

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

менеджменту

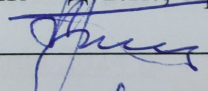
МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

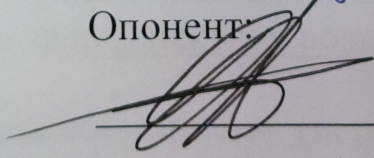
«Підвищення якості електроенергії в електричних мережах
комунального підприємства «Вінницька транспортна компанія»

Виконав: студент 2 курсу, гр. ЕСЕ-23м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Гарбузюка Р.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник д.т.н., професор каф. ЕСЕЕМ
 Бурбело М.Й.
(прізвище та ініціали)

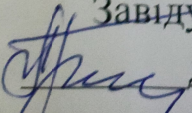
«16» грудня 2024 р.

Опонент:  Проченко А.І.
(прізвище та ініціали)

«16» грудня 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ЕСЕЕМ

 д.т.н., проф. Бурбело М.Й.
(прізвище та ініціали)

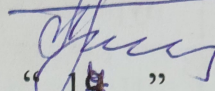
«16» грудня 2024 р.

Вінниця – 2024 року

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра Електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСЕМ

 проф. М. Й. Бурбело
"14" вересня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Гарбузюку Ростиславу Анатолійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення якості електроенергії в електричних мережах комунального підприємства «Вінницька транспортна компанія»

керівник роботи Бурбело Михайло Йосипович д.т.н., проф. каф. ЕСЕМ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «17» вересня 2024 р., № 310

2. Термін подання студентом роботи «10» грудня 2024 р.

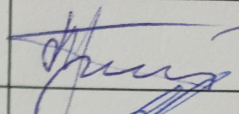
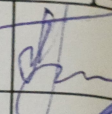
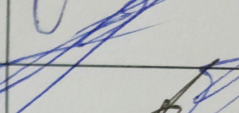
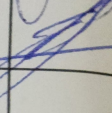
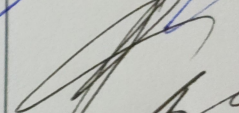
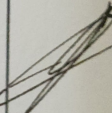
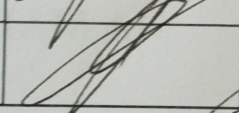
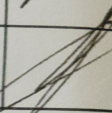
3. Вихідні дані до роботи Генплан підприємства; відомості про особливості технологічних процесів, відомості про електричні навантаження підприємства; відомості про джерела живлення та перспективу розвитку підприємства.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Характеристика споживачів підприємства. Аналіз використання фільтрокомпесуючих пристроїв для підвищення якості електроенергії. Моделювання використання фільтро-компенсуючого пристрою на підприємстві для досягнення підвищення якості електроенергії. Економічна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

План підприємства із силовими та живильними мережами. Основні економічні показники системи електропостачання. Загальний аналіз ф компенсуючих пристроїв. Порівняльний аналіз пристроїв підвищення електроенергії. Алгоритм роботи активного фільтра. Модель ПАФ в середовищі MATLAB. Моделювання основних режимів роботи ПАФ.

6. Консультанти розділів роботи

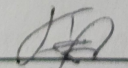
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	зав. при
Спеціальна частина	Бурбело М.Й., д.т.н., проф., каф. ЕСЕМ		
Економічна частина	Шулє Ю.А., к.т.н., доц., каф. ЕСЕМ		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Войтюк Ю.П., к.т.н., доц., каф. ЕСЕМ		
Нормконтроль	Войтюк Ю.П., к.т.н., доц., каф. ЕСЕМ		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

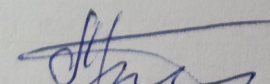
№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим
1	Характеристика підприємства та технологічного процесу	30.09.2024	Викон
2	Синтез зовнішньої СЕП	10.10.2024	Викон
3	Науково дослідна частина	25.10.2024	Викон
4	Синтез результатів наукової роботи	17.11.2024	Викон
5	Економічна частина	22.11.2024	Викон
6	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	29.11.2024	Викон
7	Графічна частина	4.12.2024	Викон

Студент


(підпис)

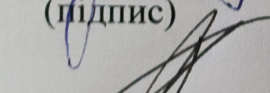
Гарбузюк Р.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи


(підпис)

Бурбело М.Й.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль


(підпис)

Войтюк Ю.П.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Гарбузюк Ростислав Анатолійович. Підвищення якості електроенергії в електричних мережах комунального підприємства «Вінницька транспортна компанія». МКР. Спеціальність 141 – Вінниця: ВНТУ, ФЕЕМ, кафедра ЕСЕЕМ, 2024 – 107 с.

В магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто питання щодо підвищення якості електроенергії в СЕП КП «ВТК».

Магістерська робота розроблена на основі фактичного матеріалу зібраного на даному підприємстві під час проходження переддипломної практики.

У першому розділі кваліфікаційної роботи розглядаються проектні рішення, як розрахунок навантажень підприємства, вибір кількості та потужності підстанцій, фідерних ліній, релейного захисту та автоматики.

В другому розділі проведений аналіз стану якості електричної енергії в СЕП підприємства. Встановлено що для підприємства характерним є наявність вищих гармонік які генерує тяговий електропривод. Проведений загальний аналіз пристроїв для зменшення вищих гармонік.

У третьому розділі розроблена науково-дослідна робота. Розроблена модернізовану математичну модель для дослідження можливості підвищення якості електроенергії за допомогою ПАФ в СЕП підприємства. Показано, що використання ПАФ для зменшення вищих гармонік є сучасним та ефективним підходом, який дозволяє забезпечити підвищення якості електроенергії в СЕП підприємства.

В четвертому розділі розраховано основні техніко-економічні показники для спроектованої СЕП.

У п'ятому розділі проаналізовано питання охорони праці.

Ключові слова: підстанція, якість електроенергії, електричні мережі, вищі гармоніки, активні фільтри.

ABSTRACT

Garbuzyuk Rostyslav Anatoliyovych. Improving the quality of electricity in the electrical networks of the municipal enterprise "Vinnytsia Transport Company". MTW. Specialty 141 - Vinnytsia: VNTU, FEEM, ESEEM department, 2024 - 107 p.

The master's qualification work considers the issue of improving the quality of electricity in the SEP of the enterprise "VTK".

The master's work is developed on the basis of actual material collected at this enterprise during the pre-diploma practice.

The first section of the qualification work considers design solutions, such as calculating the enterprise's loads, choosing the number and power of substations, feeder lines, relay protection and automation.

The second section analyzes the state of the quality of electricity in the SEP of the enterprise. It was established that the presence of higher harmonics generated by the traction electric drive is characteristic of the enterprise. A general analysis of devices for reducing higher harmonics was carried out.

In the third section, research work is developed. A modernized mathematical model has been developed to study the possibility of improving the quality of electricity using PAF in the SEP of the enterprise. It is shown that the use of PAF to reduce higher harmonics is a modern and effective approach that allows improving the quality of electricity in the SEP of the enterprise.

The fourth section calculates the main technical and economic indicators for the designed SEP.

The fifth section analyzes the issue of labor protection.

Keywords: substation, power quality, electrical networks, higher harmonics, active filters.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ХАРАКТЕРИСТИКА СПОЖИВАЧІВ ПІДПРИЄМСТВА.....	10
1.1 Характеристика підприємства	10
1.2 Розрахунок електричних навантажень підприємства	12
1.3 Проектування трансформаторних підстанцій.....	15
1.4 Вибір напруги зовнішньої лінії живлення.....	18
1.5 Техніко-економічне порівняння класів напруги живлення.....	19
1.6 Визначення оптимального перерізу ліній живлення.....	23
1.7 Перевірка вибраного електрообладнання 10 кВ.....	25
1.8 Релейний захист автомата.....	29
1.9 Висновки по розділу 1	32
2 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	33
2.1 Вплив вищих гармонік на якість електричної енергії.....	33
2.2 Загальний аналіз фільтро-компенсуючих пристроїв.....	36
2.3 Загальний аналіз активних фільтрів.....	40
2.4 Загальний аналіз послідовно-паралельного активного фільтра	42
2.5 Висновки по розділу 2	46
3 МОДЕЛЮВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРО-КОМПЕНСУЮЧОГО ПРИСТРОЮ НА ПІДПРИЄМСТВІ ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	47
3.1 Порівняльний аналіз фільтро-компенсуючих пристроїв для підвищення якості електроенергії	47
3.2 Алгоритм роботи активного фільтра	49
3.3 Моделювання роботи АФ	51
3.4 Висновки по розділу 3	57
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ.....	58
4.1 Розрахунок капіталовкладень в систему електропостачання	59
4.2 Розрахунок поточних витрат	61

4.2.1 Вибір системи освітлення	61
4.2.2 Розрахунок витрат по заробітній платі.....	63
4.2.3 Планування вартості матеріалів, що витрачаються	64
4.2.4 Визначення амортизаційних відрахувань і інших витрат	65
4.3 Розрахунок собівартості електроенергії	66
4.3.1 Розрахунок річного споживання і втрат електроенергії. Розрахунок оплати за електроенергію	66
4.3.2 Розрахунок собівартості електроенергії.....	69
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	71
5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта	72
5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць	72
5.1.2 Електробезпека.....	73
5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	76
5.2.1 Мікроклімат.....	76
5.2.2 Склад повітря робочої зони	76
5.2.3 Виробниче освітлення	77
5.2.4 Виробничий шум	78
5.2.5 Виробничі вібрації	80
5.2.6 Психофізичні фактори.....	81
5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи СЕП Жмеринський маслозавод в умовах надзвичайних ситуацій.....	83
5.3.1 Дослідження безпеки роботи СЕП КП «Вінницька транспортна компанія» в умовах впливу іонізуючих випромінювань	83
5.3.2 Дослідження безпеки роботи СЕП КП «Вінницька транспортна компанія» в умовах дії електромагнітного імпульсу	85
5.4 Розробка заходів по підвищенню безпеки роботи СЕП КП «Вінницька транспортна компанія» в умовах дії загрозливих чинників НС.....	86
5.5 Висновки по розділу 5	88
ВИСНОВКИ.....	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	91

Додаток А – Технічне завдання	96
Додаток Б – Вхідні дані для виконання кваліфікаційної роботи	99
Додаток В – Протокол перевірки текстових запозичень	100
Додаток Г – План підприємства із силовими та живильними мережами	101
Додаток Д – Основні техніко економічні показники системи електропостачання.	102
Додаток Є – Загальний аналіз фільтро-компенсуючих пристроїв	103
Додаток Ж – Порівняльний аналіз пристроїв підвищення якості електроенергії.....	104
Додаток З – Алгоритм роботи активного фільтра.....	105
Додаток К – Модель ПАФ в середовищі MATLAB	106
Додаток Л – Моделювання основних режимів роботи ПАФ	107

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність теми підвищення якості електроенергії в електричних мережах підприємств зумовлена зростанням потреби у стабільному та ефективному енергопостачанні для забезпечення надійної роботи обладнання, зниження втрат енергії та мінімізації впливу гармонійних спотворень. В умовах збільшення навантаження на електромережі та використання сучасних електронних пристроїв, чутливих до коливань напруги й частоти, поліпшення якості електроенергії сприяє зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню енергоефективності та продовженню терміну служби обладнання, що особливо важливо для стабільного функціонування підприємства для СЕП яких характерне погіршення якості електроенергії [1].

Незважаючи на широкі можливості активних фільтрів, їх практичне використання стримується через недостатнє дослідження енергетичної та економічної ефективності їх роботи у складі електротехнічного комплексу з нелінійними навантаженнями, високої вартості обладнання. У цьому зв'язку дана робота є актуальною.

Проблемам активної фільтрації присвячені праці вчених: І.В. Жежеленка, А.К. Шидловського, В.О. Волкова, Ю.К. Розанова, Г.Г. Жемерова, Zainal Salam, Tan Perng Cheng, J. Dixon, A. Moran, M. Salo, M. Gaiceanu, T.C. Green, J.H. Marks, G. Moleykutty, P.B. Kartik, R. Strzelecki, L. Czarnecky.

Мета і завдання дослідження. Метою магістерської роботи є розробка та оптимізація системи електропостачання промислового підприємства із застосуванням сучасних математичних моделей і засобів автоматизованого проектування. Дослідження спрямоване на підвищення ефективності проектування, покращення якості електричної енергії та зниження впливу вищих гармонік у системі електропостачання підприємства.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- забезпечити енергоефективність СЕП шляхом вибору оптимального класу напруги живлення та дотримання вимог надійності електропостачання;

- провести аналіз з метою оптимального вибору кількості, потужності трансформаторів;
- оцінити вплив вищих гармонік на якість електричної енергії та розробити заходи для їх мінімізації;
- створити рекомендації щодо покращення експлуатаційних характеристик системи електропостачання з урахуванням сучасних технічних і економічних вимог.

Об'єкт дослідження – СЕП КП «ВТК».

Предмет дослідження – підвищення якості електроенергії СЕП КП «ВТК» шляхом використання активних фільтрів для зменшення вищих гармонік.

Методи досліджень. У роботі використані загальноприйняті методи та засоби проведення розрахунку СЕП, які наведені в списку використаних джерел.

Наукова новизна. Основним результатом науково-дослідної роботи є розроблена модернізована математична модель для дослідження ефективності роботи ПАФ для досягнення підвищення якості електричної енергії шляхом зменшення вищих гармонік в СЕП підприємств. Результат моделювання використання ПАФ в СЕП КП «ВТК» показав, що ПАФ ефективно зменшує рівень вищих гармонік за рахунок генерації компенсаційного струму, який протидіє гармонікам, створеним нелінійними навантаженнями. Це досягається шляхом аналізу параметрів мережі в реальному часі та синхронного введення компенсаційного сигналу в мережу, що забезпечує згладжування форми струму та напруги. Як видно з результатів моделювання, після увімкнення АФ спостерігається значне зменшення амплітуд вищих гармонік у спектрі струму, що сприяє поліпшенню якості електроенергії, зниженню втрат в електромережі та стабільній роботі СЕП.

Практична цінність. Розроблено модель АФ в середовищі MatLAB, Simulink, яка дає змогу дослідити ефект від використання АФ.

Публікації, апробація.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА НАВАНТАЖЕНЬ ПІДПРИЄМСТВА

1.1 Характеристика підприємства

КП «Вінницька транспортна компанія» забезпечує транспортні перевезення у місті Вінниця. Основні види діяльності компанії – експлуатація трамваїв, тролейбусів та автобусів. Це підприємство має значну енергетичну інфраструктуру, пов'язану з експлуатацією електротранспорту.

Основне навантаження пов'язане з живленням трамваїв та тролейбусів, які споживають значну кількість електроенергії. Електроустановки забезпечують живлення тягових підстанцій, які перетворюють змінний струм у постійний для живлення електротранспорту.

Характер технологічних процесів КП «ВТК»:

- Експлуатація транспортних засобів, ремонт, технічне обслуговування рухомого складу;
- Підтримка тягових підстанцій та контактної мережі;
- Використання спеціалізованого обладнання, зокрема зварювальних установок, систем зарядки акумуляторів та іншого електроустаткування.

Відомості про трансформаторні підстанції наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Відомості про трансформаторні підстанції підприємства

№ ТП	Відстань км	P_n , кВт	S_p , кВА	Розташування
ТП-1	2,2	520	420	ДЕПО

Відомості про навантаження тягових підстанцій (ТПС) наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Відомості про електричні навантаження ТПС

№ ТПС	Відстань км	P_n , кВт	S_p , кВА	Розташування
ТП-2	2,15	540	460	ДЕПО
ТП-3	2,4	570	405	Зах. вокзал
ТП-4	1,6	620	425	ЦУМ

Додаткові дані про систему електропостачання підприємства:

Відстань від підприємства до живлячої підстанції енергосистеми «Південна» 110/35/10 кВ – 2,0 км.

Розрахункова потужність $S_p=1710$ кВА;

Час використання максимального навантаження $T_m=4000$ год/рік;

Час максимальних втрат складає $\tau_m= 2405,3$ год/рік;

Тариф за активну електроенергію:

на напрузі 10 кВ, $t= 6,649$ грн/кВт*год.

на напрузі 35 кВ, $t= 5,195$ грн/кВт*год.

Система електропостачання для КП «Вінницька транспортна компанія» повинна відповідати низці нормативних та технічних вимог, які забезпечують надійність, безпеку, якість електроенергії та енергоефективність.

Електричні навантаження ДЕПО подано у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Дані про електричне навантаження ДЕПО

№	Найменування	P_n , кВт
1	Продуктовий магазин	5,1
2	Столярний цех	38,5
3	Електроцех 1	41,0
4	Електроцех 2	25,6
5	Побутові приміщення	10,3
6	Управління ТТУ	40,0
7	Цех планового ремонту	87,2
8	Механічний цех	112,8
9	Цех технічного огляду	12,8
10	Механічна майстерня	75,4
11	Пилорама	12,3
12	Ділянка щоденних оглядів	7,7
13	Склад	1,5
14	Гараж	1,0
15	Шиномонтажний цех	7,7
16	Допоміжна будівля 1	30,8
17	Допоміжна будівля 2	10,3

На рисунку 1.1 показано генплан ДЕПО з розміщеними об'єктами проектування. Також окрім виробничих навантажень на території ДЕПО розміщена тягова підстанція ТП-2.

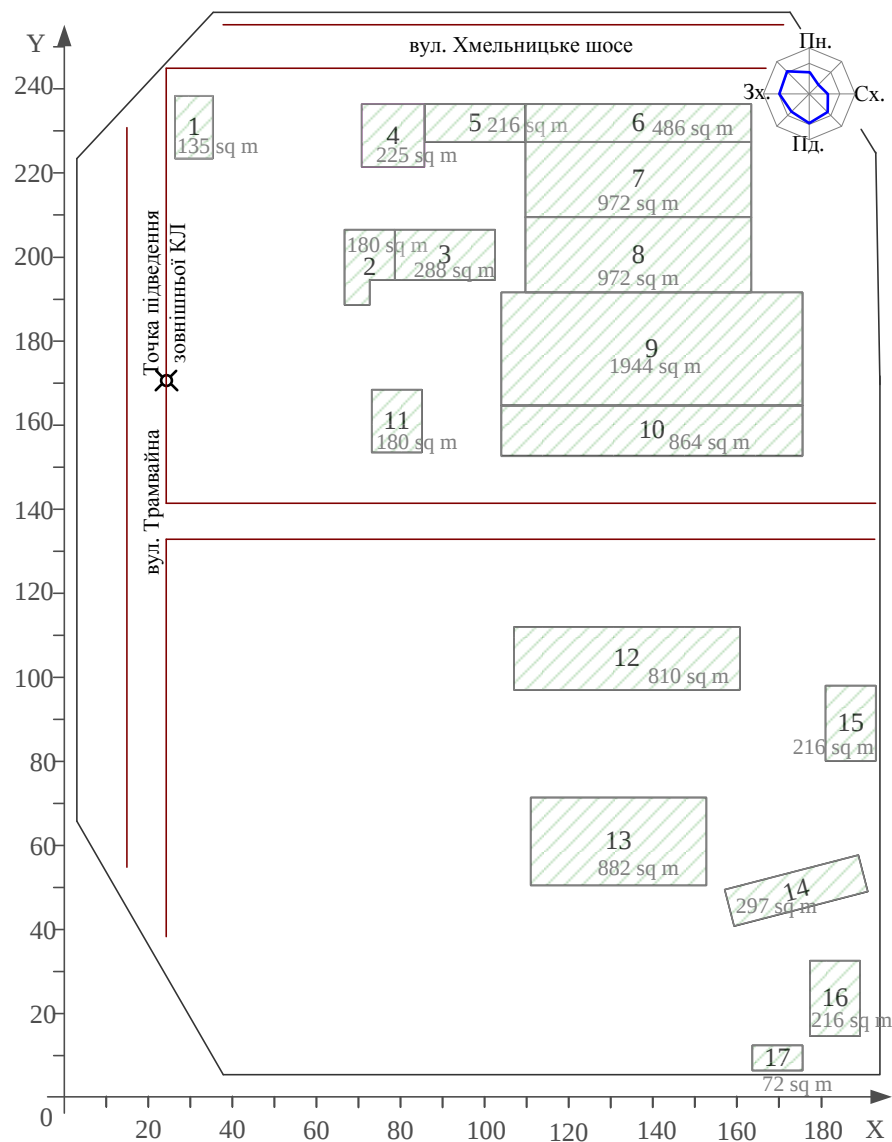


Рисунок 1.1 – Генплан ДЕПО

1.2 Розрахунок електричних навантажень підприємства

Для виконання розрахунку навантажень підприємства використовуємо формули наведені в таблиці 1.4, дані формули реалізують метод коефіцієнта використання k_v та попиту k_n [3]. В таблиці 1.4 також представлено приклад розрахунку для одного із цехів підприємства.

На рисунку 1.2 представлені розрахунки усіх об'єктів проектування. Даний розрахунок виконаний за допомогою автоматизованого розрахунку на робочому листі електронного процесора Excel.

Таблиця 1.4 – Приклад розрахунку навантажень для Складального цеху

Назва параметра	Формула	Електроцех №1 (№3 на генплані)
Коефіцієнт реактивної потужності	$\operatorname{tg}(\varphi) = \operatorname{tg}(\arg \cos(\varphi))$	$\operatorname{tg}(\varphi) = \operatorname{tg}(\arg \cos(0,65)) = 1,17$
Розрахункова активна потужність освітлення, кВт	$P_{po} = F \cdot k_{по} \cdot k_{пра} \cdot P_{пито}$	$P_{po} = 288 \cdot 0,7 \cdot 1,2 \cdot 0,014 = 3,39$
Розрахункова реактивна потужність освітлення, квар	$Q_{po} = P_{po} \cdot \operatorname{tg}(\varphi)$	$Q_{po} = 3,39 \cdot \operatorname{tg}(0,43) = 1,46$
Середня активна потужність, кВт	$P_c = k_b \cdot P_n + P_{po}$	$P_c = 0,31 \cdot 41 + 3,39 = 16,1$
Середня реактивна потужність, квар	$Q_c = k_b \cdot P_n \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + Q_{po}$	$Q_c = 0,31 \cdot 41 \cdot 1,17 + 1,46 = 16,32$
Середня повна потужність, кВА	$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2}$	$S_c = \sqrt{16,1^2 + 16,32^2} = 22,9$
Розрахункова активна потужність, кВт	$P_p = k_n \cdot P_n + P_{po}$	$P_p = 0,36 \cdot 41 + 3,39 = 18,15$
Розрахункова реактивна потужність, квар	$Q_p = k_n \cdot P_n \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + Q_{po}$	$Q_p = 0,36 \cdot 41 \cdot 1,17 + 1,46 = 18,71$
Розрахункова повна потужність, кВА	$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}$	$S_p = \sqrt{18,15^2 + 18,71^2} = 26,1$
Розрахунковий струм, А	$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U}$	$I_p = \frac{26,1}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 39,6$
Питома густина навантажень, кВА/м ²	$\rho = \frac{S_p}{F}$	$\rho = \frac{26,1}{288} = 0,09$
Сумарна середня активна потужність, кВт	$P_{c\Sigma} = \sum_1^N P_c$	$P_{c\Sigma} = 328,45$
Сумарна середня реактивна потужність, квар	$Q_{c\Sigma} = \sum_1^N Q_c$	$Q_{c\Sigma} = 234,52$
Сумарна середня повна потужність, кВА	$S_{c\Sigma} = \sqrt{P_{c\Sigma}^2 + Q_{c\Sigma}^2}$	$S_{c\Sigma} = \sqrt{328,45^2 + 234,52^2} = 403,58$
Сумарна розрахункова активна потужність освітлення, кВт	$P_{po\Sigma} = \sum_1^N P_{po}$	$P_{po\Sigma} = 118,73$
Сумарна розрахункова реактивна потужність освітлення, квар	$Q_{po\Sigma} = \sum_1^N Q_{po}$	$Q_{po\Sigma} = 51,06$
Сумарна розрахункова активна потужність, кВт	$P_{p\Sigma} = k_o \cdot \sum_1^N k_n \cdot P_n + P_{po\Sigma}$	$P_{p\Sigma} = 341,26$
Сумарна розрахункова реактивна потужність, квар	$Q_{p\Sigma} = k_o \cdot \sum_1^N P_n \cdot K_n \cdot \operatorname{tg} + Q_{po\Sigma}$	$Q_{p\Sigma} = 245,26$
Сумарна розрахункова повна потужність, кВА	$S_{p\Sigma} = \sqrt{P_{p\Sigma}^2 + Q_{p\Sigma}^2}$	$S_{p\Sigma} = \sqrt{341,26^2 + 245,26^2} = 420,25$
Сумарна питома густина навантажень, кВА/м ²	$\rho_\Sigma = \frac{S_{p\Sigma}}{F_\Sigma}$	$\rho_\Sigma = \frac{420,25}{8955} = 0,05$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	Світло																					
2	№	Цех	Рн, кВт	cos	tg	Кп	Кв	Площа, м ²	Кл0	Рплг, Вт/м ²	Кпра	tg0	Qm0, квар	Рр0, кВт	Рс, кВт	Qс, квар	Sc, кВА	Рр, кВт	Qр, квар	Sp, кВА	Ко=	
3	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
4	1	Продуктовий магазин	5,1	0,85	0,62	0,5	0,45	135	0,9	0,016	1,2	0,43	1,00	2,33	4,63	2,43	5,22	4,88	2,58	5,52	8,39	0,95
5	2	Столярний цех	38,5	0,75	0,88	0,4	0,45	180	0,8	0,013	1,2	0,43	0,97	2,25	19,57	16,25	25,44	17,65	14,55	22,87	34,75	0,13
6	3	Електроцех 1	41	0,65	1,17	0,36	0,31	288	0,7	0,014	1,2	0,43	1,46	3,39	16,10	16,32	22,92	18,15	18,71	26,07	39,60	0,09
7	4	Електроцех 2	25,6	0,65	1,17	0,34	0,31	225	0,7	0,014	1,2	0,43	1,14	2,65	10,58	10,42	14,85	11,35	11,31	16,03	24,35	0,07
8	5	Побутові приміщення	10,3	0,85	0,62	0,5	0,45	216	0,9	0,016	1,2	0,43	1,60	3,73	8,37	4,48	9,49	8,88	4,80	10,09	15,34	0,05
9	6	Управління ТТУ	40	0,85	0,62	0,42	0,36	486	0,9	0,016	1,2	0,43	3,61	8,40	22,80	12,54	26,02	25,20	14,02	28,84	43,81	0,06
10	7	Цех планового ремонту	87,2	0,8	0,75	0,45	0,36	972	0,8	0,014	1,2	0,43	5,62	13,06	44,46	29,16	53,17	52,30	35,05	62,96	95,66	0,06
11	8	Механічний цех	112,8	0,7	1,02	0,42	0,37	972	0,7	0,013	1,2	0,43	4,56	10,61	52,35	47,14	70,45	57,99	52,90	78,49	119,26	0,08
12	9	Цех технічного огляду	12,8	0,8	0,75	0,45	0,41	1944	0,8	0,014	1,2	0,43	11,23	26,13	31,38	15,17	34,85	31,89	15,55	35,48	53,90	0,02
13	10	Механічна майстерня	75,4	0,7	0,75	0,5	0,46	864	0,8	0,014	1,2	0,43	4,99	11,61	46,30	31,01	55,72	49,31	33,27	59,48	90,38	0,07
14	11	Пилорама	12,3	0,65	1,17	0,54	0,51	180	0,8	0,014	1,2	0,43	1,04	2,42	8,69	8,37	12,07	9,06	8,81	12,64	19,20	0,07
15	12	Ділянка щоденних оглядів	7,7	0,85	0,62	0,5	0,45	810	0,9	0,016	1,2	0,43	6,02	14,00	17,46	8,17	19,28	17,85	8,40	19,73	29,97	0,02
16	13	Склад	1,5	0,8	0,75	0,35	0,3	882	0,7	0,012	1,2	0,43	3,82	8,89	9,34	4,16	10,23	9,42	4,22	10,32	15,67	0,01
17	14	Гараж	1	0,8	0,75	0,35	0,3	297	0,7	0,012	1,2	0,43	1,29	2,99	3,29	1,51	3,62	3,34	1,55	3,69	5,60	0,01
18	15	Шинномонтажний цех	7,7	0,65	1,17	0,5	0,46	216	0,8	0,014	1,2	0,43	1,25	2,90	6,45	5,39	8,40	6,75	5,75	8,87	13,48	0,04
19	16	Допоміжна будівля 1	30,8	0,7	0,88	0,63	0,57	216	0,75	0,013	1,2	0,43	1,09	2,53	20,08	16,57	26,04	21,93	18,20	28,50	43,30	0,13
20	17	Допоміжна будівля 2	10,3	0,75	0,88	0,6	0,56	72	0,75	0,013	1,2	0,43	0,36	0,84	6,61	5,45	8,57	7,02	5,81	9,12	13,85	0,13
21	Всього по підприємству		520					8955					51,06	118,73	328,45	234,52	403,58	341,26	245,26	420,25	638,51	0,05

Рисунок 1.2 - Розрахунок навантаження

1.3 Проектування трансформаторних підстанцій

При виборі трансформаторної підстанції (ТП) для живлення окремої групи споживачів підприємства слід дотримуватися наступних вимог [3]:

- показником ефективності при виборі ЦРП повинна бути річна приведена вартість витрат;
- стандартна потужність обраних трансформаторів не повинна перевищувати дві величини потужності (максимум три).

Беручи до уваги особливості підприємства, навантаження розподіляється між ЦТП оптимальним чином результат такого розподілу представлено на рисунку 1.3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	№ ТП	№ цеху	Назва цеху	Розрахункова активна потужність P_p , кВт	Розрахункова реактивна потужність Q_p , кВАр	Повна розрахункова потужність S_p , кВА	Середня активна потужність P_c , кВт	Середня реактивна потужність Q_c , кВАр	Повна середня потужність S_c , кВА
1									
2		1	Продуктовий магазин	4,883	2,583	5,524	4,628	2,425	5,225
3		2	Столярний цех	17,646	14,547	22,870	19,571	16,245	25,435
4		3	Електроцех 1	18,147	18,713	26,067	16,097	16,316	22,920
5		4	Електроцех 2	11,350	11,314	16,026	10,582	10,416	14,848
6		5	Побутові приміщення	8,882	4,797	10,095	8,367	4,477	9,490
7		6	Управління ТТУ	25,198	14,023	28,837	22,798	12,535	26,017
8		7	Цех планового ремонту	52,304	35,047	62,960	44,456	29,161	53,167
9		8	Механічний цех	57,990	52,897	78,492	52,350	47,143	70,449
10		9	Цех технічного огляду	31,887	15,555	35,479	31,375	15,171	34,851
11		10	Механічна майстерня	49,312	33,268	59,485	46,296	31,006	55,720
12		11	Пилорама	9,061	8,806	12,635	8,692	8,374	12,070
13		12	Ділянка щоденних оглядів	17,847	8,405	19,727	17,462	8,166	19,277
14		13	Склад	9,416	4,217	10,317	9,341	4,160	10,225
15		14	Гараж	3,344	1,550	3,685	3,294	1,512	3,624
16		15	Шинномонтажний цех	6,753	5,749	8,869	6,445	5,389	8,401
17		16	Допоміжна будівля 1	21,931	18,199	28,499	20,083	16,570	26,036
18		17	Допоміжна будівля 2	7,022	5,812	9,116	6,610	5,449	8,567
19			Всього по ТП1	352,974	255,483	435,732	328,448	234,518	403,580

Рисунок 1.3 - Розподіл споживачів підприємства між двома ЦТП

Електронний процесор EXCEL використовується для автоматичного вирішення завдання вибору джерела живлення трансформатора відповідно до наступних даних:

- 1) нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень $E_e=0,1$;
- 2) величина коефіцієнта амортизації $E_a=0,066$;
- 3) коефіцієнт навантаження в нормальному режимі:
 - річна температура для Вінницької області $\theta=10,7^\circ\text{C}$;
 - значення ефективної температури: $\theta_e = \theta + \Delta\theta = 10,7 + 6 = 16,7^\circ\text{C}$;

- коефіцієнт навантаження для нормального режиму роботи: $k_H=1$.

4) коефіцієнт навантаження в післяаварійному режимі роботи.

Максимальна температура навколишнього середовища $\approx 30^\circ\text{C}$;

Коефіцієнт навантаження для післяаварійного режиму роботи $k_{\text{па}}=1,3$.

5) допускається відключити 10% навантаження споживачів, тому коефіцієнт $k_{\text{нпа}}=0,9$ для післяаварійного режиму роботи.

Усі необхідні формули для побудови математичної моделі вибору потужності трансформаторів наведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 Формули для автоматичного вибору потужності трансформаторів

Назва параметра	Формула
Річні приведені затрати в ТП, грн	$3(S_T) = B_{\text{ТП}}(S_{\text{ТП}}) + B_B(S_{\text{ТП}});$ $3(S_T) = (E_a + E_e) \cdot k_{\text{ТП}}(S_T, k_T) + [\Delta P_{\text{XX}}(S_T) + \Delta P_{\text{КЗ}}(S_T) \cdot k_3^2] \cdot k_T \cdot B_0$
Вартість річних втрат електроенергії, грн	$B_B(S_T) = [\Delta P_{\text{XX}}(S_T) + \Delta P_{\text{КЗ}}(S_T) \cdot k_3^2] \cdot k_T \cdot B_0$
Річна приведена вартість капіталовкладень, грн	$B_{\text{ТП}}(S_{\text{ТП}}) = (E_a + E_e) \cdot k_{\text{ТП}}(S_T, k_T)$
Обмеження, які накладаються на керовану зміну	$S_T \cdot k_T \cdot k_H \geq S_{\text{ТП}};$ $k_T > 1 \Rightarrow S_T \cdot k_{\text{па}} \geq S_{\text{ТП}} \cdot k_{\text{нпа}}$
Втрати активної потужності, кВт	$\Delta P_{\text{тр}} = n \cdot \Delta P_{\text{XX}} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\text{КЗ}} \cdot \left(\frac{S_p}{S_{\text{ном.тр}}} \right)^2$
Втрати реактивної потужності, квар	$\Delta Q_{\text{тр}} = n \cdot \frac{I_{\text{XX}}}{100} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{U_{\text{КЗ}}}{100} \cdot \left(\frac{S_p}{S_{\text{ном.тр}}} \right)^2$

Таблична форма за допомогою якої здійснюється автоматизований вибір найбільш економічної потужності цехової ТП згідно математичної моделі, яка наводиться в таблиці 1.3 представлена на рисунку 1.5.

Результат автоматизованого вибору являється проектне рішення по застосуванню для ТП 1 комплектних ТП з трансформатором 630кВА [8].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Вибір оптимальної потужності ТП1 за мінімумом затрат														
2	Дані нормального режиму														
3	Розрахункова потужність ТП, кВА										Sp=	435,732			
4	Середня потужність ТП, кВА										Sc=	403,58			
5	Кількість трансформаторів										kt=	1			
6	Допустимий коефіцієнт навантаження в нормальному режимі										kn=	1			
7	Дані післяаварійного режиму														
8	Допустимий коефіцієнт навантаження післяаварійному режимі										kpa=				
9	Доля навантаження в п.а. режимі										knpa=				
10	Економічні характеристики														
11	Питома вартість втрат, грн/кВт										Bo=	8661,61			
12	Коефіцієнт ефективності капіталовкладень										Ee=	0,1			
13	Коефіцієнт відрахувань на амортизацію										Ea=	0,036			
14															
	*	St, кВА	dPкз, кВт	dPxx, кВт	Kтп, тис. грн.	E*K, тис. грн.	dPзм, кВт	dPпс, кВт	dP, кВт	Vв, тис. грн.	З, тис. грн.	*	X	обмеж. 1	обмеж. 2
15															
16		63	1,28	0,24	86,11	11,711	61,2304	0,24	61,4704	532,433	---		---	---	+
17		100	1,97	0,33	113,36	15,417	37,4028	0,33	37,7328	326,827	---		---	---	+
18		160	3,1	0,51	136,795	18,6041	22,9911	0,51	23,5011	203,557	---		---	---	+
19		250	4,2	0,74	215,082	29,2512	12,7587	0,74	13,4987	116,921	---		---	---	+
20		400	5,9	0,95	240,781	32,7462	7,00117	0,95	7,95117	68,8699	---		---	---	+
21	V	630	8,5	1,31	325,561	44,2763	4,06608	1,31	5,37608	46,5655	90,8418	V	+	+	+
22		1000	10,5	2,1	472,777	64,2976	1,99355	2,1	4,09355	35,4567	99,7544		+	+	+
23		1600	18	2,8	605,855	82,3962	1,33497	2,8	4,13497	35,8155	118,212		+	+	+
24		2500	23,5	3,85	697,382	94,844	0,71388	3,85	4,56388	39,5306	134,375		+	+	+
25										Змін=	90,8418				
26									Опт. Пот. Трансформатора	St*=	630				

Рисунок 1.5 – Вибір потужності ТП1

В таблиці 1.6 представлені результати вибору оптимальної потужності ТП.

Таблиця 1.6 – Оптимальні потужності трансформаторних підстанцій

№ ТПС	Марка ТП	P _н , кВт	S _p , кВА	Розташування
ТП-1	ТМ-630	520	420	ДЕПО
ТП-2	ТМ-630	540	460	ДЕПО
ТП-3	ТМ-630	570	405	Зах. вокзал
ТП-4	ТМ-630	620	425	ЦУМ

Проектування або модернізація схеми електропостачання на етапі капітального ремонту передбачає створення надійної та економічно вигідної конфігурації, яка забезпечує ефективну передачу електроенергії від джерела до вузла споживання. Особливу увагу приділяють вибору класу напруги живлення, оскільки правильний підбір дозволяє оптимізувати баланс реактивної потужності та звести до мінімуму втрати електроенергії.

1.4 Вибір напруги зовнішньої лінії живлення

Розрахунок та вибір класу напруги зі стандартного ряду можливих величин напруг для здійснення живлення елементів електричної мережі слід віднести до технічних і економічних завдань, які необхідно вирішувати на стадії проектування паралельно з вибором конфігурації схем електропостачання на основі порівняння можливих варіантів. Результатом рішення даної задачі буде схема живлення з найбільш оптимальними параметрами [4].

Для визначення оптимального класу напруги живлення для параметрів СЕП, таких як необхідний об'єм спожитої потужності і відстань до живильної підстанції, рекомендується використовувати наступну формулу:

$$U_{\text{ек}} = 4,34\sqrt{L + 16 \cdot P_p} ; \quad (1.1)$$

Дана формула використовується у випадках коли параметри підприємства належать даним обмеженням, а саме довжина лінії живлення не більше $L \leq 250$ км, а необхідна потужність не більше $P_p \leq 60$ МВт [4].

Отже визначаємо оптимальне значення напруги живлення для параметрів даного підприємства:

$$U_{\text{ек}} = 4,34\sqrt{2 + 16 \cdot 0,34} = 11,85 \text{ (кВ)}.$$

Під час розрахунку напруги за даною формулою отримується нестандартне значення. Для подальших розрахунків приймаються більші та менші стандартні напруги, що найближче відповідають розрахованому значенню. Розрахунки виконуються для всіх обраних варіантів стандартних напруг.

Враховуючи відомі рівні напруги на підстанціях енергосистеми, розташованих поблизу підприємства, а також визначене оптимальне значення нестандартної напруги, для подальшого техніко-економічного аналізу обираються два варіанти схеми зовнішнього електропостачання зі стандартними напругами 10 кВ і 35 кВ.

1.5 Техніко-економічне порівняння класів напруги живлення

Попередній розрахунок показав що доцільно використати альтернативні напруги рисунок 1.6: а) напругою 35 кВ, шляхом заміни існуючих трансформаторів ТМ-630/10 на ТМ-630/35 кВ та прокладання нових кабельних ліній; б) напругою 10 кВ шляхом прокладання нових кабельних ліній.

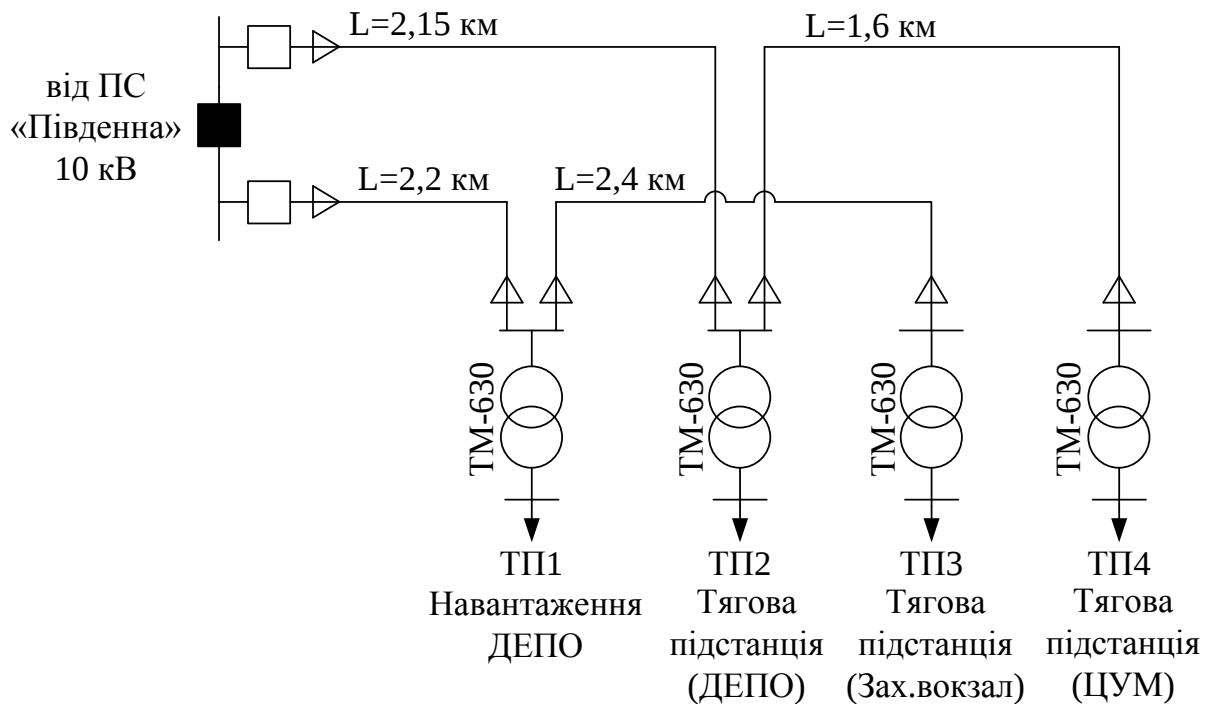


Рисунок 1.6 – Схеми живлення підприємства

Визначаємо розрахунковий струм ліній живлення для нормального режиму роботи:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} \text{ (A);} \quad (1.2)$$

Для лінії ТП1:

$$I_{p35} = \frac{S_{pТП1} + S_{pТП3}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} = \frac{420 + 405}{\sqrt{3} \cdot 35} = 13,6 \text{ (A);}$$

$$I_{p10} = \frac{420 + 405}{\sqrt{3} \cdot 10} = 47,6 \text{ (A);}$$

Для лінії ТП2:

$$I_{p35} = \frac{S_{pТП2} + S_{pТП4}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{460 + 425}{\sqrt{3} \cdot 35} = 14,7 \text{ (A)};$$

$$I_{p10} = \frac{460 + 425}{\sqrt{3} \cdot 10} = 51,1 \text{ (A)};$$

Для лінії ТП3:

$$I_{p35} = \frac{S_{pТП3}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{405}{\sqrt{3} \cdot 35} = 6,7 \text{ (A)};$$

$$I_{p10} = \frac{405}{\sqrt{3} \cdot 10} = 23,4 \text{ (A)};$$

Для лінії ТП4:

$$I_{p35} = \frac{S_{pТП4}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{425}{\sqrt{3} \cdot 35} = 7,1 \text{ (A)};$$

$$I_{p10} = \frac{425}{\sqrt{3} \cdot 10} = 24,5 \text{ (A)};$$

Для ТМ-630:

$$I_{p35} = \frac{1,4 \cdot S_{н.ТП}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{1,4 \cdot 630}{\sqrt{3} \cdot 35} = 14,5 \text{ (A)};$$

$$I_{p10} = \frac{1,4 \cdot 630}{\sqrt{3} \cdot 10} = 50,9 \text{ (A)};$$

У сучасній практиці пріоритетним є використання кабельних ліній із зшитого поліетилену (ЗПЕ), які мають високі експлуатаційні характеристики, включаючи стійкість до підвищених навантажень, тривалий термін служби та низькі втрати енергії. Для досягнення максимальної ефективності проектування враховуються стандарти напруги (наприклад, 10 кВ, 35 кВ або вище) залежно від потреб об'єкта та специфіки енергосистеми. Оптимізація вибору кабельних ліній із ЗПЕ та класу напруги дозволяє досягти балансу між економічністю, надійністю та довговічністю системи електропостачання.

В якості кабельної лінії 10 кВ приймаємо кабель з ізоляцією з шитого поліетилену типу АПвЭгаПу-10 3×35 так, як даний переріз являється мінімальним для даного класу напруги [6], допустимий струм при прокладанні у землі 119 А.

В якості кабельної лінії 35 кВ приймаємо кабель з ізоляцією з шитого поліетилену типу АПвЭгаПу-35 3х50 так, як даний переріз являється мінімальним для даного класу напруги, допустимий струм при прокладанні у землі 140 А.

Навантажувальні втрати активної електричної енергії визначають як добуток втрат активної потужності в максимальному режимі навантаження ΔP_m на час максимальних втрат τ :

$$\Delta W_a = \Delta P_m \cdot \tau = 3I_m^2 R_c \cdot 10^{-3} \cdot \tau \text{ (кВт·год/рік);} \quad (1.3)$$

де T_M – час використання максимального навантаження ($T_M = W/P_M$, тут W – кількість спожитої енергії);

Вартість втрат електроенергії в ЛЕП:

$$\begin{aligned} C_{\Delta W_{10}} = & 3 \cdot 47,6^2 \cdot 0,868 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 2405,3 \cdot 6,649 + \\ & + 3 \cdot 51,1^2 \cdot 0,868 \cdot 2,15 \cdot 10^{-6} \cdot 2405,3 \cdot 6,649 + \\ & + 3 \cdot 23,4^2 \cdot 0,868 \cdot 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2405,3 \cdot 6,649 + \\ & + 3 \cdot 24,5^2 \cdot 0,868 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 2405,3 \cdot 6,649 = 536,11 \text{ (тис.грн. / рік);} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\Delta W_{10}} = & 3 \cdot 13,6^2 \cdot 0,868 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 2405,3 \cdot 6,649 + \\ & + 3 \cdot 14,7^2 \cdot 0,868 \cdot 2,15 \cdot 10^{-6} \cdot 2405,3 \cdot 6,649 + \\ & + 3 \cdot 6,7^2 \cdot 0,868 \cdot 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2405,3 \cdot 6,649 + \\ & + 3 \cdot 7,1^2 \cdot 0,868 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 2405,3 \cdot 6,649 = 44,14 \text{ (тис.грн. / рік).} \end{aligned}$$

Результати розрахунку капітальних вкладень для двох варіантів електропостачання наведені в табл. 1.7, а щорічних витрат – в табл. 1.8.

Таблиця 1.7– Розрахунок капітальних вкладень

Перелік елементів схем	Вартість	10 кВ		35 кВ	
		Кількість	Вартість	Кількість	Вартість
Лінії електропередавання, км	тис.грн. за 1 км КЛ	км	тис.грн.	км	тис.грн.
КЛ 10 кВ АПвЭгаПу 3×35	419,00	8,35	3498,65		
КЛ 35 кВ АПвЭгаПу 3×50	592,20			9,85	5833,15
ВСЬОГО по лініях			3498,65		5833,15
Підстанції	тис.грн. за одиницю ПС.	штук	тис.грн.	штук	тис.грн.
Спорудження ТП 35 кВ 630 кВ*А	462			4	1848
ВСЬОГО по ПС			0		1848
ВСЬОГО			3498,65		7681,15

Таблиця 1.8 – Розрахунок щорічних витрат

Перелік поточних витрат	Варіанти	
	10 кВ	35 кВ
Щорічні витрати на технічне обслуговування і ремонт, в тому числі:		
ПЛ – 35 кВ, 1,2% від К		70,00
ПЛ 10 кВ, 3,8% від К	83,97	
ПС 35 кВ, 2,4% від К		44,35
ПС 10 кВ, 4,3% від К	150,44	
Всього щорічні витрати на обслуговування, ВО тис.грн.	234,41	114,35
Амортизація, в тому числі:		
ПЛ – 35 кВ, 2% від К		116,66
ПЛ 10 кВ, 3% від К	69,97	
ПС 35 кВ, 3,6% від К		276,52
ПС 10 кВ, 3,6% від К	125,95	
Всього щорічні витрати на амортизацію, Ва тис.грн.	195,92	393,18
Тариф на ЕЕ, грн./кВт*год	6,649	5,195
Вартість втрат електроенергії в ЛЕП, ВΔW тис.грн.	536,11	44,14
ВСЬОГО щорічні витрати (В) тис.грн.	966,44	551,67

Зведені річні витрати доцільно визначати за допомогою формул:

$$З = E_n \cdot K + B; \quad (1.4)$$

де E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень ($E_n = 0,1$ [5]);
 K – капітальні вкладення; B – щорічні поточні витрати на експлуатацію СЕП.

З урахуванням різниці цін на електроенергію ($4,899 - 3,448 = 1,451$ грн./кВт·год.) різниця в оплаті за спожиту електроенергію складає $1,451 \cdot 1368 \cdot 4000 = 7956,28 \cdot 10^3$ тис.грн., а зведені річні витрати складають:

$$З_{10} = 0,1 \cdot 3498,65 + 966,44 + 7956,28 = 9272,6 \text{ (тис.грн.)};$$

$$З_{35} = 0,1 \cdot 7681,15 + 551,67 = 1319,79 \text{ (тис.грн.)};$$

Термін окупності додаткових капіталовкладень буде складати:

$$T_{ок} = \frac{K_2 - K_1}{B_1 - B_2} = \frac{7681,15 - 3498,65}{(966,44 + 7956,28) - 551,67} = 0,5 \text{ (років)}. \quad (1.5)$$

Отже, додаткові капітальні вкладення за другим варіантом будуть окуплені протягом 0,5 років.

Згідно розрахунків вигіднішим є варіант 35 кВ. Але оскільки система електропостачання має бути реалізоване в забудові міста Вінниця, де наявні діючі підстанції 10 кВ приймаємо рішення, що живлення підприємства буде здійснюватися на напрузі 10 кВ.

1.6 Визначення оптимального перерізу лінії живлення

В умовах ринкових відносин, щоб запобігти значним фінансовим втратам, до розподільних кабельних мереж пред'являють головні вимоги: надійність та низькі витрати на експлуатацію. Одним із заходів підвищення надійності є заміна традиційних кабелів із просоченою паперовою ізоляцією (КП) на кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену (ЗПЕ).

Розрахунковий струм для нормального і післяаварійного режимів:

$$I_p = \frac{S_p / n}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}; \quad (1.6)$$

$$I_{\text{max}} = \frac{1,4 \cdot S_{\text{н.т}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}; \quad (1.7)$$

$$\text{Для лінії ТП1:} \quad I_{p10} = \frac{420 + 405}{\sqrt{3} \cdot 10} = 47,6 \text{ (А)};$$

$$\text{Для лінії ТП2:} \quad I_{p10} = \frac{460 + 425}{\sqrt{3} \cdot 10} = 51,1 \text{ (А)};$$

$$\text{Для лінії ТП3:} \quad I_{p10} = \frac{405}{\sqrt{3} \cdot 10} = 23,4 \text{ (А)};$$

$$\text{Для лінії ТП4:} \quad I_{p10} = \frac{425}{\sqrt{3} \cdot 10} = 24,5 \text{ (А)};$$

$$\text{Для ТМ-630:} \quad I_{p10} = \frac{1,4 \cdot 630}{\sqrt{3} \cdot 10} = 50,9 \text{ (А)};$$

В якості кабельної лінії 10 кВ приймаємо кабель з ізоляцією з шитого поліетилену типу АПвЭгаПу-10 3×35 так, як даний переріз являється мінімальним для даного класу напруги [6], допустимий струм при прокладанні у землі складає 119 А. На рисунку 1.7 представлено зовнішній вигляд та опис конструкції кабелю АПвЭгаПу-10 3×35.

Перевірка допустимого нагрівання кабелів із зшитого ПЕ виконується для нормального та післяаварійного режимів з урахування умов прокладки:

$$I_p \leq k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot I_{\text{доп}}; \quad (1.8)$$

$$I_{p.\text{па}} \leq \alpha \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot I_{\text{доп}}; \quad (1.9)$$

де k_1 - коефіцієнт, що характеризує температуру навколишнього середовища;

k_2 - коефіцієнт, що характеризує глибину прокладення кабелів в землі;

k_3 - коефіцієнт, що характеризує питомий термічний опір ґрунту;

k_4 - коефіцієнт враховує кількість паралельно прокладених кабелів в землі;

k_5 - коефіцієнт враховує кількість паралельно прокладених кабелів в повітрі;

k_6 - коефіцієнт, що характеризує вплив перерізу екрана.

АПвЭгаПу-10 3х35 ТУ У 31.3-00214534-017-2003 Кабелі силові з алюмінієвими СПЖ, ізоляцією зі зшитого поліетилену, поздовжньою та поперечною герметизацією екрану та посиленою зовнішньою оболонкою з поліетилену			
ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ:			
Номінальна напруга	кВ		10
Максимальна напруга	кВ		12
Число та номінальний перетин струмопровідних жил	мм ²		3 х 35
Товщина ізоляції	мм		3,4
Мінімальний перетин екрану	мм ²		16
Допустимий струм короткого замикання по екрану мінімального перетину	кА		3,3
Максимально допустимий струм короткого замикання по струмопровідній жилі	кА		3,3
Тривало допустимі струмові навантаження *			
• при прокладанні у повітрі	А		132
• при прокладанні в ґрунті	А		119
Рівень часткових розрядів при номінальній напрузі, не більше	рС		6
Максимально допустима температура жили			
• тривало	° С		+90
• в аварійному режимі	° С		+130
• при короткому замиканні	° С		+250
Діапазон робочих температур	° С		-60 ... +50
Мінімальний радіус вигину при прокладанні	мм		816
Розрахунковий зовнішній діаметр кабелю (довідково)**	мм		51
Маса (орієнтовно)	кг/км		2440

Рисунок 1.7 – Конструкція кабелю АПвЭгаПу-10 3×35

Проводимо перевірку кабелю для лінії яка живить ТП 2, так як по ній протікає самий високий струм:

$$51,1 \text{ (А)} \leq 1 \cdot 0,98 \cdot 1,16 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 119 = 103,7 \text{ (А)}.$$

Дана умова виконується. Також необхідно провести перевірку кабелів зі зшитого поліетилену на термічну стійкість до дії струмів КЗ.

Все електрообладнання підбирається відповідно до характеру установки, номінальним струмом і напругою, і відповідно до всіх раніше встановлених стандартів використання електрообладнання необхідно провести теплові і динамічні перевірки в умовах роботи в СЕП підприємства.

$$U_{\text{ном.в}} \geq U_{\text{ном.мережі}}, \quad (1.0)$$

$$I_{\text{ном.в}} \geq I_{\text{мах}}, \quad (1.11)$$

Комплектація РП 10 кВ ПС передбачає застосування вакуумних вимикачів типу ВРС-10-20/400 УЗ [11] з такими технічними характеристиками: $U_n = 10 \text{ кВ}$; $I_n = 10000 \text{ А}$; $I_{\text{н.вимк}} = 10 \text{ кА}$; $i_{\text{дин}} = 25 \text{ кА}$; $I_{\text{тер}} = 10 \text{ кА}$; $t_{\text{тер}} = 4 \text{ с}$. Обрані високовольні електричні апарати наведені у таблиці 1.9.

Таблиця 1.9 – Вибір високовольного обладнання СЕП

Лінія	$I_{\text{ра}}, \text{ А}$	Вимикач	$I_{\text{ном}}, \text{ А}$	Провідник	$S, \text{ мм}^2$	$I_{\text{доп}}, \text{ А}$
ТП-1	51	ВРС-10-20/400 УЗ	400	АПвЭгаПу-10	3×35	119
ТП-2	51	ВРС-10-20/400 УЗ	400	АПвЭгаПу-10	3×35	119
ТП-3	51	ВРС-10-20/400 УЗ	400	АПвЭгаПу-10	3×35	119
ТП-4	51	ВРС-10-20/400 УЗ	400	АПвЭгаПу-10	3×35	119

1.7 Перевірка вибраного електрообладнання

Розрахунок струмів КЗ виконується з метою перевірки вибраних вимикачів і кабелів. Тому необхідно визначити такі величини: періодичну складову струму трифазного КЗ в початковий момент часу $I_{\text{п0}}$, ударний струм КЗ $i_{\text{уд}}$, періодичну та аперіодичну складові в момент початку розходження контактів вимикача $I_{\text{пт}}$ та $i_{\text{ат}}$, тепловий імпульс B_K .

Складаємо схему заміщення (рисунок 1.8).

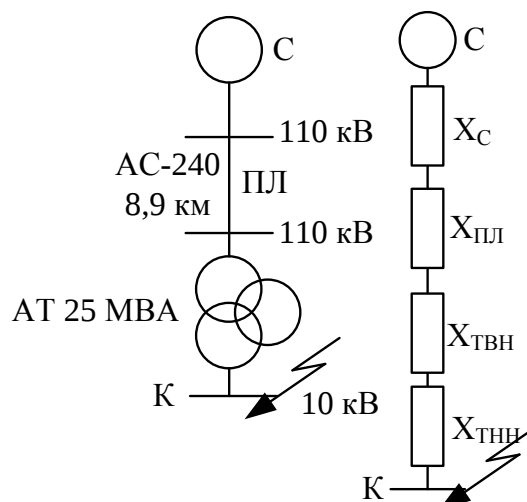


Рисунок 1.8 – Розрахункова схема і схема заміщення СЕП

Знаходимо номінальний коефіцієнт трансформації:

$$t_T = \frac{U_{BH}}{U_{HH}} = \frac{110}{10} = 11; \quad (1.12)$$

Опір системи на стороні напруги 10 кВ:

$$X_c = \frac{U_{с.н.}}{\sqrt{3} \cdot I_K} \cdot \frac{1}{t_T^2} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 17772} \cdot \frac{1}{11^2} = 0,03 \text{ (Ом)}. \quad (1.13)$$

Опір ПЛ АС-240 від ПС «Вінниця-330» до ПС «Південна»:

$$x_{ПЛ} = x_0 \cdot L \cdot \left(\frac{U_B}{U_{с.н.ПЛ}} \right)^2 = 0,4 \cdot (5,826 + 3,06) \cdot \left(\frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,03 \text{ (Ом)}.$$

Опір обмоток високої та низької напруги автотрансформатора 25 МВА:

$$u_{KB} \% = 0,5 \cdot (u_{KB-H\%} + u_{KB-C\%} - u_{KC-H\%}), \quad (1.14)$$

$$u_{KH} \% = 0,5 \cdot (u_{KB-C\%} - u_{KC-H\%} + u_{KB-H\%}), \quad (1.15)$$

$$u_{KB} \% = 0,5 \cdot (35 + 11 - 22) = 12 \text{ (\%)},$$

$$u_{KH} \% = 0,5 \cdot (-11 + 22 + 35) = 23 \text{ (\%)},$$

$$x_{*ATBC} = \frac{12}{100} \cdot \frac{(10 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 0,48 \text{ (Ом)}.$$

$$x_{*ATBC} = \frac{23}{100} \cdot \frac{(10 \cdot 10^3)^2}{25 \cdot 10^6} = 0,92 \text{ (Ом)}.$$

Сумарний опір від системи до точки К:

$$x_{\Sigma} = x_c + x_{ПЛ} + x_T = 0,03 + 0,03 + 0,48 + 0,92 = 1,46 \text{ (Ом)}.$$

Початкове діюче значення струму трифазного КЗ:

$$I_{п0} = \frac{U_{с.н.}}{\sqrt{3} \cdot x_{\Sigma}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,46} = 4,15 \text{ (кА)}. \quad (1.16)$$

Розрахуємо розрахунковий час початку розмикання:

$$t_{від} = t_{рз.мін} + t_{B.B}; \quad (1.17)$$

$$t_{від} = 0,01 + 0,15 = 0,151 \text{ (с)}.$$

Постійна часу аперіодичної складової: $T_{ac} = 0,03$ (с).

Періодична складова струму від системи не зміниться:

$$I_{nt_c} = I_{no.c} = 4,15 \text{ (кА)}.$$

Аперіодична складова струму КЗ при $\tau = 0,05$ с:

$$i_{at_c} = \sqrt{2} \cdot I_{no.c} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_{ac}}}; \quad (1.18)$$

$$i_{at_c} = \sqrt{2} \cdot 4,15 \cdot e^{-\frac{0,151}{0,03}} = 0,04 \text{ (кА)}.$$

Ударний струм КЗ:

$$i_{уд.с} = \sqrt{2} \cdot I_{no.c} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\tau}{T_{ac}}} \right); \quad (1.19)$$

$$i_{уд.с} = \sqrt{2} \cdot 4,15 \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,01}{0,03}} \right) = 10,1 \text{ (кА)}.$$

Розрахуємо тепловий імпульс:

$$B_k = I_{no.c}^2 \cdot (t_{від} + T_{асх}); \quad (1.20)$$

$$B_k = 4,15^2 \cdot (0,151 + 0,03) = 2,7 \text{ (кА}^2\text{с)}.$$

Переріз жил кабелів за термічною стійкістю до дії струмів КЗ:

$$s \geq s_{min} = \frac{I_k \sqrt{t_{вим}}}{C_T} \quad (1.21)$$

$$s = 35 \text{ (мм}^2\text{)} \geq s_{min} = \frac{4,15 \sqrt{0,151}}{94} = 17,2 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

де I_k – струм КЗ в А; $t_{вим}$ – сумарний час вимикання струму КЗ, який визначається витримкою часу основного захисту лінії (0,5...2 с), часом спрацювання високовольного вимикача та відношенням струму КЗ в початковий момент виникнення КЗ до його усталеного значення; C_T – термічний коефіцієнт, $A \cdot c^{0,5}/mm^2$, значення якого становить 90...100 для паперових кабелів і 94 – для кабелів зі зшитого ПЕ.

Умова виконується, отже живлячі кабелі АПвЭгаПу-10 3х35 вибрані вірно.

Допустимий струм КЗ тривалістю $t_{\text{вим}} = 0,151$ с буде:

$$I_{\text{доп.к}} = \frac{I_{\text{доп.к(1с)}}}{\sqrt{t_{\text{вим}}}} = \frac{3,3}{\sqrt{0,151}} = 8,49 \text{ (кА)} \geq 4,15 \text{ (кА)}. \quad (1.22)$$

Таким чином, вибрані кабелі умовам термічної стійкості до дії струму КЗ задовольняють.

Питомий опір алюмінієвої жили для температури 90 °С:

$$r_{0(90)\text{ж}} = r_{0(20)\text{ж}} \frac{228 + \Theta}{248} = 0,158 \frac{228 + 90}{248} = 0,21 \text{ (Ом/км)}. \quad (1.23)$$

Питомий опір мідного екрана для температури 70 °С:

$$r_{0(70)\text{ек}} = r_{0(20)\text{ек}} \frac{242,5 + \Theta}{262,5} = 0,193 \frac{242,5 + 70}{262,5} = 0,23 \text{ (Ом/км)}. \quad (1.24)$$

Значення наведеного струму в екрані трьохжильних кабелів:

$$I_{\text{ек.тр}} \approx I_{\text{КЗ}} \sqrt{\frac{0,0019}{0,0019 + r_{0(70)\text{ек}}^2}} = 4,15 \sqrt{\frac{0,0019}{0,0019 + 0,23^2}} = 0,773 \text{ (кА)}. \quad (1.25)$$

$$I_{\text{доп.е}} = 3,3 \text{ (кА)} \geq I_{\text{ек.тр}} = 0,773 \text{ (кА)}. \quad (1.26)$$

Таким чином, вибраний кабель АПвЭгаПу-10 3х35 відповідає умовам термічної стійкості екрана до наведеного струму.

Таблиця 1.10 – Вибір вимикачів та роз'єднувачів 10 кВ

Умови вибору	Дані для вимикачів	Дані розрахунків
$I_{\text{н.відк}} \geq I_{\text{пт}}$	$I_{\text{н.відк}} = 10 \text{ кА}$	$I_{\text{пт}} = I_{\text{пт.с}} = 4,15 \text{ кА}$
$\sqrt{2}I_{\text{н.відкл}} \geq \sqrt{2}I_{\text{пт.с}} + i_{\text{ат.с}}$	$\sqrt{2}I_{\text{н.відкл}} = \sqrt{2} \cdot 10 = 14,1 \text{ кА}$	$\sqrt{2} \cdot 4,15 + 0,04 = 6 \text{ (кА)}$
$i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}}$	$i_{\text{дин}} = 25 \text{ кА}$	$i_{\text{уд}} = i_{\text{уд.с}} = 10,1 \text{ (кА)}$
$I_{\text{дин}} \geq I_{\text{по}}$	$I_{\text{дин}} = 10 \text{ кА}$	$I_{\text{по}} = I_{\text{по.с}} = 4,15 \text{ (кА)}$
$B_{\text{к}} = I_{\text{по}}^2 t_{\text{по}}$	$I_{\text{т}}^2 t_{\text{т}} = 10^2 \cdot 4 = 400 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}$	$B_{\text{к}} = 2,7 \text{ (кА}^2 \cdot \text{с)}$

Обраний тип вимикача відповідає вимогам місця його встановлення.

1.8 Релейний захист та автоматика

Струмова відсічка (СВ). Розглянемо захист КЛ 10 кВ ділянки ПС-ТП1.

СВ виконується зі струмовими реле типу РТ-40 КА1 і КА2 [9]:

$$I_{\text{св}} = k_{\text{нКЛ}} \cdot k_{\text{нТр-р}} \cdot I_{\text{к max ВН}}^{(3)} = k_{\text{нКЛ}} \cdot k_{\text{нТр-р}} \cdot \frac{100}{U_{\text{кТр-р}}} \cdot I_{\text{ном.Тр-р}}, \quad (1.30)$$

де $I_{\text{к max ВН}}^{(3)}$ – значення струму трифазного КЗ;

$k_{\text{н}}$ – коефіцієнт надійності: 1,3—1,4 – для реле даного типу;

$$I_{\text{св}} = 1,3 \cdot 1,3 \cdot \frac{100}{10,5} \cdot 37,17 = 1183 \text{ (A)},$$

Струм спрацювання реле буде визначатися за наступним відношенням:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{св}}}{n_{\text{ТС}}} = \frac{1183}{20} = 59,15 \text{ (A)},$$

де $n_{\text{ТС}}$ – коефіцієнт трансформації ТС який рівний 100/5 відповідно паспортних даних.

Доцільно обрати реле типу РТ-40/200 у якого, межі уставок струму спрацювання реле 100—200 А.

Витримка часу вибирається за умовами селективності:

$$t_{\text{сзКЛ}} = t_{\text{свТр-р}} + \Delta t' = 0,0 + 0,5 = 0,5 \text{ (с)}.$$

Реле часу доцільно обрати типу ЕЧ-114 з межею 0,1 –1,3 с.

Визначимо струм трифазного КЗ:

$$I_{\text{кз}} = \frac{1,05 \cdot U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot Z}, \quad (1.31)$$

де U – напруга, кВ;

Z – повний сумарний опір живлячої лінії та системи, Ом.

$$Z = \sqrt{R_{\text{л}}^2 + (X_{\text{л}} + X_{\text{Г}})^2}, \quad (1.32)$$

$$X_{\Gamma} = \frac{x_{d''} \cdot U_{cp}^2}{S_{ном.\Gamma}}, \quad (1.33)$$

$$X_{\Gamma} = \frac{0,121 \cdot 10,5^2}{7,5} = 0,64 \text{ (Ом)},$$

$$Z = \sqrt{0,024^2 + (0,0047 + 0,64)^2} = 0,645 \text{ (Ом)},$$

$$I_{кз} = \frac{1,05 \cdot 10500}{\sqrt{3} \cdot 0,645} = 5959 \text{ (А)},$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}} = \frac{0,865 \cdot 5959}{1183} = 4,35 > 1,5.$$

Максимальний струмовий захист (МСЗ). Схема МСЗ приймається двофазною з трьома реле типу РТ40 (КА1, КА2, КА3).

Уставка по струму для реле даного типу вибирається з наступних умов:

а) неспрацювання захисного апарату під час післяаварійних перевантаженнях:

$$I_{\text{сз}} = \frac{k_{\text{н}} \cdot k_{\text{сзп}} \cdot I_{\text{роб max}}}{k_{\text{пов}}}, \quad (1.34)$$

$$I_{\text{сз}} = \frac{1,3 \cdot 3,0 \cdot 1,4 \cdot 72,83}{0,8} = 497,06 \text{ (А)}.$$

б) за умовами селективності з попереднім захистом:

$$I_{\text{сз}} = k_{\text{нс}} \cdot I_{\text{сзТр}} = 1,3 \cdot 497,03 = 646,18 \text{ (А)}.$$

Приймається уставка $I_{\text{сз}} = 646,18 \text{ (А)}$.

в) визначається чутливість захисту при двофазному КЗ:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}} = \frac{0,865 \cdot 5959}{646,18} = 7,97 > 1,5.$$

г) струм спрацювання реле:

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{сз}}}{n_{\text{ТС}}} = \frac{646,18}{20} = 32,3 \text{ (A)},$$

Доцільно взяти реле типу РТ 40/100.

д) час спрацьовування захисту:

$$t_{\text{сзКЛ}} = t_{\text{сзМСЗтр}} + \Delta t' = 1,2 + 0,4 = 1,6 \text{ (с)}.$$

Приймається реле часу типу ЕТ-124 з межами уставок 0,25—3,5с.

Захист від однофазних замикань на землю

У мережі з ізольованою нейтраллю струм замикання на землю рівний:

$$I_3^{(1)} = 3 \cdot I_{0\text{с}} = \frac{U_{\text{мф}} \cdot l}{10}. \quad (1.35)$$

Струм замикання кабельної лінії:

$$I_{\text{КЛ}} = 3 \cdot I_{0\text{КЛ}}^{(1)} = \frac{k_{\text{рем}} \cdot U_{\text{мф}} \cdot l}{10} = \frac{0,54 \cdot 10 \cdot 0,02}{10} = 0,0108 \text{ (A)}.$$

Струм замикання на землю всієї кабельної мережі 10 кВ:

$$3I_{0\text{КЛмережі}}^{(1)} = \frac{k_{\text{рем}} \cdot U_{\text{мф}} \cdot l}{10} = \frac{0,54 \cdot 10 \cdot 0,055}{10} = 0,03 \text{ (A)},$$

Струм спрацьовування захисту:

$$I_{\text{сз}} = \frac{k_{\text{відл}} \cdot k_{\text{стр}} \cdot 3I_{0\text{КЛ}}^{(1)}}{10} = \frac{1,1 \cdot 4 \cdot 0,03}{10} = 0,0132 \text{ (A)},$$

де $k_{\text{відл}}$ – коефіцієнт відлаштування, береться в межах 1.1—1.2;

Коефіцієнт чутливості:

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0\text{КЛмережі}}^{(1)} - 3I_{0\text{КЛ}}^{(1)}}{I_{\text{сз}}} = \frac{0,03 - 0,0108}{0,0132} = 1,45 > 1,25.$$

Отже для захисту лінії 10 кВ обрано всі необхідні захисні апарати.

1.9 Висновки до розділу 1

Аналіз технологічних процесів та електричного навантаження КП «ВТК» показав, що для реалізації СЕП підприємства доцільно виконати наступні проектні рішення:

- Для електропостачання навантажень ДЕПО достатньо одного трансформатора типу ТМ 630/10, також СЕП КП «ВТК» передбачає використання трьох тягових трансформаторних підстанцій з трансформатором ТМ 630/10, які розміщені по лінії руху електротранспорту;

- переріз зовнішньої кабельної лінії повинен бути $3 \times 35 \text{ мм}^2$, КЛ типу АПвЭгаПу-10 на напрузі 10 кВ під ПС «Південна». Для живлення тягових підстанцій 10 кВ оптимальним рішенням буде використання кабелів типу АПвЭгаПу-10 з перерізом ліній $3 \times 35 \text{ мм}^2$;

- також в даному розділі був проведений аналіз і вибір типу захисту електрообладнання в аварійному режимі роботи, та проведено перевірку обраних кабелів за допустимим перерізом та умовам термічної стійкості екрана до наведеного струму.

Технологічний процес на КП «ВТК» передбачає наявність в СЕП великої кількості тягового електроприводу. Навантаження тягового електропривода має значний вплив на якість електричної енергії через його специфічні характеристики, зокрема нерівномірність споживання електроенергії, динамічність і пульсації. Тяговий електропривод, особливо з використанням силових електронних перетворювачів (інверторів, випрямлячів), створює нелінійне навантаження, яке генерує гармонійні складові струму і напруги. Ці гармоніки виникають через періодичну комутацію в напівпровідникових пристроях і несинусоїдальний характер струму, що споживається, призводячи до спотворення основної синусоїдальної форми електроенергії у мережі. Це знижує якість електроенергії, викликаючи перегрів трансформаторів, втрати енергії та можливі збої в роботі іншого обладнання. Тому для СЕП підприємства актуальним являється питання підвищення якості електроенергії шляхом усунення гармонічного спотворення.

2 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРОКОМПЕСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1 Вплив вищих гармонік на якість електричної енергії

Гармоніки – це синусоїдальні складові (рис. 2.1) з частотою, кратною основній частоті мережі (50 або 60 Гц), які виникають в результаті нелінійного навантаження або генерації у системах [13].

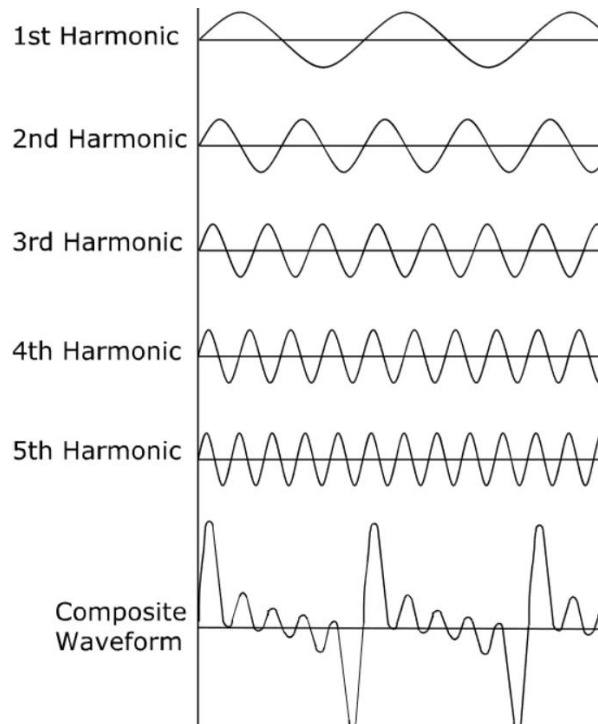


Рисунок 2.1 – Осцилограма гармонічного спотворення

Повне гармонічне спотворення (Total Harmonic Distortion, THD) – це показник, який відображає ступінь спотворення електричного сигналу в порівнянні з його основною гармонікою. Він визначається як відношення кореня квадратного суми квадратів амплітуд гармонік вищих порядків до амплітуди основної гармоніки. THD зазвичай виражається у відсотках і показує, наскільки спотворений сигнал від ідеальної синусоїди. Високий рівень THD вказує на значні гармонійні спотворення, що можуть спричиняти втрати енергії, перегрів обладнання та збої у його роботі.

Коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги дорівнює:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_1} \cdot 100 \%, \quad (2.1)$$

Небезпеку для електрообладнання представляє наявність в кривій напруги гармонічних складових напруги непарного (парного) порядку, з коефіцієнтом гармонік більше 5%.

Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги визначається як:

$$\text{THD}_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} K_{U(n)}^2}, \quad (2.2)$$

Коефіцієнт загальних гармонічних спотворень струму:

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{I_k}{I_1} \right)^2}. \quad (2.3)$$

де I_k – значення струму k-ї гармонічної складової, I_1 – значення основної складової струму $q=1$ у випадку чисто індуктивного опору мережі, і, відповідно, $q=-1$ у випадку чисто ємнісного опору мережі [15].

В таблиці 2.1 представлені допустимі значення окремої гармонічної складової.

Таблиця 2.1 – Допустимі значення коефіцієнта n-ої гармонічної складової [13]

n	ГОСТ 13109-97				ДСТУ EN 50160:2014		
	НН	6-10 кВ	35 кВ	ВН	НН	СН	ВН
Непарні гармоніки, не кратні 3							
5	6,0	4,0	3,0	1,5	6,0	6,0	5,0
7	5,0	3,0	2,5	1,0	5,0	5,0	4,0
11	3,5	2,0	2,0	1,0	3,5	3,5	3,0
13	3,0	2,0	1,5	0,7	3,0	3,0	2,5
Непарні гармоніки, кратні 3							
3	5,0	3,0	3,0	1,5	5,0	5,0	3,0
9	1,5	1,0	1,0	0,4	1,5	1,5	1,3
15	0,3	0,3	0,3	0,2	0,5	0,5	0,5
21	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5
Парні гармоніки							
2	2,0	1,5	1,0	0,5	2,0	2,0	1,9
4	1,0	0,7	0,5	0,3	1,0	1,0	1,0
6	0,5	0,3	0,3	0,2	0,5	0,5	0,5
8	0,5	0,3	0,3	0,2	0,5	0,5	0,5
10	0,5	0,3	0,3	0,2	0,5	0,5	0,5

THD використовується для оцінки якості електроенергії в системах електропостачання. Високий рівень THD вказує на значне спотворення сигналу, що може спричинити нагрівання обладнання, додаткові втрати енергії, збої в роботі електронних пристроїв та резонансні явища в мережах. Нормативні стандарти

(наприклад, ДСТУ EN 50160) обмежують допустимий рівень THD для електромереж, щоб забезпечити стабільність і безпеку їхньої роботи.

Вищі гармоніки в електричних мережах суттєво погіршують якість електроенергії, створюючи спотворення напруги і струму, що порушує стабільну роботу електричного обладнання. Гармоніки спричиняють додаткові втрати енергії у вигляді тепла, що призводить до перегріву трансформаторів, кабелів, двигунів та іншого обладнання, знижуючи їх ефективність і скорочуючи термін служби. Крім того, високий рівень гармонійних спотворень знижує коефіцієнт потужності мережі, що вимагає додаткових заходів з компенсації реактивної потужності, погіршує енергетичний баланс та призводить до зростання витрат на електроенергію.

Гармоніки також викликають додаткові втрати активної потужності в елементах системи електропостачання (СЕП), особливо в трансформаторах, генераторах і двигунах, що може призвести до перегріву їх обмоток, виходу з ладу та зниження загальної якості електроенергії. Зменшення впливу гармонік можливе завдяки використанню активних фільтрів, які нейтралізують струми гармонік, знижують теплові втрати та покращують якість електроенергії, що позитивно впливає на стабільність і ефективність роботи СЕП.

Усунення вищих гармонік, викликаних тяговими електродвигунами, передбачає використання сучасних технічних рішень для зменшення гармонійних спотворень і покращення якості електроенергії. Основні методи включають:

- Активні фільтри гармонік: Це пристрої, які аналізують потік гармонійних складових у реальному часі та генерують сигнали у протифазі для їх нейтралізації. Вони ефективні для усунення гармонік широкого спектра, особливо в тягових системах із нелінійними навантаженнями;

- Пасивні фільтри гармонік: Складаються з реактивних елементів (конденсаторів і котушок), які налаштовуються на певні гармоніки для їх поглинання. Вони є більш простим і дешевим рішенням, але менш гнучкі в роботі;

- Використання динамічних компенсаторів: Наприклад, статичних синхронних компенсаторів (STATCOM), які можуть коригувати гармонійні спотворення та компенсувати реактивну потужність.

2.2 Загальний аналіз фільтро-компенсуючих пристроїв

У наукових працях вітчизняних та зарубіжних учених розглянуто різні технічні засоби та рішення для компенсації вищих гармонік струму та напруги, а також для запобігання виникненню резонансних явищ з метою підвищення якості електроенергії та недопущення струмового навантаження конденсаторів.

Відомими традиційними способами придушення вищих гармонік струму в системі електропостачання є [14,15,16]:

- схемні рішення раціонального побудови розподільчої мережі з нелінійним навантаженням;
- антирезонансні дроселі та згладжувальні реактори в ланцюзі конденсаторів;
- пасивні фільтрокомпенсуючі установки;
- активні фільтри гармонік;
- гібридні фільтрокомпенсуючі пристрої.

На рисунку 2.2 наведено схеми трифазних випрямлячів.

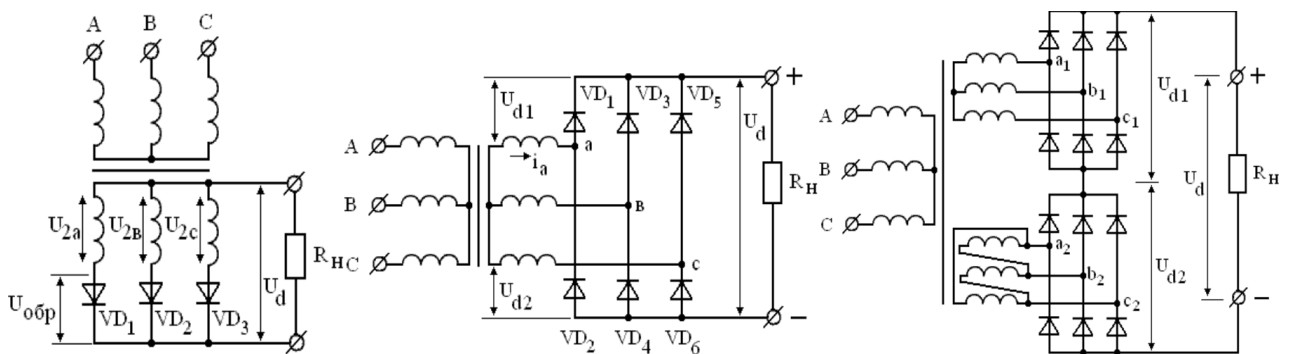


Рисунок 2.2 – Схеми випрямлячів з частотою пульсації m :

- а) нульова схема випрямляча, $m = 3$;
- б) трифазна мостова схема випрямляча, $m = 6$;
- в) дванадцятипульсна схема випрямляча, $m = 12$

Фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКП) забезпечують зменшення гармонійних спотворень та компенсацію реактивної потужності, що сприяє підвищенню якості електроенергії в системах. Основні типи ФКП включають пасивні фільтри, активні фільтри гармонік і гібридні фільтри, кожен із яких має свої переваги та недоліки.

Таблиця 2.2 – Класифікація фільтрокомпенсуючих пристроїв

Тип фільтра	Підтип	Конфігурація
Пасивні фільтри	Однофазні	Послідовні, Паралельні
	Трифазні, трипровідні	Послідовні, Паралельні
	Трифазні, чотирипровідні	Послідовні, Паралельні
Активні фільтри	Однофазні	Послідовні, Паралельні
	Трифазні, трипровідні	Послідовні, Паралельні
	Трифазні, чотирипровідні	Послідовні, Паралельні
Гібридні фільтри	Однофазні	
	Трифазні, трипровідні	
	Трифазні, чотирипровідні	

Пасивні фільтрокомпенсуючі пристрої є пасивним частотно-селективним ланцюгом, який дозволяє зменшити амплітудні значення вищих гармонік і підвищити коефіцієнт потужності мережі [14,15].

Пасивні фільтри складаються з елементів LC-ланцюга, налаштованих на поглинання конкретних частот гармонік.

Переваги:

- Простота конструкції;
- Низька вартість у порівнянні з активними рішеннями;
- Ефективність при стабільному характері навантаження.

Недоліки:

- Обмежена гнучкість – працюють лише на фіксованих частотах гармонік;
- Можливість резонансних явищ у мережі.

Пасивні фільтри гармонік класифікують за такими ознаками [16,17]:

1. Порядок фільтра, який визначається кількістю індуктивних та ємнісних елементів;
2. Характер включення: паралельно чи послідовно вузлу навантаження чи його комбінована схема включення;
3. Число фаз;
4. Частотний діапазон: вузькосмугові та широкосмугові фільтри.

Основні зміни пасивних фільтрів наведено рисунку 2.3.

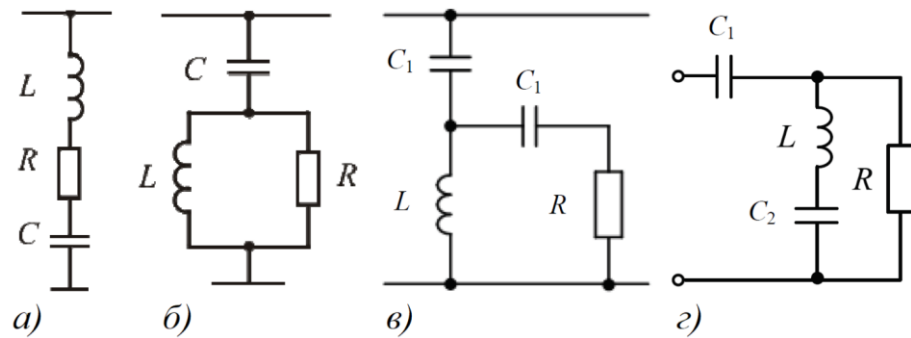


Рисунок 2.3 – Основні конфігурації пасивних фільтрокомпенсуючих пристроїв:

- а) Вузькочастотний фільтр; б) Широкочастотний фільтр 2-го порядку;
в) Широкочастотний фільтр 3-го порядку; г) Фільтр С-типу

Активні фільтри гармонік є більш прогресивним рішенням, що компенсує гармоніки в реальному часі, генеруючи сигнали протифази до спотворень.

Переваги:

- Ефективні для усунення гармонік у широкому спектрі частот;
- Можливість компенсації динамічних змін навантаження;
- Додаткова функція компенсації реактивної потужності.

Недоліки:

- Висока вартість і складність конструкції;
- Споживання власної енергії для роботи.

Гібридні фільтри. Поєднують властивості пасивних і активних фільтрів, використовуючи їх переваги для зменшення вартості та підвищення ефективності.

Переваги:

- Ефективність у зменшенні гармонік і компенсації реактивної потужності;
- Нижча вартість порівняно з повністю активними фільтрами;
- Гнучкість у роботі із змінними навантаженнями.

Недоліки:

- Складніші у налаштуванні й обслуговуванні порівняно з пасивними рішеннями.

У роботах [14,16] наводяться чотири основні типи гібридних фільтрів, схема яких визначається типом технічної задачі, що розв'язується:

1. паралельне з'єднання АФ і пасивних ФКУ, показане на рисунку 2.4 а: компенсує гармоніки з боку нелінійних пристроїв. Пасивні фільтри пригнічують залишковий рівень вищих гармонік, зменшуючи номінальну потужність і масогабаритні показники ПАФ;

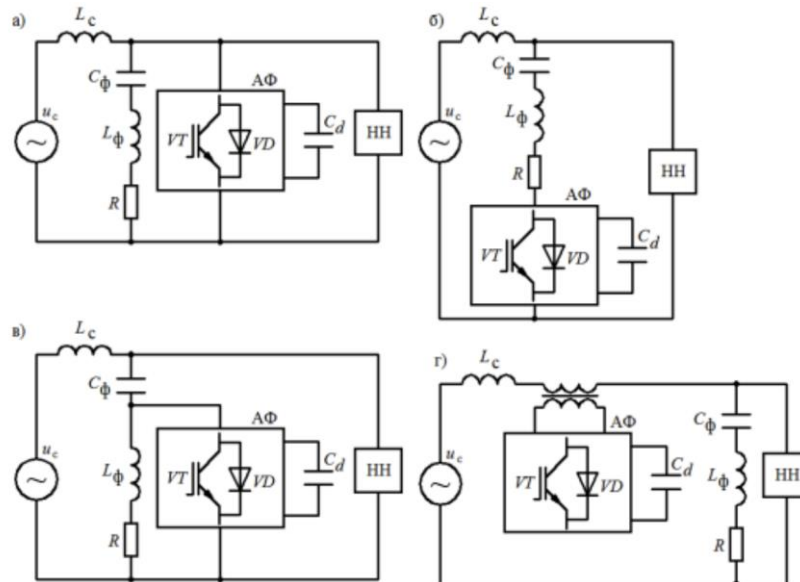


Рисунок 2.4 – Схеми гібридних фільтрів а) паралельне з'єднання АФ та пасивного ФКП; б) паралельне з'єднання АФ з активно-індуктивною частиною пасивного ФКП; в) послідовне поєднання пасивного ФКП; г) Послідовний АФ та паралельне з'єднання пасивного ФКП

2. пасивні ФКУ з'єднуються послідовно з ПАФ, як видно на рисунку 2.4 б: найбільш ефективна схема при компенсації гармонік з боку нелінійного навантаження. Вона дозволяє виключити резонансні режими, що забезпечує підвищення ефективності роботи ПАФ та компенсувати гармоніку напруги;

3. Є окремим випадком п.1 типу, що видно на рисунку 2.4 в: ПАФ з'єднується паралельно тільки з активно-індуктивною частиною 96 пасивного ФКУ, що дозволяє запобігти резонансам на гармоніках високих частот $n > 25$;

4. Послідовний АФ та паралельне з'єднання пасивних ФКУ, показане на рисунку 2.4 г: дозволяє компенсувати провали та відхилення напруги та водночас компенсувати канонічні вищі гармоніки струму з боку нелінійного навантаження.

Основні критерії вибору ФКП:

– Рівень гармонійних спотворень (коефіцієнт THD);

- Тип і динаміка навантаження (статичне чи змінне);
- Потужність системи і вартість обладнання;
- Наявність компенсації реактивної потужності.

2.3 Загальний аналіз активних фільтрів

Активний фільтр (АФ) є високотехнологічним пристроєм для підвищення якості електроенергії, який здійснює корекцію форми струму або напруги в електричних мережах. Він використовує ємнісні або індуктивні накопичувачі енергії разом із сучасними методами імпульсної модуляції для формування компенсаційного сигналу. Цей сигнал нейтралізує нелінійні компоненти струму або напруги, відновлюючи чисту синусоїдальну форму основної гармоніки. Завдяки цьому активні фільтри забезпечують ефективне усунення гармонійних спотворень, зменшення втрат енергії, стабілізацію напруги та поліпшення коефіцієнта потужності, що сприяє підвищенню енергоефективності та стабільності роботи електрообладнання.

Активний фільтр приєднується до трифазної електричної мережі пофазно. Спрощена схема підключення АФ до мережі зображена на рисунку 2.4.

Активний фільтр складається з кількох ключових компонентів, які дозволяють йому виконувати функцію динамічного усунення гармонік і корекції спотворень в електричних мережах. Основні елементи активного фільтра включають:

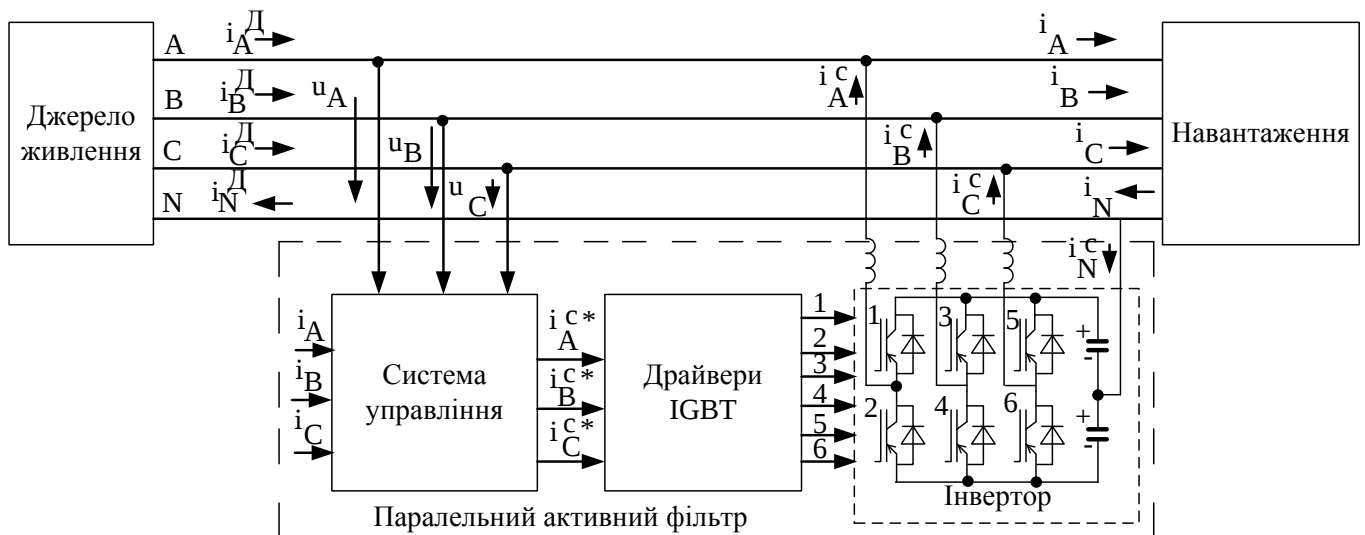


Рисунок 2.4 – Спрощена схема підключення паралельного АФ до мережі

Силовий інвертор (рис 2.3). Інвертор перетворює постійну напругу в змінну з необхідними параметрами для компенсації гармонік у мережі. Він генерує протифазні струми, які компенсують небажані гармоніки.

Інвертори можуть бути однофазними або трифазними, залежно від мережі.

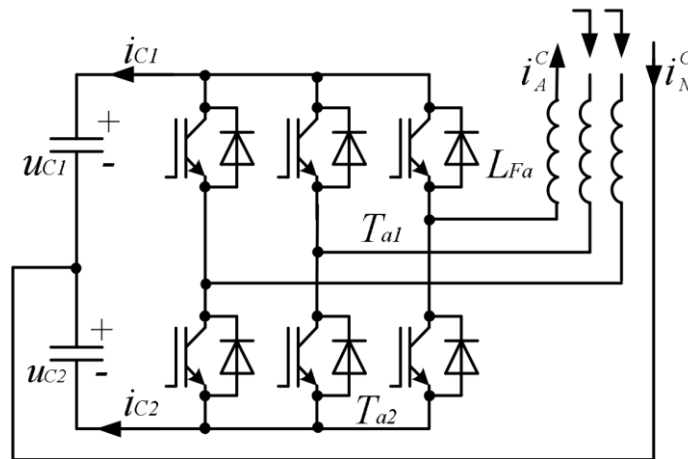


Рисунок 2.5 – Схема інвертора активного фільтра з двома конденсаторами

Джерело постійної напруги (ланка постійного струму або DC-джерело) забезпечує живлення інвертора. Це може бути енергетичний блок із конденсаторів, що накопичують енергію для роботи інвертора, або спеціальний випрямляч, який перетворює змінну напругу електромережі в постійну.

Система управління (СУ) аналізує електричну мережу, виявляє гармонічні спотворення та обчислює компенсаційні струми для їх усунення. Вона керує роботою інвертора, використовуючи методи швидкого перетворення Фур'є (FFT) чи інші алгоритми.

Вимірювальні пристрої (датчики струму та напруги) в реальному часі відстежують параметри сигналу, передаючи дані системі управління для аналізу гармонік. Датчики розташовуються як на вході й виході інвертора, так і безпосередньо в мережі.

Фільтри низьких частот (LC-фільтри) згладжують високочастотні компоненти сигналу, що утворюються під час роботи інвертора, знижуючи електромагнітні завади й покращуючи якість електроенергії.

З'єднувальні елементи (реактори або конденсатори) забезпечують підключення активного фільтра до мережі та виконують фільтрацію гармонічних струмів. Вони також компенсують реактивну потужність.

Панель керування та комунікаційний модуль дозволяють користувачу налаштовувати режими роботи, переглядати параметри мережі та контролювати роботу фільтра. Комунікаційні модулі інтегрують пристрій у системи централізованого енергоменеджменту, наприклад, SCADA.

Принцип роботи активного фільтра заключається в тому, що здійснюється постійний аналіз параметрів мережі через вимірювальні пристрої. СУ визначає рівень гармонічних спотворень і генерує компенсаційний струм за допомогою інвертора. Сигнал, що генерується інвертором, вводиться в мережу у протифазі до небажаних гармонік, таким чином зменшуючи або повністю усуваючи їх вплив.

2.4 Загальний аналіз послідовно-паралельного активного фільтра

Найбільш кращим варіантом технічної реалізації засобів активної фільтрації є спільна послідовно-паралельна комбінація двох типів АФ [15], яка у зарубіжних літературних джерелах отримала назву Unified Power Quality Conditioner (UPQC).

UPQC рисунку 2.6 структурно складається з системи управління CS, двох автономних інверторів напруги VSI1 та VSI2, об'єднаних між собою по ланці постійного струму через силовий ємнісний фільтр C та акумуляторну батарею GB, автоматичного вимикача Q, а також датчиків струму DA та напруги DV[16]. Перший інвертор VSI1 через узгоджуючий трансформатор TV здійснює одночасне регулювання амплітуди u_m та кутового зсуву трифазних напруг u_s джерела TS, а також виключає в їх спектрі високочастотні гармоніки. В свою чергу VSI2 приєднується паралельно нелінійному споживачеві NL через індуктивний дросель L, який призначений для зниження пульсацій i_c та виконує три базові функції, а саме усуває спотворення в споживаних струмах i_s , компенсує реактивну потужність по основній гармоніці, а також здійснює стабілізацію u_{dc} . Крім цього UPQC підтримує

безперервне живлення навантаження у разі короткочасного просідання u_s за рахунок акумульованої в GB електричної енергії.

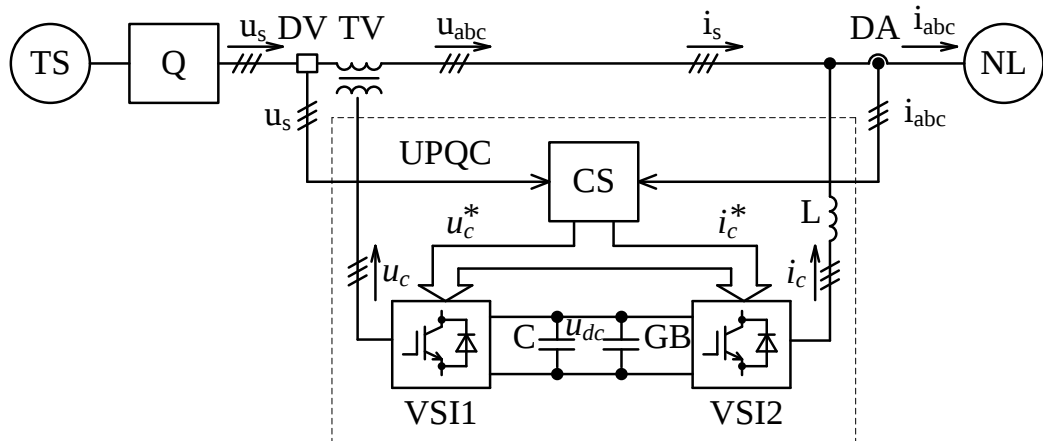


Рисунок 2.6 – Функціональна схема URQS

На рисунку 2.7 представлена схема UPQC основою якого є пара мостових трифазних інверторів напруги АФ1 і АФ2, сполучені ємністю Сd яка накопичує необхідну потужність для компенсації.

Послідовний АФ, під час своєї роботи впливає на електричну мережу у місці приєднання трансформатора Т1, та забезпечує симетрію трифазної напруги, що живить навантаження, а паралельний АФ, підключений до шин споживача за допомогою трансформатора Т2, використовується для фільтрації вищих гармонік струму навантаження і компенсації реактивної потужності навантаження.

Конденсаторна установка на стороні постійного струму забезпечує значення напруги для якої притаманні мінімальні пульсації і при цьому достатньою для роботи компенсації АФ [21].

Принципи побудови алгоритму системи управління UPQC, який являє собою послідовно-паралельний АФ, базуються на різних способах представлення трифазних змінних у часовій або частотній областях, причому в останньому випадку потрібна наявність високопродуктивних програмно-апаратних засобів у складі CS для проведення великого обсягу обчислювальних операцій.

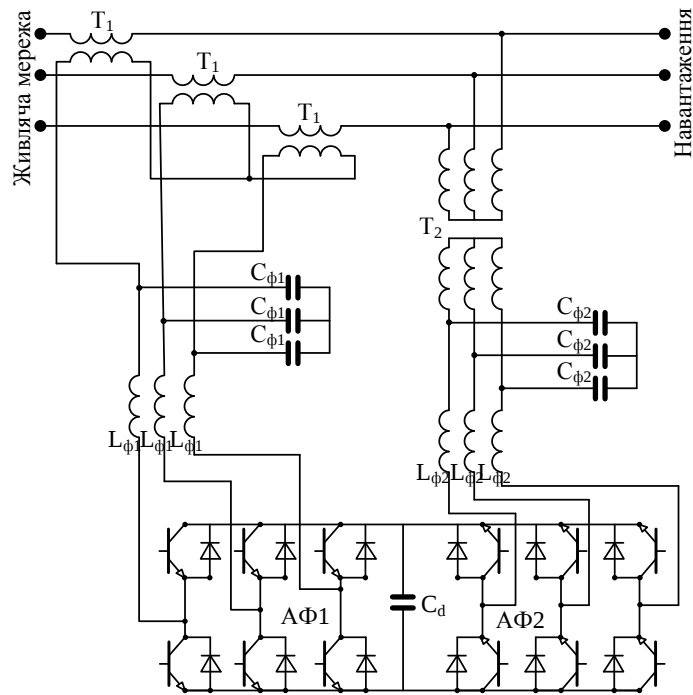


Рисунок 2.7 – Трифазна схема послідовно-паралельного включення АФ

У свою чергу серед всього різноманіття аналітичних процедур визначення компенсаційних впливів i_c і u_c у часовій області на практиці найбільшого поширення набув метод на основі так званої вихідної $p-q$ теорії миттєвої потужності [20], в рамках якої спочатку здійснюється перехід від трифазних змінних до координат стану x_α , x_β , x_o відповідно до лінійного ортогонального перетворення Е. Clarke.

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

де x_a , x_b , x_o – миттєві значення фазної напруги або струмів.

Алгоритм управління послідовним АФ:

$$\begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} = \frac{U_{abc}}{u_{d1+}} \begin{bmatrix} u_{a1+} \\ u_{b1+} \\ u_{c1+} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

де U_{abc} – модуль просторового вектора напруги, бажане значення якого вибирається як [20]:

$$U_{abc} = \sqrt{3} \cdot 220 [B].$$

u_{a1+} , u_{b1+} , u_{c1+} – гармонійні складові з кутовою частотою $\omega = 100\pi \text{ c}^{-1}$, що виділяються з повного спектру фазних напруг джерела TS [21];

u_{sa} , u_{sb} , u_{sc} – несинусоїдальні гармонічні складові.

Алгоритм управління паралельним АФ у координатах стану α , β , o :

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{co} \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Чисельні розрахунки компенсаційних впливів u_s на виході послідовного АФ дають змогу визначати оптимальні величини, які забезпечать корекцію миттєвої форми трифазних напруг з метою дотримання умови симетрії за миттєвими значеннями.

Послідовно-паралельне включення АФ має певну перевагу саме для симетрування несиметричного навантаження викликаного споживачем навантаження. URQC забезпечує комплексне підвищення рівня якості електричної енергії, і за допомогою послідовного АФ, він захищає споживача електричної енергії від негативного впливу мережі електропостачання, а за допомогою паралельного АФ, він забезпечує захист мережі від негативного впливу високочастотних гармонік які генерує несиметричний споживач електричної енергії.

Практична реалізація представлених алгоритмів для системи управління URQC дозволить значно поліпшити миттєву форму мережеских напруг і струмів. Даний тип силових перетворювальних пристроїв в даний час є найбільш ефективним технічним засобом електозбереження, що дозволяє істотно підвищити якість електричної енергії, яка споживається кінцевим навантаженням, з одночасним зниженням активних втрат у трифазних системах електропостачання загального призначення.

2.5 Висновки по розділу 2

В даному розділі кваліфікаційної роботи проведений загальний аналіз підвищення якості електроенергії в СЕП підприємств шляхом зменшення вищих гармонік. В ході проведення дослідження було встановлено:

1. Гармоніки суттєво погіршують якість електроенергії в системах електропостачання, спричиняючи додаткові втрати енергії, перегрів обладнання та збої у його роботі. Високий рівень гармонічних спотворень знижує коефіцієнт потужності мережі, погіршує енергетичний баланс і підвищує витрати на електроенергію. Зменшення величини вищих гармонік являється актуальною задачею рішення якої веде до покращення параметрів електричної мережі.

2. Для мінімізації впливу вищих гармонік використовуються сучасні технічні рішення, такі як активні та пасивні фільтри гармонік, які нейтралізують струми гармонік, а також динамічні компенсатори. Активні фільтри особливо ефективні завдяки здатності працювати в реальному часі, усуваючи гармоніки широкого спектра, що сприяє підвищенню стабільності та ефективності роботи електричних систем.

3. На разі найбільш ефективним методом вирішення прикладної задачі зменшення гармонійного складу напруг і струмів є ціленаправлена генерація в систему електропостачання силових компенсаційних сигналів, що формуються на виході АФ, які в залежності необхідних параметрів електроспоживання генеруються у швидкодіючих режимах джерела напруги (послідовний АФ) або струму (паралельний АФ).

3 МОДЕЛЮВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРО-КОМПЕНСУЮЧОГО ПРИБОРУ НА ПІДПРИЄМСТВІ ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Як було показано раніше у роботі, СЕП КП «ВТК» характеризується наявністю великої кількості тягових електроприводів, робота яких негативно впливає на якість електричної енергії та призводить до виникнення вищих гармонік величина яких перевищує нормоване значення.

Дане негативне явище призводить до погіршення роботи усієї системи електропостачання знижуючи ефективність роботи та термін служби обладнання, а також може призвести до аварійної ситуації, яка може стати причиною матеріальних збитків. Тому усунення даного негативного явища, та покращення якості електричної енергії в КП «ВТК» є актуальною задачею.

В даному розділі магістерської кваліфікаційної роботи буде проведено дослідження в ході, якого буде здійснено моделювання використання фільтро-компенсуючого пристрою в СЕП КП «ВТК» для підвищення якості електричної енергії шляхом зменшення наявних вищих гармонік до нормованих значень.

3.1 Порівняльний аналіз фільтро-компенсуючих пристроїв для підвищення якості електроенергії

Проводимо порівняльний аналіз фільтро-компенсуючих пристроїв для оцінки їх ефективності зменшувати вищі гармоніки при роботі в СЕП КП «ВТК». Для цього складаємо таблицю 3.1 в яку зводимо усю відому інформацію про найбільш поширені пристрої для фільтрації вищих гармонік.

Для підвищення якості електроенергії в СЕП КП «ВТК» вибір типу фільтра залежить від специфіки вимог: пасивні фільтри є економічним рішенням для стабільних систем із передбачуваними гармоніками, паралельні активні фільтри забезпечують ефективну компенсацію гармонік у динамічних умовах, а послідовно-паралельні активні фільтри є найкращим вибором для комплексного поліпшення

якості енергії, включаючи компенсацію напруги, але вони виправдані лише в критичних і складних системах через їхню високу вартість.

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз пристроїв для підвищення якості електроенергії

Параметр	Пасивний фільтр	Паралельний активний фільтр (ПАФ)	Поздовжньо-паралельний активний фільтр
Принцип дії	Компенсація гармонік за рахунок LC-контурів, налаштованих на певну частоту.	Генерація компенсуючого струму з протилежною фазою до гармонік.	Поєднання компенсації струмів (паралельний режим) і корекції напруги (поздовжній режим).
Ефективність компенсації гармонік	Висока для визначених частот, але малоефективна для гармонік поза налаштованим діапазоном.	Висока для широкого спектра гармонік (до 50-ї гармоніки і вище).	Дуже висока для гармонік і падіння напруги, забезпечує комплексне поліпшення якості енергії.
Реакція на змінне навантаження	Низька: ефективність падає при зміні гармонічного спектра навантаження.	Висока: адаптується до змінного режиму роботи.	Висока: одночасно адаптується до гармонік і падіння напруги.
Корекція коефіцієнта потужності	Забезпечує лише для реактивної потужності, пов'язаної з основною частотою.	Забезпечує корекцію для всіх складових реактивної потужності.	Забезпечує корекцію напруги та реактивної потужності.
Компенсація асиметрії фаз	Неможлива.	Можлива.	Можлива.
Реакція на падіння напруги	Не реагує.	Не реагує.	Здатний коригувати падіння напруги на живильній лінії.
Складність та вартість	Низька. Простий у виготовленні та дешевий.	Середня. Потребує складних компонентів і контролерів.	Висока. Вимагає складних схем і високих витрат.
Втрати енергії	Низькі.	Середні. Втрати на інверторі та елементів керування.	Середні або високі через складну роботу обох режимів.
Надійність	Висока, за умови правильної настройки.	Висока, але залежить від стабільності джерела живлення.	Середня через складність конструкції.
Застосування	Для простих систем із стабільними гармоніками (низький бюджет).	Для систем зі змінним режимом навантаження та широким спектром гармонік.	Для систем, де потрібна компенсація і гармонік, і напруги (складні мережі).

Пасивні фільтри підходять для дешевих і стабільних систем із відомим гармонійним спектром.

Паралельні активні фільтри є універсальним рішенням для компенсації гармонік у системах зі змінним режимом роботи.

Поздовжньо-паралельні активні фільтри оптимальні для підприємств із високими вимогами до якості напруги, але через високу вартість їх доцільно використовувати лише в критичних випадках.

Отже для підвищення якості електроенергії в СЕП КП «ВТК» доцільно використати ПАФ, як найбільш оптимальний пристрій відносно характеру навантаження підприємства.

3.2 Алгоритм роботи активного фільтра

Активний фільтр (АФ) – це перетворювач кривої напруги змінного струму з використанням ємнісного або індуктивного накопичувача електроенергії, використовуючи методи імпульсної модуляції усереднене значення струму (напруги) формує відповідне різниці нелінійного струму або напруги і синусоїдального струму його основної гармоніки [22].

Активний фільтр структурно складається з силової частини та системи управління. Силова частина представляється трьохфазним мостом, побудованим на IGBT-транзисторах або інших керованих елементах.

Принцип роботи активного фільтра полягає в вимірюванні та аналізі гармонічних складових струму нелінійного навантаження мережі і генерації протилежних величин гармонік струму. Нелінійне навантаження мережі містить гармонічні складові першого та вищих порядків.

$$i_n = \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \sin(n\omega t - \varphi_{in}). \quad (3.1)$$

При роботі АФ генерує гармоніки, що і нелінійне навантаження, але в протифазі:

$$i_{\phi}(t) = - \sum_{n \geq 2}^{\infty} I_{mn} \sin(n\omega t - \varphi_{in}). \quad (3.2)$$

В результаті генерації струм, споживаний від джерела i_c , має майже синусоїдальну форму, та містить тільки основну гармоніку:

$$i_C(t) = i_n(t) - i_\phi(t) = I_{mn} \sin(\omega t - \varphi_{i1}). \quad (3.3)$$

АФ покриває майже весь спектр вищих гармонік. Алгоритм роботи АФ представлено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Алгоритм роботи АФ

Етап	Опис
1. Вхідний сигнал	Отримання вхідного сигналу, який може містити різні частотні компоненти.
2. Підсилення або обробка сигналу	Операційний підсилювач змінює амплітуду сигналу в залежності від характеристик фільтра.
3. Застосування компонентів фільтра	Використовуються компоненти, які визначають частотні характеристики фільтра: резистори, конденсатори, індуктивності. Тип фільтра залежить від вибору компонентів (низькочастотний, високочастотний, смуговий).
4. Зворотний зв'язок	Використання зворотного зв'язку для стабілізації та контролю підсилення, що визначає характеристики фільтра.
5. Вихідний сигнал	Вихідний сигнал, що має змінений спектр частот відповідно до фільтрації.
6. Налаштування фільтра	Регулювання компонентів для досягнення необхідних параметрів частоти зрізу або посилення.

Повна потужність активного фільтра визначається із співвідношення:

$$S = \frac{U_C U_{St}}{X_L} \sin(\alpha) - j \left(\frac{U_C U_{St}}{X_L} \cos(\alpha) - \frac{U_C^2}{X_L} \right) = P - jQ. \quad (3.4)$$

де U_C , U_{St} – лінійні напруги;

α – фазовий кут;

P , Q – складові повної потужності.

Актуальність використання оптимального алгоритму управління активним фільтром для зменшення вищих гармонік полягає в тому, що сучасні електропостачальні системи з динамічним і нелінійним навантаженням вимагають швидкої та адаптивної компенсації гармонійних спотворень. Ефективний алгоритм дозволяє максимально точно виявляти та компенсувати гармоніки в режимі реального часу, забезпечуючи стабільність параметрів електромережі, зниження втрат енергії, подовження терміну служби обладнання та відповідність стандартам якості електроенергії. Це особливо важливо для підприємств із великими тяговими навантаженнями, де нестабільність мережі може суттєво впливати на ефективність і безпеку роботи обладнання.

3.3 Моделювання роботи АФ

Актуальність моделювання роботи активного фільтра в СЕП КП «ВТК» за допомогою MATLAB/Simulink [18,19] обумовлена потребою у точному аналізі та оптимізації роботи ПАФ перед впровадженням у реальну електромережу. Це дозволяє досліджувати динаміку ПАФ в різних режимах роботи, оцінювати ефективність алгоритмів управління, аналізувати взаємодію з іншими компонентами системи та виявляти потенційні проблеми. Використання MATLAB/Simulink забезпечує високу точність моделювання, знижує витрати на розробку і тестування, а також сприяє розробці адаптивних та енергоефективних фільтрів, що є критично важливим для підвищення якості електроенергії у системах із складним і динамічним навантаженням.

Для розробки моделі АФ використовуємо можливості комплексу MATLAB/SIMULINK [18], зокрема, пакету SimPower System [19].

Схема змодельованої електричної мережі в середовищі MATLAB/Simulink для дослідження використання АФ для зменшення вищих гармонік складається із елементів: джерело живлення, навантаження, понижуючий трансформатор, активний фільтр рисунок 3.1.

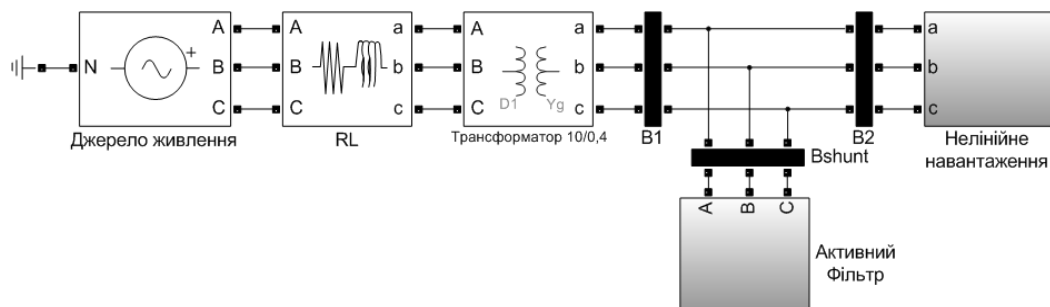


Рисунок 3.1 – Схема змодельованої електричної мережі з АФ

Модернізовану математичну модель для дослідження роботи АФ зображено на рисунку 3.2. Активний фільтр складається з трьох плечей, кожне з яких включає транзистори IGBT з антизворотними діодами, які працюють у режимі комутації для формування необхідних компенсувальних струмів. Модель також містить джерела живлення, ємності (C3, C4) для підтримання постійної напруги на шині постійного

струму, навантаження та вимірювальні блоки для моніторингу струмів і напруг. Система призначена для усунення гармонік і покращення якості електричної енергії в мережі шляхом динамічного формування протифазних гармонійних сигналів..

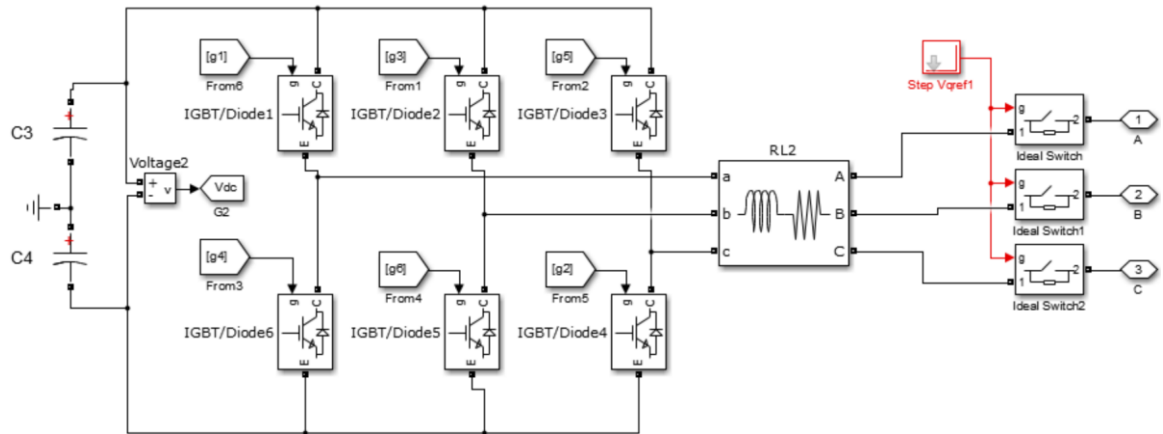


Рисунок 3.2 – Математична модель АФ в середовищі MATLAB/Simulink

На рисунку 3.3 представлена модель навантаження, реалізована в окремій підсистемі. Модель імітує роботу тягового електроприводу, який є характерним навантаженням для КП «ВТК» та являється джерелом генерації вищих гармонік.

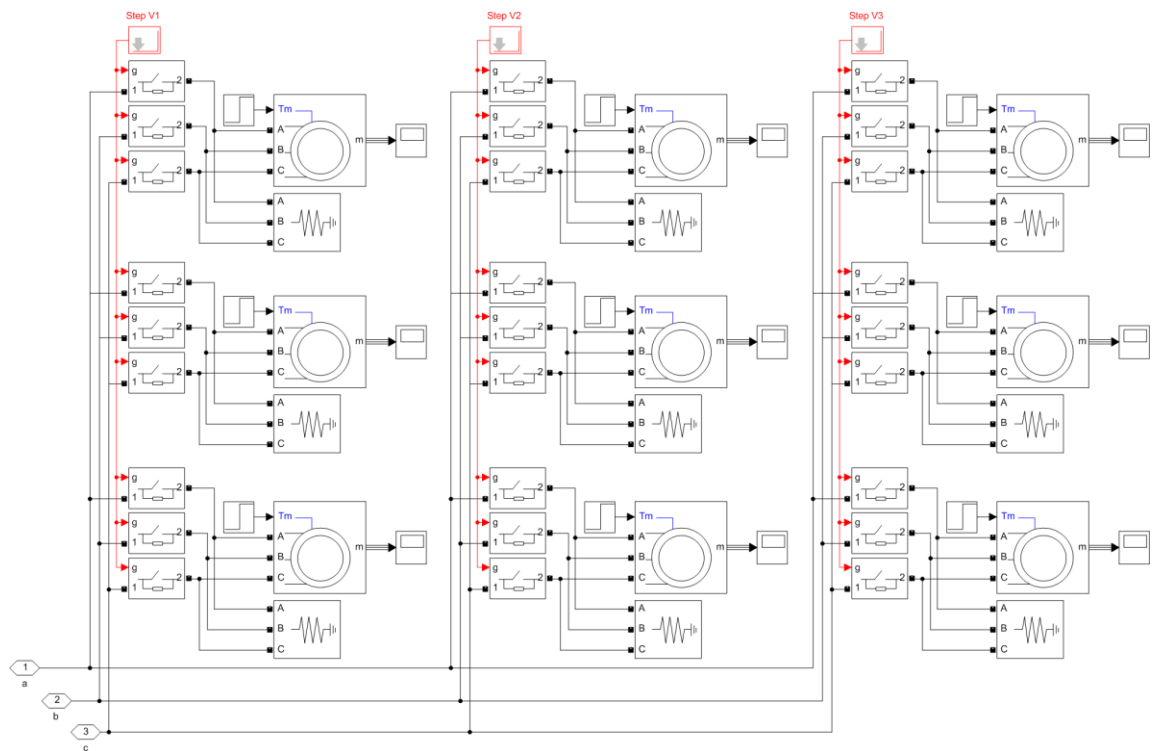


Рисунок 3.3 – Реалізація нелінійного навантаження електричної мережі

Модель АФ працює наступним чином. Нелінійне навантаження призводить до нерівномірного споживання напруги. Блок обчислення компенсуючої величини напруги порівнює значення опорних напруг та напруг на виході. Опорна напруга – це середнє миттєве значення напруги навантаження без затримки фази щодо відповідної фазної напруги. Далі напруга навантаження перетворюється в систему координат « $pq0$ ». Початкове положення осі p вибирається за тим принципом, що складова напруги визначається віссю p . Фіксована частина осі q повинна бути введена для компенсації величини відхилення напруги.

Отже, напруга, яку необхідно ввести для компенсації, розраховується у системі координат « $pq0$ ». Далі виконується перетворення в трифазну систему координат « abc ». Дана напруга є еталонною компенсаційною напругою та подається на трифазний інвертор, який створює значення компенсаційної напруги на основі негативного зворотного зв'язку.

Миттєві значення складових потужності:

$$\begin{aligned} p(t) &= i_{\alpha}(t)u_{\alpha}(t) + i_{\beta}(t)u_{\beta}(t); \\ q(t) &= i_{\alpha}(t)u_{\beta}(t) - i_{\beta}(t)u_{\alpha}(t). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Ортогональні складники напруги і струмів в системі $\alpha\beta 0$ -координат представлено формулами:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{\alpha}(t) \\ u_{\beta}(t) \\ u_0(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/6} \\ 0 & \sqrt{1/2} & -\sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \\ i_0(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/6} \\ 0 & \sqrt{1/2} & -\sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

На рисунку 3.4 зображена модель блока обчислення фазних струмів АФ [13].

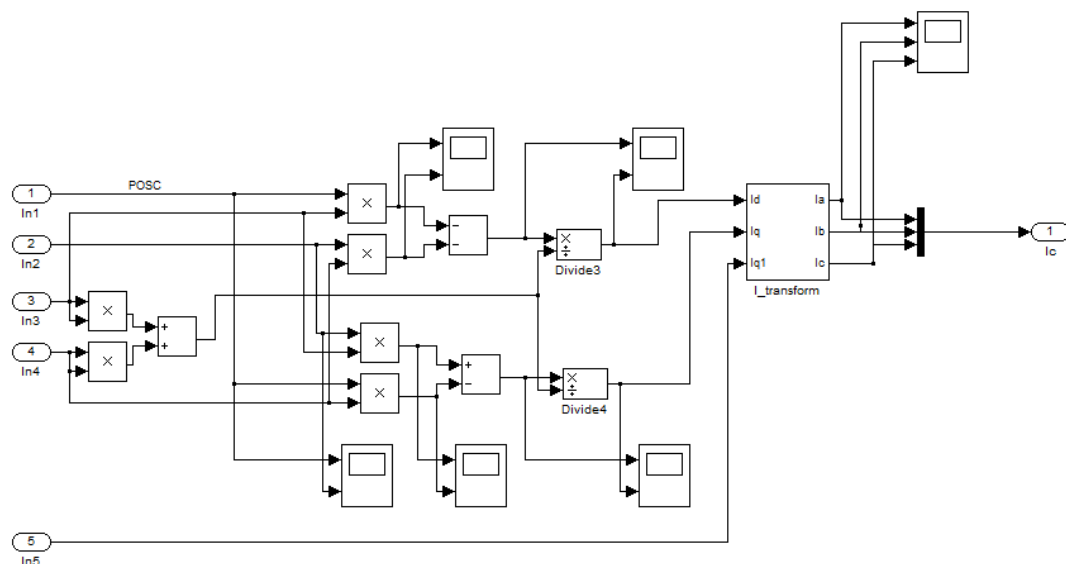


Рисунок 3.4 – Модель блока обчислення фазних струмів АФ

В блоці визначення фазних струмів активного фільтру визначається [13]:

1) величини складників потужності, які генеруватиме АФ:

$$n_p(t) = p(t) - P(t) - \left(k + \frac{1}{p\tau} \right) U_d(t); \quad n_q(t) = q(t), \quad (3.7)$$

де $P(t)$ – активна потужність навантаження $P(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t p(t) dt$;

$k + \frac{1}{p\tau}$ – параметри ПІ-регулятора, який забезпечує підтримання напруги на конденсаторі;

2) Визначення компенсаційного струму АФ в системі $\alpha\beta$ -координат:

$$i_{\alpha}^*(t) = \frac{n_p(t)u_{\alpha}(t) + n_q(t)u_{\beta}(t)}{u_{\alpha}^2(t) + u_{\beta}^2(t)}; \quad (3.8)$$

$$i_{\beta}^*(t) = \frac{-n_q(t)u_{\alpha}(t) + n_p(t)u_{\beta}(t)}{u_{\alpha}^2(t) + u_{\beta}^2(t)}; \quad (3.9)$$

3) визначення бажаної залежності фазних струмів АФ за формулою

$$\begin{bmatrix} i_a^*(t) \\ i_b^*(t) \\ i_c^*(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & 0 & \sqrt{1/3} \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/3} \\ -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/2} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha^*(t) \\ i_\beta^*(t) \\ i_0^*(t) \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

Модель системи керування подана на рис. 3.5.

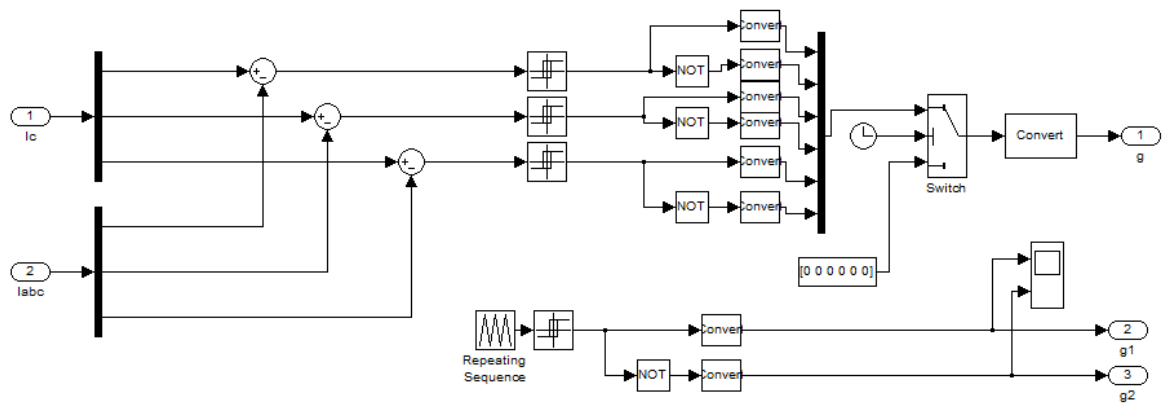
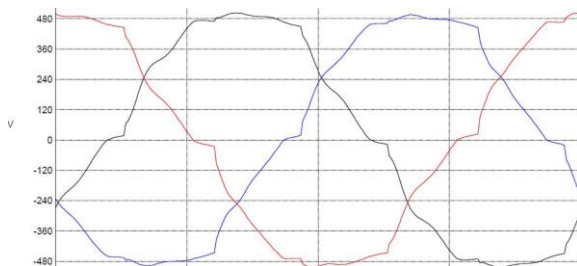


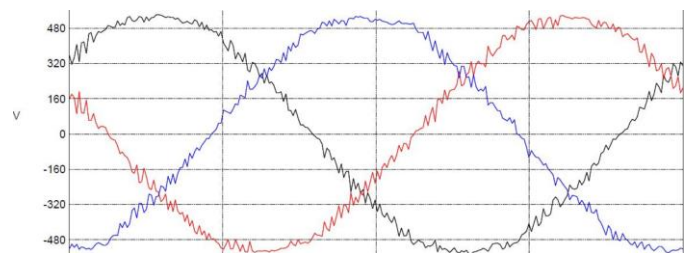
Рисунок 3.5 – Модель системи керування

Для перевірки адекватності роботи розробленої математичної моделі та можливості використання АФ для зменшення вищих гармонік проведемо її моделювання в MATLAB Simulink. Моделювання здійснено для перехідного процесу під час підключення до мережі усіх трьох секцій навантаження, яке складається з дев'яти тягових електродвигунів потужністю 40 кВт кожен.

На рисунку 3.6 представлено діаграми напруги мережі живлення без, та при роботі АФ.



Форма напруги мережі без АФ



Форма напруги мережі за наявності АФ

Рисунок 3.6 – Діаграми напруги мережі живлення

На рисунку 3.7 представлено форма споживаного з мережі струму без, та при роботі АФ.

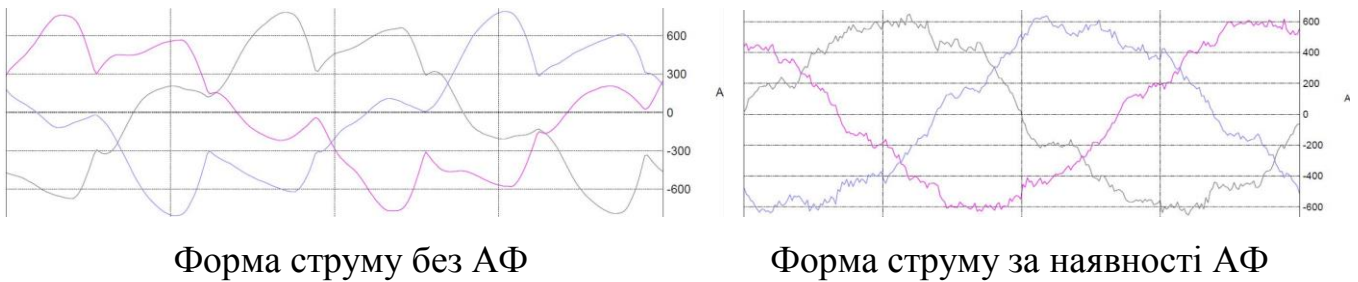


Рисунок 3.7 – Форма споживаного з мережі струму

На рисунку 3.8 представлено спектр споживаного з мережі струму без АФ та при роботі АФ.

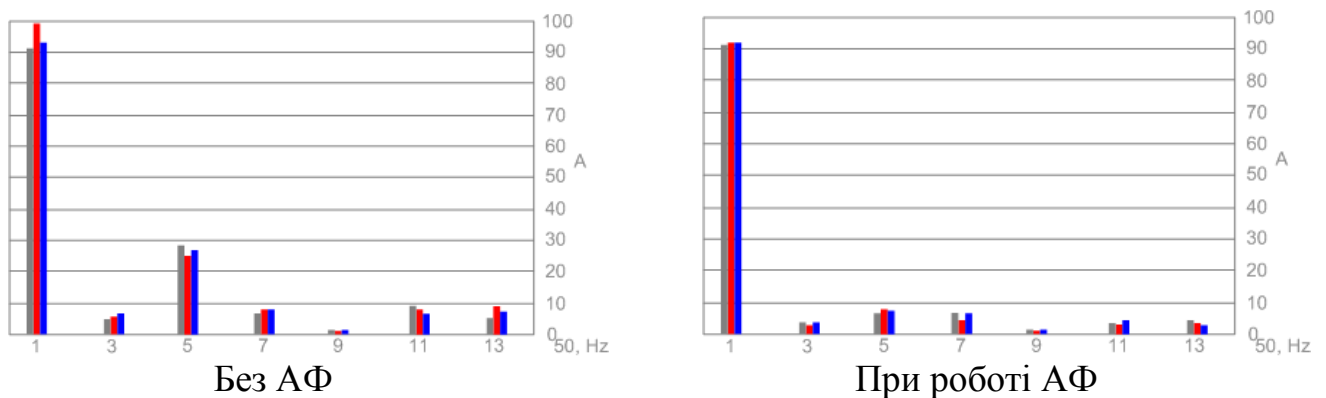


Рисунок 3.8 – Спектр споживаного з мережі струму

В таблиці 3.3 наведено коефіцієнти THD (Total Harmonic Distortion) для напруги та струму мережі живлення без та за наявності АФ.

Таблиця 3.3 – THD без та за наявності АФ

	Фазна напруга U_A	Фазна напруга U_B	Фазна напруга U_C	Струм фази А	Струм фази В	Струм фази С
THD Без АФ, %	8,4	8,9	8,7	33,6	34,1	36,2
THD з АФ, %	3,2	3,7	4,1	11,7	10,3	12,8

Для забезпечення відповідності нормам і зменшення негативного впливу на мережу рекомендується проводити регулярний енергоаудит із вимірюванням гармонічних складових в СЕП КП «ВТК». Експериментальні виміри дозволять отримати оптимальні параметри для налаштування пристрою АФ.

3.4 Висновки по розділу 3

У даному розділі магістерської кваліфікаційної роботи було проведено дослідження підвищення якості електроенергії в СЕП КП «ВТК». В ході проведення науково-дослідної роботи, були отримані наступні результати:

1. Проведено порівняльний аналіз найбільш розповсюджених фільтро-компенсуючих пристроїв. Встановлено, що для підвищення якості електроенергії в СЕП КП «ВТК» оптимальним рішенням є використання паралельних активних фільтрів, оскільки вони забезпечують ефективну компенсацію гармонік у широкому спектрі частот і адаптуються до змінного режиму роботи. Пасивні фільтри є економічним, але обмеженим рішенням для стабільних систем із передбачуваними гармоніками, тоді як поздовжньо-паралельні активні фільтри, хоч і забезпечують комплексну компенсацію гармонік та напруги, є занадто дорогими для застосування в умовах не критичних вимог.

2. Наведено оптимальний алгоритм роботи ПАФ для підвищення якості електроенергії в СЕП КП «ВТК». алгоритм дозволяє максимально точно виявляти та компенсувати гармоніки в режимі реального часу, забезпечуючи стабільність параметрів електромережі, зниження втрат енергії, подовження терміну служби обладнання та відповідність стандартам якості електроенергії.

3. Основним результатом науково-дослідної роботи є розроблена модернізована математична модель для дослідження ефективності роботи ПАФ для досягнення підвищення якості електричної енергії шляхом зменшення вищих гармонік в СЕП підприємств. Результат моделювання використання ПАФ в СЕП КП «ВТК» показав, що ПАФ ефективно зменшує рівень вищих гармонік за рахунок генерації компенсаційного струму, який протидіє гармонікам, створеним нелінійними навантаженнями. Це досягається шляхом аналізу параметрів мережі в реальному часі та синхронного введення компенсаційного сигналу в мережу, що забезпечує згладжування форми струму та напруги. Як видно з результатів моделювання, після увімкнення АФ спостерігається значне зменшення амплітуд вищих гармонік у спектрі струму, що сприяє поліпшенню якості електроенергії, зниженню втрат в електромережі та стабільній роботі СЕП.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Відповідно до схеми електричної мережі підприємства, показаної на рис. 4.1, та вихідних даних, приведених у табл. 4.1, 4.2, виконуємо усі необхідні розрахунки техніко-економічних показників спроектованої СЕП.

Таблиця 4.1 – Характеристики трансформаторних підстанцій

Підстанція	Тип трансформатора	Кількість трансформаторів	Факт. потужність підстанції, кВА
ТП 1	ТМ-630	1	420
ТП 2	ТМ-630	1	460
ТП 3	ТМ-630	1	405
ТП 4	ТМ-630	1	425

Таблиця 4.2 – Відомості про кабельні лінії

Найменування ліній	Довжина лінії, м	Марка кабелю	К-сть
ЦРП - ТП1	2200,00	АПвЭгаПу-10 3×35	1
ЦРП - ТП2	2150,00	АПвЭгаПу-10 3×35	1
ЦРП - ТП3	2400,00	АПвЭгаПу-10 3×35	1
ЦРП - ТП4	1600,00	АПвЭгаПу-10 3×35	1

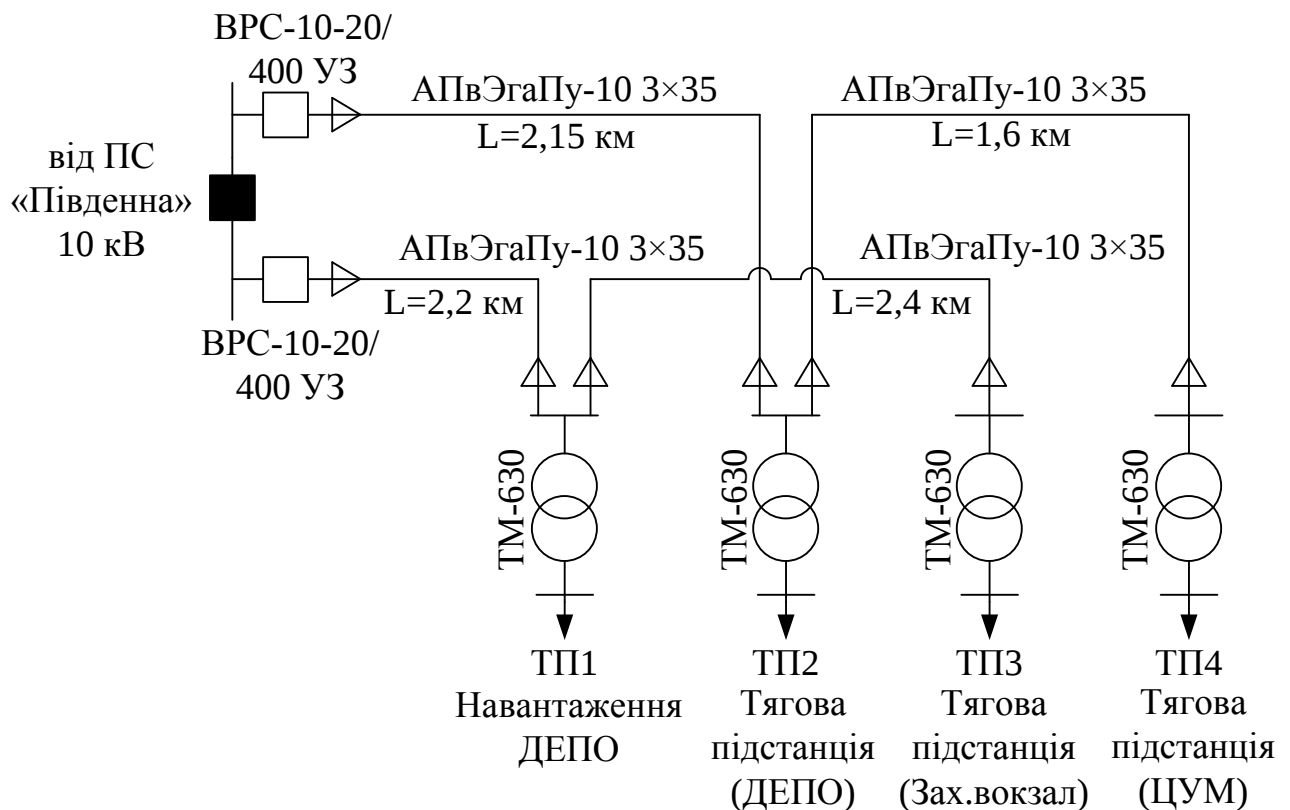


Рисунок 4.1 – Схема електропостачання підприємства

4.1 Розрахунок капіталовкладень в систему електропостачання

Розрахунок капіталовкладень в лінії електропередачі виконуємо за вартістю кабелів та їх прокладання, які наведені в табл. 4.3 і табл. 4.4 [5].

Капітальні вкладення для ліній електропередачі:

$$K_{\text{л}} = (K_{\text{пит}} \cdot n + K_{\text{прок}}) \cdot L, \quad (4.5)$$

де $K_{\text{пит}}$ - питома вартість на 1 км лінії, тис. грн./км [5];

$K_{\text{прок}}$ - питома вартість прокладання, тис. грн./км;

L - довжина лінії електропередачі, км.

n – кількість кабелів в траншеї, шт.

Визначимо вартість прокладання кабельної лінії від ЦРП до ТП1 в ґрунті II категорії без врахування переходів:

$$K_{\text{л1}} = (419,00 + 20,95) \cdot 2,2 = 967,89 \text{ (тис.грн.)}$$

Для інших ліній розрахунки виконуються аналогічно, результати розрахунків заносимо в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Розрахунок капіталовкладень для ліній електропередачі

Назва лінії	Марка кабелю	Кількість	L, км	$K_{\text{пит}}$, тис.грн	$K_{\text{прок}}$, тис.грн	Кл, тис.грн
ЦРП-ТП1	АПвЭгаПу-10 3×35	1	2,200	419,00	20,950	967,89
ЦРП-ТП2	АПвЭгаПу-10 3×35	1	2,150	419,00	20,950	945,89
ЦРП-ТП3	АПвЭгаПу-10 3×35	1	2,400	419,00	20,950	1055,88
ЦРП-ТП4	АПвЭгаПу-10 3×35	1	1,600	419,00	20,950	703,92
Разом						3673,58

Капітальні вкладення для електричних підстанцій будуть:

$$K_{\text{пс}} = \sum_{i=1}^l K_{\text{псі}} + K_{\text{пост}}, \quad (4.6)$$

де $K_{\text{псі}}$ – вартість однієї трансформаторної підстанції, тис. грн. [7];

$K_{\text{пост}}$ - постійні витрати, що практично не залежать від потужності підстанції і пов'язані з устроєм території, зі створенням майстерень, лабораторій і диспетчерських пунктів, з будівництвом житла тощо, тис. грн. Постійні витрати прийняти у розмірі 20 % від повної вартості всіх підстанцій.

Визначаємо величину капіталовкладень для трансформаторних підстанцій, наприклад, для ТП-1:

$$K_{\text{пс1}} = 473,6 + 94,72 = 568,32 \text{ (тис.грн.)}.$$

Результати розрахунків заносимо в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Розрахунок капіталовкладень для електричних підстанцій

№	Тип т-ра	Кількість	Код, тис.грн	$K_{\text{пост}}$, тис.грн	$K_{\text{пс}}$, тис.грн
КТП-1	ТМ-630	1	473,60	94,72	568,32
КТП-2	ТМ-630	1	473,60	94,72	568,32
КТП-3	ТМ-630	1	473,60	94,72	568,32
КТП-4	ТМ-630	1	473,60	94,72	568,32
Разом:					2273,28

Розрахуємо сумарну вартість вимикачів. Відповідно до схеми, зображеної на рис.1, кількість вимикачів 10 кВ – 3 шт.. Відповідно до рекомендацій приймаємо вартість вимикача 10 кВ рівною (68–84) тис. грн.. Сумарна вартість вимикачів:

$$K_{\text{В}} = 3 \cdot 75 = 225 \text{ (тис. грн.)}, \quad (4.7)$$

Вартість підстанцій з вимикачами:

$$K_{\text{пс}} = 2273,28 + 225 = 2498,28 \text{ (тис.грн.)}, \quad (4.8)$$

Відповідно сумарна величина капітальних вкладень в систему електропостачання підприємства.

$$K = 3673,58 + 2498,28 = 6171,86 \text{ (тис.грн.)}. \quad (4.9)$$

4.2 Розрахунок поточних витрат

4.2.1 Розрахунок потреби в робочій силі

Планова трудомісткість визначається як, люд.-год./рік:

$$T = \Pi \cdot t_{\text{норм}} \cdot h, \quad (4.10)$$

де Π – кількість ремонтів даного виду за рік, на одиницю обладнання;

$t_{\text{норм}}$ – норма трудомісткості поточного ремонту або огляду, люд.-год. [7];

h – кількість обладнання певного діапазону потужності, що належить до цього виду ремонтних робіт.

Проводимо розрахунки трудомісткості ремонту електрообладнання та заносимо їх результати до таблиці 3.6.

Планова трудомісткість технічного обслуговування кожної групи енергетичного устаткування і мереж складає, люд.-год./рік:

$$T_{\text{то}} = 12 \cdot t_{\text{пр}} \cdot K_{\text{ср}} \cdot K_{\text{зм}} \cdot h, \quad (4.11)$$

де 12 – кількість місяців у році;

$t_{\text{пр}}$ – планова (таблична) трудомісткість поточного ремонту одиниці устаткування люд.-год [5];

$K_{\text{ср}}$ – коефіцієнт складності ремонту, який показує частку трудомісткості поточного ремонту, необхідну для технічного обслуговування енергетичного обладнання і мереж на кожен місяць планованого року, 1/міс, $K_{\text{ср}} = 0,1$.

h – кількість обладнання в групі.

Проводимо розрахунки трудомісткості технічного обслуговування іншого електрообладнання та заносимо їх результати до таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Трудомісткість поточного ремонту та огляду

Обладнання	п, шт	Поточний ремонт			Огляд		
		К-сть на одиницю обладнання рем/рік	Норма трудомісткості люд.-год.	Заг. трудомісткість люд.-год.	К-сть на одиницю обладнання огл./рік	Норма трудомісткості люд.-год.	Заг. трудомісткість люд.-год.
Вимикач 10кВ	3	1	16	48	12	1	36
ТМ-630	4	0,33	120	158,4	12	20	960
Кабельна лінія 35 мм ² , км	8,35	1	46	384,1	1	11,5	96,025
Разом:				574,5			1080,02

Таблиця 4.6 – Трудомісткість технічного обслуговування і загальна трудомісткість

Обладнання	п, шт	Технічне обслуговування				Загальна трудомісткість обслуговування люд.-год.
		Змінність роботи	Коеф. склад. ремонтів Кср	К-сть місяців в році	Загал. трудомісткість люд.-год.	
Вимикач 10кВ	3	2	0,1	12	115,2	151,2
ТМ-1000	4	2	0,1	12	1152	2112
Кабельна лінія 95 мм ² , км	8,35	2	0,1	12	921,84	1017,865
Разом:					2189,04	3281,065

Відповідно знаходимо кількість експлуатаційних робітників, чол.:

$$H_{\text{обс}} = \frac{3280,1}{1900 \cdot 1,05} = 2,14. \quad (4.12)$$

та персоналу для ремонтних робіт, чол.:

$$H_{\text{тр}} = \frac{590,5}{1900 \cdot 1,1} = 0,28. \quad (4.13)$$

Приймаємо за нормами ПУЕ $H_{\text{тр}} = 3$ чол., $H_{\text{обс}} = 2$ чол.

4.2.2 Розрахунок витрат по заробітній платі

Фонд прямої заробітної плати:

а) для робітників, зайнятих на роботах по експлуатації й обслуговуванню енергообладнання і мереж, розраховується за формулою, грн./рік:

$$\Phi_e = H_{\text{обс}} \cdot \beta_n \cdot t_{\text{ге}} \cdot \Phi_d, \quad (4.14)$$

Годинну тарифну ставку рекомендується розраховувати за формулою:

$$t_{\text{ге}} = ((K3 + K4)/2) \cdot C_I, \quad (4.15)$$

де $K3, K4$ – тарифні коефіцієнти III та IV розрядів, відповідно, [5];

C_I – годинна тарифна ставка, що відповідає I розряду, визначається за формулою:

$$C_i = \frac{Z_{\min} \cdot k_{r,i}}{\Phi_H}, \quad (4.16)$$

$$C_I = 8000 \cdot 1/176 = 45,45 \text{ (грн./год.)}.$$

Тоді годинна тарифна ставка 3,5 розряду становитиме:

$$t_{\text{ге}} = ((1,18 + 1,27)/2) \cdot 45,45 = 55,682 \text{ (грн./год.)}, \quad (4.17)$$

Заробітна плата робітників-погодинників:

$$\Phi_e = 3 \cdot 0,9 \cdot 55,682 \cdot 1900 = 285647,727 \text{ (грн./рік)}, \quad (4.18)$$

б) для робітників, які виконують поточний ремонт енергоустаткування, фонд прямої заробітної плати розраховується за формулою, грн./рік:

$$\Phi_p = T_{\text{пр}} \cdot t_{\text{гр}}, \quad (4.19)$$

$$t_{\text{гр}} = ((K4 + K5)/2) \cdot C_I, \quad (4.20)$$

де $K4, K5$ – тарифні коефіцієнти IV та V розрядів, відповідно, [5].

Розраховуємо годинну тарифну ставку 4,5 розряду:

$$t_{\text{гр}} = ((1,27 + 1,36)/2) \cdot 45,45 = 59,77 \text{ (грн./год.)},$$

$$\Phi_p = 590,5 \cdot 59,77 = 35295,8 \text{ (грн./рік)}.$$

Фонд основної заробітної плати, грн./рік:

$$\Phi_o = \Phi(1+0.05+0.01+\alpha), \text{ (грн./рік)}, \quad (4.21)$$

де Φ - тарифний фонд Φ_e експлуатаційних робітників або фонд прямої заробітної плати Φ_p ремонтного персоналу, грн./рік;

0.01 - частка доплат за роботу у святкові дні;

0.05 - частка доплат за роботу в нічний час;

α - частка преміальних доплат для відповідної категорії робітників.

Величина основної заробітної плати для експлуатаційних робітників:

$$\Phi_{oe} = 285647,73 \cdot (1+0,05+0,01+0,2) = 359916,14 \text{ (грн./рік)}, \quad (4.22)$$

і для ремонтних:

$$\Phi_{op} = 35295,8 \cdot (1+0,05+0,01+0,25) = 46237,5 \text{ (грн./рік)}. \quad (4.23)$$

Величина додаткової заробітної плати визначається в розмірі 15% від фонду основної заробітної плати. Тому сумарна величина фонду з врахуванням додаткової заробітної плати складе, грн./рік:

$$\Phi_{од} = \Phi_o \cdot 1,15, \quad (4.24)$$

$$\Phi_{оед} = 359916,14 \cdot 1,15 = 413903,56 \text{ (грн./рік)},$$

$$\Phi_{орд} = 46237,5 \cdot 1,15 = 53173,12 \text{ (грн./рік)}.$$

З метою утворення фонду соціального страхування здійснюються нарахування на заробітну плату. З цього фонду кошти витрачаються на виплату по тимчасовій втраті працездатності, оплату відпусток по вагітності, санаторно-курортні лікування й організацію відпочинку, оздоровчі заходи для дітей працівників та інше.

Крім того, на заробітну плату здійснюються нарахування в пенсійний фонд та фонд зайнятості. Отже, витрати по заробітній платі ($C_{зп}$) розраховуються так, грн./рік:

$$C_{зп} = \Phi_{об} \cdot \left(1 + \frac{\beta_{п} + \beta_{з} + \beta_{с}}{100} \right), \quad (4.25)$$

де β_{Π} - нарахування в пенсійний фонд, $\beta_{\Pi} = 33\%$;

β_3 - нарахування у фонд зайнятості, $\beta_3 = 1,5\%$;

β_c - нарахування на соціальне страхування, $\beta_c = 1,5\%$.

Розраховуємо витрати по заробітній платі експлуатаційному персоналу:

$$C_{\text{зпе}} = 413903,56 \cdot \left(1 + \frac{33 + 1,5 + 1,5}{100} \right) = 562908,84 \text{ (грн./рік)},$$

і ремонтному персоналу:

$$C_{\text{зпр}} = 53173,1 \cdot \left(1 + \frac{33 + 1,5 + 1,5}{100} \right) = 72315,4 \text{ (грн./рік)}.$$

4.2.3 Планування вартості матеріалів, що витрачаються

Необхідні для розрахунку дані заносимо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Розрахунок вартості матеріалів, включених у норму витрат

Тип обладнання	Вартість витрат матеріалів грн. ремонт	Вартість витрат матеріалів грн. обслуговування
ТМ-630	35950,464	479339,52
КЛ	6376,06	16896,559
Разом	42326,52	496236,08

Вартість матеріалу на технічну операцію:

$$C_m = 0,01 \cdot \left(\sum_{i=1}^n C_{oi} \cdot T_i + L \cdot C_{\text{ЛЮ}} \right), \quad (4.26)$$

де C_{oi} – питома вартість витратних матеріалів на обслуговування i -го виду трансформаторів,

T_i – трудомісткість обслуговування i -го виду трансформаторів,

L – сумарна довжина кабелів,

$C_{\text{ЛЮ}}$ – питома вартість матеріалів на обслуговування кабелів.

Отже, вартість матеріалів на ремонт: $C_{\text{мпр}} = 496236,08$ (грн/рік);

і вартість матеріалів на технічне обслуговування: $C_{\text{мто}} = 42326,52$ (грн / рік).

Отже, можна розрахувати:

витрати на обслуговування електроустановок і мереж, тис. грн/рік:

$$C_{\text{обс}} = C_{\text{зпе}} + C_{\text{мто}}, \quad (4.27)$$

$$C_{\text{обс}} = 562908,84 + 496236,08 = 1059144,9 \text{ (грн/рік);}$$

та витрати на їх поточний ремонт, грн/рік:

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{зпр}} + C_{\text{мпр}}, \quad (4.28)$$

$$C_{\text{пр}} = 72315,44 + 42326,52 = 114641,96 \text{ (грн/рік).}$$

4.2.4 Визначення амортизаційних відрахувань і інших витрат

Знаходимо амортизаційні відрахування за формулою:

$$C_a = a \cdot K, \quad (4.29)$$

де a – норма амортизації, %

K – капіталовкладення, грн.

$$C_a = 0,06 \cdot 6171862,5 = 370311,75 \text{ (грн/рік).}$$

Окремою складовою в кошторисі річних поточних витрат є інші витрати:

$$C_{\text{ip}} = \beta_{\text{ip}} (C_{\text{обс}} + C_{\text{пр}} + C_a); \quad (4.30)$$

де β_{ip} - коефіцієнт відрахувань на інші витрати.

$$C_{\text{ip}} = 0,25 \cdot (1059144,92 + 114641,96 + 370311,75) = 386024,66 \text{ (грн/рік).}$$

4.3. Розрахунок собівартості електроенергії

4.3.1 Розрахунок річного споживання і втрат електроенергії. Розрахунок оплати за електроенергію

Розрахунок обсягу споживання визначається, виходячи з розрахункової потужності, яка визначається як добуток установленної (номінальної) потужності усіх електроприймачів, коефіцієнта попиту і кількості годин використання максимуму навантаження, тис. кВт·год./рік:

$$E_{ai} = P_p \cdot T_{mi}, = K_p \cdot P_{ном} \cdot T_{mi}, \quad (4.31)$$

Для прикладу визначимо річні витрати активної електроенергії для Прохідної:

$$E_{a1} = 4,88 \cdot 2500 = 12207 \text{ (кВт год./ рік)}.$$

Аналогічно визначаємо річні витрати активної електроенергії для інших цехів. Результати розрахунків заносимо в таблицю 4.9.

Таблиця 4.9 – Річні витрати активної електроенергії по цехах

№	Назва цеху	К-сть змін	Sp, кВА	Tм, год.	cos φ	Pp, кВт	Ea, кВт·год./рік
1	Продуктовий магазин	1	5,52	2500	0,85	4,88	12207
2	Столярний цех	1	22,87	2500	0,75	17,65	44116
3	Електроцех 1	1	26,07	2500	0,65	18,15	45367
4	Електроцех 2	1	16,03	2500	0,65	11,35	28375
5	Побутові приміщення	1	10,09	2500	0,85	8,88	22206
6	Управління ТТУ	1	28,84	2500	0,85	25,20	62995
7	Цех планового ремонту	1	62,96	2500	0,8	52,30	130759
8	Механічний цех	1	78,49	2500	0,7	57,99	144976
9	Цех технічного огляду	1	35,48	2500	0,8	31,89	79718
10	Механічна майстерня	1	59,48	2500	0,7	49,31	123280
11	Пилорама	1	12,64	2500	0,65	9,06	22653
12	Ділянка щоденних оглядів	1	19,73	2500	0,85	17,85	44617
13	Склад	1	10,32	2500	0,8	9,42	23539
14	Гараж	1	3,69	2500	0,8	3,34	8359
15	Шиномонтажний цех	1	8,87	2500	0,65	6,75	16883
16	Допоміжна будівля 1	1	28,50	2500	0,7	21,93	54828
17	Допоміжна будівля 2	1	9,12	2500	0,75	7,02	17556
	Разом					352,974	882435

Необхідно також визначити річні витрати реактивної електроенергії.

Втрати електроенергії в лініях розраховуємо так:

$$\Delta E_L = 3 \cdot n \cdot I_m^2 \cdot R \cdot \tau \cdot 10^{-3}, \quad (4.32)$$

де I_m – максимальний струм у лінії, А;

τ – час максимальних втрат, год./рік.

R – активний опір проводу або кабелю однієї фази, Ом;

$$R = r_0 \cdot L ; \quad (4.33)$$

де r_0 – питомий опір однієї фази кабелю, Ом / км (див. табл. 10.25 [2]),

Величина τ визначається за часом використання максимального навантаження:

$$\tau_m = \left(0,124 + \frac{T_m}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = \left(0,124 + \frac{2500}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 1225,31 \text{ (год)}, \quad (4.34)$$

Для лінії ГПП –ТП1:

Активний опір однієї фази кабелю від ГПП до ТП1:

$$R = 2,2 \cdot 0,868 = 1,91 \text{ Ом.}$$

Відповідно втрати електроенергії в лінії ГПП-ТП1:

$$\Delta E_{\text{л}} = 3 \cdot 2 \cdot 24,25^2 \cdot 1,91 \cdot 1225,3 \cdot 10^{-3} = 4127,51 \text{ (кВт·год./рік)}.$$

Аналогічно виконуємо розрахунок втрат електроенергії в інших лініях і результати заносимо до таблиця 4.10.

Таблиця 4.10 – Втрати електроенергії в лініях

Лінія	Марка кабелю	К-сть ліній	L, км	I _м , А	R, Ом	τ , год./рік	R _{пит} , Ом/км	$\Delta E_{\text{л}}$, кВт·год.
ЦРП-ТП-1	АПвЭгаПу-10 3×35	1	2,200	24,25	1,910	1225,314	0,868	4127,51
ЦРП-ТП-2	АПвЭгаПу-10 3×35	1	2,150	26,56	1,866	1225,314	0,868	4838,62
ЦРП-ТП-3	АПвЭгаПу-10 3×35	1	2,400	23,38	2,083	1225,314	0,868	4186,86
ЦРП-ТП-4	АПвЭгаПу-10 3×35	1	1,600	24,54	1,389	1225,314	0,868	3073,72
Разом								16226,7

Втрати електроенергії в ТП визначають за формулою, тис. кВт·год./рік:

$$\Delta E_T = n \cdot \Delta P_{\text{xx}} \cdot T_p + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{\text{кз}} \cdot \left(\frac{S_{\text{ф}}}{S_{\text{н}}} \right)^2 \cdot \tau, \quad (4.36)$$

де n - кількість трансформаторів;

$\Delta P_{\text{кз}}$ і ΔP_{xx} – величини номінальних втрат у трансформаторах, відповідно, при короткому замиканні і холостому ході, кВт;

Відповідно втрати енергії в трансформаторах ТП-1:

$$\Delta E_T = 1,31 \cdot 8760 + 8,5 \cdot \left(\frac{420}{630} \right)^2 \cdot 1225,3 = 16104,56 \text{ (кВт·год/рік)}.$$

Для інших ТП проводимо аналогічні розрахунки і їх результати у табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Втрати енергії в трансформаторах

№	Тип	ш	ΔP_x	ΔP_k	S_p	S_n	ΔE_T
КТП-1	ТМ-630	1	1,31	8,5	420	630	16104,56
КТП-2	ТМ-630	1	1,31	8,5	460	630	17028,26
КТП-3	ТМ-630	1	1,31	8,5	405	630	15779,83
КТП-4	ТМ-630	1	1,31	8,5	425	630	16215,43
разом							65128,08

Загальна потреба підприємства в електроенергії, кВт·год./рік:

$$E = E_a + \Delta E_{\text{л}} + \Delta E_T; \quad (4.37)$$

$$E = 882435 + 16226,71 + 65125,08 = 963789,89 \text{ (кВт·год./рік)}.$$

Оплата за спожиту електроенергію на напрузі 35 кВ:

$$\Pi_1 = 6,649 \cdot 963789,89 = 6408238,98 \text{ (грн.)}; \quad (4.38)$$

4.3.2 Розрахунок собівартості електроенергії

Собівартість корисної, споживаної підприємством кіловат-години електроенергії, коп./кВт·год.:

$$S = \frac{C_{\text{сум}} \cdot 100}{E_a}, \quad (4.39)$$

де $C_{\text{сум}}$ – величина сумарних витрат підприємства на електроенергію, тис.грн/рік;

E_a – річна кількість корисно споживаної підприємством електроенергії, тобто без врахування втрат у лініях і трансформаторах, кВт·год./рік.

Отже, загальні (сумарні) витрати підприємства на електроенергію за рік будуть складати, тис. грн./рік:

$$C_{\text{сум}} = \Pi + C_{\text{п}}, \quad (4.40)$$

де Π – оплата за спожиту електроенергію;

C_{Π} – річні витрати підприємства при передаванні електроенергії.

Річні витрати промислового підприємства, зв'язані з передаванням і розподілом електричної енергії, включають такі складові, тис.грн/рік:

$$C_{\Pi} = C_{\text{обс}} + C_{\text{пр}} + C_a + C_{\text{ір}}, \quad (4.41)$$

де $C_{\text{обс}}$ – витрати підприємства на матеріали та зарплату персоналу при обслуговуванні електромереж і устаткування, грн/рік.;

$C_{\text{пр}}$ – річні витрати на поточний ремонт устаткування і мереж, грн/рік;

C_a – амортизаційні відрахування підприємства, грн/рік;

$$C_{\Pi} = 1059144,92 + 114641,96 + 370311,75 + 386024,66 = 1930123,28 \text{ (грн/рік)}.$$

Отже, сумарні витрати визначаються так:

$$C_{\text{сум}} = 6408238,97 + 1930123,28 = 8338362,26 \text{ (грн/рік)}.$$

Отже, собівартість електроенергії:

$$S = \frac{8338362,2 \cdot 100}{882435} = 844,9 \text{ (коп./кВт} \cdot \text{год.)}.$$

Для наочності результати розрахунків зводимо в таблицю 4.12.

Таблиця 4.12 – Результати розрахунків

Показники	Позначення	Величина показників	Одиниця вимірювання
К-сть корисно спожитої ел.енергії	E_a	882435,1	кВт·год.
Річне споживання ел.енергії із втратами	E	963789,89	кВт·год.
Плата за електроенергію	Π_1	6408238,977	грн.
Витрати на передачу і розподіл ел.енергії	C_{Π}	1930123,28	грн.
Сумарні витрати під-ва	$C_{\text{сум}}$	8338362,26	грн.
Собівартість ел.енергії	S	844,93	коп/кВт·год.

В даному розділі дипломної роботи було проведено розрахунок основних техніко-економічних показників спроектованої СЕП підприємства та розраховано собівартість електричної енергії яка склала 844,93 коп/кВт·год.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У випусковій кваліфікаційній роботі розробляється система електропостачання КП «Вінницька транспортна компанія». КП «Вінницька транспортна компанія» є деревообробним підприємством, яке займає значну територію, має у своєму складі велику кількість обладнання з різними виробничими потужностями, умовами експлуатації, та характером середовища, в якому встановлене дане обладнання. Підприємство відноситься до I категорії електропостачання [2].

На оперативно-ремонтний персонал, який здійснює технічне обслуговування та експлуатацію електричного обладнання цеху з виробництва гранульованого палива (пелет), впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [24]:

а) фізичні:

- підвищена та знижена температура повітря робочої зони;
- підвищена та знижена вологість повітря у робочій зоні;
- підвищена та знижена рухливість повітря;
- підвищена запиленість повітря робочої зони;
- недостатність природного освітлення;
- недостатня освітленість робочої зони;

підвищений рівень шуму на робочому місці;

небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може відбутись через тіло людини;

підвищений рівень вібрації,

в) психофізіологічні:

- фізичні перевантаження (динамічні та статичні)
- нервово-психічні перевантаження (монотонність праці).

Актуальність проведення заходів з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях обумовлена необхідністю забезпечення здоров'я та життя працівників, мінімізації ризиків виникнення аварій, катастроф чи інших небезпечних ситуацій, а також дотриманням вимог чинного законодавства.

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць.

Схема робочого приміщення одного з цехів зображена на рисунку 5.1. Загальна площа приміщення 105м^2 , висота стелі 5м. У приміщенні знаходиться 4 електропривода. Кожен станок має окреме робоче місце для працівника.

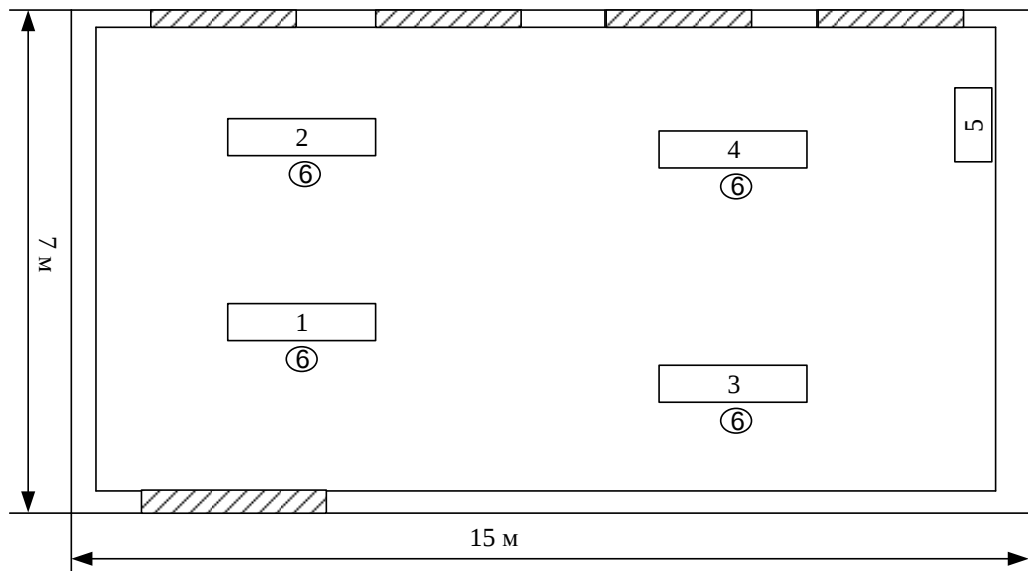


Рисунок 5.1. Робоче приміщення

Умовні позначення: 1,2 – станок круглопильний; 3 – станок фугувальний; 4 – станок свердильний; 5 – витяжка; 6 – робочі місця працівників.

5.1.2 Електробезпека

Живлення здійснюється від п/ст 10/0,4 кВ кабельними лініями, що прокладені в траншеях. У приміщенні цеху використовується трифазна чотирьохпровідна мережа із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В. Відповідно з [27] умови праці за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у робочому приміщенні є струмопровідною.

Згідно із ДСТУ Б В.2.5-82:2016, в якості захисту від ураження людей електричним струмом застосовується заземлення. Крім того безпека експлуатації при нормальному режимі роботи забезпечується застосуванням ізолювальних пристроїв, огороженням струмоведучих частин, використанням малих напруг.

Особи, що обслуговують електроустановки повинні користуватися ЗІЗ - спецвзуття, рукавиці. Засоби захисту необхідно періодично випробувати, їх слід захищати від механічних пошкоджень, впливу факторів, що погіршують їх діелектричні властивості.

Загальні вимога безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з ГОСТ 12.2.003-74, в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання любого виду і призначення.

Електропривід насосів, вентиляторів, іншого обладнання повинний бути виконаний відповідно до Правил устрою електричних установок.

В установках напругою до 1 кВ огороження роблять суцільними. Безпечні відстані між огороженнями і не ізолюваними струмоведучими частинами регламентується ПУЕ [2] і в установках до 1 кВ із суцільними огороженнями - 5см. Висота розміщення не огорожених струмоведучих частин залежить від значення напруги і рівня підготовки людей, що працюють з електроустаткуванням. Струмоведучі частини напругою до 1 кВ у місцях, де працюють люди, висота розміщення повинна бути не менше 3,5 м. Постійний контроль за ізоляцією, тому що протягом часу відбувається старіння ізоляції, що може привести до пробоя і створити небезпеку при дотику людини до ізолюваних проводів. Використовують наступні кольори для маркування ізоляції: чорна - для силових ланцюгів; червона - для ланцюгів керування.

Обов'язкова установка захисного заземлення і занулення та захисного відключення. При роботі з електроустаткуванням використовуються основні і додаткові електрозахистні засоби. До основних відносяться: ізолюючі штанги; ізолюючі і струмовимірювальні кліщі; слюсарно-монтажні інструменти з ізолюючим руків'ям. До додаткових відносяться: діелектричні рукавички; переносне заземлення; огорожуючі пристосування; плакати та знаки безпеки.

На ключах керування і приводах роз'єднувачів віддільників і вимикачах навантаження, а також на підставках запобіжників, за допомогою яких може бути подана напруга до місця робіт, вивішують плакат: "Не включати - працюють люди".

На вентилях, що закривають доступ повітря в пневматичні приводи таких апаратів, вивішується плакат: "Не відкривати - працюють люди" [27].

Передбачена проектом апаратура повинна експлуатуватися у відповідності з паспортними значеннями номінального струму та напруги. В процесі експлуатації слід постійно контролювати стан контактних сполучень та ізоляції апаратури, відсутність слідів дуги та оплавлення ошинування, опір ізоляції силових та освітлювальних мереж, правильність підключення. На всіх підготовлених місцях роботи після накладається заземлення вивішується плакат "Працювати тут".

На стругальних деревообробних верстатах ножові вали повинні бути збалансовані, мати циліндричну форму, а також пристрої для швидкого та надійного закріплення ножів на ножовому валу — для запобігання вилітання ножів. Вставні стружколамачі повинні щільно прилягати до поверхні ножів по всій їхній довжині, бути однакової форми і не мати вироблених та вищерблених ділянок. Механізм подавання заготовок повинен бути заблокований з ножовими валами верстата так, щоб зупинення будь-якого з них викликало зупинення механізму подавання оброблюваного матеріалу.

У разі стругання на верстатах з ручним подаванням заготовок найменша довжина оброблюваного матеріалу повинна на 100 мм перевищувати відстань між осями подавальних пристроїв. Стругання на таких верстатах заготовок коротше 400, вужче 50 або тонше 30 мм повинно виконуватись із застосуванням спеціальних колодок-штовхачів.

Поздовжньо-фрезерні стругальні верстати повинні мати обмежувачі граничного перерізу заготовок, що пропускаються через верстат. Обмежувачі повинні установлюватись перед подавальними пристроями. Подавальні механізми необхідно закривати щитками або кожухами, а неробочу частину нижніх ножових валів — висувним огороженням відповідно до ширини оброблюваного матеріалу. Леза ножів не повинні виступати за краї стружколамачів більше ніж на 1,5 мм і повинні описувати коло одного діаметра.

Верстати, обладнані заточувальними пристроями, повинні мати блокувальний пристрій, — для унеможливлення ввімкнення привода шліфувального круга та

переміщення каретки цього пристрою під час обертання ножового вала. У разі відсутності на фугувальному верстаті автоподавача за готової робоча частина ножового вала повинна бути повністю закрыта автоматично діючим огородженням, яке повинно відкривати ножовий вал тільки на ширину оброблюваної деталі. Неробоча частина різального інструмента фугувальних та чотиристоронніх стругальних верстатів повинна бути повністю закрыта висувним огородженням відповідно до ширини оброблюваних заготовок.

Забороняється закріплювати напрямну лінійку струбцинами.

Краї столів біля щілини ножового вала фугувальних верстатів необхідно забезпечити закріпленими врівень з поверхнею стола сталевими гостроскошеними накладками, які повинні мати рівні, без вищербин та зазубрин краї. Відстань між кромками накладок та траєкторією, що описується лезами ножів, не повинна перевищувати 3 мм. Рейсмусові та чотиристоронні стругальні верстати повинні мати блокувальний пристрій — для запобігання можливості переміщення стола по висоті механічним приводом під час обертання ножового вала. Для безпечного пропускання через рейсмусовий верстат одночасно кількох заготовок, що відрізняються за товщиною, передні подавальні вальці та передні притискачі повинні бути секційними. Незалежно від наявності чи відсутності секційних подавальних вальців усі верстати повинні мати запобіжні упори. На передньому краю стола рейсмусового верстата повинна бути додатково установлена завіса із затримувальних хитних планок. У разі вимкнення противикидних пристроїв повинен автоматично вимикатись привод подавання заготовок у напрямку обробки.

Чотиристоронні стругальні верстати повинні мати реверсування — для виведення оброблюваної заготовки. Рейсмусові верстати повинні мати вбудоване пристосування — для установлювання, заточування та виправлення ножів. Неробочу частину шліфувального круга заточувального пристосування необхідно повністю обгородити.

В умовах сучасних виробничих процесів та технологій, що часто супроводжуються підвищеними ризиками, систематична робота в цьому напрямку сприяє підвищенню рівня безпеки, зменшенню економічних втрат через травматизм

і надзвичайні події, а також створенню комфортних і безпечних умов праці, що є ключовим фактором сталого розвитку підприємств і організацій.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [29].

Мікроклімат цеху характеризується наступними чинниками: температурою повітря, відотною вологістю повітря, швидкістю руху повітря, інтенсивністю теплового випромінювання.

Робота оператора верстата відноситься до категорії Іб по важкості праці.

Енерговитрати за цією категорією становлять - до 140-174 Вт.

Допустимі норми температури, відотної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень приведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1- Допустимі норми параметрів повітря

Період року	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість	Швидкість руху, X
		Верхня межа	Нижня межа		
Холодний	Іа	20-24	17-25	75	не більше 0,2
Теплий		21-28	19-30	55 при 27 °С	0,1-0,3

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³.

При деревообробці виділяється пил нетоксичний. При роботі системи вентиляції, провітрюванні у приміщенні може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при технологічних процесах в цеху і знаходяться повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК відповідно до [23] наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери, в робочій зоні верстатника

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони проектом передбачені наступні рішення [23]:

- застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами , які встановленні безпосередньо на ділянках біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення;

необхідно проводити контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні;
застосовувати природну вентиляцію: організовану і неорганізовану.

5.2.3 Виробниче освітлення

Природне освітлення.

Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 [31] розряд зорової роботи IV, підрозряд «в» таблиця 5.3.

Таблиця 5.3 - Норми освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк			
						Штучне освітлення		Природне	Сумісне
						Комбіноване	Загальне		
Середньої точності	Вище 0,5 до 1	IV I	в	Середній, малий	Середній, темний	450	200	1,5	0.5

Підприємство знаходиться у Вінницькій області, система природного освітлення цеху деревообробки відноситься до бокової. Характеристика робіт у фарбувальній камері - середньої точності.

Нормоване значення КПО для даного виробничого приміщення розраховуємо за формулою:

$$e_N = e_H + m_N. \quad (5.1)$$

де m_N - коефіцієнт світлового клімату, $m_N = 0,95$.

Природне $e_N = 1,5 \cdot 0,95 = 1,425$.

Сумісне $e_N = 0,5 \cdot 0,85 = 0,425$.

Природне освітлення одностороннє і здійснюється через вікна, які орієнтовані на схід.

Штучне освітлення.

Правильна експлуатація установок природного і штучного освітлення відіграє важливу роль для створення високого рівня освітленості в приміщеннях і економії електроенергії, що витрачається на штучне електричне освітлення. Норми освітленості при штучному освітленні занесені до таблиці 6.2

Для освітлення вибираємо світильники прямого світла ЛПО-02 з двома люмінесцентними лампами. Висота підвісу світильників над поверхнею 4,5 м.

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

5.2.4 Виробничий шум

На деревообробному комбінаті джерелом шуму є обладнання, машини, механізми та верстати - механічний шум (постійний та непостійний).

Шум - це хаотична сукупність різних за силою і частотою звуків, що заважають сприйняттю корисних сигналів і негативно впливають на людину.

Постійна дія сильного шуму може не лише негативно вплинути на слух, але й викликати інші шкідливі наслідки - дзвін у вухах, запаморочення, головний біль, підвищення втоми, зниження працездатності [23].

Шум має кумулятивний ефект, тобто акустичні подразнення, накопичуючись в організмі людини, все сильніше пригнічують нервову систему. Тому перед втратою слуху від впливу шумів виникає функціональний розлад центральної нервової системи. Особливо шкідливий вплив шуму позначається на нервово-психічній діяльності людини. Процес нервово-психічних захворювань вищий серед осіб, що працюють у гомінких умовах, ніж у людей, що працюють у нормальних звукових умовах.

Відповідно до [37] рівень звуку вимірюється в децибелах і визначається по формулі:

$$L = 10\lg(I/I_0) = 10\lg(p/p_0) = 10\lg(U/U_0) \quad (5.2)$$

де L - рівень шуму, дБ;

p - звуковий тиск, Па;

U_0 - коливальна швидкість, 5-10 м/с;

P_0 - нульове значення звукового тиску, умовно прийняте рівним $2 \cdot 10^5$ Па.

При санітарно-гігієнічному нормуванні шуму використовують два методи:

нормування за гранично допустимим спектром шуму;

нормування рівня звуку за шкалою А шумоміра.

За характером спектру шум - широкопasmовий з безперервний спектром шириною більше октави; за тональною характеристикою постійний; за походженням - гідродинамічний.

Допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку на робочих місцях приймаються за вимогами СН 32.23-85 і наведені в таблиці 5.4 .

Для зменшення рівня шуму до допустимого в цеху двигуни виконуються в металевому кожусі, а також виконують змащення, застосовують пластмасові деталі, використовують протишумні навушники, які закривають вушну раковину.

Таблиця 5.4 - Допустимі рівні звукового тиску

Робоче місце	Рівні звукового тиску в октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц									Рівні звукового тиску, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
На постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

5.2.5 Виробничі вібрації

Вібрацією називають механічні коливання пружних тіл або систем, коли відбувається переміщення центра їх ваги в просторі відносно статичного стану. Загальна вібрація передається на тіло через опорні поверхні людини, що стоїть чи сидить (підшви ніг або сидниці).

Таблиця 5.5 - Допустимі рівні вібрації на постійних місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація:	1,3 108	0,45 99	0,22 93	0,2 92	0,2 92	0,2 92	-	-	-	-
На постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях										

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с 10-2, знаменнику - логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Основними методами колективного віброзахисту є зниження вібрації шляхом дії на джерело виникнення: відстрочка від режиму резонанс; динамічне гасіння

коливань, заміна конструктивних елементів уставок і будівельних конструкцій. Засоби індивідуального захисту діляться на засоби для ніг, рук та тіла працюючого.

5.2.6 Психофізичні фактори

Маса вантажу, що постійно підіймається та переміщується вручну, кг. складає:

для чоловіків – до 30;

для жінок – до 7.

Робоча поза.

Перебування в незручній та/або фіксованій позі більше 50% часу зміни; перебування у вимушеній позі (на колінах, навпочіпки тощо) більше 25% часу зміни перебування в позі «стоячи» більше 80 % часу зміни. Що перевищує допустимі норми, і є критичними.

Нахили тулуба (вимушені, більше 30°), кількість за зміну 101-300, що також критично.

Переміщення у просторі (переходи, обумовлені технологічним процесом, протягом зміни), км. складає.

По горизонталі – до 12;

По вертикалі – до 8; що у свою чергу є критичним .

Характер виконуваної роботи, робота за встановленим графіком з можливим його коригуванням під час діяльності.

Сенсорні навантаження.

Навантаження на слуховий аналізатор при виробничій необхідності сприйняття мови чи диференційованих сигналів складає від 50% до 70% що у свою чергу є незначним перевищенням допустимої норми.

Організм людини може безхворобливо переносити вплив небезпечних та шкідливих чинників тільки доти, доки вони не перевищують оптимальних і допустимих рівнів та часу витривалості, що зумовлено функціональними можливостями людського організму.

Дослідження фізіології праці показують, що для виконання тривалої фізичної роботи вибрано важкі величини темпу і навантажень, при цьому стомлення буде виникати швидше, що у свою чергу відобразатиметься на робочому персоналі.

При роботі в умовах перевищення гігієнічних нормативів відбувається зниження працездатності та втомлення, яке суб'єктивно сприймається як втома.

Для зменшення дії психофізіологічних чинників небезпеки в процесі праці необхідно переглянути технологічний процес, та умови праці робочого персоналу. Провести зміну умов праці шляхом зменшення часу перебування персоналу під дією шкідливих факторів а саме:

збільшення кількості змін працівників,

зміна технологічного процесу;

Для збереження високої і стійкої працездатності потрібно застосувати дві взаємодоповнюючі форми чергування періодів праці і відпочинку на виробництві:

1 – обідня перерва в середині робочого дня;

2 – технологічні короткочасні перерви.

При виконанні особливо важких робіт більш ефективним є сполучення роботи ротягом 15...20 хв із відпочинком такої ж тривалості.

При роботах, що вимагають великої нервової напруги й уваги, швидких і точних рухів рук, доцільне введення більш частих, але більш коротких перерв тривалістю 5...10 хв.

Організація процесу трудової діяльності людини логічно зв'язана також з виникненням ще одного виду технологічних перерв – мікропауз. Це нерегламентовані перерви, що виникають об'єктивно між послідовними наступними операціями і діями людини.

Таким чином, мікропаузи виникають мимовільно і, у свою чергу, забезпечують підтримку оптимального темпу роботи і високого рівня працездатності. Статистика показує, що у залежності від характеру і важкості праці мікропаузи складають 9...10 % робочого часу.

Варто враховувати індивідуальні якості працюючого, оскільки помилки на виробництві, а також нещасні випадки є наслідком зіткнення якостей людини з особливостями конкретної професійної діяльності. З метою поліпшення безпеки і захисту здоров'я працівників під час роботи необхідно проводити професійний психофізіологічний відбір для широкого кола професій.

5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи СЕП КП «Вінницька транспортна компанія» в умовах надзвичайних ситуацій

В елементній базі СЕП під дією іонізуючих випромінювань можлива зміна майже всіх електричних і експлуатаційних характеристик, що залежить від протікання процесів іонізації і порушення структури матеріалів.

В блоках СЕП можуть початися відновлювані чи не відновлювані зміни через деякий час після радіоактивного зараження при рівнях радіації значно нижчих від критичних. Імпульсна напруга найбільш легко виникає в високоомних неекранових і несиметричних колах. В результаті наявності таких кіл імпульсу струму чи напруги проникає в систему і спричинює пошкодження, ступінь яких залежить від чутливості складових системи вузлів.

Електромагнітний імпульс являє собою велику небезпеку для апаратури, добре захищеної від дії інших уражаючих факторів. Тому слід пам'ятати про те, що ЕМІ проникає в захищені блоки апаратури і вона може вийти з ладу, знаходячись в надійно захищених спорудах. Електромагнітний імпульс пробиває ізоляцію, випалює елементи електросхем радіоапаратури, викликає коротке замикання в радіопристроях тощо. Найбільш часто виходять з ладу напівпровідникові прилади, резистори, конденсатори. В резисторах електромагнітний імпульс викликає іскріння в міжконтактних з'єднаннях, що приводить до локального нагріву і порушує опір покриття. В конденсаторах електромагнітний імпульс викликає нагрів шару металізації і його вигорання, порушення контактів між обкладинками і виводами.

5.3.1 Дослідження безпеки роботи СЕП КП «Вінницька транспортна компанія» в умовах впливу іонізуючих випромінювань

Нормальна робота СЕП буде залежати від таких елементів, як транзистори, мікросхеми, резистори, конденсатори, діоди.

За критерій безпеки роботи електричного обладнання в цих умовах приймається таке значення граничного значення рівня радіації (Рзв, Р/год), при якому можуть виникнути тимчасові зміни, але система буде працювати з потрібною якістю. Отримані значення занесемо до таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 - Граничні рівні радіації для обладнання СЕП

Блоки СЕП	Елементи пристрою	Р _{гр1} , Р/год	Р _{гр} , Р/год
Блок живлення	Мікросхема 78В05	105	
	Транзистор СП1-10,	105	
Блок керування	Діод Д220А	104	
	Конденсатор Х7R	106	
	Резистор R12	107	104
Силові елементи	Транзистори, Т143-1000	105	
	Дросель ТРА11	105	
	Реактор ВР2МС	105	

Визначаємо граничне значення потужності експозиційної дози гамма-випромінювання – Р_{гр}, по мінімальних значеннях коефіцієнта послаблення радіації К_{посл}, та потужності експозиційної дози Р_{зв}.

$$Р_{гр}=Р_{зв} \cdot К_{пос} \cdot К_{н}; \quad (5.3)$$

$$Р_{гр}=104 \cdot 1 \cdot 0,9=9000 \text{ (Р/год)}.$$

Можлива експозиційна доза опромінення в заданих умовах:

$$D_{м} = \frac{2 \cdot P_{1max} \cdot (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{K_{пос}}; \quad (5.4)$$

Допустимий час роботи СЕП визначається за формулою:

$$t_{доп} = \left(\frac{D_{гр} \cdot K_{посл} + 2 \cdot P_{1max} \sqrt{t_p}}{2 \cdot P_{1max}} \right)^2; \quad (5.5)$$

$$t_{доп} = \left(\frac{10^4 \cdot 1 + 2 \cdot 6,73 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 6,73} \right)^2 = 743,94 \text{ (год)}.$$

Отже, допустимий час роботи системи електропостачання складатиме 743,94 годин при рівні радіації 9000 Р/год.

5.3.2 Дослідження безпеки роботи СЕП КП «Вінницька транспортна компанія» в умовах дії електромагнітного імпульсу

Визначаємо допустимі коливання напруги живлення:

$$U_{\text{д}} = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{ж}}}{100} \cdot N; \quad (5.6)$$

де $U_{\text{ж}}$ – напруга живлення, В;

N – допустиме відхилення напруги, %.

$$U_{\text{д}} = 220 + \frac{220}{100} \cdot 15 = 253 \text{ (В)}.$$

Вертикальна складова напруги наведення на струмопровідних частинах СЕП:

$$U_{\text{в}} = \frac{U_{\text{д}}}{100} = 2,53 \text{ (В)}.$$

Знаходимо горизонтальну складову напруженості електричного поля, при якому коефіцієнт безпеки знаходиться в межах допустимого:

$$UB = E_{\Gamma} \cdot l_{\text{в}}; \quad (5.7)$$

Звідки:

$$E_{\Gamma} = \frac{U_{\text{в}}}{l_{\text{в}}}; \quad (5.8)$$

$$E_{\Gamma} = \frac{2,53}{2,2} = 1,15 \text{ (В / м)}.$$

Знаходимо вертикальну складову напруженості електричного поля, при якому коефіцієнт безпеки знаходиться в межах допустимого:

$$E_{\Gamma} = 10^{-3} \cdot E_{\text{в}}; \quad (5.9)$$

Звідки:

$$E_{\text{в}} = \frac{E_{\Gamma}}{10^{-3}}; \quad (5.10)$$

$$E_{\text{в}} = \frac{1,15}{10^{-3}} = 1150 \text{ (В / м)}.$$

Отже, обладнання СЕП буде безпечно працювати, якщо вертикальна складова напруженості електричного поля не буде перевищувати 1150 В/м.

5.4 Розробка заходів по підвищенню безпеки роботи СЕП КП «Вінницька транспортна компанія» в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

В даному розділі було проведено оцінку безпеки роботи СЕП КП «Вінницька транспортна компанія» в умовах дії загрозливих чинників НС.

Розглянемо способи підвищення безпеки роботи обладнання системи електропостачання.

Для боротьби з впливом іонізуючого опромінення використовують алюмінієві сплави, леговані елементами з високим атомним номером (лантаноїдами і рідкоземельними елементами), сплави на основі тугоплавких і рідкоземельних елементів і багатошарові матеріали. Також для боротьби з впливом іонізуючого випромінювання можна використати новітній вітчизняний метод, що полягає в захисному покритті радіоелектронної апаратури, що розміщується на поверхнях даних елементів, які піддаються впливу іонізуючого випромінювання, відмінним тим, що захисне покриття виконане у вигляді наноструктури, яка включає сукупність атомів рідкоземельних елементів, введених в структуру армованої атомно-молекулярної металічної матриці, або утворює її захисний шар.

Для захисту апаратури від ЕМІ застосовуються різної конструкції екрани і кожухи. Найважливіші вимоги до матеріалів, з яких виготовляються захисні пристрої, такі: до складу матеріалів повинні входити елементи з великою атомною масою; захисні матеріали повинні включати легкі елементи.

Для підвищення безпеки роботи системи електропостачання в умовах дії ЕМІ застосовують: раціональне просторове розміщення вузлів і схем системи; вибір найбільш стійких до впливу ЕМІ функціональних елементів систем; створення стійких електронних схемних рішень; застосування заходів спеціального захисту; зміна порядку функціонування системи при подачі сигналу повітряної тривоги.

Для підвищення безпеки роботи обладнання системи електропостачання в умовах дії ЕМІ проводимо розрахунок захисного екрану.

Визначаємо перехідне гасіння електричного поля екраном зі сталі:

$$\begin{aligned} A &= 40 - K_{\text{бмін}}; \\ A_1 &= 40 + 21,2 = 61,2 \text{ (дБ)}; \\ A_2 &= 40 + 27,6 = 67,6 \text{ (дБ)}; \\ A_3 &= 40 + 18,3 = 68,3 \text{ (дБ)}. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Розрахуємо товщину захисного екрану:

$$t = \frac{A}{5,02 \cdot \sqrt{f}}; \quad (5.12)$$

де A - перехідне затухання екрану, дБ;

f - найбільш характерна частота, (15 кГц).

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{61,2}{5,02 \cdot \sqrt{15000}} = 0,09 \text{ (см)}; \\ t_2 &= \frac{67,6}{5,02 \cdot \sqrt{15000}} = 0,1 \text{ (см)}; \\ t_3 &= \frac{68,3}{5,02 \cdot \sqrt{15000}} = 0,12 \text{ (см)}. \end{aligned}$$

Отже, при екрануванні блоку живлення з використанням екрану товщиною 0,09 см зі сталі, блоку керування з використанням екрану товщиною що дорівнює 0,1 см, силових елементів 0,12 см, система електропостачання буде стійко працювати в умовах дії електромагнітного імпульсу.

У розділі розглянуто способи підвищення безпеки роботи системи електропостачання КП «Вінницька транспортна компанія» в умовах загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. Для захисту від іонізуючого випромінювання запропоновано використовувати матеріали, леговані лантаноїдами та рідкоземельними елементами, багатошарові конструкції й наноструктурні покриття.

Для мінімізації впливу електромагнітних перешкод (ЕМІ) рекомендовано застосування екранів, оптимальне розміщення вузлів, вибір стійких функціональних елементів і спеціальні заходи захисту. Комплекс цих рішень дозволяє забезпечити стійку та безпечну роботу системи в умовах надзвичайних ситуацій.

5.5 Висновки по розділу 5

Також, у даному розділі проведено оцінку безпеки роботи СЕП КП «Вінницька транспортна компанія» в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій та розроблено заходи по підвищенню безпеки роботи обладнання системи.

В умовах дії іонізуючих випромінювань обладнання СЕП буде безпечно працювати до рівня радіації 9000 Р/год, при допустимому часі роботи апаратури протягом 743,94 год.

Оцінюючи безпеку роботи СЕП КП «Вінницька транспортна компанія» в умовах дії електромагнітного імпульсу, доведено, що система буде злагоджено працювати, якщо вертикальна складова напруженості електричного поля не буде перевищувати: 1150 (В/м).

Висновки: в даному розділі магістерської кваліфікаційної роботи було розглянуто основні заходи з охорони праці, а саме організаційні і технологічні заходи, що направлені на максимальне зниження загрозливих чинників і створення оптимальних умов роботи на підприємстві.

З'ясувалося, що об'єкт нестійкий до дії іонізуючих випромінювань. Для підвищення стійкості роботи ОГД розробляється режим радіаційного захисту персоналу, а саме використовується робота скороченими змінами. РЕА, що використовується на ОГД, є стійкими до дії іонізуючих випромінювань.

РЕА нестійка до дії ЕМІ. Тому для підвищення стійкості об'єкту доцільно розмістити плати РЕА у вертикальній площині, та використати захисне екранування.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання МРК щодо підвищення якості електроенергії в електричних мережах комунального підприємства «Вінницька транспортна компанія», в процесі автоматизованого пошуку оптимальних рішень проектування СЕП підприємства здійснено наступні проектні рішення:

1. Для електропостачання навантажень ДЕПО достатньо одного трансформатора типу ТМ 630/10, також СЕП КП «ВТК» передбачає використання трьох тягових трансформаторних підстанцій з трансформатором ТМ 630/10, які розміщені по лінії руху електротранспорту. Переріз зовнішньої кабельної лінії повинен бути $3 \times 35 \text{ мм}^2$, КЛ типу АПвЭгаПу-10 на напрузі 10 кВ під ПС «Південна». Для живлення тягових підстанцій 10 кВ оптимальним рішенням буде використання кабелів типу АПвЭгаПу-10 з перерізом ліній $3 \times 35 \text{ мм}^2$. Також був проведений аналіз і вибір типу захисту електрообладнання в аварійному режимі роботи, та проведено перевірку обраних кабелів за допустимим перерізом та умовам термічної стійкості екрана до наведеного струму.

2. Встановлено, що технологічний процес на КП «ВТК» передбачає наявність в СЕП великої кількості тягового електроприводу. Навантаження тягового електропривода має значний вплив на якість електричної енергії через його специфічні характеристики, зокрема нерівномірність споживання електроенергії, динамічність і пульсації. Тяговий електропривод, особливо з використанням силових електронних перетворювачів (інверторів, випрямлячів), створює нелінійне навантаження, яке генерує гармонійні складові струму і напруги. Це знижує якість електроенергії, викликаючи перегрів трансформаторів, втрати енергії та можливі збої в роботі іншого обладнання.

3. Проведено порівняльний аналіз найбільш розповсюджених фільтро-компенсуючих пристроїв. Встановлено, що для підвищення якості електроенергії в СЕП КП «ВТК» оптимальним рішенням є використання паралельних активних фільтрів, оскільки вони забезпечують ефективну компенсацію гармонік у широкому спектрі частот і адаптуються до змінного режиму роботи. Пасивні фільтри є економічним, але обмеженим рішенням для стабільних систем із передбачуваними

гармоніками, тоді як поздовжньо-паралельні активні фільтри, хоч і забезпечують комплексну компенсацію гармонік та напруги, є занадто дорогими для застосування в умовах не критичних вимог.

4. Основним результатом науково-дослідної роботи є розроблена модернізована математична модель для дослідження ефективності роботи ПАФ для досягнення підвищення якості електричної енергії шляхом зменшення вищих гармонік в СЕП підприємств. Результат моделювання використання ПАФ в СЕП КП «ВТК» показав, що ПАФ ефективно зменшує рівень вищих гармонік за рахунок генерації компенсаційного струму, який протидіє гармонікам, створеним нелінійними навантаженнями. Це досягається шляхом аналізу параметрів мережі в реальному часі та синхронного введення компенсаційного сигналу в мережу, що забезпечує згладжування форми струму та напруги. Як видно з графіків, після увімкнення АФ спостерігається значне зменшення амплітуд вищих гармонік у спектрі струму, що сприяє поліпшенню якості електроенергії, зниженню втрат в електромережі та стабільній роботі СЕП.

5. Здійснено економічні розрахунки спроектованої СЕП. Тобто визначено економічну доцільність будівництва пропонованого проекту. Визначено очікувану вартість електроенергії у мережі.

6. Проаналізовані стандарти охорони праці та електробезпеки. Проведено аналіз стабільності роботи бота на робочому місці підприємства під впливом іонізуючого випромінювання та електромагнітних імпульсів.

Виконані розрахунки дозволять забезпечити максимально надійне електропостачання цього підприємства.

Для розроблення дипломного проекту були виконані вимоги ПУЕ, ПТЕ та інших нормативних документів по надійності і якості електропостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Півняк Г. Г., Жежеленко І. В., Папаїка Ю. А. Енергетична ефективність систем електропостачання : монографія. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. 148 с.
2. Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). – Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2017, 617 с.
3. Камінський А. В. Математичне та комп'ютерне моделювання процесів оптимізації центрування електричних мереж : монографія / А. В. Камінський, Б. І. Мокін – Вінниця: УНІВЕРСУМ - Вінниця, 2005. –122с.
4. Бурбело, М. Й. Спеціальні питання електропостачання: електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання / Бурбело М. Й. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – 89 с.
5. Демов О.Д. Економія електроенергії на промислових підприємствах : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2006. 95 с.
6. Офіційний сайт ПАТ «Завод Південкабель». URL: <http://www.yuzhcable.info> (дата звернення: 17.10.2024).
7. Тарифи ПАТ "Вінницяобленерго" : веб-сайт. URL: <http://www.voe.com.ua/consumers/individuals/fees> (дата звернення: 15.10.2021).
8. Трансформатори силові. URL: <http://www.budnet.com.ua/aboutcommodity.php?FirmCommodityID=4099> (дата звернення: 17.10.2024).
9. Бурбело, М. Й. Розрахунок внутрішнього електропостачання : навчальний посібник / Бурбело М. Й. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 123 с.
10. СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах НЕК Укренерго. [Чинний від 03.02.2021]. Науково-технічний центр електроенергетики «НЕК «Укренерго», 2021. 316 с. (Інформація та документація).
11. Силові вимикачі. URL: <http://www.budnet.com.ua/aboutcommodity.php?FirmCommodityID=4099> (дата звернення: 18.10.2024).

12. ДСТУ ІЕС/TR 60909-4:2008 (ІЕС/TR 60909-4:2000, IDT): 2008. Національний стандарт України. Струми короткого замикання в трифазних системах змінного струму. Частина 4. Приклади обчислення сили струму короткого замикання. . [Чинний від 01.01.2008]. Київ, 2008. 82 с. (Інформація та документація).
13. Бурбело М. Й. Електромагнітна сумісність і керування якістю електроенергії в системах електропостачання : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання. Вінниця : ВНТУ, 2024. 159 с.
14. Akagi H. Active harmonic filters. Proc.of the IEEE, 2005, 93, No 12, 2128-2141
15. Ягуп Е. В. Оптимізація режиму несиметричної трифазної системи з використанням активного фільтра та модифікованого алгоритму управління. Вісник НТУ «ХПІ», серія «Нові рішення в сучас-них технологіях». 2016. №42(1214). С. 124-128.
16. Akagi H., Kanazawa Y., Nabai A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits // Proceeding of Int. Power Electronics Conf. – Tokyo (Japan). – 1983. – Pp. 1375-1386.
17. Бурлака В. В., Поднебенна С. К., Гулаков С. В. Сучасні силові активні фільтри та імпульсні джерела живлення з корекцією коефіцієнта потужності : монографія. Маріуполь : ПДТУ, 2015. 196 с.
18. MATLAB – високорівнева мова технічних розрахунків: веб-сайт. URL: <http://matlab.products/matlab> (дата звернення: 06.05.2023)
19. Simulink – моделювання і симуляція динамічних систем: веб-сайт. URL: <http://matlabproducts/simulink> (дата звернення: 06.05.2023)
20. Ягуп В. Г., Ягуп К. В. Моделювання та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання : навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 183 с.
21. Власенко Р. В., Бялобржеський О. В. Оцінка складових потужності електричної мережі при роботі силового активного фільтра за стандартом IEEE

1459-2010. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. - 2015. - № 4. - С. 57-62.

22. Артеменко М. Ю., Батрак Л. М., Михальський В. М., і Поліщук С. Й., Оптимізація енергетичних характеристик трифазної чотирипровідної системи живлення з паралельним активним фільтром у несиметричному синусоїдному режимі. *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 30-37, 2015.

23. Кобилянський О.В., Терещенко О.П. Методичні вказівки відносно опрацювання розділу "Охорона праці" в дипломних проектах и роботах студентів електротехнічних спеціальностей: навч. Посіб. Вінниця, ВНТУ, 2003. 46 с.

24. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

25. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

26. ДБН А.3.2-2-2009. ССБП. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_a322_2009/1-1-0-945.

27. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

28. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок (Правила устройства электроустановок. Электрооборудование специальных установок). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

29. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

30. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

31. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
32. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.
33. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.
34. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.
35. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.
36. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.
37. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.
38. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.
39. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

ДОДАТКИ

Додаток А

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

УЗГОДЖЕНО

“ ” 2024р.

ЗАТВЕРДЖЕНО
Зав. кафедри ЕСЕЕМ

д.т.н., проф. Бурбело М.Й.
“ ” 2024р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

до магістерської кваліфікаційної роботи
на тему:

Підвищення якості електроенергії в електричних мережах
комунального підприємства «Вінницька транспортна компанія»

08-22.МКР.002.01.024 ТЗ

Науковий керівник:

д.т.н., проф. Бурбело М.Й. _____
(підпис)

Виконавець: студент гр. ЕСЕ-23м

Гарбузюк Р.А. _____
(підпис)

Вінниця 2024 р.

1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ (МКР)

Робота виконується на підставі наказу ВНТУ за № 310 від 17.09.24р.

Дата початку роботи 14.10.24р.

Дата закінчення роботи 07.12.24р.

2. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР. ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРОБКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

а) мета – підвищення якості електроенергії в СЕП КП «ВТК»;

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

в) вихідні дані для виконання МКР:

генплан підприємства (об'єкта); план цеха (об'єкта, ділянки, приміщення) із розташуванням обладнання; відомості про особливості технологічних процесів та навколишнього середовища (внутрішнього та зовнішнього); відомості про електричні навантаження підприємства (цеха, об'єкта, ділянки, приміщення); відомості про джерела живлення, їх віддаленість; графіки електричних навантажень (для діючого підприємства, енергетичного району); основні техніко-економічні показники.

3. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

3.1 Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). – Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2017, 617 с.

3.2. Бурбело, М. Й. Розрахунок внутрішнього електропостачання : навчальний посібник / Бурбело М. Й. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 123 с.

3.3 Кобилянський О.В., Терещенко О.П. Методичні вказівки відносно опрацювання розділу "Охорона праці" в дипломних проектах и роботах студентів електротехнічних спеціальностей: навч. Посіб. Вінниця, ВНТУ, 2003. 46 с.

3.4 Демов О. Д. «Економія електроенергії на промислових підприємствах». – Вінниця: ВНТУ, 2006р.

4. ЕТАПИ І ТЕРМІН ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Зміст етапу	Термін виконання	
	початок	кінець
4.1 Збір інформації, яка необхідна для дослідження	14.10	20.10
4.2 Проведення дослідних розрахунків	20.10	20.11
4.3 Розробка робочих креслень	20.11	22.11
4.4 Написання розрахунково-пояснювальної записки і захист магістерської роботи	22.11	07.12

5. МАТЕРІАЛИ, ЩО ПОДАЮТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ МКР

Пояснювальна записка МКР, графічні і ілюстровані матеріали, анотація до МКР українською та іноземною мовою.

6. ПОРЯДОК КОНТРОЛЮ ВИКОНАННЯ ТА ЗАХИСТУ МКР

Робота приймається на проміжних контрольних перевірках, попередньому захисті та захисті в ДЕК.

7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

7.1 Дані про патентоспроможність

Не передбачається

8 ОЧІКУВАНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ

Не передбачається

Додаток Б – Вхідні дані для виконання кваліфікаційної роботи

Відомості про трансформаторні підстанції наведені в таблиці Б.1.

Таблиця Б.1 – Відомості про трансформаторні підстанції підприємства

№ ТП	Відстань км	P_n , кВт	S_p , кВА	Розташування
ТП-1	2,2	520	420	ДЕПО

Відомості про навантаження тягових підстанцій (ТПС) наведені в таблиці Б.2.

Таблиця Б.2 – Відомості про електричні навантаження ТПС

№ ТПС	Відстань км	P_n , кВт	S_p , кВА	Розташування
ТП-2	2,15	540	460	ДЕПО
ТП-3	2,4	570	405	Зах. вокзал
ТП-4	1,6	620	425	ЦУМ

Додаткові дані про систему електропостачання підприємства:

Відстань від підприємства до живлячої підстанції енергосистеми «Південна» 110/35/10 кВ – 2,0 км.

Розрахункова потужність $S_p=1710$ кВА;

Час використання максимального навантаження $T_m=4000$ год/рік;

Час максимальних втрат складає $\tau_m= 2405,3$ год/рік;

Тариф за активну електроенергію:

на напрузі 10 кВ, $t= 6,649$ грн/кВт*год.

на напрузі 35 кВ, $t= 5,195$ грн/кВт*год.

Система електропостачання для КП «Вінницька транспортна компанія» повинна відповідати низці нормативних та технічних вимог, які забезпечують надійність, безпеку, якість електроенергії та енергоефективність.

Додаток В

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Підвищення якості електроенергії в електричних мережах комунального підприємства «Вінницька транспортна компанія»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність	90%
Схожість	10%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

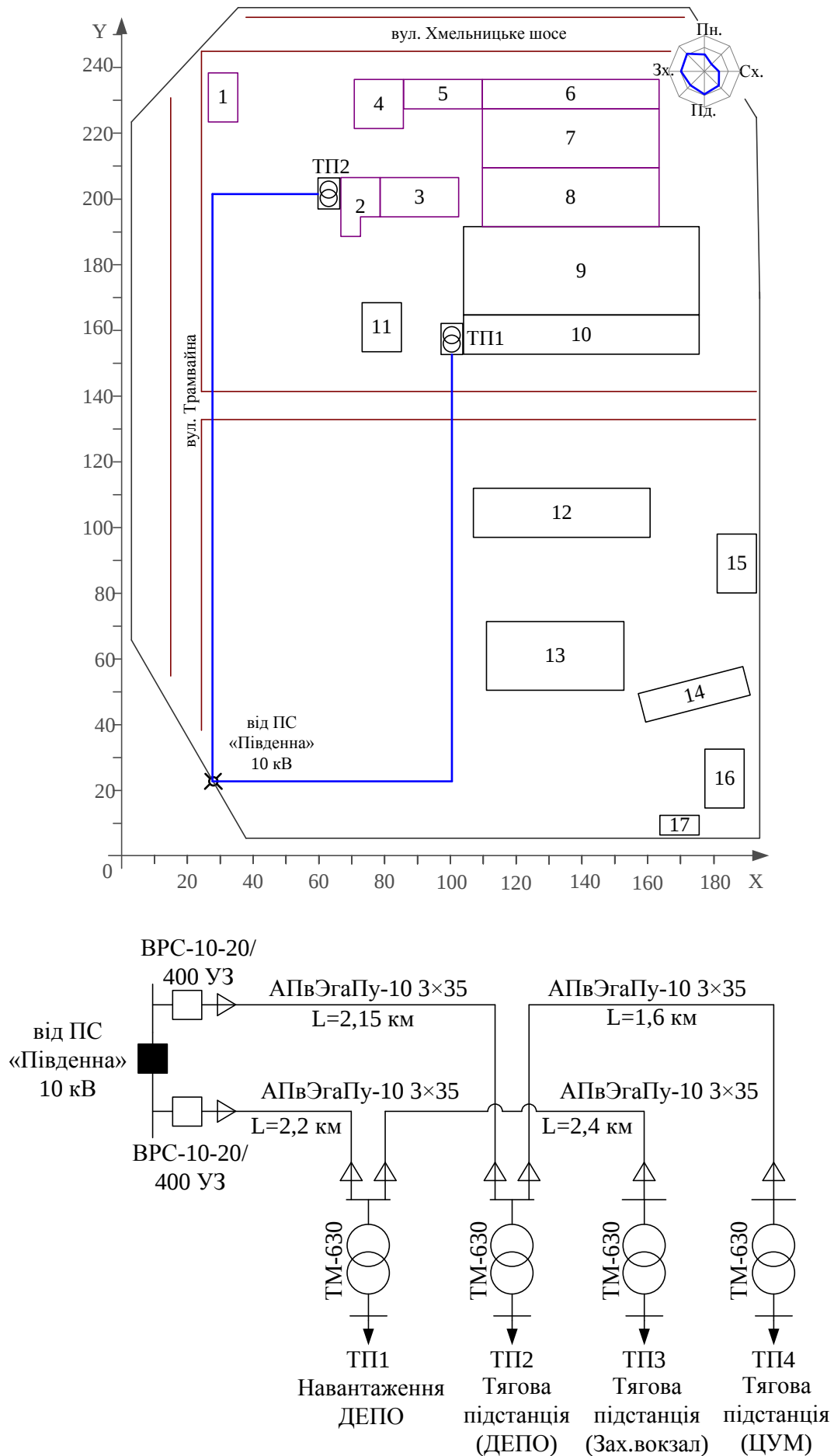
Особа, відповідальна за перевірку _____ Лобода Ю.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи _____ Гарбузюк Р.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ Бурбело М.Й.
(підпис) (прізвище, ініціали)

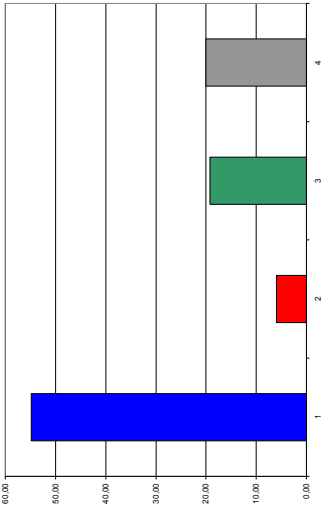
Додаток Г – План підприємства із силовими та живильними мережами



Додаток Д – Основні техніко економічні показники системи електропостачання

Сумарна величина капітальних вкладень в систему електропостачання підприємства	6171,86 тис грн
Загальна потреба підприємства в електроенергії	963789,89 кВт*год/рік
Тариф	6,649 грн/кВт*год
Оплата за спожиту електроенергію	6408238,97 грн
Собівартість спожитої електроенергії	8,4493 грн/кВт*год

Гістограма кошторису річних поточних витрат



Підсумкова таблиця

Показники	Позначення	Величина показників	Одиниця вимірювання
К-сть корисно спожитої енергії	Ea	882435,1	кВт·год.
Річне споживання ел.енергії із втратами	E	963789,89	кВт·год.
Плата за електроенергію	П ₁	6408238,977	грн.
Витрати на передачу і розподіл елен.	C _п	1930123,28	грн.
Сумарні витрати під-ва	C _{сум}	8338362,26	грн.
Собівартість ел.енергії	S	844,93	кол/кВт·год.

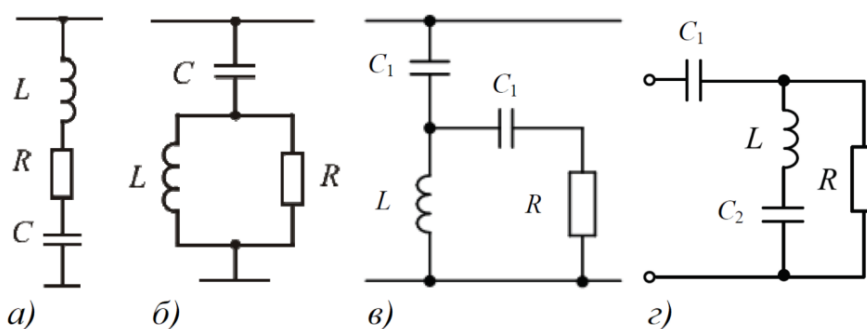
Таблиця кошторису річних поточних витрат

Стаття витрат	Величина витрат, грн.	Рн, кВт
Витрати по експлуатації обладнання	1059144,92	54,87
Витрати на поточний ремонт	114641,96	5,94
Витрати на амортизацію	370311,75	19,19
Інші витрати	386024,66	20,00
Разом	1930123,28	100

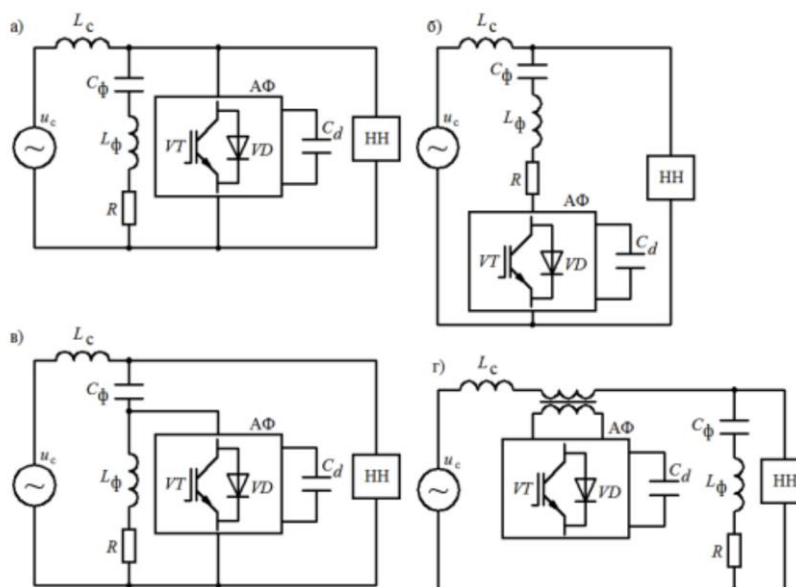
Додаток Є – Загальний аналіз фільтро-компенсуючих пристроїв

Класифікація фільтрокомпенсуючих пристроїв

Тип фільтра	Підтип	Конфігурація
Пасивні фільтри	Однофазні	Послідовні, Паралельні
	Трифазні, трипровідні	Послідовні, Паралельні
	Трифазні, чотирипровідні	Послідовні, Паралельні
Активні фільтри	Однофазні	Послідовні, Паралельні
	Трифазні, трипровідні	Послідовні, Паралельні
	Трифазні, чотирипровідні	Послідовні, Паралельні
Гібридні фільтри	Однофазні	
	Трифазні, трипровідні	
	Трифазні, чотирипровідні	



Основні конфігурації пасивних фільтрокомпенсуючих пристроїв: а) Вузькочастотний фільтр; б) Широкочастотний фільтр 2-го порядку; в) Широкочастотний фільтр 3-го порядку; г) Фільтр С-типу



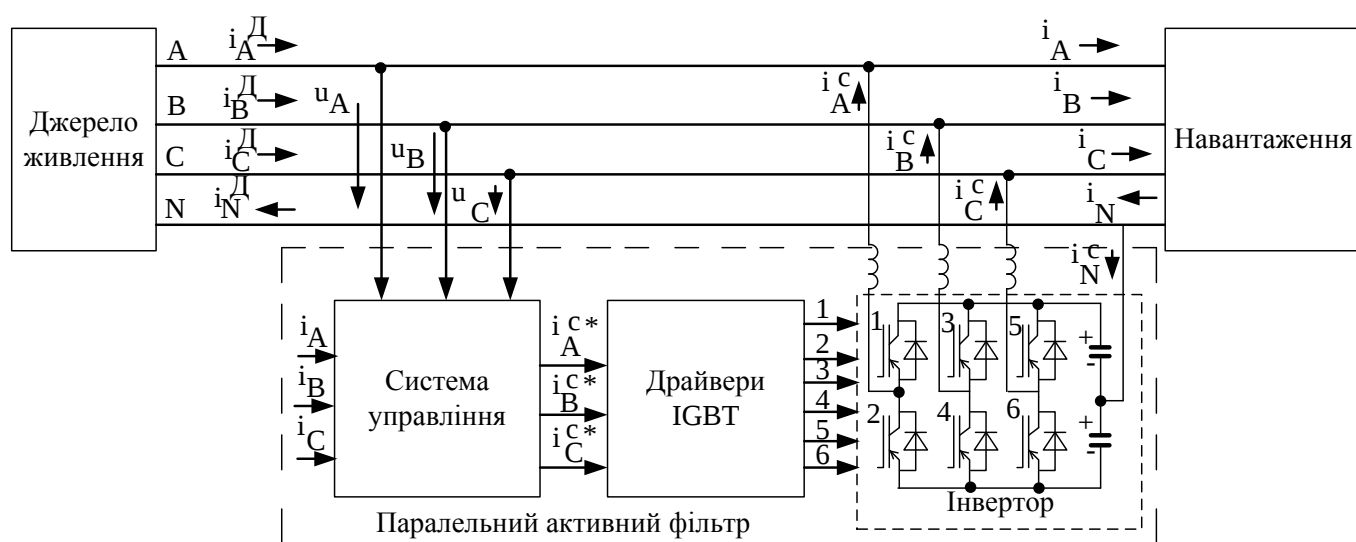
Схеми гібридних фільтрів а) паралельне з'єднання АФ та пасивного ФКП; б) паралельне з'єднання АФ з активно-індуктивною частиною пасивного ФКП; в) послідовне поєднання пасивного ФКП; г) Послідовний АФ та паралельне з'єднання пасивного ФКП

Додаток Ж – Порівняльний аналіз пристроїв для підвищення якості електроенергії

Параметр	Пасивний фільтр	Паралельний активний фільтр (ПАФ)	Поздовжньо-паралельний активний фільтр
Принцип дії	Компенсація гармонік за рахунок LC-контурів, налаштованих на певну частоту.	Генерація компенсуючого струму з протилежною фазою до гармонік.	Поєднання компенсації струмів (паралельний режим) і корекції напруги (поздовжній режим).
Ефективність компенсації гармонік	Висока для визначених частот, але малоефективна для гармонік поза налаштованим діапазоном.	Висока для широкого спектра гармонік (до 50-ї гармоніки і вище).	Дуже висока для гармонік і падіння напруги, забезпечує комплексне поліпшення якості енергії.
Реакція на змінне навантаження	Низька: ефективність падає при зміні гармонічного спектра навантаження.	Висока: адаптується до змінного режиму роботи.	Висока: одночасно адаптується до гармонік і падіння напруги.
Корекція коефіцієнта потужності	Забезпечує лише для реактивної потужності, пов'язаної з основною частотою.	Забезпечує корекцію для всіх складових реактивної потужності.	Забезпечує корекцію напруги та реактивної потужності.
Компенсація асиметрії фаз	Неможлива.	Можлива.	Можлива.
Реакція на падіння напруги	Не реагує.	Не реагує.	Здатний коригувати падіння напруги на живильній лінії.
Складність та вартість	Низька. Простий у виготовленні та дешевий.	Середня. Потребує складних компонентів і контролерів.	Висока. Вимагає складних схем і високих витрат.
Втрати енергії	Низькі.	Середні. Втрати на інверторі та елементів керування.	Середні або високі через складну роботу обох режимів.
Надійність	Висока, за умови правильної настройки.	Висока, але залежить від стабільності джерела живлення.	Середня через складність конструкції.
Застосування	Для простих систем із стабільними гармоніками (низький бюджет).	Для систем зі змінним режимом навантаження та широким спектром гармонік.	Для систем, де потрібна компенсація і гармонік, і напруги (складні мережі).

Додаток 3 – Алгоритм роботи активного фільтра

Етап	Опис
1. Вхідний сигнал	Отримання вхідного сигналу, який може містити різні частотні компоненти.
2. Підсилення або обробка сигналу	Операційний підсилювач змінює амплітуду сигналу в залежності від характеристик фільтра.
3. Застосування компонентів фільтра	Використовуються компоненти, які визначають частотні характеристики фільтра: резистори, конденсатори, індуктивності. Тип фільтра залежить від вибору компонентів (низькочастотний, високочастотний, смуговий).
4. Зворотний зв'язок	Використання зворотного зв'язку для стабілізації та контролю підсилення, що визначає характеристики фільтра.
5. Вихідний сигнал	Вихідний сигнал, що має змінений спектр частот відповідно до фільтрації.
6. Налаштування фільтра	Регулювання компонентів для досягнення необхідних параметрів частоти зрізу або посилення.



Спрощена схема підключення паралельного АФ до мережі

Додаток К – Модель ПАФ в середовищі MATLAB

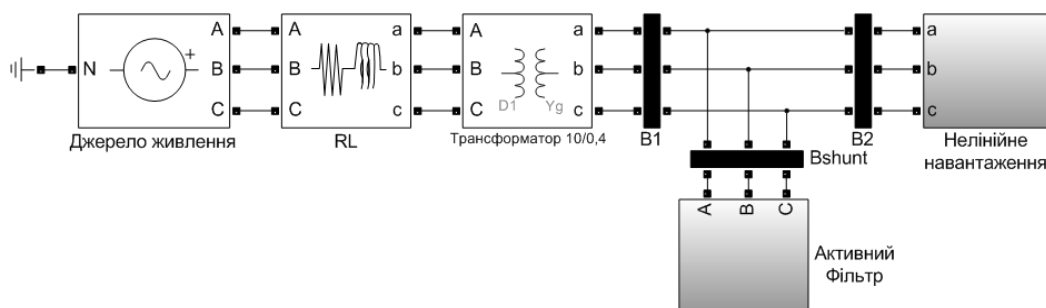
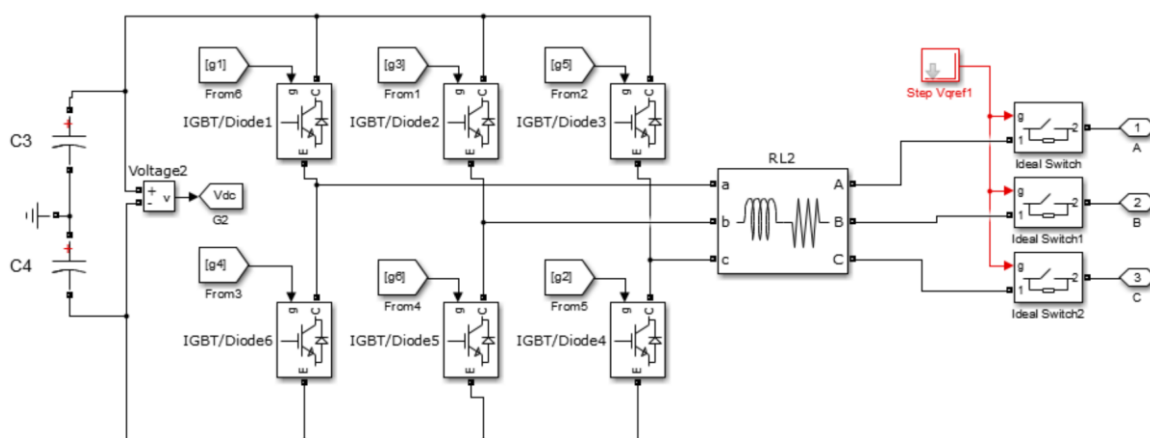
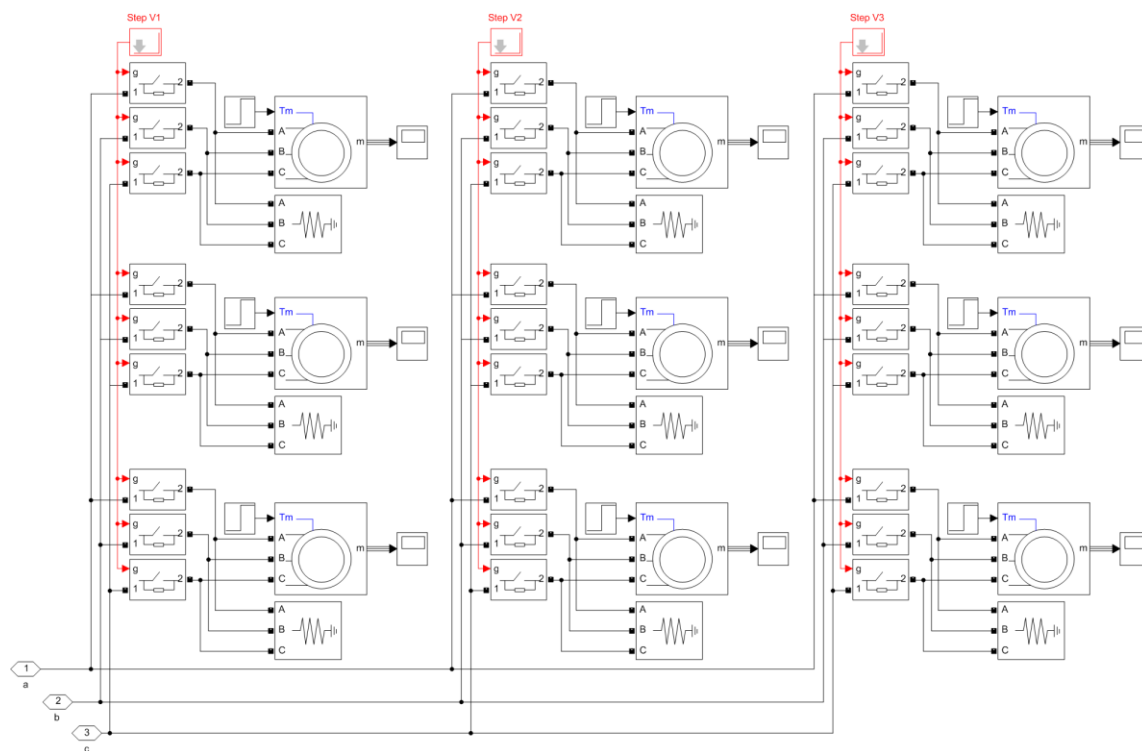


Схема змодельованої електричної мережі з АФ

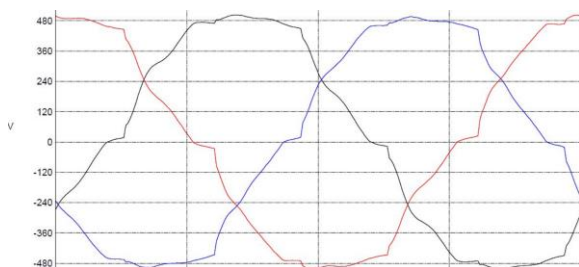


Математична модель АФ в середовищі MATLAB/Simulink

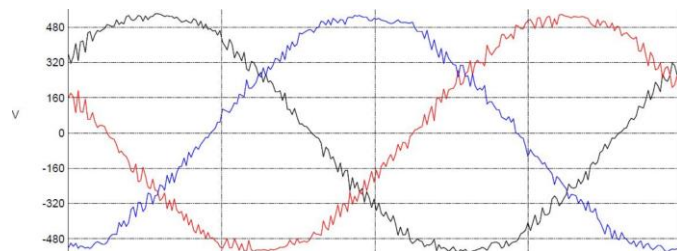


Реалізація нелінійного навантаження електричної мережі

Додаток Л – Моделювання основних режимів роботи ПАФ

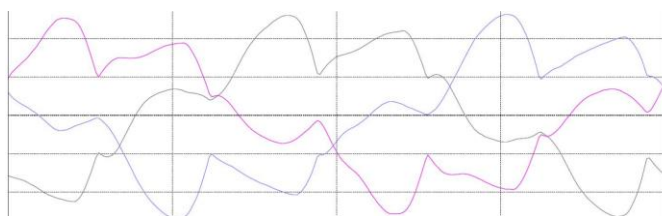


Форма напруги мережі без АФ

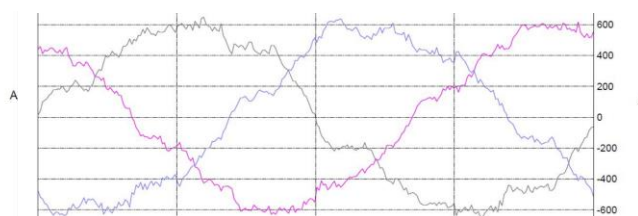


Форма напруги мережі за наявності АФ

Діаграми напруги мережі живлення

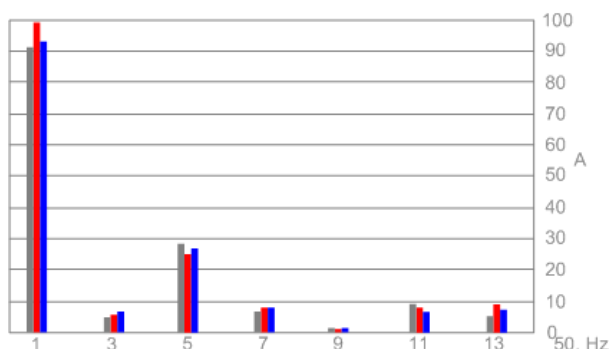


Форма струму без АФ

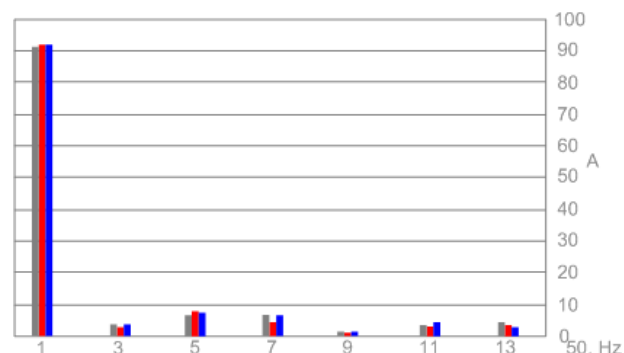


Форма струму за наявності АФ

Форма споживаного з мережі струму



Без АФ



При роботі АФ

Спектр споживаного з мережі струму

THD без та за наявності АФ

	Фазна напруга U_A	Фазна напруга U_B	Фазна напруга U_C	Струм фази А	Струм фази В	Струм фази С
THD Без АФ, %	8,4	8,9	8,7	33,6	34,1	36,2
THD з АФ, %	3,2	3,7	4,1	11,7	10,3	12,8

