

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

«АНАЛІЗ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНІЙ МЕРЕЖІ
МАЛОГО ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА ТА РОЗРОБКА ЗАХОДІВ
ЩОДО ЇЇ ПОКРАЩЕННЯ»

Виконав: здобувач

вищої освіти групи ЕЕМ-22-2

ГОГІН Володимир Віталійович

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2026 р.

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ГОГІН Володимир Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Аналіз якості електричної енергії в локальній мережі малого промислового підприємства та розробка заходів щодо її покращення»
2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2026 р.
3. Метою кваліфікаційної роботи є аналіз показників якості електричної енергії в локальній мережі малого промислового підприємства зі збирання металоконструкцій та розробка технічних заходів щодо їх покращення. Для досягнення мети необхідно проаналізувати нормативні вимоги й сучасні технічні рішення, виконати розрахунок електричних навантажень, втрат, коефіцієнта потужності, гармонічних спотворень і несиметрії фаз, а також розробити модель у MATLAB Live Script для оцінювання ефективності запропонованих заходів.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)
У пояснювальній записці необхідно розглянути теоретичні основи якості електричної енергії, нормативні вимоги, джерела погіршення якості електроенергії та готові технічні рішення для її покращення. Також потрібно виконати розрахунок параметрів локальної мережі підприємства, оцінити режими роботи до та після модернізації, змоделювати показники якості електроенергії в MATLAB Live Script і обґрунтувати доцільність компенсації реактивної потужності, фільтрації гармонік та балансування фазних навантажень.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
До графічного матеріалу необхідно включити однолінійну схему локальної електричної мережі підприємства зі збирання металоконструкцій, структурну схему заходів покращення якості електроенергії та графіки результатів моделювання. Обов'язковими є графіки добового навантаження, зміни коефіцієнта потужності, втрат активної потужності, гармонічних спотворень THDI/THDU, несиметрії фаз і порівняння інтегрального показника якості електроенергії до та після модернізації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
II	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
III	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Аналіз теми, підбір нормативної, навчальної та наукової літератури	11.05.2026
2	Розроблення структури кваліфікаційної роботи та формування вступу	14.05.2026
3	Виконання першого розділу: аналіз готових рішень і досліджень щодо якості електроенергії	15.05.2026
4	Формування вихідних даних підприємства та розроблення однолінійної схеми локальної мережі	19.05.2026
5	Виконання другого розділу: розрахунок електричних навантажень, втрат, $\cos\phi$, THD та несиметрії фаз	21.05.2026
6	Виконання третього розділу: моделювання в MATLAB Live Script і порівняння режимів до та після модернізації	25.05.2026
7	Оформлення графічного матеріалу, висновків, списку літератури та додатків	1.06.2026
8	Дата закінчення роботи, перевірка на антиплагіат та подання керівнику	7.06.2026
9	Аналіз теми, підбір нормативної, навчальної та наукової літератури	10.06.2026

Дата видачі завдання 11.05.2026р.

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Володимир ГОГІН

_____ (Ім'я Прізвище)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Ігор ПЕРЕСУНЬКО

_____ (Ім'я Прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Проектування зарядної станції для електромобілів з підключенням до мережі малої потужності»68 с., 15 рис., 40 літературних джерел.

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4

Досліджуваний об'єкт — локальна електрична мережа малого промислового підприємства зі збирання металоконструкцій, яка живиться від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ та включає зварювальні пости, верстати, компресорне обладнання, вентиляцію, освітлення й адміністративно-побутові навантаження.

У першому розділі виконано аналіз поняття якості електричної енергії, основних нормативних вимог, причин її погіршення в локальних промислових мережах та сучасних технічних рішень для покращення показників електропостачання.

У другому розділі сформовано розрахункову схему локальної мережі підприємства зі збирання металоконструкцій та виконано розрахунок електричних навантажень, активної, реактивної і повної потужності, коефіцієнта потужності, струмів та завантаження трансформатора.

У третьому розділі розроблено розрахунково-імітаційну модель локальної електричної мережі в середовищі MATLAB Live Script, яка дозволяє дослідити добову зміну показників якості електроенергії.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: якість електроенергії, локальна мережа, гармонічні спотворення, компенсація реактивної потужності, MATLAB-моделювання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Гогін В.В.			Зміст	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пєресунько І.					6	1
Н. Контр.		Пєресунько І.				КНУ		
Затвердж.		Пєресунько І.				гр. ЕЕМ-22-2		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. Аналіз готових рішень, нормативних вимог і досліджень з якості електричної енергії в локальних мережах малих промислових підприємств	9
1.1. Поняття якості електричної енергії та її значення для підприємств зі збирання металоконструкцій	9
1.2. Характеристика локальної електричної мережі типового підприємства зі збирання металоконструкцій	11
1.3. Джерела погіршення якості електроенергії в цехах збирання металоконструкцій	14
1.4. Нормативні вимоги та методи вимірювання показників якості електроенергії.....	16
1.5. Аналіз готових технічних рішень для покращення якості електроенергії	18
1.6. Огляд наукових досліджень з проблем якості електроенергії в низьковольтних промислових мережах	21
Висновок до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2. Розрахунок параметрів локальної мережі підприємства зі збирання металоконструкцій та оцінювання показників якості електроенергії.....	26
2.1. Характеристика об'єкта дослідження та розрахункова схема електропостачання	26
2.2. Вихідні дані та розрахунок електричних навантажень підприємства	28
2.3. Розрахунок активної, реактивної та повної потужності підприємства	31
2.4. Розрахунок струмів, втрат напруги та втрат потужності в кабельних лініях.....	33
2.5. Вибір апаратів захисту, комутації та обліку електроенергії	36
2.6. Розрахунок гармонічних спотворень струму та напруги	38
2.6. Узагальнене оцінювання проблемних режимів роботи локальної мережі	40
Висновки до розділу 2.....	42
РОЗДІЛ 3. Моделювання режимів роботи локальної мережі та розробка заходів щодо покращення якості електричної енергії.....	44
3.1. Постановка задачі моделювання та вибір програмного середовища	44
3.2. Розробка математичної моделі локальної мережі підприємства	45
3.3. Моделювання добового графіка навантаження та реактивної потужності	47
3.4. Моделювання гармонічних спотворень струму та напруги	48
3.5. Моделювання несиметрії фазних навантажень	50
3.6. Оцінювання втрат потужності та ефекту від компенсації реактивної потужності.....	52
3.7. Розробка технічних заходів щодо покращення якості електричної енергії.....	54
3.8. MATLAB Live Script для моделювання показників якості електроенергії	56
Висновки до розділу 3.....	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розробив		Гогін В.В.			Зміст		Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевірів		Пересунько І.							6	1
Н. Контр.		Пересунько І.			КНУ гр. ЕЕМ-22-2					
Затвердж.		Пересунько І.								

ВСТУП

Якість електричної енергії є одним із визначальних чинників надійної, безпечної та енергоефективної роботи локальних систем електропостачання промислових підприємств. Для малих підприємств, що виконують збирання металоконструкцій, ця проблема має особливе значення, оскільки технологічний процес зазвичай поєднує електрозварювання, роботу електродвигунів вентиляції та компресорів, використання ручного електроінструменту, LED-освітлення, офісного обладнання, джерел безперебійного живлення та частотних перетворювачів. Така структура навантаження формує складні режими споживання електроенергії, у яких одночасно можуть виникати відхилення напруги, несиметрія фазних навантажень, зниження коефіцієнта потужності та гармонічні спотворення струму і напруги [1–5].

Актуальність теми пояснюється тим, що більшість малих промислових підприємств живляться від мережі 0,4 кВ через трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ, а їх електричні мережі часто розвиваються поступово: до вже наявних щитів підключаються нові зварювальні пости, компресори, вентиляційні установки, верстати або інверторні джерела живлення без комплексної перевірки впливу на режим напруги та якість електроенергії. У результаті локальна мережа може працювати з перевантаженими кабельними лініями, підвищеними втратами, нерівномірним завантаженням фаз і високою часткою нелінійного навантаження [8; 9; 12; 13].

Для підприємства зі збирання металоконструкцій погіршення якості електричної енергії може мати не лише енергетичні, а й технологічні наслідки. Нестабільність напруги може впливати на режим роботи зварювальних апаратів, якість шва, спрацювання захистів, роботу електроприводів вентиляції та компресорів. Гармоніки можуть спричиняти додаткове нагрівання трансформаторів і кабелів, а також помилки в роботі електронних блоків

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вступ	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив		Гогін В.В.						
Перевірів		Пересунько І.					7	1
						КНУ гр. ЕЕМ-22-2		
Н. Контр.		Пересунько І.						
Затвердж.		Пересунько І.						

керування. Низький коефіцієнт потужності збільшує струм у мережі, втрати потужності та завантаження елементів електропостачання [5; 8; 10; 11].

Сучасний підхід до вирішення таких задач передбачає не лише одноразовий розрахунок електричних навантажень, а й системне оцінювання показників якості електроенергії відповідно до чинних стандартів та правил вимірювання. Зокрема, для оцінювання характеристик напруги доцільно використовувати положення ДСТУ EN 50160:2023, а для організації вимірювання показників якості електроенергії — підходи IEC 61000-4-30:2025. Для гармонічних складових важливе значення мають IEC 61000-4-7 та IEEE Std 519-2022, які встановлюють підходи до вимірювання та обмеження гармонічних спотворень у точці спільного приєднання [1–5].

Об’єктом дослідження є локальна система електропостачання малого промислового підприємства зі збирання металоконструкцій напругою 0,4 кВ, що живиться від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ.

Предметом дослідження є показники якості електричної енергії, режими роботи локальної мережі, вплив лінійних, нелінійних і несиметричних навантажень, а також технічні заходи покращення якості електроенергії.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є аналіз якості електричної енергії в локальній мережі малого підприємства зі збирання металоконструкцій та розробка технічно обґрунтованих заходів щодо її покращення.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання: проаналізувати нормативні вимоги та наукові дослідження з якості електроенергії; визначити характерні джерела спотворень у локальній мережі підприємства зі збирання металоконструкцій; сформувати узагальнену розрахункову схему підприємства; розрахувати навантаження, втрати напруги, коефіцієнт потужності, несиметрію фаз та гармонічні показники; виконати моделювання режимів роботи мережі; запропонувати заходи компенсації

реактивної потужності, фільтрації гармонік, балансування фаз і моніторингу показників якості електроенергії.

Методи дослідження: аналіз нормативних документів і наукових джерел; методи розрахунку електричних навантажень; метод симетричних складових для оцінювання несиметрії; спектральний аналіз для оцінювання гармонік; розрахунок втрат напруги та втрат потужності; математичне та імітаційне моделювання режимів роботи локальної мережі.

Практична цінність роботи полягає у формуванні комплексного підходу до оцінювання якості електричної енергії в мережі малого підприємства. Отримані результати можуть бути використані для вибору обладнання компенсації реактивної потужності, фільтрів гармонік, засобів балансування фазних навантажень і систем моніторингу якості електроенергії.

Для подальших розрахунків у роботі приймається умовне підприємство зі збирання металоконструкцій із такими основними електроприймачами: зварювальні інверторні апарати, асинхронні двигуни вентиляції, компресорна установка, верстати малої та середньої потужності, освітлення, офісні споживачі та допоміжні електронні пристрої. Розрахункова електрична схема, числові параметри навантажень і режими роботи будуть деталізовані у розділі 2, а в розділі 3 буде виконано моделювання показників якості електроенергії та оцінювання ефективності запропонованих заходів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ГОТОВИХ РІШЕНЬ, НОРМАТИВНИХ ВИМОГ І ДОСЛІДЖЕНЬ З ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ МАЛИХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1. Поняття якості електричної енергії та її значення для підприємств зі збирання металоконструкцій

Поняття якості електричної енергії розглядається як сукупність характеристик електричної енергії в певній точці електричної системи, які визначають її придатність для нормальної роботи електроприймачів. У практичному сенсі якість електроенергії оцінюється через рівень напруги, частоту, форму кривої напруги, симетрію трифазної системи, наявність провалів, перенапруг, переривань, гармонік, інтергармонік, флікера та інших електромагнітних збурень [1; 2; 8].

Для малих промислових підприємств проблема якості електроенергії часто недооцінюється, оскільки основну увагу приділяють лише достатності встановленої потужності трансформатора або вибору автоматичних вимикачів. Проте навіть за умови відсутності явних перевантажень мережа може працювати з низьким коефіцієнтом потужності, значними гармонічними струмами, нерівномірним завантаженням фаз і підвищеними втратами в кабельних лініях. У такому випадку формально потужності джерела живлення може бути достатньо, але електричні режими залишаються нераціональними [8–11].

На підприємстві зі збирання металоконструкцій якість електричної енергії безпосередньо впливає на технологічну стабільність. Зварювальні апарати, особливо інверторного типу, чутливі до рівня напруги та самі можуть створювати нелінійний струм споживання. Вентиляційні установки та компресори містять асинхронні електродвигуни, для яких відхилення напруги, несиметрія фаз та перегрів мають прямий зв'язок зі строком служби ізоляції.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ		
Розробив	Гогін В.В.						
Перевірів	Пересунько І.						
Н. Контр.	Пересунько І.						
Затвердж.	Пересунько І.				КНУ гр. ЕЕМ-22-2		

Системи керування, імпульсні джерела живлення, LED-освітлення та комп'ютерне обладнання можуть бути як джерелами гармонік, так і споживачами, чутливими до електромагнітних збурень [10; 12; 13].

Найбільш узагальненими показниками, які доцільно використовувати в подальших розрахунках, є відхилення напруги, коефіцієнт потужності, коефіцієнти гармонічних спотворень напруги та струму, коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю, втрати напруги та втрати активної потужності. Саме ці показники є достатньо інформативними для бакалаврської роботи, оскільки їх можна пов'язати з конкретними технічними заходами: компенсацією реактивної потужності, фільтрацією гармонік, балансуванням навантаження і моніторингом мережі [1–5].

$$\delta U = ((U - U_n) / U_n) \cdot 100 \% \quad (1.1)$$

де δU — відхилення напруги, %; U — фактичне значення напруги в точці вимірювання, В; U_n — номінальне значення напруги, В. Для мережі 0,4 кВ аналіз може виконуватися як за фазною напругою 230 В, так і за лінійною напругою 400 В залежно від точки підключення споживача [1; 2].

$$THDU = (\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_h^2} / U_1) \cdot 100 \% \quad (1.2)$$

$$THDI = (\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_h^2} / I_1) \cdot 100 \% \quad (1.3)$$

де U_1 та I_1 — основні гармоніки напруги та струму; U_h та I_h — діючі значення гармонічних складових порядку h . Показники THDU та THDI використовуються для кількісного оцінювання викривлення форми кривих напруги і струму та є важливими при виборі фільтрувального обладнання [3; 5; 11].



Рисунок 1.1 — Класифікація основних показників якості електричної енергії для локальної мережі малого промислового підприємства

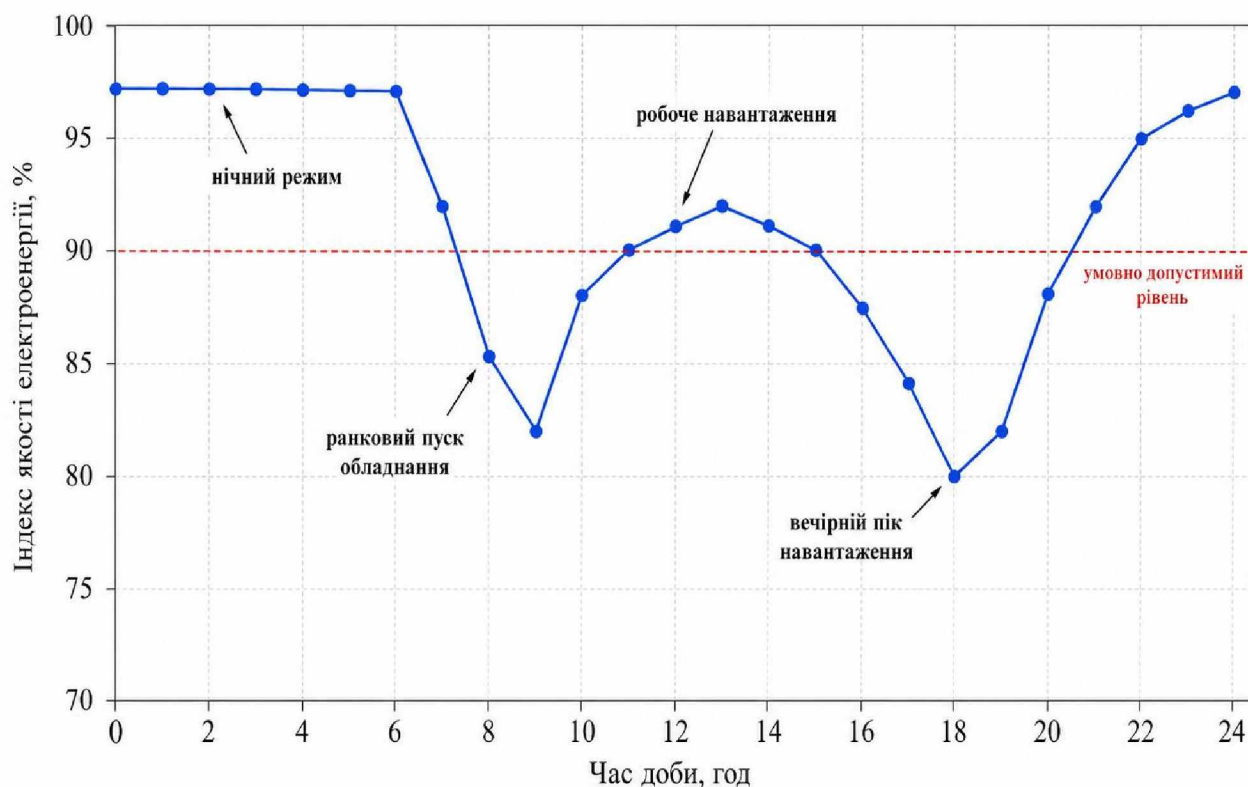


Рисунок 1.2 – Приклад добової зміни показника якості електроенергії

1.2. Характеристика локальної електричної мережі типового підприємства зі збирання металоконструкцій

Типове мале підприємство зі збирання металоконструкцій можна розглядати як виробничий об'єкт із локальною мережею 0,4 кВ, що живиться від

комплектної трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ. Основними споживачами є зварювальні пости, ділянка механічної обробки та підготовки металу, вентиляційна система, компресорна установка, вантажопідіймальні механізми, освітлення, адміністративно-побутові приміщення та допоміжні електронні системи. Саме така структура навантаження є зручною для дослідження, оскільки поєднує лінійні, нелінійні, однофазні та трифазні електроприймачі [8; 10; 13].

Для подальшого розрахунку доцільно прийняти підприємство з трансформатором 10/0,4 кВ потужністю 400 кВА. Таке значення є достатнім для моделювання реального виробничого цеху середньої завантаженості без надмірного ускладнення розрахунків. Головний розподільний щит 0,4 кВ може мати кілька групових відходящих ліній: зварювальна дільниця, механічна дільниця, вентиляція і компресор, освітлення та офісне навантаження. Вимірювання показників якості електроенергії доцільно організовувати в точці спільного приєднання локальної мережі, тобто на вводі ГРЩ або на стороні 0,4 кВ трансформатора [2; 5; 6].

Узагальнена електрична структура підприємства важлива не лише для вибору апаратів захисту, а й для правильної інтерпретації показників якості електроенергії. Наприклад, гармонічні струми, які генеруються окремими зварювальними апаратами або частотними перетворювачами, створюють падіння напруги на повному опорі трансформатора та кабельних ліній. Тому рівень THDU залежить не лише від гармонічного спектра навантаження, але й від жорсткості мережі, довжини кабельних ліній, потужності трансформатора та місця вимірювання [5; 11; 16].

Для цеху збирання металоконструкцій характерною особливістю є нерівномірність режимів протягом робочого дня. Під час активного зварювання зростає частка нелінійного та імпульсного навантаження. Під час роботи вентиляції та компресора зростає реактивна складова навантаження. У режимах підготовки, переміщення заготовок або перерв частина електроприймачів

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимикається, що змінює коефіцієнт потужності та завантаження фаз. Тому для коректного аналізу слід розглядати не лише номінальні параметри обладнання, а й добовий або змінний графік навантаження [8; 9].

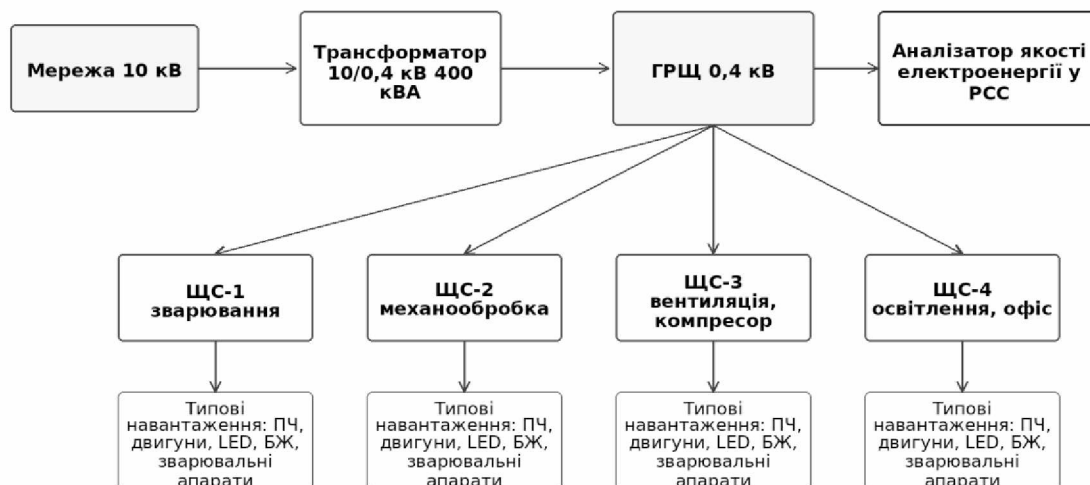


Рисунок 1.2 — Узагальнена структура локальної мережі цеху збирання металоконструкцій

Таблиця 1.1 — Орієнтовна структура навантаження підприємства зі збирання металоконструкцій

Група навантаження	Типові електроприймачі	Характер навантаження	Можливий вплив на ЯЕ	Доцільний показник контролю
Зварювальна дільниця	Інверторні та трансформаторні зварювальні апарати	Нелінійне, змінне, імпульсне	Гармоніки, провали напруги, низький $\cos\varphi$	THDI, THDU, ΔU , $\cos\varphi$
Вентиляція	Асинхронні двигуни вентиляторів, можливі ПЧ	Двигунне, індуктивне, частково нелінійне	Реактивна потужність, пускові струми, гармоніки ПЧ	P, Q, $\cos\varphi$, $I_{\text{пуск}}$, THDI
Компресорна установка	Електродвигун компресора, автоматика	Індуктивне, циклічне	Провали напруги під час пуску,	ΔU , P, Q, $\cos\varphi$

			реактивна потужність	
Механообробка	Свердлильні, відрізні, шліфувальні верстати	Переважно двигунне	Пускові струми, несиметрія при однофазних верстатах	I_f , ΔU , K2U
Освітлення та офіс	LED- світильники, БЖ, комп'ютери	Однофазне, нелінійне	Гармоніки 3-го порядку, струм у N- провіднику	THDI, IN, K2U

1.3. Джерела погіршення якості електроенергії в цехах збирання металоконструкцій

Основними джерелами погіршення якості електроенергії у цеху збирання металоконструкцій є технологічне обладнання, яке створює різкозмінні або нелінійні режими споживання струму. До таких споживачів належать зварювальні апарати, частотні перетворювачі електроприводів, випрямлячі, імпульсні джерела живлення, LED-освітлення, а також однофазні електроприймачі, підключені з нерівномірним розподілом між фазами [11–13; 17].

Зварювальне обладнання є одним із найбільш характерних джерел електромагнітних збурень для підприємства зі збирання металоконструкцій. Класичні трансформаторні зварювальні апарати можуть створювати значні коливання навантаження та знижений коефіцієнт потужності, а сучасні інверторні апарати, незважаючи на кращу керованість технологічного процесу,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовують силові електронні перетворювачі та можуть генерувати гармонічні складові струму [13].

Частотні перетворювачі, що застосовуються для керування вентиляторами, насосами або іншими механізмами, зазвичай містять діодний випрямляч, проміжну ланку постійного струму та інвертор. Вхідний струм такого перетворювача не є синусоїдальним, тому в мережі виникають гармоніки 5-го, 7-го, 11-го, 13-го та вищих порядків. За відсутності вхідних дроселів, фільтрів або достатньої потужності мережі рівень гармонічних спотворень може суттєво зрости [5; 11; 17].

Несиметрія фазних навантажень у цеху може виникати через нерівномірний розподіл однофазних споживачів: переносного інструменту, освітлення, офісних електроприймачів, зарядних пристроїв, блоків живлення та однофазних зварювальних апаратів. Несиметрія призводить до появи складової зворотної послідовності напруги, збільшення струму в нейтральному провіднику, додаткового нагрівання асинхронних двигунів і нерівномірного завантаження фаз трансформатора [1; 8; 9].

Ще одним фактором є реактивна потужність двигунного навантаження. Асинхронні двигуни вентиляції, компресорів і верстатів споживають реактивну потужність для створення магнітного поля. Якщо така потужність не компенсується локально, зростає повний струм, збільшуються втрати активної потужності в кабельних лініях і трансформаторі, а також погіршується використання встановленої потужності джерела живлення [8; 10; 16].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.4)$$

$$\cos\varphi = P / S \quad (1.5)$$

де S — повна потужність, кВА; P — активна потужність, кВт; Q — реактивна потужність, квар; $\cos\varphi$ — коефіцієнт потужності. З формул (1.4)–(1.5) видно, що за сталої активної потужності збільшення реактивної складової призводить до зростання повної потужності та струму навантаження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.3 — Причинно-наслідковий зв’язок погіршення якості електроенергії та заходів її покращення

1.4. Нормативні вимоги та методи вимірювання показників якості електроенергії

Аналіз якості електричної енергії повинен спиратися на нормативні документи, які встановлюють перелік показників, допустимі межі та правила вимірювання. Для бакалаврської роботи доцільно поєднати українські нормативні вимоги, європейські стандарти характеристик напруги та міжнародні стандарти щодо методів вимірювання і гармонічного аналізу. Такий підхід дає змогу не обмежуватися лише розрахунком навантаження, а сформулювати повноцінну методику діагностики локальної мережі [1–7].

ДСТУ EN 50160:2023 визначає характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. Для промислового споживача цей стандарт важливий тим, що дозволяє оцінити параметри напруги на межі відповідальності між оператором системи розподілу та користувачем мережі. Водночас внутрішня локальна мережа підприємства також повинна бути спроектована так, щоб власні електроприймачі не створювали неприйнятних відхилень напруги та електромагнітних збурень у точці спільного приєднання [1; 6].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

ІЕС 61000-4-30:2025 визначає методи вимірювання та інтерпретації результатів для показників якості електроенергії у системах змінного струму з частотою 50 або 60 Гц. Стандарт виділяє класи вимірювання, зокрема Class A для точних та порівнюваних вимірювань і Class S для статистичного моніторингу. Для дослідження локальної мережі підприємства доцільно орієнтуватися на логіку цього стандарту: вибір точки вимірювання, тривалість реєстрації, фіксація напруги, струмів, частоти, гармонік, несиметрії, провалів, перенапруг і переривань [2].

ІЕС 61000-4-7 встановлює підходи до вимірювання гармонік та інтергармонік у мережах 50/60 Гц. Цей документ важливий для коректного обчислення спектра гармонік і загальних коефіцієнтів спотворень. У практичній частині роботи його положення можна використати як методичну основу для формування спектра 3-ї, 5-ї, 7-ї, 11-ї та 13-ї гармонік, які є характерними для нелінійних споживачів [3; 11; 12].

IEEE Std 519-2022 доцільно використовувати при аналізі гармонік у точці спільного приєднання. Цей стандарт розглядає межу між джерелом живлення та навантаженням як РСС і встановлює цілі щодо обмеження спотворень напруги та струму для систем, у яких одночасно присутні лінійні та нелінійні навантаження. Для підприємства зі збирання металоконструкцій це особливо важливо, оскільки воно може містити групу зварювальних апаратів і частотних перетворювачів [5].

Таблиця 1.2 — Нормативні документи, доцільні для аналізу якості електроенергії

Документ	Сфера застосування	Що використовується у роботі	Зв'язок із локальною мережею підприємства
ДСТУ EN 50160:2023	Характеристики напруги у мережах загальної призначеності	Відхилення напруги, несиметрія, гармоніки,	Оцінювання напруги у точці приєднання та на

		провали перенапруги	та вводі підприємства
ІЕС 61000-4-30:2025	Методи вимірювання показників якості електроенергії	Принципи вимірювання, класи приладів, інтерпретація результатів	Організація моніторингу у ГРЩ 0,4 кВ
ІЕС 61000-4-7	Вимірювання гармонік та інтергармонік	Спектральний аналіз, групування гармонік	Оцінювання THDU і THDI від нелінійних навантажень
ІЕС 61000-4-15	Вимірювання флікера	Оцінювання коливань напруги	Доцільно при значній змінності зварювального навантаження
IEEE Std 519-2022	Контроль гармонік у системах електропостачання	Підхід РСС, межі гармонічних спотворень	Вибір фільтрації гармонік та оцінювання впливу підприємства на мережу
Кодекс систем розподілу	Вимоги до взаємодії ОСР і користувачів мережі	Відповідальність за якість електропостачання та вимірювання	Нормативна база для споживача в Україні

У рамках подальших розрахунків доцільно прийняти, що вимірювання показників якості електроенергії виконується на вводі ГРЩ 0,4 кВ протягом робочої зміни або модельної доби. Для реального енергоаудиту тривалість вимірювання відповідно до практики контролю якості електроенергії має охоплювати характерні режими роботи підприємства, включно з піковим зварювальним навантаженням, запуском компресора, роботою вентиляції та освітлення [2; 6; 7].

1.5. Аналіз готових технічних рішень для покращення якості електроенергії

Покращення якості електроенергії в локальній мережі малого підприємства повинно виконуватися комплексно. Недоцільно обмежуватися

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лише встановленням конденсаторної батареї або лише фільтра гармонік, оскільки проблеми можуть мати різну фізичну природу. Наприклад, низький $\cos\phi$ пов'язаний із реактивною потужністю двигунів, гармонічні спотворення — з нелінійними навантаженнями, а несиметрія — з нерівномірним розподілом однофазних споживачів [8; 10; 11].

Найпоширенішим рішенням для зменшення реактивної потужності є автоматична установка компенсації реактивної потужності. Вона складається з конденсаторних ступенів, контакторів або тиристорних ключів, контролера $\cos\phi$, апаратів захисту та вимірювальних трансформаторів струму. Для підприємства зі збирання металоконструкцій таке рішення може зменшити струм у вводі, знизити втрати в кабелях і трансформаторі, а також підвищити резерв потужності для технологічних споживачів [8; 10; 16].



Рисунок 1.4 Аналіз готових технічних рішень для покращення якості електроенергії

Проте використання звичайних конденсаторних батарей у мережі з високою часткою нелінійних навантажень може бути небезпечним через ризик

резонансу з гармонічними складовими. Тому для промислових об'єктів із частотними перетворювачами та зварювальними апаратами доцільно розглядати дросельовані конденсаторні установки або пасивні гармонічні фільтри. Таке обладнання поєднує компенсацію реактивної потужності з обмеженням впливу певних гармонік [11; 14; 15].

Для більш складних випадків застосовуються активні фільтри гармонік. На відміну від пасивного фільтра, активний фільтр вимірює гармонічну складову струму та формує компенсувальний струм протилежної форми. Перевагою такого рішення є адаптивність до змінного навантаження, що важливо для цехів із непостійною роботою зварювальних постів. Недоліком є вища вартість, необхідність налаштування та обслуговування силової електроніки [11; 12; 15].

Балансування фаз є одним із найдоступніших організаційно-технічних заходів. Воно передбачає аналіз фактичних струмів фаз, розподіл однофазних споживачів між фазами, перенесення частини груп освітлення або розеткових ліній, а також контроль струму в нейтральному провіднику. У багатьох малих підприємствах саме цей захід може дати помітний ефект без значних капітальних витрат [8; 9].

Системи моніторингу якості електроенергії є базовою передумовою для технічно правильного вибору заходів. До складу такої системи може входити аналізатор якості електроенергії класу А або S, багатфункціональний лічильник з реєстрацією параметрів, трансформатори струму, програмне забезпечення та архів даних. Для бакалаврської роботи достатньо передбачити один пункт моніторингу на вводі ГРЩ 0,4 кВ і, за потреби, один-два додаткові пункти на найбільш проблемних групах навантаження [2; 20].

Таблиця 1.3 — Порівняння технічних рішень для покращення якості електроенергії

Рішення	Основне призначення	Переваги	Обмеження	Доцільність для цеху металоконструкцій
---------	---------------------	----------	-----------	--

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк. 20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Автоматична компенсація реактивної потужності	Підвищення $\cos\varphi$, зменшення Q	Просте та ефективне рішення для двигунного навантаження	Потребує перевірки на резонанс із гармоніками	Доцільна за наявності значного двигунного навантаження
Дросельована конденсаторна установка	Компенсація Q з обмеженням резонансних явищ	Безпечніша в мережах з гармоніками	Вища вартість, потребує підбору реакторів	Доцільна при поєднанні двигунів, ПЧ і зварювання
Пасивний фільтр гармонік	Зменшення окремих гармонік	Відносно простий і надійний	Ефективний переважно для заданих частот	Доцільний при сталому спектрі навантаження
Активний фільтр гармонік	Компенсація змінного спектра гармонік	Адаптивність, висока ефективність	Висока вартість і складність	Доцільний при великій кількості інверторних зварювальних апаратів
Балансування фаз	Зменшення несиметрії та струму N	Низька вартість, швидкий ефект	Потребує обліку змін режимів роботи	Обов'язковий базовий захід
Моніторинг PQ	Виявлення причин і контроль результатів	Дас доказову базу для рішень	Не усуває проблему самостійно	Доцільний для всіх варіантів модернізації

1.6. Огляд наукових досліджень з проблем якості електроенергії в низьковольтних промислових мережах

Наукові дослідження з якості електроенергії в низьковольтних мережах зосереджені на кількох напрямках: вплив нелінійних навантажень на гармонічний склад струму, оцінювання провалів напруги, вплив несиметрії на електродвигуни, розробка активних і пасивних фільтрів, компенсація реактивної потужності та створення систем моніторингу. Для теми цієї бакалаврської

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботи найбільш важливими є дослідження, пов'язані з низьковольтними мережами, промисловими навантаженнями, зварювальним обладнанням і гармонічними спотвореннями [8–13].

У класичних працях з якості електроенергії підкреслюється, що більшість проблем не може бути правильно оцінена без урахування місця виникнення збурення та місця вимірювання. Наприклад, провал напруги може бути спричинений як зовнішньою мережею, так і пуском великого двигуна всередині підприємства. Гармоніки струму можуть створюватися окремими електроприймачами, але рівень гармонік напруги залежить від опору мережі. Тому для локальної мережі малого підприємства необхідно поєднувати вимірювання, розрахунок і моделювання [8; 9; 16].

Дослідження низьковольтних мереж із нелінійними навантаженнями показують, що загальний рівень гармонік не завжди дорівнює простій сумі гармонік окремих пристроїв. Можливі ефекти взаємного послаблення або підсилення гармонічних складових, які залежать від фазових кутів струмів, структури навантаження та параметрів мережі. Це важливо для бакалаврської роботи, оскільки в моделі підприємства потрібно врахувати не лише наявність нелінійних споживачів, але й їх частку в загальному навантаженні [12].

Окрему увагу в сучасних роботах приділено зварювальному обладнанню. Дослідження зварювальних постів показують, що різні типи зварювальних апаратів по-різному впливають на показники якості електроенергії. Традиційні апарати можуть суттєво впливати на коефіцієнт потужності та коливання напруги, тоді як інверторні апарати формують гармонічний спектр через роботу силового перетворювача. Це підтверджує доцільність вибору саме підприємства зі збирання металоконструкцій як об'єкта дослідження [13].

Питання застосування пасивних фільтрів гармонік також широко досліджується. Пасивні фільтри можуть ефективно зменшувати окремі гармонічні складові, але їх параметри повинні бути узгоджені з параметрами мережі. Неправильний вибір частоти налаштування або ємності може

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спричинити резонансні перенапруги та перевантаження елементів фільтра. Тому для практичного вибору обладнання необхідно попередньо виконувати розрахунок і моделювання [14; 15].

Узагальнюючи результати досліджень, можна зробити висновок, що для локальної мережі малого підприємства найбільш доцільною є методика, яка включає: формування розрахункової схеми; визначення структури навантаження; оцінювання P , Q , S і $\cos\varphi$; розрахунок втрат напруги та втрат потужності; оцінювання несиметрії; розрахунок THDI і THDU; порівняння варіантів покращення якості електроенергії. Саме така логіка буде використана в наступних розділах роботи.

Таблиця 1.4 — Узагальнення напрямів досліджень, корисних для теми бакалаврської роботи

Напрямок досліджень	Що встановлено у літературі	Як використовується в роботі	Джерела
Загальна теорія якості електроенергії	Потрібно враховувати місце збурення, місце вимірювання та чутливість обладнання	Формування методики аналізу локальної мережі	[8–10]
Гармоніки в низьковольтних мережах	Нелінійні навантаження створюють THDI, але сумарний спектр залежить від взаємодії пристроїв	Побудова моделі THDI/THDU залежно від частки нелінійного навантаження	[11; 12]
Зварювальне обладнання	Різні типи зварювальних апаратів по-різному впливають на напругу, $\cos\varphi$ і гармоніки	Обґрунтування вибору підприємства зі збирання металоконструкцій	[13]

Фільтрація гармонік	Пасивні фільтри ефективні, але потребують правильного налаштування	Порівняння варіантів фільтрації у розділі 3	[14; 15]
Компенсація реактивної потужності	Підвищення $\cos\phi$ зменшує струм і втрати, але конденсатори потрібно перевіряти на резонанс	Розрахунок Q_c і оцінка впливу на втрати	[8; 10; 16]

Висновок до розділу 1

У першому розділі проаналізовано поняття якості електричної енергії та показано її значення для локальної мережі малого промислового підприємства зі збирання металоконструкцій. Встановлено, що для такого об'єкта характерним є поєднання двигунних, зварювальних, електронних, освітлювальних та однофазних навантажень, які можуть одночасно впливати на рівень напруги, коефіцієнт потужності, гармонічні спотворення та несиметрію фаз [1–5; 8; 13].

Розглянуто типову структуру локальної мережі підприємства з трансформатором 10/0,4 кВ, головним розподільним щитом 0,4 кВ та груповими лініями до зварювальної дільниці, механічної дільниці, вентиляції, компресора, освітлення та офісного навантаження. Для подальших розрахунків доцільно прийняти точку контролю показників якості електроенергії на вводі ГРЩ 0,4 кВ, що відповідає логіці аналізу в точці спільного приєднання та дає змогу оцінювати сумарний вплив локальної мережі [2; 5; 6].

Встановлено, що основними причинами погіршення якості електроенергії для цеху збирання металоконструкцій є робота зварювальних апаратів, частотних перетворювачів, асинхронних двигунів, LED-освітлення, імпульсних джерел живлення та нерівномірно розподілених однофазних споживачів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільш інформативними показниками для подальшого аналізу є δU , $\cos\varphi$, P , Q , S , $THDU$, $THDI$, фазні струми, струм нейтрального провідника, коефіцієнт несиметрії та втрати потужності [8; 10–13].

Аналіз нормативної бази показав, що для дослідження доцільно застосувати ДСТУ EN 50160:2023, ІЕС 61000-4-30:2025, ІЕС 61000-4-7, ІЕС 61000-4-15, IEEE Std 519-2022, Кодекс систем розподілу та інші документи, які визначають методичні основи вимірювання і оцінювання показників якості електричної енергії [1–7].

На основі огляду готових технічних рішень запропоновано розглядати комплекс заходів: автоматичну компенсацію реактивної потужності, дросельовані конденсаторні установки, пасивні або активні фільтри гармонік, балансування фазних навантажень та моніторинг якості електроенергії. Подальший розділ роботи має бути спрямований на розрахунок параметрів локальної мережі підприємства, оцінювання проблемних режимів і підготовку вихідних даних для моделювання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ПІДПРИЄМСТВА ЗІ ЗБИРАННЯ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ТА ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1. Характеристика об'єкта дослідження та розрахункова схема електропостачання

У другому розділі бакалаврської роботи розрахунок виконується для умовного малого промислового підприємства, основним видом діяльності якого є збирання металоконструкцій із листового та профільного металу. Такий об'єкт є типовим для невеликого виробничого майданчика, де поєднуються зварювальні пости, механічна обробка, плазмове різання, компресорне господарство, вентиляція, фарбувальна дільниця, освітлення і адміністративно-побутові споживачі. Саме поєднання двигунного, зварювального та електронного навантаження створює передумови для зниження коефіцієнта потужності, появи гармонік і несиметрії фазних навантажень [1; 2; 5; 8; 13].

Електропостачання підприємства приймається від мережі 10 кВ через комплектну трансформаторну підстанцію з одним силовим трансформатором Т1 типу 10/0,4 кВ потужністю 400 кВА. На стороні 0,4 кВ встановлено головний розподільний щит ГРЩ, від якого живляться п'ять групових щитів: щит зварювальної дільниці, щит дільниці різання і пресування, щит механічної дільниці, щит компресорної та вентиляційної установки, щит освітлення й адміністративних споживачів. Точка приєднання ГРЩ 0,4 кВ у цій роботі приймається як умовна точка спільного приєднання РСС, у якій оцінюються інтегральні показники якості електроенергії [5; 6; 21; 22].

Для спрощення бакалаврського розрахунку прийнято, що трансформатор працює від симетричної трифазної мережі 10 кВ, а основні відхилення показників якості електроенергії формуються всередині локальної мережі 0,4 кВ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ	Літ.	Арк.	Акрушіє	
Розробив	Гогін В.В.								
Перевірів	Пересунько І.								
Н. Контр.	Пересунько І.					КНУ			
Затвердж.	Пересунько І.				гр. ЕЕМ-22-2				

Це дозволяє зосередити увагу на внутрішніх причинах погіршення режиму: нерівномірному розподілі однофазних споживачів, роботі інверторних зварювальних джерел, частотних перетворювачів вентиляції, LED-освітлення та імпульсних блоків живлення [2; 3; 8; 17].

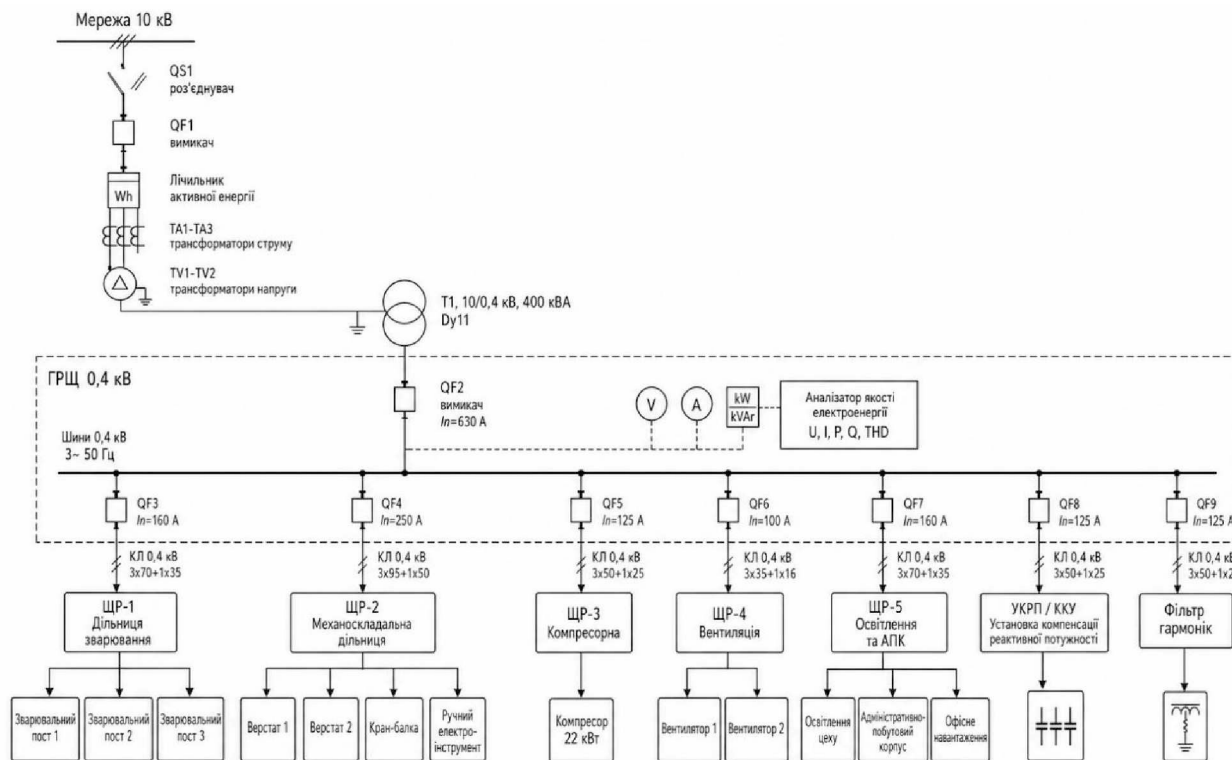


Рисунок 2.1 — Розрахункова однолінійна схема локальної мережі підприємства зі збирання металоконструкцій

Для подальших розрахунків приймаються такі базові електричні параметри: номінальна лінійна напруга низьковольтної мережі $U_n = 0,4$ кВ; частота $f = 50$ Гц; номінальна потужність трансформатора $S_{tr} = 400$ кВА; напруга короткого замикання трансформатора $u_k = 6$ %; коефіцієнт корисної дії трансформатора у нормальному режимі приймається близьким до паспортного значення для сухих або масляних трансформаторів малої потужності. Остаточний вибір типу трансформатора не виконується, оскільки у роботі досліджується не проектування підстанції, а аналіз режимів якості електричної енергії [8; 21; 22].

2.2. Вихідні дані та розрахунок електричних навантажень підприємства

Для підприємства зі збирання металоконструкцій склад електроприймачів приймається на основі типової структури технологічного процесу. До основних споживачів належать інверторні зварювальні пости, плазмовий різак з ЧПК, відрізні та свердлильні верстати, листозгинальний прес, мостовий кран, компресор, вентиляційні установки з частотними перетворювачами, LED-освітлення та адміністративно-офісне обладнання. Розрахунок виконується за встановленою потужністю та коефіцієнтом попиту, що дозволяє врахувати нерівночасність роботи обладнання [8; 10; 21].

$$P_{\text{вст},i} = n_i \cdot P_{\text{н}i}, \text{ кВт} \quad (2.1)$$

$$P_{\text{р},i} = P_{\text{вст},i} \cdot k_{\text{п},i}, \text{ кВт} \quad (2.2)$$

$$Q_{\text{р}i} = P_{\text{р}i} \cdot \text{tg}(\arccos(\cos\varphi_i)), \text{ квар} \quad (2.3)$$

$$S_{\text{р},i} = P_{\text{р},i} / \cos\varphi_i, \text{ кВА} \quad (2.4)$$

де $P_{\text{вст},i}$ — встановлена активна потужність i -ї групи електроприймачів, кВт; n_i — кількість однотипних електроприймачів; $P_{\text{н},i}$ — номінальна потужність одного електроприймача, кВт; $k_{\text{п},i}$ — коефіцієнт попиту; $P_{\text{р},i}$, $Q_{\text{р},i}$, $S_{\text{р},i}$ — відповідно розрахункові активна, реактивна та повна потужності групи; $\cos\varphi_i$ — коефіцієнт потужності групи навантаження.

Електроприймач	К-сть	Рн, кВт	Рвст, кВт	кп	cosφ
Зварювальні пости MIG/MAG	6	18.0	108.0	0.45	0.74
Плазмовий різак з ЧПК	1	30.0	30.0	0.70	0.85
Відрізні та стрічкопильні верстати	4	5.5	22.0	0.60	0.80

Електроприймач	К-сть	Рн, кВт	Рвст, кВт	кп	cosφ
Свердлильні верстати	3	3.0	9.0	0.55	0.78
Листозгинальний прес	1	15.0	15.0	0.50	0.82
Мостовий кран	1	11.0	11.0	0.35	0.75
Компресорна установка	1	22.0	22.0	0.80	0.84
Вентиляційні установки з ПЧ	2	7.5	15.0	0.75	0.82
Вентилятор фарбувальної ділянки	1	5.5	5.5	0.60	0.80
LED-освітлення цеху і складу	1	12.0	12.0	0.90	0.95
Адміністративне та ІТ-обладнання	1	8.0	8.0	0.70	0.90
Разом			257.5		

Таблиця 2.1 — Вихідні дані електроприймачів підприємства

Електроприймач	Рр, кВт	Qp, квар	Sp, кВА	Тип навантаження
Зварювальні пости MIG/MAG	48.60	44.17	65.68	зварювальне, нелінійне
Плазмовий різак з ЧПК	21.00	13.01	24.71	силова електроніка, нелінійне
Відрізні та стрічкопильні верстати	13.20	9.90	16.50	двигунне
Свердлильні верстати	4.95	3.97	6.35	двигунне

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Електроприймач	Pr, кВт	Qp, квар	Sp, кВА	Тип навантаження
Листозгинальний прес	7.50	5.24	9.15	двигунне/гідравлічне
Мостовий кран	3.85	3.40	5.13	короткочасне двигунне
Компресорна установка	17.60	11.37	20.95	двигунне
Вентиляційні установки з ПЧ	11.25	7.85	13.72	двигунне + ПЧ
Вентилятор фарбувальної ділянки	3.30	2.47	4.12	двигунне
LED-освітлення цеху і складу	10.80	3.55	11.37	однофазне, нелінійне
Адміністративне та ІТ-обладнання	5.60	2.71	6.22	однофазне, нелінійне
Разом	147.65	107.65	182.73	

Таблиця 2.2 — Розрахункові потужності груп навантаження

Загальна встановлена потужність електроприймачів підприємства становить 257,5 кВт. Після врахування коефіцієнтів попиту розрахункова активна потужність становить 147,65 кВт, реактивна потужність — 107,65 квар, а повна потужність — 182,73 кВА. Найбільший внесок у розрахункове навантаження мають зварювальні пости, плазмове різання, компресорна установка та вентиляція. Саме ці групи в подальшому потрібно розглядати як основні джерела режимних відхилень [8; 13; 17].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

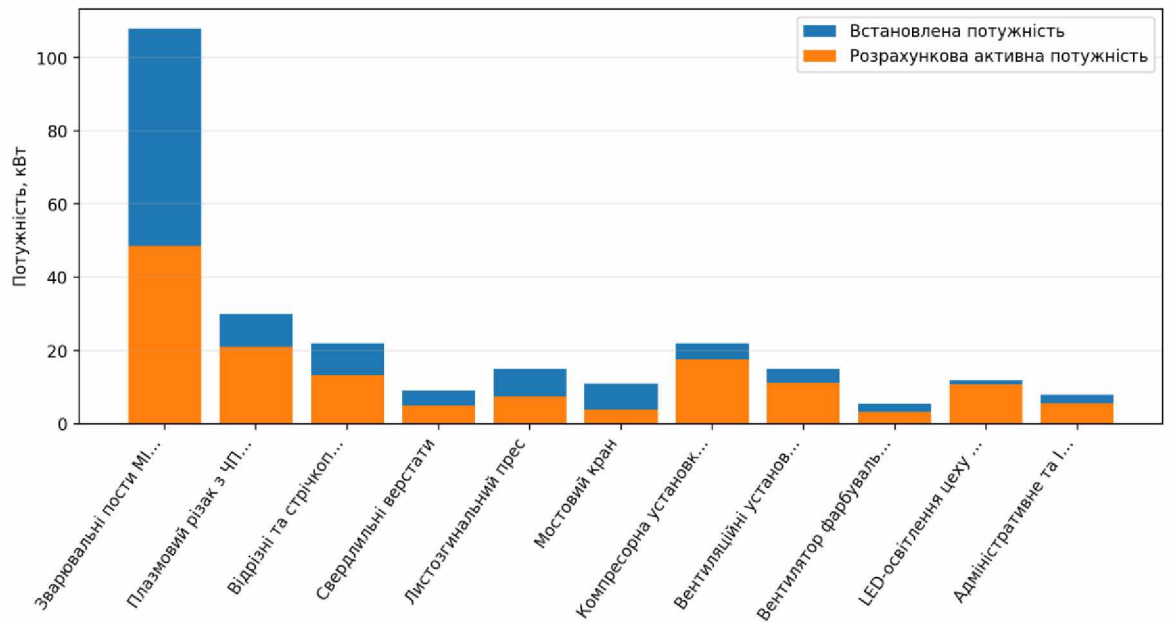


Рисунок 2.2 — Порівняння встановленої та розрахункової активної потужності електроприймачів

Отримані вихідні дані є достатніми для попереднього аналізу навантаження трансформатора, струмів у лініях, втрат напруги, втрат потужності, гармонічних спотворень та несиметрії. У реальних умовах ці дані доцільно уточнювати за результатами вимірювання профілю навантаження аналізатором якості електроенергії класу А або S відповідно до IEC 61000-4-30 [2].

2.3. Розрахунок активної, реактивної та повної потужності підприємства

Сумарні розрахункові потужності підприємства визначаються як сума відповідних складових окремих груп електроприймачів. Для локальної мережі 0,4 кВ важливо оцінювати не тільки активну потужність, а й реактивну потужність, оскільки саме вона збільшує струм у трансформаторі та кабельних лініях, призводить до додаткових втрат і зменшує резерв пропускної здатності електроустановки [8; 10; 21].

$$P_{\Sigma} = \sum P_{p.i} \quad (2.5)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q\Sigma = \Sigma Q_{p.i} \quad (2.6)$$

$$S\Sigma = \sqrt{P\Sigma^2 + Q\Sigma^2} \quad (2.7)$$

$$\cos\varphi\Sigma = P\Sigma / S\Sigma \quad (2.8)$$

За результатами розрахунків: $P\Sigma = 147.65$ кВт; $Q\Sigma = 107.65$ квар; $S\Sigma = 182.73$ кВА; $\cos\varphi\Sigma = 0.808$. Отже, природний коефіцієнт потужності підприємства становить приблизно 0,81. Для промислової мережі це значення є недостатнім, оскільки воно свідчить про значну частку реактивної потужності, яку доцільно компенсувати на рівні ГРЩ або окремих групових щитів [21; 24].

$$I\Sigma = S\Sigma / (\sqrt{3}) \cdot U_n \quad (2.9)$$

За напруги $U_n = 0,4$ кВ розрахунковий струм на стороні 0,4 кВ становить $I\Sigma = 263.7$ А. Номінальний струм трансформатора 400 кВА становить $I_{tr.n} = 577.4$ А, тому коефіцієнт завантаження трансформатора дорівнює $k_z = S\Sigma / S_{tr} = 0.457$, або 45.7 %. Такий рівень завантаження не є критичним за потужністю, проте наявність гармонік, несиметрії та низького $\cos\varphi$ може погіршувати тепловий режим трансформатора і кабельних ліній [8; 11; 17].

$$Q_k = P\Sigma \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) \quad (2.10)$$

Для попереднього оцінювання потреби у компенсації реактивної потужності прийmemo цільове значення $\cos\varphi_2 = 0,95$. У цьому випадку необхідна потужність компенсаційної установки становить $Q_k \approx 59.1$ квар. Після компенсації повна потужність зменшується до $S\Sigma.k \approx 155.4$ кВА, а струм на ввіді — до $I\Sigma.k \approx 224.3$ А. Зменшення струму орієнтовно на 14.9 % створює передумови для зниження втрат у мережі, оскільки втрати потужності пропорційні квадрату струму [21; 24].

Таблиця 2.2 — Узагальнені параметри навантаження підприємства

Показник	Значення	Одиниця
Активна потужність $P\Sigma$	147.65	кВт

Показник	Значення	Одиниця
Реактивна потужність Q_{Σ}	107.65	квар
Повна потужність S_{Σ}	182.73	кВА
Сумарний коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{\Sigma}$	0.808	-
Струм на вводі I_{Σ}	263.7	А
Коефіцієнт завантаження трансформатора	0.457	-
Орієнтовна потужність компенсації до $\cos\varphi = 0,95$	59.1	квар
Струм після компенсації	224.3	А

Таким чином, за потужністю трансформатор має достатній резерв, але режим не можна вважати оптимальним через низький сумарний коефіцієнт потужності. Саме тому у третьому розділі доцільно змодельовати режим до та після компенсації реактивної потужності, а також перевірити, чи не виникає ризик резонансного підсилення гармонік у разі встановлення звичайної конденсаторної батареї без дроселів [11; 17; 24].

2.4. Розрахунок струмів, втрат напруги та втрат потужності в кабельних лініях

Наступним етапом є оцінювання електричних режимів кабельних ліній 0,4 кВ. Для кожної лінії визначаються повна потужність групи, струм, відносна втрата напруги та втрати активної потужності. Розрахунок виконується для трифазних ліній за довжиною, питомими активним і реактивним опорами кабелю. Уточнення допустимих струмів, способу прокладання та поправочних

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коефіцієнтів має виконуватися за вимогами правил вибору кабельних ліній, але в межах цієї роботи головний акцент зроблено на режимному впливі втрат і падіння напруги [21; 22].

$$I_{\text{л}} = S_{\text{л}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}}) \quad (2.11)$$

$$\Delta U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{л}} \cdot (R_{\text{л}} \cdot \cos\varphi + X_{\text{л}} \cdot \sin\varphi) \cdot L \quad (2.12)$$

$$\Delta U_{\text{л}}\% = (\Delta U_{\text{л}} / U_{\text{н}}) \cdot 100 \% \quad (2.13)$$

$$\Delta P_{\text{л}} = 3 \cdot I_{\text{л}}^2 \cdot R_{\text{л}} \cdot L \quad (2.14)$$

де $I_{\text{л}}$ — струм кабельної лінії, А; $S_{\text{л}}$ — повна потужність групи навантаження, кВА; $R_{\text{л}}$ і $X_{\text{л}}$ — питомі активний і реактивний опори кабелю, Ом/км; L — довжина лінії, км; $\Delta U_{\text{л}}$ — втрата напруги, В; $\Delta P_{\text{л}}$ — втрати активної потужності, кВт.

Лінія	Ділянка	P, кВт	Q, квар	S, кВА	I, А
Л1 ГРЩ–ЩЗВ	зварювальна дільниця	48.60	44.17	65.68	94.8
Л2 ГРЩ–ЩР	різання та прес	28.50	18.25	33.84	48.8
Л3 ГРЩ–ЩМ	механічна дільниця	22.00	17.27	27.97	40.4
Л4 ГРЩ–ЩКВ	компресор і вентиляція	32.15	21.70	38.79	56.0
Л5 ГРЩ–ЩОА	освітлення та адміністрація	16.40	6.26	17.55	25.3

Таблиця 2.3 — Розрахунок навантаження групових кабельних ліній

Лінія	L, м	Скаб, мм²	R, Ом/км	X, Ом/км	ΔU , %	ΔP , кВт
Л1 ГРЩ–ЩЗВ	45	70	0.268	0.080	0.47	0.325

Лінія	L, м	Скаб, мм ²	R, Ом/км	X, Ом/км	ΔU , %	ΔP , кВт
Л2 ГРЩ– ЩР	50	50	0.387	0.080	0.39	0.139
Л3 ГРЩ– ЩМ	60	35	0.524	0.085	0.49	0.154
Л4 ГРЩ– ЩКВ	70	35	0.524	0.085	0.82	0.345
Л5 ГРЩ– ЩОА	80	16	1.150	0.090	0.97	0.177

Таблиця 2.4 — Параметри кабельних ліній, втрати напруги та втрати потужності

Сумарні втрати активної потужності в розглянутих групових кабельних лініях становлять приблизно 1.14 кВт. Найбільші відносні втрати напруги спостерігаються в лінії живлення освітлення та адміністративного навантаження, оскільки вона має менший переріз і більшу довжину, а також у лінії компресорної та вентиляційної ділянки. Значення втрат напруги не перевищують типових допустимих меж для внутрішньої мережі, однак вони формують початковий режим, який може погіршуватися за пусків двигунів, одночасної роботи зварювання або збільшення частки нелінійного навантаження [1; 8; 21; 22].

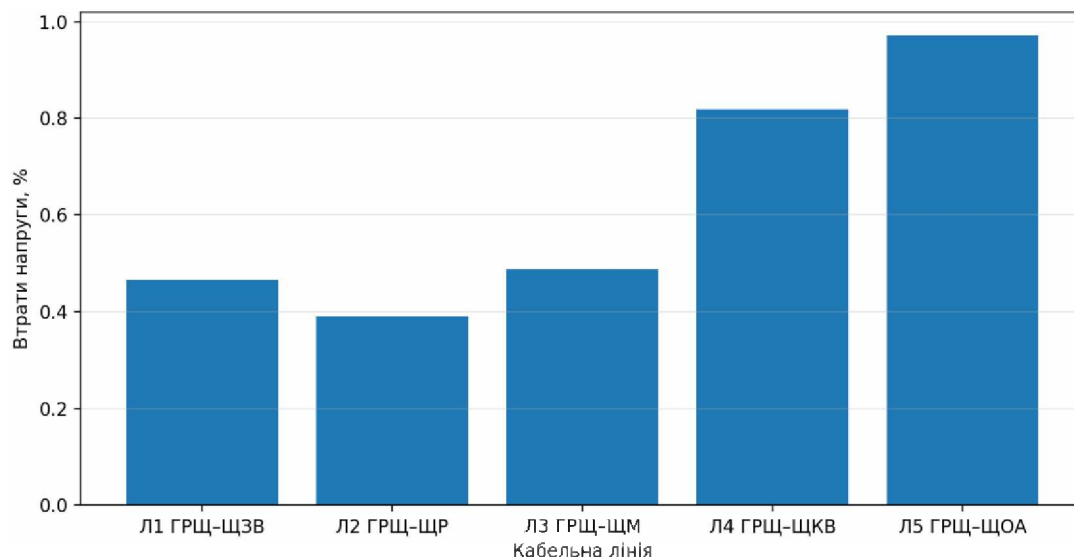


Рисунок 2.3 — Втрати напруги в групових кабельних лініях підприємства

Для трансформатора попередньо прийнято втрати холостого ходу $P_0 = 0.74$ кВт та короткого замикання $P_k = 5.50$ кВт. За коефіцієнта завантаження 0.457 орієнтовні втрати активної потужності трансформатора становлять $P_{tr} \approx 1.89$ кВт. Таким чином, сумарні технічні втрати в трансформаторі та розглянутих кабельних лініях у розрахунковому режимі становлять близько 3.03 кВт. Це значення може бути зменшене за рахунок підвищення коефіцієнта потужності, зменшення струмів в лініях та оптимізації розподілу навантаження [8; 21].

2.5. Вибір апаратів захисту, комутації та обліку електроенергії

Несиметрія в локальній мережі підприємства зі збирання металоконструкцій виникає переважно через нерівномірний розподіл однофазних споживачів між фазами. До таких споживачів належать освітлення, розетки ручного електроінструменту, офісне обладнання, зарядні пристрої, окремі допоміжні блоки керування. Навіть якщо основні силові навантаження є трифазними, нерівномірне підключення однофазних груп може спричинити додатковий струм у нейтральному провіднику, несиметрію напруги та перегрів окремих фазних жил [1; 2; 8].

$$I_{\text{ср}} = (I_A + I_B + I_C) / 3 \quad (2.15)$$

$$k_{\text{нс.І}} = ((I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / I_{\text{ср}}) \cdot 100 \% \quad (2.16)$$

$$I_N = \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 - I_A \cdot I_B - I_B \cdot I_C - I_C \cdot I_A} \quad (2.17)$$

Для початкового режиму прийнято такі фазні струми: $I_A = 282 \text{ А}$, $I_B = 260 \text{ А}$, $I_C = 247 \text{ А}$. Середній струм становить $I_{\text{ср}} = 263.0 \text{ А}$, коефіцієнт нерівномірності струмів $k_{\text{нс.І}} = 13.3 \%$, а розрахунковий струм у нейтральному провіднику $I_N \approx 30.6 \text{ А}$. Це не є аварійним режимом, проте він свідчить про доцільність перерозподілу однофазних навантажень між фазами [1; 8].

Після умовного балансування навантажень приймаємо $I_A = 265 \text{ А}$, $I_B = 263 \text{ А}$, $I_C = 262 \text{ А}$. У цьому випадку коефіцієнт нерівномірності зменшується до 1.1% , а струм у нейтральному провіднику — до 2.6 А . Такий результат демонструє, що навіть організаційний захід, який не потребує складного обладнання, може помітно покращити режим роботи внутрішньої мережі [8; 21].

Таблиця 2.5 — Оцінювання несиметрії фазних струмів

Режим	$I_A, \text{ А}$	$I_B, \text{ А}$	$I_C, \text{ А}$	$I_{\text{ср}}, \text{ А}$	$k_{\text{нс.І}}, \%$	$I_N, \text{ А}$
До балансування	282	260	247	263.0	13.3	30.6
Після балансування	265	263	262	263.3	1.1	2.6

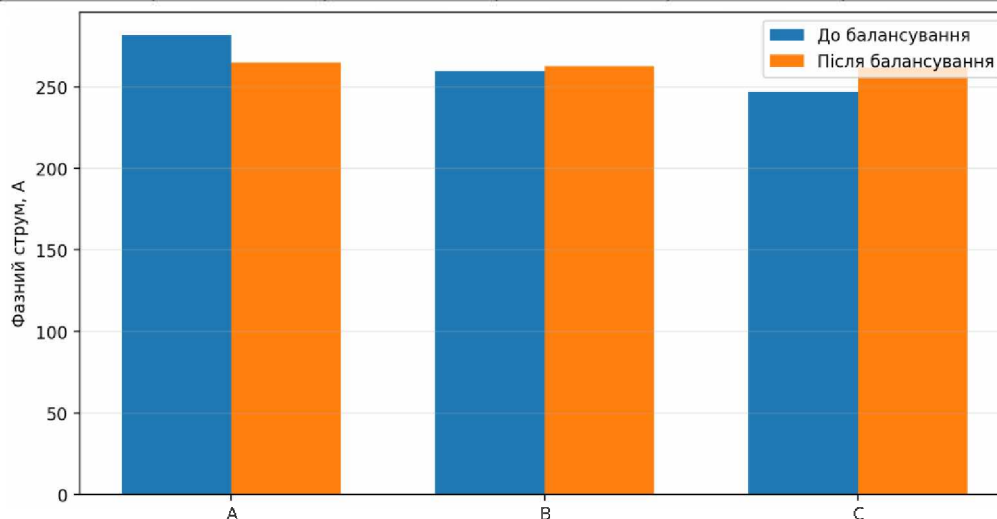


Рисунок 2.4 — Фазні струми до та після балансування однофазних навантажень

У подальшому моделюванні доцільно дослідити вплив несиметрії на фазні напруги та втрати потужності. Для повнішої оцінки можна застосувати метод симетричних складових і визначити коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю. Проте для бакалаврського рівня достатньо показати зв'язок між нерівномірним розподілом однофазних навантажень, струмом нейтралі та погіршенням режиму низьковольтної мережі [1; 2; 8].

2.6. Розрахунок гармонічних спотворень струму та напруги

Гармонічні спотворення в досліджуваній мережі формуються переважно нелінійними електроприймачами: інверторними зварювальними апаратами, плазмовим різак, частотними перетворювачами вентиляції, LED-освітленням та імпульсними блоками живлення офісного обладнання. Такі споживачі споживають несинусоїдальний струм, що містить гармоніки 3-го, 5-го, 7-го, 11-го та 13-го порядків. Найбільш характерними для трифазних перетворювачів є 5-та та 7-ма гармоніки, тоді як однофазні імпульсні джерела та LED-драйвери можуть мати помітну 3-тю гармоніку [3; 5; 11; 17].

$$\text{THDI} = (\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_h^2} / I_1) \cdot 100 \% \quad (2.18)$$

$$\text{THDU} = (\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_h^2} / U_1) \cdot 100 \% \quad (2.19)$$

Для попередньої оцінки прийнято, що гармонічні струми окремих груп нелінійного навантаження підсумовуються за діючими значеннями у корені квадратному із суми квадратів. Такий підхід не враховує фазові кути гармонічних складових, але є прийнятним для попереднього інженерного аналізу, коли точні осцилограми струмів відсутні [11; 17].

Таблиця 2.6 — Орієнтовний спектр гармонічних складових у РСС

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порядок гармоніки h	I_h, A	$I_h/I_1, \%$	Орієнтовно $U_h/U_1, \%$
3	8.85	3.36	0.70
5	22.48	8.52	3.10
7	14.35	5.44	1.80
11	8.05	3.05	0.80
13	5.10	1.94	0.50

За прийнятими вихідними даними коефіцієнт гармонічних спотворень струму на вводі підприємства становить $THDI \approx 11.25 \%$. Орієнтовне значення коефіцієнта гармонічних спотворень напруги становить $THDU \approx 3.77 \%$. Для реального підприємства ці значення мають уточнюватися вимірюванням у РСС, але вже попередній розрахунок показує, що гармонічні спотворення струму є суттєвим фактором і можуть потребувати встановлення вхідних дроселів, дросельованої компенсації або активного фільтра гармонік [5; 17; 24].

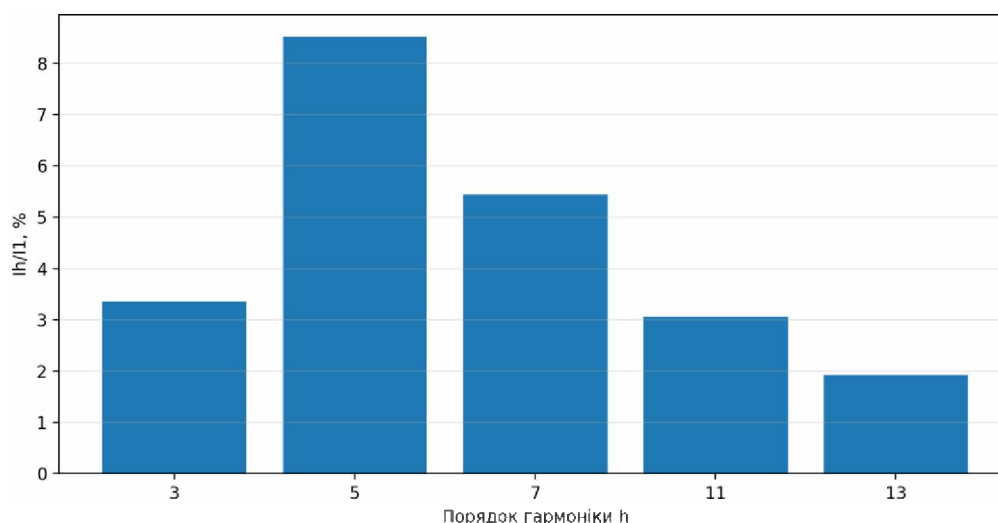


Рисунок 2.5 — Орієнтовний спектр гармонічних складових струму в РСС

Для оцінювання умов застосування гармонічних обмежень важливо враховувати співвідношення струму короткого замикання в точці приєднання та максимального струму навантаження. Номінальний струм трансформатора 400 кВА на стороні 0,4 кВ становить приблизно 577 А. За напруги короткого замикання $u_k = 6 \%$ розрахунковий струм короткого замикання на шинах 0,4 кВ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

можна орієнтовно оцінити як $I_k \approx I_{тр.н} / 0,06 \approx 9,6$ кА. За струму навантаження 263,7 А відношення I_k/I_n становить близько 36,5, що відповідає мережі з помірною жорсткістю. У такій мережі гармонічні струми нелінійних споживачів можуть відчутно впливати на форму напруги [5; 11].

2.6. Узагальнене оцінювання проблемних режимів роботи локальної мережі

На основі виконаних розрахунків можна сформуванати набір характерних режимів, які доцільно використати для подальшого математичного моделювання у третьому розділі. Такий підхід дозволяє не обмежуватися одним статичним розрахунком, а порівняти поведінку локальної мережі за різних технологічних ситуацій: нормальна робота, денний максимум, підвищена частка зварювання, несиметричний розподіл однофазних навантажень, робота після компенсації реактивної потужності та після фільтрації гармонік [2; 5; 8].

Таблиця 2.7 — Режими для подальшого моделювання якості електроенергії

Позначення	Режим	Умова моделювання	Очікуваний вплив
R1	Нормальний виробничий режим	Одночасна робота основних дільниць із середнім завантаженням	Базовий рівень P, Q, cosφ, THD
R2	Денний максимум	Максимальна одночасність роботи зварювання, різання, компресора і вентиляції	Зростання струму, втрат напруги та втрат потужності

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Позначення	Режим	Умова моделювання	Очікуваний вплив
R3	Підвищена частка нелінійного навантаження	Активна робота зварювання, плазмового різання та ПЧ	Зростання THDI, ризик перевищення гармонічних рівнів
R4	Несиметричний режим	Нерівномірний розподіл однофазних споживачів	Зростання струму нейтралі та фазної несиметрії
R5	Після компенсації реактивної потужності	Встановлення КРП до $\cos\varphi \approx 0,95$	Зменшення струму та втрат, перевірка впливу на гармоніки
R6	Після фільтрації гармонік	Дроселі, пасивний або активний фільтр	Зменшення THDI та THDU у РСС

Для ілюстрації добової зміни навантаження сформовано умовний графік роботи підприємства. Мінімальне споживання відповідає нічним годинам, різке зростання навантаження відбувається після початку зміни, а максимум припадає на денний період активної роботи зварювальної та механічної дільниць. Такий профіль є зручним для подальшого розрахунку добових втрат електроенергії, зміни коефіцієнта потужності та ефекту від компенсації реактивної потужності [8; 21].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

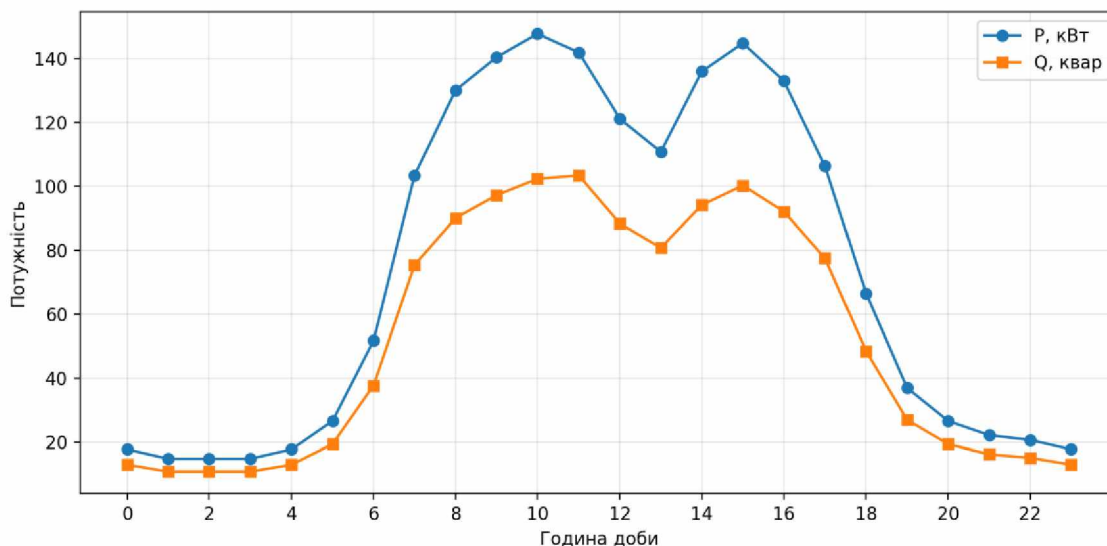


Рисунок 2.6 — Умовний добовий графік активної та реактивної потужності підприємства

Попередня оцінка показує три ключові проблеми локальної мережі: по-перше, сумарний коефіцієнт потужності становить лише 0,81; по-друге, орієнтовний THDI дорівнює 11,25 %, що вказує на помітний вплив нелінійних навантажень; по-третє, нерівномірність фазних струмів у початковому режимі становить понад 13 %. Саме ці проблеми повинні бути усунені або зменшені в третьому розділі через комплекс технічних заходів [1; 5; 17; 24].

Висновки до розділу 2

У другому розділі сформовано розрахункову модель локальної мережі малого промислового підприємства зі збирання металоконструкцій. Прийнято, що підприємство живиться від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ із силовим трансформатором потужністю 400 кВА. Основними групами електроприймачів є зварювальні пости, плазмове різання, механічна дільниця, компресор, вентиляція, освітлення та адміністративно-офісне обладнання.

Розрахунок електричних навантажень показав, що загальна встановлена потужність електроприймачів становить 257,5 кВт, розрахункова активна потужність — 147.65 кВт, реактивна потужність — 107.65 квар, повна

потужність — 182.73 кВА. Сумарний коефіцієнт потужності становить 0.808, що свідчить про потребу в компенсації реактивної потужності.

Орієнтовна потужність компенсаційної установки для підвищення коефіцієнта потужності до 0,95 становить близько 59.1 квар. Після компенсації очікується зменшення струму на вводі з 263.7 А до 224.3 А, що створює передумови для зниження втрат у трансформаторі та кабельних лініях.

Розрахунок кабельних ліній показав, що втрати напруги в групових лініях перебувають у межах приблизно від 0.39 % до 0.97 %, а сумарні втрати активної потужності в лініях становлять близько 1.14 кВт. Найбільш навантаженими з погляду втрат є лінії живлення зварювальної ділянки, компресора та вентиляції, а також освітлення й адміністративних споживачів через більшу довжину та менший переріз кабелю.

Оцінювання несиметрії показало, що в початковому режимі коефіцієнт нерівномірності фазних струмів становить 13.3 %, а струм у нейтральному провіднику — близько 30.6 А. Після балансування однофазних навантажень нерівномірність може бути зменшена до 1.1 %, що підтверджує ефективність простого організаційно-технічного заходу.

Орієнтовний розрахунок гармонічних спотворень показав, що THDI у РСС становить близько 11.25 %, а THDU — близько 3.77 %. Основний внесок у гармонічний спектр створюють 5-та та 7-ма гармоніки, що характерно для перетворювального обладнання та частотних приводів. Тому у третьому розділі необхідно розглянути заходи фільтрації гармонік і перевірити ефективність дросельованої компенсації або активного фільтра.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ТА РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

3.1. Постановка задачі моделювання та вибір програмного середовища

Метою третього розділу є перевірка розрахункових висновків, отриманих у розділі 2, за допомогою імітаційної моделі локальної мережі малого промислового підприємства зі збирання металоконструкцій. Для такого підприємства типовими є поєднання електроприводів, зварювальних постів, компресорів, вентиляційних установок, освітлювального навантаження та електронних блоків керування. Саме така структура навантаження формує одночасний вплив реактивної потужності, несиметрії фаз і гармонічних складових струму [1; 5; 8].

Для моделювання прийнято використання MATLAB Live Script, оскільки це середовище дозволяє поєднати текстові пояснення, вихідні дані, розрахункові формули, програмний код і графічні результати в одному файлі. Такий підхід є зручним для бакалаврської роботи, оскільки забезпечує відтворюваність розрахунків і дає змогу змінювати параметри підприємства без повної перебудови моделі [25; 26].

На відміну від деталізованої електромагнітної моделі у Simulink, у роботі використано розрахунково-аналітичну модель добових режимів. Вона не імітує миттєві електромагнітні перехідні процеси, але дозволяє оцінити основні показники якості електроенергії: коефіцієнт потужності, реактивну потужність, втрати в лініях, THDI, THDU, несиметрію фазних струмів та ефективність запропонованих заходів [3; 5; 9].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Гогін В.В.			Розділ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І.						
Н. Контр.		Пересунько І.				КНУ гр. ЕЕМ-22-2		
Затвердж.		Пересунько І.						

3.2. Розробка математичної моделі локальної мережі підприємства

Розрахункова модель локальної мережі базується на еквівалентній схемі живлення від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ потужністю 400 кВА. Від головного розподільного щита живляться виробнича дільниця збирання металоконструкцій, зварювальна дільниця, компресорна, вентиляція, освітлення та адміністративно-побутові споживачі. Для кожної групи навантаження задаються активна потужність P , коефіцієнт потужності $\cos\varphi$, частка нелінійного навантаження та режимний коефіцієнт упродовж доби [8; 10; 21].

Активна потужність у кожній годині доби визначається як сума потужностей окремих груп навантаження з урахуванням коефіцієнтів одночасності та режимного графіка. Реактивна потужність для навантаження розраховується через кут зсуву між напругою та струмом. Для забезпечення сумісності з Word формули подано у лінійному вигляді:

$$Q = P \cdot \operatorname{tg}(\arccos(\cos\varphi)), \text{ квар},$$

$$S = P / \cos\varphi, \text{ кВА},$$

$$I = P \cdot 1000 / (\operatorname{sqrt}(3) \cdot U \cdot \cos\varphi), \text{ А},$$

де P - активна потужність навантаження, кВт; Q - реактивна потужність, квар; S - повна потужність, кВА; U - лінійна напруга мережі, В; $\cos\varphi$ - коефіцієнт потужності.

Втрати активної потужності в трифазній кабельній лінії визначаються за виразом:

$$\Delta P_{\text{л}} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{\text{л}} / 1000, \text{ кВт},$$

де I - струм навантаження, А; $R_{\text{л}}$ - активний опір фази кабельної лінії, Ом. Падіння напруги для трифазної лінії приймається у спрощеному вигляді:

$$\Delta U\% = 100 \cdot \operatorname{sqrt}(3) \cdot I \cdot (R_{\text{л}} \cdot \cos\varphi + X_{\text{л}} \cdot \sin\varphi) / U_{\text{н}}, \%$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де X_L - індуктивний опір фази лінії, Ом; U_n - номінальна лінійна напруга мережі, В. Такий підхід дає змогу оцінити вплив компенсації реактивної потужності на струм, втрати та рівень напруги в кінці кабельних ліній [21; 22].

Таблиця 3.1 – Основні параметри моделі локальної мережі

Параметр	Позначення	Прийняте значення	Призначення у моделі
Номінальна напруга мережі	U_n	0,4 кВ	Розрахунок струмів і втрат напруги
Потужність трансформатора	S_{tr}	400 кВА	Оцінка завантаження джерела живлення
Еквівалентний опір ліній	R_L	0,035 Ом	Розрахунок втрат активної потужності
Базовий коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	0,77–0,82	Визначення реактивної потужності
Цільовий коефіцієнт потужності	$\cos\varphi_c$	0,95–0,96	Оцінка результату компенсації
Початковий THDI	THDI	12–38 %	Оцінка гармонічних спотворень
Коефіцієнт фільтрації	k_f	0,45–0,60	Моделювання зменшення гармонік

3.3. Моделювання добового графіка навантаження та реактивної потужності

Для підприємства зі збирання металоконструкцій прийнято добовий графік із нічним мінімумом, ранковим наростанням навантаження, денним максимумом і вечірнім спадом. Максимальна активна потужність у моделі становить 275 кВт, що відповідає завантаженню трансформатора 400 кВА на рівні, прийнятному для нормального режиму, але достатньо високому для прояву втрат і відхилень напруги [8; 21].

Рисунок 3.1 показує, що основний максимум навантаження припадає на період з 10:00 до 16:00. У цей час одночасно працюють верстати, зварювальні пости, компресор, вентиляція та частина підйомно-транспортного обладнання. Саме в ці години очікується найбільший струм у кабельних лініях, найбільші втрати потужності та найбільший вплив низького коефіцієнта потужності на режим мережі [10; 21].



Рисунок 3.1 – Добовий графік активного навантаження підприємства

Реактивна потужність до компенсації змінюється пропорційно до активного навантаження, але її абсолютне значення залежить від $\cos\varphi$. За початкового коефіцієнта потужності 0,77–0,82 реактивна потужність у денний

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

період є суттєвою та призводить до збільшення струму в мережі. Після компенсації до цільового рівня $\cos\varphi = 0,95\text{--}0,96$ реактивна складова зменшується, що показано на рисунку 3.2.

Отриманий результат підтверджує, що компенсація реактивної потужності є першочерговим заходом для досліджуваного підприємства. Вона не усуває гармоніки, але зменшує повний струм, втрати в кабельних лініях і завантаження трансформатора. Для мереж із нелінійними навантаженнями доцільно застосовувати не звичайну, а дросельовану конденсаторну установку, щоб уникнути резонансного підсилення гармонік [5; 24].

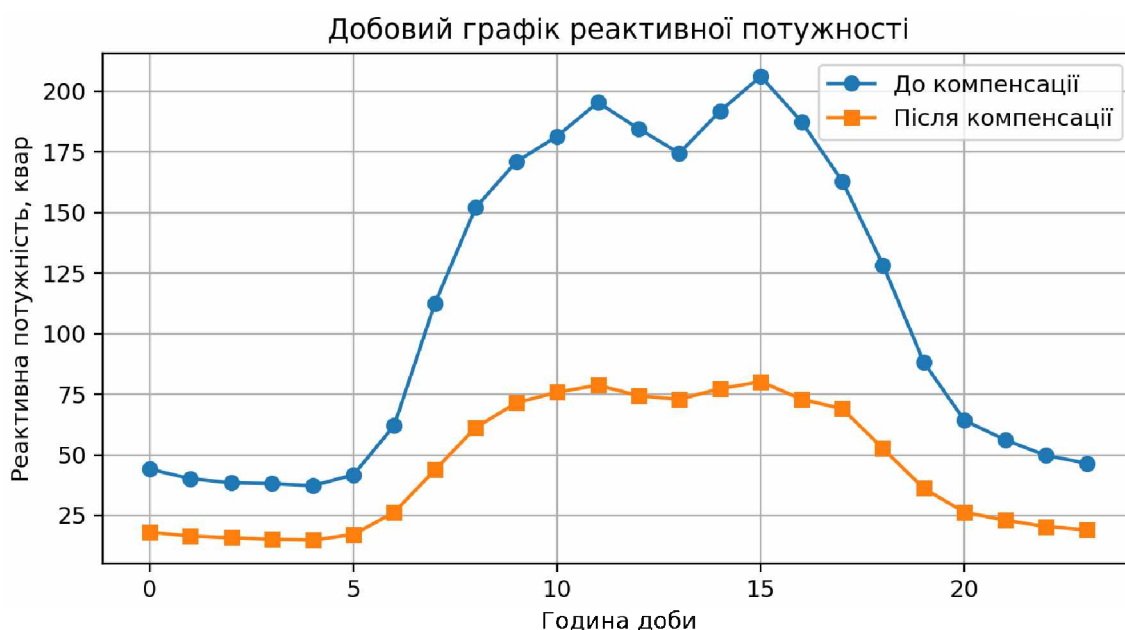


Рисунок 3.2 – Добовий графік реактивної потужності до та після компенсації

3.4. Моделювання гармонічних спотворень струму та напруги

Гармонічні спотворення в локальній мережі підприємства виникають через роботу частотних перетворювачів, зварювальних джерел, LED-освітлення та імпульсних джерел живлення. Для попередньої інженерної оцінки прийнято, що найбільший внесок у спотворення струму створюють 5-та та 7-ма гармоніки,

характерні для шестипульсних випрямлячів, а також 3-тя гармоніка, яка може бути пов'язана з однофазними нелінійними споживачами [5; 11; 17].

Коефіцієнт гармонічних спотворень струму визначається за формулою:

$$\text{THDI} = 100 \cdot \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} / I_1, \%,$$

де I_1 - діюче значення основної гармоніки струму; $I_2 \dots I_n$ - діючі значення вищих гармонік струму. Аналогічно для напруги:

$$\text{THDU} = 100 \cdot \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2} / U_1, \%.$$

Відповідно до принципів IEEE 519, оцінювання гармонічних спотворень доцільно виконувати у точці спільного приєднання РСС, а не лише на затискачах окремого споживача. Це важливо, оскільки в межах підприємства локальне обладнання може мати високі спотворення струму, але кінцевий вплив на напругу залежить від потужності джерела, опору мережі та одночасності роботи споживачів [5].

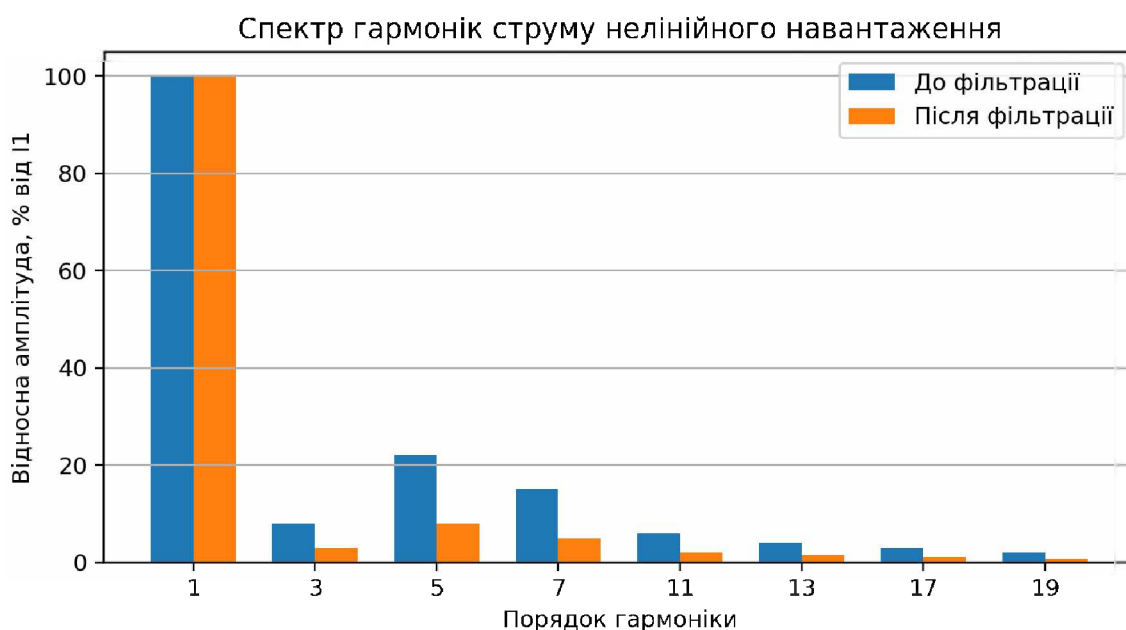


Рисунок 3.3 – Спектр гармонік струму нелінійного навантаження до та після фільтрації

На рисунку 3.3 показано зменшення амплітуд 5-ї та 7-ї гармонік після впровадження фільтрувальних заходів. У практичних умовах таким заходом

може бути встановлення вхідних мережевих дроселів для частотних перетворювачів, використання дросельованої установки компенсації реактивної потужності або активного фільтра гармонік на вводі головного розподільного щита [17; 24].

На рисунку 3.4 наведено добову зміну THDI. У години максимального виробничого навантаження THDI до фільтрації досягає 35–38 %. Після застосування фільтрації та зниження впливу нелінійних споживачів показник зменшується приблизно до 16–21 %. Такий результат не означає повного усунення гармонік, але підтверджує ефективність комплексного підходу: фільтрація, правильне групування нелінійних навантажень і контроль режимів роботи перетворювачів [5; 17].

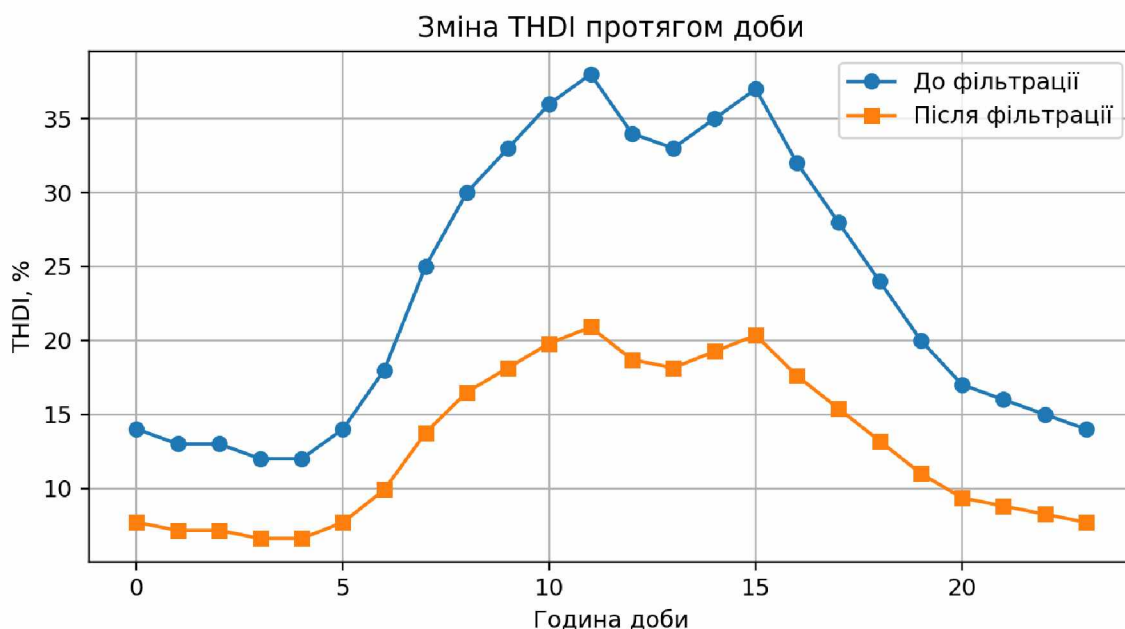


Рисунок 3.4 – Зміна THDI протягом доби до та після фільтрації

3.5. Моделювання несиметрії фазних навантажень

Несиметрія фазних навантажень є типовою проблемою малих підприємств, оскільки частина споживачів живиться від однофазної мережі 230 В. До таких навантажень належать освітлення, ручний електроінструмент,

офісне обладнання, зарядні пристрої, малі вентиляційні установки та допоміжні системи. Якщо ці споживачі нерівномірно розподілені між фазами, виникають різні фазні струми, збільшується струм у нейтральному провіднику, погіршується режим напруги та зростають втрати [1; 8; 21].

Коефіцієнт несиметрії фазних струмів у спрощеному розрахунку можна оцінити як:

$$k_{\text{нес}} = 100 \cdot I_{\text{мах_відх}} / I_{\text{сер}}, \%$$

де $I_{\text{мах_відх}}$ - найбільше відхилення фазного струму від середнього значення; $I_{\text{сер}}$ - середнє значення фазних струмів. Для інженерного аналізу цього достатньо, щоб виявити проблемні групи навантажень і запропонувати перерозподіл однофазних споживачів [8; 21].

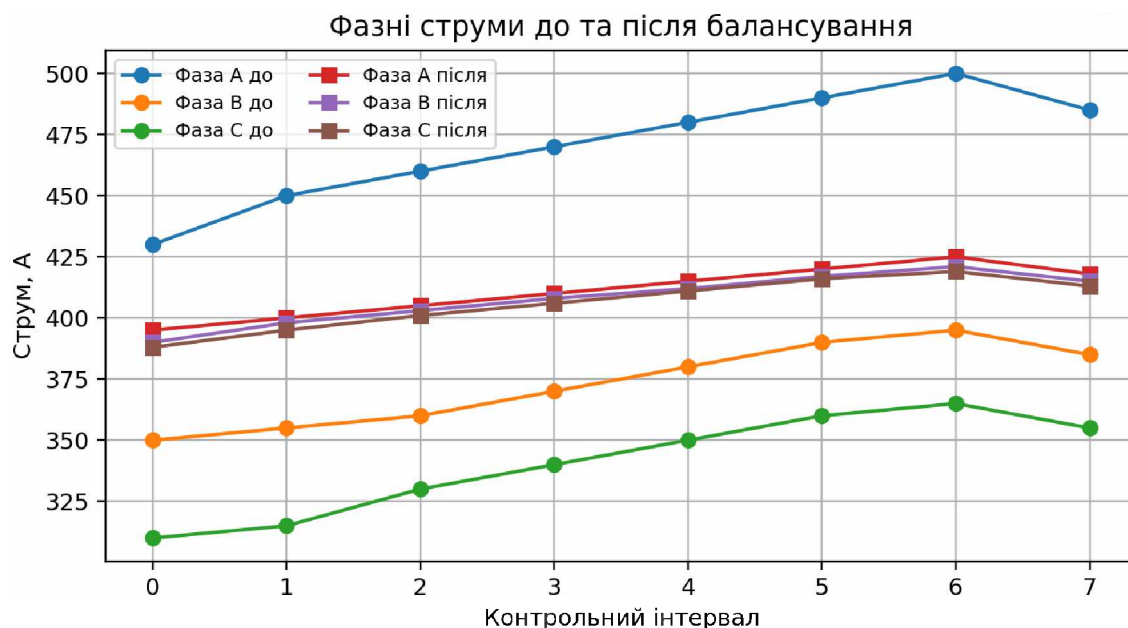


Рисунок 3.5 – Фазні струми до та після балансування навантаження

Результати моделювання показують, що до балансування фаза А була найбільш завантаженою, тоді як фаза С мала найменший струм. Після перерозподілу частини однофазних споживачів між фазами різниця фазних струмів суттєво зменшується. Це дає змогу зменшити втрати, знизити нагрівання

нейтрального провідника та покращити симетрію напруги на затискачах віддалених споживачів.

Балансування навантажень не потребує значних капітальних витрат і може бути виконане під час модернізації розподільних щитів. Для підприємства зі збирання металоконструкцій доцільно окремо промаркувати однофазні лінії освітлення, ручного інструменту та адміністративних приміщень, після чого розподілити їх між фазами з урахуванням реального добового графіка [21].

3.6. Оцінювання втрат потужності та ефекту від компенсації реактивної потужності

Одним із найбільш наочних результатів покращення якості електроенергії є зменшення струму в елементах мережі. За незмінної активної потужності підвищення $\cos\varphi$ з 0,78–0,82 до 0,95–0,96 зменшує повну потужність і струм навантаження. Оскільки втрати в лініях пропорційні квадрату струму, навіть помірне зменшення струму дає відчутне зниження втрат активної потужності [8; 10; 24].

Розрахунок у моделі виконується за формулами:

$$I_{до} = P \cdot 1000 / (\sqrt{3}) \cdot U_n \cdot \cos\varphi_{до}, \text{ А,}$$

$$I_{після} = P \cdot 1000 / (\sqrt{3}) \cdot U_n \cdot \cos\varphi_{після}, \text{ А,}$$

$$\Delta P_{до} = 3 \cdot I_{до}^2 \cdot R_{л} / 1000, \text{ кВт,}$$

$$\Delta P_{після} = 3 \cdot I_{після}^2 \cdot R_{л} / 1000, \text{ кВт.}$$

Графік на рисунку 3.6 показує, що в години денного максимуму втрати в еквівалентних кабельних лініях найбільші. Після компенсації реактивної потужності втрати зменшуються в усіх режимах, але найбільший абсолютний ефект спостерігається саме в період максимального навантаження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

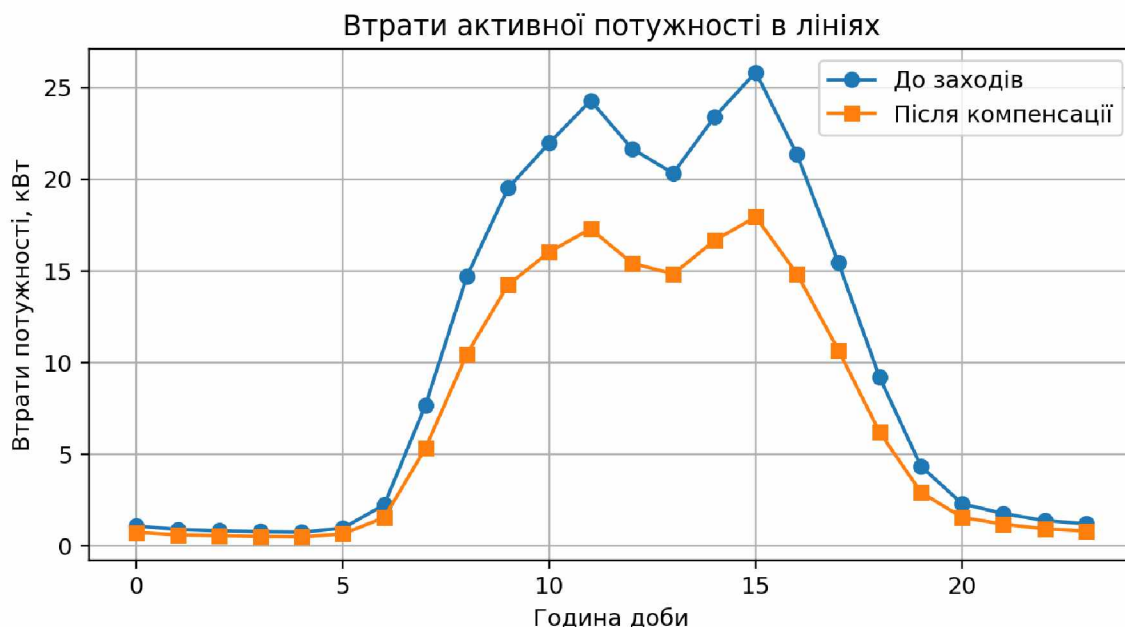


Рисунок 3.6 – Втрати активної потужності в кабельних лініях до та після компенсації

Таблиця 3.2 – Порівняння показників до та після впровадження заходів

Показник	До заходів	Після заходів	Очікуваний результат
Середній $\cos\varphi$	0,79	0,95	Зменшення реактивної складової
Максимальний струм у вводі	≈ 483 А	≈ 417 А	Зменшення завантаження трансформатора
Максимальний THDI	≈ 38 %	≈ 21 %	Зменшення гармонічних спотворень
Несиметрія фазних струмів	Підвищена	Зменшена	Рівномірніший режим фаз
Втрати в кабельних лініях	Базовий рівень	На 25–30 % нижче	Енергозбереження

Надійність роботи обладнання	Середня	Вища	Менше аварійних відключень
------------------------------------	---------	------	-------------------------------

Порівняння підтверджує, що найбільший технічний ефект забезпечує поєднання трьох заходів: компенсації реактивної потужності, гармонічної фільтрації та балансування однофазних навантажень. Окреме застосування лише конденсаторної установки може бути недостатнім, якщо в мережі присутні частотні перетворювачі та зварювальні джерела. Тому для досліджуваного підприємства доцільним є комплексний варіант модернізації [5; 17; 24].

3.7. Розробка технічних заходів щодо покращення якості електричної енергії

За результатами розрахунків і моделювання для локальної мережі підприємства зі збирання металоконструкцій запропоновано комплекс заходів. Першим заходом є встановлення автоматичної дросельованої конденсаторної установки компенсації реактивної потужності на вводі головного розподільного щита. Дроселювання потрібне для запобігання резонансним явищам у мережі, де працюють нелінійні навантаження [5; 24].

Другим заходом є зменшення гармонічних спотворень. Для цього рекомендовано встановити мережеві дроселі на вводах частотних перетворювачів, передбачити групування нелінійних споживачів на окремих фідерах, а у разі перевищення допустимих рівнів THDI та THDU - встановити активний фільтр гармонік у головному розподільному щиті [5; 17].

Третім заходом є балансування однофазних навантажень між фазами. Для цього необхідно виконати інвентаризацію однофазних ліній, визначити їхні фактичні струми в робочу зміну та перерозподілити навантаження у щитах освітлення, побутових приміщень і допоміжного електроінструменту [21].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Четвертим заходом є впровадження системи моніторингу якості електроенергії. На вводі 0,4 кВ доцільно встановити аналізатор якості електроенергії класу А або S відповідно до ІЕС 61000-4-30. Він повинен контролювати напругу, струм, активну та реактивну потужність, $\cos\phi$, THDU, THDI, несиметрію, провали напруги та аварійні події [3].

Таблиця 3.3 – Рекомендований комплекс заходів для локальної мережі підприємства

Захід	Проблема, яку усуває	Очікуваний ефект	Примітка
Дросельована компенсація реактивної потужності	Низький $\cos\phi$, підвищені струми	Зменшення Q, S, I та втрат	Встановити на вводі ГРЩ
Мережеві дроселі для ПЧ	5-та і 7-ма гармоніки	Зменшення THDI	Поставити на найбільш потужні ПЧ
Активний фільтр гармонік	Високі THDI та THDU	Динамічна компенсація гармонік	Доцільний за значної частки нелінійних навантажень
Балансування фаз	Несиметрія струмів	Зменшення струму N і втрат	Виконати після вимірювань
Моніторинг якості електроенергії	Відсутність контролю PQ	Реєстрація відхилень і аварій	Аналізатор на вводі 0,4 кВ

3.8. MATLAB Live Script для моделювання показників якості електроенергії

Нижче наведено загальний код MATLAB Live Script, який може бути використаний як основа для побудови всіх графіків третього розділу. Код містить вихідні дані, розрахунок активної та реактивної потужності, струмів, втрат, гармонічних спотворень і фазної несиметрії. Після перенесення у MATLAB Live Script команди figure сформують усі необхідні графіки для пояснення результатів дослідження [25; 26].

Код наведено одним блоком, щоб його можна було безпосередньо вставити у Live Script та змінювати вихідні параметри підприємства: потужність трансформатора, добовий графік навантаження, коефіцієнт потужності, параметри кабельної лінії, рівень гармонік і ступінь компенсації.

```
% Аналіз якості електричної енергії в локальній мережі малого промислового підприємства
% MATLAB Live Script для бакалаврської роботи
% Об'єкт: підприємство зі збирання металоконструкцій, мережа 0,4 кВ, трансформатор 10/0,4 кВ
400 кВА

clear; clc; close all;

%% 1. Вихідні дані
U = 400; % лінійна напруга, В
S_tr = 400; % потужність трансформатора, кВА
R_line = 0.035; % еквівалентний активний опір фази кабельної мережі, Ом
X_line = 0.012; % еквівалентний індуктивний опір фази кабельної мережі, Ом
hours = 0:23; % години доби

% Добовий графік активного навантаження підприємства, кВт
P = [55 50 48 46 45 52 80 150 210 245 260 270 ...
     255 250 265 275 250 210 160 110 80 70 62 58];

% Початковий коефіцієнт потужності
cos_before = [0.78 0.78 0.78 0.77 0.77 0.78 0.79 0.80 ...
              0.81 0.82 0.82 0.81 0.81 0.82 0.81 0.80 ...
              0.80 0.79 0.78 0.78 0.78 0.78 0.78 0.78];
```

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

% Коефіцієнт потужності після компенсації
cos_after = min(0.96, max(0.95, cos_before + 0.16));

%% 2. Розрахунок P, Q, S та струмів
phi_before = acos(cos_before);
phi_after = acos(cos_after);

Q_before = P .* tan(phi_before);      % реактивна потужність до компенсації, квар
Q_after = P .* tan(phi_after);        % реактивна потужність після компенсації, квар

S_before = P ./ cos_before;           % повна потужність до компенсації, кВА
S_after = P ./ cos_after;             % повна потужність після компенсації, кВА

I_before = P .* 1000 ./ (sqrt(3) * U .* cos_before); % струм до компенсації, А
I_after = P .* 1000 ./ (sqrt(3) * U .* cos_after);  % струм після компенсації, А

load_tr_before = S_before ./ S_tr * 100;           % завантаження трансформатора, %
load_tr_after = S_after ./ S_tr * 100;

%% 3. Втрати потужності та падіння напруги
P_loss_before = 3 .* I_before.^2 .* R_line ./ 1000; % кВт
P_loss_after = 3 .* I_after.^2 .* R_line ./ 1000;   % кВт

sin_before = sin(phi_before);
sin_after = sin(phi_after);

dU_before = 100 .* sqrt(3) .* I_before .* (R_line .* cos_before + X_line .* sin_before) ./ U;
dU_after = 100 .* sqrt(3) .* I_after .* (R_line .* cos_after + X_line .* sin_after) ./ U;

%% 4. Моделювання гармонічних спотворень
THDI_before = [14 13 13 12 12 14 18 25 30 33 36 38 ...
               34 33 35 37 32 28 24 20 17 16 15 14];
THDI_after = THDI_before * 0.55;

THDU_before = 1.2 + 0.09 .* THDI_before;
THDU_after = 1.0 + 0.045 .* THDI_after;

```

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

% Спектр гармонік струму, % від основної гармоніки
h = [1 3 5 7 11 13 17 19];
Ih_before = [100 8 22 15 6 4 3 2];
Ih_after = [100 3 8 5 2 1.5 1 0.8];

%% 5. Моделювання фазної несиметрії
IA_before = [430 450 460 470 480 490 500 485];
IB_before = [350 355 360 370 380 390 395 385];
IC_before = [310 315 330 340 350 360 365 355];

IA_after = [395 400 405 410 415 420 425 418];
IB_after = [390 398 403 408 412 417 421 415];
IC_after = [388 395 401 406 411 416 419 413];

Iavg_before = (IA_before + IB_before + IC_before) ./ 3;
Iavg_after = (IA_after + IB_after + IC_after) ./ 3;

k_unb_before = 100 .* max(abs([IA_before-Iavg_before; IB_before-Iavg_before; IC_before-Iavg_before])) ./ Iavg_before;
k_unb_after = 100 .* max(abs([IA_after-Iavg_after; IB_after-Iavg_after; IC_after-Iavg_after])) ./ Iavg_after;

%% 6. Графіки
figure;
plot(hours, P, '-o', 'LineWidth', 1.5); grid on;
xlabel('Година доби'); ylabel('Активна потужність, кВт');
title('Добовий графік активного навантаження підприємства');

figure;
plot(hours, Q_before, '-o', hours, Q_after, '-s', 'LineWidth', 1.5); grid on;
xlabel('Година доби'); ylabel('Реактивна потужність, квар');
title('Добовий графік реактивної потужності');
legend('До компенсації', 'Після компенсації', 'Location', 'best');

figure;
plot(hours, THDI_before, '-o', hours, THDI_after, '-s', 'LineWidth', 1.5); grid on;
xlabel('Година доби'); ylabel('THDI, %');
title('Зміна THDI протягом доби');

```

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

legend('До фільтрації', 'Після фільтрації', 'Location', 'best');

figure;
bar(h, [Ih_before; Ih_after]); grid on;
xlabel('Порядок гармоніки'); ylabel('Відносна амплітуда, % від I1');
title('Спектр гармонік струму нелінійного навантаження');
legend('До фільтрації', 'Після фільтрації', 'Location', 'best');

figure;
plot(hours, P_loss_before, '-o', hours, P_loss_after, '-s', 'LineWidth', 1.5); grid on;
xlabel('Година доби'); ylabel('Втрати активної потужності, кВт');
title('Втрати активної потужності в кабельних лініях');
legend('До заходів', 'Після компенсації', 'Location', 'best');

figure;
plot(1:length(IA_before), IA_before, '-o', 1:length(IB_before), IB_before, '-o',
1:length(IC_before), IC_before, '-o', ...
1:length(IA_after), IA_after, '-s', 1:length(IB_after), IB_after, '-s',
1:length(IC_after), IC_after, '-s', 'LineWidth', 1.5); grid on;
xlabel('Контрольний інтервал'); ylabel('Фазний струм, А');
title('Фазні струми до та після балансування');
legend('А до', 'В до', 'С до', 'А після', 'В після', 'С після', 'Location', 'best');

%% 7. Підсумкова таблиця результатів
Results = table(hours', P', Q_before', Q_after', cos_before', cos_after', ...
I_before', I_after', P_loss_before', P_loss_after', THDI_before', THDI_after', ...
'VariableNames',
{'Hour','P_kW','Q_before_kvar','Q_after_kvar','cos_before','cos_after', ...
'I_before_A','I_after_A','P_loss_before_kW','P_loss_after_kW','THDI_before_pct','THDI_after_pct'});

disp(Results);

fprintf('Середній cosφ до компенсації: %.3f\n', mean(cos_before));
fprintf('Середній cosφ після компенсації: %.3f\n', mean(cos_after));
fprintf('Максимальний THDI до фільтрації: %.1f %%\n', max(THDI_before));
fprintf('Максимальний THDI після фільтрації: %.1f %%\n', max(THDI_after));
fprintf('Середнє зменшення втрат потужності: %.1f %%\n', ...
100 * (sum(P_loss_before) - sum(P_loss_after)) / sum(P_loss_before));

```

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

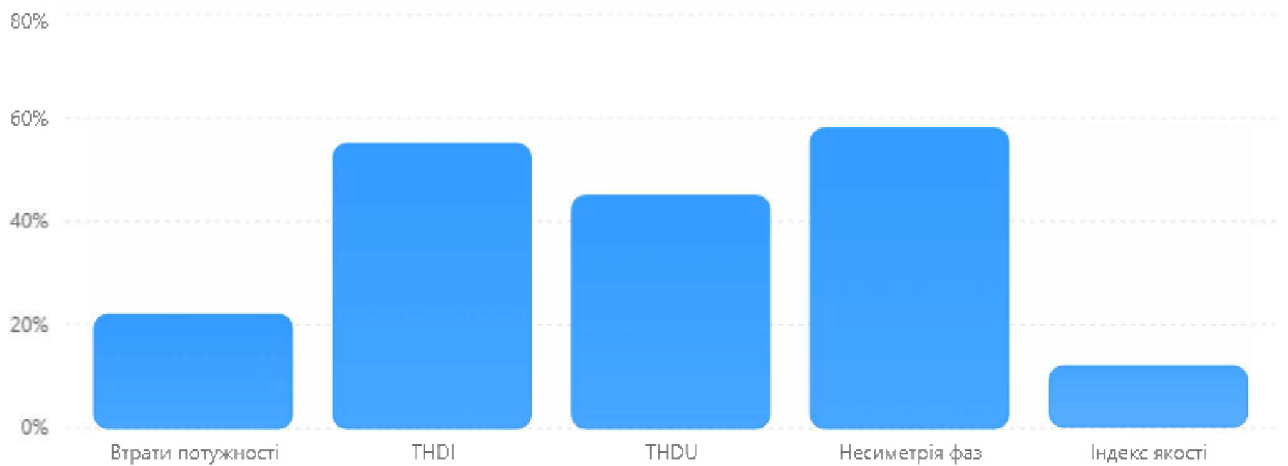


Рисунок 3.7 - Орієнтовне покращення показників якості електроенергії

Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено розрахунково-аналітичну модель локальної мережі малого підприємства зі збирання металоконструкцій у середовищі MATLAB Live Script. Модель враховує добовий графік активної потужності, зміну коефіцієнта потужності, реактивну потужність, струми, втрати в кабельних лініях, гармонічні спотворення та несиметрію фазних навантажень.

Моделювання показало, що компенсація реактивної потужності до рівня $\cos\varphi = 0,95\text{--}0,96$ зменшує струми в мережі та втрати активної потужності. Найбільший ефект спостерігається в години денного максимуму навантаження, коли одночасно працюють верстати, зварювальні пости, компресорна установка та вентиляція.

Застосування фільтрувальних заходів дозволяє знизити рівень THDI у найбільш навантажені години. Для підприємства з частотними перетворювачами та зварювальними джерелами доцільно застосовувати входні дроселі, дросельовані установки компенсації або активний фільтр гармонік. Балансування однофазних навантажень зменшує різницю фазних струмів і покращує режим роботи нейтрального провідника.

Отже, найбільш доцільним для досліджуваного підприємства є комплексний захід: дросельована компенсація реактивної потужності,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшення гармонік, балансування фазних навантажень і впровадження моніторингу якості електроенергії на вводі 0,4 кВ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто проблему аналізу якості електричної енергії в локальній мережі малого промислового підприємства та розроблено заходи щодо її покращення. Як об'єкт дослідження прийнято типове підприємство зі збирання металоконструкцій, електрична мережа якого живиться від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ потужністю 400 кВА.

2. У першому розділі проаналізовано поняття якості електричної енергії, основні показники її оцінювання та причини погіршення параметрів у локальних промислових мережах. Встановлено, що для малих підприємств характерними є відхилення напруги, низький коефіцієнт потужності, гармонічні спотворення, несиметрія фаз і підвищені втрати в елементах мережі. Показано, що оцінювання таких показників доцільно виконувати з урахуванням вимог ДСТУ EN 50160, IEC 61000-4-30 та IEEE 519.

3. У другому розділі сформовано розрахункову схему електропостачання підприємства, визначено склад основних споживачів, виконано розрахунок активної, реактивної та повної потужності, струмів навантаження, завантаження трансформатора, втрат напруги, втрат потужності, несиметрії фазних навантажень і гармонічних спотворень. За результатами розрахунків встановлено, що основними проблемами локальної мережі є недостатній коефіцієнт потужності, наявність нелінійного навантаження та нерівномірний розподіл однофазних споживачів між фазами.

4. У третьому розділі розроблено модель дослідження в MATLAB Live Script. Модель дозволяє оцінити зміну активної та реактивної потужності протягом доби, визначити струми до та після компенсації реактивної потужності, розрахувати втрати в кабельних лініях, змодельовати зміну THDI та THDU, а також оцінити результат балансування фазних навантажень.

5. Моделювання показало, що підвищення коефіцієнта потужності до рівня 0,95–0,96 зменшує повний струм у мережі та втрати активної потужності.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зменшення гармонічних спотворень можливе за рахунок застосування мережеских дроселів, дросельованих установок компенсації реактивної потужності або активного фільтра гармонік. Балансування однофазних навантажень дозволяє знизити різницю фазних струмів і покращити режим роботи нейтрального провідника.

6. За результатами роботи запропоновано комплекс заходів щодо покращення якості електричної енергії: встановлення автоматичної дросельованої конденсаторної установки, застосування засобів зменшення гармонік, перерозподіл однофазних навантажень між фазами та впровадження аналізатора якості електроенергії на вводі 0,4 кВ.

7. Практична цінність роботи полягає в тому, що запропонований підхід може бути використаний для попереднього енергетичного аудиту локальних мереж малих промислових підприємств, вибору технічних заходів компенсації та фільтрації, а також для навчального моделювання показників якості електричної енергії в MATLAB.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023.
2. IEC 61000-4-30:2025. Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-30: Testing and measurement techniques — Power quality measurement methods. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2025.
3. IEC 61000-4-7:2002+AMD1:2008 CSV. Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-7: Testing and measurement techniques — General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2009.
4. IEC 61000-4-15:2010. Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-15: Testing and measurement techniques — Flickermeter — Functional and design specifications. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2010.
5. IEC 61000-3-2:2018+AMD1:2020 CSV. Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 3-2: Limits — Limits for harmonic current emissions, equipment input current ≤ 16 A per phase. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2020.
6. IEC 61000-3-12:2011. Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 3-12: Limits — Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16 A and ≤ 75 A per phase. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2011.
7. IEEE Std 519-2022. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022.
8. IEC 60364-5-52:2009+AMD1:2024 CSV. Low-voltage electrical installations — Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment — Wiring systems. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2024.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Гогін В.В.				Список використаних джерел	Літ.	Арк.
Перевірів	Пересунько І.						Акрушів
Н. Контр.	Пересунько І.					65	4
Затвердж.	Пересунько І.					КНУ гр. ЕЕМ-22-2	

9. IEC 60364-4-43:2023. Low-voltage electrical installations — Part 4-43: Protection for safety — Protection against overcurrent. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2023.

10. IEC 60364-5-53:2019. Low-voltage electrical installations — Part 5-53: Selection and erection of electrical equipment — Devices for protection for safety, isolation, switching, control and monitoring. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2019.

11. IEC 61642:1997. Industrial a.c. networks affected by harmonics — Application of filters and shunt capacitors. Geneva : International Electrotechnical Commission, 1997.

12. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2017. Затверджено наказом від 21.07.2017 № 476.

13. Про затвердження Кодексу систем розподілу : постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18> (дата звернення: 13.06.2026).

14. Якість електричної енергії. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг : вебсайт. URL: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi> (дата звернення: 13.06.2026).

15. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 16 с.

16. Dugan R. C., McGranaghan M. F., Santoso S., Beaty H. W. Electrical Power Systems Quality. 3rd ed. New York : McGraw-Hill Education, 2012. 580 p.

17. Bollen M. H. J. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. New York : IEEE Press ; Piscataway : Wiley-Interscience, 2000. 543 p.

18. Bollen M. H. J., Gu I. Y. H. Signal Processing of Power Quality Disturbances. Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2006. 861 p.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Arrillaga J., Watson N. R. Power System Harmonics. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2003. 412 p.
20. Sankaran C. Power Quality. Boca Raton : CRC Press, 2002. 202 p.
21. De La Rosa F. C. Harmonics and Power Systems. Boca Raton : CRC Press, 2006. 208 p.
22. Baghini A. Handbook of Power Quality. Chichester : John Wiley & Sons, 2008. 642 p.
23. Wakileh G. J. Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design. Berlin : Springer, 2001. 525 p.
24. Fuchs E. F., Masoum M. A. S. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines. 2nd ed. Amsterdam : Academic Press, 2015. 1138 p.
25. Ewald F. Fuchs, Mohammad A. S. Masoum. Power Conversion of Renewable Energy Systems. New York : Springer, 2011. 698 p.
26. Schneider Electric. Electrical Installation Guide: According to IEC International Standards. Schneider Electric, 2024. URL: <https://www.se.com/ww/en/work/products/product-launch/electrical-installation-guide/> (дата звернення: 13.06.2026).
27. Schneider Electric. Power Factor Correction and Harmonic Filtering. Electrical Installation Guide. URL: https://www.electrical-installation.org/enwiki/Power_Factor_Correction (дата звернення: 13.06.2026).
28. ABB. Technical Guide No. 6: Guide to Harmonics with AC Drives. ABB Drives, 2016. URL: https://library.e.abb.com/public/bc35ffb4386c4c039e3a8ec20cef89c5/Technical_guide_No_6_3AFE64292714_RevF_EN.pdf (дата звернення: 13.06.2026).
29. ABB. Power Factor Correction and Harmonic Filtering in Electrical Plants. ABB, 2010. URL: <https://library.e.abb.com/public/4704e67320c08992c1257870002e4700/1SDC007107G0202.pdf> (дата звернення: 13.06.2026).
30. Eaton. Power Factor Correction: A Guide for the Plant Engineer. Eaton, 2024. URL: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/low-voltage-power->

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

distribution-controls-systems/power-factor-corrections/portfolio/eaton-pfc-guide-plant-engineer-SA02607001E.pdf (дата звернення: 13.06.2026).

31. Eaton. Power Factor Capacitors and Detuned Filters: Consulting Application Guide. Eaton, 2015. URL: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/design-guides---consultant-audience/canada/cag/eaton-power-factor-capacitors-detuned-filters-consulting-application-guide-tb02608001e-tab-35-ca08104001e-ca.pdf> (дата звернення: 13.06.2026).

32. Memon Z. A., Uqaili M. A., Unar M. A. Harmonics Mitigation of Industrial Power System Using Passive Filters. arXiv. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1605.06684> (дата звернення: 13.06.2026).

33. Memon Z. A., Uqaili M. A., Unar M. A. Design of Three-Phase Hybrid Active Power Filter for Compensating the Harmonic Currents of Three-Phase System. arXiv. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1604.03223> (дата звернення: 13.06.2026).

34. Gligor A. Design and Simulation of a Shunt Active Filter in Application for Control of Harmonic Levels. arXiv. 2010. URL: <https://arxiv.org/abs/1002.4786> (дата звернення: 13.06.2026).

35. Akbari B., Pourtahmasbi F., Mokhtari H. An Analytical Strategy for Passive Harmonic Filter Placement in Transmission Systems with Stochastic Aggregate Load Models Considering Resonant Conditions. arXiv. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1911.07311> (дата звернення: 13.06.2026).

36. MathWorks. MATLAB Live Editor. MathWorks : вебсайт. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab/live-editor.html> (дата звернення: 13.06.2026).

37. MathWorks. Live Scripts and Functions. MATLAB Documentation. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/live-scripts-and-functions.html> (дата звернення: 13.06.2026).

38. MathWorks. Create Live Scripts in the Live Editor. MATLAB Documentation. URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_prog/create-live-scripts.html (дата звернення: 13.06.2026).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

39. MathWorks. Simscape Electrical Documentation. MathWorks : вебсайт.
URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/> (дата звернення: 13.06.2026).

40. MathWorks. Powergui Block. Simscape Electrical Documentation. URL:
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/powergui.html> (дата звернення:
13.06.2026).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248с-4	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		