МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ

ДЕННОЇ ФОРМИ ЗДОБУТТЯ ОСВІТИ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему:«Розробка схеми електропостачання металургійного цеху»

Виконав: студент 4 курсу, групи 6.1413–с2–1

спеціальності 141 Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації .

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(назва освітньої програми)

В.С. Малигін

(ініціали та прізвище)

Керівник старший викладач Прихно В.Л.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент .

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні денної форми здобуття освіти

Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва)

Спеціалізація
(код та назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕІКСС
Д.М. Морозов
«23» 12 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Малигіну Віктору Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи: «Розробка схеми електропостачання металургійного цеху»

керівник роботи Прихно В.Л., старший викладач
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 23 » 12 2025 року № 1833 - с

2 Строк подання студентом роботи 20 травня 2026 р.

3 Вихідні дані до роботи Встановлена потужність основного обладнання цеху 1321 кВт; напруга живлення підстанції 10 кВ; напруга розподільної мережі 0,4 кВ; струм трифазного КЗ з боку вищої напруги 9,6 кА; час використання максимуму навантаження 5200 год; кількість робочих змін — 2; перелік технологічного устаткування цеху точного лиття.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Загальна частина: опис технологічного процесу, характеристика середовища, класифікація ЕП; 2) Розрахункова частина: вибір схеми та напруги, розрахунок електричних та освітлювальних навантажень, вибір КТП 10/0,4 кВ, розрахунок струмів КЗ, вибір апаратів захисту; 3) Охорона праці: електробезпека, розрахунок заземлення, пожежна безпека; 4) Техніко-економічне обґрунтування.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1) План розташування основного технологічного устаткування цеху точного лиття; 2) Принципова однолінійна схема електропостачання цеху.

6 Консультанти з окремих розділів роботи (проєкту):

Назва розділу	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата видачі	Підпис, дата прийняття
Загальна частина	Прихно В.Л., ст. викл.	23.12.2025	20.05.2026
Розрахункова частина	Прихно В.Л., ст. викл.	23.12.2025	20.05.2026
Охорона праці	Прихно В.Л., ст. викл.	23.12.2025	20.05.2026
Техніко-економічне обґрунтування	Прихно В.Л., ст. викл.	23.12.2025	20.05.2026

7 Дата видачі завдання 23.12.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Відмітка про виконання
1.	Збір, систематизація та аналіз вихідних даних і науково-технічної літератури	23.12.2025 — 18.01.2026	виконано
2.	Розрахунок електричних і світлотехнічних навантажень об'єкта	19.01.2026 — 08.02.2026	виконано
3.	Обґрунтування схеми розподілу та вибір потужності силових трансформаторів КТП	09.02.2026 — 28.02.2026	виконано
4.	Розрахунок параметрів КЗ, вибір захисної комутаційної апаратури та провідників	01.03.2026 — 22.03.2026	виконано
5.	Розробка комплексних інженерних заходів з охорони праці та захисного заземлення	23.03.2026 — 05.04.2026	виконано
6.	Проведення розрахунків техніко-економічної ефективності проєктних рішень	06.04.2026 — 19.04.2026	виконано
7.	Оформлення текстової частини пояснювальної записки та графічного матеріалу	20.04.2026 — 20.05.2026	виконано

Студент _____ (підпис) В.С. Малигін

Керівник роботи _____ (підпис) В.Л. Прихно

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ (підпис) С.В. Башлій

РЕФЕРАТ

Малигін В.С. Розробка схеми електропостачання металургійного цеху. – Запоріжжя: ЗНУ, 2026. – 60 с., 20 табл., 2 рис., 17 джерел.

Об’єкт дослідження – система електропостачання цеху точного лиття металургійного підприємства.

Мета роботи – комплексна організація надійного, безпечного та економічно обґрунтованого електропостачання цеху точного лиття шляхом впровадження сучасних схемних рішень, засобів автоматики, енергоефективного обладнання та верифікації інженерних розрахунків за європейськими методиками.

Методи дослідження – аналітичні методи розрахунку електричних навантажень, струмів короткого замикання, втрат потужності та електроенергії; методи математичного і комп’ютерного моделювання систем електропостачання та освітлення (SIMARIS Design, DIALux evo).

Результати та їх новизна: на основі аналізу технологічного процесу визначено категорії надійності електроприймачів. Спроєктовано схему внутрішньоцехової мережі 400/230 В за системою TN-S. До встановлення прийнято двотрансформаторну підстанцію з енергоефективними трансформаторами потужністю 2×800 кВА. Забезпечення показників якості електроенергії досягається за рахунок технічних параметрів трансформаторного обладнання. Виконано розрахунок робочого та аварійного освітлення, розроблено заходи з охорони праці. Виконано техніко-економічний аналіз, згідно з яким капітальні вкладення становлять 10,88 млн. грн.

Галузь використання – проєктні організації, відділи головного енергетика металургійних та машинобудівних підприємств при реконструкції або проєктуванні нових систем електропостачання цехів.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, МЕТАЛУРГІЙНИЙ ЦЕХ, ТРАНСФОРМАТОРНА ПІДСТАНЦІЯ, СТРУМИ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ, SIMARIS DESIGN, ОСВІТЛЕННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ 4
ЗМІСТ 5
ВСТУП 7
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА 9
1.1 Опис технологічного процесу цеху точного лиття та характеристика основного обладнання 9
1.2 Характеристика навколишнього середовища, умов розміщення та пожежо- і вибухонебезпечності зон цеху 11
1.3 Класифікація ЕП за надійністю електропостачання 12
1.4 Вихідні дані для проєктування 15
2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА 17
2.1 Вибір напруги живлення цехової мережі та місця розміщення КТП . 17
2.2 Вибір схеми цехової мережі та варіанта конструктивного виконання 20
2.3 Визначення розрахункового силового навантаження на першому рівні електропостачання 20
2.3.1 Розрахунок Ливарної машини-1: 21
2.4 Визначення розрахункового силового навантаження на другому рівні електропостачання 22
2.4.1 Розрахунок силового навантаження ШРМ-1 23
2.5 Визначення розрахункового силового навантаження на третьому рівні електропостачання 24
2.6 Розрахунок освітлювальних навантажень 25
2.6.1 Розрахунок робочого освітлення ливарного цеху 25
2.6.2 Особливості комп'ютерного моделювання освітлення у середовищі DIALux evo 27
2.6.3 Розрахунок аварійного освітлення та освітлення території ... 28
2.6.4 Зведена таблиця розрахунку освітлювальних навантажень цеху 29
2.7 Визначення сумарних навантажень цеху 29
2.8 Визначення пікових струмів ЕП та розподільчих пунктів 30
2.8.1 Розрахунок пікових струмів для ШРМ-1. 31
2.9 Вибір кількості, типу та номінальної потужності силових трансформаторів 32
2.10 Визначення потужності низьковольтних конденсаторних установок 34
2.11 Вибір перерізу провідників цехової мережі 35
2.11.1 Розрахунок перерізу кабелю лінії «ГРЩ-2.ЩОГ». 36

2.11.2 Вибору шинопроводу для вузла «ШММ-1» 37
2.12 Вибір перерізу провідників розподільної мережі 38
2.12.1 Вибір перерізу провідника розподільної мережі для поз. 1 ... 39
2.13 Розрахунок струмів короткого замикання (КЗ) 40
2.13.1 Розрахунок трифазних струмів КЗ 40
2.13.2 Розрахунок однофазних струмів КЗ 41
2.13.3 Розрахунок струмів точки КЗ «К1 (Шини РУНН 0.4 кВ)». 41
2.14 Вибір апаратів захисту 44
2.14.1 Розрахунок та вибір автоматичного вимикача для Ввідний автомат ГРЩ (поз. Шини РУНН). 45
2.15 Порівняння результатів розрахунку системи електропостачання ... 46
3 ОХОРОНА ПРАЦІ 47
3.1 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях 47
3.1.1 Правові та організаційні основи охорони праці 47
3.1.2 Забезпечення електробезпеки з урахуванням специфіки цеху 47
3.1.3 Розрахунок захисного заземлення цехової трансформаторної підстанції 48
3.1.4 Пожежна безпека об’єкта 51
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ 53
4.1 Визначення кошторисної вартості елементів системи електропостачання 53
4.1.1 Розрахунок кошторису 53
4.2 Планування електропостачання цеху та розрахунок втрат 54
4.2.1 Розрахунок втрат 54
4.3 Розрахунок витрат на утримання та експлуатацію обладнання 55
4.3.1 Розрахунок витрат 56
4.4 Техніко-економічні показники системи електропостачання 56
4.4.1 Розрахунок капітальних вкладень 56
ВИСНОВКИ 58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 59
ДОДАТКИ 61
ДОДАТОК А — ТАБЛИЦІ 62
ДОДАТОК Б — ПРЕЗЕНТАЦІЯ 69

ВСТУП

Процеси модернізації промислового комплексу України на сучасному етапі нерозривно пов'язані з необхідністю підвищення енергоефективності та надійності електропостачання металургійних підприємств. Особливої ваги це питання набуває для об'єктів із безперервними та високотехнологічними процесами, одним із прикладів є цех точного лиття зі встановленою потужністю основного обладнання 1321 кВт та двозмінним режимом роботи. Специфіка такого виробництва полягає у функціонуванні електроприймачів (ЕП) I та II категорій надійності. Оскільки переривання їхнього живлення загрожує не лише важкими технологічними аваріями, а й небезпекою для життя персоналу, це зумовлює необхідність застосування надійних двотрансформаторних підстанцій (КТП) із секціонуванням шин та пристроями автоматичного введення резерву (АВР).

Додатковим чинником, який визначає сучасні вимоги до проєктування таких промислових мереж в умовах євроінтеграції, є потреба гармонізації чинних Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) із європейськими стандартами. Насамперед це стосується нормативів серії ДСТУ EN 60364 (електрична безпека) та ДСТУ EN 50160, які регламентують контроль якості напруги в умовах значного впливу вищих гармонік, що генеруються індукційними печами. Крім того, відповідно до стандартів енергетичного менеджменту ISO 50001 та європейських директив EcoDesign Tier 2, які безпосередньо регламентують вимоги до трансформаторного обладнання (згідно з гармонізованим ДСТУ EN 50708-2-1:2022), доцільним є застосування енергоефективних сухих трансформаторів напругою 10/0,4 кВ, використання яких дозволяє суттєво мінімізувати втрати потужності, знизити пожежні ризики та підвищити рівень пожежної безпеки.

З огляду на це, головною метою цієї кваліфікаційної роботи є комплексна організація надійного, безпечного та економічно обґрунтованого електропостачання цеху точного лиття шляхом впровадження сучасних схемних рішень, засобів автоматики, енергоефективного обладнання та верифікації інженерних розрахунків за європейськими методиками.

Для реалізації поставленої мети у дослідженні було визначено та послідовно вирішено такі науково-практичні завдання:

- проаналізувати технологічний процес цеху та виконати класифікацію електроприймачів за категорійністю згідно з вимогами ПУЕ;

- розрахувати електричні навантаження силового обладнання та систем освітлення за допомогою комбінованого методу, що поєднує підходи ДСТУ 9324:2025 (Додаток А) та IEC 60364-8-1;
- обґрунтувати оптимальну кількість і потужність сухих силових трансформаторів КТП 10/0,4 кВ відповідно до вимог директиви EcoDesign Tier 2;
- визначити параметри засобів компенсації реактивної потужності та систем захисту мережі від деструктивного впливу вищих гармонік;
- спроєктувати внутрішньоцехову електричну мережу напругою 0,4 кВ із вибором відповідних кабелів та сучасної захисно-комутаційної апаратури;
- виконати розрахунок струмів короткого замикання за стандартом IEC 60909 для перевірки стійкості обраного обладнання;
- розробити комплекс заходів з охорони праці, зокрема розрахувати захисне заземлення.

Об’єктом дослідження у даній роботі виступає процес розподілу, трансформації та споживання електричної енергії на промислових підприємствах металургійного типу з безперервним циклом виробництва. У свою чергу, предмет дослідження охоплює електричну схему, технічні параметри, режими роботи, а також сучасні засоби автоматики та захисне обладнання системи електропостачання цеху точного лиття.

Практична цінність отриманих результатів полягає у створенні технічно доцільної та високоефективної системи електропостачання конкретного цеху, що гарантує нормативну надійність живлення та мінімізує сумарні втрати енергії. Запропоновані інженерні та проєктні рішення мають універсальний характер, тому можуть бути успішно впроваджені під час реконструкції чи модернізації аналогічних об’єктів металургійної галузі України.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Опис технологічного процесу цеху точного лиття та характеристика основного обладнання

На рисунку 1.1 представлений план розташування устаткування цеху.



Рисунок 1.1 — Розташування основного технологічного устаткування на плані цеху точного лиття

Цех точного лиття спеціалізується на серійному та дрібносерійному виробництві виливків із вуглецевих і легованих сталей методом лиття по моделях, що виплавляються, а також деталей з високоміцних чавунів та спеціальних жароміцних сплавів. Виробничий процес організований за потоковим принципом і починається в ізольованих зонах першого поверху допоміжного приміщення. Там розташована спеціалізована модельна дільниця та склади вихідних матеріалів. В умовах температурного контролю та кондиціонування готуються воскоподібні модельні суміші та піщано-смоляні склади. Ізоляція цієї зони капітальною стіною від плавильного відділення є важливою технологічною вимогою для забезпечення необхідної якості поверхні майбутніх моделей.

Підготовлена модельна маса надходить до ливарних машин (поз. 1–8), які у даному технологічному циклі виконують функцію автоматизованих шприц-машин та піскострільних установок. Вони здійснюють запресовування воскового або полімерного складу у прес-форми під тиском для отримання точних копій майбутніх деталей. Після охолодження воскові моделі збираються у модельні блоки і передаються на дільницю нанесення вогнетривкого

покриття, яка територіально розміщена між допоміжними приміщеннями та сушильним відділенням. Процес занурення блоків у баки із керамічною суспензією та їх подальше обсипання кварцовим піском здійснюється за допомогою маніпуляторів та мішалок, приводи яких живляться від загальноцехових збірок малої потужності. Після нанесення кожного шару керамічної оболонки блоки проходять термічну сушку в сушильних шафах (поз. 26, 27) із програмним управлінням рівнем вологості.

Сформовані керамічні оболонки завантажуються в електротермічні печі (поз. 12, 13), де за температури 120–150 °С відбувається витоплювання модельного складу. Отримана рідка маса направляється на регенерацію для повторного використання, а звільнені від воску порожні керамічні форми переміщуються до електротермічних печей камерного типу (поз. 32, 33). У цих агрегатах здійснюється випалювання оболонок при температурі 900–1000 °С. Ця операція забезпечує повне вигоряння залишків органіки та надає керамічній формі необхідної механічної міцності для витримування термічних і механічних навантажень під час заливки рідкого металу.

Для виготовлення відповідальних деталей, зокрема лопаток газотурбінних двигунів із жароміцних сплавів, застосовується заливка у вакуумі. Цей процес вимагає заливки розплаву у попередньо розігріту форму. Тому прожарені оболонки безпосередньо перед заливкою переносяться до електротермічних печей підігріву (поз. 22–25), які встановлені поруч із вакуумними установками та підтримують температуру форм на рівні 800–900 °С. Плавка та заливка спецсплавів здійснюється в індукційних електропечах (поз. 34, 35). Ці установки обладнані шлюзовими камерами та водоохолоджуваними мідними штоками з точними механізмами витяжки, що забезпечує процес направленої або монокристалічної кристалізації. Раптове знеструмлення цих печей не допускається, оскільки це призводить до утворення браку металу, застигання розплаву в тиглі та руйнування вакуумних систем.

Плавка вуглецевих і легованих сталей та високоміцних чавунів серійного виробництва здійснюється у групі плавильних електропечей (поз. 14–21). Для забезпечення контролю хімічного складу металу перед кожною заливкою проводиться експрес-аналіз. Плавильник відбирає пробу рідкого металу і через систему цехової пневмопошти оперативно відправляє її на другий поверх допоміжних приміщень, де функціонує лабораторія спектрального аналізу. Використання пневмопошти усуває необхідність ручного транспортування зразків, дозволяючи лаборантам у короткий час визначити склад та передати команду на коригування розплаву. Також на другому поверсі базується інже-

нерно-технічний персонал, технологи АСУТП та відділ технічного контролю, робочі місця яких розміщені окремо від виробничої зони.

Логістика важких вантажів у цеху забезпечується кран-балками (поз. 37–39), які функціонують у режимі з високим коефіцієнтом використання. Це зумовлено тим, що крани інтегровані в єдиний технологічний процес. Вони з мінімальними простоями транспортують ковші з рідким металом від плавильних печей до заливальних майданчиків, переміщують піддони з керамічними оболонками від печей випалювання, а після завершення кристалізації транспортують залиті форми на дільницю очищення.

Після заливки та повного охолодження виливки підлягають звільненню від керамічної оболонки та залишків стержнів. Деталі завантажуються в очисні барабани (поз. 9–11) та галтувальний барабан (поз. 36), де відбувається механічне очищення їхньої поверхні від формувальної суміші та окалини. Очищені вироби проходять фінальну стадію термічної обробки в електрогартувальних печах (поз. 28–31). У цих агрегатах здійснюється нормалізація, гартування або відпуск металу, що необхідно для зняття внутрішніх ливарних напружень та формування заданих механічних властивостей готової продукції.

Завершальним елементом технологічного комплексу, який впливає на безпеку та безперервність процесу, є система витяжної вентиляції. Вона реалізується вентиляторами (поз. 40–44). Ці установки забезпечують роботу витяжних зонтів над індукційними плавильними печами та дільницями витоплювання воску. Надійне видалення шкідливих газів, продуктів горіння полімерів та дрібнодисперсного кварцового пилу є обов'язковою нормативною вимогою для захисту здоров'я персоналу та дотримання екологічних стандартів ливарного виробництва.

1.2 Характеристика навколишнього середовища, умов розміщення та пожежо- і вибухонебезпечності зон цеху

Вибір електрообладнання, марок кабелів та способів прокладання електричних мереж визначається умовами навколишнього середовища технологічних дільниць. Класифікація середовищ у цеху виконана відповідно до вимог ПУЕ (Глава 1.1), а визначення класів пожежо- та вибухонебезпечних зон — згідно з вимогами НПАОП 40.1-1.32-01 («Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок»).

Технологічний процес цеху точного лиття характеризується різними умовами середовища, що вимагає диференційованого підходу до вибору ступеня захисту оболонок (IP) згідно з ДСТУ EN 60529.

Основне виробниче приміщення (плавильно-заливальна дільниця, термообробка, вибивка). Згідно з ПУЕ (п. 1.1.10 та 1.1.11), середовище класифікується як жарке (температура перевищує +35 °С протягом тривалого часу) та запилене. Основний пил, що виділяється під час вибивки та транспортування форм (кварцовий пісок, кераміка, металева окалина), є негорючим. Відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.32-01, це приміщення не утворює вибухонебезпечних зон. З огляду на санітарні норми боротьби з дрібнодисперсним пилом, у цеху застосовується гідроприбирання будівельних конструкцій та обладнання. У зв'язку з цим, для обладнання, розташованого в зонах гідроприбирання, рекомендується ступінь захисту не нижче IP54–IP65 залежно від умов встановлення: для електродвигунів — IP54/IP55, а для світильників та шаф керування слід застосовувати виконання не нижче IP65. Для прокладання кабельних ліній поблизу термічного обладнання слід застосовувати кабелі з термостійкою ізоляцією або виконувати теплове екранування.

Модельна дільниця (1-й поверх допоміжного приміщення). На цій дільниці відбувається приготування модельного складу та витоплювання воску. Технологічний процес пов'язаний із використанням горючих рідин (розплавлені парафіни, стеарин, віск) із температурою спалаху понад +61 °С. Згідно з п. 4.4.2 НПАОП 40.1-1.32-01, така дільниця може бути віднесена до пожежонебезпечної зони класу П-I. Електрообладнання та апаратура керування в цій зоні повинні відповідати вимогам до електроустановок у пожежонебезпечних зонах; доцільно застосовувати обладнання зі ступенем захисту не менше IP44 (а з урахуванням загальних цехових умов — IP54).

Експрес-лабораторія, приміщення АСУТП та ВТК (2-й поверх допоміжного приміщення). Середовище класифікується як нормальне. Вибухо- та пожежонебезпечні зони відсутні. Для цих приміщень допускається застосування електрообладнання загальнопромислового виконання зі ступенем захисту не нижче IP20 (рекомендовано IP20–IP40 для приладів та IP31/IP54 для розподільних щитків).

1.3 Класифікація ЕП за надійністю електропостачання

Класифікація ЕП цеху точного лиття щодо надійності їхнього електропостачання є важливим етапом проєктування системи внутрішньоцехового розподілу енергії. Вона визначає структуру побудови головної схеми електричних з'єднань, вибір кількості та потужності трансформаторів, а також конфігурацію пристроїв АВР. Основною нормативною базою для класифікації за категоріями надійності є ПУЕ (Розділ 1, Глава 1.2). Додатково враховуються вимоги національних стандартів ДСТУ EN 60364-1 та ДСТУ EN 60364-5-56 щодо систем безпеки та резервування живлення.

Відповідно до пункту 1.2.17 ПУЕ, до особливої групи першої категорії відносяться ЕП, безперервна робота яких необхідна для безаварійної зупинки виробництва з метою запобігання загрозі життю людей, вибуху, пожежі або пошкодженню дорогого основного обладнання. У досліджуваному цеху до цієї групи віднесені індукційні вакуумні електропечі (поз. 34, 35). Технологічний аналіз процесу вакуумного лиття показує, що раптове тривале припинення живлення індукторів та вакуумних насосів у момент плавки або направленої кристалізації призводить до порушення режиму роботи вакуумної системи, що створює ризик аварійної ситуації та пошкодження обладнання. Крім того, зупинка систем охолодження тигля загрожує виходом з ладу печі. Для таких установок доцільним є застосування автономних джерел живлення систем керування та охолодження на час аварійної зупинки.

До першої категорії надійності, згідно з вимогами пункту 1.2.17 та 1.2.18 ПУЕ, належать ЕП, перерва в постачанні електроенергії яких може спричинити загрозу життю людей або значні матеріальні збитки внаслідок пошкодження обладнання чи масового браку продукції. У цю групу входять вентилятори витяжних систем цеху (поз. 40–44). Зупинка промислової вентиляції у плавильному відділенні та на дільниці витоплювання воску може призвести до перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) токсичних газів і дрібнодисперсного кварцового пилу, що створює загрозу здоров'ю персоналу. Відповідно до положень ДСТУ EN 60364-5-56 щодо систем безпеки, живлення таких споживачів має відновлюватися автоматично за мінімальний час (схема з АВР на стороні 0,4 кВ).

До другої категорії надійності, відповідно до пункту 1.2.17 та 1.2.19 ПУЕ, відносяться ЕП, перерва в електропостачанні яких призводить до недовідпуску продукції, простою робочого персоналу, технологічного обладнання та промислового транспорту. До цієї категорії віднесено основний масив технологічного обладнання цеху: ливарні машини (поз. 1–8), електротермічні печі витоплювання воску (поз. 12, 13), плавильні електропечі серійного виробництва (поз. 14–21), печі підігріву форм (поз. 22–25), сушильні шафи (поз. 26, 27), електрогартувальні печі (поз. 28–31) та печі випалювання керамічних оболонок (поз. 32, 33). Тимчасовий простій цих агрегатів не несе прямої загрози людському життю, проте порушує потоковість виробництва, спричиняє охолодження розплаву в тиглях, брак керамічних форм через розтріскування при порушенні температурного графіка та економічні втрати. Сюди ж відносяться кран-балки (поз. 37–39), оскільки їхня зупинка унеможливлює транспортування ковшів із рідким металом. Для ЕП другої категорії допускається перерва в електропостачанні на час, необхідний для перемикань черговим персоналом, що відповідає сучасним підходам до забезпечення безперервності технологічних процесів.

Наявність двотрансформаторної КТП із АВР дозволяє забезпечити їхнє живлення з мінімальною перервою.

До третьої категорії надійності, згідно з пунктом 1.2.17 та 1.2.20 ПУЕ, відносяться ЕП, які не підпадають під визначення першої чи другої категорій. У цеху це очисні барабани (поз. 9–11) та галтувальний барабан (поз. 36). Дане обладнання виконує механічні операції над уже твердими виливками. Зупинка цих барабанів не порушує хіміко-фізичні процеси і не зупиняє роботу плавильного відділення завдяки наявності буфера незавершеного виробництва. Для таких споживачів допускається перерва в електропостачанні на час усунення пошкодження терміном до 1 доби.

Окремого аналізу потребують допоміжні приміщення цеху. Перший поверх, де розташована модельна дільниця, що забезпечує постачання воскових блоків, відноситься до другої категорії надійності. На другому поверсі експрес-лабораторія спектрального аналізу, системи АСУТП та цехова пневмопошта також класифікуються за другою категорією. Це обґрунтовано тим, що зупинка лабораторного обладнання або компресора пневмопошти робить неможливим оперативний контроль плавки у печах, що призводить до зупинки плавильного відділення. Загальне інженерне обладнання допоміжного блоку (кондиціонування, опалення) відноситься до третьої категорії. Винятком є мережа аварійного та евакуаційного освітлення, яка згідно з ДБН В.2.5-28:2018 та вимогами ДСТУ EN 60364-5-56 до систем безпеки класифікується за першою категорією надійності та отримує живлення від шин АВР або вбудованих акумуляторів.

Таблиця 1.1 — Надійність електропостачання електроприймачів цеху

Поз. на плані	Найменування електроприймача	Категорія надійності	Нормативне обґрунтування	Технологічна причина класифікації
1	2	3	4	5
1–4	Ливарна машина	II	ПУЕ п. 1.2.19	Запобігання зупинці потокового виробництва моделей
5–8	Ливарна машина	II	ПУЕ п. 1.2.19	Запобігання зупинці потокового виробництва моделей
9–11	Очисний барабан	III	ПУЕ п. 1.2.20	Наявність проміжного часового буфера для обробки
12, 13	Електротермічна піч	II	ПУЕ п. 1.2.19	Запобігання браку керамічних оболонок
14–21	Плавильна електропіч	II	ПУЕ п. 1.2.19	Запобігання охолодженню металу та недовідпуску продукції

1	2	3	4	5
22–25	Електротермічна піч	II	ПУЕ п. 1.2.19	Забезпечення температурного режиму форм перед заливкою
26, 27	Сушильна шафа	II	ПУЕ п. 1.2.19	Забезпечення температурно-вологісного графіка сушіння
28–31	Електроагрувальна піч	II	ПУЕ п. 1.2.19	Забезпечення режиму термообробки виливків
32, 33	Електротермічна піч	II	ПУЕ п. 1.2.19	Дотримання графіка випалювання кераміки
34, 35	Електропіч індукційна	I (Особлива)	ПУЕ п. 1.2.18	Запобігання ризику аварійної ситуації та пошкодженню вакуумної системи
36	Галтувальний барабан	III	ПУЕ п. 1.2.20	Механічне очищення деталей, простій не є критичним
37–39	Кран-балка	II	ПУЕ п. 1.2.19	Забезпечення транспортування ковшів з рідким металом
40–44	Вентилятор	I	ПУЕ п. 1.2.18, ДСТУ EN 60364-5-56	Захист персоналу від можливого перевищення ГДК газів
45	Модельна дільниця	II	ПУЕ п. 1.2.19	Забезпечення матеріалами потокового циклу цеху
46	Лабораторія, АСУТП	II	ПУЕ п. 1.2.19	Забезпечення матеріалами потокового циклу цеху

1.4 Вихідні дані для проєктування

Основні вихідні дані для розробки системи електропостачання цеху точного лиття ґрунтуються на технічному завданні до дипломного проєкту і містять базові електротехнічні, режимні та геометричні параметри підприємства.

Електротехнічні та режимні параметри:

- Встановлена потужність технологічного обладнання основного цеху ($P_{\text{цех}}$): 1321 кВт
- Напруга живлення цехової підстанції ($U_{\text{ВН}}$): 10 кВ
- Напруга розподільної мережі ($U_{\text{НН}}$): 0,40 кВ
- Струм трифазного КЗ з боку вищої напруги ($I_{\text{КЗ}}$): 9,60 кА
- Час використання максимуму навантаження ($T_{\text{НБ}}$): 5200 год
- Кількість робочих змін ($N_{\text{зм}}$): 2
- Робочих годин на тиждень ($N_{\text{год тиж}}$): 66 год
- Фактична температура навколишнього середовища ззовні ($T_{\text{сер}}$): 12 °C
- Фактична температура навколишнього середовища всередині ($T_{\text{сер}}$): 45 °C.

Архітектурно-будівельні параметри:

- Розміри основного виробничого корпусу ($L \times W \times H$): $48 \times 30 \times 9$ м
- Допоміжне приміщення: двоповерхове, кожен ($L \times W \times H$): $5 \times 30 \times 4$ м.

Детальний перелік електроприймачів цеху, їхні номінальні електричні характеристики (потужність $p_{\text{н}}$, коефіцієнт потужності $\cos\varphi$, коефіцієнт використання $k_{\text{В}}$, коефіцієнт завантаження $k_{\text{з}}$) наведено у таблиці нижче.

Таблиця 1.2 — Вихідні дані цеху точного лиття і допоміжних приміщень

Поз.	Назва ЕП	$p_{\text{н}}$, кВт	$\cos\varphi$	$k_{\text{з}}$	$k_{\text{В}}$
1–4	Ливарна машина	22,00	0,82	0,90	0,90
5–8	Ливарна машина	26,00	0,85	0,90	0,90
9–11	Очисний барабан	17,00	0,95	0,90	0,60
12, 13	Електротермічна піч	30,00	1,00	0,80	0,70
14–21	Плавильна електропіч	55,00	1,00	0,75	0,80
22–25	Електротермічна піч	24,00	1,00	0,80	0,90
26, 27	Сушильна шафа	12,00	0,95	0,70	0,70
28–31	Електроагрувальна піч	19,00	1,00	0,80	0,85
32, 33	Електротермічна піч	75,00	1,00	0,90	0,93
34, 35	Електропіч індукційна	60,00	1,00	0,85	0,87
36	Галтувальний барабан	17,00	0,96	0,85	0,75
37–39	Кран-балка	10,00	0,88	0,80	0,70
40–44	Вентилятор	13,00	0,85	0,70	0,65
45	Модельна дільниця	25,00	0,85	0,80	0,60
46	Лабораторія, АСУТП	18,00	0,92	0,75	0,70

2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Вибір напруги живлення цехової мережі та місця розміщення КТП

Вибір номінальної напруги внутрішньоцехової розподільної мережі визначається складом ЕП, їхньою потужністю та вимогами до безпеки експлуатації. Оскільки переважна більшість технологічного обладнання цеху (плавильні печі, ливарні машини, вентилятори, приводи кранів) є трифазними споживачами, а освітлювальні установки, лабораторне обладнання та прилади автоматики вимагають однофазного живлення, для проєктування приймається трифазна чотирипровідна мережа 400/230 В змінного струму частотою 50 Гц. Такий рівень напруги дозволяє забезпечити живлення силового та освітлювального навантаження від спільної системи трансформаторного живлення цехової підстанції, що є техніко-економічно доцільним рішенням. З метою забезпечення електробезпеки персоналу та електромагнітної сумісності чутливого електронного обладнання лабораторії й АСУТП, передбачається застосування системи заземлення типу TN-S із глухозаземленою нейтраллю джерела живлення.

Для визначення оптимального місця розташування цехової КТП виконано розрахунок координат центру електричних навантажень (ЦЕН). Початок умовної системи координат суміщено з нижнім лівим кутом плану цеху.

Координати ЦЕН за активною потужністю і при врахуванні коефіцієнтів використання ЕП відносно осей координат обчислюють наступним чином:

$$X_{\text{ц}} = \frac{\sum p_{\text{н}_i} \cdot k_{\text{В}_i} \cdot x_{\text{і}}}{\sum p_{\text{н}_i} \cdot k_{\text{В}_i}} \tag{2.1}$$

$$Y_{\text{ц}} = \frac{\sum p_{\text{н}_i} \cdot k_{\text{В}_i} \cdot y_{\text{і}}}{\sum p_{\text{н}_i} \cdot k_{\text{В}_i}} \tag{2.2}$$

де

$p_{\text{н}}$ - установлена активна потужність і-го ЕП;

$k_{\text{В}}$ - коефіцієнт використання і-го ЕП;

x, y - координати і-го ЕП.

Результати обчислень зводяться у таблицю нижче.

Таблиця 2.1 — Координати ЕП та ЦЕН

Поз.	Назва ЕП	$p_н$, кВт	$k_В$	x, м	y, м
1	2	3	4	5	6
1	Ливарна машина	22,00	0,90	5,00	4,50
2	Ливарна машина	22,00	0,90	10,00	5,00
3	Ливарна машина	22,00	0,90	15,00	5,50
4	Ливарна машина	22,00	0,90	27,00	8,50
5	Ливарна машина	26,00	0,90	4,50	21,00
6	Ливарна машина	26,00	0,90	9,50	22,50
7	Ливарна машина	26,00	0,90	14,00	25,00
8	Ливарна машина	26,00	0,90	19,00	25,50
9	Очисний барабан	17,00	0,60	4,00	11,00
10	Очисний барабан	17,00	0,60	9,00	11,00
11	Очисний барабан	17,00	0,60	14,00	11,00
12	Електротермічна піч	30,00	0,70	43,00	21,00
13	Електротермічна піч	30,00	0,70	46,50	21,00
14	Плавильна електропіч	55,00	0,80	2,50	3,00
15	Плавильна електропіч	55,00	0,80	7,50	3,50
16	Плавильна електропіч	55,00	0,80	12,50	4,00
17	Плавильна електропіч	55,00	0,80	17,50	4,50
18	Плавильна електропіч	55,00	0,80	2,50	19,00
19	Плавильна електропіч	55,00	0,80	7,00	20,50
20	Плавильна електропіч	55,00	0,80	12,00	22,00
21	Плавильна електропіч	55,00	0,80	17,00	23,50
22	Електротермічна піч	24,00	0,90	28,50	25,00
23	Електротермічна піч	24,00	0,90	32,00	25,00
24	Електротермічна піч	24,00	0,90	35,50	25,00
25	Електротермічна піч	24,00	0,90	39,00	25,00
26	Сушильна шафа	12,00	0,70	43,00	26,00
27	Сушильна шафа	12,00	0,70	46,50	26,00
28	Електроагрувальна піч	19,00	0,85	44,50	11,00
29	Електроагрувальна піч	19,00	0,85	44,50	8,00
30	Електроагрувальна піч	19,00	0,85	44,50	5,00
31	Електроагрувальна піч	19,00	0,85	44,50	2,00
32	Електротермічна піч	75,00	0,93	37,00	10,00
33	Електротермічна піч	75,00	0,93	30,50	10,00
34	Електропіч індукційна	60,00	0,87	37,00	20,00
35	Електропіч індукційна	60,00	0,87	30,50	20,00
36	Галтувальний барабан	17,00	0,75	20,00	11,00
37	Кран-балка	10,00	0,70	23,50	22,50

1	2	3	4	5	6
38	Кран-балка	10,00	0,70	23,50	7,50
39	Кран-балка	10,00	0,70	33,50	28,00
40	Вентилятор	13,00	0,65	30,50	4,00
41	Вентилятор	13,00	0,65	41,50	0,00
42	Вентилятор	13,00	0,65	8,50	0,00
43	Вентилятор	13,00	0,65	41,50	30,00
44	Вентилятор	13,00	0,65	8,50	30,00
45	Модельна дільниця	25,00	0,60	50,50	15,00
46	Лабораторія, АСУТП	18,00	0,70	50,50	15,00
Координати ЦЕН ($n = 46$ шт) з урахуванням $k_{\text{В}}$:				23,30	14,63

За результатами обчислень з урахуванням розрахункових електричних навантажень та просторового розташування кожного ЕП, координати ЦЕН становлять X = 23,30 м та Y = 14,63 м. Отримана точка розташована у геометричному центрі виробничого цеху, безпосередньо на головному транспортному проїзді між зонами обслуговування кран-балок.

Спорудження внутрішньоцехової підстанції у точці ЦЕН або поблизу неї є технічно недоцільним, оскільки це призведе до порушення транспортних потоків цеху та заважатиме роботі підйомно-транспортного обладнання. Крім того, розміщення КТП всередині плавильно-заливального відділення ускладнюється наявністю запиленого середовища та регулярним гідроприбиранням. Використання цехових трансформаторів сухого типу зі зниженими втратами вимагає забезпечення інтенсивного повітрообміну, що важко реалізувати в умовах внутрішньоцехового розміщення без додаткових систем вентиляції та захисного виконання оболонок.

Враховуючи вищенаведені фактори, а також наявність напрямку підведення живлення 10 кВ, найдоцільнішим рішенням є спорудження прибудованої трансформаторної підстанції. Вона розташовуватиметься вздовж північної стіни цеху, наближено до осі X = 20...25 м. Таке просторове рішення дозволяє скоротити довжину високовольтних живильних кабельних ліній, уникнути прокладання транзитних магістралей територією цеху, а також забезпечити сприятливі умови охолодження трансформаторів. Прибудоване виконання підстанції також забезпечує підвищення пожежної безпеки та спрощує доступ до обладнання для технічного обслуговування. Попри незначне зміщення підстанції відносно розрахункової координати ЦЕН, таке розташування дозволяє зменшити втрати напруги в мережі 0,40 кВ.

2.2 Вибір схеми цехової мережі та варіанта конструктивного виконання

Схема внутрішньоцехової електричної мережі розроблена з огляду на величину розрахункових електричних навантажень, категорійність ЕП та їхнє просторове розміщення. Запропоноване техніко-економічне рішення спрямоване на мінімізацію витрат провідникового матеріалу, зниження втрат напруги та забезпечення високої надійності живлення. При проєктуванні також враховано вимогу щодо гнучкості мережі, що дозволить у майбутньому здійснювати модернізацію або переміщення технологічного обладнання без суттєвої перебудови системи електропостачання.

Для реалізації цих вимог у цеху точного лиття застосовано змішану (радіально-магістральну) схему живлення. Такий підхід уможливив використання збірних комплектних конструкцій, зокрема шинопроводів, що суттєво оптимізує монтаж та знижує експлуатаційні витрати.

Відповідно до прийнятої конфігурації, основні групи технологічних споживачів II та III категорій підключені до магістральних розподільних шинопроводів (ШРМ-1…3). Також до них підключені системи вентиляції I категорії, вимоги до надійності яких забезпечуються міжсекційним АВР. Водночас ЕП особливої групи та найпотужніші ЕП живляться по радіальних лініях: 32 та 33 безпосередньо від головного розподільчого щита низької напруги (ГРЩ) підстанції, а 34 та 35 - через щит особливої категорії (ЩОГ), який має можливість перемикання на третє незалежне джерело — генератор.

2.3 Визначення розрахункового силового навантаження на першому рівні електропостачання

На першому рівні системи електропостачання навантаження на живильну лінію створюється окремим ЕП. Для кожного приєднання розрахункові значення активної p_p, реактивної q_p та повної s_p потужностей визначаються на основі номінальної потужності $p_{\text{н}}$ та індивідуального коефіцієнта завантаження $k_{\text{з}}$ за такими формулами:

$$p_p = k_{\text{з}} \cdot p_{\text{н}} \tag{2.3}$$

$$q_p = p_p \cdot \operatorname{tg}\varphi \tag{2.4}$$

$$s_p = \sqrt{p_p^2 + q_p^2} \tag{2.5}$$

де

$\operatorname{tg}\varphi$ — коефіцієнт реактивної потужності, який визначається через номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi$:

$$\operatorname{tg}\varphi = \operatorname{tg}[\arccos(\cos\varphi)] \tag{2.6}$$

Розрахунковий струм лінії живлення I_p для трифазного електроприймача обчислюється за формулою:

$$I_p = \frac{s_p}{\sqrt{3}U_{\text{НН}}} \tag{2.7}$$

2.3.1 Розрахунок Ливарної машини-1:

Коефіцієнт реактивної потужності:

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \operatorname{tg}[\arccos(0{,}82)] = 0{,}7$$

Розрахункова активна потужність:

$$p_{\text{р}} = k_{\text{з}} \cdot p_{\text{н}} = 0{,}9 \cdot 22 = 19{,}8 \ \ \text{кВт}$$

Розрахункова реактивна потужність:

$$q_{\text{р}} = p_{\text{р}} \cdot \operatorname{tg}\varphi = 19{,}8 \cdot 0{,}7 = 13{,}82 \ \ \text{кВАр}$$

Розрахункова повна потужність:

$$s_{\text{р}} = \sqrt{p_{\text{р}}^2 + q_{\text{р}}^2} = \sqrt{19{,}8^2 + 13{,}82^2} = 24{,}15 \ \ \text{кВА}$$

Розрахунковий струм приєднання:

$$I_{\text{р}} = \frac{s_{\text{р}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}}} = \frac{24{,}15}{\sqrt{3} \cdot 0{,}4} = 34{,}85 \ \ \text{А}$$

Обчислені параметри розрахункових навантажень для кожного технологічного та допоміжного електроприймача цеху зведено до таблиці нижче.

Таблиця 2.2 — Розрахункові навантаження ЕП

Поз.	Найменування ЕП	$p_{\text{н}}$, кВт	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	p_p, кВт	q_p, кВАр	s_p, кВА	I_p, А
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1–4	Ливарна машина	22,00	0,82	0,70	19,80	13,82	24,15	34,85
5–8	Ливарна машина	26,00	0,85	0,62	23,40	14,50	27,53	39,74
9–11	Очисний барабан	17,00	0,95	0,33	15,30	5,03	16,11	23,25
12–13	Електротермічна піч	30,00	1,00	0,00	24,00	0,00	24,00	34,64

1	2	3	4	5	6	7	8	9
14–21	Плавильна електропіч	55,00	1,00	0,00	41,25	0,00	41,25	59,54
22–25	Електротермічна піч	24,00	1,00	0,00	19,20	0,00	19,20	27,71
26–27	Сушильна шафа	12,00	0,95	0,33	8,40	2,76	8,84	12,76
28–31	Електроагрувальна піч	19,00	1,00	0,00	15,20	0,00	15,20	21,94
32–33	Електротермічна піч	75,00	1,00	0,00	67,50	0,00	67,50	97,43
34–35	Електропіч індукційна	60,00	1,00	0,00	51,00	0,00	51,00	73,61
36	Галтувальний барабан	17,00	0,96	0,29	14,45	4,21	15,05	21,73
37–39	Кран-балка	10,00	0,88	0,54	8,00	4,32	9,09	13,12
40–44	Вентилятор	13,00	0,85	0,62	9,10	5,64	10,71	15,45
45	Модельна дільниця	25,00	0,85	0,62	20,00	12,39	23,53	33,96
46	Лабораторія, АСУТП	18,00	0,92	0,43	13,50	5,75	14,67	21,18
Всього		1364,00	—	—	1105,55	197,41	1123,04	1620,96

2.4 Визначення розрахункового силового навантаження на другому рівні електропостачання

На другому рівні системи електропостачання визначається навантаження, що створюється групами електроприймачів, які підключені до розподільчих пунктів — шинопроводів, розподільчих щитів та силових шаф.

Номінальна потужність групи електроприймачів визначається як сума їхніх індивідуальних номінальних потужностей.

Груповий коефіцієнт використання $K_{\text{В}}$ для кожного вузла обчислюється за виразом:

$$K_{\text{В}} = \frac{\sum k_{\text{В}_i} P_{\text{н}_i}}{\sum P_{\text{н}_i}} \tag{2.8}$$

Ефективне число електроприймачів n_e, яке характеризує нерівномірність групового навантаження, обчислюється залежно від відношення максимальної та мінімальної потужностей приймачів у групі.

$$n_e = \begin{cases} n & \text{якщо} \quad \frac{p_{\text{н}_{\max}}}{p_{\text{н}_{\min}}} \le 3 \\ \frac{\left(\sum P_{\text{н}_i}\right)^2}{\sum P^2_{\text{н}\,i}} & \text{якщо} \quad \frac{p_{\text{н}_{\max}}}{p_{\text{н}_{\min}}} > 3 \end{cases} \tag{2.9}$$

За визначеними значеннями n_e та $K_{\text{В}}$ за довідковими таблицями знаходиться коефіцієнт розрахункового навантаження K_p.

Розрахункова активна P_p, реактивна Q_p та повна S_p потужності для кожного вузла визначаються за формулами:

$$P_p = K_p \cdot \sum_i k_{\text{В}_i} P_{\text{н}_i} \tag{2.10}$$

$$Q_p = \begin{cases} 1{,}1 \sum_i k_{\text{В}_i} P_{\text{н}_i} \operatorname{tg}\varphi_i & \text{якщо} \quad n_e \le 10 \\ \sum_i k_{\text{В}_i} P_{\text{н}_i} \operatorname{tg}\varphi_i & \text{якщо} \quad n_e > 10 \end{cases} \tag{2.11}$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \tag{2.12}$$

Додатково визначаються попередні значення коефіцієнта потужності:

$$\cos\varphi_{\text{пре}} = \frac{P_p}{S_p} \quad \operatorname{tg}\varphi_{\text{пре}} = \frac{Q_p}{P_p} \tag{2.13}$$

Розрахунковий струм I_p розподільчого пункту обчислюється на основі повної розрахункової потужності S_p та номінальної напруги мережі $U_{\text{НН}}$:

$$I_p = \frac{s_p}{\sqrt{3} U_{\text{НН}}} \tag{2.14}$$

2.4.1 Розрахунок силового навантаження ШРМ-1

Сумарна номінальна потужність групи електроприймачів:

$$\sum P_{\text{н}} = 4 \cdot 55 + 4 \cdot 26 + 1 \cdot 10 + 1 \cdot 13 = 347 \ \text{кВт}$$

Середньозважений груповий коефіцієнт використання обчислюється за формулою:

$$K_{\text{в.гр}} = \frac{0{,}8 \cdot 4 \cdot 55 + 0{,}9 \cdot 4 \cdot 26 + 0{,}7 \cdot 1 \cdot 10 + 0{,}65 \cdot 1 \cdot 13}{347} = \frac{285{,}05}{347} = 0{,}82$$

Знаходимо відношення найбільшої потужності до найменшої у групі:

$$\frac{55}{10} = 5{,}5$$

Оскільки відношення перевищує 3, визначаємо ефективне число електроприймачів:

$$n_e = \frac{(347)^2}{4 \cdot 55^2 + 4 \cdot 26^2 + 1 \cdot 10^2 + 1 \cdot 13^2} = \frac{120409}{15073} = 7 \text{ шт}$$

Із довідникової літератури, для знайденого n_e та $K_{\text{в.гр}} = 0{,}82$, знаходимо коефіцієнт розрахункового навантаження $K_p = 1$.

Розрахункова активна потужність:

$$P_{\text{р}} = 1 \cdot 285{,}05 = 285{,}05 \text{ кВт}$$

Розрахункова реактивна потужність (з урахуванням n_e):

$$Q_{\text{р}} = 1{,}1 \cdot (0{,}8 \cdot 4 \cdot 55 \cdot 0 + 0{,}9 \cdot 4 \cdot 26 \cdot 0{,}62 + \\ + 0{,}7 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 0{,}54 + 0{,}65 \cdot 1 \cdot 13 \cdot 0{,}62) = 73{,}73 \text{ кВАр}$$

Повна розрахункова потужність групи:

$$S_{\text{р}} = \sqrt{285{,}05^2 + 73{,}73^2} = 294{,}43 \text{ кВА}$$

Розрахунковий струм лінії, що живить ШРМ-1:

$$I_{\text{р}} = \frac{294{,}43}{\sqrt{3} \cdot 0{,}4} = 424{,}97 \text{ А}.$$

Результати розрахунків зводяться у таблицю Ф636-92 (Додаток А).

2.5 Визначення розрахункового силового навантаження на третьому рівні електропостачання

Третій рівень електропостачання відповідає підсумковому силовому навантаженню на збірних шинах нижчої напруги цехової трансформаторної підстанції. На цьому етапі виконується підсумовування навантажень усіх розподільчих пунктів та радіальних приєднань цеху.

Середньозважений коефіцієнт використання для цеху в цілому визначається аналогічно до другого рівня.

Коефіцієнт розрахункового навантаження K_p на шинах КТП визначається за довідковими даними на основі підсумкового n_e та середньоцехового $K_{\text{В}}$. Розрахункові значення активної, реактивної та повної потужностей третього рівня обчислюються за методикою впорядкованих діаграм і є основою для подальшого вибору силових трансформаторів.

Розрахункова реактивна потужність Q_p обчислюється за формулою:

$$Q_p = K_p \sum_i k_{\text{В}_i} P_{\text{н}_i} \text{tg}\,\varphi_i \tag{2.15}$$

Підставивши сумарні значення силових приймачів цеху:

$$P_{\text{р3}} = K_p \cdot \sum k_{\text{в}} i \cdot P_{\text{н}} i = 0{,}85 \cdot 1112{,}7 = 945{,}8 \ \text{кВт}.$$

$$Q_{\text{р3}} = K_p \cdot \sum k_{\text{в}} i \cdot P_{\text{н}} i \cdot \text{tg}\,\varphi_i = 0{,}85 \cdot 184{,}77 = 157{,}06 \ \text{кВАр}.$$

2.6 Розрахунок освітлювальних навантажень

Розрахунок системи робочого освітлення виробничих та допоміжних приміщень проєктуємого об'єкта виконано на базі сучасних енергоефективних світлодіодних світильників. Методологічною основою аналітичної частини є точний метод коефіцієнта використання світлового потоку, який дозволяє визначити базові параметри освітлювальної установки на основі її геометрії та нормативних вимог.

Аналітичний розрахунок є першим етапом проєктування, мета якого — визначення попередньої кількості світлоточок. На другому етапі для верифікації отриманих результатів, забезпечення нормативної рівномірності освітлення та побудови реального розподілу світлового поля виконується комп'ютерне тривимірне моделювання у спеціалізованому програмному комплексі DIALux evo.

2.6.1 Розрахунок робочого освітлення ливарного цеху

З огляду на вищеописані важкі умови експлуатації та значну висоту приміщення як основний світильник прийнято Philips BY581P 250S/840 DIA HE MB GC SI.

Загальна площа цеху:

$$S_{\text{ц}} = L_{\text{ц}} \cdot W_{\text{ц}} \tag{2.16}$$

$$S_{\text{ц}} = 48 \cdot 30 = 1440 \ \text{м}^2$$

Розрахункова висота підвісу джерела світла над робочою поверхнею:

$$H_p = H_n - h_c - h_p \tag{2.17}$$

де

H_n — загальна висота приміщення, м;

h_c — довжина підвісу світильника, м;

h_p — висота, на рівні якої знаходиться робоча зона, м.

$$H_p = 9{,}0 - 1{,}0 - 0{,}8 = 7{,}2 \text{ м}$$

Нормований рівень освітленості для заданого розряду зорової роботи і заданих умовах технологічного процесу згідно з ДСТУ EN 12464-1:2022:

$$E_{\text{норм}} = 500 \text{ лк}$$

Необхідна кількість світильників за методом коефіцієнта використання світлового потоку обчислюється відповідно до виразу:

$$N_{\text{св}} = \frac{E_{\text{норм}} \cdot S \cdot K_{\text{з}} \cdot Z}{\Phi \cdot \eta} \tag{2.18}$$

де

$K_{\text{з}}$ — коефіцієнт запасу, який враховує поступове зниження світлового потоку світлодіодів у процесі експлуатації та запилення оптичної частини світильників, приймається в межах 1,2–1,5;

Z — коефіцієнт нерівномірності освітлення, що являє собою відношення середньої освітленості до мінімальної, приймається в межах 1,1–1,2;

Ф — номінальний світловий потік одного LED-світильника, лм;

η — коефіцієнт використання світлового потоку, визначається за довідниковими таблицями виробника.

$$N_{\text{св}} = \frac{500 \cdot 1440 \cdot 1{,}50 \cdot 1{,}15}{25000 \cdot 0{,}75} = 66{,}24 \text{ шт}$$

На основі отриманого значення та з урахуванням подальшого моделювання до встановлення приймається кількість світильників:

$$N'_{\text{св}} = 70 \text{ шт}$$

Сумарна встановлена потужність освітлювальної установки при одиничній номінальній потужності світильника ($P_{\text{л}} = 138$ Вт) визначається за формулою:

$$P'_{\text{вст}} = N'_{\text{св}} \cdot P_{\text{л}} \tag{2.19}$$

$$P'_{\text{вст}} = 70 \cdot 138 = 9660 \text{ Вт} = 9{,}66 \text{ кВт}$$

Фактична питома потужність проєктуємої системи освітлення за формулою становить:

$$P_{\text{пит}} = \frac{P'_{\text{вст}}}{S} \tag{2.20}$$

$$P_{\text{пит}} = \frac{9660}{1440} = 6{,}71 \text{ Вт/м}^2$$

Активне розрахункове навантаження освітлювальної мережі з урахуванням коефіцієнта попиту визначається за формулою:

$$P_{\text{р.осв}} = K_{\text{п}} \cdot K_{\text{пра}} \cdot P'_{\text{вст}} \tag{2.21}$$

де

$K_{\text{п}}$ — коефіцієнт попиту освітлення;

$K_{\text{пра}}$ — коефіцієнт, що враховує втрати в пускорегулювальній апаратурі світильників.

$$P_{\text{р.осв}} = 0{,}85 \cdot 1{,}00 \cdot 9{,}66 = 8{,}21 \text{ кВт}$$

Реактивна розрахункова потужність системи за формулою становить:

$$Q_{\text{р.осв}} = P_{\text{р.осв}} \cdot \operatorname{tg}\varphi \tag{2.22}$$

$$Q_{\text{р.осв}} = 8{,}21 \cdot 0{,}48 = 3{,}94 \text{ кВАр}$$

2.6.2 Особливості комп'ютерного моделювання освітлення у середовищі DIALux evo

Порівняльний аналіз результатів традиційного інженерного розрахунку та цифрового моделювання в ПК DIALux evo виявив певні розбіжності у кількості прийнятих світильників для різних зон підприємства, що обумовлено наступними чинниками:

1. *Для ливарного цеху:* Збільшення кількості світлоточок порівняно з базовим аналітичним розрахунком (70 шт замість 68 можливих) викликане детальним урахуванням реального технологічного середовища. Програма DIALux evo дозволяє інтегрувати тривимірні моделі великогабаритного обладнання, що дає змогу математично розрахувати зони тіньових ефектів, явище багатократного відбивання світла від поверхонь та перекриття світлових потоків технологічними машинами. Це вимагає встановлення додаткових джерел світла для забезпечення нормативної рівномірності освітлення на робочих місцях.
2. *Для допоміжних приміщень:* Дещо менша кількість світильників у порівнянні з теоретичним максимумом обумовлена тим, що на етапі розробки

проєкту архітектурно-планувальні дані щодо насиченості цих приміщень меблями та дрібним обладнанням – відсутні. Моделювання проводилося для умовно вільних просторів з високими коефіцієнтами відбивання від стін та стелі. Слід зазначити, що у разі подальшої деталізації технологічного плану та насичення цих зон обладнанням, виникне потреба в оптимізації системи, що, найімовірніше, призведе до збільшення кількості світильників для компенсації затінення.

Для верифікації якості розподілу світлового потоку було побудовано карти розподілу світла. Графічні результати моделювання, що ілюструють ізолінії робочої освітленості та фінальний тривимірний розподіл яскравості, представлено нижче на рисунку 2.1.

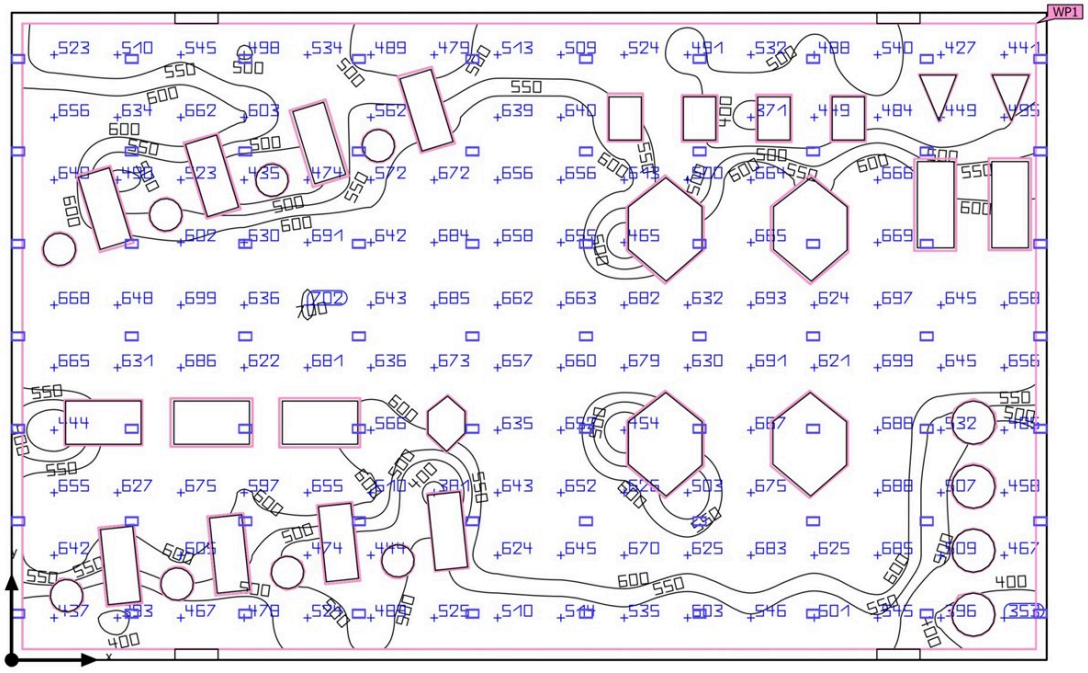


Рисунок 2.1 — Карта розподілу світлових потоків цеху точного лиття

2.6.3 Розрахунок аварійного освітлення та освітлення території

Система аварійного освітлення інтегрується безпосередньо в мережу загального робочого освітлення. Для цього використовується частина штатних світильників основного типу, які додатково комплектуються індивідуальними акумуляторними блоками аварійного живлення. Оскільки в нормальному режимі експлуатації ці світильники споживають потужність у складі загальної робочої мережі, окремий розрахунок додаткового силового навантаження для аварійного освітлення не виконується з метою уникнення подвійного обліку потужності.

Навантаження системи зовнішнього освітлення території підприємства визначається за укрупненими показниками на рівні 10 % від сумарної актив-

ної та реактивної розрахункових потужностей робочого освітлення всього цеху згідно з виразами:

$$P_{\text{р.т.о}} = 0,1 P_{\text{р.осв.заг}} \tag{2.23}$$

$$Q_{\text{р.т.о}} = 0,1 Q_{\text{р.осв.заг}} \tag{2.24}$$

Підставивши значення розрахункового робочого освітлення:

$$P_{\text{р.т.о}} = 0,1 \cdot P_{\text{р.осв}} = 0,1 \cdot 11{,}58 = 1{,}16 \ \text{кВт}$$

$$Q_{\text{р.т.о}} = 0,1 \cdot Q_{\text{р.осв}} = 0,1 \cdot 5{,}56 = 0{,}56 \ \text{кВАр}$$

2.6.4 Зведена таблиця розрахунку освітлювальних навантажень цеху

Нижче наведено зведені результати аналітичних розрахунків та комп'ютерного оптимізаційного моделювання для всієї інфраструктури проєктуємого об'єкта.

Таблиця 2.3 — Загальні показники освітлювальної мережі об'єкта

Приміщення	Світильник	Розміри прим., м	Площа S, м²	$E_{\text{норм}}$, лк	H_p, м	$N_{\text{св}}$, шт	$N'_{\text{св}}$, шт	$P_{\text{р.осв}}$, кВт	$Q_{\text{р.осв}}$, кВАр
Ливарний цех	Philips BY581P 250S/840 DIA HE MB GC SI	30 × 48	1440	500	7,2	66,2	70	8,21	3,94
Модельна дільниця	Philips WT120C 60S/840 PSD L1500	30 × 5	150	750	3,2	44,4	38	1,54	0,74
Лабораторія, приміщення АСУТП	Philips SP342P 52S/940 DEIA MLO SMT L120 WH	30 × 5	150	750	2,7	47,6	42	1,83	0,88
Всього робоче освітлення:								11,58	5,56
Освітлення території (10%):								1,16	0,56
Загальне навантаження освітлення:								12,74	6,12

2.7 Визначення сумарних навантажень цеху

Підсумкові електричні навантаження цеху визначаються шляхом окремого підсумовування активних і реактивних складових розрахункових потужностей силового обладнання та систем освітлення. Сумарна розрахункова активна $P_{\text{р}_\Sigma}$ та реактивна $Q_{\text{р}_\Sigma}$ потужності обчислюються за виразами:

$$P_{\text{р}_\Sigma} = P_p + P_{\text{р.о}} + P_{\text{р.а.о}} + P_{\text{р.т.о}} \tag{2.25}$$

$$Q_{\text{р}\Sigma} = Q_p + Q_{\text{р.о}} + Q_{\text{р.а.о}} + Q_{\text{р.т.о}} \tag{2.26}$$

Сумарна повна розрахункова потужність $S_{\text{р}}\Sigma$ цеху становить:

$$S_{\text{р}_\Sigma} = \sqrt{P_{\text{р}_\Sigma}^2 + Q_{\text{р}_\Sigma}^2} \tag{2.27}$$

Сумарна розрахункова активна потужність:

$$P_{\text{р}}\Sigma = P_{\text{р3}} + P_{\text{р.осв}} + P_{\text{р.т.о}} = 945{,}8 + 11{,}58 + 1{,}16 = 958{,}54 \ \text{кВт}$$

Сумарна розрахункова реактивна потужність:

$$Q_{\text{р}}\Sigma = Q_{\text{р3}} + Q_{\text{р.осв}} + Q_{\text{р.т.о}} = 157{,}06 + 5{,}56 + 0{,}56 = 163{,}17 \ \text{кВАр}$$

Сумарна розрахункова повна потужність:

$$S_{\text{р}}\Sigma = \sqrt{P_{\text{р}}\Sigma^2 + Q_{\text{р}}\Sigma^2} = \sqrt{958{,}54^2 + 163{,}17^2} = 972{,}33 \ \text{кВА}$$

Результати всіх розрахунків зводяться у таблицю Ф636-92 (Додаток А).

2.8 Визначення пікових струмів ЕП та розподільчих пунктів

Піковий струм одиночного ЕП дорівнює його пусковому струму і визначається за формулою:

$$I_{\text{пік}} = I_{\text{пуск}} = k_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{ном}} \tag{2.28}$$

де

$k_{\text{пуск}}$ — кратність пускового струму за паспортними даними обладнання (для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором приймається $k_{\text{пуск}} = 5 \div 7$; для електротермічних установок без потужних приводів $k_{\text{пуск}} = 1 \div 1,5$);

$I_{\text{ном}}$ — номінальний струм ЕП, А.

У зв’язку з відсутністю точних паспортних даних заводів-виробників на етапі проєктування, $k_{\text{пуск}}$ для розрахунку пікових навантажень ЕП прийнято за нормативними довідковими даними з урахуванням технологічної специфіки обладнання:

- для асинхронних двигунів ливарних машин та витяжних вентиляторів (1–8, 40–44) — 6,5;
- для механізмів з важкими умовами пуску (9–11, 36) — 7,0;
- для приводів підйомно-транспортного обладнання (37–39) — 4,5;
- для електротермічних печей опору та сушильних шаф (12–13, 22–33) — 1,0;

• для індукційних вакуумних електропечей (34–35) — 2,5.

Піковий струм групи ЕП (до п'яти одиниць включно) напругою до 1 кВ визначається як сума пускового струму найпотужнішого двигуна та номінальних струмів решти апаратів групи:

$$I_{\text{пік.гр}} = I_{\text{пуск.макс}} + \sum_{\text{i}=1}^{\text{n-1}} I_{\text{ном i}} \tag{2.29}$$

де

$I_{\text{пуск.макс}}$ — найбільший з пускових струмів одного ЕП у групі, А;

$\sum I_{\text{ном i}}$ — сумарний номінальний струм групи без урахування ЕП з найбільшим пусковим струмом, А.

Для груп, що містять більше п'яти ЕП, при активно-індуктивному характері навантаження піковий струм обчислюється за виразом:

$$I_{\text{пік.гр}} = I_{\text{пуск.макс}} + \left(I_p - k_{\text{в.макс}} \cdot I_{\text{ном.макс}}\right) \tag{2.30}$$

де

I_p — розрахунковий струм усіх ЕП групи (визначений на другому рівні електропостачання), А;

$k_{\text{в.макс}}$, $I_{\text{ном.макс}}$ — відповідно коефіцієнт використання та номінальний струм ЕП з найбільшим пусковим струмом.

За відсутності точних заводських даних, величину пікового струму від дугових чи індукційних електропечей та зварювальних трансформаторів приймається не меншою за трикратний номінальний струм.

Пікова повна потужність групи визначається за формулою:

$$S_{\text{пік(пуск)}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{пік.гр}} \tag{2.31}$$

Визначені значення пікових струмів ліній живлення розподільчих пунктів та окремих потужних ЕП використовуються на наступних етапах проєктування для налаштування селективності релейного захисту, вибору перерізу кабельних ліній та перевірки мережі на допустимі коливання напруги.

2.8.1 Розрахунок пікових струмів для ШРМ-1.

Найпотужнішим ЕП (за величиною пускового струму) у цій групі є Ливарна машина (поз. 5). Його розрахунковий номінальний струм становить

$I_{\text{ном}} = 49{,}06$ А, а кратність пускового струму $k_{\text{пуск}} = 6{,}5$. Піковий струм цього індивідуального ЕП:

$$I_{\text{пік}} = I_{\text{пуск.макс}} = 6{,}5 \cdot 49{,}06 = 318{,}86 \ \text{А}.$$

Оскільки до ШРМ-1 підключено більше п’яти електроприймачів (загалом 10 шт.), піковий струм усієї групи обчислюється з використанням розрахункового струму групи $I_p = 424{,}97$ А та коефіцієнта використання найпотужнішого ЕП $k_{\text{в.макс}} = 0{,}9$:

$$I_{\text{пік.гр}} = 318{,}86 + (424{,}97 - 0{,}9 \cdot 49{,}06) = 699{,}69 \ \text{А}.$$

Таблиця 2.4 — Розрахункові пікові струми ЕП та вузлів живлення

Найменування вузла (РП або лінії)	ЕП з найбільшим пусковим струмом	Параметри найпотужнішого ЕП при пуску			Розрахунковий струм групи I_p (або $\sum I_{\text{ном}}$), А	Піковий струм вузла $I_{\text{пік}}$, А
		$I_{\text{ном.макс}}$, А	$k_{\text{пуск}}$	$I_{\text{пуск.макс}}$, А		
ШРМ-1	Ливарна машина (поз. 5)	49,06	6,5	318,86	424,97	699,69
ШРМ-3	Ливарна машина (поз. 1)	43,03	6,5	279,68	467,02	707,97
ШРМ-2	Вентилятор (поз. 41)	24,53	6,5	159,43	410,27	553,76
Радіальні лінії						
Лінія до поз. 32	Електротермічна піч (поз. 32)	108,25	1,0	108,25	108,25 (Іном)	108,25
Лінія до поз. 33	Електротермічна піч (поз. 33)	108,25	1,0	108,25	108,25 (Іном)	108,25
ЩОГ	Електропіч індукційна (поз. 34)	86,60	2,5	216,51	173,21 (сума Іном)	303,11

2.9 Вибір кількості, типу та номінальної потужності силових трансформаторів

Вибір кількості та номінальної потужності силових трансформаторів цехової комплектної підстанції здійснюється за сумарним розрахунковим навантаженням об’єкта з урахуванням категорійності споживачів та просторової густини навантаження.

Загальна корисна площа корпусу цеху точного лиття з урахуванням основного виробничого залу та двох поверхів допоміжних приміщень становить:

$$S_{\text{заг}} = 30 \cdot 48 + 2 \cdot (5 \cdot 30) = 1740 \text{ м}^2$$

Питома густина повного електричного навантаження обчислюється наступним чином:

$$S_{\text{пит}} = \frac{S_p}{S_{\text{заг}}} \tag{2.32}$$

$$S_{\text{пит}} = \frac{973{,}68}{1740} = 0{,}56 \text{ кВА/м}^2$$

Оскільки питома густина навантаження перевищує нормативний поріг 0.4 кВА/м², а технологічний комплекс містить споживачів особливої групи та I категорії надійності, до встановлення приймається двотрансформаторна підстанція ($N = 2$). Таке рішення забезпечує постійне гаряче резервування та можливість АВР на секційному вимикачі 0.4 кВ.

Відповідно до рекомендацій для двотрансформаторних підстанцій підприємств із безперервним циклом виробництва, цільовий коефіцієнт завантаження трансформаторів у нормальному режимі приймається на рівні $k_{\text{з}} = 0.7$.

Мінімально необхідна потужність силового трансформатора за умови повної компенсації реактивної складової визначається за активною потужністю:

$$S_{\text{н.т.р}} = \frac{P_p}{N \cdot k_{\text{з}}} \tag{2.33}$$

$$S_{\text{н.т.р}} = \frac{959{,}81}{2 \cdot 0.7} = 685{,}58 \text{ кВА}$$

До встановлення приймаються два сухі трансформатори з литою ізоляцією номінальною потужністю $S_{\text{ном}} = 800$ кВА, що відповідають вимогам європейської директиви енергоефективності EU EcoDesign Tier 2.

Фактичний коефіцієнт завантаження трансформаторів у нормальному експлуатаційному режимі без урахування роботи компенсувальних пристроїв становить:

$$k_{\text{з.факт}} = \frac{S_p}{N} \cdot S_{\text{ном}} \tag{2.34}$$

$$k_{\text{з.факт}} = \frac{959{,}81}{2 \cdot 800,} = 0{,}600$$

Отримане значення $k_{\text{з.факт}} = 0{,}6$ є оптимальним, оскільки забезпечує роботу трансформатора в зоні максимального ККД та гарантує надійне післяаварійне резервування з допустимим рівнем перевантаження.

Таблиця 2.5 — Технічні характеристики силового трансформатора EcoDesign Tier 2

Тип / Серія	$S_{\text{ном}}$, кВА	Напруга, кВ		$P_{\text{хх}}$, кВт	$P_{\text{кз}}$, кВт	u_k, %	I_0, %
		ВН	НН				
GEAFOL Neo 4GX5944-3E	800,	6	0,4	1,17	8,00	6,0	0,6

Таблиця 2.6 — Відомість вибору трансформаторів за формою Ф202-90

Найменування цеху	Розрахункове навантаження на шинах КТП				Прийнята конфігурація підстанції, шт × кВА
	$P_{\text{р}\Sigma}$, кВт	$Q_{\text{р}\Sigma}$, квар	$S_{\text{р}\Sigma}$, кВА	$\cos\varphi$	
Ливарний цех точного лиття (з допоміжними приміщеннями)	959,81	163,78	973,68	0,99	2 × 800,

2.10 Визначення потужності низьковольтних конденсаторних установок

Для забезпечення оптимального теплового режиму обраних силових трансформаторів та підтримки проєктного коефіцієнта завантаження $k_{\text{з}} = 0.7$, доцільно визначити технологічно необхідну частку реактивної потужності, яка може бути передана через трансформатори з мережі вищої напруги 10 кВ.

Максимально допустима реактивна потужність $Q_{\text{т}}$, яку здатні передати трансформатори за заданого графіка активного навантаження, визначається за виразом:

$$Q_{\text{т}} = \sqrt{\left(N \cdot k_{\text{з}} \cdot S_{\text{ном.т}}\right)^2 - P_{\text{р}}\Sigma^2} \tag{2.35}$$

Потужність низьковольтної конденсаторної установки $Q_{\text{н.к}}$ визначається як різниця між сумарною реактивною потребою цеху та можливостями трансформаторів:

$$Q_{\text{н.к}} = Q_{\text{р}}\Sigma - Q_{\text{т}} \tag{2.36}$$

Підставивши значення сумарних розрахункових навантажень цеху ($P_{\text{р}}\Sigma = 959{,}81$ кВт, $Q_{\text{р}}\Sigma = 163{,}78$ квар) та номінальні параметри трансформаторів:

$$Q_{\text{т}} = \sqrt{(2 \cdot 0{,}7 \cdot 800)^2 - 959{,}81^2} = 577{,}2 \ \text{ квар.}$$

$$Q_{\text{н.к}} = 163{,}78 - 577{,}2 = -413{,}42 \ \text{ квар.}$$

Оскільки значення $Q_{\text{н.к}} < 0$, встановлення класичних ступінчастих конденсаторних установок(ККУ) для компенсації реактивної потужності на боці 0,4 кВ не потрібне. Обрані силові трансформатори номіналом 800 кВА мають достатній резерв повної потужності для передачі необхідної реактивної потужності без застосування додаткових засобів компенсації.

2.11 Вибір перерізу провідників цехової мережі

Розраховується допустимий тривалий струм $I'_{\text{доп}}$ з врахуванням умов прокладання:

$$I'_{\text{доп}} = K_{\text{сер}} \cdot K_{\text{пр}} \cdot K_{\text{поп}} \cdot I_{\text{доп}} \tag{2.37}$$

де

$K_{\text{пр}}$ — поправковий коефіцієнт на кількість працюючих кабелів, що лежать поруч;

$K_{\text{поп}}$ — поправковий коефіцієнт для чотирипровідних систем, 0.92;

$K_{\text{сер}}$ — поправковий коефіцієнт на температуру навколишнього середовища, обчислюється наступним чином:

$$K_{\text{сер}} = \sqrt{\frac{T_{\text{ж.м}} - T_{\text{сер}}}{T_{\text{ж.м}} - T_{\text{сер.н}}}} \tag{2.38}$$

де

$T_{\text{ж.м}}$ — нормована тривало допустима температура жил;

$T_{\text{сер}}$ — фактична температура навколишнього середовища;

$T_{\text{сер.н}}$ — нормована температура середовища, $25°C$.

При виконанні умови:

$$I'_{\text{доп}} \geq I_p \tag{2.39}$$

обраний попередньо кабель приймається за умовою нагрівання. Якщо умова не виконується, то приймається кабель з наступним більшим стандартним значенням допустимого струму $I_{\text{доп}}$, заново розраховується $I'_{\text{доп}}$ і перевіряється умова.

Коли кабель за умовою нагрівання обрано, до таблиці нижче заносяться значення $I_{\text{доп}}$, $I'_{\text{доп}}$, переріз жил $S_{\text{ж}}$, тип кабелю, довжина кабелю $l_{\text{кб}}$, питомі активний r_n та реактивний x_n опори.

Фактичні активний $R_{\text{кб}}$ та реактивний $X_{\text{кб}}$ опори кабелю визначають згідно залежностей:

$$R_{\text{кб}} = r_n \cdot l_{\text{кб}}; \quad X_{\text{кб}} = x_n \cdot l_{\text{кб}} \tag{2.40}$$

Обраний кабель необхідно перевірити за втратою напруги $\Delta U'_{\text{кб}}$, яка визначається за формулою:

$$\Delta U'_{\text{кб}} = \frac{P_p R_{\text{кб}} + Q_p X_{\text{кб}}}{10 U_n^2} \tag{2.41}$$

де

P_p, Q_p — розрахункові активна та реактивна потужності навантаження, кВт та кВАр;

U_n — номінальна напруга, кВ.

Втрата напруги не повинна перевищувати максимально допустимої — 5%.

2.11.1 Розрахунок перерізу кабелю лінії «ГРЩ-2.ЩОГ».

Розрахунковий струм лінії становить $I_p = 150{,}69$ А. Кабель прокладається способом «повітря» (кількість поруч — 1).

Визначаємо поправкові коефіцієнти:

- на температуру середовища (45 °C): $K_{\text{сер}} = 0{,}74$;
- на кількість кабелів поруч: $K_{\text{пр}} = 1$;
- сумарний коефіцієнт зниження: $K_{\text{заг}} = 0{,}74 \cdot 1 \cdot 1 = 0{,}74$.

Обираємо переріз $S_{\text{ж}} = 95\text{мм}^2$, для якого табличний тривало допустимий струм становить $I_{\text{доп}} = 220$ А. Розрахунковий допустимий струм з урахуванням умов:

$$I'_{\text{доп}} = I_{\text{доп}} \cdot K_{\text{заг}} = 220 \cdot 0{,}74 = 162{,}8 \ \text{ А}.$$

Оскільки $I'_{\text{доп}} \geq I_p$ ($162{,}8 \geq 150{,}69$), переріз обрано правильно.

Фактичні опори кабелю довжиною 0,005 км:

$$R_{\text{кб}} = r_n \cdot l_{\text{кб}} = 0{,}195 \cdot 0{,}005 = 0{,}001 \ \ \text{Ом},$$

$$X_{\text{кб}} = x_n \cdot l_{\text{кб}} = 0{,}081 \cdot 0{,}005 = 0{,}0004 \ \ \text{Ом}.$$

Перевірка за втратою напруги:

$$\Delta U'_{\text{кб}} = \frac{104{,}4 \cdot 0{,}001 + 0 \cdot 0{,}0004}{10 \cdot 0{,}4^2} = 0{,}06 \ \%.$$

Втрата напруги не перевищує 5%, отже, вибір остаточний.

Таблиця 2.7 — Вибір кабелів та перевірка втрат напруги

Кабель до ПРЕ	I_p, А	P_p, кВт	Q_p, кВАр	$I_{\text{доп}}$, А	$I'_{\text{доп}}$, А	$S_{\text{ж}}$, мм²	Тип кабелю	$l_{\text{кб}}$, км	r_n, Ом/км	x_n, Ом/км	$R_{\text{кб}}$, Ом	$X_{\text{кб}}$, Ом	$\Delta U'_{\text{кб}}$, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ГРЩ-2.ЩОГ	150,69	104,40	0,00	220,	162,80	95	3х95	0,005	0,195	0,081	0,0010	0,0004	0,06
Г.ЩОГ-Г	150,69	104,40	0,00	220,	162,80	95	3х95	0,005	0,195	0,081	0,0010	0,0004	0,06
ГРЩ-2.32	100,68	69,75	0,00	180,	106,56	70	3х70	0,032	0,265	0,082	0,0084	0,0026	0,37
ГРЩ-2.33	100,68	69,75	0,00	180,	106,56	70	3х70	0,032	0,265	0,082	0,0084	0,0026	0,37
ЩОГ.34	75,34	52,20	0,00	145,	85,84	50	3х50	0,022	0,370	0,085	0,0080	0,0018	0,26
ЩОГ.35	75,34	52,20	0,00	145,	85,84	50	3х50	0,022	0,370	0,085	0,0080	0,0018	0,26

Номінальний струм комплектних шинопроводів ШРА $I_{\text{н.ШРА}}$ обирають за розрахунковим струмом I_p другого рівня електропостачання:

$$I_{\text{н.ШРА}} \geq I_p \tag{2.42}$$

2.11.2 Вибору шинопроводу для вузла «ШММ-1»

ШММ-1: вид: ШР, матеріал: Cu.

Розрахунковий струм становить $I_p = 1405{,}39$ А.

Температурна корекція струму для $T = 12$ С за каталогом виробника: $K_t = 1$. З урахуванням зниження пропускної здатності від нагрівання обираємо шинопровід LDC262 з базовим номінальним струмом $I_{\text{ном}} = 2000$ А.

Фактичний тривало допустимий струм:

$$I'_{\text{доп}} = I_{\text{ном}} \cdot K_t = 2000 \cdot 1 = 2000 \ \ \text{А},$$

що більше за розрахунковий струм 1405,39 А.

Перевірка за втратою напруги (для $r_{\max} = 0{,}051$ та $x = 0{,}037$ Ом/км):

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot k_{\text{розп}} \cdot I_p \cdot l_{\text{ш}} \cdot 100}{U_{\text{НН}} \cdot 1000} \cdot (r_{\max} \cos\varphi + x \sin\varphi) = 0{,}07\ \%.$$

Результати вибору шинопроводів зводять до таблиці нижче.

Таблиця 2.8 — Вибір шинопроводів та перевірка втрат напруги

Призначення шинопроводу	$I_{\text{ф}}$ (I_p), А	$I_{\text{ном}}$, А	K_t	Тип Модель	P_p, кВт	Q_p, кВАр	$l_{\text{ш}}$, км	$r_{\max}$, Ом/км	x, Ом/км	ΔU, %	i_{pk}, кА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ШММ-1	1405,39	2000,	1,000	LDC262	959,81	163,78	0,002	0,051	0,037	0,07	176,0
ШММ-2	1405,39	2000,	1,000	LDC262	959,81	163,78	0,002	0,051	0,037	0,07	176,0
ШРМ-1	424,97	630,	0,940	BD2C-630	285,05	73,73	0,022	0,066	0,038	0,30	64,0
ШРМ-2	415,01	630,	0,940	BD2C-630	283,76	46,40	0,073	0,066	0,038	0,93	64,0
ШРМ-3	469,87	630,	0,885	BD2C-630	314,00	85,88	0,065	0,066	0,038	0,97	64,0

2.12 Вибір перерізу провідників розподільної мережі

Переріз проводу (кабелю) розподільної мережі вибирається за умовою нагрівання в нормальному режимі за формулою:

$$I'_{\text{доп}} \geq I_{\text{н}} \tag{2.43}$$

де

$I_{\text{н}}$ — розрахунковий струм 1-го рівня електропостачання, визначається за формулою:

$$I_{\text{н}} = \frac{p_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \cos\varphi_{\text{н}} \eta_{\text{н}}} \tag{2.44}$$

Допустимий тривалий струм для проводів $I_{\text{доп}}$ залежно від перерізу, способу прокладання, кількості проводів у трубі наводиться в таблицях 1.3.4 та 1.3.6 ПУЕ. Допустимий струм з урахуванням умов навколишнього середовища й умов прокладання визначається як:

$$I'_{\text{доп}} = K_{\text{сер}} K_{\text{пр}} K_{\text{поп}} I_{\text{доп}} \tag{2.45}$$

Для проводів, прокладених у сталевих трубах, поправковий коефіцієнт на умови прокладання $K_{\text{поп}} = 1,0$. У довідкових таблицях вже враховуються умови прокладки залежно від кількості проводів у трубі. Для кабелів приймається $K_{\text{поп}} = 0,92$. Поправковий коефіцієнт $K_{\text{сер}}$ для розрахункової температури ливарного цеху 45 °С визначається за таблицею 1.3.10 ПУЕ.

Активний і реактивний опори проводів обчислюються за формулами:

$$R_{\text{пр}} = r_n l_{\text{пр}} \tag{2.46}$$

$$X_{\text{пр}} = x_n l_{\text{пр}} \tag{2.47}$$

де

r_n і x_n — активний і реактивний питомі опори проводів відповідно, Ом/км;

$l_{\text{пр}}$ — довжина проводу, км.

Вибраний стандартний переріз проводу перевіряється на втрату напруги за формулою:

$$\Delta U_{\text{пр}} = \frac{p_{\text{н}} R_{\text{пр}} + q_{\text{н}} X_{\text{пр}}}{10 U_{\text{н}}^2}, \% \tag{2.48}$$

2.12.1 Вибір перерізу провідника розподільної мережі для поз. 1

Вид: провід, спосіб прокладання: труба.

Розрахунковий струм приймача становить:

$$I_{\text{н}} = \frac{p_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \cos\varphi_{\text{н}}} = \frac{22}{\sqrt{3} \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}82} = 38{,}72 \ \text{А}.$$

Визначаємо поправкові коефіцієнти:

- на температуру середовища (45^{C}): $K_{\text{сер}} = 0{,}74$;
- на кількість провідників поруч (1 шт.): $K_{\text{пр}} = 1$;
- на умови прокладання (для провід): $K_{\text{поп}} = 1$;
- сумарний коефіцієнт зниження: $K_{\text{заг}} = 0{,}74 \cdot 1 \cdot 1 = 0{,}74$.

Згідно з довідниковими даними обираємо переріз $s = 16 \text{мм}^2$, для якого базовий тривало допустимий струм становить $I_{\text{доп}} = 70$ А. Допустимий струм з урахуванням умов:

$$I'_{\text{доп}} = I_{\text{доп}} \cdot K_{\text{заг}} = 70 \cdot 0{,}74 = 51{,}8 \ \text{А}.$$

Умова нагрівання виконується ($51{,}8 \geq 38{,}72$).

Фактичні опори лінії довжиною $l_{\text{кб}} = 0{,}006$ км:

$$R_{\text{кб}} = r_n \cdot l_{\text{кб}} = 1{,}16 \cdot 0{,}006 = 0{,}0066 \ \text{Ом},$$

$$X_{\text{кб}} = x_n \cdot l_{\text{кб}} = 0{,}095 \cdot 0{,}006 = 0{,}0005 \ \text{Ом}.$$

Перевірка вибраного провідника за втратою напруги (з урахуванням реактивної потужності $q = 15{,}36$ квар):

$$\Delta U_{\text{пр}} = \frac{22 \cdot 0{,}0066 + 15{,}36 \cdot 0{,}0005}{10 \cdot 0{,}4^2} = 0{,}096\ \%.$$

Втрата напруги задовольняє норму ($\Delta U_{\text{пр}} \le 5\%$).

Результати вибору перерізів проводів та розрахунку їхніх опорів зведено до таблиці у Додаток А.

2.13 Розрахунок струмів короткого замикання (КЗ)

2.13.1 Розрахунок трифазних струмів КЗ

Для перевірки електрообладнання та шинопроводів на електродинамічну й термічну стійкість, а також для перевірки спрацьовування апаратів захисту виконується розрахунок струмів короткого замикання.

Початкове діюче значення періодичної складової струму трифазного КЗ $I_{\text{п}(0)}$ визначається обов'язковим урахуванням величини активного опору всіх елементів мережі:

$$I_{\text{п}(0)} = \frac{U_{\text{н.сер}}}{\sqrt{3}\sqrt{R_{1_\Sigma}^2 + X_{1_\Sigma}^2}} \tag{2.49}$$

Активні R_{1_Σ} та індуктивні X_{1_Σ} опори кола КЗ обчислюються як сума опорів живильної системи X_c, понижувального трансформатора X_t, R_t та ліній електропередачі R_l і X_l:

$$X_c = \frac{U_{\text{н}}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{к.ВН}} \cdot U_{\text{н.ВН}}}\ \text{мОм} \tag{2.50}$$

$$R_t = \frac{P_k \cdot U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2} \cdot 10^6\ \text{мОм} \tag{2.51}$$

$$X_t = \sqrt{u_k^2 - \left(100 \cdot \frac{P_k}{S_{\text{ном}}}\right)^2} \cdot \left(\frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}\right) \cdot 10^4\ \text{мОм} \tag{2.52}$$

$$R_l = r_0 \cdot L\ \text{мОм} \tag{2.53}$$

$$X_l = x_0 \cdot L\ \text{мОм} \tag{2.54}$$

Ударний струм i_y, необхідний для перевірки динамічної стійкості, розраховується через ударний коефіцієнт k_y.

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_k^3 \text{ кА} \tag{2.55}$$

2.13.2 Розрахунок однофазних струмів КЗ

Однофазний КЗ розраховують для перевірки надійності спрацьовування захисних апаратів у разі пробою фази на корпус. Струм залежить від повного опору петлі «фаза-нуль» $Z_{\text{пт}}$ та опору нульової послідовності трансформатора $Z_{\text{т}}^1$:

$$Z_{\text{пт}} = \frac{Z_{\text{т}}^1}{3} + Z_{\text{пт}_\Sigma} \text{ мОм} \tag{2.56}$$

$$I_k^1 = \frac{U_{\text{ф}}}{Z_{\text{пт}}} \text{ кА} \tag{2.57}$$

2.13.3 Розрахунок струмів точки КЗ «К1 (Шини РУНН 0.4 кВ)».

Сумарні активний та індуктивний опори всіх елементів кола від джерела живлення до точки пошкодження становлять відповідно $R_{1_\Sigma} = 2{,}3$ мОм та $X_{1_\Sigma} = 14{,}13$ мОм.

Повний еквівалентний опір прямої послідовності:

$$Z_{1_\Sigma} = \sqrt{R_{1_\Sigma}^2 + X_{1_\Sigma}^2} = \sqrt{2{,}3^2 + 14{,}13^2} = 14{,}32 \text{ мОм}.$$

Початкове діюче значення струму трифазного КЗ:

$$I_{\text{п}(0)} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{1_\Sigma}} = \frac{420}{\sqrt{3} \cdot 14{,}32} = 16{,}94 \text{ кА}.$$

Ударний струм трифазного КЗ з урахуванням ударного коефіцієнта $k_y = 1{,}5$ (та струмів підживлення від двигунів, якщо такі є):

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{\text{п}(0)} + I_{\text{підж}} = \sqrt{2} \cdot 1{,}5 \cdot 16{,}94 + 0 = 35{,}93 \text{ кА}.$$

Для визначення струму однофазного КЗ знаходимо повний опір петлі «фаза-нуль». З урахуванням опору нульової послідовності трансформатора ($\frac{Z_{\text{т}}^1}{3} = 13{,}23$ мОм) та сумарного опору петлі ліній і апаратів ($Z_{\text{пт}_\Sigma} = 1{,}74$ мОм):

$$Z_{\text{пт}} = \frac{Z_{\text{т}}^1}{3} + Z_{\text{пт}_\Sigma} = 13{,}23 + 1{,}74 = 14{,}97 \text{ мОм}.$$

Струм однофазного КЗ:

$$I_k^1 = \frac{U_\text{ф}}{Z_\text{пт}} = \frac{230}{14{,}97} = 15{,}36 \ \text{кА}.$$

Результати розрахунку струмів трифазного та однофазного КЗ зведено до таблиць нижче.

Таблиця 2.9 — Розрахунок струмів трифазного КЗ

Точка КЗ	$R_{1_{\Sigma.20°C}}$, мОм	X_{1_Σ}, мОм	Z_{1_Σ}, мОм	$I_{\text{п}(0)}$, кА	k_y	i_y, кА
1	2	3	4	5	6	7
К1 (Шини РУНН 0.4 кВ)	2,30	14,13	14,32	16,94	1,5	35,93
К2 (Початок ШММ-1)	2,30	14,13	14,32	16,94	1,0	23,95
К2 (Початок ШММ-2)	2,30	14,13	14,32	16,94	1,0	23,95
К2 (Початок ШРМ-1)	2,30	14,13	14,32	16,94	1,0	23,95
К2 (Початок ШРМ-2)	2,30	14,13	14,32	16,94	1,0	23,95
К2 (Початок ШРМ-3)	2,30	14,13	14,32	16,94	1,0	23,95
КЗ Шини ЩР-1	4,03	15,44	15,96	15,19	1,0	21,49
КЗ Шини ЩОГ (від ГРЩ)	5,31	15,73	16,60	14,61	1,0	20,66
КЗ Шини ЩОГ-Г (від Ген.)	9,65	178,18	178,44	1,36	1,0	1,92
КЗ Шини ЩОГ (від Ген.)	9,95	178,34	178,62	1,36	1,0	1,92
КЗ 4 (Мін. траса)	12,91	16,53	20,97	11,56	1,0	16,35
КЗ 8 (Мін. траса)	9,03	14,83	17,36	13,96	1,0	19,75
КЗ 11 (Мін. траса)	28,85	17,41	33,70	7,20	1,0	10,18
КЗ 13 (Мін. траса)	9,68	15,80	18,53	13,08	1,0	18,50
КЗ 17 (Мін. траса)	7,25	16,55	18,07	13,42	1,0	18,98
КЗ 21 (Мін. траса)	5,70	15,08	16,13	15,04	1,0	21,27
КЗ 22 (Мін. траса)	15,45	15,02	21,55	11,25	1,0	15,91
КЗ 26 (Мін. траса)	31,06	15,48	34,70	6,99	1,0	9,88
КЗ 28 (Мін. траса)	14,65	16,37	21,97	11,04	1,0	15,61
КЗ 32	8,49	16,70	18,73	12,95	1,0	18,31
КЗ 33	8,49	16,70	18,73	12,95	1,0	18,31
КЗ 34	11,06	17,51	20,71	11,71	1,0	16,56
КЗ 35	11,06	17,51	20,71	11,71	1,0	16,56
КЗ 36	28,50	17,15	33,26	7,29	1,0	10,31
КЗ 37	57,89	15,37	59,90	4,05	1,0	5,73
КЗ 38	59,97	16,95	62,31	3,89	1,0	5,50
КЗ 39	48,83	15,32	51,18	4,74	1,0	6,70
КЗ 40	33,74	17,79	38,14	6,36	1,0	8,99
КЗ 41	23,92	17,07	29,39	8,25	1,0	11,67
КЗ 42	23,72	16,92	29,13	8,32	1,0	11,77

1	2	3	4	5	6	7
КЗ 43	21,73	15,40	26,63	9,11	1,0	12,88
КЗ 44	21,60	15,30	26,47	9,16	1,0	12,96
КЗ 45	6,35	15,63	16,87	14,37	1,0	20,32
КЗ 46	7,71	15,64	17,44	13,91	1,0	19,67
КЗ Освітлення-1	824,44	23,85	824,78	0,29	1,0	0,42
КЗ Освітлення-2	692,83	22,50	693,20	0,35	1,0	0,49
КЗ Освітлення-3	824,44	23,85	824,78	0,29	1,0	0,42
КЗ Освітлення території	877,33	24,39	877,67	0,28	1,0	0,39

Таблиця 2.10 — Розрахунок струмів однофазного КЗ

Точка КЗ	$\frac{Z_т^1}{3}$, мОм	$Z_{пт_Σ}$, мОм	$Z_{пт}$, мОм	I_k^1, кА
1	2	3	4	5
К1 (Шини РУНН 0.4 кВ)	13,23	1,74	14,97	15,36
К2 (Кінець ШММ-1)	13,23	1,87	15,10	15,24
К2 (Кінець ШММ-2)	13,23	1,87	15,10	15,24
К2 (Кінець ШРМ-1)	13,23	3,41	16,64	13,82
К2 (Кінець ШРМ-2)	13,23	7,29	20,52	11,21
К2 (Кінець ШРМ-3)	13,23	6,64	19,87	11,57
КЗ Шини ЩР-1	13,23	6,16	19,39	11,86
КЗ Шини ЩОГ (від ГРЩ)	13,23	7,66	20,89	11,01
КЗ Шини ЩОГ-Г (від Ген.)	0,00	2,14	2,14	107,46
КЗ Шини ЩОГ (від Ген.)	0,00	3,18	3,18	72,31
КЗ 1 (Макс. траса)	13,23	28,01	41,24	5,58
КЗ 5 (Макс. траса)	13,23	41,22	54,45	4,22
КЗ 9 (Макс. траса)	13,23	80,01	93,24	2,47
КЗ 12 (Макс. траса)	13,23	33,74	46,97	4,90
КЗ 14 (Макс. траса)	13,23	14,18	27,41	8,39
КЗ 18 (Макс. траса)	13,23	20,05	33,28	6,91
КЗ 25 (Макс. траса)	13,23	43,32	56,55	4,07
КЗ 27 (Макс. траса)	13,23	88,59	101,82	2,26
КЗ 31 (Макс. траса)	13,23	37,97	51,20	4,49
КЗ 32	13,23	22,09	35,32	6,51
КЗ 33	13,23	22,09	35,32	6,51
КЗ 34	13,23	26,72	39,95	5,76
КЗ 35	13,23	26,72	39,95	5,76
КЗ 36	13,23	78,76	91,99	2,50
КЗ 37	13,23	170,26	183,49	1,25
КЗ 38	13,23	173,41	186,64	1,23
КЗ 39	13,23	142,78	156,01	1,47
КЗ 40	13,23	92,48	105,71	2,18

1	2	3	4	5
КЗ 41	13,23	63,84	77,07	2,98
КЗ 42	13,23	63,53	76,76	3,00
КЗ 43	13,23	60,50	73,73	3,12
КЗ 44	13,23	60,30	73,53	3,13
КЗ 45	13,23	21,45	34,68	6,63
КЗ 46	13,23	25,53	38,76	5,93
КЗ Освітлення-1	13,23	2475,72	2488,95	0,09
КЗ Освітлення-2	13,23	2080,89	2094,12	0,11
КЗ Освітлення-3	13,23	2475,72	2488,95	0,09
КЗ Освітлення території	13,23	2634,39	2647,62	0,09

2.14 Вибір апаратів захисту

Вибір автоматичних вимикачів здійснюється за такими основними умовами:

1. За номінальною напругою автомата:

$$U_{\text{ном.а}} \geq U_{\text{НН}} \tag{2.58}$$

де

$U_{\text{ном.а}}$ — номінальна напруга автомата;

$U_{\text{НН}}$ — номінальна напруга мережі.

2. За номінальним струмом розчіплювача:

$$I_{\text{ном.а}} \geq I_{\text{ном.р}} \geq I_{p} \tag{2.59}$$

де

$I_{\text{ном.а}}$ та $I_{\text{ном.р}}$ — номінальні струми автомата та його розчіплювача;

I_{p} — розрахунковий струм лінії.

3. За граничною комутаційною здатністю. Як комутаційний апарат автомати перевіряють щодо здатності вимикання струму КЗ:

$$I_{\text{вим}} \geq I^{3}_{\text{к.max}} \tag{2.60}$$

де

$I_{\text{вим}}$ — номінальний струм вимикання автомата при нормованих умовах;

$I^{3}_{\text{к.max}}$ — початкове діюче значення періодичної складової струму трифазного КЗ.

4. Перевірка від пікових або пускових струмів. Уставка струму спрацьовування електромагнітного розчіплювача миттєвої дії $I_{\text{відс}}$ вибирається більшою за піковий струм групи електроприймачів або пусковий струм одиночного електроприймача:

$$I_{\text{відс}} = I_{\text{ном.а}} \cdot k_{\text{магн}} \geq 1,25 \cdot I_{\text{пік}} \tag{2.61}$$

де

$I_{\text{пік}}$ — піковий струм;

$1,25$ — коефіцієнт надійності, що враховує похибку від розкиду характеристик.

5. Перевірка на чутливість захисту. Для надійного спрацьовування мінімальний струм КЗ (однофазного КЗ у найвіддаленішій точці) має перевищувати уставку розчіплювача:

$$K_{\text{чут}} = \frac{I^{1}_{\text{к.min}}}{I_{\text{відс}}} \geq 1,1 \tag{2.62}$$

де

$I^{1}_{\text{к.min}}$ — струм однофазного КЗ;

$K_{\text{чут}}$ — коефіцієнт чутливості апарата захисту.

2.14.1 Розрахунок та вибір автоматичного вимикача для Ввідний автомат ГРЩ (поз. Шини РУНН).

Вихідні дані для розрахунку:
- Розрахунковий струм: $I_p = 1475{,}47$ А;
- Піковий струм: $I_{\text{пік}} = 2183{,}44$ А;
- Максимальний струм трифазного КЗ: $I^{3}_{\text{к.max}} = 16{,}94$ кА;
- Мінімальний струм однофазного КЗ: $I^{1}_{\text{к.min}} = 15{,}36$ кА.

Згідно з каталогом попередньо обираємо автоматичний вимикач типу Siemens 3WA1 1600A (Налашт. Ir) з номінальним струмом $I_{\text{ном.а}} = 1600$ А.

Перевіряємо виконання умов вибору:

1. За струмом навантаження:

$$I_{\text{ном.а}} = 1600 \ \text{А} \geq I_p = 1475{,}47 \ \text{А}.$$

Умова виконується.

2. За здатністю вимикання струмів КЗ:

$$I_{\text{вим}} = 66 \ \text{кА} \geq I^{3}_{\text{к.max}} = 16{,}94 \ \text{кА}.$$

Умова виконується.

3. Перевірка уставки електромагнітного розчіплювача (відсічки) від хибного спрацьовування під час пікових струмів:

$$I_{\text{відс}} = I_{\text{ном.а}} \cdot k_{\text{магн}} = 1600 \cdot 4 = 6400 \ \text{А}.$$

$$I_{\text{відс}} = 6400 \ \text{А} \geq 1,25 \cdot I_{\text{пік}} = 1,25 \cdot 2183{,}44 = 2729{,}3 \ \text{А}.$$

Умова виконується.

4. Перевірка автомата на чутливість до мінімального струму КЗ:

$$K_{\text{чут}} = \frac{I^{1}_{\text{к.min}}}{I_{\text{відс}}} = \frac{15363{,}93 \ \text{А}}{6400 \ \text{А}} = 2{,}4 \geq 1,1.$$

Умова виконується, отже, автомат обрано та перевірено правильно.

Результати вибору комутаційних апаратів та апаратів захисту зведено до таблиці у додатку А.

2.15 Порівняння результатів розрахунку системи електропостачання

Для верифікації прийнятих проєктних рішень та оцінки точності розрахунків, виконаних методом коефіцієнта використання згідно з нормами ДСТУ, було проведено моделювання системи електропостачання цеху в програмному комплексі Siemens SIMARIS Design. Зазначене програмне забезпечення базується на стандартах IEC 60364 та IEC 60909, що дозволяє провести аналіз параметрів мережі з урахуванням уточнених даних про опір провідників та контактних з’єднань.

Детальні однолінійні схеми електричної мережі цеху з результатами розрахунків, на основі яких проводилося моделювання, наведено у додатках. Аналіз отриманих даних підтверджує обґрунтованість вибору перерізів провідників та номіналів апаратів захисту. Наявні розбіжності у результатах розрахунків пояснюються різними методологічними підходами до врахування перехідних опорів та температурних режимів провідників у вітчизняних та міжнародних нормативних документах.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

3.1.1 Правові та організаційні основи охорони праці

Організація охорони праці в цеху точного лиття регламентується Законом України «Про охорону праці», Кодексом законів про працю України (КЗпП), а також специфічними галузевими нормами, зокрема НПАОП 27.5-1.46-14 «Правила охорони праці під час лиття металів». Відповідно до законодавства, відповідальність за створення безпечних умов праці покладається на роботодавця.

Для профілактики виробничого травматизму в умовах ливарного виробництва, яке належить до робіт із підвищеною небезпекою, функціонує Служба охорони праці. Основним інструментом допуску до роботи є система інструктажів (вступний, первинний, повторний не рідше 1 разу на 3 місяці, позаплановий та цільовий). Персонал, що обслуговує плавильно-заливальну дільницю та вакуумні установки, проходить щорічну перевірку знань нормативних актів з охорони праці та технологічних інструкцій.

3.1.2 Забезпечення електробезпеки з урахуванням специфіки цеху

Безпечна експлуатація електроустановок цеху забезпечується дотриманням вимог НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (ПБЕЕС) та ПУЕ.

Оскільки технологічний процес цеху пов’язаний із наявністю жаркого та запиленого середовища (плавильне відділення), а також використанням потужних електротермічних установок (індукційні печі поз. 34, 35; печі випалювання поз. 32, 33), до електробезпеки висуваються підвищені вимоги:

Кваліфікація персоналу: До обслуговування загальноцехового обладнання допускаються особи з II групою з електробезпеки. Обслуговування РУ-0,4 кВ та високовольтної частини КТП 10 кВ виконує електротехнічний персонал із групою допуску не нижче III та IV відповідно.

Технічні заходи та видимий розрив: Для безпечного проведення ремонтних робіт у розподільних пристроях КТП та на вводах індукційних печей проєктом передбачено застосування сучасних повітряних автоматичних вимикачів (серія 3WA) у висувному виконанні. Це гарантовано забезпечує створення видимого розриву електричного кола та механічне блокування від випадкового вмикання, що є критично важливим при обслуговуванні ліній живлення плавильних агрегатів.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): Враховуючи ризик виникнення електричної дуги при оперативних перемиканнях, електротехнічний персонал забезпечується термостійким спецодягом із захистом від термічних ризиків електричної дуги, діелектричними рукавицями, ботами та захисними екранами. Ливарники та термісти забезпечуються костюмами з вогнетривким просоченням і термостійким взуттям для захисту від бризок розплаву.

Блокування обладнання: Індукційні електропечі обладнуються електричним блокуванням, яке знімає напругу з індуктора при припиненні циркуляції охолоджувальної води або відкриванні дверцят шаф керування.

Практичні прийоми звільнення потерпілого від дії струму: У разі ураження струмом необхідно негайно знеструмити установку (вимикачем, рубильником). Якщо це неможливо в установках до 1 кВ, потерпілого відтягують за сухий одяг, використовуючи діелектричні засоби або неструмопровідні предмети (дошку, пластик).

3.1.3 Розрахунок захисного заземлення цехової трансформаторної підстанції

Для захисту персоналу від ураження електричним струмом при пробої ізоляції на корпус передбачено влаштування захисного заземлення. Захисне заземлення обладнання проєктованого цеху здійснюється шляхом приєднання внутрішньоцехової магістралі до спільного зовнішнього контуру прибудованої КТП, опір якого задовольняє вимоги для електроустановок до 1 кВ ($R \leq 4$ Ом).

Метою даного розрахунку є визначення типу заземлювачів, їх кількості та місця розміщення для забезпечення опору розтікання струму. Спочатку розраховується опір з урахуванням напруги дотику та струму замикання:

Розрахункові питомі опори ґрунту (суглинок):

$$\rho_{\text{р.в}} = K_{\text{в}} \rho \tag{3.1}$$

$$\rho_{\text{р.г}} = K_{\text{г}} \rho \tag{3.2}$$

де

$\rho_{\text{р.в}}$ — розрахунковий питомий опір ґрунту для вертикальних електродів, Ом·м;

$\rho_{\text{р.г}}$ — розрахунковий питомий опір ґрунту для горизонтального електрода (смуги), Ом·м;

$K_{в}$ — коефіцієнт сезонності для вертикальних заземлювачів;

$K_{г}$ — коефіцієнт сезонності для горизонтальних заземлювачів;

ρ — базовий питомий опір ґрунту для заданого типу землі (суглинку) за нормальних умов, Ом·м.

$$\rho_{р.в} = 1{,}3 \cdot 100 = 130 \ \text{Ом} \cdot \text{м},$$

$$\rho_{р.г} = 2{,}5 \cdot 100 = 250 \ \text{Ом} \cdot \text{м}.$$

Опір розтікання одного вертикального електрода:

$$R_{з.в} = \frac{0.366 \rho_{р.в}}{l_{в}} \left(\lg \frac{2 l_{в}}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 t_{в} + l_{в}}{4 t_{в} - l_{в}} \right) \tag{3.3}$$

де

$R_{з.в}$ — опір розтіканню струму одиничного вертикального електрода, Ом;

$l_{в}$ — довжина вертикального електрода (стрижня), м;

d — діаметр вертикального електрода, м;

$t_{в}$ — відстань від поверхні землі до середини вертикального електрода, м.

$$R_{з.в} = \frac{0.366 \cdot 130}{3} \left(\lg \frac{2 \cdot 3}{20 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 2{,}2 + 3}{4 \cdot 2{,}2 - 3} \right) = 41{,}73 \ \text{Ом}.$$

Наближена кількість вертикальних заземлювачів:

$$n = \frac{R_{з.в}}{K_{в.в.е} R_{з.норм}} \tag{3.4}$$

де

n — наближена (попередня) кількість вертикальних електродів, шт.;

$K_{в.в.е}$ — попередній коефіцієнт використання вертикальних електродів (коефіцієнт екранування);

$R_{з.норм}$ — нормоване значення опору заземлювального пристрою.

$$n = \frac{41{,}73}{0{,}47 \cdot 4} = 22{,}2 \ \text{шт}.$$

Приймається $n = 23$ шт. Опір розтікання горизонтального заземлювача (смуги):

$$R_{\text{з.г}} = \frac{0.366\rho_{\text{р.г}}}{l_{\text{г}}} \lg \frac{2l_{\text{г}}^2}{bt_{\text{г}}} \tag{3.5}$$

де

$R_{\text{з.г}}$ — опір розтіканню струму з'єднувальної смуги без урахування взаємоекранування, Ом;

$l_{\text{г}}$ — загальна довжина горизонтального заземлювача (смуги), м;

b — ширина сталевої смуги, м;

$t_{\text{г}}$ — глибина закладання горизонтальної смуги в ґрунт, м.

$$R_{\text{з.г}} = \frac{0.366 \cdot 250}{3 \cdot 23} \lg \frac{2(3 \cdot 23)^2}{40 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}7} = 7{,}34 \quad \text{Ом.}$$

Опір горизонтального заземлювача з урахуванням екранування:

$$R_{\text{з.г.е}} = \frac{R_{\text{з.г}}}{K_{\text{в.г.е}}} \tag{3.6}$$

де

$R_{\text{з.г.е}}$ — реальний опір горизонтального заземлювача з урахуванням екранування іншими електродами, Ом;

$K_{\text{в.г.е}}$ — коефіцієнт використання (екранування) горизонтальної смуги у контурі.

$$R_{\text{з.г.е}} = \frac{7{,}34}{0{,}26} = 28{,}21 \quad \text{Ом.}$$

Уточнений опір вертикальних електродів:

$$R_{\text{з.в.е}} = \frac{R_{\text{з.г.е}} R_{\text{з.норм}}}{R_{\text{з.г.е}} - R_{\text{з.норм}}} \tag{3.7}$$

де

$R_{\text{з.в.е}}$ — уточнений необхідний опір групи вертикальних електродів, який вони мають забезпечити спільно зі смугою, Ом.

$$R_{\text{з.в.е}} = \frac{28{,}21 \cdot 4}{28{,}21 - 4} = 4{,}66 \quad \text{Ом.}$$

Уточнена кількість вертикальних електродів контуру:

$$n_{\text{у}} = \frac{R_{\text{з.в}}}{K_{\text{в.в.е}} R_{\text{з.в.е}}} \tag{3.8}$$

де

$n_{\text{у}}$ — уточнена кількість вертикальних заземлювачів, шт.;

$K_{\text{в.в.е}}$ — уточнений коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів, вибраний за таблицею для вже відомої прийнятої кількості електродів.

$$n_{\text{у}} = \frac{41{,}73}{0{,}45 \cdot 4{,}66} = 19{,}9 \quad \text{шт.}$$

Остаточно для спорудження контуру приймається 20 вертикальних електродів.

3.1.4 Пожежна безпека об’єкта

Забезпечення пожежної безпеки в цеху регламентується Кодексом цивільного захисту України, ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об’єктів будівництва» та «Правилами пожежної безпеки в Україні».

Враховуючи наявність різних класів зон за пожежо- та вибухонебезпечністю (згідно з НПАОП 40.1-1.32-01), система протипожежного захисту цеху має чітке зонування:

Модельна дільниця (зона класу П-I): Через використання горючих модельних сумішей (парафін, стеарин, віск із температурою спалаху понад +61 °C) ця зона є найбільш пожежонебезпечною. Тут встановлюється електрообладнання зі ступенем захисту IP54, а приміщення обладнується автоматичною пожежною сигналізацією.

Плавильно-заливальна дільниця: Основний ризик становить розлив рідкого металу (температура понад 1000 °C) та пробій водоохолоджуваних елементів індукційних печей. Обов’язковою вимогою є відсутність вологи на заливальних майданчиках для запобігання вибухоподібному пароутворенню.

Для локалізації можливих загорянь цех комплектується первинними засобами пожежогасіння:

Вуглекислотні вогнегасники (ВВК) та порошкові (ВП) — застосовуються для гасіння електроустановок під напругою (до 1000 В), щитів керування АСУТП та індукційних печей. Застосування води або пінних вогнегасників для гасіння електропечей та розплавленого металу категорично заборонено.

Ящики з сухим піском та совками — встановлюються поблизу плавильних печей для локалізації бризок розплаву, а також на модельній дільниці для усунення розливів горючих полімерних сумішей.

Протипожежні покривала (кошми) — для швидкого гасіння локальних осередків на робочих місцях.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

4.1 Визначення кошторисної вартості елементів системи електропостачання

Для визначення первісної балансової вартості основних фондів, що вводяться у дію, а також для розрахунку величини амортизаційних відрахувань необхідно провести розрахунки кошторисної вартості елементів системи електропостачання. Основою для складання кошторису є прийняті в проєкті системи електропостачання технічні рішення. На виконання будівельно-монтажних робіт (БМР) закладено 30% від загальної кошторисної вартості електрообладнання.

4.1.1 Розрахунок кошторису

Таблиця 4.1 — Кошторис на придбання та монтаж обладнання та мереж цеху лиття

Найменування та характеристика обладнання та мереж	Одиниці виміру	К-сть	Кошторисна вартість, грн.	
			одиниці	загальна сума
1	2	3	4	5
Комплектна трансформаторна підстанція КТП 2х800 кВА	компл.	1	2074492	2074492
Вимикач автоматичний серії Siemens 3WA1 1600A (Налашт. Ir)	шт.	3	191363	574090
Вимикач автоматичний серії Siemens 3VA2 630A	шт.	3	93348	280044
Вимикач автоматичний серії Siemens 3VA1 100A	шт.	11	10268	112951
Вимикач автоматичний серії Siemens 3VA2 250A	шт.	3	37339	112018
Вимикач автоматичний серії Siemens 3VA1 50A	шт.	15	9241	138622
Вимикач автоматичний серії Siemens 5SL4 (C32)	шт.	4	3317	13268
Вимикач автоматичний серії Siemens 5SL4 (C25)	шт.	10	3317	33170
Вимикач автоматичний серії Siemens 5SY7 (C32)	шт.	5	4411	22053
Вимикач автоматичний серії Siemens 3VA1 125A	шт.	2	10502	21003
Вимикач автоматичний серії Siemens 5SL4 (C16) (Налашт. Ir)	шт.	4	3317	13268

1	2	3	4	5
Магістральний шинопровід ШРМ-3 (630А)	м	65	28000	1820000
Магістральний шинопровід ШРМ-1 (630А)	м	22	28000	616000
Магістральний шинопровід ШРМ-2 (630А)	м	73	28000	2044000
Провід силовий марки 3х16	м	79	439	34660
Провід силовий марки 3х10	м	112	285	31888
Провід силовий марки 3х50	м	73	1284	93698
Провід силовий марки 3х4	м	50	117	5835
Кабель захищений марки 3х95	м	68	3080	209473
Кабель захищений марки 3х70	м	47	2194	103103
Провід силовий марки 3х6	м	36	173	6217
Провід силовий марки 2х1.5	м	281	34	9619

Укрупнений підсумок капітальних вкладень із урахуванням виконання будівельно-монтажних робіт (БМР):

- Первісна вартість силового електрообладнання з БМР: 10237472 грн.
- Первісна вартість кабельних ліній та внутрішніх мереж з БМР: 642840 грн.
- Загальні капітальні вкладення в систему електропостачання: 10880312 грн.

4.2 Планування електропостачання цеху та розрахунок втрат

Основним методом планування електропостачання промислового підприємства є розробка його електричного балансу. Річна потреба в електроенергії на технологічні процеси та силові потреби визначається на основі розрахункового навантаження цеху за виразом:

$$W_n = P_{\text{р}_\Sigma} \cdot T_p \tag{4.1}$$

Втрати активної енергії у двообмоткових трансформаторах КТП протягом року розраховуються за формулою:

$$\Delta W_m = n_{\text{тр}} \cdot \left(P_{\text{кз}} \cdot k_z^2 \cdot k_{\text{ф}}^2 \cdot T_p + P_{\text{хх}} \cdot T_p \right) \tag{4.2}$$

4.2.1 Розрахунок втрат

Розрахунок річного споживання при сумарному навантаженні цеху $P_{\text{р}_\Sigma} = 959{,}81$ кВт та фонді часу $T_p = 3432$ год:

$$W_n = 959{,}81 \cdot 3432 = 3294068 \ \ \text{кВт} \cdot \text{год} \tag{4.3}$$

Підставивши паспортні параметри вибраних трансформаторів та коефіцієнт їх завантаження в нормальному режимі ($k_z = 0{,}6$), отримаємо:

$$\Delta W_m = 2 \cdot \left(8 \cdot 0{,}6^2 \cdot 1{,}1 \cdot 3432 + 1{,}17 \cdot 3432\right) = 31951 \ \text{кВт} \cdot \text{год} \qquad (4.4)$$

Втрати в жилах кабельних ліній розподільної мережі другого рівня, розраховані автоматично на основі довжин та опорів кожної лінії, склали $\Delta W_{\text{л}} = 10821$ кВт·год. Результати планування та зведені витратно-прихідні статті електричної енергії подано у формі балансу цеху (Таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 — Електробаланс цеху точного лиття

Стаття балансу	Код рядка	Активна енергія, кВт·год	% до підсумку
1	2	3	4
Прихід			
Виробництво електроенергії власними установками	01	0	0,0 %
Надходження з зовнішньої енергосистеми	02	3336840	100,0 %
Разом прихід (01+02)	03	3336840	100,0 %
Витрати			
Споживання електроприймачами цеху на технологічні та силові потреби	04	3294068	98,72 %
Втрати в трансформаторах КТП цеху	05	31951	0,96 %
Втрати в цехових кабельних мережах	06	10821	0,32 %
Разом витрати (включаючи втрати)	11	3336840	100,0 %

4.3 Розрахунок витрат на утримання та експлуатацію обладнання

Витрати на утримання та експлуатацію обладнання складаються з амортизаційних відрахувань, витрат на поточний ремонт і капітальний ремонт підрядною організацією (на рівні 12% від первісної вартості).

Собівартість розподілу та передачі 1 кВт·год електроенергії в системі цеху визначається відношенням:

$$\bar{s} = \frac{B_e \cdot 10^2}{\frac{W_n}{1000}} \qquad (4.5)$$

4.3.1 Розрахунок витрат

Таблиця 4.3 — Розрахунок річних амортизаційних відрахувань

Найменування груп основних фондів	Первісна вартість, грн.	Норма, %	Амортизаційні відрахування, грн.
1	2	3	4
Силове електрообладнання КТП	10237472	20	2047494
Кабельні лінії та мережі	642840	10	64284
Разом	10880312	–	2111778

Таблиця 4.4 — Кошторис річних експлуатаційних витрат на електропостачання

Статті затрат	Затрати, тис. грн.	% до підсумку
1	2	3
Амортизаційні відрахування від основних фондів	2111,78	47,32 %
Поточний ремонт та обслуговування (15% від амортизації)	316,77	7,1 %
Цехові та загальновиробничі витрати (30% від експлуатаційних)	728,56	16,33 %
Капітальний ремонт (підрядний спосіб, 12% від вартості)	1305,64	29,26 %
Разом річні експлуатаційні витрати (B_e)	4462,75	100,0 %

Собівартість розподілу та передачі 1 кВт·год електроенергії в системі цеху:

$$\bar{s} = \frac{B_e \cdot 10^2}{\frac{W_n}{1000}} = \frac{4462{,}75 \cdot 10^2}{3294{,}07} = 135{,}48 \ \ \text{коп}/(\text{кВт} \cdot \text{год}) \tag{4.6}$$

4.4 Техніко-економічні показники системи електропостачання

Для остаточної оцінки ефективності прийнятих проєктних рішень визначаються питомі капітальні вкладення на 1 кВА приєднаної потужності трансформаторів:

$$K_{\text{пит}} = \frac{B_{\text{обл.сума}}}{S_{\text{р}\Sigma}} \tag{4.7}$$

4.4.1 Розрахунок капітальних вкладень

Значення питомих капітальних вкладень складе:

$$K_{\text{пит}} = \frac{B_{\text{обл.сума}}}{S_{\text{р}_\Sigma}} = \frac{10880312}{974} = 11174{,}42 \quad \text{грн/кВА}. \tag{4.8}$$

Планові загальні техніко-економічні показники системи електропостачання цеху лиття наведено в таблиці Таблиця 4.5.

Таблиця 4.5 — Підсумкові техніко-економічні показники системи електропостачання

Показник	Одиниця виміру	Значення
1	2	3
Розрахункова активна потужність цеху ($P_{\text{р}_\Sigma}$)	кВт	959,81
Приєднана потужність трансформаторів КТП	кВА	974
Річна потреба цеху в корисній електроенергії	тис. кВт·год	3294,07
Сумарні річні втрати в трансформаторах та кабелях	тис. кВт·год	42,77
Втрати електроенергії у відсотках до споживання	%	1,28 %
Загальні капітальні вкладення в мережу цеху з БМР	тис. грн.	10880,31
Річні витрати на оплату купованої енергії (тариф 7.2 грн)	тис. грн.	24025,25
Річні експлуатаційні витрати на утримання мережі (B_e)	тис. грн.	4462,75
Собівартість передачі та розподілу 1 кВт·год всередині цеху	коп/(кВт·год)	135,48
Повна собівартість 1 кВт·год споживаної енергії з урахуванням втрат	грн/(кВт·год)	8,65
Питомі капітальні вкладення	грн/кВА	11174,42

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано аналіз та розробку системи електропостачання цеху точного лиття металургійного підприємства.

На основі аналізу технологічного процесу визначено категорії надійності електроприймачів. До особливої групи I категорії віднесено вакуумні індукційні печі (поз. 34, 35); до I категорії — систему витяжної вентиляції; решту обладнання віднесено до II та III категорій. Визначено координати центру електричних навантажень ($X = 23,30$ м, $Y = 14,63$ м) та обґрунтовано розташування прибудованої трансформаторної підстанції.

Спроєктовано схему внутрішньоцехової мережі 400/230 В за системою TN-S. Розрахункові навантаження становлять: активна потужність $P_p = 959,81$ кВт, реактивна $Q_p = 163,78$ кВАр, повна $S_p = 973,68$ кВА. До встановлення прийнято двотрансформаторну підстанцію з енергоефективними трансформаторами потужністю $2 \cdot 800$ кВА з коефіцієнтом завантаження $k_з = 0,6$.

Забезпечення показників якості електроенергії досягається за рахунок технічних параметрів трансформаторного обладнання. Для захисту мережі від струмів короткого замикання (трифазний $I_k = 16,94$ кА, ударний $i_y = 35,93$ кА) обрано магістральні шинопроводи LDC262 та комутаційну апаратуру серії 3WA1.

Параметри робочого та аварійного освітлення, виконаного на основі світлодіодних світильників, верифіковано програмними методами моделювання. Розрахунок параметрів мережі та налаштування пристроїв релейного захисту підтверджено у програмному комплексі SIMARIS Design.

Забезпечення нормативних умов з охорони праці реалізовано шляхом розрахунку контуру заземлення з опором $R = 4$ Ом та заходів з пожежогасіння відповідно до класу зони П-I.

За результатами техніко-економічного аналізу встановлено, що капітальні вкладення становлять 10880,3 тис. грн. Річні втрати електроенергії в системі становлять 1,19% від сумарного споживання. Собівартість розподілу 1 кВт·год електроенергії становить 143,81 коп.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги. – Київ : Мінрегіон України, 2016.
2. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – Київ : Держнаглядохоронпраці, 1998.
3. НПАОП 27.5-1.46-14. Правила охорони праці у ливарному виробництві. – Київ : Міненерговугілля України, 2014.
4. ДСТУ EN 12464-1:2022. Світло та освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Внутрішні робочі місця (EN 12464-1:2021, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
5. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. – Київ : Мінрегіон України, 2018.
6. ДСТУ EN 60364-5-56:2010. Низьковольтні електричні установки. Частина 5-56. Вибір і монтаж електрообладнання. Системи забезпечення безпеки. – Київ : ДП «УкрНДНЦ».
7. ДСТУ EN 60364-1:2014. Низьковольтні електричні установки. Частина 1. Основні положення, оцінювання загальних характеристик, терміни та визначення понять. – Київ : ДП «УкрНДНЦ».
8. ДСТУ EN 60529:2014. Ступені захисту, що забезпечуються оболонками (Код IP) (EN 60529:1991; A1:2000; A2:2013, IDT). – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014.
9. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – Київ : Держнаглядохоронпраці України, 2001.
10. ДСТУ 9324:2025. Настанова щодо проєктування систем електропостачання промислових підприємств. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2025.
11. ДСТУ EN 50708-2-1:2022. Трансформатори силові. Додаткові європейські вимоги. Частина 2-1. Середні силові трансформатори. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
12. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – Вид. офіц. – Київ : Міненерговугілля України, 2017.
13. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС). – Вид. офіц. – Київ : Міненерговугілля України, 2006.
14. Офіційна технічна документація та специфікація до програмного комплексу SIMARIS design [Електронний ресурс] / Siemens AG. – Режим доступу: https://new.siemens.com
15. Офіційна технічна документація та посібник користувача DIALux evo [Електронний ресурс] / DIAL GmbH. – Режим доступу: https://www.dialux.com

16. Електронна база даних світлотехнічного обладнання та світильників Philips [Електронний ресурс] / Signify (Philips Lighting). – Режим доступу: https://www.lighting.philips.com
17. Електронна база даних електротехнічного обладнання (автоматичні вимикачі, шинопроводи, трансформатори) [Електронний ресурс] / Siemens AG. – Режим доступу: https://new.siemens.com

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А — ТАБЛИЦІ

Таблиця А.1 — Ф636-92

Поз. позначення	Найменування ЕП	Вихідні дані						Розрахункові величини			Ефективне число ЕП, n_e	Коефіцієнт розрахункового навантаження, $K_р$	Розрахункова потужність			$I_р$, Розрахунковий струм, А
		за завданням технологів			за довідниковими даними											
		Кількість ЕП n, шт	Номінальна		Коефіцієнт використання $k_В$, $K_В$	Коефіцієнт потужності		$k_В \cdot P_н$	$k_В \cdot P_н \cdot \operatorname{tg}\varphi$	$n \cdot p_н^2$			$P_р$, активна, кВт	$Q_р$, реактивна, кВАр	$S_р$, повна, кВА	
			Одної ЕП, $p_н$	Загальна, $P_н = n \cdot p_н$		$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ШРМ-1																
18...21	Плавильна електропіч	4,00	55,00	220,00	0,80	1,00	0,00	176,00	0,00	12100,00	—	—	—	—	—	—
5...8	Ливарна машина	4,00	26,00	104,00	0,90	0,85	0,62	93,60	58,01	2704,00	—	—	—	—	—	—
37	Кран-балка	1,00	10,00	10,00	0,70	0,88	0,54	7,00	3,78	100,00	—	—	—	—	—	—
44	Вентилятор	1,00	13,00	13,00	0,65	0,85	0,62	8,45	5,24	169,00	—	—	—	—	—	—
Всього по ШРМ-1		10,00	—	347,00	0,82	0,97	0,26	285,05	67,02	15073,00	7,00	1,00	285,05	73,73	294,43	424,97
ШРМ-3																
9...11	Очисний барабан	3,00	17,00	51,00	0,60	0,95	0,33	30,60	10,06	867,00	—	—	—	—	—	—
1...4	Ливарна машина	4,00	22,00	88,00	0,90	0,82	0,70	79,20	55,28	1936,00	—	—	—	—	—	—
14...17	Плавильна електропіч	4,00	55,00	220,00	0,80	1,00	0,00	176,00	0,00	12100,00	—	—	—	—	—	—
36	Галтувальний барабан	1,00	17,00	17,00	0,75	0,96	0,29	12,75	3,72	289,00	—	—	—	—	—	—
38	Кран-балка	1,00	10,00	10,00	0,70	0,88	0,54	7,00	3,78	100,00	—	—	—	—	—	—
42	Вентилятор	1,00	13,00	13,00	0,65	0,85	0,62	8,45	5,24	169,00	—	—	—	—	—	—

Продовження додатку А

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Всього по ШРМ-3		14,00	—	399,00	0,79	0,96	0,27	314,00	78,07	15461,00	10,00	1,00	314,00	85,88	325,53	469,87
ШРМ-2																
22...25	Електротермічна піч	4,00	24,00	96,00	0,90	1,00	0,00	86,40	0,00	2304,00	—	—	—	—	—	—
39	Кран-балка	1,00	10,00	10,00	0,70	0,88	0,54	7,00	3,78	100,00	—	—	—	—	—	—
26...27	Сушильна шафа	2,00	12,00	24,00	0,70	0,95	0,33	16,80	5,52	288,00	—	—	—	—	—	—
12...13	Електротермічна піч	2,00	30,00	60,00	0,70	1,00	0,00	42,00	0,00	1800,00	—	—	—	—	—	—
28...31	Електроагрувальна піч	4,00	19,00	76,00	0,85	1,00	0,00	64,60	0,00	1444,00	—	—	—	—	—	—
41	Вентилятор	1,00	13,00	13,00	0,65	0,85	0,62	8,45	5,24	169,00	—	—	—	—	—	—
43	Вентилятор	1,00	13,00	13,00	0,65	0,85	0,62	8,45	5,24	169,00	—	—	—	—	—	—
40	Вентилятор	1,00	13,00	13,00	0,65	0,85	0,62	8,45	5,24	169,00	—	—	—	—	—	—
45	Модельна дільниця	1,00	25,00	25,00	0,60	0,85	0,62	15,00	9,30	625,00	—	—	—	—	—	—
46	Лабораторія, АСУТП	1,00	18,00	18,00	0,70	0,92	0,43	12,60	5,37	324,00	—	—	—	—	—	—
Всього по ШРМ-2		18,00	—	348,00	0,78	0,99	0,15	269,75	39,67	7392,00	18,00	1,00	269,75	39,67	272,65	393,54
Радіальні лінії																
32	Електротермічна піч	1,00	75,00	75,00	0,93	1,00	0,00	69,75	0,00	5625,00	1,00	1,00	69,75	0,00	69,75	100,68
33	Електротермічна піч	1,00	75,00	75,00	0,93	1,00	0,00	69,75	0,00	5625,00	1,00	1,00	69,75	0,00	69,75	100,68
ЩОГ																
34...35	Електропіч індукційна	2,00	60,00	120,00	0,87	1,00	0,00	104,40	0,00	7200,00	—	—	—	—	—	—
Всього по ЩОГ		2,00	—	120,00	0,87	1,00	0,00	104,40	0,00	7200,00	2,00	1,00	104,40	0,00	104,40	150,69
Третій рівень		46,00	—	1364,00	0,82	0,99	0,17	1112,70	184,77	56376,00	33,00	0,85	945,80	157,06	958,75	1383,83
Робоче освітлення		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12,74	6,12	14,13	20,40
Освітлення території		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,27	0,61	—	—
Разом													959,81	163,78	973,68	1405,39

Таблиця А.2 — Переріз провідників розподільчої мережі

№ обл. на плані	$p_н$, кВт	$I_н$, А	$I_{доп}$, А	$I'_{доп}$, А	s, мм²	тип кабеля (провода)	$l_{кб}$, км	r_n, Ом/км	x_n, Ом/км	$R_{кб}$, Ом	$X_{кб}$, Ом	$\Delta U_{пр}$, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	22,00	38,7	70,	51,8	16	3х16	0,006	1,160	0,095	0,0066	0,0005	0,096
2	22,00	38,7	70,	51,8	16	3х16	0,006	1,160	0,095	0,0072	0,0006	0,105
3	22,00	38,7	70,	51,8	16	3х16	0,007	1,160	0,095	0,0078	0,0006	0,113
4	22,00	38,7	70,	51,8	16	3х16	0,007	1,160	0,095	0,0084	0,0007	0,121
5	26,00	44,2	70,	51,8	16	3х16	0,010	1,160	0,095	0,0121	0,0010	0,206
6	26,00	44,2	70,	51,8	16	3х16	0,009	1,160	0,095	0,0102	0,0008	0,174
7	26,00	44,2	70,	51,8	16	3х16	0,007	1,160	0,095	0,0084	0,0007	0,143
8	26,00	44,2	70,	51,8	16	3х16	0,006	1,160	0,095	0,0065	0,0005	0,111
9	17,00	25,8	50,	37,0	10	3х10	0,013	1,840	0,099	0,0239	0,0013	0,259
10	17,00	25,8	50,	37,0	10	3х10	0,013	1,840	0,099	0,0239	0,0013	0,259
11	17,00	25,8	50,	37,0	10	3х10	0,013	1,840	0,099	0,0239	0,0013	0,259
12	30,00	43,3	70,	51,8	16	3х16	0,008	1,160	0,095	0,0093	0,0008	0,174
13	30,00	43,3	70,	51,8	16	3х16	0,005	1,160	0,095	0,0058	0,0005	0,109
14	55,00	79,4	135,	99,9	50	3х50	0,005	0,370	0,085	0,0019	0,0004	0,066
15	55,00	79,4	135,	99,9	50	3х50	0,006	0,370	0,085	0,0021	0,0005	0,074
16	55,00	79,4	135,	99,9	50	3х50	0,006	0,370	0,085	0,0023	0,0005	0,080
17	55,00	79,4	135,	99,9	50	3х50	0,007	0,370	0,085	0,0025	0,0006	0,086
18	55,00	79,4	135,	99,9	50	3х50	0,013	0,370	0,085	0,0050	0,0011	0,170
19	55,00	79,4	135,	99,9	50	3х50	0,012	0,370	0,085	0,0043	0,0010	0,149
20	55,00	79,4	135,	99,9	50	3х50	0,010	0,370	0,085	0,0037	0,0009	0,127
21	55,00	79,4	135,	99,9	50	3х50	0,008	0,370	0,085	0,0031	0,0007	0,106
22	24,00	34,6	50,	37,0	10	3х10	0,007	1,840	0,099	0,0129	0,0007	0,193
23	24,00	34,6	50,	37,0	10	3х10	0,007	1,840	0,099	0,0129	0,0007	0,193

Продовження додатку А

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
24	24,00	34,6	50,	37,0	10	3x10	0,007	1,840	0,099	0,0129	0,0007	0,193
25	24,00	34,6	50,	37,0	10	3x10	0,007	1,840	0,099	0,0129	0,0007	0,193
26	12,00	18,2	27,	20,0	4	3x4	0,006	4,630	0,102	0,0278	0,0006	0,210
27	12,00	18,2	27,	20,0	4	3x4	0,006	4,630	0,102	0,0278	0,0006	0,210
28	19,00	27,4	50,	37,0	10	3x10	0,006	1,840	0,099	0,0101	0,0005	0,120
29	19,00	27,4	50,	37,0	10	3x10	0,006	1,840	0,099	0,0101	0,0005	0,120
30	19,00	27,4	50,	37,0	10	3x10	0,006	1,840	0,099	0,0101	0,0005	0,120
31	19,00	27,4	50,	37,0	10	3x10	0,006	1,840	0,099	0,0101	0,0005	0,120
36	17,00	25,6	50,	37,0	10	3x10	0,013	1,840	0,099	0,0239	0,0013	0,258
37	10,00	16,4	27,	20,0	4	3x4	0,012	4,630	0,102	0,0556	0,0012	0,351
38	10,00	16,4	27,	20,0	4	3x4	0,012	4,630	0,102	0,0556	0,0012	0,351
39	10,00	16,4	27,	20,0	4	3x4	0,010	4,630	0,102	0,0463	0,0010	0,293
40	13,00	22,1	34,	25,2	6	3x6	0,009	3,090	0,100	0,0278	0,0009	0,230
41	13,00	22,1	34,	25,2	6	3x6	0,006	3,090	0,100	0,0185	0,0006	0,154
42	13,00	22,1	34,	25,2	6	3x6	0,006	3,090	0,100	0,0185	0,0006	0,154
43	13,00	22,1	34,	25,2	6	3x6	0,006	3,090	0,100	0,0185	0,0006	0,154
44	13,00	22,1	34,	25,2	6	3x6	0,006	3,090	0,100	0,0185	0,0006	0,154
45	25,00	42,5	70,	47,7	16	3x16	0,002	1,160	0,095	0,0023	0,0002	0,038
46	18,00	28,2	50,	34,0	10	3x10	0,002	1,840	0,099	0,0037	0,0002	0,042
Освітлення-1	2,70	4,3	19,	12,9	1.5	2x1.5	0,067	12,300	0,126	0,8204	0,0084	1,391
Освітлення-2	2,82	4,5	19,	12,9	1.5	2x1.5	0,056	12,300	0,126	0,6888	0,0071	1,218
Освітлення-3	2,70	4,3	19,	12,9	1.5	2x1.5	0,067	12,300	0,126	0,8204	0,0084	1,391
Освітлення території	2,70	4,3	19,	12,9	1.5	2x1.5	0,071	12,300	0,126	0,8733	0,0089	1,481

Таблиця А.3 — Вибір комутаційних апаратів та апаратів захисту

Поз.	Призначення	Модель автомата	I_p, А	$I_{ном.р}$, А	$I_{k.max}$, кА	$I_{вим}$, кА	$I_{пік}$, А	$I_{відсічки}$, А	$I_{k.min}$, кА	$K_{чут}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Шини РУНН	Ввідний автомат ГРЩ	Siemens 3WA1 1600A (Налашт. Ir)	1475,47	1600	16,94	66	2183,44	6400	15,36	2,4
ШРМ-1	Автомат магістралі ШРМ-1	Siemens 3VA2 630A	424,97	630	16,94	55	699,69	7560	13,82	1,83
ШРМ-2	Автомат магістралі ШРМ-2	Siemens 3VA2 630A	410,27	630	16,94	55	553,76	7560	11,21	1,48
ШРМ-3	Автомат магістралі ШРМ-3	Siemens 3VA2 630A	467,02	630	16,94	55	707,97	7560	11,57	1,53
ЩР-1	Автомат лінії до ЕП №ЩР-1	Siemens 3VA1 100A	78,55	100	15,19	25	78,55	1000	11,86	11,86
ЩОГ	Автомат лінії до ЕП №ЩОГ	Siemens 3VA2 250A	173,21	250	14,61	55	303,11	3000	11,01	3,67
ЩОГ-Г	Автомат лінії до ЕП №ЩОГ-Г	Siemens 3VA2 250A	173,21	250	1,36	55	303,11	3000	107,46	35,82
ЩОГ_Ген	Автомат лінії до ЕП №ЩОГ_Ген	Siemens 3VA2 250A	173,21	250	1,36	55	303,11	3000	72,31	24,1
1	Автомат лінії до ЕП №1	Siemens 3VA1 50A	43,03	50	11,56	25	279,68	500	5,58	11,15
5	Автомат лінії до ЕП №5	Siemens 3VA1 50A	49,06	50	13,96	25	318,86	500	4,22	8,45
9	Автомат лінії до ЕП №9	Siemens 5SL4 (C32)	28,7	32	7,2	10	200,89	320	2,47	7,71
12	Автомат лінії до ЕП №12	Siemens 3VA1 50A	43,3	50	13,08	25	43,3	500	4,9	9,79
14	Автомат лінії до ЕП №14	Siemens 3VA1 100A	79,39	100	13,42	25	79,39	1000	8,39	8,39

Продовження додатку А

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
18	Автомат лінії до ЕП №18	Siemens 3VA1 100A	79,39	100	15,04	25	79,39	1000	6,91	6,91
22	Автомат лінії до ЕП №22	Siemens 3VA1 50A	34,64	50	11,25	25	34,64	500	4,07	8,13
26	Автомат лінії до ЕП №26	Siemens 5SL4 (C25)	20,26	25	6,99	10	20,26	250	2,26	9,04
28	Автомат лінії до ЕП №28	Siemens 5SY7 (C32)	27,42	32	11,04	15	27,42	320	4,49	14,04
32	Автомат лінії до ЕП №32	Siemens 3VA1 125A	108,25	125	12,95	25	108,25	1250	6,51	5,21
33	Автомат лінії до ЕП №33	Siemens 3VA1 125A	108,25	125	12,95	25	108,25	1250	6,51	5,21
34	Автомат лінії до ЕП №34	Siemens 3VA1 100A	86,6	100	11,71	25	216,51	1000	5,76	5,76
35	Автомат лінії до ЕП №35	Siemens 3VA1 100A	86,6	100	11,71	25	216,51	1000	5,76	5,76
36	Автомат лінії до ЕП №36	Siemens 5SL4 (C32)	28,4	32	7,29	10	198,8	320	2,5	7,81
37	Автомат лінії до ЕП №37	Siemens 5SL4 (C25)	18,22	25	4,05	10	82,01	250	1,25	5,01
38	Автомат лінії до ЕП №38	Siemens 5SL4 (C25)	18,22	25	3,89	10	82,01	250	1,23	4,93
39	Автомат лінії до ЕП №39	Siemens 5SL4 (C25)	18,22	25	4,74	10	82,01	250	1,47	5,9
40	Автомат лінії до ЕП №40	Siemens 5SL4 (C25)	24,53	25	6,36	10	159,43	250	2,18	8,7
41	Автомат лінії до ЕП №41	Siemens 5SL4 (C25)	24,53	25	8,25	10	159,43	250	2,98	11,94
42	Автомат лінії до ЕП №42	Siemens 5SL4 (C25)	24,53	25	8,32	10	159,43	250	3	11,98
43	Автомат лінії до ЕП №43	Siemens 5SL4 (C25)	24,53	25	9,11	10	159,43	250	3,12	12,48

Продовження додатку А

Продовження таблиці

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
44	Автомат лінії до ЕП №44	Siemens 5SL4 (C25)	24,53	25	9,16	10	159,43	250	3,13	12,51
45	Автомат лінії до ЕП №45	Siemens 3VA1 50A	47,17	50	14,37	25	47,17	500	6,63	13,27
46	Автомат лінії до ЕП №46	Siemens 5SY7 (C32)	31,38	32	13,91	15	31,38	320	5,93	18,55
Освітлення-1	Автомат лінії до ЕП №Освітлення-1	Siemens 5SL4 (C16) (Налашт. Ir)	4,81	16	0,29	10	4,81	64	0,09	1,44
Освітлення-2	Автомат лінії до ЕП №Освітлення-2	Siemens 5SL4 (C16) (Налашт. Ir)	5,02	16	0,35	10	5,02	64	0,11	1,72
Освітлення-3	Автомат лінії до ЕП №Освітлення-3	Siemens 5SL4 (C16) (Налашт. Ir)	4,81	16	0,29	10	4,81	64	0,09	1,44
Освітлення території	Автомат лінії до ЕП №Освітлення території	Siemens 5SL4 (C16) (Налашт. Ir)	4,81	16	0,28	10	4,81	64	0,09	1,36

ДОДАТОК Б — ПРЕЗЕНТАЦІЯ

Слайд 1



Слайд 2

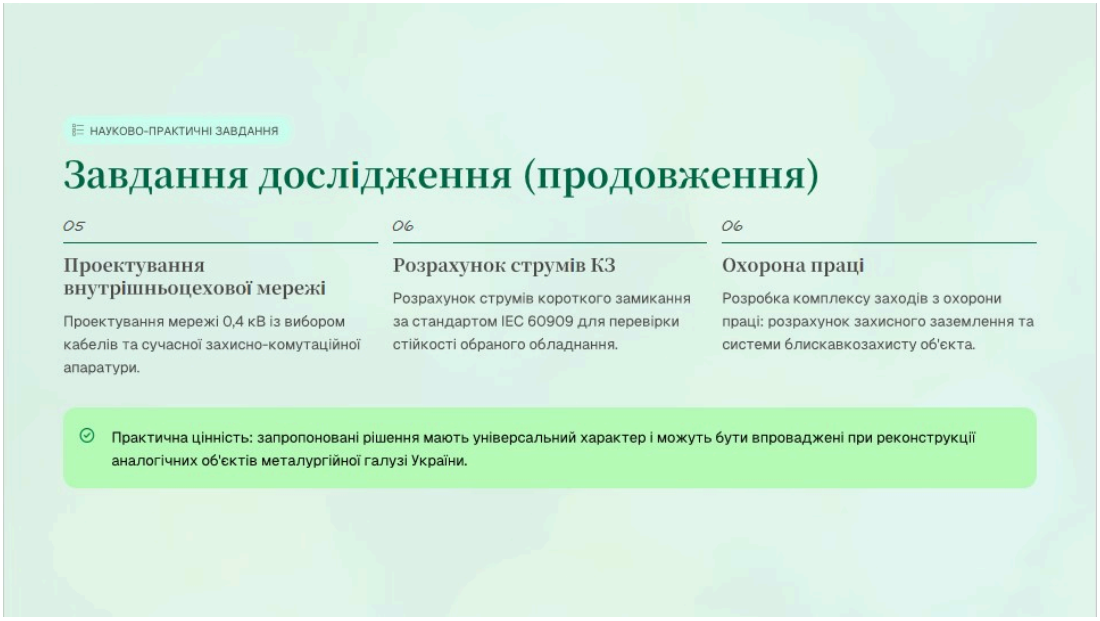


Продовження додатку Б

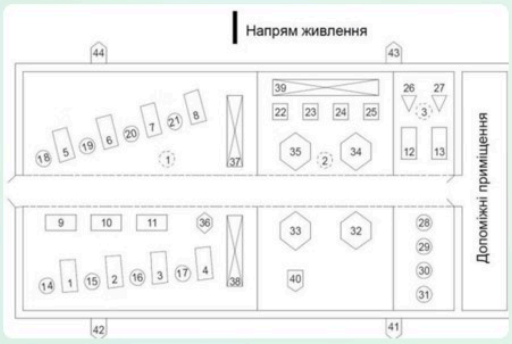
Слайд 3



Слайд 4



Слайд 5



Технологічний процес цеху точного лиття

Цех спеціалізується на серійному виробництві виливків із вуглецевих і легованих сталей методом лиття по моделях, що виплавляються, а також деталей із жароміцних сплавів. Розміри корпусу: 48 × 30 × 9 м.

Модельна дільниця
Підготовка воскових моделей, нанесення керамічного покриття

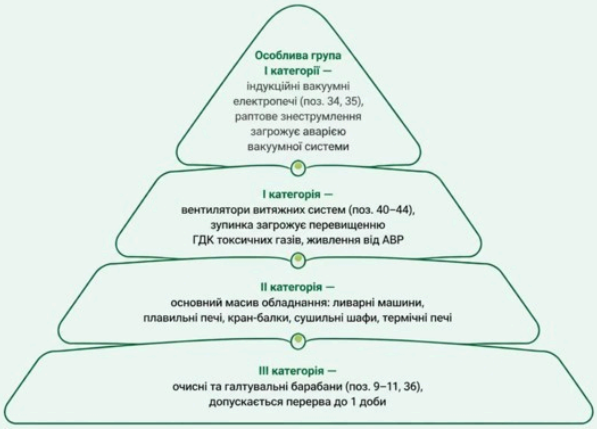
Плавильне відділення
Індукційні та дугові печі, вакуумне лиття спецсплавів

Термообробка
Випалювання кераміки, гартування та відпуск виливків

Допоміжні системи
Кран-балки, вентиляція, лабораторія, АСУТП

Слайд 6

Класифікація електроприймачів за надійністю



Класифікація визначає структуру головної схеми електричних з'єднань, кількість трансформаторів та конфігурацію пристроїв АВР згідно з ПУЕ (Розділ 1, Глава 1.2) та ДСТУ EN 60364-5-56.

Продовження додатку Б

Слайд 7

Вибір напруги та розміщення КТП

Прийняті рішення

Трифазна чотирипровідна мережа 400/230 В, 50 Гц. Система заземлення TN-S з глухозаземленою нейтраллю.

КТП розміщується прибудовано вздовж північної стіни цеху (вісь X = 20...25 м).

Центр електричних навантажень

Координати ЦЕН: X = 23,30 м, Y = 14,63 м — геометричний центр цеху, на головному транспортному проїзді.

Внутрішньоцехове розміщення КТП недоцільне через запилене середовище, гідроприбирання та перешкоди для кран-балок. Прибудоване виконання забезпечує охолодження трансформаторів та пожежну безпеку.



Слайд 8

Схема цехової мережі та трансформатори

Змішана (радіально-магістральна) схема

Основні групи споживачів II–III категорій підключені до магістральних шинопроводів ШРМ-1...3. Споживачі особливої групи живляться по радіальних лініях через щит особливої категорії (ЩОГ) з можливістю перемикання на генератор.

ШРМ-1

Плавильні печі, ливарні машини, кран-балка, вентилятор

ШРМ-2

Термічні печі, сушильні шафи, вентилятори, лабораторія

ШРМ-3

Очисні барабани, ливарні машини, плавильні печі

Силові трансформатори

Питома густина навантаження: **0,56 кВА/м²** (перевищує поріг 0,4 кВА/м²).

Прийнято двотрансформаторну КТП (N = 2) з коефіцієнтом завантаження $k_з = 0,7$.

Обрано: 2 × GEAFOL Neo 800 кВА (10/0,4 кВ) — сухі трансформатори з литою ізоляцією, відповідають EU EcoDesign Tier 2. Фактичний $k_з = 0,6$ — оптимальна зона ККД.



Продовження додатку Б

Слайд 9

Розрахунок електричних навантажень

959,81
кВт
Сумарна розрахункова активна потужність цеху

163,78
кВАр
Сумарна розрахункова реактивна потужність

973,68
кВА
Сумарна розрахункова повна потужність

1321
кВт
Встановлена потужність технологічного обладнання

Розрахунок виконано за трирівневою методикою: 1-й рівень — окремі ЕП; 2-й рівень — групи ЕП на шинопроводах (ШРМ); 3-й рівень — шини КТП. Застосовано комбінований метод ДСТУ 9324:2025 та IEC 60364-8-1 з коефіцієнтами використання та розрахункового навантаження.

Слайд 10

Освітлення та компенсація реактивної потужності

Система освітлення

Розрахунок виконано методом коефіцієнта використання світлового потоку з верифікацією у DIALux evo.

Ливарний цех



70 шт. Philips BY581P 250S/840

E = 500 лк

Модельна дільниця



38 шт. Philips WT120C 60S/840 PSD L1500

E = 750 лк

Лабораторія



42 шт. Philips SP342P 52S/940 DEIA MLO SMT L120 WH

E = 750 лк

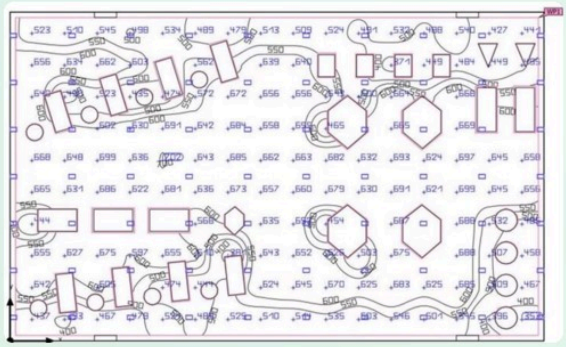
Компенсація реактивної потужності

Розрахунок показав: **Q = −413 кВАр** — встановлення класичних конденсаторних батарей не потрібне, трансформатори мають достатній резерв.

⚠ Замість ККУ передбачено встановлення активного фільтра гармонік (АФГ) для захисту від вищих гармонік (5, 7, 11, 13 порядків) від індукційних печей. Забезпечує THD_I ≤ 5% згідно з ДСТУ EN 50160.

Слайд 11

Моделювання освітлення у DIALux evo



Карта розподілу світлових потоків цеху точного лиття підтверджує нормативну рівномірність освітлення на всіх робочих місцях. Значення освітленості в більшості зон перевищують нормативний рівень 500 лк, що відповідає вимогам ДСТУ EN 12464-1:2022.

ⓘ Розбіжності між аналітичним розрахунком та DIALux evo обумовлені урахуванням тіньових ефектів від великогабаритного обладнання та багатократного відбивання світла від поверхонь цеху.

Слайд 12

Вибір провідників та апаратів захисту

Провідники цехової мережі

Вибір перерізів виконано за умовою нагрівання з урахуванням поправкових коефіцієнтів на температуру середовища 45°C (K_cep = 0,74) та перевірено за втратою напруги (≤ 5%).

Шинопроводи

3 × BD2C-630 (Cu), I_ном = 630 А, ΔU ≤ 1%

Кабелі живлення

3×95, 3×70, 3×50 мм² залежно від навантаження

Розподільна мережа

Проводи 3×4…3×50 мм² у сталевих трубах

Апарати захисту (Siemens)

Вибір автоматичних вимикачів виконано за 5 умовами: номінальна напруга, струм розчіплювача, комутаційна здатність, захист від пікових струмів, чутливість до мінімального КЗ.

3WA1 1600A

Ввідний автомат ГРЩ, I_вим = 66 кА

3VA2 630A

Автомати магістралей ШРМ-1…3

3VA2 / 5SY4

Автомати окремих ЕП (100–250 А / 25–32 А)

Продовження додатку Б

Слайд 13

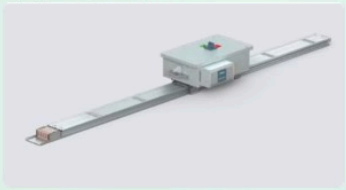
Ілюстрація обраних провідників та апаратів захисту

Апарати захисту Siemens



Siemens 3WA1 1600 A — вводний автомат ГРЩ

Провідники цехової мережі



Шинопровід BD2C-630 (Cu), 630 A



Siemens 3VA2 630 A — автомат магістралей ШРМ

Слайд 14

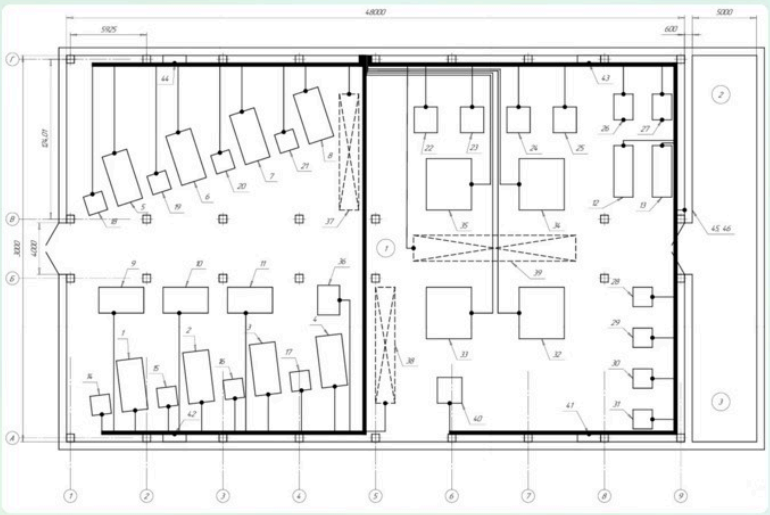


Схема розміщення електроприймачів та силових шинопроводів ШРМ-1...3 у цеху точного лиття

Слайд 15

Розрахунок струмів КЗ та верифікація

16,94 кА	35,93 кА	15,36 кА
Струм трифазного КЗ на шинах РУНН 0,4 кВ	Ударний струм трифазного КЗ	Струм однофазного КЗ на шинах РУНН

Розрахунок виконано за методикою IEC 60909 з урахуванням активних та індуктивних опорів всіх елементів кола. Для перевірки прийнятих рішень виконано моделювання у **Siemens SIMARIS Design** (стандарти IEC 60364 та IEC 60909). Розбіжності між методами пояснюються різними підходами до врахування перехідних опорів та температурних режимів.

✓ Всі обрані апарати захисту задовольняють умову чутливості: $K_{чут} \geq 1{,}1$ для кожного приєднання.

Слайд 16

Охорона праці та пожежна безпека

Електробезпека

Регламентується НПАОП 40.1-1.21-98 (ПБЕЕС) та ПУЕ. Застосовано автомати Siemens 3WA у висувному виконанні для гарантованого видимого розриву при обслуговуванні.

Захисне заземлення КТП

Ґрунт — суглинок ($\rho = 100$ Ом·м). Розраховано контур із **20 вертикальних електродів** довжиною 3 м, з'єднаних горизонтальною смугою. Забезпечено $R \leq 4$ Ом.

Пожежна безпека

Зонування відповідно до НПАОП 40.1-1.32-01:

- Модельна дільниця — зона П-I (горючі парафіни, стеарин), обладнання IP54, автоматична сигналізація
- Плавильне відділення — заборона вологи на заливальних майданчиках
- Засоби гасіння: вуглекислотні (ВВК) та порошкові (ВП) вогнегасники, ящики з піском, протипожежні покривала



Продовження додатку Б

Слайд 17

