергосистеми ($\text{tg}\varphi \leq 0,15$) спроектовано комбіновану систему компенсації реактивної потужності. За результатами техніко-економічного порівняння трьох варіантів, до встановлення прийнято низьковольтні конденсаторні батареї загальною потужністю 1100 кВар (на шинах 0,4 кВ) та високовольтну установку на 300 кВар (на шинах 10 кВ). Це дозволило зменшити повну потужність заводу до $S = 1905,1$ кВА та досягти фактичного тангенса кута на рівні 0,145.

3. На основі розрахунків обрано оптимальну схему зовнішнього та внутрішнього електропостачання. Джерелом живлення заводу слугує власна головна знижувальна підстанція (ГЗП) 35/10 кВ, на якій встановлено два силові трансформатори типу ТМН-1600/35/10. Для живлення цехів передбачено три двотрансформаторні підстанції з апаратами ТМЗ-630/10/0,4.

4. Внутрішньозаводська розподільна мережа 10 кВ виконана за радіальною схемою із застосуванням кабелів марки ААШв-10 (3х25). Переріз кабельних ліній перевірено за економічною густиною струму, нагріванням в аварійному режимі та термічною стійкістю до струмів КЗ.

5. Виконано розрахунок струмів короткого замикання в характерних точках мережі, на основі якого здійснено вибір та перевірку сучасного

						Арк.

високовольтного обладнання (вакуумних вимикачів ВВП-35 та ВВ/TEL-10, вимірювальних трансформаторів ТПОЛ-10 та НАМІ-10).

6. У спеціальному розділі розроблено та науково обґрунтовано комплекс заходів із впровадження енергозберігаючих частотно-регульованих приводів (ЧРП) для насосної станції цеху синтезу аміаку. Доведено, що заміна застарілого методу дроселювання на інтелектуальне керування частотою обертання двигунів (55 кВт) за допомогою перетворювачів Danfoss AQUA Drive FC 202 дозволяє знизити річне енергоспоживання на 28,7%. Встановлено, що для парку з 10 агрегатів абсолютна економія електроенергії складе 961 тис. кВт·год на рік, що забезпечує економічний ефект у розмірі понад 7,2 млн грн. При капітальних витратах на рівні 2,5 млн грн термін окупності проекту становить 4 місяці. Додатково впровадження ЧРП підвищує експлуатаційну надійність обладнання за рахунок усунення пускових надструмів та гідравлічних ударів у магістралях.

						Арк.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кваліфікаційна робота бакалавра: метод. рекомендації до структури та оформлення випускної кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков та ін.]; Міністерство освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2023. – 80 с.

2. Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств: ДСТУ-Н Б В.2.5-80-2015. – [Чинний від 2015–10–28]. – К.: Мінрегіон, 2016. – 83 с. – (Національний стандарт України).

3. 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. – 208 с.

4. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папайка, Л.І. Несен, за ред. Г.Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро : НГУ, 2016. – 600 с.

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

6. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання : навч. посіб. / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, О. А. Козловський [та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2019. – 272 с.

7. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О. І. Соловей, В. П. Розен, П. Г. Плешков та ін.]; Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Черкаси: Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.

8. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України. – Київ : 2017. – 617 с.

9. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення ДБН В.2.5-28:2018. – [Чинний від 2019–02–28]. – К.: Мінрегіон, 2018. – 83 с. – (Державні Будівельні Норми).

10. Керівництво з проектування систем частотного керування. Каталог продукції VLT AQUA Drive FC 202. – Danfoss Drives, 2024. – 145 с.

11. Шкрабець Ф.П. Електропостачання: навч. посіб. / Ф.П.Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с.

						Арк.