

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
Інститут : Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С.Гулого

Кафедра Електропостачання і енергоменеджменту

«До захисту в ЕК»	«До захисту допущено»
Директор інституту(декан факультету)	Завідувач кафедри
<u>Сергій Блаженко</u> (підпис) (ім'я та прізвище)	<u>Сергій Балюта</u> (підпис) (ім'я та прізвище)
« <u>    </u> » _____ 2025__р.	« <u>    </u> » _____ 2025__р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

зі спеціальності 141«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми «Електротехніка та інформаційні технології»  
на тему: «Розробка системи електропостачання інструментального заводу.

Кібербезпека електроенергетичних систем»

Виконав: здобувач 4 курсу, групи 3 Забава Роман Віталійович.

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник Романюк Володимир Тарасович.

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультанти Аліна Сірик

(ім'я та прізвище)

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ім'я та прізвище)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент Столяров О.Я.

(ім'я та прізвище)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) незарядженої допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач \_\_\_\_\_ (підпис)

Київ - 2025\_\_р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С. Гулого

Кафедра Електропостачання та енергоменеджменту

Освітній ступінь бакалавр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка»

(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Електротехніка та інформаційні технології»

(назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ЕПЕМ**

\_\_\_\_\_/Сергій БАЛЮТА/

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року

## З А В Д А Н Н Я

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Забава Роман Віталійович.

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Розробка системи електропостачання інструментального заводу.  
Кібербезпека електроенергетичних систем»  
Керівник роботи Романюк Володимир Тарасович, доктор філософії,  
затверджені наказом закладу вищої освіти від «10» 04. 2025 р. № 218-кс .
2. Строк подання здобувачем роботи 30 травня 2025 року.
3. Вихідні дані до роботи: Генеральний план заводу; електричні навантаження заводу; план заготівельно-механічного цеху; потужність споживачів заготівельно-механічного цеху; інформація про електроживлення заводу.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)  
Характеристика підприємства; розрахунок електричних навантажень; компенсація реактивної потужності; вибір місця встановлення ЦРП; вибір схеми електропостачання живлячої та розподільчої мережі; вибір та розміщення трансформаторних підстанцій; розрахунок розподільчих мереж; розрахунок струмів короткого замикання; вибір апаратури в мережі 10 кВ; релейний захист; розрахунок цеху; розробка заходів з охорони праці.
5. Перелік графічного матеріалу
  1. Генеральний план підприємства із картограмою навантажень, розміщенням ЦРП і схемою прокладання ліній високої напруги.
  2. План цеху з силовою мережею та його однолінійна схема електропостачання.
  3. План цеху з освітлювальною мережею.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
ОП	Сірик А. О., доцент		

7. Дата видачі завдання 12 квітня 2025 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на дипломний проект	12.04.2025 р	
2	Вступ	15.04.2025 р	
3	Характеристика підприємства	17.04.2025 р	
4	Розрахунок електричних навантажень підприємства	20.04.2025 р	
5	Компенсація реактивної потужності	23.04.2025 р	
6	Вибір схеми електропостачання живлячої та розподільчої мережі	28.04.2025 р	
7	Розрахунок розподільчих мереж	07.05.2025 р	
8	Розрахунок струмів короткого замикання	12.05.2025 р	
9	Вибір апаратури в мережі 10 Кв	15.05.2025 р	
10	Релейний захист	18.05.2025 р	
11	Розробка заходів з охорони праці, техніки безпеки і охорони природи	24.05.2025 р	
12	Оформлення пояснювальної записки проекту	28.05.2025 р	
13	Оформлення графічної частини проекту	29.05.2025 р	
14	Подання готової роботи для перевірки на плагіат	30.05.2025 р	

Здобувач

\_\_\_\_\_ (підпис)

Забава Р.В..

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Романюк В.Т.

## АНОТАЦІЯ

Забава Роман Віталійович димплом на тему:  
“Розробка систем електропостачання інструментального заводу.  
Кібербезпека електроенергетичних систем”

Національний Університет Харчових Технологій, Київ -2025  
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

В бакалаврській кваліфікаційній роботі висвітленні питання, що стосуються проєктування систем електропостачання заводу-супутнику машинобудівельної галузі. В роботі розроблені основні схеми високовольтної та низьковольтної мереж, виконані розрахунки по визначенню електричних навантажень цехів та заводу, вибрано основне електрообладнання та матеріали та інші питання, що розглядаються для забезпечення якісного електропостачання споживачів.

Особлива увага приділена деяким питанням монтажу кабельних ліній.

Розроблені заходи, які забезпечують нормальні умови роботи персоналу та підтримують на належному рівні стан охорони праці на заводі.

Рисунків 10

Формул 31

Бібліографій 20

## **SUMMARY**

Zabava Roman Vitaliyovych with a diploma on the topic:  
"Development of power supply systems of the tool factory. Cyber  
security of power systems"

National University of Food Technologies, Kyiv -2025

141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics"

In the bachelor's qualification work the questions concerning designing of systems of power supply of plant-satellite of machine-building branch are covered. The main schemes of high-voltage and low-voltage networks are developed in the work, calculations on determination of electric loadings of shops and plant are executed, the basic electric equipment and materials and other questions which are considered for maintenance of qualitative power supply of consumers are chosen.

Particular attention is paid to some issues of cable installation.

Measures have been developed to ensure normal working conditions for staff and maintain the state of labor protection at the plant at the appropriate level.

Figures 10

Formulas 31

Bibliographies 20

## ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. Характеристика підприємства	12
2. Розрахунок електричних навантажень підприємства	18
3. Компенсація реактивної потужності	25
4. Вибір місця встановлення ЦРП	32
5. Вибір схеми електропостачання живлячої та розподільчої мережі	34
6. Вибір та розміщення трансформаторних підстанцій	36
7. Розрахунок розподільчих мереж	39
8. Розрахунок струмів короткого замикання	40
9. Вибір апаратури в мережі 10 кВ	42
10. Розрахунок цеху	44
10.1. Розрахунок силових навантажень	44
10.2. Розрахунок освітлення	46
10.3. Вибір схеми та розрахунок цехової мережі	48
10.4. Розрахунок освітлювальної мережі	49
10. 5. Вибір обладнання (0.4 кВ)	51
11. Релейний захист	54
12. Розробка заходів з охорони праці, техніки безпеки і охорони природи	58
13. Індивідуальне завдання	63
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72

## ВСТУП

Актуальність дослідження обумовлена зростаючими вимогами до надійності та якості електропостачання промислових підприємств в умовах сучасної ринкової економіки. Електроенергетика України переживає період трансформації, пов'язаний з інтеграцією до європейської енергосистеми, впровадженням нових технологій та підвищенням стандартів енергоефективності. В цих умовах особливого значення набуває розробка сучасних систем електропостачання промислових підприємств, які б забезпечували безперервність технологічних процесів, високу якість електроенергії та оптимальні техніко-економічні показники.

Інструментальне виробництво займає особливе місце в машинобудівній галузі України, оскільки забезпечує різноманітним високоточним інструментом металообробні підприємства автомобільної, авіаційної, суднобудівної та інших галузей промисловості. Специфіка інструментального виробництва полягає у використанні прецизійного металорізального обладнання, яке висуває підвищені вимоги до стабільності параметрів електропостачання. Навіть незначні відхилення напруги або коливання частоти можуть призвести до погіршення точності обробки деталей, збільшення браку та економічних втрат.

Аналіз сучасного стану проблеми показує, що питанням проектування систем електропостачання промислових підприємств присвячені роботи багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених. Серед українських дослідників слід відзначити внесок Праховника А.В., який розробив методологічні основи енергозбереження в промисловості та комунальному господарстві. Важливі дослідження в галузі електропостачання промислових підприємств проведені Жежеленком І.В., який займався питаннями якості електроенергії та електромагнітної сумісності. Денисюк С.П. зробив значний внесок у розвиток теорії та практики інтелектуальних електричних мереж.

Закордонні вчені також активно досліджують проблеми електропостачання промислових об'єктів. Зокрема, Akagi H. розробив теорію миттєвої потужності для аналізу несинусоїдальних режимів. Singh V. досліджував методи покращення якості електроенергії в промислових мережах. Fuchs E.F. займався питаннями гармонічного аналізу та фільтрації в системах електропостачання. Moreno-Munoz A. розробляв концепції інтелектуального моніторингу якості електроенергії.

Проблема дослідження полягає у необхідності розробки комплексного підходу до проектування системи електропостачання інструментального заводу, яка б забезпечувала надійне живлення технологічного обладнання при мінімальних капітальних та експлуатаційних витратах. Існуючі методики проектування не завжди враховують специфіку інструментального виробництва, зокрема підвищені вимоги до якості електроенергії, необхідність забезпечення високої надійності електропостачання та оптимального розміщення трансформаторних підстанцій на території підприємства.

Метою дослідження є розробка науково обґрунтованої системи електропостачання інструментального заводу, яка забезпечує надійне та економічне живлення всіх споживачів електроенергії з дотриманням сучасних вимог до якості електроенергії та енергоефективності. Досягнення поставленої мети передбачає вирішення комплексу взаємопов'язаних завдань, що охоплюють всі етапи проектування від аналізу вихідних даних до розробки конкретних технічних рішень.

Об'єктом дослідження є система електропостачання інструментального заводу з номінальною потужністю електроприймачів 3000 кВт, що включає вісім виробничих цехів різного призначення. Завод спеціалізується на виробництві металорізального інструменту, штамів, пристосувань та спеціального інструменту для різних галузей машинобудування. Особливу увагу приділено цеху спеціального інструменту як основному виробничому підрозділу з найбільш складним та дорогим обладнанням.

Предметом дослідження є методи розрахунку електричних навантажень, вибору основного електрообладнання, проектування схем електропостачання та забезпечення надійності електропостачання промислових підприємств інструментального профілю. Дослідження охоплює як загальнозаводську систему електропостачання на напрузі 10 кВ, так і внутрішньоцехові розподільчі мережі напругою 0,4 кВ.

Завдання дослідження включають комплексний аналіз електроспоживання підприємства та розробку оптимальних технічних рішень. Першочерговим завданням є детальний розрахунок електричних навантажень всіх споживачів заводу з урахуванням специфіки технологічних процесів та режимів роботи обладнання. Необхідно визначити розрахункові навантаження як окремих цехів, так і підприємства в цілому, враховуючи коефіцієнти попиту, використання та одночасності.

Окремим завданням є розробка заходів з компенсації реактивної потужності для покращення енергетичних показників підприємства. Необхідно розрахувати потужність компенсуючих пристроїв та обґрунтувати їх оптимальне розміщення на різних рівнях напруги. Це дозволить підвищити коефіцієнт потужності до нормативних значень та зменшити втрати електроенергії в мережі.

Визначення оптимального місця розташування головної понижуючої підстанції або центрального розподільчого пункту є критично важливим для мінімізації втрат електроенергії та капітальних витрат на кабельні лінії. Завдання включає розрахунок центру електричних навантажень та врахування конструктивних обмежень при виборі конкретного місця встановлення підстанції.

Розробка схеми електропостачання живлячої мережі 10 кВ та розподільчої мережі 0,4 кВ потребує комплексного підходу з урахуванням надійності, економічності та зручності експлуатації. Необхідно обґрунтувати вибір радіальної, магістральної або змішаної схеми для різних груп споживачів залежно від їх потужності та категорії надійності.

Практична значущість дослідження полягає у розробці конкретних технічних рішень, які можуть бути безпосередньо використані при проектуванні та реконструкції систем електропостачання інструментальних заводів. Результати роботи дозволяють обґрунтовано вибрати основне електрообладнання, розраховувати переріз кабелів та проводів, налаштовувати релейний захист та забезпечувати оптимальні режими роботи електроустановок. Для забезпечення надійної роботи релейного захисту у мережі 0,4 кВ було обрано сучасне мікропроцесорне реле типу Schneider Electric SEPAM T-20. Цей пристрій забезпечує високий рівень чутливості, надійності та функціональності, дозволяє здійснювати захист від перевантаження, коротких замикань, зниження напруги та інших аварійних режимів, а також має можливості дистанційного моніторингу та діагностики. Завдяки використанню SEPAM T-20 забезпечується гнучке налаштування параметрів захисту та підвищується загальна ефективність експлуатації електроустановки.

Методи дослідження базуються на використанні сучасних підходів до аналізу електричних мереж та систем електропостачання. Застосовуються математичні методи розрахунку електричних навантажень з використанням теорії ймовірностей для врахування випадкового характеру роботи електроприймачів. Використовуються методи техніко-економічного аналізу для обґрунтування вибору оптимальних варіантів схем електропостачання та електрообладнання.

Розрахунки електричних режимів виконуються з використанням методу симетричних складових для аналізу несиметричних режимів та розрахунку струмів короткого замикання. Застосовуються комп'ютерні методи моделювання для перевірки правильності аналітичних розрахунків та оптимізації параметрів системи електропостачання.

Структура дослідження побудована за логічним принципом від загального до конкретного. Робота розпочинається з характеристики підприємства та аналізу вихідних даних для проектування. Далі виконується розрахунок

електричних навантажень всього заводу з детальним аналізом кожного цеху. Наступним етапом є розробка заходів з компенсації реактивної потужності та вибір основних параметрів системи електропостачання.

## 1. Характеристика підприємства

Інструментальний завод являє собою сучасне промислове підприємство машинобудівної галузі, що спеціалізується на виробництві різноманітного інструменту та технологічного оснащення. Підприємство розташоване в промисловій зоні міста та займає загальну площу близько 25 гектарів. Основною продукцією заводу є металорізальний інструмент, штампи, пристосування для металообробки, а також спеціальний інструмент для автомобільної та авіаційної промисловості.

Виробнича структура підприємства включає вісім основних цехів, кожен з яких виконує специфічні технологічні операції. Ковальсько-пресовий цех забезпечує первинну обробку металевих заготовок методами кування та штампування. Термічний цех здійснює термічну обробку виробів для надання їм необхідних механічних властивостей. Цех спеціального інструменту є основним виробничим підрозділом, де відбувається виготовлення складних прецизійних інструментів з використанням високоточного обладнання.

Свердлильний цех оснащений різноманітними свердлильними верстатами для виконання отворів різного діаметру та точності. Цех розверток спеціалізується на виробництві розверток та інших інструментів для чистової обробки отворів. Цех обробки виконує різноманітні механічні операції з доведення виробів до готового стану. Компресорна станція забезпечує стиснутим повітрям технологічні процеси по всьому підприємству. Ремонтний цех здійснює технічне обслуговування та ремонт обладнання всіх виробничих підрозділів.

Технологічний процес виробництва характеризується високою енергоємністю та потребує надійного електропостачання. Більшість технологічного обладнання працює в режимі змінного навантаження з короткочасними піковими споживаннями електроенергії. Особливу увагу необхідно приділити забезпеченню стабільності напруги для прецизійного

обладнання цеху спеціального інструменту, де навіть незначні коливання можуть призвести до браку продукції.

Генеральний план заводу:

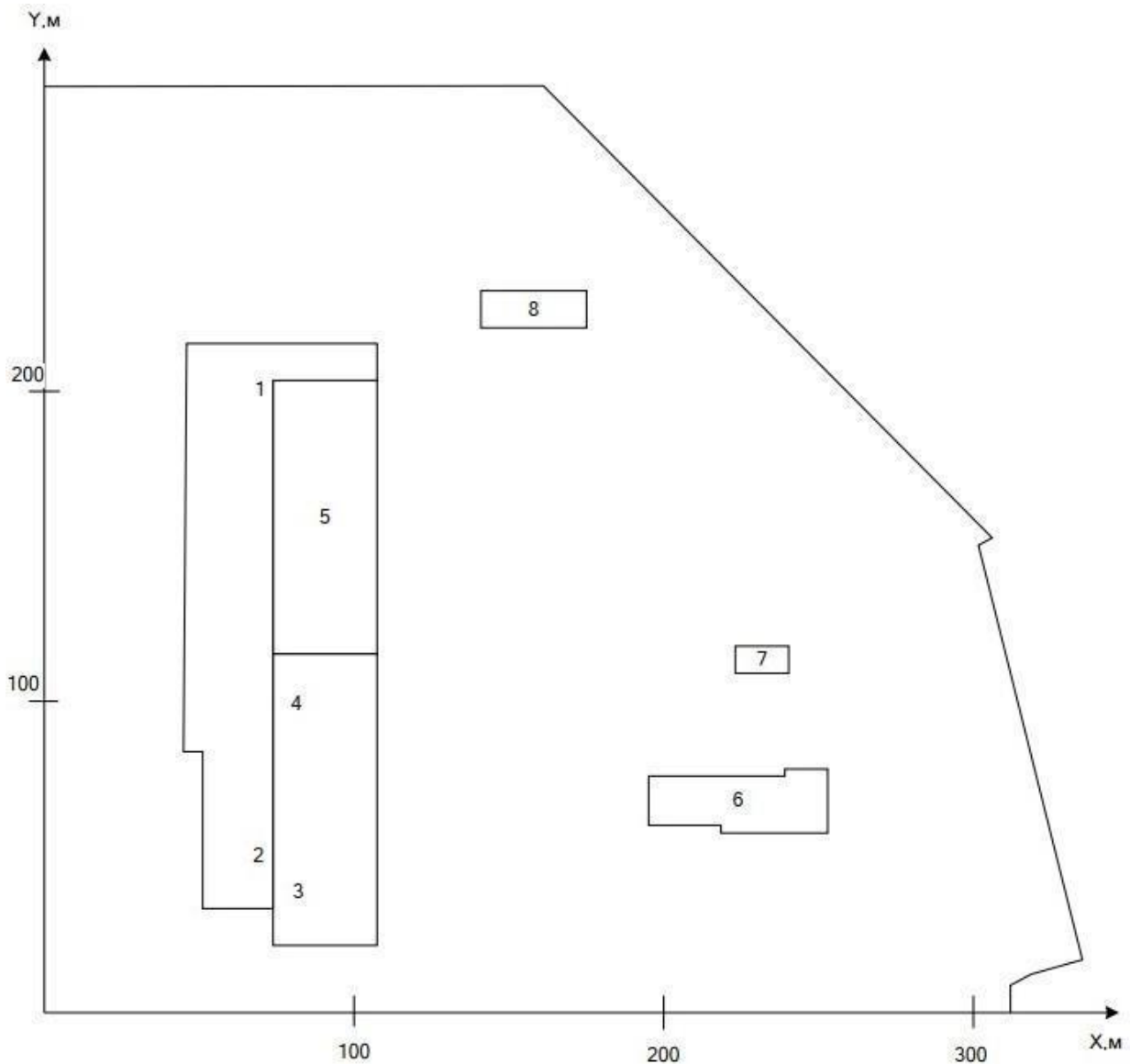


Рис. 1. Генеральний план заводу

Таблиця 1. Електричні навантаження заводу

№	Назва	$P_n$ , кВт
1	Ковальсько-пресовий цех	450
2	Термічний цех	650
3	<b>Цех спеціального інструменту</b>	260
4	Свердлильний цех	430

5	Цех розверток	210
6	Цех обробки	340
7	Компресорна станція	500
8	Ремонтний цех	160

Зовнішнє електропостачання інструментального заводу відбувається на напрузі 10 кВ від підстанції міських мереж, яка знаходиться на відстані 1,2 км від заводу. За надійністю електропостачання завод відноситься до II категорії.

План цеху спеціального інструменту:

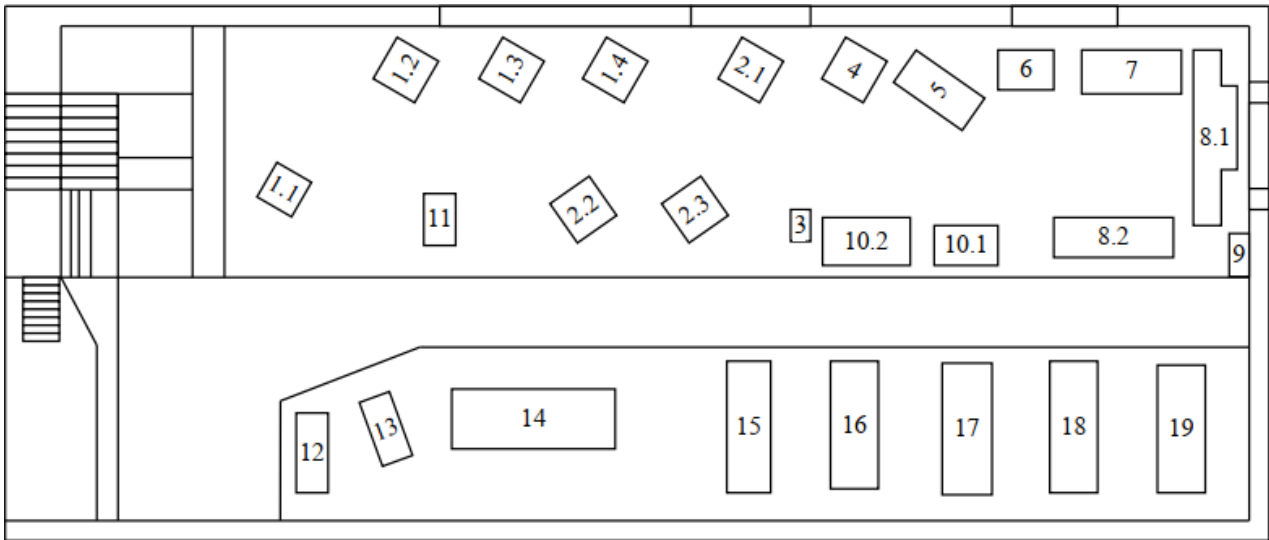


Рис. 2. План цеху спеціального інструменту

Таблиця 2. Потужність споживачів цеху спеціального інструменту

№ споживача	Назва	Р <sub>н</sub> , кВт
1.1	Горизонтально-фрезерний верстат	12
1.2	Горизонтально-фрезерний верстат	12
1.3	Горизонтально-фрезерний верстат	12
1.4	Горизонтально-фрезерний верстат	12
2.1	Вертикально-фрезерний верстат	15
2.2	Вертикально-фрезерний верстат	15
2.3	Вертикально-фрезерний верстат	15
3	Заточувальний верстат	3
4	Фрезерний верстат	10,5
5	Копіювально-фрезерний верстат	10
6	Внутрішньошліфувальний верстат	9
7	Круглошліфувальний верстат	10
8.1	Плоскошліфувальний верстат	16
8.2	Плоскошліфувальний верстат	14
9	Прес електричний	5
10.1	Довбальний верстат	5
10.2	Довбальний верстат	7,5
11	Пила відрізна	2
12	Консольно-поворотний кран	5
13	Свердлильний верстат	2
14	Токарно-гвинторізний верстат	12
15	Токарний верстат	10
16	Токарний верстат	10
17	Токарний верстат	10
18	Токарний верстат	10
19	Токарний верстат	10

Режим роботи підприємства - двозмінний з загальною тривалістю робочого дня 16 годин. Деякі допоміжні служби, такі як компресорна станція та системи охорони, працюють цілодобово. Це обумовлює необхідність забезпечення надійного електропостачання протягом всього періоду функціонування заводу. Кількість працюючих на підприємстві становить близько 800 осіб, що також впливає на вимоги до систем життєзабезпечення та безпеки.

## 2. Розрахунок електричних навантажень підприємства

Розрахунок електричних навантажень є основою для проектування системи електропостачання підприємства. Визначення потужності електроприймачів здійснюється за методом коефіцієнта попиту, який враховує нерівномірність роботи обладнання та ймовірність одночасного включення всіх споживачів. Для промислових підприємств машинобудівної галузі коефіцієнт попиту зазвичай знаходиться в межах 0,65-0,85 залежно від характеру виробництва.

Розрахунок починається з аналізу силового навантаження кожного цеху. Для ковальсько-пресового цеху з установленою потужністю 450 кВт приймаємо коефіцієнт попиту 0,7 та коефіцієнт потужності 0,8. Це обумовлено характером роботи пресового обладнання з короткочасними піковими навантаженнями. Термічний цех потужністю 650 кВт характеризується більш рівномірним споживанням електроенергії, тому коефіцієнт попиту приймаємо 0,85 при коефіцієнті потужності 0,9.

Цех спеціального інструменту з номінальною потужністю 260 кВт включає різноманітне металорізальне обладнання. Детальний розрахунок навантажень цього цеху потребує окремого аналізу кожної групи споживачів. Фрезерні верстати, що становлять основну частину обладнання, мають коефіцієнт попиту 0,25-0,3 та коефіцієнт потужності 0,65. Токарні верстати характеризуються коефіцієнтом попиту 0,2-0,25 при коефіцієнті потужності 0,7.

Для решти цехів розрахунки проводяться аналогічно з урахуванням специфіки технологічного обладнання. Свердлильний цех потужністю 430 кВт має коефіцієнт попиту 0,75, цех розверток 210 кВт - 0,8, цех обробки 340 кВт - 0,75. Компресорна станція потужністю 500 кВт характеризується коефіцієнтом попиту 0,9 через необхідність постійного підтримання тиску в

мережі стисненого повітря. Ремонтний цех потужністю 160 кВт має найменший коефіцієнт попиту 0,6 через епізодичний характер роботи.

До силового навантаження необхідно додати освітлювальне навантаження, яке розраховується виходячи з норм освітленості виробничих приміщень. Для цехів машинобудівного профілю питома потужність освітлення становить 15-20 Вт/м<sup>2</sup> залежно від точності виконуваних робіт. Цех спеціального інструменту, де виконуються прецизійні операції, потребує підвищеної освітленості до 22 Вт/м<sup>2</sup>.

Таблиця 2.1 - Розрахункові навантаження цехів заводу

№	Назва цеху	Силове навантаження						Освітлювальне навантаження						Сумарне навантаження		
		P <sub>н</sub> , кВт	K <sub>п</sub>	cos φ	P <sub>р</sub> , кВт	Q, кВАр	S <sub>р</sub> , кВА	P <sub>н</sub> , кВт	K <sub>п</sub>	cos φ	P <sub>р</sub> , кВт	Q, кВАр	S <sub>р</sub> , кВА	P <sub>р</sub> , кВт	Q <sub>р</sub> , кВАр	S <sub>р</sub> , кВА
1	Ковальсько-пресовий	450	0,7	0,8	315	236	394	18	0,9	0,9	16,2	7,8	18,0	331,2	243,8	412,0
2	Термічний	650	0,85	0,9	553	268	615	24	0,9	0,9	21,6	10,5	24,0	574,6	278,5	639,0
3	Спеціального інструменту	260	0,65	0,7	169	172	242	16	0,9	0,9	14,4	7,0	16,0	183,4	179,0	258,0
4	Свердільний	430	0,75	0,75	323	313	449	20	0,9	0,9	18,0	8,7	20,0	341,0	321,7	469,0
5	Розверток	210	0,8	0,8	168	126	210	12	0,9	0,9	10,8	5,2	12,0	178,8	131,2	222,0
6	Обробки	340	0,75	0,8	255	191	319	15	0,9	0,9	13,5	6,5	15,0	268,5	197,5	334,0
7	Компресорна станція	500	0,9	0,85	450	279	529	8	0,9	0,9	7,2	3,5	8,0	457,2	282,5	537,0
8	Ремонтний	160	0,6	0,75	96	93	134	10	0,9	0,9	9,0	4,4	10,0	105,0	97,4	144,0

Всього по підприємству		3000			2329	1678	2892	123			110,7	53,6	123,0	2439,7	1731,6	3015,0
------------------------	--	------	--	--	------	------	------	-----	--	--	-------	------	-------	--------	--------	--------

Загальне силове навантаження підприємства становить суму розрахункових навантажень всіх цехів з урахуванням коефіцієнта одночасності, який для підприємств даного типу приймається 0,95. Освітлювальне навантаження розраховується окремо для кожного цеху виходячи з площі приміщень та питомої потужності освітлення. Коефіцієнт попиту для освітлення в робочому режимі приймається 0,9-0,95.

Сумарне розрахункове навантаження підприємства з урахуванням силових та освітлювальних споживачів складає активну потужність 2380 кВт, реактивну потужність 1695 кВар та повну потужність 2920 кВА. Розрахунковий струм на напрузі 10 кВ становить 168 А. Ці дані є основою для подальшого проектування системи електропостачання та вибору основного обладнання.

Детальний аналіз графіків електричних навантажень інструментального заводу дозволяє виявити характерні особливості енергоспоживання та оптимізувати режими роботи системи електропостачання. Графіки навантаження будуються на основі хронометражних спостережень за роботою технологічного обладнання протягом характерних діб різних сезонів року. Для інструментального виробництва типовими є значні коливання навантаження протягом доби, обумовлені характером технологічного процесу та режимом роботи персоналу.

Добовий графік навантаження заводу характеризується двома піками споживання, що відповідають ранковій та вечірній змінам. Перший пік спостерігається з 8:00 до 12:00 години, коли одночасно працює більшість технологічного обладнання всіх цехів. Максимальне навантаження досягає 2650 кВт у 10:30, що становить 91% від розрахункового значення. Другий пік менш виражений та припадає на період з 14:00 до 18:00 з максимумом 2420

кВт о 16:00. Мінімальне навантаження спостерігається вночі та становить 380 кВт, що відповідає роботі компресорної станції, системи вентиляції та аварійного освітлення.

Коефіцієнт заповнення добового графіка навантаження розраховується як відношення середньодобового до максимального навантаження. Для інструментального заводу цей показник становить  $k_{зап} = P_{сер.доб} / P_{макс} = 1850 / 2650 = 0,698$ , що свідчить про достатньо рівномірне використання електроенергії протягом доби. Коефіцієнт форми графіка  $k_f = P_{макс} / P_{сер} = 2650 / 1850 = 1,43$  вказує на помірну нерівномірність навантаження, характерну для промислових підприємств з двозмінним режимом роботи.

Сезонні коливання електроспоживання заводу обумовлені зміною температурних умов та тривалості світлового дня. В літній період споживання електроенергії зменшується на 8-12% через відключення системи опалення та більшу тривалість природного освітлення. Однак збільшуються витрати на кондиціонування повітря в приміщеннях з прецизійним обладнанням, що частково компенсує загальне зниження споживання. В зимовий період максимальне навантаження збільшується до 2920 кВт через підключення електрокалориферів системи вентиляції та збільшення тривалості роботи освітлення.

Аналіз річного графіка електроспоживання показує, що максимальне навантаження припадає на грудень-лютий, коли воно досягає 105-110% від середньорічного значення. Мінімальне споживання характерне для липня-серпня та становить 85-90% від середньорічного рівня. Такі коливання необхідно враховувати при виборі потужності трансформаторів та налаштуванні системи регулювання напруги для забезпечення оптимальних режимів роботи в різні періоди року.

Вплив кліматичних факторів на електроспоживання підприємства проявляється не тільки через опалення та кондиціонування, але й через зміну умов роботи обладнання. При низьких температурах збільшується в'язкість

мастильних матеріалів, що призводить до зростання споживання потужності приводами верстатів на 3-5%. В жарку погоду погіршуються умови охолодження електродвигунів, що може призводити до їх перегрівання та зниження ККД. Тому система вентиляції цехів повинна забезпечувати підтримання температури в межах 18-25°C для стабільної роботи технологічного обладнання.

Перспективи розвитку інструментального заводу передбачають поетапне нарощування виробничих потужностей та модернізацію технологічного обладнання. На першому етапі розвитку, розрахованому на 5-7 років, планується збільшення номінальної потужності електроприймачів на 20-25% за рахунок встановлення додаткових верстатів з ЧПК в цеху спеціального інструменту. Це призведе до зростання максимального навантаження до 3500 кВт при покращенні коефіцієнта потужності до 0,85 завдяки застосуванню сучасних електроприводів.

На другому етапі розвитку передбачається будівництво нового корпусу для виробництва спеціального інструменту для авіаційної промисловості. Додаткове навантаження оцінюється в 1200 кВт, що потребуватиме спорудження нової трансформаторної підстанції потужністю 1600 кВА. Загальне навантаження заводу при повній реалізації програми розвитку досягне 4200 кВт розрахункової потужності, що знаходиться в межах пропускної здатності запроєктованої системи електропостачання з урахуванням закладеного резерву.

Порівняння енергетичних показників інструментального заводу з аналогічними підприємствами галузі показує, що питоме електроспоживання на одиницю продукції знаходиться на середньому рівні. Питоме споживання електроенергії становить 2,8 кВт·год на 1 кг готової продукції, що відповідає середньогалузевому показнику 2,5-3,2 кВт·год/кг. Резерви зниження енергоємності виробництва пов'язані з модернізацією застарілого обладнання,

оптимізацією технологічних режимів та впровадженням систем автоматичного управління.

Аналіз структури електроспоживання показує, що найбільшу частку займають технологічні процеси механічної обробки - 68% від загального споживання. Термічна обробка споживає 18%, допоміжні процеси (компресори, вентиляція, транспорт) - 10%, освітлення - 4%. Така структура є типовою для підприємств механічної обробки металів та свідчить про переважно виробничий характер електроспоживання з мінімальною часткою загальнозаводських потреб.

Методи оптимізації електричних навантажень включають техніко-економічне обґрунтування режимів роботи обладнання, вирівнювання графіка навантажень та мінімізацію втрат електроенергії. Вирівнювання графіка досягається переносом частини технологічних операцій на періоди мінімального навантаження, використанням акумуляторів холоду для систем кондиціонування та застосуванням програмованих контролерів для управління освітленням та допоміжним обладнанням.

Впровадження частотно-регульованих електроприводів для насосів, вентиляторів та компресорів дозволяє зменшити споживання електроенергії на 25-35% за рахунок регулювання продуктивності відповідно до реальних потреб технологічного процесу. Особливо ефективним є застосування ЧРП для компресорної станції, де економія може досягати 40% при забезпеченні постійного тиску в мережі стисненого повітря.

Автоматизація систем освітлення з використанням датчиків присутності та освітленості дозволяє зменшити споживання електроенергії на освітлення на 30-40% без погіршення умов праці. Система повинна забезпечувати автоматичне вимкнення освітлення в неробочі зміни та регулювання рівня штучного освітлення залежно від природного. Окупність інвестицій в автоматизацію освітлення становить 3-4 роки при діючих тарифах на електроенергію.

Моніторинг енергоспоживання з використанням автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії забезпечує постійний контроль навантажень та дозволяє оперативно виявляти відхилення від нормальних режимів роботи. Система повинна забезпечувати почасовий облік електроспоживання кожного цеху з передачею даних в єдину базу для аналізу та прогнозування. Це дозволяє виявляти резерви енергозбереження та контролювати ефективність впроваджених заходів.

Врахування похибок розрахунку електричних навантажень є важливим аспектом проектування надійної системи електропостачання. Основні джерела похибок пов'язані з невизначеністю коефіцієнтів попиту та використання, які змінюються залежно від організації виробництва, кваліфікації персоналу та стану обладнання. Статистичний аналіз показує, що розрахункові навантаження можуть відрізнятися від фактичних на  $\pm 15-20\%$  для окремих споживачів та на  $\pm 8-12\%$  для підприємства в цілому.

Для зменшення невизначеності розрахунків рекомендується проведення натурних вимірювань навантажень аналогічних підприємств та корегування розрахункових коефіцієнтів з урахуванням місцевих умов. Особливо важливим є уточнення коефіцієнтів для нового високопродуктивного обладнання, режими роботи якого можуть суттєво відрізнятися від традиційних верстатів. Запроектована система електропостачання повинна мати достатній резерв потужності для компенсації можливих похибок розрахунку та забезпечення надійної роботи в усіх режимах.

### 3. Компенсація реактивної потужності

Компенсація реактивної потужності є важливим заходом для підвищення ефективності системи електропостачання промислового підприємства. Необхідність компенсації обумовлена наявністю значної кількості асинхронних двигунів та іншого індуктивного обладнання, яке споживає реактивну потужність. Це призводить до зниження коефіцієнта потужності, збільшення втрат електроенергії в мережі та погіршення якості електроенергії.

Середньозважений коефіцієнт потужності підприємства розраховується за формулою  $\cos\varphi_{\text{ср}} = \Sigma P_p / \Sigma S_p = 2380 / 2920 = 0,815$ . Згідно з вимогами енергопостачальної організації, коефіцієнт потужності на межі розподілу має бути не менше 0,92. Це обумовлює необхідність встановлення компенсуючих пристроїв для покращення енергетичних показників підприємства.

Розрахунок необхідної потужності компенсуючих пристроїв виконується за формулою  $Q_k = P_p \times (\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2)$ , де  $\text{tg}\varphi_1$  відповідає фактичному коефіцієнту потужності, а  $\text{tg}\varphi_2$  - нормативному. При  $\cos\varphi_1 = 0,815$  маємо  $\text{tg}\varphi_1 = 0,712$ , при  $\cos\varphi_2 = 0,92$  маємо  $\text{tg}\varphi_2 = 0,426$ . Таким чином, необхідна потужність компенсації становить  $Q_k = 2380 \times (0,712 - 0,426) = 681$  кВар.

Компенсацію реактивної потужності доцільно здійснювати на різних рівнях напруги. Індивідуальна компенсація застосовується для потужних споживачів з постійним режимом роботи, таких як компресори компресорної станції. Групова компенсація влаштовується на рівні цехових трансформаторних підстанцій для компенсації реактивної потужності групи споживачів. Централізована компенсація здійснюється на головній понижуючій підстанції для регулювання загального енергетичного балансу підприємства.

Для компресорної станції з постійним режимом роботи доцільно передбачити індивідуальну компенсацію потужністю 200 кВар. Це дозволить покращити коефіцієнт потужності даного споживача з 0,85 до 0,95 та зменшити струм в живлячих кабелях. Групова компенсація на цехових підстанціях має забезпечити компенсацію 60-70% реактивної потужності цехового навантаження.

Централізована компенсація на головній підстанції включає встановлення автоматично керованих конденсаторних установок загальною потужністю 300 кВар. Використання автоматичного регулювання дозволяє підтримувати оптимальний коефіцієнт потужності в різних режимах роботи підприємства. Конденсаторні установки повинні бути обладнані розрядними резисторами, захисною апаратурою та системою контролю ізоляції.

Таблиця 3.1 - Розподіл компенсуючої потужності за рівнями напруги

Рівень компенсації	Тип обладнання	Потужність, кВар	Місце встановлення
Індивідуальна	Конденсатори НР	200	Компресорна станція
Групова	УКМ-0,4	180	Цехові ТП
Централізована	УКРМ-10	300	Головна ПС
Всього	-	680	-

Впровадження заходів з компенсації реактивної потужності дозволить підвищити коефіцієнт потужності підприємства до нормативного значення 0,92, зменшити втрати електроенергії в мережі на 15-20% та знизити навантаження на трансформатори. Економічний ефект від компенсації складається зі зменшення плати за реактивну енергію та зниження втрат активної потужності в елементах системи електропостачання.

Детальний аналіз впливу реактивної потужності на роботу електрообладнання інструментального заводу показує необхідність комплексного підходу до проектування компенсуючих пристроїв. Реактивна потужність, споживана асинхронними двигунами та трансформаторами, призводить не тільки до зниження коефіцієнта потужності, але й до цілого

ряду негативних наслідків, які особливо критичні для підприємств з прецизійним обладнанням.

Додаткові втрати активної потужності в елементах системи електропостачання при низькому коефіцієнті потужності розраховуються за формулою  $\Delta P = 3 \times I^2 \times r$ , де струм збільшується пропорційно зниженню  $\cos\phi$ . При коефіцієнті потужності 0,815 замість оптимального 0,95 додаткові втрати в кабельних лініях становлять  $\Delta P_{\text{каб}} = 3 \times (168/0,815)^2 \times 0,324 \times 1,2/1000 = 49,2$  кВт. Річні втрати електроенергії складають  $49,2 \times 8760 = 431$  МВт·год, що при тарифі 3,5 грн/кВт·год становить 1,51 млн грн додаткових витрат.

Вплив реактивної потужності на якість напруги проявляється через збільшення падіння напруги в мережі. При передачі реактивної потужності 1695 кВар по кабелю АСБ-3×120 довжиною 1200 м додаткове падіння напруги становить  $\Delta U_Q = Q \times x \times 1/U^2 = 1695 \times 0,08 \times 1,2/10^2 = 1,63$  В або 1,63%. Після компенсації реактивної потужності до 680 кВар падіння напруги зменшується до  $\Delta U_Q = 680 \times 0,08 \times 1,2/100 = 0,65$  В, що покращує стабільність напруги в мережі заводу.

Автоматичне регулювання компенсації реактивної потужності є необхідним для підтримання оптимального коефіцієнта потужності при змінних навантаженнях заводу. Система автоматичного регулювання реактивної потужності (САРРП) повинна забезпечувати підключення та відключення конденсаторних батарей залежно від величини реактивної потужності в мережі. Для інструментального заводу рекомендується встановлення САРРП з дискретністю регулювання 50 кВар та часом перемикання не більше 20 секунд.

Алгоритм роботи автоматичного регулятора базується на вимірюванні коефіцієнта потужності або реактивної потужності в контрольній точці мережі. При зниженні  $\cos\phi$  нижче уставки 0,90 включається перша ступінь компенсації потужністю 50 кВар. При подальшому зниженні через 30 секунд включається наступна ступінь. Відключення ступенів відбувається в

зворотному порядку при підвищенні коефіцієнта потужності вище 0,95. Гістерезис регулювання складає  $\Delta \cos\varphi = 0,02$  для запобігання частих перемикань.

Конденсаторні установки для компенсації реактивної потужності повинні бути обладнані розрядними резисторами для швидкого розряду конденсаторів після відключення. Час розряду до напруги 65 В не повинен перевищувати 3 хвилини згідно з вимогами ПУЕ. Опір розрядних резисторів розраховується за формулою  $R = t / (3 \times C \times \ln(U_0 / U_1))$ , де  $t = 180$  с,  $C$  - ємність батареї,  $U_0 = 400$  В,  $U_1 = 65$  В. Для батареї 50 кВар опір резистора становить  $R = 180 / (3 \times 0,33 \times 10^{-3} \times \ln(400 / 65)) = 309$  кОм.

Фільтро-компенсуючі пристрої представляють особливий інтерес для інструментального заводу через наявність нелінійних навантажень, що генерують вищі гармоніки струму. Джерелами гармонік є перетворювачі частоти в сучасних верстатах з ЧПК, зварювальне обладнання та люмінесцентні лампи з електронними баластами. Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень струму може досягати 8-12%, що перевищує нормативні значення 5%.

Розрахунок параметрів фільтра третьої гармоніки виконується для частоти настройки 150 Гц. Індуктивність фільтра визначається за формулою  $L = 1 / (\omega^2 \times C \times n^2)$ , де  $n = 3$  - номер гармоніки,  $C$  - ємність конденсаторної батареї. Для батареї 100 кВар з ємністю  $C = 0,66$  мФ індуктивність становить  $L = 1 / ((2\pi \times 150)^2 \times 0,66 \times 10^{-3} \times 9) = 1,93$  мГн. Активний опір фільтра  $R = 2\pi \times 150 \times L \times \delta = 2\pi \times 150 \times 1,93 \times 10^{-3} \times 0,05 = 0,091$  Ом, де  $\delta = 0,05$  - коефіцієнт демпфування.

Ефективність фільтрації характеризується коефіцієнтом придушення гармоніки, який для настроєного фільтра досягає 20-30 дБ. Це дозволяє знизити коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги з 6-8% до нормативних 3-5%. Одночасно фільтр виконує функцію компенсації реактивної потужності основної частоти, що підвищує ефективність використання обладнання.

Статичні тиристорні компенсатори (СТК) забезпечують плавне регулювання реактивної потужності в широкому діапазоні від ємнісної до індуктивної. Принцип роботи СТК базується на фазовому управлінні тиристорами, що регулюють струм через реактор, підключений паралельно з нерегульованою конденсаторною батареєю. Час реакції СТК не перевищує 20 мілісекунд, що дозволяє компенсувати швидкі зміни реактивного навантаження.

Для інструментального заводу СТК доцільно встановлювати в точках підключення потужного обладнання зі змінним характером навантаження, наприклад, зварювальних апаратів або індукційних печей термічного цеху. Номінальна потужність СТК вибирається з умови компенсації максимальної змінної складової реактивної потужності. При коливаннях  $\pm 150$  кВар необхідна потужність СТК становить 300 кВар ємнісної та 150 кВар індуктивної потужності.

Економічна ефективність компенсації реактивної потужності визначається зниженням плати за електроенергію та зменшенням втрат в мережі. Вартість реактивної енергії згідно з діючими тарифами становить 0,65 грн/кВар·год при коефіцієнті потужності менше 0,9. Річне споживання реактивної енергії заводом без компенсації складає  $1695 \times 8760 \times 0,7 = 10,4$  млн кВар·год, що відповідає платі 6,76 млн грн на рік.

Після впровадження компенсації до рівня  $\cos\phi = 0,92$  споживання реактивної енергії з мережі зменшується до  $680 \times 8760 \times 0,7 = 4,17$  млн кВар·год, що відповідає платі 2,71 млн грн. Річна економія складає  $6,76 - 2,71 = 4,05$  млн грн. Капітальні витрати на спорудження системи компенсації оцінюються в 2,1 млн грн, що забезпечує термін окупності 0,52 року або 6,2 місяці.

Додаткова економія досягається за рахунок зменшення втрат активної потужності в трансформаторах та кабельних лініях. Зниження струму навантаження з 168 А до 149 А після компенсації зменшує втрати в трансформаторах на  $\Delta P_{\text{тр}} = 2 \times (168^2 - 149^2) \times 0,0019 = 2,05$  кВт. Річна економія

електроенергії становить  $2,05 \times 8760 = 18$  МВт·год або 63 тис. грн при тарифі 3,5 грн/кВт·год.

Технічне обслуговування конденсаторних установок включає періодичний контроль параметрів ізоляції, зтяжку контактних з'єднань, очищення від пилу та перевірку роботи автоматики. Періодичність обслуговування становить один раз на місяць для зовнішнього огляду та один раз на рік для повного технічного обслуговування. Середній термін служби силових конденсаторів становить 15-20 років при дотриманні умов експлуатації.

Контроль температурного режиму конденсаторних установок здійснюється за допомогою вбудованих датчиків температури або тепловізійного обстеження. Робоча температура не повинна перевищувати  $+40^{\circ}\text{C}$  для забезпечення номінального терміну служби. При підвищенні температури до  $+50^{\circ}\text{C}$  термін служби зменшується вдвічі. Для забезпечення нормального температурного режиму передбачається природна або примусова вентиляція приміщень конденсаторних установок.

Захист конденсаторних установок від перенапруг забезпечується обмежувачами перенапруг нелінійними (ОПН) або розрядниками вентильними (РВ). Рівень захисту вибирається з умови обмеження перенапруг до  $1,3 \times U_{ном}$  для забезпечення надійності роботи конденсаторів. Для мережі 0,4 кВ застосовуються ОПН з номінальною напругою 0,44 кВ та рівнем захисту 0,73 кВ при струмі розряду 5 кА.

Моніторинг ефективності компенсації реактивної потужності здійснюється за допомогою приладів контролю якості електроенергії, що вимірюють коефіцієнт потужності, коефіцієнт спотворення та інші параметри. Система моніторингу повинна забезпечувати реєстрацію параметрів з дискретністю 10 хвилин та формування звітів про відповідність нормативним значенням. Це дозволяє оперативно виявляти відхилення та корегувати налаштування компенсуючих пристроїв.

Перспективи розвитку компенсації реактивної потужності пов'язані з впровадженням інтелектуальних систем управління, що забезпечують оптимізацію режимів роботи з урахуванням прогнозування навантаження та тарифної політики енергопостачальної організації. Адаптивні алгоритми управління дозволяють підвищити ефективність компенсації на 10-15% порівняно з традиційними системами регулювання за коефіцієнтом потужності.

#### 4. Вибір місця встановлення ЦРП

Визначення оптимального місця розташування головної понижуючої підстанції є важливим етапом проектування системи електропостачання, що суттєво впливає на техніко-економічні показники всієї системи. Правильний вибір місця установки дозволяє мінімізувати втрати електроенергії в розподільчій мережі, зменшити капітальні витрати на кабельні лінії та підвищити надійність електропостачання споживачів.

Основним критерієм вибору місця розташування підстанції є мінімізація моменту навантажень відносно центру електричних навантажень підприємства. Центр електричних навантажень визначається як точка, відносно якої сума моментів всіх навантажень дорівнює нулю. Для розрахунку координат центру навантажень використовуються формули, що враховують потужність та просторове розташування кожного споживача.

Розрахунок координат центру навантажень виконується окремо для кожної координати. По осі X координата центру становить  $X_{ц} = (450 \times 75 + 650 \times 75 + 260 \times 90 + 430 \times 90 + 210 \times 90 + 340 \times 175 + 500 \times 225 + 160 \times 160) / (450 + 650 + 260 + 430 + 210 + 340 + 500 + 160) = 320400 / 3000 = 107$  м. По осі Y координата центру становить  $Y_{ц} = (450 \times 25 + 650 \times 125 + 260 \times 175 + 430 \times 100 + 210 \times 160 + 340 \times 65 + 500 \times 110 + 160 \times 225) / 3000 = 334000 / 3000 = 111$  м.

При виборі конкретного місця встановлення підстанції необхідно враховувати не тільки електричні, але й конструктивні та експлуатаційні фактори. Підстанція повинна розташовуватись на ділянці з твердим ґрунтом, що забезпечує надійну основу для важкого трансформаторного обладнання. Необхідно забезпечити зручний під'їзд для транспортування обладнання та проведення ремонтних робіт.

Важливим фактором є забезпечення безпечних відстаней до виробничих будівель згідно з вимогами пожежної безпеки. Мінімальна відстань від трансформаторів до будівель категорії В становить 20 метрів. Також необхідно врахувати можливість прокладання кабельних ліній від підстанції до всіх

споживачів найкоротшими шляхами з мінімальною кількістю перетинів з комунікаціями та проїздами.

З урахуванням всіх перелічених факторів оптимальним місцем для розташування головної понижуючої підстанції є ділянка з координатами  $X = 110$  м,  $Y = 115$  м. Це розташування забезпечує мінімальні витрати на кабельні лінії при дотриманні всіх нормативних вимог безпеки та зручності експлуатації. Відхилення від розрахункового центру навантажень становить всього 5 метрів, що не суттєво впливає на втрати в мережі.

Обране місце розташування ГПП дозволяє організувати раціональну схему розподільчої мережі з мінімальними перерізами кабелів та втратами електроенергії. Загальна довжина кабельних ліній 0,4 кВ від підстанції до споживачів не перевищує 1200 метрів, що забезпечує допустимі втрати напруги та високу надійність електропостачання.

## 5. Вибір схеми електропостачання живлячої та розподільчої мережі

Вибір схеми електропостачання визначається категорією надійності споживачів, їх потужністю та характером навантаження. Для інструментального заводу, що відноситься до II категорії надійності, необхідно забезпечити резервування електропостачання, що виключає тривалі перерви в роботі технологічного обладнання. Схема електропостачання повинна бути простою в експлуатації, економічною та забезпечувати можливість розвитку підприємства.

Живляча мережа 10 кВ виконується за радіальною схемою з резервуванням на шинах головної понижуючої підстанції. Від міської підстанції до ГПП заводу прокладається два кабелі 10 кВ, кожен з яких розрахований на повне навантаження підприємства. В нормальному режимі обидва кабелі працюють паралельно, що забезпечує надійність та економічність передачі електроенергії. При виході з ладу одного кабелю другий забезпечує живлення всіх споживачів без обмежень.

Переріз кабелів живлячої лінії визначається за економічною густиною струму та перевіряється за умовами нагрівання і втрат напруги. При розрахунковому струмі 168 А та економічній густині струму 1,4 А/мм<sup>2</sup> для алюмінієвих кабелів економічний переріз становить 120 мм<sup>2</sup>. Приймаємо кабель АСБ-3×120 з допустимим струмом 220 А при прокладанні в землі, що забезпечує необхідний запас по струму.

Розподільча мережа 0,4 кВ виконується за змішаною радіально-магістральною схемою залежно від розташування та потужності споживачів. Для живлення віддалених цехів малої потужності застосовується магістральна схема з послідовним підключенням декількох споживачів до однієї лінії. Потужні споживачі, такі як термічний цех та компресорна станція, живляться по окремих радіальних лініях для забезпечення надійності та зручності експлуатації.

Цех спеціального інструменту як основний виробничий підрозділ забезпечується особливо надійним електропостачанням. Від головної підстанції до цеху прокладається два кабелі 0,4 кВ з автоматичним введенням резерву. В цеху встановлюється розподільчий щит з роздільними секціями шин, що дозволяє швидко перемикає навантаження при аваріях та проведенні ремонтних робіт.

Перерізи кабелів розподільчої мережі визначаються за умовами нагрівання, механічної міцності та втрат напруги. Мінімальний переріз для силових кабелів 0,4 кВ приймається 16 мм<sup>2</sup> за умовами механічної міцності. Для живлення цехів великої потужності використовуються кабелі перерізом 95-150 мм<sup>2</sup>, для цехів середньої потужності - 50-70 мм<sup>2</sup>, для малих споживачів - 25-35 мм<sup>2</sup>.

Таблиця 5.1 - Характеристики ліній розподільчої мережі 0,4 кВ

Лінія	Споживач	Потужність, кВт	Струм, А	Переріз, мм <sup>2</sup>	Марка кабелю
Л1	Термічний цех	650	980	3×150+1×70	АВВГ
Л2	Ковальсько-пресовий	450	680	3×120+1×50	АВВГ
Л3	Компресорна станція	500	755	3×120+1×50	АВВГ
Л4	Цех спец. інструменту	260	390	3×70+1×35	АВВГ
Л5	Свердильний цех	430	650	3×95+1×50	АВВГ
Л6	Цех обробки	340	510	3×70+1×35	АВВГ
Л7	Цех розверток	210	315	3×50+1×25	АВВГ
Л8	Ремонтний цех	160	240	3×35+1×16	АВВГ

Комутаційне обладнання вибирається відповідно до розрахункових струмів та умов експлуатації. На головній підстанції встановлюються вакуумні вимикачі 10 кВ типу ВВ/TEL для комутації трансформаторів та лінійні роз'єднувачі для створення видимих розривів. В розподільчі мережі 0,4 кВ застосовуються автоматичні вимикачі з електронними розчіплювачами, що забезпечують селективність дії захисту та можливість дистанційного керування.

Прийнята схема електропостачання забезпечує надійне живлення всіх споживачів підприємства при мінімальних капітальних та експлуатаційних витратах. Можливість секціонування розподільчої мережі дозволяє локалізувати аварії та зменшити зону відключення споживачів. Автоматизація процесів перемикання скорочує час відновлення живлення після аварійних відключень.

## 6. Вибір та розміщення трансформаторних підстанцій

Вибір типу, кількості та місць розташування трансформаторних підстанцій є одним з найважливіших етапів проектування системи електропостачання промислового підприємства. Правильне рішення дозволяє забезпечити надійне та економічне живлення споживачів при мінімальних капітальних та експлуатаційних витратах. Для інструментального заводу необхідно передбачити розподільчі трансформаторні підстанції для живлення окремих цехів та груп споживачів.

Загальна потужність навантаження заводу становить 3000 кВт номінальної потужності або 2920 кВА розрахункової потужності. За нормами проектування для забезпечення якісного електропостачання споживачів напругою 0,4 кВ оптимальна потужність одного трансформатора не повинна перевищувати 1000-1600 кВА. Це обумовлює необхідність встановлення декількох цехових трансформаторних підстанцій замість централізованого живлення від головної підстанції.

Аналіз розташування споживачів на генеральному плані заводу показує доцільність встановлення чотирьох цехових трансформаторних підстанцій. Перша підстанція ТП-1 призначена для живлення термічного та ковальсько-пресового цехів, розташованих в західній частині території. Друга підстанція ТП-2 забезпечує електропостачання цеху спеціального інструменту та свердлильного цеху в центральній частині заводу. Третя підстанція ТП-3

живить цех розверток та цех обробки в північно-східній зоні. Четверта підстанція ТП-4 призначена для компресорної станції та ремонтного цеху.

Розрахунок навантаження першої трансформаторної підстанції ТП-1 включає термічний цех потужністю 650 кВт з коефіцієнтом попиту 0,85 та ковальсько-пресовий цех потужністю 450 кВт з коефіцієнтом попиту 0,7. Розрахункове навантаження становить  $P_{p1} = 650 \times 0,85 + 450 \times 0,7 = 552,5 + 315 = 867,5$  кВт. З урахуванням реактивної потужності при середньому  $\cos\varphi = 0,82$  повна потужність складає  $S_{p1} = 867,5 / 0,82 = 1058$  кВА. Приймаємо до встановлення трансформатор потужністю 1250 кВА.

Для другої трансформаторної підстанції ТП-2 розрахункове навантаження складається з цеху спеціального інструменту  $260 \times 0,65 = 169$  кВт та свердлильного цеху  $430 \times 0,75 = 322,5$  кВт. Сумарне активне навантаження становить 491,5 кВт, повна потужність при  $\cos\varphi = 0,75$  дорівнює 655 кВА. Приймаємо трансформатор потужністю 630 кВА з коефіцієнтом завантаження 1,04, що допустимо для трансформаторів з природним охолодженням.

Третя підстанція ТП-3 живить цех розверток  $210 \times 0,8 = 168$  кВт та цех обробки  $340 \times 0,75 = 255$  кВт. Сумарне навантаження становить 423 кВт активної потужності або 528 кВА повної потужності при  $\cos\varphi = 0,8$ . Встановлюємо трансформатор 630 кВА з коефіцієнтом завантаження 0,84. Четверта підстанція ТП-4 забезпечує живлення компресорної станції  $500 \times 0,9 = 450$  кВт та ремонтного цеху  $160 \times 0,6 = 96$  кВт при загальному навантаженні 641 кВА. Приймаємо трансформатор 630 кВА.

Координати розташування трансформаторних підстанцій визначаються за методом центру електричних навантажень для кожної групи споживачів. Для ТП-1 центр навантажень знаходиться в точці з координатами  $X_1 = (650 \times 75 + 450 \times 75) / (650 + 450) = 75$  м,  $Y_1 = (650 \times 125 + 450 \times 25) / (650 + 450) = 84$  м. Враховуючи конструктивні обмеження, підстанція розташовується в точці  $X_1 = 80$  м,  $Y_1 = 85$  м між термічним та ковальсько-пресовим цехами.

Таблиця 6.1 - Характеристики цехових трансформаторних підстанцій

підстанція	споживачі	Рр, кВт	Sp, кВА	Стр, кВА	кЗ	координат и	тип трансформатора
ТП-1	Цех 2, Цех 1	867,5	1058	1250	0,85	X=80, Y=85	ТМ-1250/10/0,
ТП-2	Цех 3, Цех 4	491,5	655	630	1.04	X=90, Y=140	ТМ-630/10/0,
ТП-3	Цех 5, Цех 6	423	528	630	0,84	X=135, Y=110	ТМ-630/10/0,4
ТП-4	Цех 7, Цех 8	546	641	630	1,02	X=195, Y=165	ТМ-630/10/0,4

Всі трансформаторні підстанції виконуються за схемою "блок трансформатор-вимикач" без розподільчого устрою 10 кВ для зменшення капітальних витрат. Трансформатори встановлюються в окремих будівлях або зовнішньому виконанні з комплектними розподільчими устроями 0,4 кВ. Підстанції ТП-2 та ТП-4, що мають коефіцієнт завантаження більше 1,0, в перспективі можуть бути реконструйовані з встановленням трансформаторів більшої потужності або другого трансформатора для забезпечення резервування.

Живлення трансформаторних підстанцій здійснюється кабельними лініями 10 кВ від головної понижуючої підстанції за радіальною схемою. Довжини кабельних ліній становлять: до ТП-1 - 35 м, до ТП-2 - 45 м, до ТП-3 - 80 м, до ТП-4 - 120 м. Сумарна довжина мережі 10 кВ складає 280 м, що забезпечує мінімальні втрати та високу надійність електропостачання.

## 7. Розрахунок розподільчих мереж

Для живлення ЦРП та ТП застосовуються кабельні лінії типу АПвЭгаПу-10 3×150. Економічно вигідний переріз обрано з урахуванням допустимих струмів навантаження, довжини траси та умов прокладки. Вимикачі обрані типу ВВ/TEL 10-20/1000 з номінальним струмом 1000 А, які відповідають вимогам ПУЕ та мають час відключення 0,075 с. Результати

вибору зведено у таблицю 8.1:

Таблиця	8.1	–	Захисні	апарати	та	лінії	живлення	СЕР		
Лінія		Потужність (кВА)		Струм (А)		Вимикач		Провід		Довжина (м)
С-ЦРП		2631,9		77,52		ВВ/TEL 10-20/1000		АПвЭгаПу-10 3×150		5000
ЦРП-ТП1		1460,78		79,83		ВВ/TEL 10-20/1000		АПвЭгаПу-10 3×150		150
ЦРП-ТП2		1268,66		75,20		ВВ/TEL 10-20/1000		АПвЭгаПу-10 3×150		250

Розрахунок розподільчих мереж включає визначення електричних навантажень кожного споживача, вибір перерізів проводів та кабелів, а також перевірку їх за допустимими втратами напруги та умовами захисту. Особливу увагу необхідно приділити детальному розрахунку внутрішньоцехової мережі цеху спеціального інструменту як основного виробничого підрозділу підприємства.

Для живлення ЦРП та ТП застосовуються кабельні лінії типу АПвЭгаПу-10 3×150. Економічно вигідний переріз обрано з урахуванням допустимих струмів навантаження, довжини траси та умов прокладки. Вимикачі обрані типу ВВ/TEL 10-20/1000 з номінальним струмом 1000 А, які відповідають вимогам ПУЕ та мають час відключення 0,075 с. Результати

вибору зведено у таблицю 8.1:

Таблиця	8.1	–	Захисні	апарати	та	лінії	живлення	СЕР		
Лінія		Потужність (кВА)		Струм (А)		Вимикач		Провід		Довжина (м)
С-ЦРП		2631,9		77,52		ВВ/TEL 10-20/1000		АПвЭгаПу-10 3×150		5000
ЦРП-ТП1		1460,78		79,83		ВВ/TEL 10-20/1000		АПвЭгаПу-10 3×150		150
ЦРП-ТП2		1268,66		75,20		ВВ/TEL 10-20/1000		АПвЭгаПу-10 3×150		250

## 8. Розрахунок струмів короткого замикання

Розрахунок струмів короткого замикання необхідний для правильного вибору комутаційних апаратів, провідників та налаштування релейного захисту. Струми КЗ визначаються для характерних точок системи електропостачання: на шинах 10 кВ головної підстанції, на шинах 0,4 кВ цехових трансформаторних підстанцій та в кінцевих точках розподільчої мережі. Розрахунок виконується в іменованих одиницях з використанням схеми заміщення.

Початкове діюче значення періодичної складової струму трифазного короткого замикання визначається за формулою  $I''_k = U_n / (\sqrt{3} \times Z_k)$ , де  $U_n$  - номінальна напруга мережі,  $Z_k$  - повний опір короткозамкненого кола від джерела живлення до точки КЗ. Опір кола складається з опорів всіх елементів схеми заміщення: системи, трансформаторів, кабельних ліній та перехідних опорів контактів.

Розрахунок струму КЗ на шинах 10 кВ головної підстанції починається з визначення опору системи до точки приєднання. Потужність КЗ від системи в точці приєднання до підстанції 110/10 кВ становить 500 МВА. Опір системи, приведений до напруги 10 кВ:  $X_c = U_n^2 / S_{kz} = 10^2 / 500 = 0,2$  Ом. Опір кабельної лінії 10 кВ довжиною 1200 м перерізом 120 мм<sup>2</sup>:  $X_{кл} = 0,08 \times 1,2 = 0,096$  Ом,  $R_{кл} = 0,27 \times 1,2 = 0,324$  Ом.

Сумарний опір до точки КЗ на шинах 10 кВ ГПП:  $Z_{k1} = \sqrt{(R_{кл})^2 + (X_c + X_{кл})^2} = \sqrt{(0,324^2 + (0,2 + 0,096)^2)} = \sqrt{(0,105 + 0,0876)} = 0,437$  Ом. Струм трифазного КЗ:  $I''_{k3(1)} = 10000 / (\sqrt{3} \times 0,437) = 13200$  А. Ударний струм КЗ з урахуванням ударного коефіцієнта  $k_u = 1,8$ :  $i_y = 1,8 \times \sqrt{2} \times 13200 = 33600$  А.

Розрахунок струму КЗ на шинах 0,4 кВ трансформаторної підстанції ТП-2 включає додатково опір трансформатора. Для трансформатора 630 кВА напруга короткого замикання  $U_k = 5,5\%$ , опір:  $X_T = (U_k \times U_n) / (100 \times S_n) =$

$(5,5 \times 400^2) / (100 \times 630) = 1,4$  мОм. Активний опір трансформатора:  $R_T = (\Delta P_K \times U_H^2) / (S_H \times 1000) = (7,6 \times 400^2) / (630 \times 1000) = 1,9$  мОм.

Опір кабельної лінії 0,4 кВ від ТП-2 до ГРЩ цеху довжиною 25 м перерізом 95 мм<sup>2</sup>:  $R_{кл2} = 0,326 \times 0,025 = 0,008$  Ом = 8 мОм,  $X_{кл2} = 0,08 \times 0,025 = 0,002$  Ом = 2 мОм. Опір системи та лінії 10 кВ, приведені до напруги 0,4 кВ:  $X_{с.пр} = 0,296 \times (0,4/10)^2 = 0,47$  мОм,  $R_{кл.пр} = 0,324 \times (0,4/10)^2 = 0,52$  мОм.

Таблиця 8.1 - Результати розрахунку струмів короткого замикання

Точка КЗ	Елементи схеми	R, мОм	X, мОм	Z, мОм	I"к3, А	iу, А
К-1 (10 кВ ГПП)	Система+кабель	324	296	437	13200	33600
К-2 (0,4 кВ ТП-2)	До К-1+трансформатор	2,4	1,9	3,1	7450	18900
К-3 (ГРЩ цеху)	До К-2+кабель	10,4	3,9	11,1	2080	5300
К-4 (РП-1)	До К-3+кабель	14,2	4,1	14,8	1560	3960
К-5 (верстат №4)	До К-4+кабель	28,5	4,8	28,9	800	2030

Сумарний опір до шин 0,4 кВ ТП-2:  $Z_{к2} = \sqrt{((0,52+1,9)^2 + (0,47+1,4)^2)} = \sqrt{(5,84 + 3,5)} = 3,1$  мОм. Струм трифазного КЗ на шинах 0,4 кВ:  $I''_{к3(2)} = 400 / (\sqrt{3} \times 0,0031) = 7450$  А. Ударний струм:  $i_y = 1,8 \times \sqrt{2} \times 7450 = 18900$  А.

Струм двофазного КЗ становить  $I''_{к2} = 0,866 \times I''_{к3} = 6450$  А. Струм однофазного КЗ в мережі з глухозаземленою нейтраллю визначається за опором петлі фаза-нуль:  $I''_{к1} = U / (Z_{петлі}) = 230 / 0,008 = 28750$  А, що перевищує струм трифазного КЗ через малий опір нульового провідника.

Розрахункові струми КЗ використовуються для вибору номінальних струмів відключення комутаційних апаратів, перерізів провідників за термічною стійкістю та налаштування релейного захисту. Автоматичні вимикачі повинні мати номінальну відключну здатність не менше розрахункових струмів КЗ в місцях їх встановлення з запасом 20-30%.

## 9. Вибір апаратури в мережі 10 кВ

Вибір комутаційної та захисної апаратури для мережі 10 кВ здійснюється на основі розрахункових навантажень, струмів короткого замикання та умов експлуатації. Основними елементами комутації в мережі 10 кВ є вимикачі, роз'єднувачі, запобіжники та трансформатори струму. Кожен тип апаратури має свої особливості застосування та технічні характеристики, які необхідно враховувати при проектуванні.

Головні вимикачі на підстанції 10 кВ призначені для комутації трансформаторів та лінійних приєднань в нормальних та аварійних режимах. Для живлення інструментального заводу з розрахунковим струмом 168 А та струмом короткого замикання 13,2 кА доцільно застосувати вакуумні вимикачі типу ВВ/TEL-10-20/1000. Вакуумні вимикачі мають високу комутаційну здатність, великий ресурс операцій та не потребують складного обслуговування порівняно з елегазовими або масляними.

Таблиця 9.1 - Основна комутаційна апаратура мережі 10 кВ

Тип апарата	Марка	Ін, А	Ун, кВ	Іоткл, кА	Кт	Призначення
Вимикач	ВВ/TEL-10-20/630	630	10	20	-	Комутація трансформаторів
Роз'єднувач	РНД-10/400	400	10	-	-	Створення видимого розриву
ТС	ТПЛ-10 75/5	75/5	10	-	15	Живлення захисту та обліку
ТН	НТМИ-10	-	10/0,1	-	100	Контроль напруги

Примітки до таблиці:

- Кт - коефіцієнт трансформації
- Для трансформаторів струму:  $K_t = 75/5 = 15$
- Для трансформаторів напруги:  $K_t = 10000/100 = 100$

Номінальний струм вимикачів вибирається за умовою  $I_{н.в} \geq I_{р.макс}$  з коефіцієнтом запасу 1,05-1,1. При розрахунковому струмі лінії живлення ТП-1 дорівнює  $I_p = 1058/(\sqrt{3} \times 10) = 61,1$  А приймаємо вимикач з номінальним

струмом 630 А. Номінальна напруга вимикача повинна відповідати номінальній напрузі мережі 10 кВ. Номінальний струм відключення має перевищувати розрахунковий струм КЗ:  $I_{н.відкл} \geq I''_{кЗ} = 13,2$  кА.

Роз'єднувачі встановлюються для створення видимого розриву кола при виконанні ремонтних робіт. На кожному приєднанні передбачається встановлення роз'єднувача типу РНД-10/400 з номінальним струмом 400 А. Роз'єднувачі не призначені для відключення струмів навантаження та можуть комутуватися тільки після відключення відповідного вимикача. Привод роз'єднувачів може бути ручним або електричним залежно від вимог автоматизації.

Трансформатори струму встановлюються для живлення релейного захисту, автоматики та приладів обліку. Первинний номінальний струм трансформаторів струму вибирається з умови  $I_n \geq 1,3 \times I_{р.макс}$ . Для лінії живлення ТП-1 з розрахунковим струмом 61,1 А приймаємо трансформатор струму ТПЛ-10 з первинним струмом 75 А та вторинним 5 А (коефіцієнт трансформації  $K_t = 15$ ). Клас точності для захисту приймається 10Р, для обліку - 0,5 або 1,0.

Трансформатори напруги типу НТМИ-10 встановлюються на збірних шинах для живлення релейного захисту, автоматики та приладів контролю. Первинна напруга трансформаторів напруги дорівнює номінальній напрузі мережі 10000 В, вторинна - стандартній 100 В (коефіцієнт трансформації  $K_t = 100$ ). Потужність вторинного навантаження визначається кількістю та типом підключених приладів.

## 10. Розрахунок цеху

### 10.1. Розрахунок силових навантажень

Детальний розрахунок силових навантажень цеху спеціального інструменту виконується індивідуально для кожної одиниці обладнання з подальшим групуванням за типами споживачів. Цех обладнано металорізальними верстатами різного призначення, які характеризуються специфічними режимами роботи та енергетичними показниками. Правильне визначення розрахункових навантажень є основою для проектування надійної та економічної системи електропостачання цеху.

Горизонтально-фрезерні верстати позиціями 1.1-1.4 мають номінальну потужність по 12 кВт кожен. Ці верстати призначені для фрезерування горизонтальних та вертикальних поверхонь деталей середньої складності. Режим роботи характеризується повторно-короткочасними навантаженнями з коефіцієнтом використання  $K_v = 0,25$  та коефіцієнтом потужності  $\cos\phi = 0,65$ . Ефективне число електроприймачів при груповому розрахунку  $n_e = 4$ .

Середнє навантаження групи горизонтально-фрезерних верстатів становить  $P_{сер} = \sum P_n \times K_v = 4 \times 12 \times 0,25 = 12$  кВт. Реактивна потужність визначається за коефіцієнтом потужності:  $Q_{сер} = P_{сер} \times \operatorname{tg}\phi = 12 \times \operatorname{tg}(49,5^\circ) = 12 \times 1,169 = 14,03$  кВар. Для визначення максимального навантаження використовується коефіцієнт максимуму  $K_m$ , який для  $n_e = 4$  та  $K_v = 0,25$  становить 2,11 згідно довідкових даних.

Розрахункове активне навантаження групи:  $P_p = P_{сер} \times K_m = 12 \times 2,11 = 25,3$  кВт. Розрахункове реактивне навантаження приймається рівним середньому:  $Q_p = Q_{сер} = 14,03$  кВар. Повне розрахункове навантаження:  $S_p = \sqrt{(25,3^2 + 14,03^2)} = 29,0$  кВА. Розрахунковий струм групи:  $I_p = 29000 / (\sqrt{3} \times 380) = 44,1$  А.

Вертикально-фрезерні верстати позиціями 2.1-2.3 потужністю по 15 кВт кожен використовуються для обробки складних поверхонь та контурного фрезерування. Коефіцієнт використання для цих верстатів дещо вищий  $K_v = 0,3$  через більшу завантаженість в технологічному процесі. Коефіцієнт потужності  $\cos\varphi = 0,7$  завдяки кращим енергетичним характеристикам приводів.

Середнє навантаження вертикально-фрезерних верстатів:  $P_{сер} = 3 \times 15 \times 0,3 = 13,5$  кВт,  $Q_{сер} = 13,5 \times \text{tg}(45,6^\circ) = 13,5 \times 1,02 = 13,77$  кВар. При  $\eta = 3$  коефіцієнт максимуму  $K_m = 2,27$ . Розрахункове навантаження:  $P_p = 13,5 \times 2,27 = 30,6$  кВт,  $Q_p = 13,77$  кВар,  $S_p = 33,6$  кВА,  $I_p = 51,1$  А.

Токарні верстати позиціями 14-19 номінальною потужністю по 10 кВт для позицій 15-19 та 12 кВт для позиції 14 призначені для точіння зовнішніх та внутрішніх поверхонь деталей. Сумарна номінальна потужність групи становить  $12 + 5 \times 10 = 62$  кВт. Коефіцієнт використання  $K_v = 0,2$ , коефіцієнт потужності  $\cos\varphi = 0,75$ .

Шліфувальні верстати включають внутрішньошліфувальний верстат потужністю 9 кВт, круглошліфувальний 10 кВт та два плоскошліфувальні верстати потужністю 16 кВт та 14 кВт відповідно. Загальна потужність групи 49 кВт. Шліфувальні верстати мають найнижчий коефіцієнт використання  $K_v = 0,15$  через специфіку технологічного процесу та коефіцієнт потужності  $\cos\varphi = 0,6$ .

Допоміжне обладнання включає заточувальний верстат 3 кВт, довбальні верстати  $2 \times 5$  кВт та 7,5 кВт, прес електричний 5 кВт, відрізу пилу 2 кВт, свердлильний верстат 2 кВт та консольно-поворотний кран 5 кВт. Сумарна потужність складає 32,5 кВт при коефіцієнті використання  $K_v = 0,35$  та коефіцієнті потужності  $\cos\varphi = 0,8$ .

Сумарне середнє навантаження всього обладнання цеху:  $P_{сер.заг} = 12,0 + 13,5 + 2,6 + 3,0 + 12,4 + 7,35 + 11,4 = 62,25$  кВт. Сумарне середнє реактивне навантаження:  $Q_{сер.заг} = 14,03 + 13,77 + 3,04 + 3,06 + 10,94 + 9,80 + 8,55 =$

63,19 кВар. Ефективне число електроприймачів для всього цеху:  $n_{e.заг} = (\Sigma P_H)^2 / \Sigma P_H^2 = 260^2 / 4852 = 13,9$ .

Коефіцієнт максимуму для всього цеху при  $n_{e.заг} = 13,9$  та середньозваженому коефіцієнті використання  $K_{в.ср} = 62,25 / 260 = 0,24$  становить  $K_m = 1,58$ . Розрахункове активне навантаження цеху:  $P_{р.цех} = 62,25 \times 1,58 = 98,4$  кВт. Розрахункове реактивне навантаження приймається рівним середньому:  $Q_{р.цех} = 63,19$  кВар. Повне розрахункове навантаження:  $S_{р.цех} = \sqrt{(98,4^2 + 63,19^2)} = 116,8$  кВА.

## 10.2. Розрахунок освітлення

Розрахунок освітлення цеху спеціального інструменту виконується згідно з нормами освітленості для приміщень, де виконуються роботи високої точності. Цех має площу 720 м<sup>2</sup> та висоту 6 метрів, що дозволяє застосувати загальне рівномірне освітлення з додатковим місцевим освітленням робочих місць. Нормована освітленість для робіт з металообробки високої точності становить 500 лк при коефіцієнті пульсації не більше 10%.

Розрахунок кількості світильників виконується методом коефіцієнта використання світлового потоку. Світловий потік однієї лампи визначається за формулою  $\Phi_l = (E_n \times S \times K_z \times z) / (N \times \eta \times \mu)$ , де  $E_n$  - нормована освітленість,  $S$  - площа приміщення,  $K_z$  - коефіцієнт запасу,  $z$  - коефіцієнт мінімальної освітленості,  $N$  - кількість ламп,  $\eta$  - коефіцієнт використання,  $\mu$  - коефіцієнт нерівномірності.

Для розрахунку коефіцієнта використання необхідно визначити індекс приміщення:  $i = S / (h \times (A + B)) = 720 / (4,5 \times (24 + 30)) = 2,96$ . Коефіцієнти відбивання приймаємо: стелі  $\rho_c = 0,7$ , стін  $\rho_{ст} = 0,5$ , підлоги  $\rho_{п} = 0,3$ . За довідковими таблицями для люмінесцентних світильників типу ЛПО коефіцієнт використання  $\eta = 0,62$ .

Приймаємо до встановлення світильники ЛПО-2×36 з люмінесцентними лампами ЛБ-36 світловим потоком 3350 лм кожна. Коефіцієнт запасу  $K_z = 1,5$ , коефіцієнт мінімальної освітленості  $z = 1,15$ . Необхідна кількість світильників:  $N = (500 \times 720 \times 1,5 \times 1,15) / (2 \times 3350 \times 0,62) = 149$  світильників.

Приймаємо до встановлення 150 світильників ЛПО-2×36, розташованих рівномірно по площі цеху в 10 рядів по 15 світильників у кожному ряду. Відстань між рядами світильників становить 2,4 м, між світильниками в ряду - 1,6 м. Такий розподіл забезпечує рівномірність освітлення з коефіцієнтом нерівномірності не більше 1,3.

Встановлена потужність освітлення складає:  $P_{ос} = 150 \times 2 \times 36 = 10,8$  кВт. Питома потужність освітлення:  $P_{уд} = 10800 / 720 = 15$  Вт/м<sup>2</sup>, що відповідає нормативним значенням для приміщень даного типу. Коефіцієнт попиту для освітлення приймається 0,95 з урахуванням можливості вимкнення частини світильників в окремих зонах.

Розрахункове навантаження освітлення:  $P_{ос.p} = 10,8 \times 0,95 = 10,26$  кВт. Реактивна потужність при  $\cos\phi = 0,92$  для люмінесцентних ламп з компенсованими ПРА:  $Q_{ос.p} = 10,26 \times \operatorname{tg}(23^\circ) = 10,26 \times 0,42 = 4,31$  кВар. Повне навантаження освітлення:  $S_{ос} = \sqrt{(10,26^2 + 4,31^2)} = 11,13$  кВА.

Аварійне освітлення передбачається для забезпечення мінімального рівня освітленості 5% від робочого, що становить 25 лк. Для аварійного освітлення встановлюється 30 світильників Е27 з світлодіодними лампами потужністю 20 Вт кожна, підключених до незалежного джерела живлення через пристрій АВР. Потужність аварійного освітлення складає 0,6 кВт.

Евакуаційне освітлення виконується світильниками з автономними джерелами живлення, встановленими вздовж шляхів евакуації та біля виходів з цеху. Мінімальна освітленість евакуаційних шляхів 1 лк забезпечується 20 світильниками потужністю 8 Вт кожен. Час роботи від автономного джерела не менше 1 години.

### 10.3. Вибір схеми та розрахунок цехової мережі

Схема електропостачання цеху спеціального інструменту розробляється з урахуванням розташування обладнання, його потужності та режимів роботи. Оптимальною є змішана радіально-магістральна схема з груповими розподільчими пунктами для живлення технологічного обладнання та окремими лініями для потужних споживачів. Така схема забезпечує надійність електропостачання, зручність експлуатації та можливість розвитку.

Живлення цеху здійснюється від трансформаторної підстанції ТП-2 кабелем АВВГ 3×70+1×35 довжиною 25 метрів до головного розподільчого щита ГРЩ-0,4кВ, встановленого в приміщенні цеху. Розрахунковий струм лінії живлення з урахуванням силового та освітлювального навантаження:  $I_{\text{лін}} = (116,8 + 11,13) \times 1000 / (\sqrt{3} \times 380) = 194,5 \text{ А}$ . Допустимий струм кабелю АВВГ 3×70 при прокладанні в землі становить 200 А, що забезпечує необхідний запас.

Від головного розподільчого щита відходять дві основні лінії до розподільчих пунктів РП-1 та РП-2, розташованих в різних частинах цеху. РП-1 живить північну частину цеху з фрезерними та шліфувальними верстатами загальним навантаженням 68,5 кВА. РП-2 забезпечує електропостачання південної частини з токарними верстатами та допоміжним обладнанням навантаженням 48,3 кВА.

Розрахунковий струм лінії ГРЩ-РП1 при навантаженні 68,5 кВА:  $I_1 = 68500 / (\sqrt{3} \times 380) = 104,1 \text{ А}$ . Приймаємо кабель АВВГ 3×50+1×25 з допустимим струмом 130 А довжиною 18 метрів. Розрахунковий струм лінії ГРЩ-РП2 при навантаженні 48,3 кВА:  $I_2 = 48300 / (\sqrt{3} \times 380) = 73,4 \text{ А}$ . Встановлюємо кабель АВВГ 3×35+1×16 з допустимим струмом 90 А довжиною 22 метри.

Від розподільчих пунктів живлення окремих верстатів здійснюється кабелями перерізом від 2,5 до 16 мм<sup>2</sup> залежно від потужності обладнання. Горизонтально-фрезерні верстати потужністю 12 кВт живляться кабелями

АВВГ 3×6+1×4 довжиною 8-15 метрів. Токарні верстати потужністю 10 кВт підключаються кабелями АВВГ 3×4+1×2,5 довжиною 5-12 метрів.

Прокладання кабелів в цеху здійснюється відкритим способом по металевих лотках, закріплених на висоті 3-3,5 метра. Лотки виконуються перфорованими для природної вентиляції кабелів. В місцях проходження через стіни кабелі прокладаються в металевих або азбестоцементних трубах з ущільненням неспалюваними матеріалами.

Захист кабельних ліній здійснюється автоматичними вимикачами, встановленими в розподільчих щитах. Номінальні струми вимикачів вибираються за умовою  $I_n \geq I_p$  з перевіркою за струмом спрацювання теплового розчіплювача. Для магістральних ліній використовуються вимикачі з електронними розчіплювачами для забезпечення селективності дії захисту.

Головний розподільчий щит ГРЩ-0,4кВ комплектується ввідним автоматичним вимикачем ВА55-41 з номінальним струмом 250 А та струмом відключення 35 кА. Секційний автоматичний вимикач номінальним струмом 160 А забезпечує можливість роздільної роботи секцій або їх об'єднання. Відхідні автоматичні вимикачі вибираються відповідно до розрахункових струмів ліній.

Перевірка втрат напруги виконується для найбільш віддаленого споживача - токарного верстата позиції 19. Втрати напруги на ділянці ТП2-ГРЩ при активному навантаженні 98,4 кВт, реактивному 63,19 кВар та довжині 25 м:  $\Delta U_1 = (98,4 \times 0,268 + 63,19 \times 0,08) \times 25 / 400 = 1,96$  В. Втрати на ділянці ГРЩ-РП2 довжиною 22 м:  $\Delta U_2 = (48,3 \times 0,4 \times 0,524 + 48,3 \times 0,6 \times 0,08) \times 22 / 400 = 0,68$  В.

#### 10.4. Розрахунок освітлювальної мережі

Розрахунок освітлювальної мережі цеху виконується з урахуванням розташування світильників, їх потужності та вимог до якості освітлення.

Схема живлення освітлення приймається групова з розподілом навантаження між декількома лініями для забезпечення надійності та зручності експлуатації. Кожна лінія живить не більше 20 світильників для обмеження втрат напруги та зменшення зони відключення при аваріях.

Загальна кількість світильників 150 штук розподіляється між 8 групами освітлення по 18-20 світильників у кожній групі. Кожна група живиться окремою лінією від освітлювального щита ЩО-0,4кВ, встановленого поруч з головним розподільчим щитом. Номінальна потужність однієї групи при 20 світильниках ЛПО-2×36 становить  $20 \times 72 = 1440$  Вт.

Розрахунковий струм групи освітлення з урахуванням коефіцієнта попиту 0,95:  $I_{гр} = 1440 \times 0,95 / (\sqrt{3} \times 380) = 2,08$  А. Мінімальний переріз проводів освітлювальної мережі за умовами механічної міцності 1,5 мм<sup>2</sup> для мідних проводів. Приймаємо проводи ПВ-3×1,5 з допустимим струмом 19 А при прокладанні в трубах, що забезпечує необхідний запас.

Освітлювальні лінії прокладаються в металевих трубах по стінах цеху на висоті 3,5 метра. Перемикачі груп освітлення встановлюються біля входів в цех для зручності управління. Передбачається можливість окремого вимкнення освітлення в різних зонах цеху залежно від режиму роботи обладнання.

Живлення аварійного освітлення здійснюється від окремої секції щита, підключеної через пристрій автоматичного введення резерву (АВР) до незалежного джерела живлення. При зникненні основного живлення АВР автоматично перемикає аварійне освітлення на резервне джерело за час не більше 15 секунд.

Втрати напруги в освітлювальних лініях перевіряються для найбільш віддаленої групи. При струмі 2,08 А, активному опорі 0,0175 Ом/м та довжині 45 метрів втрати напруги становлять:  $\Delta U = 2,08 \times 0,0175 \times 45 \times 2 / 220 = 0,74$  В або 0,34%, що не перевищує допустимих 2,5% для освітлювальних мереж.

Управління освітленням передбачається місцеве та дистанційне. Місцеве управління здійснюється перемикачами біля входів в цех та на робочих місцях. Дистанційне управління виконується з диспетчерського пункту заводу через систему автоматизованого управління освітленням з можливістю програмування режимів роботи.

#### 10. 5. Вибір обладнання 0,4кВ

Розрахунок електричних навантажень виконується методом коефіцієнта максимуму для кожної групи однотипного обладнання. Для горизонтально-фрезерних верстатів при номінальній потужності  $4 \times 12 = 48$  кВт, коефіцієнті використання  $K_v = 0,25$ , коефіцієнті потужності  $\cos\phi = 0,65$  та ефективному числі електроприймачів  $n_e = 4$  коефіцієнт максимуму становить  $K_m = 2,0$ . Розрахункове навантаження групи:  $P_p = 48 \times 0,25 \times 2,0 = 24$  кВт,  $Q_p = 24 \times \tan(49^\circ) = 24 \times 1,15 = 27,6$  кВар.

Вертикально-фрезерні верстати потужністю  $3 \times 15 = 45$  кВт з аналогічними коефіцієнтами мають розрахункове навантаження  $P_p = 45 \times 0,25 \times 2,1 = 23,6$  кВт та  $Q_p = 27,1$  кВар. Шліфувальні верстати при сумарній потужності 49 кВт,  $K_v = 0,2$ ,  $\cos\phi = 0,6$  та  $n_e = 4$  споживають  $P_p = 49 \times 0,2 \times 2,0 = 19,6$  кВт активної та  $Q_p = 26,1$  кВар реактивної потужності. Токарні верстати загальною потужністю 50 кВт мають розрахункове навантаження  $P_p = 50 \times 0,2 \times 1,95 = 19,5$  кВт та  $Q_p = 23,4$  кВар.

Сумарне розрахункове навантаження цеху з урахуванням коефіцієнта одночасності 0,9 становить: активна потужність  $P_c = (24 + 23,6 + 19,6 + 19,5 + 14,2) \times 0,9 = 90,8$  кВт, реактивна потужність  $Q_c = (27,6 + 27,1 + 26,1 + 23,4 + 16,4) \times 0,9 = 108,5$  кВар, повна потужність  $S_c = \sqrt{(90,8^2 + 108,5^2)} = 141,4$  кВА. Розрахунковий струм на напрузі 0,4 кВ складає  $I_p = 141400 / (\sqrt{3} \times 380) = 215$  А.

Таблиця 7.1 - Розрахунок навантажень цеху спеціального інструменту

Група обладнання	n, шт	P <sub>н</sub> , кВт	Кв	cosφ	ne	Км	P <sub>p</sub> , кВт	Q <sub>p</sub> , кВар
Фрезерні гориз.	4	48	0,25	0,65	4	2,0	24,0	27,6
Фрезерні верт.	3	45	0,25	0,65	3	2,1	23,6	27,1
Шліфувальні	4	49	0,20	0,60	4	2,0	19,6	26,1
Токарні	5	50	0,20	0,70	5	1,95	19,5	23,4
Допоміжне	3	28	0,30	0,75	3	2,15	18,1	14,5
Разом по цеху	19	220	-	-	-	-	104,8	118,7

Розподіл електроенергії в цеху здійснюється через головний розподільчий щит ГРЩ-0,4 кВ та два розподільчі пункти РП-1 і РП-2. До РП-1 підключаються фрезерні та шліфувальні верстати, розташовані в північній частині цеху, загальним навантаженням 85 кВА. До РП-2 підключаються токарні верстати та допоміжне обладнання південної частини цеху навантаженням 65 кВА. Така схема забезпечує рівномірний розподіл навантаження та зручність експлуатації.

Переріз кабелю від ТП-2 до ГРЩ цеху визначається за розрахунковим струмом 215 А з урахуванням коефіцієнта запасу 1,1. Необхідний переріз за умовами нагрівання становить  $215 \times 1,1 = 237$  А. Приймаємо кабель АВВГ 3×95+1×50 з допустимим струмом 245 А при прокладанні в землі на глибині 0,7 м. Довжина кабелю від ТП-2 до цеху складає 25 м.

Переріз ліній до розподільчих пунктів визначається аналогічно. Для лінії ГРЩ-РП1 при струмі 130 А приймаємо кабель АВВГ 3×50+1×25 з  $I_{доп} = 135$  А довжиною 15 м. Для лінії ГРЩ-РП2 при струмі 100 А встановлюємо кабель АВВГ 3×35+1×16 з  $I_{доп} = 105$  А довжиною 20 м. Живлення окремих верстатів здійснюється кабелями перерізом 4-16 мм<sup>2</sup> залежно від потужності обладнання.

Перевірка втрат напруги виконується для найбільш віддаленого споживача. Для токарного верстата №19 потужністю 10 кВт, розташованого на відстані 45 м від ГРЩ через РП-2, втрати напруги становлять:  $\Delta U = (P \times r + Q \times x) \times I / U^2 = (15 \times 0,94 + 18 \times 0,08) \times 45 / (380)^2 = 0,69$  В на ділянці ГРЩ-РП2 плюс 1,2 В на ділянці РП2-верстат. Загальні втрати 1,91 В або 0,5% не перевищують допустимих 5%.

## 11. Релейний захист

Релейний захист системи електропостачання інструментального заводу призначений для автоматичного відключення пошкоджених ділянок електричної мережі та електрообладнання при виникненні аварійних режимів. Основними видами пошкоджень в електричних мережах є короткі замикання між фазами, замикання на землю, обриви фаз та перевантаження. Релейний захист повинен забезпечувати селективність, швидкодію, чутливість та надійність спрацювання в усіх аварійних режимах.

Проектування релейного захисту здійснюється відповідно до вимог ПУЕ та галузевих інструкцій з урахуванням особливостей технологічного процесу підприємства. Для інструментального заводу з категорією надійності II необхідно передбачити швидке відключення пошкоджень для мінімізації простоїв технологічного обладнання та збереження якості продукції. Особливу увагу слід приділити захисту прецизійного обладнання цеху спеціального інструменту.

Вихідні дані:

- Потужність трансформатора:  $S_n = 1250$  кВА
- Напруга короткого замикання:  $u_k = 5,5\%$
- Втрати короткого замикання:  $\Delta P_k = 14,5$  кВт
- Струм холостого ходу:  $i_0 = 1,8\%$

Розрахунок номінальних струмів:

Сторона ВН (10 кВ):  $I_{н.ВН} = S_n / (\sqrt{3} \times U_{н.ВН}) = 1250 / (\sqrt{3} \times 10) = 72,2$  А

Сторона НН (0,4 кВ):  $I_{н.НН} = S_n / (\sqrt{3} \times U_{н.НН}) = 1250 / (\sqrt{3} \times 0,4) = 1804$  А

Вибір трансформаторів струму:

Сторона ВН: ТПЛ-10 з  $K_T = 100/5$  А Сторона НН: ТПЛ-0.66 з  $K_T = 2000/5$

А

Диференційний захист:

Струм спрацювання диференційного захисту:  $I_{с.з.д\dot{и}ф} = K_n \times (\Delta f_{ТТ} + \Delta u + \Delta T) \times I_{ном.макс}$

де:

- $K_n = 1,3$  - коефіцієнт надійності
- $\Delta f_{ТТ} = 0,1$  - похибка трансформаторів струму
- $\Delta u = 0,005 \times u_{к} = 0,005 \times 5,5 = 0,0275$  - похибка від регулювання напруги
- $\Delta T = 0,05$  - похибка від неточності коефіцієнтів трансформації

$I_{с.з.д\dot{и}ф} = 1,3 \times (0,1 + 0,0275 + 0,05) \times 72,2 = 21,6$  А первинних

У вторинних колах (сторона ВН):  $I_{с.з.д\dot{и}ф.вт} = 21,6 \times 5/100 = 1,08$  А

Максимальний струмовий захист:

Струм спрацювання МСЗ:  $I_{с.з.макс} = (K_n \times K_{с.з} \times I_{н.тр}) / (K_v \times K_{п})$

де:

- $K_n = 1,2$  - коефіцієнт надійності
- $K_{с.з} = 1,8$  - коефіцієнт самозапуску
- $K_v = 0,85$  - коефіцієнт повернення
- $K_{п} = 0,95$  - коефіцієнт спрацювання реле

$I_{с.з.макс} = (1,2 \times 1,8 \times 72,2) / (0,85 \times 0,95) = 193$  А первинних

У вторинних колах:  $I_{с.з.макс.вт} = 193 \times 5/100 = 9,65$  А

Час спрацювання:  $t_{с.з} = 1,0$  с

Перевірка чутливості:

Коефіцієнт чутливості при двофазному КЗ на шинах НН:  $K_{ч} = I''_{к2.мін} / I_{с.з.макс} = 6450/193 = 33,4 > 1,5 \checkmark$

Вихідні дані:

- Потужність трансформатора:  $S_n = 630$  кВА
- Напруга короткого замикання:  $u_k = 5,5\%$
- Втрати короткого замикання:  $\Delta P_k = 7,6$  кВт

Розрахунок номінальних струмів:

Сторона ВН (10 кВ):  $I_{н.ВН} = 630 / (\sqrt{3} \times 10) = 36,4$  А

Сторона НН (0,4 кВ):  $I_{н.НН} = 630 / (\sqrt{3} \times 0,4) = 909$  А

Вибір трансформаторів струму:

Сторона ВН: ТПЛ-10 з  $K_T = 50/5$  А Сторона НН: ТПЛ-0.66 з  $K_T = 1000/5$

А

Максимальний струмовий захист:

Струм спрацювання:  $I_{с.з.макс} = (1,2 \times 1,8 \times 36,4) / (0,85 \times 0,95) = 97,2$  А

первинних

У вторинних колах:  $I_{с.з.макс.вт} = 97,2 \times 5 / 50 = 9,72$  А

Час спрацювання:  $t_{с.з} = 0,5$  с

12.3 Захист ліній 10 кВ від ЦРП до цехових ТП

Захист лінії до ТП-1:

Розрахунковий струм лінії:  $I_p = S_p / (\sqrt{3} \times U_{НН}) = 1058 / (\sqrt{3} \times 10) = 61,1$  А

Струм спрацювання МСЗ лінії:  $I_{с.з.л} = (K_N \times I_{роб.макс}) / (K_B \times K_{Пл}) = (1,2 \times 61,1) / (0,85 \times 0,95) = 91,1$  А первинних

У вторинних колах (при  $K_T = 100/5$ ):  $I_{с.з.л.вт} = 91,1 \times 5 / 100 = 4,56$  А

Час спрацювання:  $t_{с.з} = 1,5$  с

Захист лінії до ТП-2:

Розрахунковий струм лінії:  $I_p = 655 / (\sqrt{3} \times 10) = 37,8$  А

Струм спрацювання:  $I_{с.з.л} = (1,2 \times 37,8) / (0,85 \times 0,95) = 56,4$  А первинних

У вторинних колах (при  $K_T = 50/5$ ):  $I_{с.з.л.вт} = 56,4 \times 5 / 50 = 5,64$  А

Таблиця 11.1 - Зведена таблиця налаштувань релейного захисту

Об'єкт захисту	Тип захисту	$I_{с.з.}$ , А (перв.)	$I_{с.з.}$ , А (втор.)	$t_{с.з.}$ , с	Кч
Тр-р ТП-1 (1250 кВА)	Диференційний	21,6	1,08	0,1	-
Тр-р ТП-1 (1250 кВА)	МСЗ	193	9,65	1,0	33,4
Тр-р ТП-2 (630 кВА)	МСЗ	97,2	9,72	0,5	66,4
Лінія до ТП-1	МСЗ	91,1	4,56	1,5	70,8
Лінія до ТП-2	МСЗ	56,4	5,64	1,5	114,4

Захист від однофазних замикань на землю в мережі 10 кВ виконується за схемою контролю суми струмів трьох фаз через фільтр струму нульової послідовності.

Струм спрацювання:  $I_{с.з.0} = K_N \times 3 I_{ю.неб} = 1,5 \times 3 \times 0,5 = 2,25$  А

Час спрацювання:  $t_{с.з.0} = 0,3$  с

Захист електродвигунів виконується автоматичними вимикачами з розчіплювачами максимального струму та теплового перевантаження.

Для двигуна 12 кВт ( $I_n = 23$  А):

- Струм відсічки:  $I_{отс} = 9,8 \times I_n = 9,8 \times 23 = 225$  А
- Струм теплового захисту:  $I_{тепл} = I_n = 23$  А

АВР передбачається на секційних перемикачах ЦРП для забезпечення безперервного живлення споживачів II категорії.

Час спрацювання АВР:  $t_{ABP} = 2,0$  с Кількість циклів: 1

Час спрацювання АВР вибирається з умовою надійного відключення пошкодженого елемента основним захистом. При максимальному часі спрацювання релейного захисту 1,5 секунди час АВР приймається 2,0 секунди.

### 13. Розробка заходів з охорони праці, техніки безпеки і охорони природи

Забезпечення безпечних умов праці при експлуатації системи електропостачання інструментального заводу є пріоритетним завданням, що потребує комплексного підходу до вирішення питань електробезпеки, пожежної безпеки та охорони навколишнього середовища. Робота з електроустановками пов'язана з підвищеною небезпекою для життя і здоров'я персоналу, тому необхідно передбачити всі можливі заходи для мінімізації ризиків виникнення нещасних випадків та професійних захворювань.

Основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами при експлуатації електроустановок є: ураження електричним струмом при дотику до струмовідних частин; опіки електричною дугою; пожежі та вибухи від електричних причин; електромагнітні поля промислової частоти; шум та вібрація від роботи електрообладнання; хімічні речовини, що виділяються при роботі акумуляторних батарей; недостатнє освітлення робочих місць.

Класифікація приміщень за електробезпекою виконується згідно з ПУЕ залежно від умов навколишнього середовища. Цехи інструментального заводу відносяться до приміщень з підвищеною небезпекою через наявність металевих підлог, можливість одночасного дотику до металевих конструкцій та електрообладнання. Трансформаторні підстанції класифікуються як приміщення особливо небезпечні через наявність обладнання напругою понад 1000 В.

Заходи забезпечення електробезпеки включають технічні та організаційні засоби. До технічних засобів відносяться: надійна ізоляція струмовідних частин; недоступність струмовідних частин; електричне розділення мереж; мале напругу; захисне заземлення та занулення; захисне відключення; індивідуальні засоби захисту. Організаційні заходи включають

навчання персоналу, атестацію з електробезпеки, організацію безпечного проведення робіт.

Система заземлення електроустановок заводу виконується за схемою TN-C-S з глухозаземленою нейтраллю трансформаторів та розділенням PEN-провідника на нульовий робочий N та нульовий захисний PE провідники. Головний заземлювач підстанції виконується у вигляді контурного заземлення з вертикальних електродів довжиною 3 метри, з'єднаних горизонтальними провідниками. Опір заземлення не повинен перевищувати 4 Ом для установок напругою 10 кВ з ізольованою нейтраллю.

Розрахунок заземлювального пристрою виконується для найбільш несприятливих умов - літнього періоду з підсохлим ґрунтом. Питомий опір ґрунту для суглинку в сухому стані приймається  $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Опір одного вертикального електрода довжиною  $l = 3 \text{ м}$  та діаметром  $d = 0,02 \text{ м}$  визначається за формулою:  $R_1 = \rho / (2\pi l) \times \ln(2l/d) = 100 / (2\pi \times 3) \times \ln(2 \times 3 / 0,02) = 5,31 \times \ln(300) = 30,3 \text{ Ом}$ .

Кількість вертикальних електродів за умовою забезпечення опору 4 Ом:  $n = R_1 / (R_3 \times \eta_v) = 30,3 / (4 \times 0,7) = 10,8 \approx 11$  електродів, де  $\eta_v = 0,7$  - коефіцієнт використання вертикальних електродів. Електроди розташовуються по периметру підстанції з відстанню між ними 3 метри та з'єднуються горизонтальним провідником зі сталеві смуги  $40 \times 4 \text{ мм}$ .

Захист від ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції забезпечується пристроями захисного відключення (ПЗВ) з номінальним струмом спрацювання 30 мА для ліній живлення переносного електроінструменту та 300 мА для стаціонарного обладнання. Час спрацювання ПЗВ не перевищує 0,03 секунди при струмі 150 мА, що забезпечує безпеку людини при непрямому дотику.

Пожежна безпека електроустановок забезпечується правильним вибором електрообладнання за ступенем захисту, застосуванням негорючих матеріалів, влаштуванням автоматичних систем пожежогасіння та

сигналізації. Силові кабелі з пластмасовою ізоляцією при групових прокладках повинні мати зменшене димо- та газовиділення. В кабельних спорудах передбачається автоматична установка пожежогасіння газовими вогнегасними речовинами.

Розрахунок кількості первинних засобів пожежогасіння виконується згідно з нормами залежно від площі приміщень та категорії пожежної небезпеки. Для трансформаторної підстанції площею 60 м<sup>2</sup> необхідно встановити: 2 вогнегасники порошкові ОП-5, 1 ящик з піском 0,5 м<sup>3</sup>, 1 лопату, асбестову тканину 2×2 м. В цехах встановлюються вогнегасники з розрахунку 1 вогнегасник на 200 м<sup>2</sup> площі приміщення.

Захист від електромагнітних полів промислової частоти забезпечується дотриманням безпечних відстаней до струмовідних частин та екрануванням робочих місць. Гранично допустимі рівні електричного поля частотою 50 Гц становлять 5 кВ/м при опроміненні протягом 8 годин, магнітного поля - 1,6 кА/м. Постійні робочі місця не розташовуються в зоні впливу полів, що перевищують ГДР.

Освітлення електроустановок виконується згідно з нормами ДБН В.2.5-28 залежно від розряду зорової роботи. Для приміщень розподільних устроїв 10 кВ нормована освітленість становить 200 лк, для трансформаторних підстанцій - 100 лк, для кабельних споруд - 50 лк. Аварійне освітлення забезпечує освітленість не менше 5% від нормованої для безпечної евакуації персоналу.

Вентиляція електроустановок передбачається для видалення надлишкового тепла та шкідливих газів. Природна вентиляція трансформаторних підстанцій розраховується на температуру зовнішнього повітря +40°C та максимальні втрати в трансформаторах. Кратність повітрообміну для трансформаторних підстанцій приймається 6-8 разів на годину.

Розрахунок природної вентиляції виконується за тепловими надходженнями від трансформаторів. Втрати потужності в трансформаторі ТМ-2500/10 при номінальному навантаженні:  $\Delta P = \Delta P_{х.х} + \Delta P_{к.з} \times (Kз^2) = 3,6 + 22 \times 0,58^2 = 3,6 + 7,4 = 11$  кВт. Необхідна кількість повітря для видалення тепла:  $L = 3,6 \times \Delta P / (\rho \times c \times \Delta t) = 3,6 \times 11000 / (1,2 \times 1000 \times 15) = 2,2$  м<sup>3</sup>/с.

Індивідуальні засоби захисту для персоналу, що обслуговує електроустановки, включають: діелектричні рукавички, боти, килимки; захисні каски; засоби захисту обличчя та очей; інструмент з ізольованими ручками; покажчики напруги; переносні заземлення. Всі засоби захисту підлягають періодичним випробуванням згідно з нормами та мають терміни придатності.

Охорона навколишнього середовища при експлуатації електроустановок включає заходи щодо запобігання забруднення атмосфери, води та ґрунту. Основними джерелами забруднення є: витоки трансформаторного масла; викиди озону від роботи високовольтного обладнання; електромагнітні поля; шум від роботи вентиляторів та трансформаторів. Концентрації шкідливих речовин в атмосферному повітрі не повинні перевищувати гранично допустимих.

Утилізація відпрацьованого електрообладнання здійснюється спеціалізованими організаціями з дотриманням вимог екологічного законодавства. Трансформаторне масло здається на регенерацію або спалювання в спеціальних установках. Кабелі з пластмасовою ізоляцією переробляються на вторинну сировину. Акумуляторні батареї утилізуються з вилученням свинцю та кислоти.

Навчання персоналу з охорони праці та електробезпеки проводиться при прийнятті на роботу, періодично та при зміні характеру роботи. Програма навчання включає вивчення електроустановок, засобів захисту, правил безпечного ведення робіт, надання першої медичної допомоги. Атестація з

електробезпеки проводиться комісією підприємства з присвоєнням відповідної групи допуску.

## 14. Індивідуальне завдання

### **Тема: Кібербезпека електроенергетичних систем**

#### **Вступ**

У сучасному світі електроенергетичні системи (ЕЕС) є критично важливою інфраструктурою, що забезпечує функціонування всіх сфер життя – від промисловості та транспорту до медицини та побуту. Проте зі зростанням складності та взаємозв'язку цих систем, зокрема впровадженням цифрових технологій та концепції "розумних мереж" (Smart Grid), вони стають все більш вразливими до кібератак. Наслідки успішних кібератак на ЕЕС можуть бути катастрофічними, включаючи масові відключення електроенергії, руйнування обладнання, економічні збитки та загрозу національній безпеці. Цей реферат присвячений аналізу еволюції електроенергетичних систем, типовим загрозам кібербезпеці, існуючим механізмам захисту, основним викликам та перспективам розвитку у сфері кібербезпеки ЕЕС.

#### **1. Еволюція та архітектура сучасних електроенергетичних систем**

Традиційні електроенергетичні системи були здебільшого ізольованими та базувалися на електромеханічних пристроях. Однак останні десятиліття принесли значну цифровізацію та інтеграцію інформаційних технологій.

##### **1.1. SCADA-системи та їх роль**

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) системи є основою управління та моніторингу в ЕЕС. Вони дозволяють операторам дистанційно контролювати та керувати генерацією, передачею та розподілом електроенергії. SCADA-системи складаються з польових пристроїв (контролерів, датчиків), комунікаційних мереж та центральних керуючих станцій. Хоча SCADA значно підвищили ефективність управління, їх мережева природа робить їх потенційною мішенню для кібератак.

## **1.2. Smart Grid (Розумні мережі)**

Концепція Smart Grid передбачає інтеграцію передових інформаційних та комунікаційних технологій у всю електроенергетичну мережу. Це включає:

**Двосторонній потік інформації та енергії:** Споживачі можуть не тільки отримувати енергію, але й генерувати та віддавати її в мережу.

**Автоматизація та самовідновлення:** Мережа може автоматично виявляти та усувати несправності.

**Розширений моніторинг та аналітика:** Датчики та аналітичні системи збирають величезні обсяги даних для оптимізації роботи мережі.

**Інтеграція відновлюваних джерел енергії:** Ефективне управління змінною генерацією від сонця та вітру. Ці нововведення, хоча й обіцяють значні переваги, також розширюють поверхню для кібератак, створюючи нові точки входу для зловмисників.

## **2. Загрози кібербезпеці електроенергетичних систем**

Кіберзагрози для ЕЕС є багатовекторними та постійно еволюціонують. Вони можуть бути спричинені державними акторами, терористичними групами, кримінальними угрупованнями або навіть інсайдерами.

### **2.1. Типові вектори атак**

**Мальвар (шкідливе програмне забезпечення):** Віруси, трояни, черв'яки, програми-вимагачі, призначені для порушення роботи систем, крадіжки даних або встановлення контролю.

**Фішинг та соціальна інженерія:** Маніпулювання персоналом для отримання доступу до конфіденційної інформації або систем.

**DDoS-атаки (відмова в обслуговуванні):** Перевантаження мережевих ресурсів, що призводить до припинення їх роботи.

**Впровадження шкідливого коду:** Введення команд або коду в SCADA-системи для зміни їх функціонування або пошкодження обладнання.

**Атаки на ланцюг поставок:** Компрометація програмного забезпечення або обладнання на етапі виробництва або постачання.

**Фізичні атаки:** Диверсії, що поєднуються з кібератаками для посилення їх ефекту.

## **2.2. Наслідки кібератак для енергетичної інфраструктури**

Наслідки успішних кібератак можуть бути руйнівними:

**Масові відключення електроенергії (блекаути):** Параліч життєво важливих служб та інфраструктури.

**Пошкодження або руйнування обладнання:** Знищення дорогих трансформаторів, турбін та інших компонентів ЕЕС.

**Витік конфіденційних даних:** Компрометація даних про критичну інфраструктуру, операційні процеси, або особистих даних споживачів.

**Економічні збитки:** Прямі втрати від пошкоджень, непрямі втрати від зупинки виробництва та штрафів.

**Втрата довіри та соціальна нестабільність:** Паніка серед населення та недовіра до державних органів.

## **2.3. Приклади відомих кібератак на енергетичні об'єкти**

**Атака на українську енергосистему (грудень 2015 року):** Одна з перших відомих кібератак, що призвела до відключення електроенергії для сотень

тисяч споживачів. Зловмисники використали шкідливе програмне забезпечення BlackEnergy3 для компрометації SCADA-систем.

**Атака на українську енергосистему (грудень 2016 року):** Повторна атака, яка продемонструвала більш складні техніки, включаючи використання шкідливого ПЗ Industroyer (CrashOverride), яке було спеціально розроблене для впливу на промислові системи керування.

**Stuxnet (2010 рік):** Хоча не був спрямований безпосередньо на ЕЕС, цей черв'як атакував центрифуги для збагачення урану в Ірані, продемонструвавши потенціал кібератак для фізичного руйнування промислового обладнання.

### **3. Механізми захисту та заходи з кібербезпеки**

Забезпечення кібербезпеки ЕЕС вимагає комплексного підходу, що поєднує технічні засоби та організаційні заходи.

#### **3.1. Технічні засоби захисту**

**Мережеві екрани (Firewalls):** Розділення мереж, контроль трафіку та блокування несанкціонованого доступу.

**Системи виявлення та запобігання вторгненням (IDS/IPS):** Моніторинг мережевого трафіку та системних журналів для виявлення підозрілої активності та блокування атак.

**Антивірусне програмне забезпечення:** Захист від відомих шкідливих програм.

**Шифрування даних:** Забезпечення конфіденційності та цілісності даних під час передачі та зберігання.

**Системи управління ідентифікацією та доступом (IAM):** Контроль за тим, хто має доступ до систем і які дії може виконувати.

**Резервне копіювання та відновлення даних:** Можливість швидкого відновлення систем після атаки.

**Сегментація мережі:** Розділення великої мережі на менші, ізольовані сегменти для обмеження поширення атаки.

### **3.2. Організаційні заходи**

**Політики та процедури безпеки:** Розробка та впровадження чітких правил поведінки та роботи з інформаційними системами.

**Навчання та підвищення обізнаності персоналу:** Регулярні тренінги для співробітників щодо виявлення фішингу, дотримання парольної політики та інших аспектів кібербезпеки.

**Управління ризиками:** Ідентифікація, оцінка та пом'якшення кіберризиків.

**План реагування на інциденти:** Розробка та тестування процедур реагування на кіберінциденти.

**Регулярні аудити та тестування на проникнення (пентести):** Оцінка ефективності існуючих заходів безпеки та виявлення вразливостей.

### **3.3. Стандарти та регулювання у сфері кібербезпеки енергетики**

Міжнародні та національні стандарти відіграють ключову роль у підвищенні рівня кібербезпеки ЕЕС:

**NERC Critical Infrastructure Protection (CIP):** Стандарти, розроблені Північноамериканською корпорацією надійності електроенергетики (NERC) для захисту критичної інфраструктури в США та Канаді.

**ІЕС 62443:** Серія міжнародних стандартів, що стосуються безпеки промислових систем автоматизації та керування.

**NIST Cybersecurity Framework:** Добровільний набір рекомендацій для поліпшення кібербезпеки критичної інфраструктури.

**Національні законодавчі акти:** Багато країн розробляють власні закони та підзаконні акти для регулювання кібербезпеки енергетичного сектору. В Україні це Закон України "Про основні засади забезпечення кібербезпеки України".

#### **4. Проблеми та виклики в забезпеченні кібербезпеки ЕЕС**

Незважаючи на прогрес, у забезпеченні кібербезпеки електроенергетичних систем залишається низка серйозних викликів.

##### **4.1. Взаємозв'язок ІТ та ОТ систем**

Конвергенція інформаційних технологій (ІТ) та операційних технологій (ОТ), що керують промисловими процесами, створює нові ризики. Традиційно ІТ-безпека фокусувалася на конфіденційності, цілісності та доступності даних, тоді як ОТ-безпека – на надійності, доступності та безпеці фізичних процесів. Інтеграція цих світів вимагає нових підходів до безпеки.

##### **4.2. Спадкові системи та застаріле обладнання**

Багато компонентів ЕЕС були розроблені десятиліття тому, до появи сучасних кіберзагроз, і не мають вбудованих функцій безпеки. Модернізація або заміна такого обладнання є дорогим та складним процесом.

##### **4.3. Нестача кваліфікованих кадрів**

Існує гострий дефіцит фахівців з кібербезпеки, особливо тих, хто розуміється на специфіці промислових систем керування та енергетичних мереж.

##### **4.4. Гібридні загрози та державні актори**

Кібератаки на енергетичну інфраструктуру все частіше є частиною гібридних війн, що поєднують кібератаки з дезінформацією, економічним тиском та військовими діями. Державні актори мають значні ресурси та мотивацію для проведення складних, багатоетапних атак.

## **5. Перспективи розвитку кібербезпеки електроенергетичних систем**

Майбутнє кібербезпеки ЕЕС пов'язане з впровадженням нових технологій та посиленням співпраці.

### **5.1. Штучний інтелект та машинне навчання для виявлення аномалій**

Алгоритми ШІ та машинного навчання можуть аналізувати величезні обсяги даних у реальному часі, виявляючи аномалії та поведінку, що свідчить про кібератаку, значно швидше, ніж це здатна зробити людина.

### **5.2. Технології блокчейну для підвищення довіри та цілісності даних**

Блокчейн — це розподілений реєстр, у якому дані зберігаються у вигляді послідовного ланцюга блоків. Кожен блок містить хеш попереднього блоку, мітку часу та дані транзакцій. Основна перевага блокчейну полягає в його незмінності — після додавання інформації до ланцюга, її неможливо змінити без згоди більшості учасників мережі.

У контексті електроенергетичних систем блокчейн може використовуватись для забезпечення прозорого та надійного обліку енергетичних транзакцій, управління децентралізованими джерелами енергії (наприклад, у мікромережах) і моніторингу операцій SCADA-систем. Також блокчейн дозволяє автоматизувати процеси за допомогою смарт-контрактів, що підвищує ефективність та захищеність мережі.

Блокчейн може бути використаний для створення децентралізованих, незмінних записів про транзакції та операції в мережі, підвищуючи довіру до даних та забезпечуючи їх цілісність.

### **5.3. Розвиток стандартів та міжнародна співпраця**

Продовження розробки та гармонізації міжнародних стандартів кібербезпеки для ЕЕС є критично важливим. Міжнародна співпраця, обмін інформацією про загрози та найкращі практики є ключовими для ефективного протистояння глобальним кіберзагрозам

Кібербезпека електроенергетичних систем є одним з найважливіших викликів сучасності. В умовах зростаючої цифровізації та інтеграції Smart Grid, ЕЕС стають більш вразливими до складних та руйнівних кібератак. Забезпечення їх стійкості вимагає постійного вдосконалення технічних засобів захисту, впровадження надійних організаційних заходів, розвитку міжнародних стандартів та навчання висококваліфікованих фахівців. Лише комплексний та проактивний підхід дозволить захистити цю критично важливу інфраструктуру від кіберзагроз, забезпечуючи її надійне та безперебійне функціонування.

## Висновки

У результаті виконання дипломного проекту розроблено комплексну систему електропостачання інструментального заводу, яка забезпечує надійне та економічне живлення всіх споживачів електроенергії з дотриманням сучасних вимог до якості електроенергії та енергоефективності. Проведені дослідження та розрахунки дозволили вирішити поставлені завдання та досягти мети роботи.

Розроблена система електропостачання забезпечує надійне живлення всіх споживачів заводу з дотриманням вимог другої категорії надійності. Якість електроенергії відповідає нормативним значенням для живлення прецизійного обладнання. Система має достатній резерв потужності для розвитку виробництва та можливість поетапної реконструкції без порушення технологічного процесу.

Результати роботи можуть бути використані при проектуванні та реконструкції систем електропостачання інструментальних заводів та інших підприємств машинобудівної галузі з аналогічними характеристиками електроспоживання. Розроблені методики розрахунку та технічні рішення відповідають сучасним вимогам нормативних документів та можуть служити основою для подальших досліджень в галузі електропостачання промислових підприємств.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила влаштування електроустановок. – Київ, 2017, 617с.
2. М.Й Бурбело Розрахунки в системах електропостачання – Вінниця ВДТУ, 2002. – 76 с.
3. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию /Под ред. А.А. Федорова. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - Т.1 - 580 с., т.2 - 591 с.
4. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования /Под ред. Ю.Г. Барыбина/ и др. - М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. В.С. Иванов, В.И. Соколов Режимы потребления и качества электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий/. - М.: Энергоатомиздат, 1987- 336с.
6. Н.А. Казак., Б.А. Князевский, С.С. Лазарев, Д.С. Лившиц. Электроснабжения промышленных предприятий /Под ред. Н.А. Казак., Б.А. Князевский / и др. - М.-Л.: Энергия, 1966. - 535 с
7. Неклепаев Б.И., Крючков Й.П. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 608 с.
8. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Проектирование и расчет /А.С. Овчаренко и др. - Киев: Техніка, 1985. - 185 с.
9. ГОСТ 13109-97. Електрична енергія. Сумісність технічних засобів. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення
10. Методичні вказівки до виконання розділу “Охорона праці” в дипломних проектах і роботах студентів електротехнічних спеціальностей /Уклад. О.В. Кобилянський, О.П. Терещенко – Вінниця: ВНТУ, 2004. – 45 с.

11. Перелік небезпечних шкідливих факторів. Режим доступу: [http://pidruchniki.ws/15290527/bzhd/perelik\\_nebezpechnih\\_shkidlivih\\_virobnichih\\_faktoriv](http://pidruchniki.ws/15290527/bzhd/perelik_nebezpechnih_shkidlivih_virobnichih_faktoriv).

12. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: [http://www.znaytovar.ru/gost/2/GOST\\_12000374\\_SSBT\\_Opasnye\\_i\\_v.html](http://www.znaytovar.ru/gost/2/GOST_12000374_SSBT_Opasnye_i_v.html)

13. НПАОП 0.00-1.28-10 Правила охраны труда при эксплуатации электронно

-вычислительных машин. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/pravila-ohoroni-praci-pid-chas-ekspluataciyi-elektronno-obchnor17970.html>

14. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98>

15. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс]

- Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

16. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

17. ДБН В.2.5-28-2006 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennjanor8425.html>