

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«____» _____ 2023 р.

Кваліфікаційна робота
бакалавра

на тему _____ **Дослідження показників якості електроенергії в**
електромережі з нелінійним навантаженням

Виконав студент _____ **4** _____ **курсу,**
групи _____ **ЕЛК-19**
(шифр групи)

спеціальності підготовки _____ **141 «Електроенергетика, електротехніка**
(шифр і назва спеціальності підготовки)
та електромеханіка»

_____ **Артем БУРЛАЙ**

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Керівник _____ **канд. техн. наук, доцент Н. САВЧЕНКО**

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

_____ (підпис)

Рецензент

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

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

Засвідчую, що у цій випускній
кваліфікаційній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

_____ **Е. НЕМЦЕВ**

Студент

_____ (підпис)

_____ (підпис)

_____ (дата)

_____ (дата)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Артему БУРЛАЮ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: _____ Дослідження показників якості електроенергії в
 електромережі з нелінійним навантаженням _____

керівник роботи _____ Наталя САВЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент
 (ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи _____ 05 червня 2022 року _____

3. Вихідні дані до роботи: _____ Схема електропостачання цеху промислового
 підприємства та перелік елементів до неї. Відомості про джерело живлення:

ЦТП зі знижувальним трансформатором ТСЗ-400/10, $S_{тр}=400\text{кВА}$, $U_{вн}=10\text{кВ}$,

$U_{нн}=0,4\text{кВ}$. Відомості про навантаження: зварювальний трансформатор

ТСШ-3000-3; лінійне навантаження шини ШРА4: $P = 29,3\text{ кВт}$, $Q = 40,6\text{ кВАр}$;

лінійне навантаження шини ШРА3: $P = 85,15\text{ кВт}$, $Q = 32,9\text{ кВАр}$.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Аналіз показників якості електричної енергії в системі електропостачання.

2. Моделювання та дослідження впливу роботи зварювального обладнання на показники якості електроенергії у системі електропостачання цеху.

3. Компенсація реактивної потужності в системі електропостачання.

4. Розробка заходів з охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Вісім слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 3	Н. САВЧЕНКО, доц. каф.		
Розділ 4			
Нормоконтроль	Е. НЕМЦЕВ, ст. викл.		

7. Дата видачі завдання 05 травня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	05.05.23 – 12.05.23	
2.	Розділ 2	13.05.23 – 23.05.23	
3.	Розділ 3	24.05.23 – 31.05.23	
4.	Розділ 4	01.06.23 – 05.06.23	
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			

Студент _____
(підпис)

Артем БУРЛАЙ
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Наталя САВЧЕНКО
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Актуальність роботи. На якість електричної енергії впливає робота електричного обладнання. В нашому випадку цим обладнання являються зварювальні установки. Рівномірний розподіл навантаження по фазах трифазної мережі не завжди вдається, особливо за наявності крупних зварювальних установок. Тому в трифазній мережі з установкам електрозварювань виникає несиметрія струмів, яка приводить до несиметрії напруги.

Актуальність роботи полягає у оціненні впливу роботи електрозварювальних установок на роботу систем в цілому, впливу гармонійних складових та сумарного гармонійного спотворення струму або напруги.

Мета роботи і задачі дослідження. Розробка схеми електропостачання цеху та розрахунок її режимів. Складання схеми заміщення для дослідження її в програмному пакеті Matlab.

Дослідження роботи зварювальних установок змінного струму та їх впливу на роботу системи в цілому.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати наступні задачі:

- розробка моделі схеми електропостачання цеху за допомогою програмного пакету Matlab;
- дослідження режимів роботи схеми електропостачання при різних її постановці;
- аналіз отриманих результатів;

Об'єкт дослідження: зварювальна установка цехової мережі

Предмет дослідження: математична модель цехової мережі при наявності зварювального обладнання

Методи досліджень. При вирішенні поставлених задач використовувались загальні методи теорії електротехніки та математичного моделювання.

Основні наукові та практичні результати, їх значення. У пакеті візуального програмування досліджено модель системи споживання електричної енергії ділянки цеху промислового підприємства до складу якої входять споживачі як з лінійними так і нелінійними навантаженнями.

Встановлено, що відключення лінійних навантажень викликає зміну режиму системи та збільшення потужності яка передається силовим трансформатором, окрім цього суттєво змінюється рівень гармонік цієї потужності.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЇХ РЕГУЛЮВАННЯ	9
1.1 Показники якості за напругою та потужність електроенергії за умов несинусоїдальності	9
1.2 Розрахунок схеми електропостачання за умов несинусоїдальності	23
1.3 Показники якості за напругою та потужністю за умов не симетрії	26
1.4 Розрахунок несиметричного режиму електричної мережі	32
2 ПОВНА ПОТУЖНІСТЬ ЦЕХУ ЗІ ЗВАРЮВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ	37
2.1 Модель технологічної ділянки цеху та зварювальної установки	37
2.2 Моделювання та дослідження процесів у системі електропостачання цеху	40
2.3 Аналіз результатів дослідження	46
3 КОМПЕНСАЦІЯ НЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	53
3.1 Методи компенсації	53
3.2 Пристрої компенсації	55
3.3 Дослідження показників якості електроенергії при використанні конденсаторних батарей	59
ВИСНОВКИ	71
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	72
ДОДАТКИ	74
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ	74
А.1 Основні положення закону України про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасних випадків на виробництві	74

А.2 Технічні заходи і засоби захисту безпечної експлуатації зварювальної установки при нормальних режимах роботи	76
А.3 Організація пожежної безпеки у виробничому приміщенні	80
А.4 Розрахунок штучного освітлення за даними цеху	84
ДОДАТОК Б. ТЕХНІКО ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК	87
Б.1 Розрахунок додаткових втрат у мережах електропостачання при зниженні якості електроенергії. Визначення величини ймовірного збитку від скорочення строку служби обладнання	87
ДОДАТОК В. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	96
ДОДАТОК Г. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	103

ВСТУП

В даний час питання пов'язані з якістю електропостачання є досить актуальними. До поняття якості електропостачання в першу чергу відноситься якість електроенергії. Якість електричної енергії характеризується різними порушеннями і спотвореннями форми напруги живлення, серед яких комутаційні перенапруги, що викликаються комутацією ділянок електричної мережі, провали і відхилення напруги під час роботи пристроїв автоматичного включення резерву і перемикачів на інші джерела живлення. Самі електроприймачі можуть вносити спотворення в електричну мережу. Такими властивостями володіють електроприймачі з різко змінним і нелінійним характером навантаження (дроселі, індукційні печі, будь-які перетворювачі, зварювальне обладнання і т.п.)

На якісні значення параметрів електричної енергії впливає робота електричного обладнання. В нашому випадку цим обладнання являються зварювальні установки. Рівномірний розподіл навантаження по фазах трифазної мережі не завжди вдається, особливо за наявності крупних зварювальних установок. Тому в трифазній мережі з установкам електрозварювань виникає несиметрія струмів, яка приводить до несиметрії напруги. Звідси і виникає необхідність оцінки повної потужності системи електропостачання цеху, яка була зроблена у даній випускній роботі.

Крім оцінки характеру споживання потужності був проведений розрахунок штучного освітлення цеху та техніко-економічний розрахунок.

1 ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЦЕХУ ТА ЇХ РЕГУЛЮВАННЯ

1.1 Показники якості за напругою та потужністю електроенергії за умов несинусоїдальності

На сьогодні в Україні діє стандарт ГОСТ 13109-97 “Електрична енергія. Сумісність технічних засобів. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення”, який встановлює норми і показники ЯЕ в електромережах загального призначення однофазного та трифазного змінного струму промислової частоти у мережах, до яких приєднуються електричні мережі, що перебувають у власності різних споживачів електричної енергії, або приймачі електричної енергії (точки загального приєднання) [5]. Норми ЯЕ, що встановлюються стандартом, є обов'язковими і служать для забезпечення електромагнітної сумісності електричних мереж систем електропостачання загального призначення і електричних мереж приймачів електричної енергії (споживачів).

Одним з найважливіших показників якості є напруга. Згідно з ГОСТ 13109-97, встановлюються такий показник, як несинусоїдальність напруги:

Несинусоїдальність напруги. В процесі вироблення, перетворення, розподілу і споживання електроенергії мають місце спотворення форми синусоїдальних струмів і напруг. Несинусоїдальність форми струму в основному визначається електроприймачами з нелінійною характеристикою.

До них, зокрема, відносяться вентильні перетворювачі, електродугові сталеплавильні печі, випрямні установки, газорозрядні лампи, зварювальне обладнання та ін.

Вимірювання електроенергії при наявності вищих гармонік проводиться з похибкою, знак якої може бути як позитивним, так і негативним.

При відхиленні частоти на 1 Гц похибка лічильника може досягати 0,5%.

Відомо, що будь-яку несинусоїдальну функцію $f(\omega t)$ (рис. 1.1), можна представити у вигляді суми постійної величини і нескінченного ряду синусоїдальних величин з кратними частотами (гармонійні складові). Синусоїдальна складова, період якої дорівнює періоду несинусоїдальної періодичної величини, називається основною (першою) гармонікою. Інші складові синусоїди з частотами з другої по n -ну називають вищими гармоніками.

Несинусоїдальність напруги характеризується наступними показниками:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги;
- коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги.

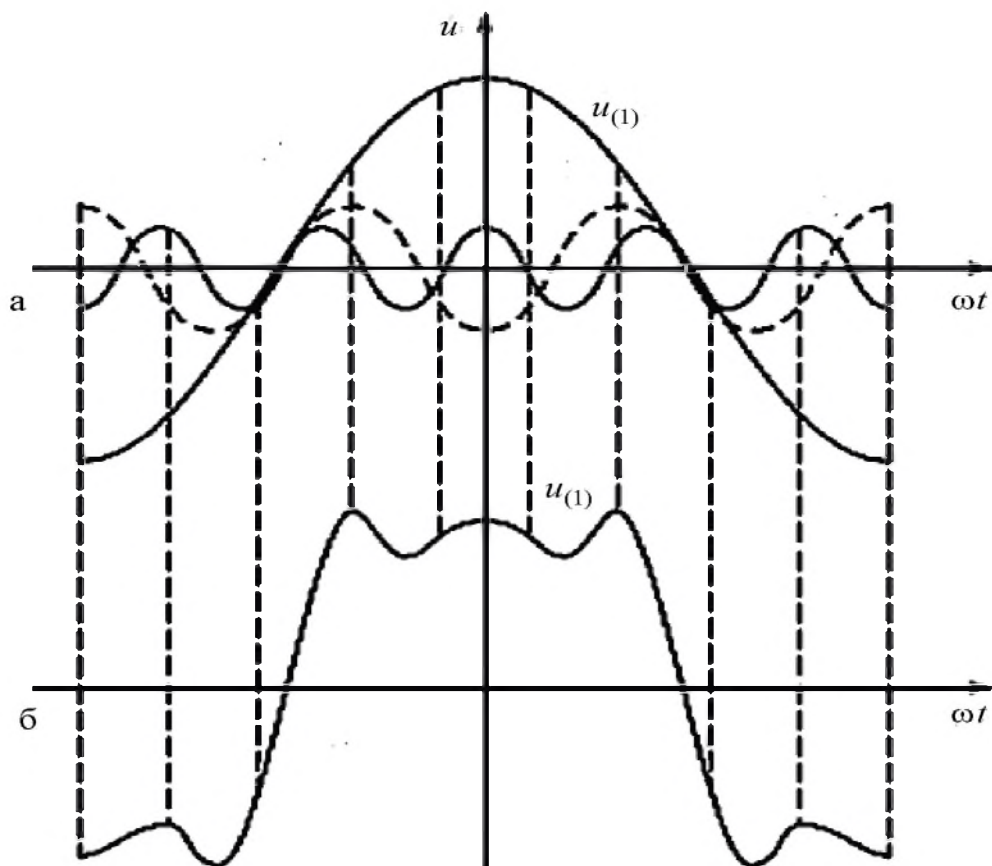


Рисунок 1.1 – Несинусоїдальність напруги: а – гармонічного складу напруги (1, 3, 5-а гармоніки); б – результуюча (спотворена форма кривої)

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U визначається за виразом:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N u_{(n)}^2}}{u_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

де $u_{(n)}$ – діюче значення n -ої гармонійної складової напруги, В;

n – порядок гармонійної складової напруги;

N – порядок останньої гармонійної складової напруги, стандартом встановлюється $N = 40$;

$u_{(1)}$ – діюче значення напруги основної частоти, В.

Коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги дорівнює:

$$K_{U(n)} = \frac{u_{(n)}}{u_{(1)}} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

Багато інженерів під нелінійним навантаженням описують всі категорії обладнання, які генерують гармоніки, розміщуючи разом реальні нелінійні навантаження, такі як пристрої з магнітним сердечником (дроселі, трансформатори та двигуни) та дугорозрядні пристрої (електрозварники, дугові печі, дугові газорозрядні лампи) з усіма видами навантажень, наприклад перетворювачами (з регульованими приводами постійного та змінного струму, зарядними пристроями або з будь-якими комбінаціями з вищеперерахованих). Істина полягає в тому, що контрольована ділянка навантаження керованих або некерованих випрямлячів, а також циклоконверторів, виконана набором перемикачів, які періодично або послідовно підключені або відключені один до

одного або декількох лінійних або майже лінійних навантажень в живильній лінії. Правильна назва цьому явищу – параметричне навантаження. Для цілей даного дослідження всі гармонійні генеруючі навантаженням, які будуть розглядатися під єдиною назвою матимуть назву – нелінійне навантаження.

На рисунку 1.2 (а) зображена схема, де нелінійне навантаження N , L живиться від мережі, яка має еквівалентну схему, що складається з джерела синусоїдальної напруги, в поєднанні з опором R_s та індуктивністю L_s .

$$u_s = \hat{U}_s \sin(\omega t) \quad (1.3)$$

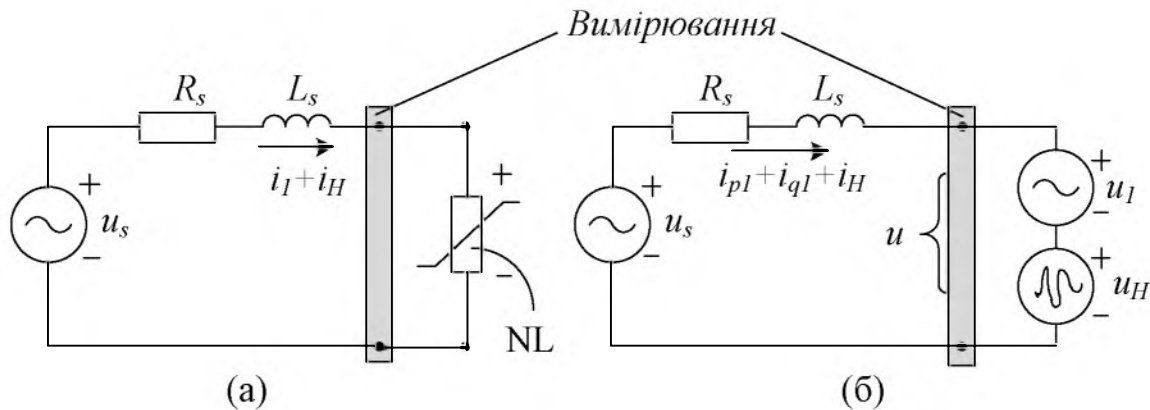


Рисунок 1.2 – Нелінійне навантаження загальний випадок: а – базова схема; б – еквівалентна лінійна схема

Значення струму розділяється на основне і повне гармонійне:

$$i = i_1 + i_H, \text{ де } i_1 = \hat{I}_1 \sin(\omega t - \theta_1) \text{ та } i_H = \sum_{h \neq 1} \hat{I}_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (1.4)$$

Напруга нелінійного навантаження u може буде представлена двома еквівалентними напругами з протилежними полярностями (рис. 1.2 – б).

$$u = u_1 - u_H, \text{ де } u_1 = \hat{U}_1 \sin(\omega t) \text{ та } u_H = \sum_{h \neq 1} \hat{U}_h \sin(h\omega t + \alpha_h + \theta_h) \quad (1.5)$$

де основна фазна напруга береться в якості опорної. Далі струм i_1 складається з двох компонентів: активний струм у фазі з напругою u_1

$$i_{p1} = \hat{I}_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t) \quad (1.6)$$

Та реактивний струм у квадратурі з u_1

$$i_{q1} = -\hat{I}_1 \sin \theta_1 \cos(\omega t) \quad (1.7)$$

Причина такого поділу струмів впливає з необхідності розрахунку основної миттєвої активної потужності, яка вимірюється на клеммах NL .

За Законом Кірхгофа напруга для основної частоти буде дорівнювати:

$$u_s = R_s i_1 + L_s \frac{di_1}{dt} + u_1 \quad (1.8)$$

Таким чином, основна миттєва потужність, яка подається з u_s буде рівна:

$$u_s i_1 = u_s (i_{p1} + i_{q1}) = R_s i_1 (i_{p1} + i_{q1}) + L_s (i_{p1} + i_{q1}) \frac{di_1}{dt} + u_1 i_{p1} + u_1 i_{q1} \quad (1.9)$$

Неактивні компоненти є результатом взаємодії між u_s з i_H , тому:

$$u_s i_H = R_s i_1 i_H + L_s i_H \frac{di_1}{dt} + u_1 i_H \quad (1.10)$$

Основна миттєва потужність рівна:

$$p_{p1} = u_1 i_{p1} = \hat{U}_1 \sin(\omega t) [\hat{I}_1 \cos \theta_1 \sin(\omega t)] \quad (1.11)$$

Аналогічним чином можна знайти основну миттєву реактивну потужність:

$$p_{q1} = u_1 i_{q1} = \hat{U}_1 \sin(\omega t) [-\hat{I}_1 \sin \theta_1 \cos(\omega t)] \quad (1.12)$$

З (1.8) ми можемо знайти:

$$u_s i_{p1} = R_s i_1 i_{p1} + L_s i_{p1} \frac{di_1}{dt} + p_{p1} \quad (1.13)$$

Та

$$u_s i_{q1} = R_s i_1 i_{q1} + L_s i_{q1} \frac{di_1}{dt} + p_{q1} \quad (1.14)$$

За Законом Кірхгофа напруга для основної частоти дорівнює:

$$u_H = \sum_{h \neq 1} u_h = R_s \sum_{h \neq 1} i_h + L_s \sum_{h \neq 1} \frac{di_h}{dt} = R_s i_H + L_s \frac{di_H}{dt} \quad (1.15)$$

це дає миттєву потужність, через наявність i_1 :

$$u_H i_1 = R_s i_H i_1 + L_s i_1 \frac{di_H}{dt} \quad (1.16)$$

і миттєву потужність за рахунок i_H :

$$\begin{aligned} u_H i_H &= \sum_{h \neq 1} u_h \sum_{h \neq 1} i_h = \sum_{h \neq 1} u_h i_h + \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}} u_m i_n = \\ &= R_s \sum_{h \neq 1} i_h^2 + R_s \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}} i_m i_n + L_s \left[\sum_{h \neq 1} i_h \frac{di_h}{dt} + \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}} i_m \frac{di_n}{dt} \right] \end{aligned} \quad (1.17)$$

Перша складова у (1.17) – це частина потужності, яка підводиться до R_s , у тому числі загальна гармонійна активна потужність P_H та миттєва внутрішня потужність першого порядку. Друга складова в (1.17) – це частина миттєвої внутрішньої потужності mn -порядку. Остання складова являє собою коливальну потужність між u_H та L_s .

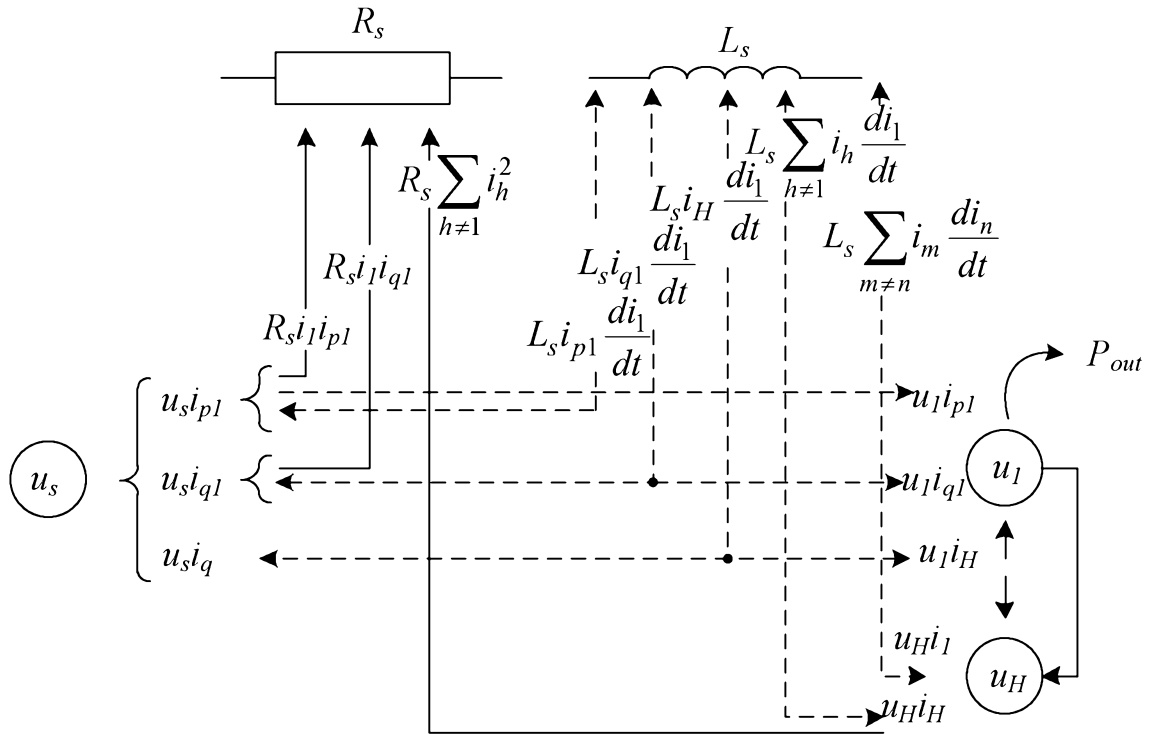


Рисунок 1.3 – Потік миттєвих потужностей, які відображають компоненти потоку вектору Пойтінга. (потік внутрішніх потужностей не показаний)

Далі перевіримо миттєву потужність на $u_s i_H$. З (1.8) отримаємо:

$$u_s i_H = R_s i_1 i_H + L_s i_H \frac{di_1}{dt} + u_1 i_H \quad (1.18)$$

Також перша складова в (1.16) і (1.18) є частиною внутрішньої миттєвої потужності p_{iH} , а інша частина миттєвої потужності, представлена на рисунку 1.3.

Набір рівнянь з (1.10) до (1.18) допоміг визначити графік потоку миттєвої потужності, який зображений на рисунку 1.3. Як і в попередніх прикладах, ми виявили, що частина активної потужності, яка подається на u_s рухається до R_s , решта подається на u_1 . Також частина активної потужності передається u_H до R_s .

Падіння напруги через лінійну індуктивність L_s рівне:

$$u_{Ls} = \frac{di}{dt} = L_s \left(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_H}{dt} \right) \quad (1.19)$$

Миттєва потужність, яка подається на L_s буде рівна:

$$p_{Ls} = u_{Ls} \left(i_1 + \sum_{h \neq 1} i_h \right) = L_s \left(i_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{di_H}{dt} + i_H \frac{di_1}{dt} + \sum_{h \neq 1} i_h \frac{di_h}{dt} + \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}} i_m \frac{di_n}{dt} \right) \quad (1.20)$$

Синусоїдальне джерело напруги u_s постачає три значення миттєвої потужності: $u_s i_{p1}$ (1.13), $u_s i_{q1}$ (1.14) та $u_s i_H$. Нелінійне навантаження NL отримує миттєву активну потужність через $u_1 i_{p1}$ (1.11) і забезпечує миттєву активну потужність через активні компоненти $u_H i_H$ (1.17).

Це нелінійне навантаження взаємодіє з енергією, яка живиться п'ятьма різними миттєвими потужностями: потужність $u_1 i_{p1}$ – це односпрямована миттєва потужність. Компонент $u_1 i_{q1}$ пульсацій з нульовим середнім значенням при взаємодії L_s , NL та u_s . До цієї категорії відносяться потужності $u_1 i_H$ та $u_H i_1$. Нарешті, миттєва потужність $u_H i_H$ має односпрямовані компоненти, які протікають з NL до R_s та миттєву потужність, яка коливається між NL та L_s .

Припускаючи, що нелінійне навантаження постачає миттєву потужність p_{out} , закон збереження енергії вимагає виконання умови:

$$(u_1 - u_H)(i_1 + i_H) = p_{out} \text{ або } u_1 i_1 + u_1 i_H = p_{out} + u_H i_1 + u_H i_H \quad (1.21)$$

Вирішимо рівняння, використовуючи (1.21), яке вказує на механізм генерації гармонік:

$$\int_0^T (u_1 i_1 + u_1 i_H) dt = \int_0^T p_{out} dt + \int_0^T (u_H i_1 + u_H i_H) dt \quad (1.22)$$

Це рівняння пояснює: “електрична енергія, яка постачається до нелінійного навантаження дорівнює енергії, яка перетворюється на навантаженні в тепло, чи в іншу форму енергії, та енергії, яка перетворюється в енергію більш високих гармонійних частот та повертається в мережу”.

Краса представлення миттєвої потужності, показана на рисунку 1.3, вона гарно узгоджується з потоком енергії, визначеним, як середнє значення вектору Пойтинга. Кожна миттєва потужність показана на рисунку 1.3 відображається в одному з компонентів електромагнітних хвиль з частотою щільності потоку енергії $\vec{\phi} = \vec{E} \times \vec{H}$. Це твердження базується на тому, що вектор Пойтинга пропорційний миттєвій потужності, $\phi = \left(\frac{K_E K_H}{r^2} \right) ui$.

Згідно з рисунком 1.3 спеціально призначений високоякісний інструмент або ватметр, підключений до клем нелінійного навантаження, буде вимірювати наступні п'ять значень миттєвої потужності.

З (1.11) отримаємо результати:

$$p_{p1} = u_1 i_{p1} = U_1 I_1 \cos \theta_1 [1 - \cos(2\omega t)] = P_1 + p_{i1}, \quad P_1 = U_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (1.23)$$

Та з (1.12)

$$p_{q1} = -Q_1 \sin(2\omega t); \quad Q_1 = U_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (1.24)$$

Наступною складовою в (1.10) є “приховане” значенням миттєвої потужності спотворення струму:

$$p_{DI} = u_1 i_H = 2U_1 \sum_{h \neq 1} I_h \sin(\omega t) \sin(h\omega t + \alpha_h); \quad (1.25)$$

$$p_{DI} = U_1 \sum_{h \neq 1} I_h \{ \cos[(h-1)\omega t + \alpha_h] - \cos[(h+1)\omega t + \alpha_h - \theta_h] \}.$$

З рівняння (1.16) можливо знайти миттєву, спотворену напругою, потужність, як $u_H i_1$, яка охоплює також $L_s i_1 \frac{di_H}{dt}$. Детально розписаний вираз цих коливань буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} p_{DV} &= u_H i_1 = 2I_1 \sum_{h \neq 1} U_h \sin(\omega t - \theta_1) \sin(h\omega t + \alpha_h + \theta_h) = \\ &= I_1 \sum_{h \neq 1} U_h \{ \cos[(h-1)\omega t + \alpha_h + \theta_1 + \theta_h] - \cos[(h+1)\omega t + \alpha_h - \theta_h - \theta_1] \} \end{aligned} \quad (1.26)$$

Нарешті, з (1.17) ми отримуємо миттєве значення гармонійної потужності, яка подається на джерело гармонійної напруги u_H :

$$\begin{aligned} p_H &= u_H i_H = R_s \sum_{h \neq 1} [\hat{I}_h \sin(h\omega t + \alpha_h + \theta_h)]^2 + R_s \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}} i_m i_n + \\ &+ L_s \omega \sum_{h \neq 1} h \hat{I}_h^2 \sin(h\omega t + \alpha_h) \cos(h\omega t + \alpha_h) + \end{aligned} \quad (1.27)$$

$$\begin{aligned}
& + L_s \omega \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}} n \hat{I}_m \hat{I}_n \sin(m\omega t + \alpha_m) \cos(n\omega t + \alpha_n) = \\
& = \sum_{h \neq 1} (P_h + p_{ih}) + R_s \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}} i_m i_n + \sum_{h \neq 1} Q_h \sin(2h\omega t + 2\alpha_h) + \\
& + 2L_s \omega \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}} n I_n I_m \{ \sin[(m-n)\omega t + \alpha_m - \alpha_n] - \sin[(m+n)\omega t + \alpha_m + \alpha_n] \}
\end{aligned}$$

Ця складова охоплює загальну гармонійну потужність $P_H = \sum_{h \neq 1} P_h$, миттєву внутрішню потужність $p_{iH} = \sum_{h \neq 1} p_{ih}$, частину внутрішньої потужності другого порядку та частину потужності, яка коливається між L_s та u_H .

Тільки миттєві потужності p_{p1} та p_H мають середні значення та забезпечують миттєві потужності P_1 та P_H , відповідно. Всі інші миттєві потужності є неактивними.

З рисунку 1.3 отримаємо результати, щодо значення втрат миттєвої потужності в лінії:

$$\Delta p = R_s \left(i_1 i_{p1} + i_1 i_{q1} + \sum_{h \neq 1} i_h^2 \right) \quad (1.28)$$

Замінивши $i_1 = i_{p1} + i_{q1}$ та $i_h = i_{ph} + i_{qh}$ у виразі (1.28) отримаємо:

$$\Delta p = R_s \left[i_{p1}^2 + i_{q1}^2 + 2i_{p1}i_{q1} + \sum_{h \neq 1} (i_{ph}^2 + i_{qh}^2 + 2i_{ph}i_{qh}) \right] \quad (1.29)$$

Тому активна потужність втрачається в лінії, яка живить нелінійне навантаження:

$$\begin{aligned}\Delta P &= R_s \left[I_{p1}^2 + I_{q1}^2 + \sum_{h \neq 1} (I_{ph}^2 + I_{qh}^2) \right] = \\ &= R_s \left\{ \left(\frac{P_1}{U_1} \right)^2 + \left(\frac{Q_1}{U_1} \right)^2 + \sum_{h \neq 1} \left[\left(\frac{P_h}{U_h} \right)^2 + \left(\frac{Q_h}{U_h} \right)^2 \right] \right\}\end{aligned}\quad (1.30)$$

Цей результат є дуже важливим, оскільки він доводить, що втрати потужності в лінії електропередачі, яка проводить несинусоїдальний струм є функцією квадрату активних потужностей (P_1^2 та $\sum_{h \neq 1} P_h^2$), квадрату реактивних потужностей (Q_1^2 та $\sum_{h \neq 1} Q_h^2$) та квадрату напруги U_1^2 та U_h^2 .

Вираз, який викладений нижче для синусоїдальних умов,

$$\Delta P = R_s I^2 = R_s (I_p^2 + I_q^2) = \frac{R_s}{U^2} (P^2 + Q^2) = \frac{R_s}{U^2} S^2 \quad (1.31)$$

може бути використаний в умовах однофазних несинусоїдальних.

$$\begin{aligned}\Delta P &= R_s I^2 = \frac{R_s}{U^2} U^2 I^2 = \frac{R_s}{U^2} \left[U_1^2 + \sum_{h \neq 1} U_h^2 \right] \left[I_{p1}^2 + I_{q1}^2 + \sum_{h \neq 1} (I_{ph}^2 + I_{qh}^2) \right] = \\ &= \frac{R_s}{U^2} \left[P_1^2 + Q_1^2 + U_1^2 \sum_{h \neq 1} I_h^2 + I_1^2 \sum_{h \neq 1} U_h^2 + \sum_{h \neq 1} U_h^2 \sum_{h \neq 1} I_h^2 \right]\end{aligned}\quad (1.32)$$

Останній вираз є важливим, оскільки він показує, що всі п'ять значень миттєвої потужності p_{p1} , p_{q1} , p_{DI} , p_{DV} та p_H , з (1.23) до (1.26), впливають на втрати потужності в лінії електропередачі.

Якщо розглядати двигуни змінного струму і аналізувати теорію обертового поля, то ми зрозуміємо, що кожна гармоніка напруги створює обертовий магнітний потік. Однак, це тільки основна напруга, яка підтримує обертове магнітне поле; інші гармоніки обертового поля шкідливі та спричиняють паразитні крутні моменти та додаткові втрати. Маючи на увазі, що двигуни змінного струму є більшістю з навантажень (актуально для трифазних систем), то доцільно розглядати гармоніки, активні та неактивні, в якості побічного продукту перетворення енергії з 60/50 Гц в частотні гармоніки енергії і розглядати гармонійну енергію, яка генерується нелінійним навантаженням у вигляді електромагнітного забруднення.

Гармонійна активна потужність $P_H = \sum_{h \neq 1} P_h = \sum_{h \neq 1} U_h I_h \cos \theta_h$ на думку

багатьох інженерів, є прийнятим показником гармонійного забруднення. У переважній більшості практичних ситуацій $P_H \ll P_1$. В ту ж мить, значення кожної P_h пояснюється тим, що фазовий кут $|\theta_h| \approx 90^\circ$ ($\tan \theta_h = h\omega L_s / R_s$ та зазвичай $h\omega L_s \gg R_s$). Якщо навантаження є лінійним, то $P_H > 0$, якщо ж навантаження є нелінійним і генерує гармонійну енергію, то $P_H < 0$. Ця умова справедлива тільки в тому випадку, якщо нелінійне навантаження є досить великим і відокремленим від інших нелінійних навантажень. Існує безліч ситуацій, коли нелінійне навантаження поглинає енергію певної гармонійної частоти і постачає енергію на інших частотах [16, 17]. Це відбувається, коли досліджуване нелінійне навантаження переважає інші нелінійні навантаження які живляться від цього ж фідера та досліджуване нелінійне навантаження, яке виступає в якості приймача (активного фільтру). Це означає, що одна або більше гармонійних складових струму інжектуючі. Вектори на досліджуваному

навантажені не співпадають по фазі з більш крупнішими інжектуючими фаворами більших навантажень.

Аналіз, результати і спостереження, які представлені у даному підпункті, можуть здатися відділеними від реального проектування приладів обліку, вибору розподільчого пристрою або планування оптимальної стратегії щодо поліпшення коефіцієнта потужності. Тим не менше, цей матеріал надає міцну основу, сприяє об'єктивній оцінці різних очевидних аналізів потужності та допомагає встановити переваги і недоліки різних тверджень.

1.2 Розрахунок схеми електропостачання за умов несинусоїдальності

Причиною виникнення несинусоїдальних струмів і напруг в системах електропостачання підприємств є нелінійні ВАХ елементів електричних мереж та споживачів електроенергії. Дані навантаження споживають з мережі струм, крива якого є несинусоїдальною.

В результаті цього виникають спотворення кривої напруги та струму мережі або, іншими словами, несинусоїдальну режиму роботи системи електропостачання.

Розрахунок режимі вищих гармонійних складових виконується при наступних допущеннях [1]:

- система електропостачання передбачається симетричною та лінійною, тобто всі фази мережі мають однойменні параметри;
- опір елементів струмами вищих гармонійних складових прямої та зворотної послідовності одної частоти приймається однаковим;
- джерела гармонійних складових представляються симетричними трифазними навантаженнями, які генерують в мережу струми вищих гармонік;

Ці допущення дозволяють розглянути режим кожної гармонійної складової незалежно від режиму іншої та використати для розрахунку амплітудних спектрів принцип накладення.

Для проведення розрахунків необхідно мати наступні початкові дані:

- однолінійну схему електропостачання;
- дані про елементи електричної мережі, які необхідні для розрахунку параметрів їх схем заміщення;
- дані про параметри джерел вищих гармонійних складових та режимах їх роботи.

Розрахунок несинусоїдального режиму по запропонованій методиці включає в себе виконання наступних етапів [7]:

1. Складається схема заміщення системи електропостачання для струмів вищих гармонік. Схема заміщення складається на одну фазу та має нейтраль, до якої під'єднуються нульові точки схем заміщення генераторів, узагальнених навантажень, батарей конденсаторів та ємнісні провідності ліній електропередачі напругою вище 1 кВ. Спотворюючі навантаження моделюються джерелами струмів безкінечної потужності, які підключені до відповідних вузлів схеми заміщення. Для ЛЕП складається схема заміщення з урахуванням хвильового характеру лінії. Схема заміщення трансформаторів складається з урахуванням комплексних коефіцієнтів трансформації. Топологія схеми заміщення описується за допомогою двох масивів, в яких вказуються номери вузлів початків та кінців гілок.

2. Виконується розрахунок параметрів схем заміщення елементів системи електропостачання споживачі та розподільчих мереж енергосистем для струмів зворотної послідовності промислової частоти.

При цьому, активними опорами елементів нехтуються, а коефіцієнти, які враховують витіснення струму у провідниках на індуктивний опір елементів, вважають постійними на розглянутому діапазоні частот.

3. Визначається спектральний склад струмів джерел вищих гармонійних складових. У зв'язку з тим, що рівні напруг суттєво впливають на амплітудні та фазові спектри струмів перетворювачів, при їх розрахунках необхідно використовувати значення фактичних напруг електромережі, знайдені при розрахунку режиму прямої послідовності промислової частоти.

4. Проводиться розрахунок режиму вищої гармонійної складової. Формується матриця провідностей вузлів Y_y , яка перераховується в спеціальну мало заповнену матрицю коефіцієнтів перетворення G_n .

5. Напруга вищих гармонійних складових у вузлах схеми заміщення та струми у гілках розраховуються за формулами:

$$\dot{U}_n = G_n \times \dot{J}_n; \quad (1.33)$$

$$\dot{I}_n = Y_{bn} M_t \dot{U}_n, \quad (1.34)$$

де $\dot{U}_n$, $\dot{J}_n$ – стовпчикові комплексні матриці вузлових напруг та струмів для n -ої гармоніки;

M_t – транспонована перша матриця інцидентів;

Y_{bn} – матриця провідностей для гілок n -ої гармоніки;

G_n – квадратна комплексна матриця коефіцієнтів перетворення, яка формується на основі матриці провідностей вузлів для струмів n -ої гармоніки Y_{yn}

Оскільки на першому кроці ітераційного процесу для ліній електропередачі значення діючих струмів приймаються рівними нулю, $I_{nn}^* = 0$, $I_{kn}^* = 0$, то знайдені значення $\dot{U}_n$ та $\dot{I}_n$ є наближеними.

6. Використовуючи знайдені значення $\dot{U}_n$ та $\dot{I}_n$, телеграфні рівняння, уточнюючи значення задаючих струмів, виконують повторний розрахунок за формулами (1.33) та (1.34).

7. Пункти 5 та 6 виконуються для кожної з розглянутих гармонік до тих пір, поки для напруги у всіх вузлах не виконається умова:

$$\delta U = \frac{U_{ni} - U_{ni+1}}{U_{ni}}, \quad (1.35)$$

де U_{ni} та U_{ni+1} – значення напруг для n -ої гармоніки на i та $i+1$ кроці;
 δ – значення приросту напруги.

8. По знайденим значенням напруги U_{ni} розраховуються коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U у вузлах, та діюче значення струму I_{ni} у гілках схеми заміщення.

1.3 Показники якості за напругою та потужністю за умов несиметрії

Несиметрія напруги. Найбільш поширеними джерелами несиметрії напруг у трифазних системах електропостачання є такі споживачі електроенергії, симетричне трифазне навантаження яких або неможливе, або недоцільне з техніко-економічних міркувань. До таких установок відносяться індукційні та дугові електричні печі, тягові навантаження залізничних потягів, освітлювальні установки, зварювальні трансформатори. Несиметричні режими напруги в електричних мережах мають місце також в аварійних ситуаціях – при обриві фази або несиметричних коротких замиканнях. Несиметрія напруг характеризується наявністю в трифазній електричній мережі напруг зворотної

або нульової послідовностей, що є значно меншими за величиною, ніж відповідні складові напруги прямої (основної) послідовності [5].

Несиметрія трифазної системи напруг виникає внаслідок накладення на систему прямої послідовності системи напруг зворотної послідовності, що призводить до змін абсолютних значень фазних і міжфазних напруг (рис. 1.4).

Крім несиметрії, що викликається напругами системи зворотної послідовності, може виникати несиметрія від накладення на систему прямої послідовності системи напруг нульової послідовності. В результаті зсуву нейтралі трифазної системи виникає несиметрія фазних напруг при збереженні симетричної системи міжфазних напруг (рис. 1.5).

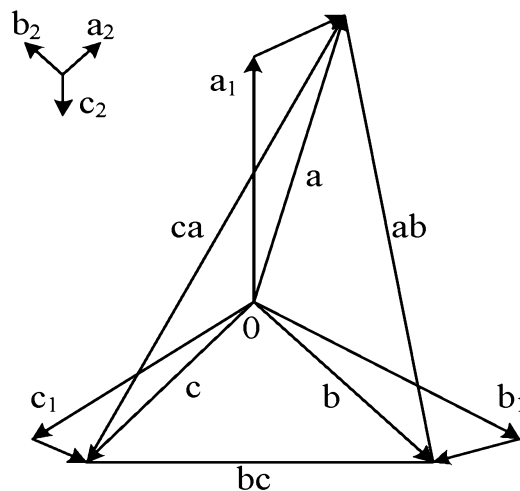


Рисунок 1.4 – Векторна діаграма напруг прямої та зворотної послідовностей

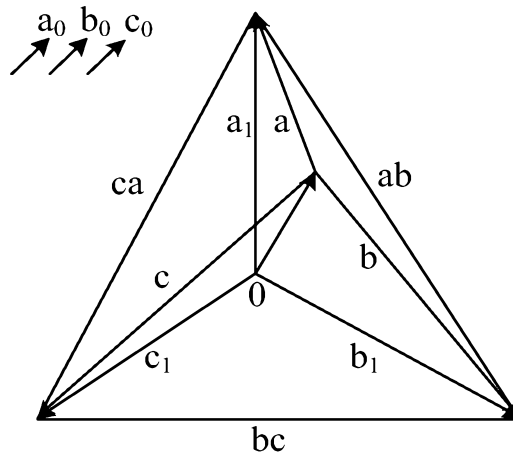


Рисунок 1.5 – Векторна діаграма напруг прямої та нульової послідовностей

Несиметрія напруг характеризується наступними показниками:

- коефіцієнтом несиметрії напруги по зворотній послідовності;
- коефіцієнтом несиметрії напруг за нульовою послідовністю.

Коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності дорівнює:

$$K_{2U} = \frac{u_{2(1)}}{u_{1(1)}} \cdot 100\%, \quad (1.36)$$

де $u_{2(1)}$ – діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруг, В;

$u_{1(1)}$ – діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти, В.

Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю дорівнює:

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3}u_{0(1)}}{u_{1(1)}} \cdot 100\%, \quad (1.37)$$

де $u_{0(1)}$ – діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти трифазної системи напруг, В.

Вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю проводять у чотирьохпровідниковій мережі. Нормально допустиме і гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в точці загального приєднання до електричних мереж складають 2,0 і 4,0 %.

Нормовані значення коефіцієнта несиметрії напруги за нульовою послідовністю в точці загального приєднання до чотирьохпровідникової електричної мережі 0,38 кВ також дорівнюють 2,0 і 4,0 %.

Використовуючи метод симетричних складових та використовуючи часові залежності змінних величин у трифазній системі напруги, представляються у вигляді симетричної системи:

$$u_a = U_m \sin \theta \quad u_c = U_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); \quad u_e = U_m \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right), \quad (1.38)$$

де U_m – амплітудне значення напруги;

$\theta = \omega t$ – кутова частота живильної напруги.

Вважаючи струми несиметричними, можна представити їх у вигляді суми струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей:

$$i_a = I_{1m} \sin(\theta - \varphi_1) + I_{2m} \sin(\theta - \varphi_2) + I_{0m} \sin(\theta - \varphi_0); \quad (1.39)$$

$$i_b = I_{1m} \sin\left(\theta - \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{2m} \sin\left(\theta - \varphi_2 - \frac{4\pi}{3}\right) + I_{0m} \sin(\theta - \varphi_0); \quad (1.40)$$

$$i_c = I_{1m} \sin\left(\theta - \varphi_1 - \frac{4\pi}{3}\right) + I_{2m} \sin\left(\theta - \varphi_2 - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{0m} \sin(\theta - \varphi_0), \quad (1.41)$$

де I_{1m} , I_{2m} , I_{0m} – амплітудні значення струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей;

φ_1 , φ_1 , φ_1 – фазовий кут прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Знаходимо миттєві потужності фаз:

$$p_a = U_m \sin \theta [I_{1m} \sin(\theta - \varphi_1) + I_{2m} \sin(\theta - \varphi_2) + I_{0m} \sin(\theta - \varphi_0)]; \quad (1.42)$$

$$p_b = U_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \left[I_{1m} \sin\left(\theta - \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{2m} \sin\left(\theta - \varphi_2 - \frac{4\pi}{3}\right) + I_{0m} \sin(\theta - \varphi_0) \right]; \quad (1.43)$$

$$p_c = U_m \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \left[I_{1m} \sin\left(\theta - \varphi_1 - \frac{4\pi}{3}\right) + I_{2m} \sin\left(\theta - \varphi_2 - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{0m} \sin(\theta - \varphi_0) \right]. \quad (1.44)$$

Середнє значення миттєвої потужності – постійна складова, вводячи діючі значення напруги і відповідних струмів послідовностей отримаємо:

$$\bar{p}_a = UI_1 \cos \varphi_1 + UI_2 \cos \varphi_2 + UI_0 \cos \varphi_0; \quad (1.45)$$

$$\bar{p}_b = UI_1 \cos \varphi_1 + UI_2 \cos\left(\varphi_2 + \frac{2\pi}{3}\right) + UI_0 \cos\left(\varphi_0 - \frac{2\pi}{3}\right); \quad (1.46)$$

$$\bar{p}_c = UI_1 \cos \varphi_1 + UI_2 \cos\left(\varphi_2 - \frac{2\pi}{3}\right) + UI_0 \cos\left(\varphi_0 + \frac{2\pi}{3}\right). \quad (1.47)$$

Активна потужність трифазної системи $\bar{p}$ рівна сумі активних потужностей усіх фаз:

$$\bar{p} = 3UI_1 \cos \varphi_1 \quad (1.48)$$

Отже, у несиметричній трифазній системі із симетричним живленням, активна потужність переноситься тільки активними складовими струмів прямої послідовності, які і являються активними складовими струмів фаз.

Миттєва активна потужність складається з постійної та змінної складової. У розглянутому випадку складову миттєвої потужності можна представити у вигляді суми трьох складових, які обумовлені прямою, зворотною та нульовою послідовностями складових струмів.

$$\tilde{p} = p - \bar{p} = \tilde{p}_1 + \tilde{p}_2 + \tilde{p}_0 \quad (1.49)$$

Пряма послідовність струму не складає пульсацій миттєвої потужності у трифазній системі [15], тому $\tilde{p}_1 = 0$.

Пульсації миттєвої потужності, обумовлені зворотною послідовністю струму:

$$\begin{aligned} \tilde{p}_2 &= U_m I_{2m} \left[\sin \theta \sin(\theta - \varphi_2) + \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\theta - \varphi_2 - \frac{4\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \sin\left(\theta - \varphi_2 - \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \\ &= UI_2 \left[\sin(2\theta - \varphi_2) + \sin\left(2\theta - \varphi_2 - \frac{2\pi}{3} - \frac{4\pi}{3}\right) \sin(2\theta - \varphi_2 - \frac{4\pi}{3} - \frac{2\pi}{3}) \right] = 3UI_2 \sin(2\theta - \varphi_2) \end{aligned} \quad (1.50)$$

Змінна складова миттєвої потужності, обумовлена нульовою послідовністю струму утворює зрівноважену систему векторів:

$$\begin{aligned}\tilde{p}_0 &= U_m I_{0m} \left[\sin \theta \sin(\theta - \varphi_0) + \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \sin(\theta - \varphi_0) + \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \sin(\theta - \varphi_0) \right] = \\ &= UI_0 \left[\sin(2\theta - \varphi_0) + \sin\left(2\theta - \varphi_0 - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(2\theta - \varphi_0 - \frac{4\pi}{3}\right) \right] = 0\end{aligned}\quad (1.51)$$

Сумарна змінна складова миттєвої потужності має вигляд:

$$\tilde{p} = 3UI_2 \sin(2\theta - \varphi_2) \quad (1.52)$$

У випадку наявності вищих гармонік даний підхід не є раціональним. В даному випадку розрахунки необхідно виконувати для кожної гармоніки і знаходити середнє значення всіх гармонік.

1.4 Розрахунок несиметричного режиму електричної мережі

Розглянемо трифазне коло з симетричним генератором, симетричним навантаженням, в лінії якого виникла несиметрія (наприклад КЗ або обрив фази) рисунок 1.6.

Алгоритм розрахунку фазних струмів $\hat{I}_A$, $\hat{I}_B$, $\hat{I}_C$ та фазних напруг $\hat{U}_A$, $\hat{U}_B$, $\hat{U}_C$ несиметричної ділянки при розрахунку методом симетричних складових буде однаковим для любого виду несиметрії

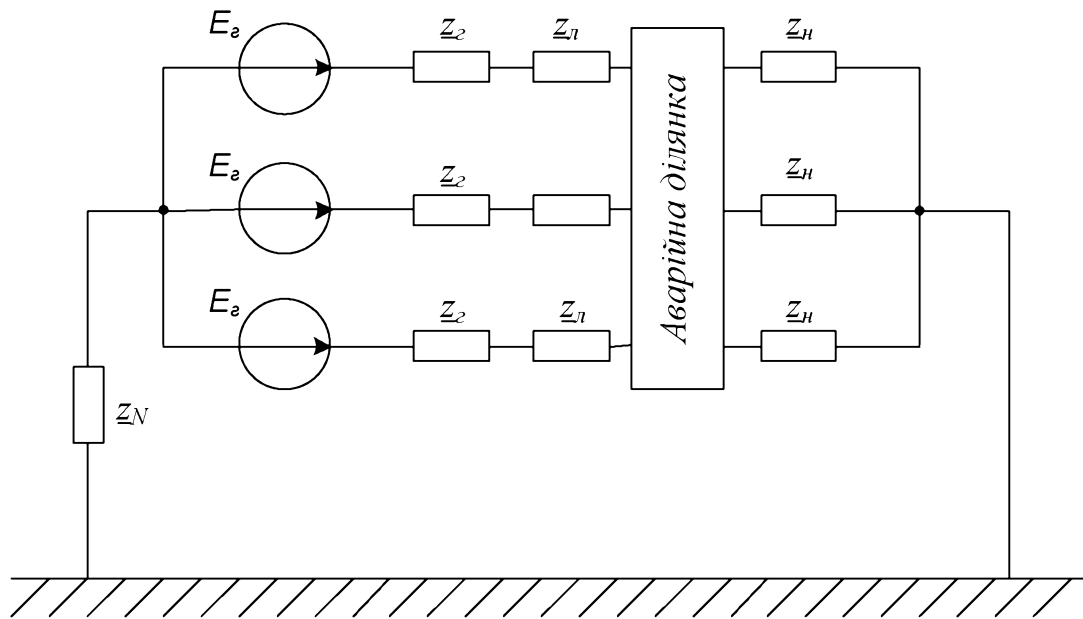


Рисунок 1.6 – Трифазне несиметричне коло

При розрахунку несиметрії роблять наступне:

1. Складають розрахункову схему, в якій несиметричну ділянку в лінії по принципу компенсації замінюють еквівалентним джерелом з несиметричною системою напруг $\hat{U}_A$, $\hat{U}_B$, $\hat{U}_C$ в місці несиметрії. При поперечній несиметрії це джерело увімкнене між фазами і землею, при прокольній – у розріз фази.

2. Трифазні несиметричні системи напруг, струмів та ЕРС, яка діє в колі, представляють як суму складових прямої, зворотної та нульової послідовностей.

3. Початкове коло замінюють трьома схемами, в кожній з яких присутні опори та діючі ЕРС, напруги і струми відповідних послідовностей. Так як ці схеми будуть симетричними, розрахунок кожної з них достатньо проводити тільки для одної фази (фази А). Тому, для розрахунку складають три однофазні схеми: прямої, зворотної та нульової послідовностей.

4. Однофазні схеми заміщення перетворюють до найпростішого виду. Складають для них рівняння за другим законом Кірхгофа.

5. Додатково записують граничні умови у місці несиметрії, виражаючи при цьому напруги та струми через симетричні складові.

6. Розраховуючи систему рівнянь, розраховують симетричні складові струмів та напруг.

7. Після розрахунку симетричних складових визначають шукані струми і напруги.

Системи прямої та зворотної послідовностей є урівноваженими, тобто сума векторів всіх трьох фаз рівна нулю. Система нульової послідовності – не урівноважена, сума векторів рівна потроєному значенню одного вектора. Тому напруги вихідної системи будуть розраховуватися як сума відповідних симетричних складових:

$$\hat{U}_A = \hat{U}_{A1} + \hat{U}_{A2} + \hat{U}_{A0};$$

$$\hat{U}_B = \hat{U}_{B1} + \hat{U}_{B2} + \hat{U}_{B0}; \quad (1.53)$$

$$\hat{U}_C = \hat{U}_{C1} + \hat{U}_{C2} + \hat{U}_{C0}.$$

Для більш компактного запису використовують оператор фази $a = e^{j120^\circ}$. Використовуючи його, напруги для аз В та С можна виразити через напругу фази А (індекс А в подальшому не використовується для спрощення записів):

$$\hat{U}_{B1} = a^2 \hat{U}_{A1} = a^2 \hat{U}_1;$$

$$\hat{U}_{C1} = a \hat{U}_{A1} = a \hat{U}_1; \quad (1.54)$$

$$\hat{U}_{B2} = a\hat{U}_{A2} = a\hat{U}_2;$$

$$\hat{U}_{C2} = a^2\hat{U}_{A2} = a^2\hat{U}_2.$$

У системі нульової послідовності всі напруги мають однакову фазу, тому:

$$\hat{U}_{A0} = \hat{U}_{B0} = \hat{U}_{C0} = \hat{U}_0 \quad (1.55)$$

Тому, з урахуванням виразу (1.54) та (1.55) система (1.53) буде мати наступний вигляд:

$$\hat{U}_A = \hat{U}_1 + \hat{U}_2 + \hat{U}_0;$$

$$\hat{U}_B = a^2\hat{U}_1 + a\hat{U}_2 + \hat{U}_0; \quad (1.56)$$

$$\hat{U}_C = a\hat{U}_1 + a^2\hat{U}_2 + \hat{U}_0.$$

По такому принципу можна записати системи рівнянь для струму.

При складанні схем заміщення потрібно враховувати наступні моменти:

- якщо навантаження з'єднане за схемою трикутника, то його потрібно перетворити у зірку та знайти відповідні опори всіх послідовностей для зірки;
- якщо система ЕРС генератора симетрична, то фазна напруга генератора буде присутня тільки у схемі прямої послідовності. Несиметрична система вихідних ЕРС розкладається на симетричні складові:

$$\hat{U}_0 = \frac{1}{3}(\hat{U}_A + \hat{U}_B + \hat{U}_C)$$

$$\hat{U}_1 = \frac{1}{3}(\hat{U}_A + a\hat{U}_B + a^2\hat{U}_C) \quad (1.57)$$

$$\hat{U}_2 = \frac{1}{3}(\hat{U}_A + a^2\hat{U}_B + a\hat{U}_C).$$

– схеми прямої та зворотної послідовностей не будуть містити в собі опір нульового проводу, так як струми цих послідовностей по нульовому проводу не протікають $\hat{I}_A + \hat{I}_B + \hat{I}_C = 0$;

– схема нульової послідовності складається при несиметричних КЗ на землю, а також при обриві однієї або двох фаз.

– опір нейтрального проводу у схему нульової послідовності вводиться потрійної величини. Це зв'язано з тим, що по нульовому проводу протікають струми $\hat{I}_0$ всіх трьох фаз, тобто $\hat{I}_N = 3\hat{I}_0$. Рівняння за другим законом Кірхгофа по контуру фази А для нульової послідовності запишеться як $\hat{I}_0 \underline{z}_0 + 3\hat{I}_0 \underline{z}_N = \hat{U}_0$.

Звідси і вийде формула для комплексного еквівалентного опору нульової послідовності:

$$\underline{z}_{0e} = \frac{\hat{U}_0}{\hat{I}_0} = \underline{z}_0 + 3\underline{z}_N \quad [3]. \quad (1.58)$$

2 ПОВНА ПОТУЖНІСТЬ МЕРЕЖІ ЦЕХУ ЗІ ЗВАРЮВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ

На якість електричної енергії впливає робота електричного обладнання. В нашому випадку цим обладнання являються зварювальні установки. Рівномірний розподіл навантаження по фазах трифазної мережі не завжди вдається, особливо за наявності крупних зварювальних установок. Тому в трифазній мережі з установкам електрозварювань виникає несиметрія струмів, яка приводить до несиметрії напруги. Звідси і виникає необхідність оцінки повної потужності цехової мережі.

2.1 Модель технологічної ділянки цеху та зварювальної установки

У цеху розташовані, токарні верстати, вертикально-свердлильні верстати, гідравлічні і ексцентрикові преси, зварювальні трансформатори.

Усі електроприймачі живляться напругою 380 В.

Освітлювальне навантаження складає окрему групу яка живиться напругою 220 В.

Приміщення цеху відноситься до нормальних за ступенем пожежо- і вибухобезпеки, з нормальним хімічним середовищем і вологістю, сухе.

Споживачі електроенергії можна умовно розбити на дві групи: з лінійним навантаженням та з нелінійним навантаженням.

До групи споживачів з лінійним навантаженням можна віднести токарні верстати, вертикально-свердлильні верстати, гідравлічні і ексцентрикові преси. До нелінійних – зварювальні трансформатори.

Ділянка №3 – типу ШРА 73 У3 з наступними технічними даними:

- 1) номінальний струм $I_{ном} = 250 \text{ A}$;
- 2) електродинамічна стійкість 15 кА;
- 3) поперечний переріз 260x80 мм.

Ділянка №4 – типу ШРА 73 У3 з наступними технічними даними:

- 1) номінальний струм $I_{ном} = 630 \text{ A}$;
- 2) електродинамічна стійкість 35 кА;
- 3) поперечний переріз 284x125 мм.

Щоб перейти до схеми заміщення системи електропостачання цеху доцільно представити схеми заміщення деяких елементів: лінії електропередачі (рис. 2.2) та трансформатора (рис. 2.3).

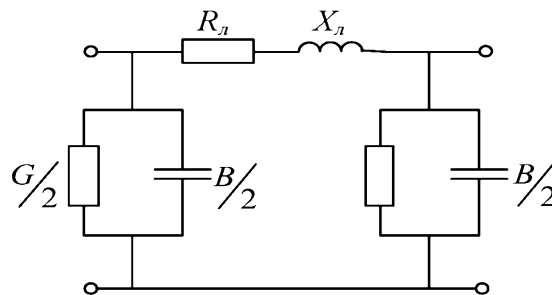


Рисунок 2.2 – Схема заміщення лінії електропередачі

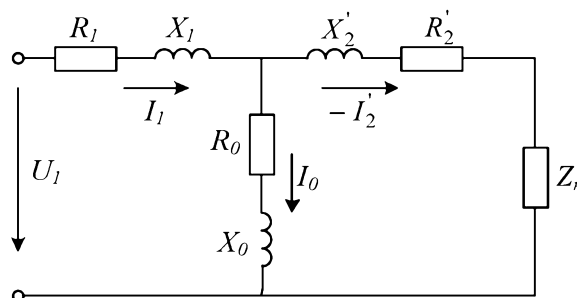


Рисунок 2.3 – Схема заміщення трансформатора

2.2 Моделювання та дослідження процесів у системі електропостачання цеху

На основі схеми електропостачання цеху у пакеті візуального програмування було складено схему заміщення ділянки цеху зі зварювальною установкою змінного струму (рис.2.6).

Для оцінки роботи зварювального обладнання та його впливу на систему електропостачання цеху, було проведено наступні дослідження:

- повної схеми електропостачання цеху;
- схеми без еквівалентного навантаження (лінійного) на шині ШРА4;
- схеми без роботи одного із розрядників.

Нижче представлений перелік елементів, які входять до системи електропостачання цеху та їхні параметри:

- джерело живлення (*Three-Phase Source*): $U_n = 10$ кВ, $f = 50$ Гц;
- знижувальний трансформатор ТС3/400/10/0,4: $S = 400$ кВА, $U_{BH} = 10$ кВ, $U_{HH} = 0,4$ кВ, $R_1 = 0,54$ Ом, $L_1 = 6,7$ мГн, $R_2 = 0,54$ мОм, $L_2 = 0,067$ мГн;
- шина ШМА2: $R = 0,665$ мОм, $L = 0,0015$ мГн;
- шина ШРА4: $R = 4,785$ мОм, $L = 0,0198$ мГн;
- шина ШРА3: $R = 10,05$ мОм, $L = 0,032$ мГн;
- провід АПВ 4×10 : $R = 9,3$ мОм, $L = 0,0007$ мГн;
- провід АВВГ $2(4 \times 150)$: $R = 0,3$ мОм, $L = 0,00028$ мГн;
- зварювальний трансформатор ТСШ-3000-3: $S = 300$ кВА, $U_{BH} = 0,38$ кВ, $U_{HH} = 80$ В, $R_1 = 0,9$ Ом, $L_1 = 0,01366$ мГн, $R_2 = 0,9$ мОм, $L_2 = 0,01366$ мГн;

– лінійне навантаження шини ШРА4 (*Three-Phase Series RLC Load SHRA4*):
 $P = 29,3$ кВт, $Q = 40,6$ кВАр;

– лінійне навантаження шини ШРА3 (*Three-Phase Series RLC Load SHRA3*):
 $P = 85,15$ кВт, $Q = 32,9$ кВАр;

Обмотки знижувального трансформатора з'єднані схемою Δ/Y . Система шин ШМА2, ШРА3, ШРА4 та проводи які з'єднують шини ШРА3, ШРА4 з шиною ШМА2 реалізована за допомогою блоків Three-Phase Series RLC Branch.

Зварювальний трансформатор з'єднаний за схемою Y/Y . Робота зварювального обладнання реалізована за допомогою розрядників (*Surge Arrester*), які з'єднані за схемою трикутника: $U_{ref} = 110$ В, $I_{ref} = 500$ А, кількість металоксидних дисків – 2. Вибір даного елемента для реалізації змодельованої схеми пояснюється його нелінійною характеристикою, яка зображена на рис. 2.3.

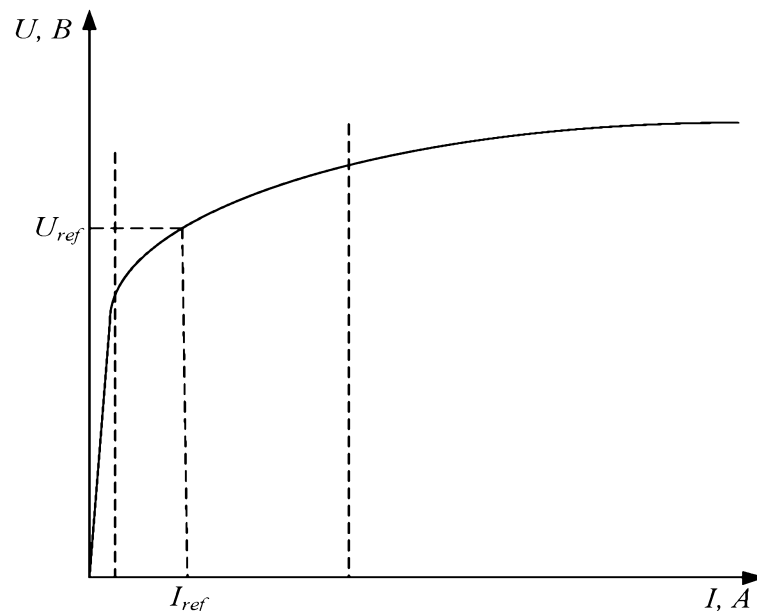


Рисунок 2.4 – ВАХ розрядника

де U_{ref} – захисна напруга розрядника;

I_{ref} – захисний струм розрядника [10].

Для вимірювання фазних значень струму та напруги системи електропостачання цеху були використані трифазні мультиметри (*Three-Phase V-I Measurement*). Дані елементи встановлені на чотирьох контрольованих ділянках: після знижувального трансформатора, після шини ШМА2, після шини ШРА3 та на ділянці схеми зі зварювальною установкою.

Для вимірювання параметрів мережі були використані блоки перерахунку активної, реактивної та повної потужності, а також сумарного гармонійного спотворення напруги по кожній із фаз. До блоків перерахунку під'єднані дисплеї, які відображають вищеперераховані параметри у числовому еквіваленті.

Підсистема блоку зображена на рис. 2.5.

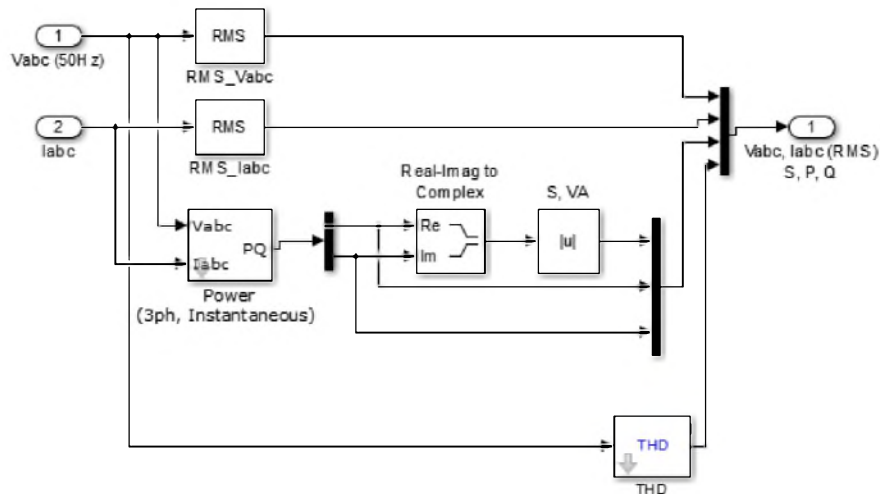


Рисунок 2.5 – Блок підсистеми для визначення фазного струму та напруги, активної, реактивної, повної потужностей та сумарного гармонійного спотворення напруги

Відповідно блоки підсистеми мають своє функціональне значення: входи I та 2 – вхідні сигнали трифазної напруги та трифазного струму відповідно; блок RMS – середньоквадратичне значення трифазної напруги та струму; блок $Power$ ($3ph$, $Instantaneous$) – блок за допомогою якого здійснюється перерахунок миттєвої активної та реактивної потужності трифазної мережі; блок $Real$ – $Imaging$ to $Complex$ – відповідає за математичну операцію, за допомогою якої виводиться реальні або мнимі частини вхідного сигналу, тобто потужності; блок THD – здійснює перерахунок сумарного гармонійного спотворення напруги по кожній із фаз; блок $|u|$ – відповідає за розрахунок повної потужності трифазної мережі; вихід I – вихідний сигнал підсистеми, який з'єднується з дисплеєм та несе інформацію про числові значення всіх вище перерахованих параметрів.

На всіх чотирьох контрольованих ділянках були використані осцилографи, для отримання амплітудних значень струму та напруги ($Scope$ – $Scope5$).

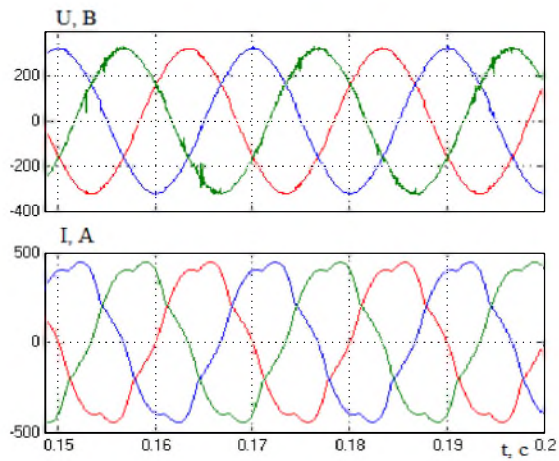
Для оцінки спектрального гармонійного складу потужності були використані функціональні блоки (Fcn) в яких була задана функція:

$$u_1u_4 + u_2u_5 + u_3u_6, \quad (2.1)$$

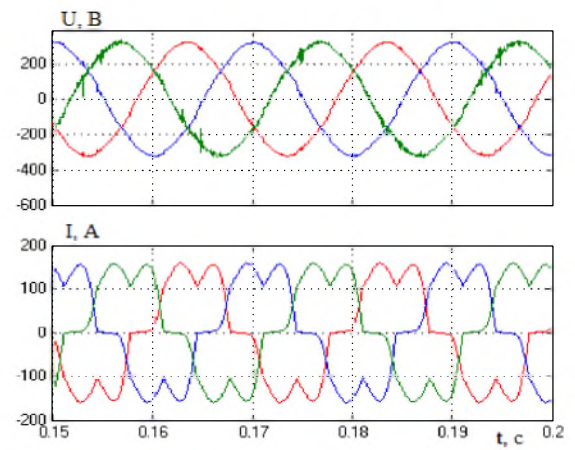
де u_1, u_2, u_3 – сигнали напруги по кожній із фаз;

u_4, u_5, u_6 – сигнали струму по кожній із фаз.

На рисунку 2.6 зображена схема заміщення електропостачання цеху у пакеті візуального програмування Matlab.

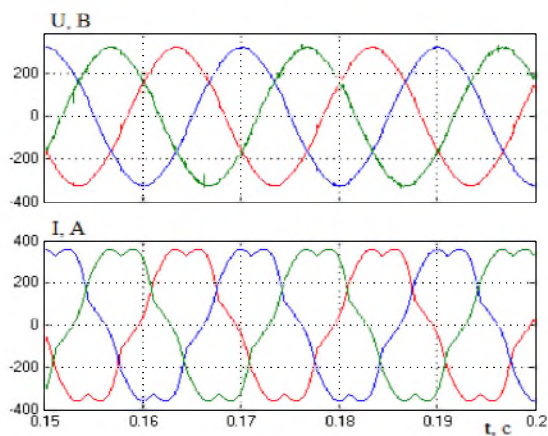


а)

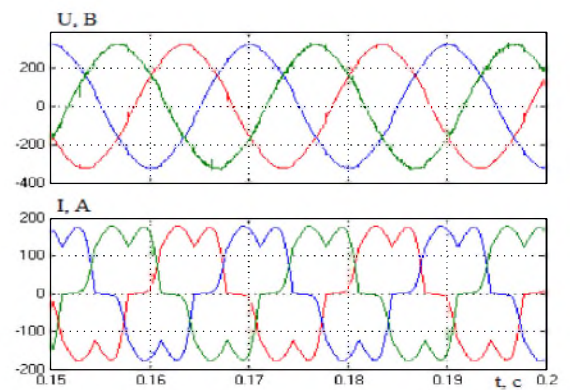


б)

Рисунок 2.7 – Графіки струму та напруги на ділянці схеми (дослід перший): а) після знижувального трансформатора; б) зі зварювальним трансформатором

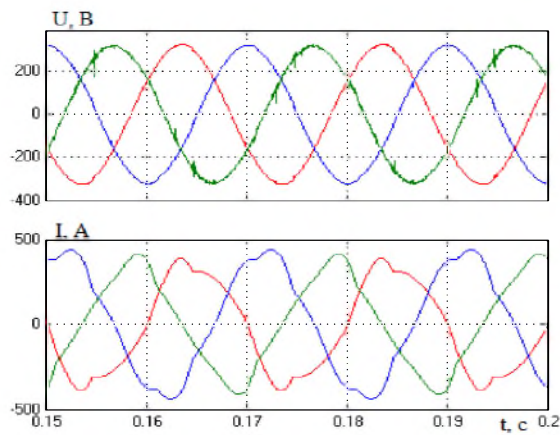


а)

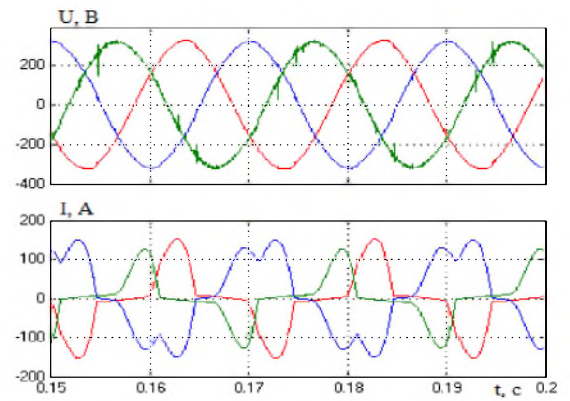


б)

Рисунок 2.8 – Графіки струму та напруги на ділянці схеми (дослід другий): а) після знижувального трансформатора; б) зі зварювальним трансформатором



а)



б)

Рисунок 2.9 – Графіки струму та напруги на ділянці схеми (дослід третій):

а) після знижувального трансформатора; б) зі зварювальним трансформатором

При перших двох дослідження графіки струму та напруги майже не відрізняються одне від одного. Як на ділянці схеми після знижувального трансформатора, так і на ділянці схеми зі зварювальним обладнанням, через роботу останнього характер сигналу струму має несинусоїдальну форму. При виконанні третього дослідження характер сигналу струму набуває несиметричної форми.

2.3 Аналіз результатів дослідження

При проведенні дослідів були отримані значення спектрального гармонійного складу повної потужності при частотах від 0 до 900 Гц (для постійної складової та для 18 гармонік) системи електропостачання цеху промислового підприємства, значення сумарного гармонійного спотворення напруги по кожній із фаз та значення повної активної та реактивної

потужностей на ділянках цеху після знижувального трансформатора та зі зварювальним обладнанням. Нижче представлене графічне відображення спектрального складу повної потужності та зведені таблиці з параметрами схеми при різних дослідженнях.

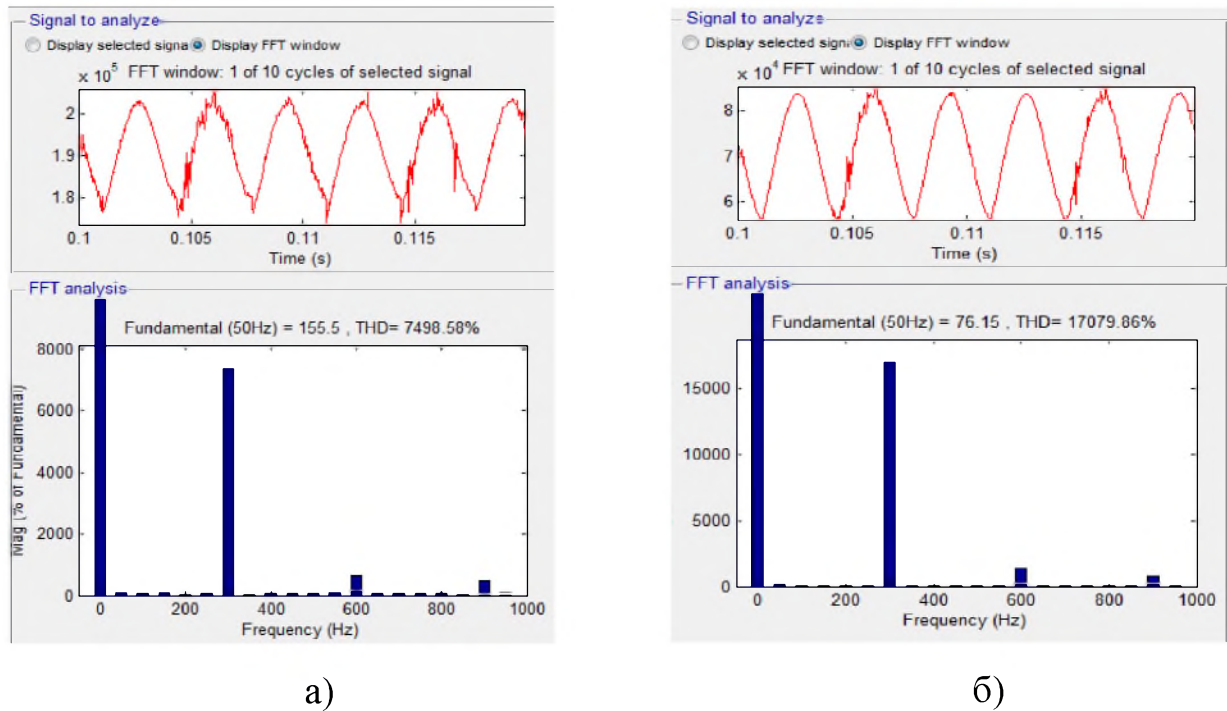


Рисунок 2.10 – Графічне відображення спектрального гармонійного складу повної потужності (для першого дослід) на ділянці схеми: а) після знижувального трансформатора; б) зі зварювальним трансформатором

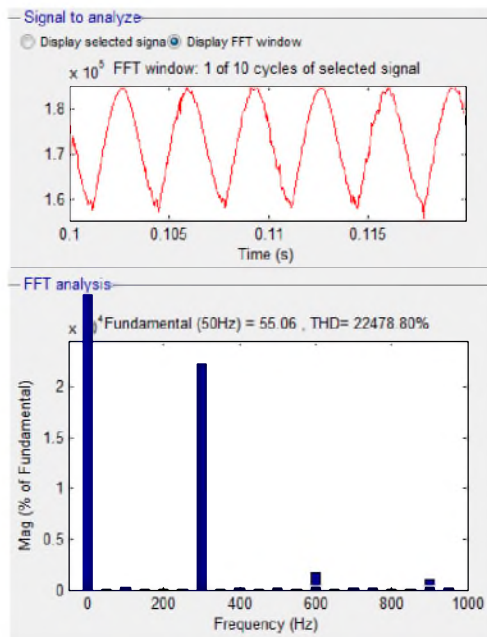
Таблиця 2.1 – Числові значення параметрів схеми електропостачання для першого дослід

Показники	Дослід перший			
	Знижувальний трансформатор	ШМА2	ШРА3	Зварювальний трансформатор
I	2	3	4	5
U_{abc} , В	227,5	227,3	224,4	226,5
I_{abc} , А	328	190,2	140,8	118,8
P , кВт	194,4	104,5	88,63	73,32

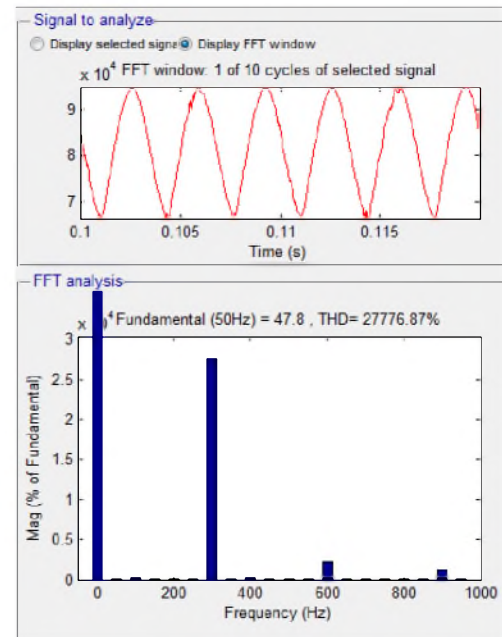
Продовження таблиці 2.1

Q , кВАр	111	76,81	33,58	33,67
S , кВА	223,8	129,7	94,77	80,68
$THDU_a$	0,1822	0,1823	0,1825	0,1834
$THDU_b$	0,1727	0,1727	0,1724	0,1727
$THDU_c$	0,2709	0,2707	0,2707	0,2714
S_0 , ВА	191605,05			71327,28
S_{50} , ВА	155,46			76,15
S_{100} , ВА	94,18			62,64
S_{150} , ВА	124,3			54,99
S_{200} , ВА	52,7			19,86
S_{250} , ВА	103,85			53,29
S_{300} , ВА	11480,21			12921,73
S_{350} , ВА	11,92			38,6
S_{400} , ВА	73,05			39,51
S_{450} , ВА	77,59			19,03
S_{500} , ВА	95,38			56,61
S_{550} , ВА	123,86			46,38
S_{600} , ВА	974,38			1067,42
S_{650} , ВА	96,75			49,81
S_{700} , ВА	97,14			54,19
S_{750} , ВА	97,07			34,16
S_{800} , ВА	101,71			48,71
S_{850} , ВА	21,3			18,39
S_{900} , ВА	728,38			550,54

Аналізуючи отримані значення спектрального складу можна сказати, що переважаючою є основна та шоста гармоніки повної потужності, спостерігається незначний сплеск потужності на дванадцятій та вісімнадцятій гармоніці.



а)



б)

Рисунок 2.11 – Графічне відображення спектрального гармонійного складу повної потужності (для другого дослід) на ділянці схеми: а) після знижувального трансформатора; б) зі зварювальним трансформатором

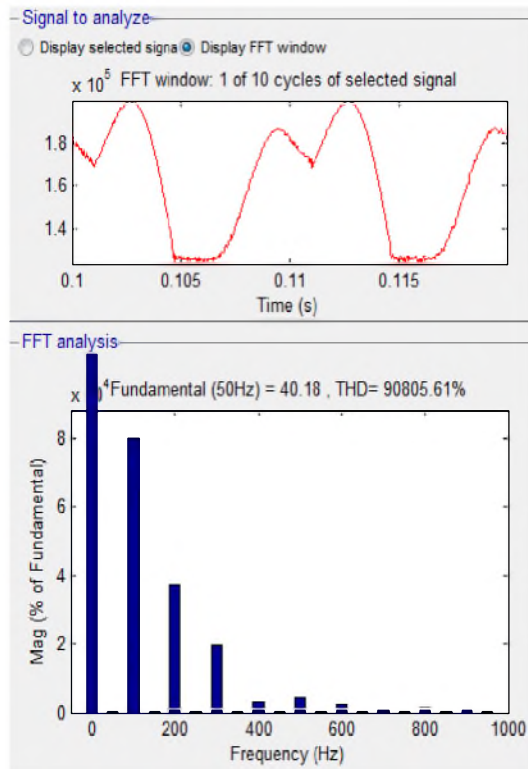
Таблиця 2.2 – Числові значення параметрів схеми електропостачання для другого дослід

Показники	Дослід другий			
	Знижувальний трансформатор	ШМА2	ШРА3	Зварювальний трансформатор
I	2	3	4	5
U_{abc} , В	229,5	229,4	226,3	229,1
I_{abc} , А	282,4	141	141,5	141
P , кВт	179,7	88,95	89,55	88,88
Q , кВАр	74,06	38,71	34,71	38,56
S , кВА	194,4	97,01	96,04	96,88
$THDU_a$	0,1933	0,1934	0,1936	0,1947
$THDU_b$	0,161	0,161	0,1607	0,1609
$THDU_c$	0,2684	0,2684	0,2684	0,268

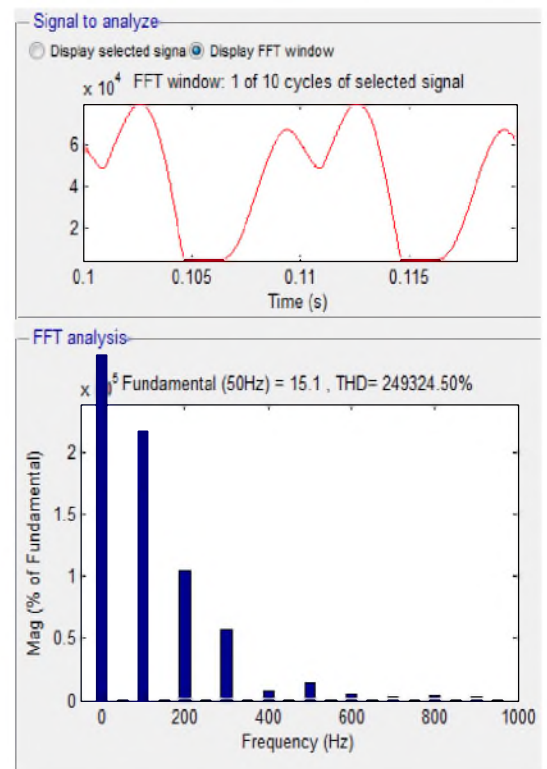
Продовження таблиці 2.2

S_0 , BA	172578,44			81964,11
S_{50} , BA	55,06			47,8
S_{100} , BA	178,36			136,03
S_{150} , BA	49,57			31,81
S_{200} , BA	32,64			27,22
S_{250} , BA	51,94			20,68
S_{300} , BA	12300,59			13205,78
S_{350} , BA	45,2			18,18
S_{400} , BA	114,69			80,53
S_{450} , BA	53,59			37,11
S_{500} , BA	89,47			67,71
S_{550} , BA	55,32			29,81
S_{600} , BA	962,48			1103,11
S_{650} , BA	47,46			31,59
S_{700} , BA	81,98			58,76
S_{750} , BA	74,13			53,14
S_{800} , BA	19,17			15,28
S_{850} , BA	40,01			24,46
S_{900} , BA	549,02			607,87

Аналізуючи отримані результати в даному дослідженні можна сказати наступне: при відключенні еквівалентного лінійного навантаження не суттєво змінилися значення струму та напруги на контрольованих ділянках схеми електропостачання цеху. Не суттєво збільшився і спектральний гармонійний склад повної потужності. Переважаючими гармоніками, як і в попередньому дослідженні, залишилися основна та шоста.



а)



б)

Рисунок 2.12 – Графічне відображення спектрального гармонійного складу повної потужності (для третього дослід) на ділянці схеми: а) після знижувального трансформатора; б) зі зварювальним трансформатором

Таблиця 2.3 – Числові значення параметрів схеми електропостачання для третього дослід

Показники	Дослід третій			
	Знижувальний трансформатор	ШМА2	ШРА3	Зварювальний трансформатор
I	2	3	4	5
U_{abc} , В	228,4	228,3	225,3	227,9
I_{abc} , А	310,1	172,7	140,4	101,5
P , кВт	185,2	95,13	88,91	63,85
Q , кВАр	104,2	70,37	33,16	27,16
S , кВА	212,5	118,3	94,89	69,36
$THDU_a$	0,1925	0,1926	0,1928	0,1942

Продовження таблиці 2.3

$THDU_b$	0,1633	0,1633	0,163	0,1631
$THDU_c$	0,2717	0,2717	0,2717	0,2722
S_0 , BA	162802,26			42133,88
S_{50} , BA	40,18			15,1
S_{100} , BA	32172,19			32855,88
S_{150} , BA	75,33			57,35
S_{200} , BA	15011,19			15899,55
S_{250} , BA	46,81			12,1
S_{300} , BA	7934,33			8756,2
S_{350} , BA	65,42			27,19
S_{400} , BA	1273,57			1162,02
S_{450} , BA	26,31			2,59
S_{500} , BA	1831,01			2126,22
S_{550} , BA	14,28			8,98
S_{600} , BA	894,29			856,34
S_{650} , BA	45,17			14,28
S_{700} , BA	284,89			385,38
S_{750} , BA	57,11			14,12
S_{800} , BA	674,22			636,57
S_{850} , BA	57,47			13,45
S_{900} , BA	438,75			380,36

Аналізуючи дослідження схеми без роботи одного із розрядників видно, що спектральний гармонійний склад повної потужності зазнає значних змін. У порівнянні з попередніми дослідженнями де переважаючими були основна та шоста гармоніки тут навпаки, спостерігається сплеск потужності на другій та четвертій гармоніках.

3 КОМПЕНСАЦІЯ НЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Збільшення виробничих потужностей на промислових підприємствах приводить до перевантаження встановленого електрообладнання та потребує переоснащення системи електропостачання. Традиційним рішення цієї проблеми є прокладка додаткових кабелів більшого перерізу або встановлення додаткових трансформаторів. Такий підхід потребує суттєвих капіталовкладень, тому раціональним рішенням є впровадження на підприємстві установок компенсації реактивної потужності.

3.1 Методи компенсації

На кожному промисловому підприємстві повинні бути проведені заходи по раціональному використанні всього обладнання, направлені на зниження реактивної потужності навантаження, в першу чергу споживану асинхронними двигунами та трансформаторами.

Наступні методи являються основними:

1. *Забезпечення нормального режиму роботи асинхронних двигунів.* Номінальний коефіцієнт потужності (при P_n та U_n) асинхронних двигунів, в залежності від номінальної потужності, лежить в середньому в межах від 0,85 до 0,92, чому відповідає коефіцієнт реактивної потужності від 0,615 до 0,425. При недовантаженні двигунів і особливо при збільшенні напруги вище номінальної коефіцієнт потужності суттєво зменшується.

Це пояснюється тим, що при зменшенні активного навантаження двигуна реактивна потужність майже не змінюється, внаслідок чого зменшується коефіцієнт потужності. При збільшенні напруги різко збільшується струм намагнічування та споживання реактивної потужності при незмінній активній, що також приводить до зменшення коефіцієнта потужності. Тому всі недовантажені двигуни повинні бути замінені на двигуни меншої потужності.

Це виконується при умові, якщо двигун завантажений в межах 45 – 70 %.

2. Обмеження часу холостого ходу.

Необмежене споживання реактивної потужності має місце при роботі обладнання на холостому ході. В цьому випадку двигуни споживають до 80 % всієї своєї реактивної потужності. Різноманітними розрахунками показано, якщо тривалість холостого ходу перевищує 10 секунд, то цілком прийнятно двигун вимикати з мережі. При цьому повинна бути зіставлена технологічна періодичність пусків та зупином обладнання з точки зору його перегріву пусковими струмами.

Для відімкнення двигуна на між операційний період станків, тобто на час, необхідний для вироблення готової деталі, зазвичай використовуються так звані обмежувачі ХХ. Обмежувачі ХХ автоматично вимикають двигун станка.

3. Створення нормального режиму роботи цехових трансформаторів.
Більшість трансформаторів працюють цілодобово. При паралельній роботі трансформаторів у випадку зниження навантаження до 30 – 50 % один трансформатор повинен бути вимкнений. Навантаження повинно контролюватися по амперметрам. При ремонті та налагоджувальних роботах на підприємстві в неробочий час необхідно так організовувати схему живлення робочих місць, щоб у роботі знаходилося мінімально необхідне число трансформаторів. Положення відгалужень трансформатора зі сторони живлення повинно відповідати фактичній напрузі мережі. Якщо відгалуження

встановлені на меншу напругу (у порівнянні з напругою мережі), то реактивна потужність трансформатора збільшується.

4. Заміна асинхронних двигунів на синхронні.

Проводить у разі, якщо технологічно умови дозволяють доцільно використати синхронні двигуни. Використання даного типу двигунів завжди є оправданим для приводу механізмів з довготривалим режимом роботи, наприклад для потужних компресорів, вентиляторів, повітродувок і т.п.

При цьому всі синхронні двигуни повинні працювати з випереджуючим коефіцієнтом потужності не більше ніж $\cos\varphi=0,9$, який дозволить зробити запас компенсованої реактивної потужності [12].

3.2 Пристрої компенсації

До пристроїв компенсації реактивної потужності можна віднести:

1. Синхронні компенсатори.

Являються синхронними машинами – генераторами реактивної потужності. Вони працюють у режимі синхронного двигуна на ХХ. На промислових підприємствах синхронні компенсатори мають обмежене використання. Це пояснюється питомими затратами на встановлення синхронних компенсаторів та втратами активної потужності.

Перевагою синхронних компенсаторів є можливість плавного та автоматичного регулювання вироблення реактивної потужності та впливу на рівень напруги у споживачів. Через це синхронні компенсатори широко використовуються на підстанціях енергосистем.

2. Синхронні двигуни.

Синхронні машини, переважно середньої та великої потужності, широко використовуються на підприємствах, як джерела реактивної потужності. Синхронні машини можуть працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Синхронні двигуни можуть працювати при випереджаючим значенні $\cos\varphi$ і віддавати в мережу реактивну потужність.

Якщо необхідності в генерації реактивної потужності немає, то двигуни можуть працювати при $\cos\varphi=1$ не споживаючи та не віддаючи реактивну потужність в мережу.

Більшість двигунів виготовляються з випереджаючим $\cos\varphi=0,9$. При такому значенні вони можуть генерувати реактивну потужність рівну приблизно 50 % від номінальної реактивної потужності двигуна. При неповному завантаженні віддача реактиву може бути збільшена. Максимальна компенсуючи здатність синхронного двигуна досягається при номінальному значенні струму збудження. При зменшенні струму збудження компенсуючи здатність двигуна різко падає.

3. Конденсаторні установки.

Являються найбільш поширеними джерелами реактивної потужності на промислових підприємствах. Вони використовуються на підстанціях підприємств на стороні ВН (6 – 10 кВ) та на стороні НН (0,22 ÷ 0,66 кВ), а також на розподільчих пунктах в цехах або одиночних споживачах електричної енергії.

Використання УКРП дозволяє:

- знизити навантаження силових трансформаторів;
- забезпечити живлення навантаження по кабелю з меншим перерізом;
- за рахунок часткового струмового розвантаження силових трансформаторів та кабелів підключити додаткове навантаження;

- дозволяє уникнути глибокого провалу напруги на лініях електропостачання та збільшити запас стійкості мережі споживачі при зовнішніх збуреннях;
- полегшити пуск та роботу двигунів (у випадку індивідуальної компенсації);
- збільшити строк експлуатації обладнання.

Існує одиночна, групова та централізована компенсація.

Одинична компенсація використовується у випадку якщо потрібна компенсація потужних споживачів та споживана потужність споживача є постійною протягом тривалого часу.

Групова компенсація використовується у випадку компенсації кількох індуктивних навантажень, які розташовані одне біля одного і мають одночасний запуск.

Централізована компенсація (ступінчаста). Для підприємств зі змінним споживанням реактивної потужності використання постійно увімкнених конденсаторних батарей є недоцільним, тому що при цьому може виникнути режим недокомпенсації або перекомпенсації. В даному випадку конденсаторні установки оснащуються спеціальними контролерами та комутаційно-захисною апаратурою.

При відхиленні параметра $\cos \varphi$ від заданого значення контролер підключає або відключає ступені конденсатора. Тому перевагою централізованої компенсації є те, що підключена потужність конденсаторів відповідає споживаній реактивній потужності в конкретний момент часу.

Існує поперечна та прокольна компенсація.

Поперечна компенсація реактивної потужності, полягає в паралельному з'єднанні пристроїв, що компенсують, з'єднанні індуктивного і ємнісного опорів, при цьому струм в нерозгалуженій частини ланцюга являє собою геометричну суму струмів індуктивності і ємності.

Індуктивний струм відстає від напруги, а ємнісний випереджає його. При відповідному значенні ємності сумарний струм є нижче індуктивного струму навантаження, що призводить до збільшення коефіцієнта потужності.

Підвищення коефіцієнта потужності навантаження за допомогою джерел реактивної потужності дозволяє збільшити пропускну спроможність ліній, підвищити активне навантаження трансформаторів без збільшення їх повної потужності.

При поперечної компенсації реактивної потужності поряд зі зниженням струму навантаження слід зазначити зниження втрат активної потужності, підвищення рівня напруги в мережі і зниження його втрат в окремих елементах системи електропостачання. Найбільш доцільно підключати конденсатори якомога ближче до приймачів і споживачів електроенергії та.

При поздовжній компенсації реактивної потужності конденсатори вмикаються послідовно з навантаженням через розділовий трансформатор. Поздовжня компенсація забезпечує автоматичне регулювання напруги в залежності від струму навантаження.

Однак при поздовжньої компенсації, виникають аварійні режими. Причинами їх можуть виявитися ферорезонансні коливання, перенапруження, внутрішні пошкодження конденсаторів. Якщо в схемі живлення виникає різке підвищення напруги, то конденсатори повинні бути негайно розряджені через іскровий проміжок та зашунтовані високовольтним вимикачем.

Конденсатори при поздовжньої компенсації включаються в ланцюг послідовно, тому через них проходить повний струм лінії, в тому числі і струм короткого замикання.

Поздовжня компенсація застосовується на лініях високої напруги, перш за все, для стійкості енергосистеми і для збільшення пропускну спроможності ліній [4].

3.3 Дослідження показників компенсації при використанні конденсаторних батарей

Гармоніки в силових системах виникають при роботі будь-яких пристроїв з нелінійними робочими характеристиками. При використанні устаткування, яке може генерувати гармоніки, або при наявності проблем, пов'язаних з гармоніками в мережі, рішенням може бути застосування конденсаторних установок з фільтрами вищих гармонік.

Струми вищих гармонік можуть бути причиною порушень в роботі мереж енергопостачання, а також несприятливо позначатися на роботі електрообладнання, в тому числі на конденсаторній установці для корекції коефіцієнта потужності.

Нижче приведена методика розрахунку фільтра гармонік, настроєного на певну частоту.

Напруга на елементах фільтра:

$$U_c = U_L + U_{жс}, \quad (3.1)$$

де U_c, U_L – напруга на конденсаторі та котушці індуктивності;

$U_{жс}$ – напруга живлення.

Потужність фільтра:

$$S = \frac{U_{жс}^2}{x_c - x_L}, \quad (3.2)$$

де x_C, x_L – реактивні опори конденсатора та котушки індуктивності на основній частоті.

Реактивний опір фільтра, в залежності від номера гармоніки розраховується за формулою:

$$X_n = n\omega L - \frac{1}{n\omega C}, \quad (3.3)$$

де n – порядок гармоніки;

ω – кутова частота гармоніки.

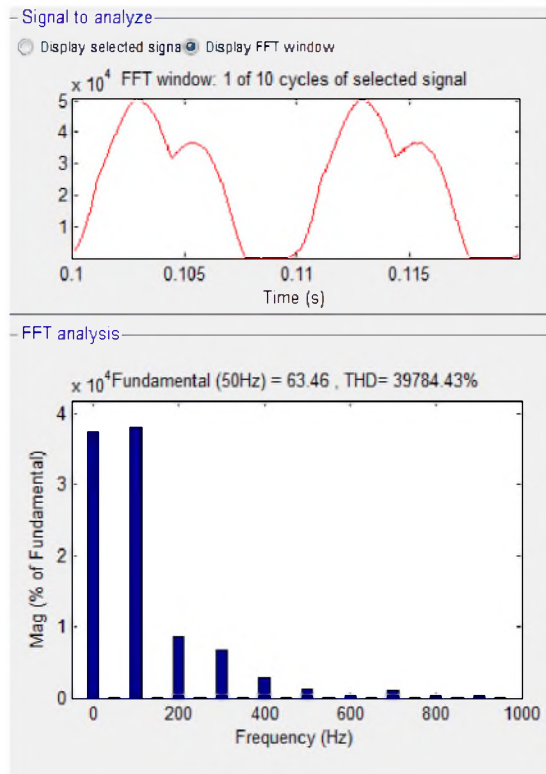
На основі схеми заміщення системи електропостачання цеху було досліджено показники якості електроенергії без та з компенсуючим пристроєм.

Моделювання базувалися на основі дослідження повної схеми електропостачання цеху (дослід 1) та схеми без еквівалентного навантаження на шині ШРА4 (дослід 2).

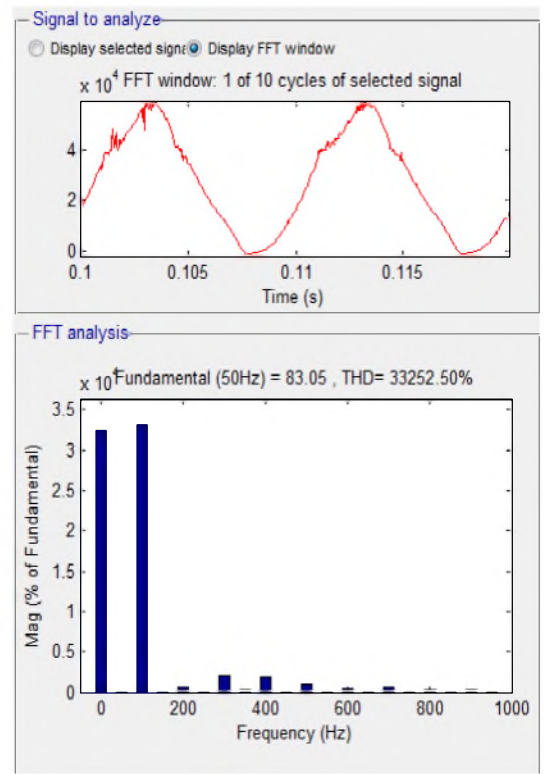
Оцінено гармонійний склад потужності, струму та напруги фази А на ділянці цеху зі зварювальною установкою.

Отримано графіки комплексного опору при гармонійному сигналі (імпедансу) для обох досліджень.

На рисунку 3.1 зображений спектральний гармонійний склад потужності фази А без фільтрокомпенсуючого пристрою та з фільтрокомпенсуючим пристроєм відповідно.



а)



б)

Рисунок 3.1 – Спектральний гармонійний склад потужності фази А (дослід 1): а) без фільтру; б) з фільтром

З рисунку 3.1 видно, що домінуючою в обох випадках є постійна гармонійна складова потужності фази та основна гармоніка. В той же час при компенсації зменшуються числові значення подальшого гармонійного спектру та сумарного гармонійного спотворення в цілому, але збільшується значення основної гармоніки.

На рисунку 3.2, 3.3 представлений спектральний гармонійний склад струму та напруги фази А відповідно.

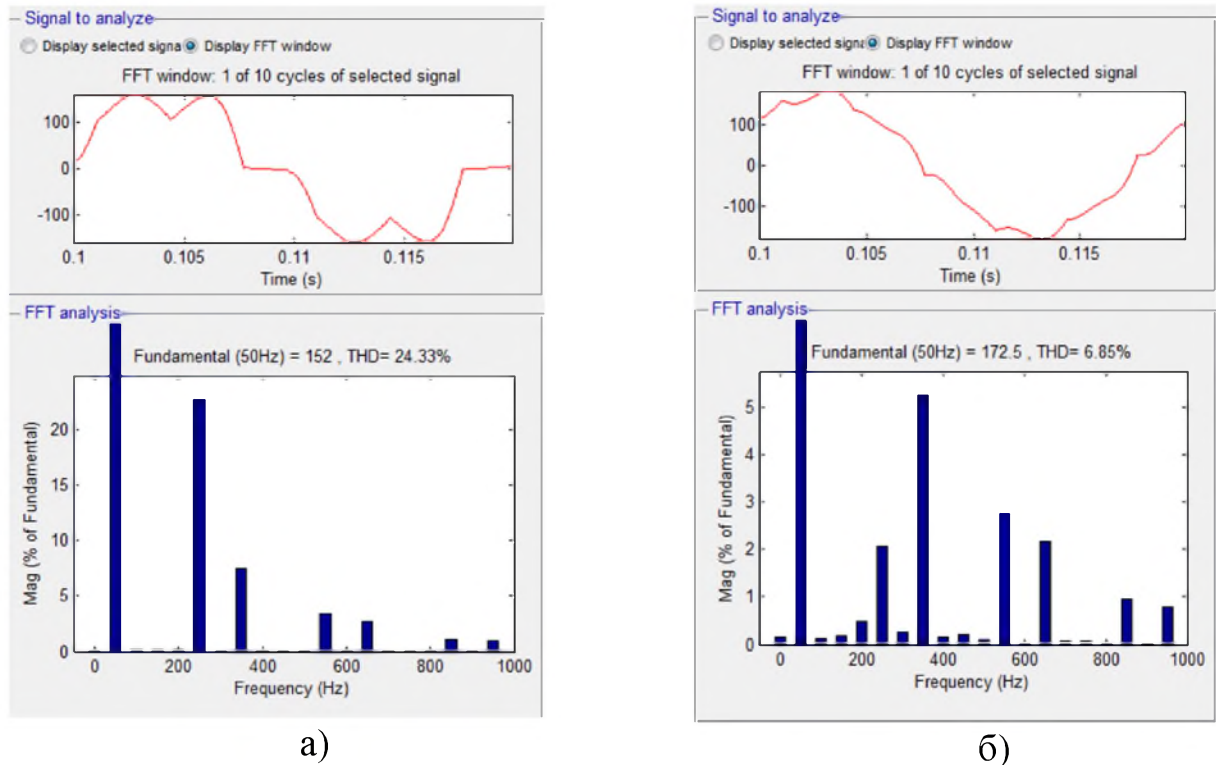
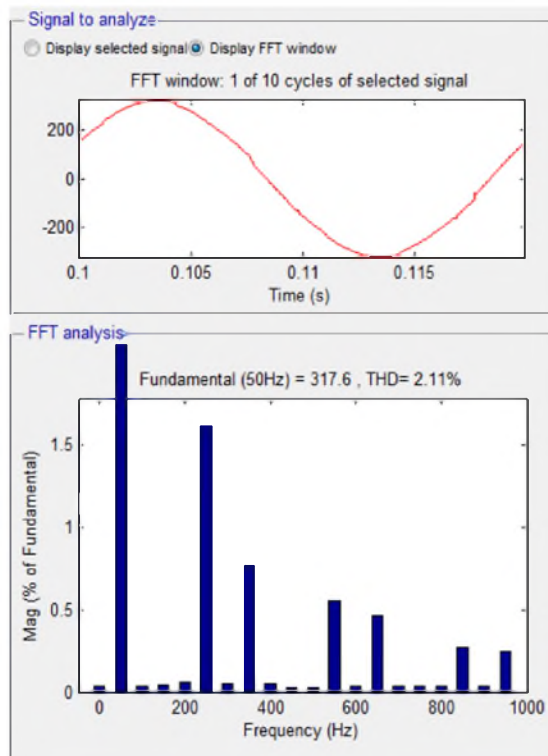


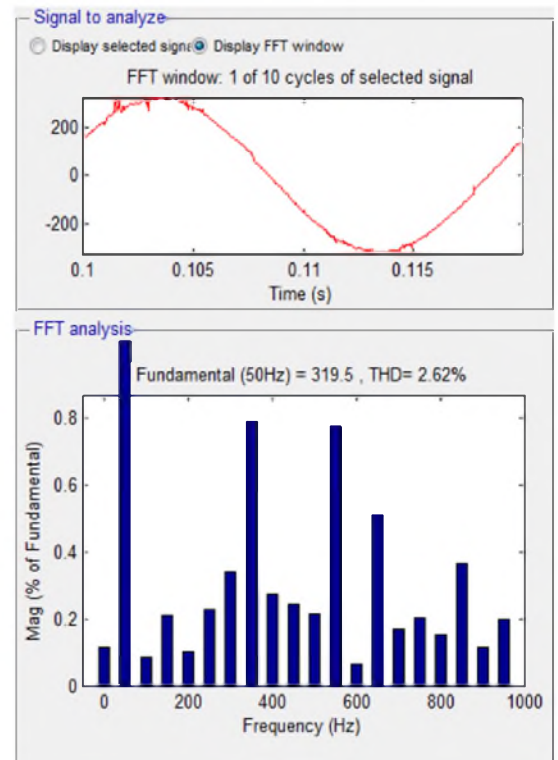
Рисунок 3.2 – Спектральний гармонійний склад струму фази А (дослід 1):

а) без фільтру; б) з фільтром

З рисунку видно, що при роботі системи електропостачання без фільтрокомпенсуючого пристрою домінуючою є основна гармоніка струму та п'ята, здійснюючи компенсацію п'ятої гармоніки, домінуючою залишається основна гармоніка, але її числове значення зростає на величину компенсованої гармоніки. При компенсації зменшується і сумарне гармонійне спотворення фазного струму та форма його сигналу, яка наближається до синусоїдальної.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Спектральний гармонійний склад напруги фази А (дослід 1):

а) без фільтру; б) з фільтром

З гармонійним спектральним складом напруги складається наступна ситуація: домінуючою, в обох випадках, виступає перша гармоніка напруги. Використовуючи фільтрокомпенсуючу установку зменшується сумарне гармонійне спотворення напруги, але спостерігаються незначні сплески напруги майже на всіх частотах спектру.

При дослідженні схеми електропостачання цеху без фільтру та з ним були отриманий графік комплексного опору гармонійного сигналу (імпедансу), які приведені на рисунку 3.4.

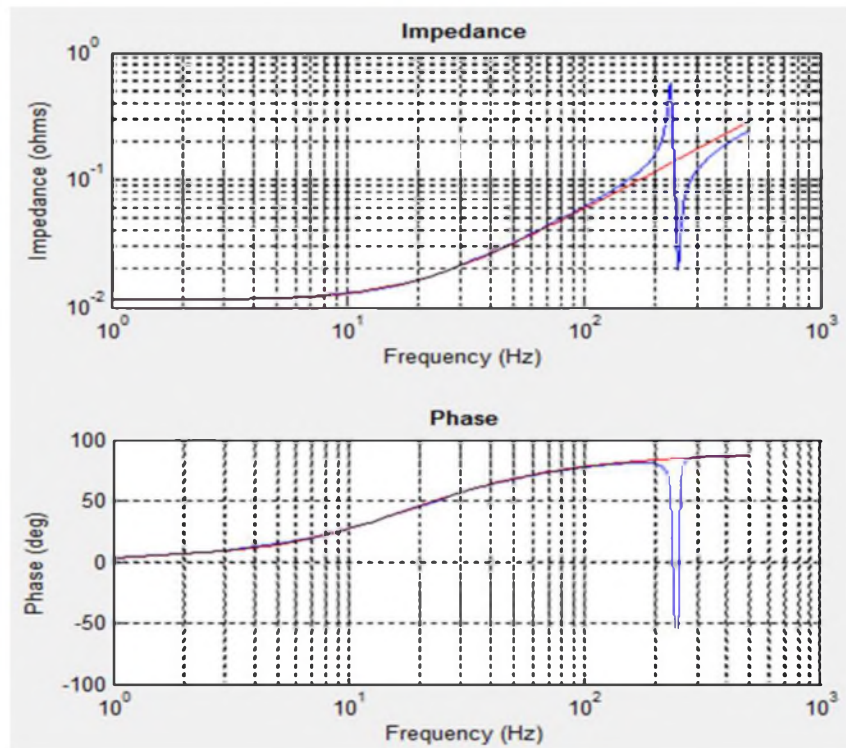


Рисунок 3.4 – Графіки імпедансу (дослід 1)

Нижче представлені зведені таблиці числових гармонійних значень потужності, струму та напруги та їх фазових зсувів відповідно основної частоти без фільтру та з фільтром.

Таблиця 3.1 – Числові значення потужності, струму та напруги та їх фазові зсуви без одночастотного фільтру

$f, \text{Гц}$	$S_a, \text{ВА}$	φ_P	$i_a, \text{А}$	φ_i	$u_a, \text{В}$	φ_u
1	2	3	4	5	6	7
0	23770,87	90	0,014	270	0,12	90
50	63,46	231,9	152	18,4	317,64	28,4
100	24155,7	-43,1	0,18	197,6	0,13	175,7
150	19,15	220,4	0,21	-67,3	0,13	162,6
200	5525,3	-47,1	0,19	240,5	0,19	178,1
250	32,24	152,2	34,42	255,7	5,14	162,5
300	4317,33	172,4	0,06	99	0,16	-52,6
350	17,68	236,9	11,4	0,6	2,43	268,8

Продовження таблиці 3.1

400	1794,19	-66,9	0,07	196,6	0,17	113,9
450	4,75	125	0,1	172,9	0,09	141
500	855,08	245,2	0,07	186,4	0,08	174,9
550	8,87	107,1	5,26	187,4	1,75	96,2
600	370,38	68,4	0,04	-39,6	0,13	207,2
650	5,03	-55,8	4,05	265	1,48	178,3
700	672,34	193	0,01	28,8	0,12	-86,1
750	15,15	183,6	0,09	111,7	0,13	50,5
800	247,08	119,5	0,01	123,6	0,13	84,5
850	17,8	-18,8	1,71	70,2	0,86	-24,3
900	174,55	-57	0,04	268,9	0,1	170,4

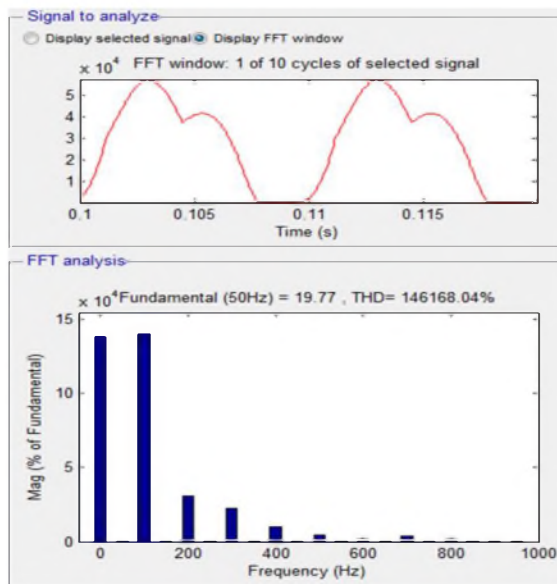
Таблиця 3.2 – Числові значення потужності, струму та напруги та їх фазові зсуви з одно частотним фільтром

$f, \text{Гц}$	$S_a, \text{ВА}$	φ_P	$i_a, \text{А}$	φ_i	$u_a, \text{В}$	φ_u
0	26901,68	90	0,26	270	0,36	90
50	83,05	217,7	172,46	40,6	319,49	28,2
100	27477,48	-21,1	0,22	188,4	0,28	162,7
150	83,98	231	0,3	150,7	0,68	58,4
200	445,13	255,6	0,83	188,8	0,33	-34,6
250	125,96	81,4	3,55	186,2	0,74	-12,2
300	1658,77	76,3	0,46	20,8	1,09	-65,8
350	149,63	261,1	9,02	7	2,53	268,7
400	1486,29	-62,3	0,26	17,9	0,88	181,1
450	69,85	158,9	0,38	11,6	0,78	230,5
500	847,46	233,7	0,16	24,8	0,69	166
550	70,35	92,2	4,76	186,9	2,49	111,7
600	426,78	85,1	0,09	14,4	0,2	52,3
650	44,58	60,3	3,74	264,6	1,63	152,3
700	570,47	183,2	0,1	-9,8	0,54	58,5
750	91,08	14,7	0,1	-13,9	0,65	32,6
800	219,31	95,1	0,06	-28,3	0,49	-7,3

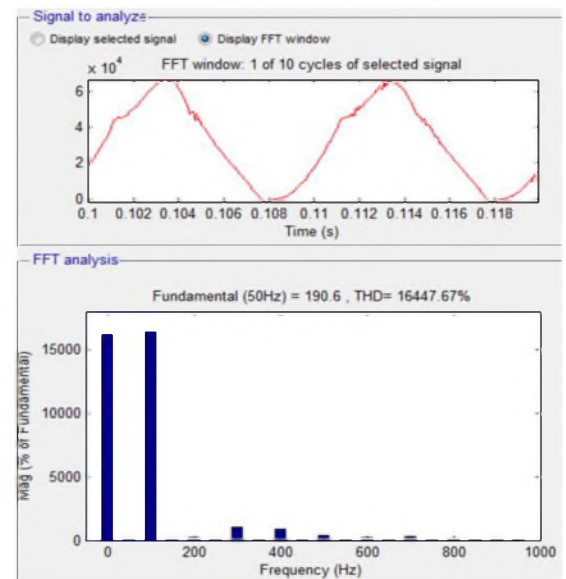
Продовження таблиці 3.2

850	63,2	-29,8	1,63	65,1	1,17	-21,4
900	260,35	-44,3	0,05	28,9	0,37	-46,4

Нижче приведений спектральний гармонійний склад потужності, струму та напруги фази А для другого досліду, а також графіки імпедансу та зведені таблиці числових значень вищеперерахованих параметрів без фільтрокомпенсуючого пристрою та з ним.



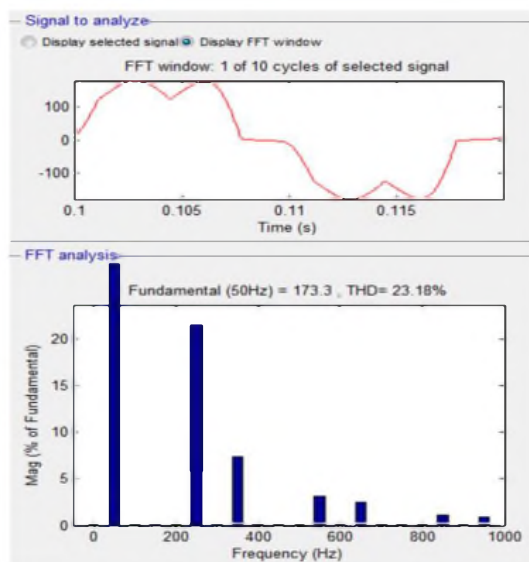
а)



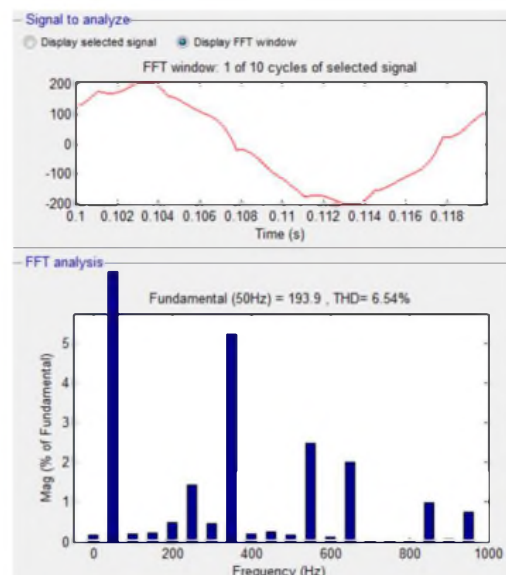
б)

Рисунок 3.5 – Спектральний гармонійний склад потужності фази А (дослід 2): а) без фільтру; б) з фільтром

З рисунку 3.5 видно, що при відключенні лінійного навантаження ситуація практично не змінилася, зросли лише числові значення досліджуваних параметрів. Аналогічна ситуація складається у випадку дослідження спектрального гармонійного складу струму (рис. 3.6) та напруги (рис. 3.7) фази А.



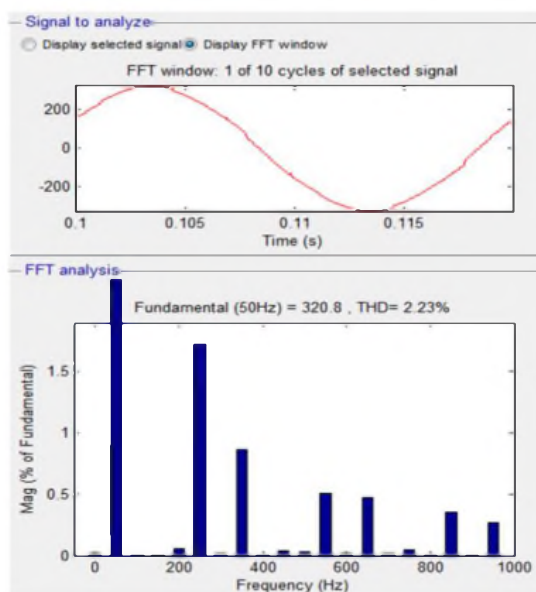
а)



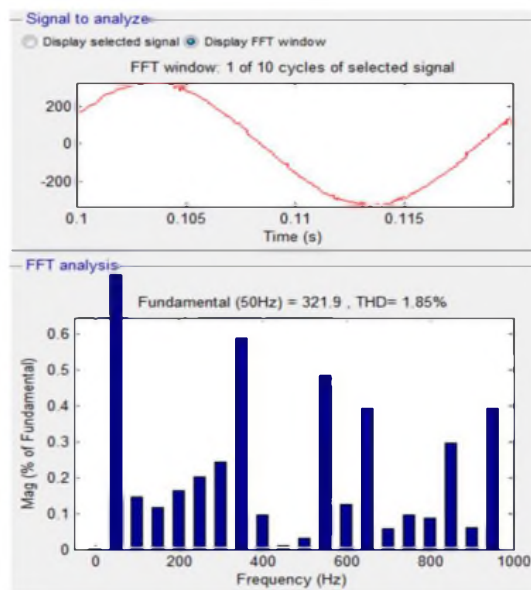
б)

Рисунок 3.6 – Спектральний гармонійний склад струму фази А (дослід 2):

а) без фільтру; б) з фільтром



а)



б)

Рисунок 3.7 – Спектральний гармонійний склад напруги фази А (дослід 2):

а) без фільтру; б) з фільтром

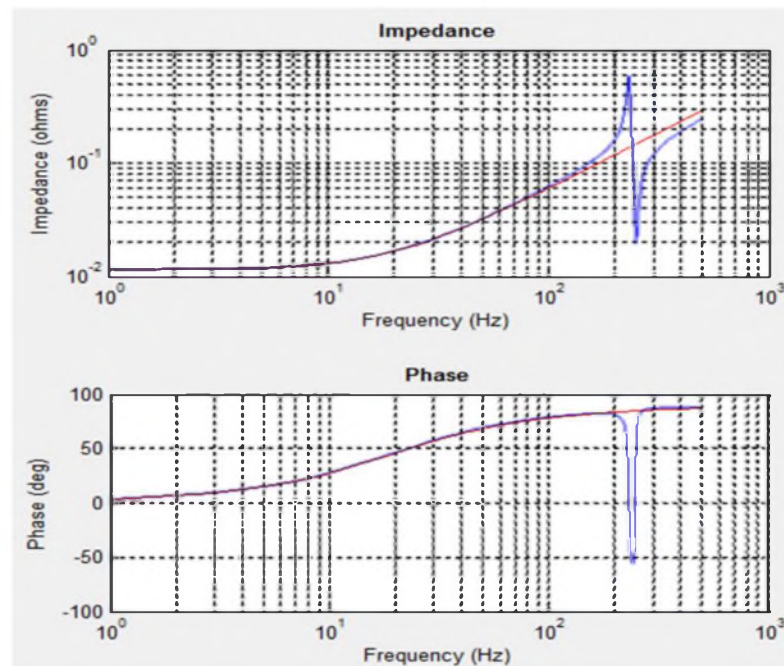


Рисунок 3.8 – Графіки імпедансу (дослід 2)

Таблиця 3.3 – Числові значення потужності, струму та напруги та їх фазові зсуви без одночастотного фільтру

$f, \text{Гц}$	$S_a, \text{ВА}$	φ_P	$i_a, \text{А}$	φ_i	$u_a, \text{В}$	φ_u
0	27314,09	90	0,08	270	0,08	270
50	19,77	182,5	173,26	17,7	320,77	28,3
100	27801,34	-43,8	0,13	-19,8	0,05	31,5
150	7,76	199,1	0,27	-49	0,02	-53,8
200	6084,82	-50,8	0,13	94,7	0,17	-12,4
250	40,97	-47,1	37,28	252,4	5,54	159,3
300	4413,67	169,4	0,21	233,7	0,06	94,2
350	17,2	147,1	12,86	-10,8	2,78	255,8
400	2029,71	-78,5	0,08	-65,3	0,04	17,1
450	12,88	183,7	0,05	192,2	0,13	-86,9
500	891,18	230,7	0,05	37,8	0,08	69,4
550	17,43	-81,4	5,34	172,5	1,64	81,8
600	379,16	49,3	0,06	168	0,08	127,9
650	7,12	73	4,29	250	1,52	162

Продовження таблиці 3.3

700	700,26	176	0,05	252,8	0,06	138,5
750	7,82	244,2	0,07	70,4	0,15	-50,2
800	294,49	90,4	0,05	246,8	0,03	162,3
850	3,63	226,6	1,97	41,9	1,13	-47
900	202,76	-75,7	0,02	-20	0,05	194,1

Таблиця 3.4 – Числові значення потужності, струму та напруги та їх фазові зсуви з одно частотним фільтром

$f, \Gamma\text{ц}$	S_a, BA	φ_P	i_a, A	φ_i	u_a, B	φ_u
1	2	3	4	5	6	7
0	30781,1	90	0,33	90	0,01	270
50	190,57	21,4	193,87	37,1	321,88	27,6
100	31212,16	-25,5	0,4	-78,5	0,48	1,1
150	251,9	238,2	0,43	183,2	0,37	216,1
200	408,77	213,4	0,95	184,6	0,52	116,6
250	243,98	90,7	2,79	170,4	0,66	32
300	1886,63	58,4	0,89	15	0,79	232,7
350	78,43	-20	10,13	-7,5	1,89	262,9
400	1608,91	-74,5	0,39	-10,2	0,31	7,9
450	50,65	-33,3	0,47	10,5	0,03	253,1
500	740,82	224,3	0,31	11,2	0,1	82,4
550	39,69	-57,3	4,79	167,6	1,56	67,7
600	342,77	56,2	0,21	25,4	0,4	177,1
650	38,47	50,2	3,89	243,9	1,27	122,9
700	571,73	167,7	0,06	-6,3	0,18	-34,3
750	16,69	87,1	0,06	-25,8	0,31	-22
800	310,46	76	0,08	23,9	0,28	39,4
850	54,01	23,7	1,92	31,4	0,96	-32,7
900	161,1	-63,5	0,15	6	0,2	18,7

Аналізуючи проведені дослідження можна зробити наступні висновки.

При дослідженні повної схеми електропостачання цеху, без

фільтрокомпенсуючого пристрою та з ним, значення параметрів мережі практично не відрізняються між собою, змінюється лише форма сигналу та спектральний гармонійний склад.

При компенсації найбільшої гармоніки струму для всіх трьох досліджуваних параметрів, числове значення переноситься на основну гармоніку, роблячи її більшою.

При дослідженні схеми електропостачання без лінійного еквівалентного навантаження на шині ШРА4 ситуація практично не змінилася.

Значення досліджуваних параметрів несуттєво збільшилися, що є характерним при відімкненні навантаження. Спектральний гармоній склад суттєво не змінився.

Тобто на значення якості параметрів електричної енергії відключення лінійного навантаження не впливає.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі була проведена оцінка складових потужності системи електропостачання цеху промислового підприємства при неякісних параметрах електроенергії. Оцінка базувалася на роботі зварювального обладнання, яке встановлене в цеху. При різних дослідженнях було отримано спектральний гармонійний склад трифазної потужності цеху, значення параметрів струму та напруги, активної, реактивної, повної потужностей та сумарного гармонійного спотворення напруги по кожній із фаз. Також було проведено дослідження спектрального гармонійного складу потужності фази А при використанні фільтрокомпенсуючого пристрою та без нього. В роботі представлена методика розрахунку потужності мережі електропостачання цеху при наявності у системі вищих гармонійних складових.

Опираючись на результати проведених досліджень у розділі II та III можна зробити загальний висновок щодо характеру споживання електроенергії: значення струму, напруги, потужностей та сумарного гармонійного спотворення майже не відрізняються між собою. Стосовно спектрального гармонійного складу, то складається зовсім інша ситуація. На значення потужностей при певній частоті в цілому впливає не зміна навантаження споживачів, а режим роботи зварювального трансформатора.

У дипломній роботі проведений розрахунок штучного освітлення за даними цеху промислового підприємства та техніко-економічний розрахунок величини матеріальних втрат від неякісної електроенергії та при скороченні терміну служби електрообладнання, яке працює у мережі, де присутні вищі гармонійні складові напруги та струму.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Akagi H. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IPEC'83 – Int. Power Electronics Conf. – 1983. – P. 1375–1386.
2. БДН В.2.5-28-2006 Природне і штучне освітлення – К.: МінБуд України, 2006 р. – 62 с.
3. Czarnecki L. S. On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory / L. S. Czarnecki // IEEE Trans. On Power Electronics. – 2004. Vol. 19, No. 3. – P. 828–836.
4. Кузнєцов В. Г., Шполянський О. Г., Яремчук Н. А. Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах. Технічна електродинаміка. 2011 №3 С. 46-52
5. ГОСТ 13109-97. Електрична енергія. Сумісність технічних засобів. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення – К: Технічний Комітет, 1997 р.
6. Ванько В. М., Столярчук П. Г. Проблеми контролю якості електроенергії в електричних мережах. Вимірювальна техніка та метрологія. 2011 №58. С. 47-56
7. Бунько В. Я. Підвищення параметрів електричної енергії в мережах 0,4 кВ на основі оптимальної компенсації реактивної потужності. Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації: збірник наукових праць XV Міжнар. Наук.- техн. конф. (Кременчук, 11-12 квітня 2017р.)
8. Закон України №1105 – XIV – К.: ВР України, від 23.09.1999 р.
9. Закон України №3/45 – XII – К.: ВР України, від 17.12.1993 р.

10. Соломчак О. В. Проблеми розрахунку та компенсації реактивної потужності в мережах з несинусоїдним навантаженням/Соломчак О. В, Гладь І. В. // Енергетика та електрифікація. – 2008. – №6. – С. 27-32
11. Медведєв Е. Н./Сорокін Г.Ф. Основи охорони праці – К.: Видавничий дім “Професіонал”, 2008 р. – 208 с.
12. Кириленко О.В. Аналіз стійкості енергетичних систем за напругою // Кириленко О. В., Павловський В. В.// Технічна електродинаміка. – К: ІЕД НАНУ, – 2010 – №3
13. Правила улаштування електроустановок – К.: Міненерговугілля, 2014 р.
14. ДСТУ EN 50160:2008. Характеристики напруги електропостачання у розподільчих мережах загальної призначеності.
15. Emanuel A. E.: “Harmonic Generation Modeling and Harmonic Power Flow in Power Systems,” Proceedings of the Second International Conference on Harmonics in Power Systems, Manitoba, Oct. 1986, pp. 158–63.
16. Emanuel A. E.: “On the Assessment of Harmonic Pollution,” IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, No.3, July 1995, pp. 1693–98.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Основні положення закону України про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасних випадків на виробництві

Основні положення закону:

Стаття 1. Завдання страхування від нещасного випадку.

Завданнями страхування від нещасного випадку є:

- проведення профілактичних заходів, які спрямовані на усунення шкідливих і небезпечних виробничих факторів, запобігання нещасним випадкам на виробництві, професійним захворюванням та іншим випадкам загрози здоров'ю застрахованих, викликаним умовами праці;
- відновлення здоров'я та працездатності потерпілих на виробництві від нещасних випадків або професійних захворювань;
- відшкодування шкоди, пов'язаної з втратою застрахованими особами заробітної плати або відповідної її частини під час виконання трудових обов'язків, надання їм соціальних послуг у зв'язку з ушкодженням здоров'я, а також у разі їх смерті здійснення страхових виплат непрацездатним членам їх сімей.

Стаття 2. Сфера дії Закону.

Дія цього Закону поширюється на осіб, які працюють на умовах трудового договору (контракту) на підприємствах, в установах, організаціях, незалежно від їх форм власності та господарювання (далі - підприємства), у фізичних осіб, на осіб, які забезпечують себе роботою самостійно, та громадян - суб'єктів підприємницької діяльності.

Особи, право яких на отримання відшкодування шкоди раніше було встановлено згідно із законодавством СРСР або законодавством України про

відшкодування шкоди, заподіяної працівникам внаслідок травмування на виробництві або професійного захворювання, пов'язаних з виконанням ними трудових обов'язків, мають право на забезпечення по страхуванню від нещасного випадку відповідно до цього Закону.

Стаття 4. Законодавство про страхування від нещасного випадку.

Законодавство про страхування від нещасного випадку складається із Основ законодавства України про загальнообов'язкове державне соціальне страхування, цього Закону, Кодексу законів про працю України, Закону України "Про охорону праці" та інших нормативно-правових актів. Якщо міжнародним договором України, згода на обов'язковість якого надана Верховною Радою України, встановлено інші норми, ніж ті, що передбачені законодавством про страхування від нещасного випадку, то застосовуються норми міжнародного договору.

Стаття 5. Основні принципи страхування від нещасного випадку.

Основними принципами страхування від нещасного випадку є:

- паритетність держави, представників осіб, які є застрахованими та роботодавців в управлінні страхуванням від нещасного випадку;
- своєчасне та повне відшкодування шкоди страховиком;
- обов'язковість страхування від нещасного випадку осіб, які працюють на умовах трудового договору (контракту) та інших підставах, передбачених законодавством про працю, а також добровільність такого страхування для осіб, які забезпечують себе роботою самостійно, та громадян - суб'єктів підприємницької діяльності;
- надання державних гарантій реалізації застрахованими громадянами своїх прав;
- обов'язковість сплати страхувальником страхових внесків;
- формування та витрачання страхових коштів на солідарній основі;

- диференціювання страхового тарифу з урахуванням умов і стану безпеки праці, виробничого травматизму та професійної захворюваності на кожному підприємстві;

- цільове використання коштів страхування від нещасного випадку.

Стаття 6. Суб'єкти та об'єкти страхування від нещасного випадку

Суб'єктами страхування від нещасного випадку є застраховані громадяни, а в окремих випадках – члени їх сімей та інші особи, страхувальники та страховик. Застрахованою є фізична особа, на користь якої здійснюється страхування.

Страхувальниками є роботодавці, а в окремих випадках - застраховані особи. Страховик - Фонд соціального страхування від нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань України (далі - Фонд соціального страхування від нещасних випадків).

Об'єктом страхування від нещасного випадку є життя застрахованого, його здоров'я та працездатність [8].

A.2 Технічні заходи і засоби захисту безпечної експлуатації зварювальної установки при нормальних режимах роботи

Згідно з ПУЕ в електроустановках використовують такі системи заходів [14]:

- ізоляція струмопровідних частин;
- малі напруги;
- недоступність до неізольованих провідників;
- вирівнювання потенціалів;

Ці засоби захисту не є універсальними, тому для створення безпечних умов праці необхідно застосовувати не один, а кілька засобів одночасно.

Ізоляція струмовідних частин забезпечується шляхом покриття їх шаром діелектрика для захисту людини від випадкового доторкання до частин електроустановок, через які проходить струм. Розрізняють робочу, додаткову, подвійну та посилену ізоляцію.

Робоча ізоляція – це ізоляція, яка забезпечує нормальну роботу електроустановки та захист людини від ураження струмом.

Додаткова ізоляція, – це ізоляція, яка застосовується додатково до робочої і у випадку її пошкодження забезпечує захист людини від ураження струмом.

Подвійна ізоляція, – ізоляція, яка складається з робочої та додаткової.

Наприклад, додаткова ізоляція досягається шляхом виготовлення корпусів та рукояток електроустаткування із діелектричних матеріалів (пластмасові корпуси ручних електрифікованих інструментів, побутових електропристроїв тощо).

Посиленою називається покращена робоча ізоляція.

Механічні пошкодження, волога, перегрівання, хімічні впливи зменшують захисні властивості ізоляції. Навіть у нормальних умовах ізоляція поступово втрачає свої початкові властивості, “старіє”. Тому необхідно систематично проводити профілактичні огляди та випробовування ізоляції. У приміщеннях з підвищеною небезпекою та в особливо небезпечних, відповідно не менше одного разу на два роки та в півріччя, перевіряють відповідність опору ізоляції до норм шляхом вимірювання. Для електромереж напругою до 1000 В опір ізоляції струмовідних частин електроустановок повинен бути не меншим ніж 0,5 МОм, а електрифікованого ручного інструменту – не менше ніж 1 МОм, якщо інше не передбачено відповідними нормами. Мала напруга застосовується для зменшення небезпеки ураження електричним струмом. До малих напруг належать номінальні напруги, що не перевищують 42 В змінного струму та 110

В постійного струму. За таких напруг струм, що може пройти через тіло людини, є дуже малим і вважається відносно безпечним. Однак гарантувати цілковиту безпеку неможливо, тому поряд з малою напругою використовують й інші способи та засоби захисту. Малі напруги застосовують у приміщеннях з підвищеною небезпекою (напруга до 42 В включно) та в особливо небезпечних приміщеннях (напруга до 12 В включно) для живлення ручних електрифікованих інструментів, переносних світильників, для місцевого освітлення на виробничому устаткуванні.

Забезпечення недоступності неізолюваних струмовідних частин передбачає застосування захисних огорожень, блокувальних пристроїв та розташування неізолюваних струмовідних частин на недосяжній висоті чи в недоступному місці.

Захисні огороження можуть бути суцільними та сітчастими. Суцільні огороження (корпуси, кожухи, кришки і т. ін.) застосовуються в електроустановках з напругою до 1000 В, а сітчасті (огорожі, бар'єри) – до і вище 1000 В.

Якщо під час експлуатації електроустановок передбачений періодичний доступ (для оглядів, технічного обслуговування, ремонтів) до їх огорожених зон, в яких знаходяться неізолювані струмові дні частини, то дверцята, кришки, двері цих огорожень повинні мати блокувальні пристрої. Останні забезпечують зняття напруги зі струмовідних частин у разі відкривання огороження та спробі проникнути в небезпечну зону. Блокувальні пристрої за принципом дії поділяються на механічні, електричні та електронні.

Вирівнювання потенціалів є способом зниження напруг дотику та кроку між точками електричного кола, до яких можливе одночасне доторкання людини або на яких вона може одночасно стояти. Вирівнювання потенціалів досягається шляхом штучного підвищення потенціалу опорної поверхні ніг до рівня потенціалу струмовідної частини, а також при контурному заземленні.

Вертикальні заземлювачі в контурному заземленні розміщуються як по контуру, так і всередині захисної зони і з'єднуються сталевими полосами. У разі замикання струмовідних частин на корпус, що приєднаний до такого контурного заземлення, ділянки землі всередині контуру набувають високих потенціалів, які наближаються до потенціалу заземлювачів. Завдяки цьому максимальні напруги дотику та кроку знижуються до допустимих значень.

Для захисту персоналу, що обслуговує електроустановки, використовують спеціальні захисні засоби. Ці засоби умовно поділяються на ізолюючі, огорожуючі і запобігаючі. Ізолюючі в свою чергу поділяються на основні і допоміжні.

До них належать в електроустановках напругою:

- до 1000 В – штанги, діелектричні рукавиці, електровимірювальні кліщі, монтажний інструмент, а також показчики напруги;
- понад 1000 В – ізолюючі штанги, електровимірювальні кліщі, показчики напруги, а також засоби для виконання ремонтних робіт під напругою вище 1000В.

Додаткові ізолюючі засоби не придатні витримувати робочу напругу, їх призначення полягає у тому, щоб посилити захисну дію основних ізолюючих засобів, з якими вони разом використовуються.

До додаткових ізолюючих захисних засобів в електроустановках відносяться:

- до 1000 В – діелектричні калоші, килимки, ізолюючі підставки;
- понад 1000 В – діелектричні рукавиці, боти, килимки, ізолюючі підставки.

А.3 Організація пожежної безпеки у виробничому приміщенні

Пожежна безпека – стан об'єкта, за якого з регламентованою ймовірністю унеможливлються виникнення і розвиток пожежі та вплив на людей її небезпечних чинників [11].

Загальні принципи організації пожежної безпеки:

Забезпечення пожежної безпеки – невід'ємна частина державної діяльності щодо охорони життя та здоров'я людей, національного багатства та навколишнього середовища. Відповідно до ст. 4 Закону України “Про пожежну безпеку”, державні органи виконавчої влади та органи самоврядування всіх рівнів у межах своєї компетенції організовують розроблення та впровадження у відповідних галузях і регіонах організаційних і науково-технічних заходів щодо запобігання пожежам та їх гасіння, забезпечення пожежної безпеки населених пунктів і об'єктів [9].

Забезпечення пожежної безпеки є складовою частиною виробничої та іншої діяльності посадових осіб, працівників підприємств, установ, організацій. Згідно з чинним законодавством забезпечення пожежної безпеки підприємств, установ та організацій покладаються на їх власників (керівників) та уповноважених ними осіб, якщо інше не передбачено відповідним договором.

Власники підприємств, установ та організацій, а також орендарі зобов'язані:

- розробляти комплексні заходи щодо забезпечення пожежної безпеки;
- відповідно до нормативних актів з пожежної безпеки розробляти і затверджувати положення, інструкції, інші нормативні акти, що діють у межах підприємства, здійснювати постійний контроль за їх додержанням;

- забезпечувати дотримання протипожежних вимог стандартів, норм, правил, а також виконання вимог приписів і постанов органів державного пожежного нагляду;

- організовувати навчання працівників правилам пожежної безпеки та пропаганду заходів щодо їх забезпечення;

- утримувати в справному стані засоби протипожежного захисту і зв'язку, пожежну техніку, обладнання та інвентар, не допускати їх використання не за призначенням;

- створювати у разі потреби, відповідно до встановленого порядку, підрозділи пожежної охорони та необхідну для їх функціонування матеріально-технічну базу;

- подавати на вимогу державної пожежної охорони відомості та документи про стан пожежної безпеки об'єктів і продукції, що ними виробляється;

- здійснювати заходи щодо впровадження автоматичних засобів виявлення та гасіння пожеж;

- своєчасно інформувати пожежну охорону про несправність пожежної техніки, систем протипожежного захисту, водопостачання тощо;

- проводити службові розслідування випадків пожеж.

Відповідно до ст. 6 Закону громадяни України, іноземні громадяни та особи без громадянства, які перебувають на території України зобов'язані:

- виконувати правила пожежної безпеки, забезпечувати будівлі, які їм належать згідно з правом особистої власності, первинними засобами гасіння пожеж і протипожежним інвентарем, виховувати у дітей обережність у

поводженні з вогнем;

- повідомляти пожежну охорону про виникнення пожежі та вживати заходів щодо її ліквідації, рятування людей і майна.

Відповідно до Правил пожежної безпеки в Україні основними організаційними заходами щодо забезпечення пожежної безпеки є:

- визначення обов'язків посадових осіб щодо гарантування пожежної безпеки;
- призначення відповідальних за пожежну безпеку окремих будівель, споруд, приміщень, ділянок тощо, технологічного та інженерного устаткування, а також за утримання і експлуатацію наявних технічних засобів протипожежного захисту;
- встановлення на кожному підприємстві (установі, організації) відповідного протипожежного режиму;
- розробка й затвердження загальнооб'єктної інструкції про заходи пожежної безпеки та відповідних інструкцій для всіх вибухопожежонебезпечних та пожежонебезпечних приміщень, організація вивчення цих інструкцій працівниками;
- розробка планів (схем) евакуації людей на випадок пожежі;
- встановлення порядку (системи) оповіщення людей про пожежу, ознайомлення з ним усіх працюючих;
- визначення категорій будівель та приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою відповідно до вимог чинних нормативних документів, встановлення класів зон за Правилами улаштування електроустановок;
- забезпечення територій, будівель та приміщень відповідними знаками пожежної безпеки, табличками із зазначенням номера телефону та порядку виклику пожежної охорони;
- створення та організація роботи пожежно-технічних комісій, добровільних пожежних дружин та команд.

Важливим чинником є забезпечення первинних засобів пожежогасіння, тому будинки, споруди, приміщення, технологічні установки повинні бути

забезпечені первинними засобами пожежогасіння: вогнегасниками, ящиками з піском, бочками з водою, покривалами з негорючого теплоізоляційного полотна, грубововняної тканини, пожежними відрами,

совковими лопатами, пожежним інструментом (гаками, ломами, сокирами тощо), які використовуються для локалізації і ліквідації пожеж у початковій стадії їхнього розвитку.

Норми належності первинних засобів пожежогасіння для об'єктів слід встановлювати згідно з нормами технологічного проектування, враховуючи наступне:

- визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння залежить від фізико-хімічних та пожежонебезпечних властивостей горючих речовин, їх взаємодії з вогнегасними речовинами, а також розмірів площ виробничих приміщень, відкритих майданчиків та установок;

- необхідну кількість первинних засобів пожежогасіння визначають окремо для кожного поверху та приміщення, а також для етажерок відкритих установок. Якщо в одному приміщенні розміщені декілька різних за пожежною небезпекою виробництв, не відділених одне від одного протипожежними стінами, то всі ці приміщення забезпечують вогнегасниками, пожежним інвентарем та іншими видами засобів пожежогасіння за нормами найбільш небезпечного виробництва;

- покривала повинні мати розмір не менш як 1×1 м. Вони призначені для гасіння невеликих осередків пожеж у разі займання речовин, горіння яких не може відбуватися без доступу повітря. У місцях застосування та зберігання ЛЗР та ГР розміри покривал можуть бути збільшені до величин: 2×1,5 м, 2×2 м. Покривала слід застосовувати для гасіння пожеж класів А, В, D, Е;

- бочки з водою встановлюються у виробничих, складських та інших приміщеннях, спорудах у разі відсутності внутрішнього протипожежного водогону та за наявності горючих матеріалів, а також на території підприємств з розрахунку установки однієї бочки на 250 – 300 квадратних метрів захисної площі.

Бочки для зберігання води з метою пожежогасіння відповідно повинні мати місткість не менше ніж 0,2 кубічних метри і бути укомплектованими пожежним відром місткістю не менше восьми літрів;

– пожежні щити (стенди) установлюються на території підприємства з розрахунку один щит (стенд) на площу 5000 квадратних метрів.

До комплекту засобів пожежогасіння, які розміщуються на ньому, слід включати: вогнегасники – 3 шт., ящик з піском – 1 шт., покривало з негорючого теплоізоляційного матеріалу або повсті розміром 2×2 м – 1 шт., гаки – 3 шт., лопати – 2 шт., ломы – 2 шт., сокири – 2 шт.

Пожежні щити (стенди) та засоби пожежогасіння повинні бути пофарбовані у відповідні кольори за чинним державним стандартом. На пожежних щитах (стендах) потрібно вказувати їх порядкові номери та номер телефону для виклику пожежної охорони, порядковий номер пожежного щита зазначають після літерного індексу "ПЩ";

– ящики для піску повинні мати місткість 0,5, 1,0 або 3,0 кубічних метрів та бути укомплектовані совковою лопатою.

Конструкція ящика повинна забезпечувати зручність видобування піску та унеможливлувати потрапляння опадів.

А.4 Розрахунок штучного освітлення за даними цеху

Розрахунок штучного освітлення проведемо за методом коефіцієнта використання. Дані приміщення: ширина – $a = 30$ м, довжина – $b = 48$ м, висота – $h = 9$ м, коефіцієнти відбиття: стелі (світло-сіра) – $\rho_{стелі} = 53$ %, стін (темні) – $\rho_{стін} = 10$ %, підлоги (темна) – $\rho_{підлоги} = 10$ %. Робоча поверхня знаходиться на відстані $h_p = 1,1$ м від підлоги, відстань від стелі до джерела

освітлення – $h_c = 0,3$ м [6]. Необхідно освітити дане приміщення світильниками РСП-250, використовуючи лампи ДРЛ-250, потужність яких складає 250 Вт, створивши нормовану освітленість $E_n = 100$ лк (для газорозрядних ламп) [2].

1. Враховуючи відстань від підлоги до робочої поверхні та від стелі до джерела освітлення знайдемо:

$$H = h - h_p - h_c; \quad H = 9 - 1,1 - 0,3 = 7,6 \text{ м.} \quad (\text{A.1})$$

Лампи ДРЛ мають криву світлорозподілу типу Л (напівшироку), для якої $\lambda = L/H = 1,4$, отже відстань між світильниками (рядами) $L = \lambda h = 1,4 \cdot 7,6 = 10,7$ м. Нам потрібно розташувати світильники у $a/L = 30/10,7 \approx 3$ ряди.

Визначаємо індекс приміщення:

$$i = \frac{S}{H(a+b)} = \frac{ab}{H(a+b)}; \quad i = \frac{30 \cdot 48}{7,6(30+48)} = 2,42. \quad (\text{A.2})$$

2. Залежно від коефіцієнтів відбиття для прийнятого типу світильника вибираємо коефіцієнт використання світлового потоку $\eta = 68$ % [1].

3. Враховуючи те, що коефіцієнт запасу, який враховую поступове запилення верхні ламп і світильників та старіння ламп, для робочих цехових приміщень – 1,3, для світильників із ртутними лампами приймаємо $K_z = 1,2$. Коефіцієнт нерівномірності освітлення $Z = 0,7$ [6]. Визначаємо необхідний світловий потік залежно від значення нормованої освітленості:

$$\Phi = \frac{E_n SK_3 Z}{\eta}; \quad \Phi = \frac{100 \cdot 1440 \cdot 1,1 \cdot 0,7}{0,68} = 163058,82 \text{ лм.} \quad (\text{A.3})$$

4. Світловий потік газорозрядної лампи, потужність якої 250 Вт, складає 13500 лм. Знаходимо кількість світильників:

$$n = \frac{\Phi}{\Phi_l}; \quad n = \frac{163058,82}{13500} = 12,07 \approx 12 \text{ шт.} \quad (\text{A.4})$$

ДОДАТОК Б. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК

Б.1 Розрахунок додаткових втрат у системах електропостачання при зниженні якості електроенергії. Визначення величини ймовірного збитку від скорочення строку служби обладнання

Від шин 10 кВ розподільчої підстанції заводу живляться зварювальні трансформатори та асинхронні двигуни. Потужність однорідних груп навантаження складає: асинхронні двигуни – 114,45 кВт; зварювальні трансформатори – 300 кВА, цеховий трансформатор – 400 кВА, потужність силових конденсаторів – 394,4 кВАр.

Коефіцієнт несиметрії на шинах 0,38 кВ складає 0,5%. Гармонійні складові напруги: $U_3 = 0,04 \%$, $U_5 = 1,62 \%$, $U_7 = 0,76 \%$, $U_9 = 0,03 \%$, $U_{11} = 0,55 \%$.

Середня тривалість роботи обладнання: для АД – 8760 год/рік, для зварювальних трансформаторів – 6200 год/рік, для цехового трансформатора 8760 год/рік, для силових конденсаторів – 8760 год/рік.

1 Додаткові втрати від несиметрії та несинусоїдальності для асинхронних двигунів:

$$\Delta P_{a\partial} = k_{a\partial} \left(2,41 \varepsilon_U^2 + 2 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v \sqrt{v}} \right) P_n, \quad (\text{Б.1})$$

де ε_U – коефіцієнт несиметрії напруги, рівний відношенню напруги зворотної послідовності до номінальної, %;

U_v – відношення напруги v -ої гармоніки до номінальної, %;

P_n – номінальна активна потужність групи двигунів, кВт;

k_{ad} – коефіцієнт додаткових втрат при несиметричній та несинусоїдальній напрузі, визначається залежно від потужності двигуна та від галузевої приналежності підприємства (згідно з [13] $k_{ad} = 2,29$).

$$\Delta P_{ad} = 2,29 \left[2,41 \cdot 0,0005^2 + 2 \cdot \left(\frac{0,0004^2}{3\sqrt{3}} + \frac{0,0162^2}{5\sqrt{5}} + \frac{0,0076^2}{7\sqrt{7}} + \frac{0,0003^2}{9\sqrt{9}} + \frac{0,0055}{11\sqrt{11}} \right) \right] \times$$

$$\times 114,45 = 0,015 \text{ кВт} \quad (\text{Б.2})$$

2 Додаткові втрати в трансформаторах при несиметрії напруги та несинусоїдальності напруги:

$$\Delta P_{mp} = \left[k' \varepsilon_U^2 + k'' \left(\sum_{v=2}^{\infty} \frac{1 + 0.05v^2}{v\sqrt{v}} U_v^2 \right) \right] S_n, \quad (\text{Б.3})$$

де k' , k'' – коефіцієнти додаткових втрат, визначаються за [13] наступним чином:

Тип трансформатора	k'
Трансформатори 35-220 кВ	0,5
Цехові трансформатори 6-10 кВ	2,67
Спеціальні трансформатори (зварювальні, пічні)	0,67

Таблиця 5.1 – значення коефіцієнтів k' та k'' в залежності від типу ТР.

$$k'' = 0,607k'$$

Цеховий трансформатор:

$$\Delta P_{тр.цех} = \left[2,67 \cdot 0,0005^2 + 1,62 \cdot \left(\frac{1+0,05 \cdot 3^2}{3\sqrt{3}} \cdot 0,0004^2 + \frac{1+0,05 \cdot 5^2}{5\sqrt{5}} \cdot 0,0162^2 + \frac{1+0,05 \cdot 7^2}{7\sqrt{7}} \cdot 0,0076^2 + \frac{1+0,05 \cdot 9^2}{9\sqrt{9}} \cdot 0,0003^2 + \frac{1+0,05 \cdot 11^2}{11\sqrt{11}} \cdot 0,0055^2 \right) \right] \cdot 400; \quad (Б.4)$$

$$\Delta P_{тр.цех} = 1,23 \text{ кВт.}$$

Зварювальний трансформатор:

$$\Delta P_{тр.зв} = \left[0,67 \cdot 0,0005^2 + 0,407 \cdot \left(\frac{1+0,05 \cdot 3^2}{3\sqrt{3}} \cdot 0,0004^2 + \frac{1+0,05 \cdot 5^2}{5\sqrt{5}} \cdot 0,0162^2 + \frac{1+0,05 \cdot 7^2}{7\sqrt{7}} \cdot 0,0076^2 + \frac{1+0,05 \cdot 9^2}{9\sqrt{9}} \cdot 0,0003^2 + \frac{1+0,05 \cdot 11^2}{11\sqrt{11}} \cdot 0,0055^2 \right) \right] \cdot 300; \quad (Б.5)$$

$$\Delta P_{тр.зв} = 0,309 \text{ кВт.}$$

3. Додаткові втрати від несиметрії та несинусоїдальності напруг для силових конденсаторів:

$$\Delta P_{кc} = Q_{ном} tg\delta \left(\varepsilon_U^2 + \sum_{v=2}^{\infty} v U_v^2 \right) \quad (Б.6)$$

де $Q_{ном}$ – номінальна реактивна потужність конденсаторної установки;

$tg\delta$ – тангенс кута втрат на основній частоті, $tg\delta = 0,003$.

$$\Delta P_{\kappa c} = 394,4 \cdot 0,003 \cdot \left(0,0005^2 + 3 \cdot 0,0004^2 + 5 \cdot 0,0162^2 + 7 \cdot 0,0076^2 + 9 \cdot 0,0003^2 + 11 \cdot 0,0055^2 \right); \quad (\text{Б.7})$$

$$\Delta P_{\kappa c} = 2,427 \text{ Вт.}$$

Сумарні додаткові втрати в усіх елементах системи електропостачання цеху розраховуються:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{ad} + \Delta P_{тр.цех} + \Delta P_{тр.зв} + \Delta P_{\kappa c}; \quad (\text{Б.8})$$

$$\Delta P_{\Sigma} = 0,015 + 1,23 + 0,309 + 0,002427 = 1,556 \text{ кВт.}$$

4. Вартість додаткових втрат активної потужності (сума збитку):

$$B_1 = T_e \cdot \sum_{i=1}^n \Delta P_i T_i \quad (\text{Б.9})$$

де T_e – вартість 1 кВт·год, грн. ($T_e = 2,2$ грн/кВт·год);

ΔP_i – додаткові втрати активної потужності у i -й групі однорідних елементів, кВт;

T_i – тривалість роботи за рік i -ої групи однорідних елементів, год/рік;

n – число розглянутих груп однорідних елементів.

$$B_1 = 2,2 \cdot (0,015 \cdot 8760 + 1,23 \cdot 8760 + 0,309 \cdot 6200 + 0,002427 \cdot 8760); \quad (\text{Б.10})$$

$$B_1 = 28260 \text{ грн.}$$

5. Розрахуємо кратність зниження терміну служби обладнання, обумовленого несиметрією і несинусоїдальністю напруги

$$\gamma = e^{k_{вук}}, \quad (\text{Б.11})$$

де $k_{вук}$ – коефіцієнт викривлення, що визначається для різних груп однорідних споживачів:

– для двигунів:

$$k_{вук} = d' \varepsilon_U^2 + d'' \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}; \quad (\text{Б.12})$$

– для трансформаторів:

$$k_{вук} = d' \varepsilon_U^2 + d'' \left(\sum_{v=2}^{\infty} \frac{1 + 0,05v^2 + \frac{1,7}{\sqrt{v}}}{v\sqrt{v}} U_v^2 \right); \quad (\text{Б.13})$$

– для силових конденсаторів:

$$k_{вук} = d \left(\varepsilon_U^2 + \sum_{v=2}^{\infty} v U_v^2 \right) \quad (\text{Б.14})$$

Коефіцієнти d' та d'' для відповідних груп обладнання згідно з [13] складають:

Таблиця 5.2 – Значення коефіцієнтів d' та d'' для різних груп обладнання

Вид обладнання	d'	d''
АД	434	389
Трансформатори цехові	610	207
Трансформатори зварювальні	153	52
Силові конденсатори	2,6	—

Кратність зниження терміну служби для асинхронних двигунів:

$$k_{\text{вук}} = 434 \cdot 0,0005^2 + 389 \cdot \left(\frac{0,0004^2}{3\sqrt{3}} + \frac{0,0162^2}{5\sqrt{5}} + \frac{0,0076^2}{7\sqrt{7}} + \frac{0,0003^2}{9\sqrt{9}} + \frac{0,0055^2}{11\sqrt{11}} \right) = 0,011; \quad (\text{Б.15})$$

$$\gamma = e^{0,011} = 1,012.$$

Для трансформаторів цехових:

$$k_{\text{вук}} = 610 \cdot 0,0005^2 + 207 \cdot \left(\frac{1 + 0,05 \cdot 3^2 + \frac{1,7}{\sqrt{3}}}{3\sqrt{3}} \cdot 0,0004^2 + \dots + \frac{1 + 0,05 \cdot 11^2 + \frac{1,7}{\sqrt{11}}}{11\sqrt{11}} \cdot 0,0055^2 \right); \quad (\text{Б.16})$$

$$k_{\text{вук}} = 0,019; \gamma = e^{0,019} = 1,021.$$

Для зварювальних трансформаторів:

$$k_{\text{вук}} = 153 \cdot 0,0005^2 + 52 \cdot \left(\frac{1 + 0,05 \cdot 3^2 + \frac{1,7}{\sqrt{3}}}{3\sqrt{3}} \cdot 0,0004^2 + \dots + \frac{1 + 0,05 \cdot 11^2 + \frac{1,7}{\sqrt{11}}}{11\sqrt{11}} \cdot 0,0055^2 \right); \quad (\text{Б.17})$$

$$k_{\text{вук}} = 0,0047; \gamma = e^{0,0047} = 1,005.$$

Для силових конденсаторів:

(Б.18)

$$k_{вук} = 2,6 \cdot (0,0005^2 + 3 \cdot 0,0004^2 + \dots + 11 \cdot 0,0055^2) = 0,0053;$$

$$\gamma = e^{0,0053} = 1,006.$$

6. Визначимо збиток від зниження терміну служби електрообладнання.
Для цього приймемо укрупнені показники вартості обладнання.

Таблиця 5.3 – Укрупнені показники вартості обладнання

Обладнання	Вартість, (С) грн/кВт (кВА)	E_n	E_a	E_{np}	Приведені витрати ($З_{np}$), грн
АД	700,72	0,18	0,066	0,02	1028,07
Трансформатор цеховий	575		0,04		55200
Трансформатор зварювальний	3716,66		0,05		278749,5
Силовий конденсатор	145,75		0,055		14866,5

де E_n – коефіцієнт ефективності капіталовкладень;

$$E_a = \frac{1}{T_{obl}} - \text{коефіцієнт амортизаційних відрахувань};$$

T_{obl} – нормативний термін служби обладнання;

E_{np} – коефіцієнт відрахувань на поточні витрати.

Згідно з паспортними даними:

– для асинхронних двигунів марки 4А112М2УЗ: $E_a = \frac{1}{15} = 0,066$;

– для цехового трансформатора ТСЗ-400/10/0,4: $E_a = \frac{1}{25} = 0,04$;

– для зварювального трансформатора ТШС-3000-3: $E_a = \frac{1}{20} = 0,05$;

– для силового конденсатора : $E_a = \frac{1}{18} = 0,055$.

Ціна обладнання:

– асинхронний двигун 4А112М2У3 – 3854 грн/шт.;

– цеховий трансформатор ТСЗ-400/10/0,4 – 230000 грн/шт.;

– зварювальний трансформатор ТСП-3000-3 1115000 – грн/шт.;

– силовий конденсатор КРМ-0,4-400/40 – 58300 грн/шт.

У даному випадку приведені витрати визначаються виходячи зі значень коефіцієнтів ефективності капіталовкладень, відрахувань на амортизацію та відрахувань на поточні витрати.

(Б.19)

$$Z_{np} = (E_n + E_a + E_{np}) P_n C;$$

$$Z_{np.ad} = (0,18 + 0,066 + 0,02) \cdot 5,5 \cdot 702,72 = 1028,07 \text{ грн.}; \quad (\text{Б.20})$$

$$Z_{np.tr.цех.} = (0,18 + 0,04 + 0,02) \cdot 400 \cdot 575 = 55200 \text{ грн.}; \quad (\text{Б.21})$$

$$Z_{np.tr.зв.} = (0,18 + 0,05 + 0,02) \cdot 300 \cdot 3716,66 = 278749,5; \quad (\text{Б.22})$$

$$Z_{np.кc} = (0,18 + 0,055 + 0,02) \cdot 400 \cdot 145,75 = 14866,5 \text{ грн.} \quad (\text{Б.23})$$

1. Загальні витрати (збиток) від зниження терміну служби обладнання:

(Б.24)

$$B_2 = \left[\sum_{i=1}^n Z_i (\gamma_i - 1) \right] \frac{1}{1 + E_n T_n},$$

де Z_i – приведені витрати на i -у групу елементів;

T_n – середній нормативний термін служби обладнання (прийmemo рівним 20 років).

$$B_2 = [1028,07 \cdot (1,012 - 1) + 55200 \cdot (1,021 - 1) + 278749,5 \cdot (1,005 - 1) + 14866,5 \cdot (1,006 - 1)] \times \quad (\text{Б.2} \\ \times \frac{1}{1 + 0,18 \cdot 20} = 577,062 \text{ грн.} \quad 5)$$

Проведений техніко-економічний розрахунок дозволяє зробити висновок: при роботі електрообладнання від неякісної електроенергії грошовий збиток підприємства буде набагато більшим, ніж від зменшення строку служби обладнання. Загальний грошовий збиток підприємства буде становити 28837,062 гривень/рік

Схема заміщення лінії електропередачі

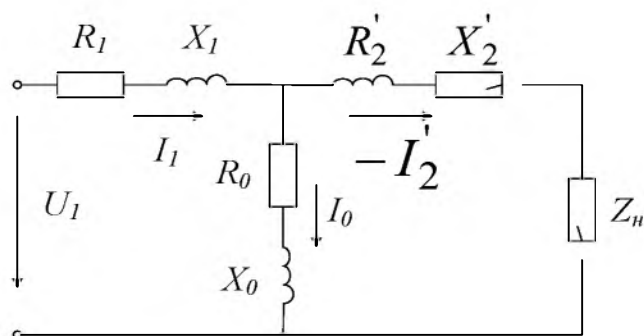
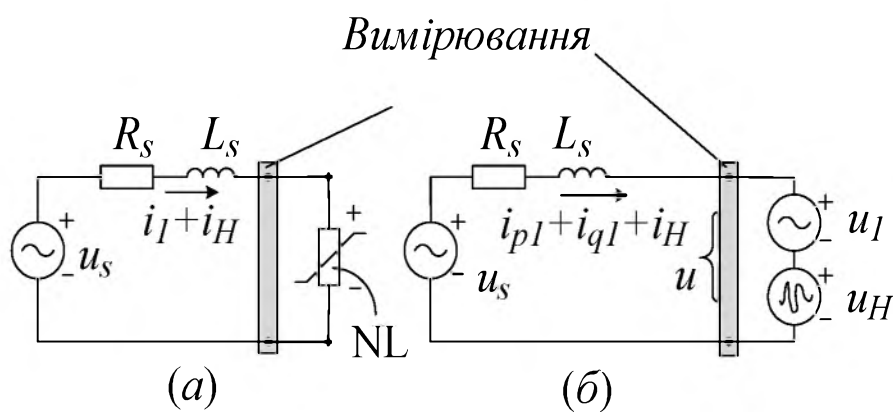
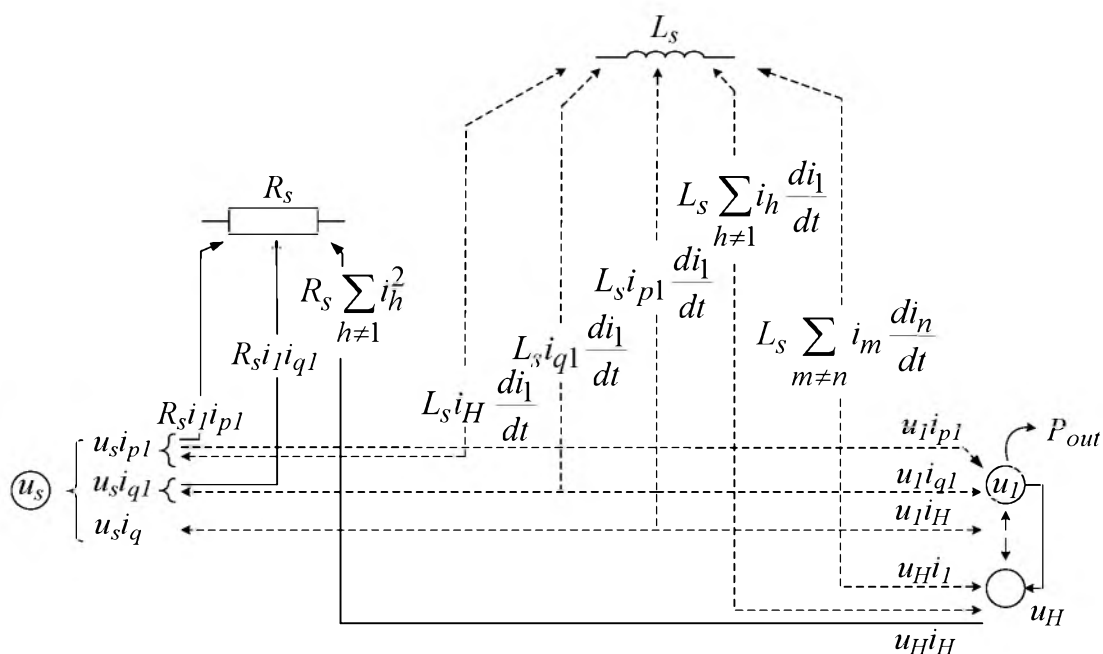


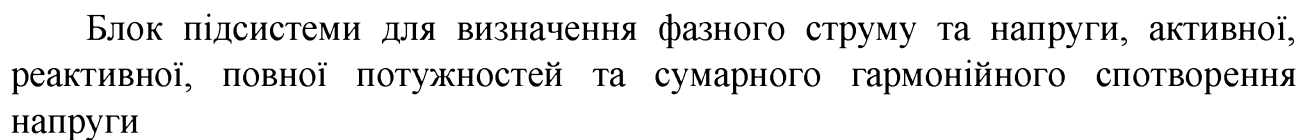
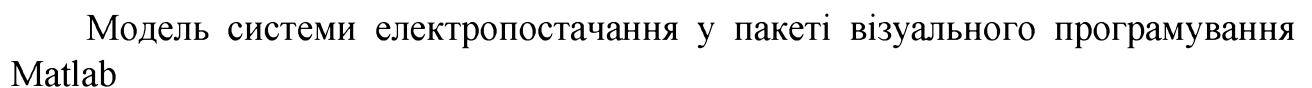
Схема заміщення трансформатора

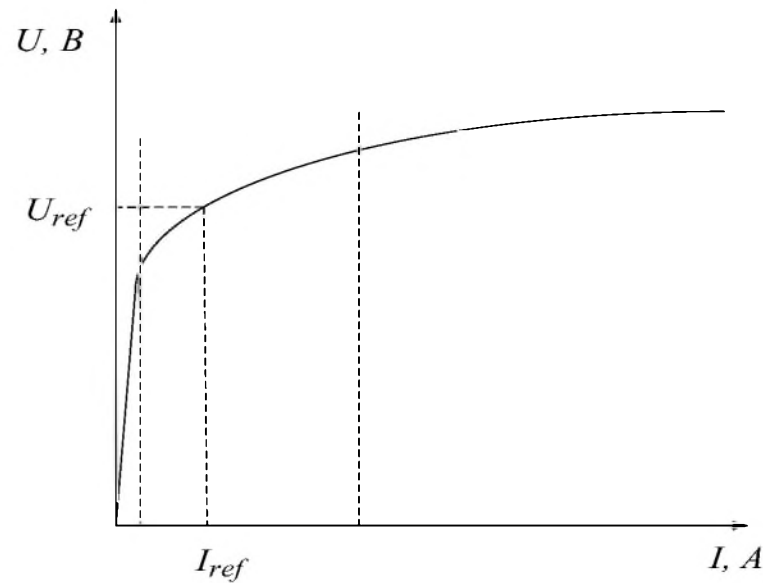


Нелінійне навантаження загальний випадок: *а* – базова схема; *б* – еквівалентна лінійна схема

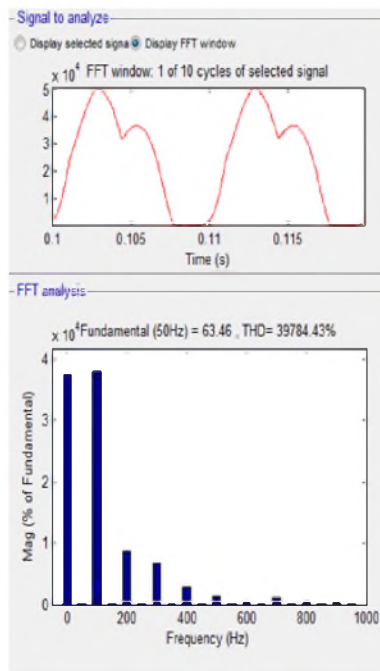


Потік миттєвих потужностей

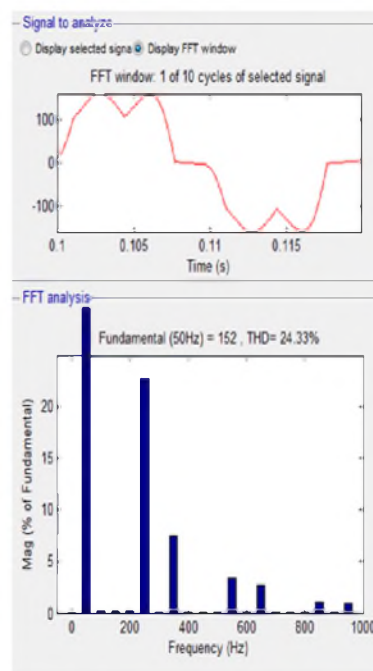




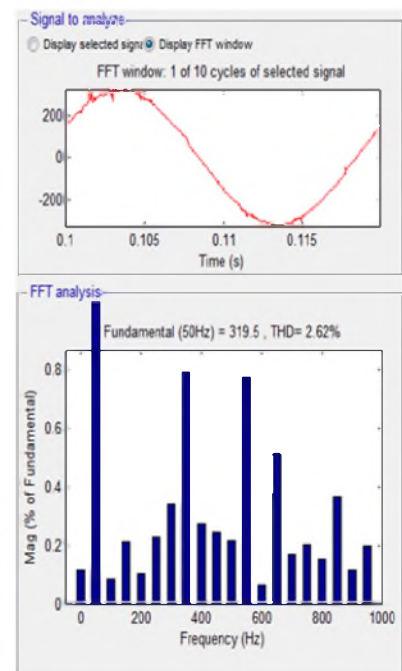
ВАХ розрядника



а)

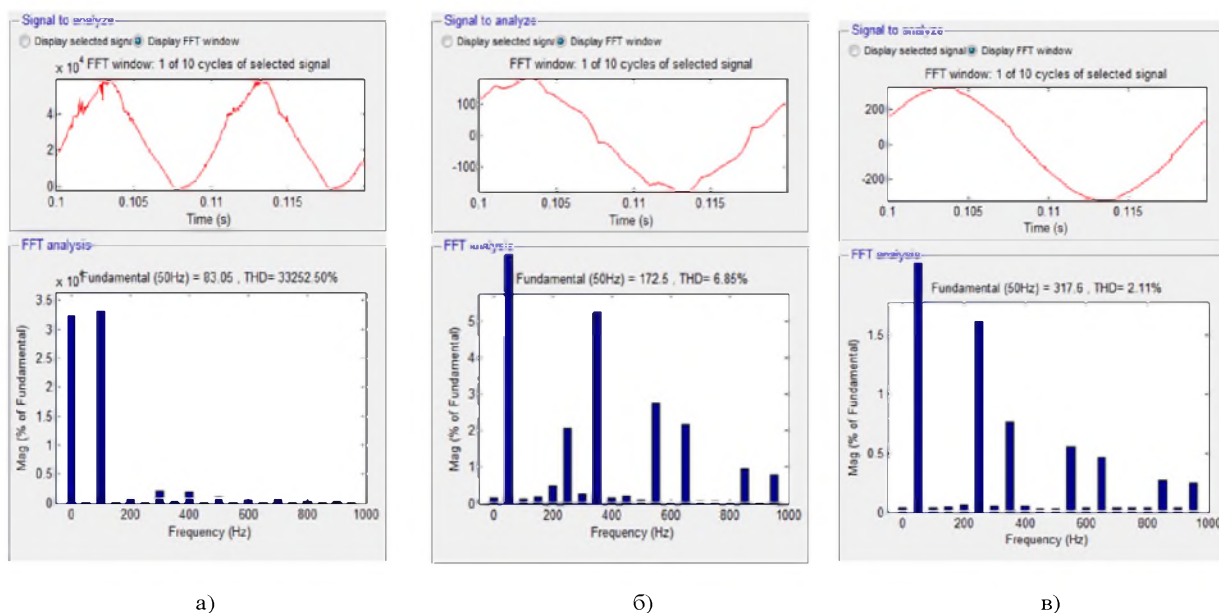


б)

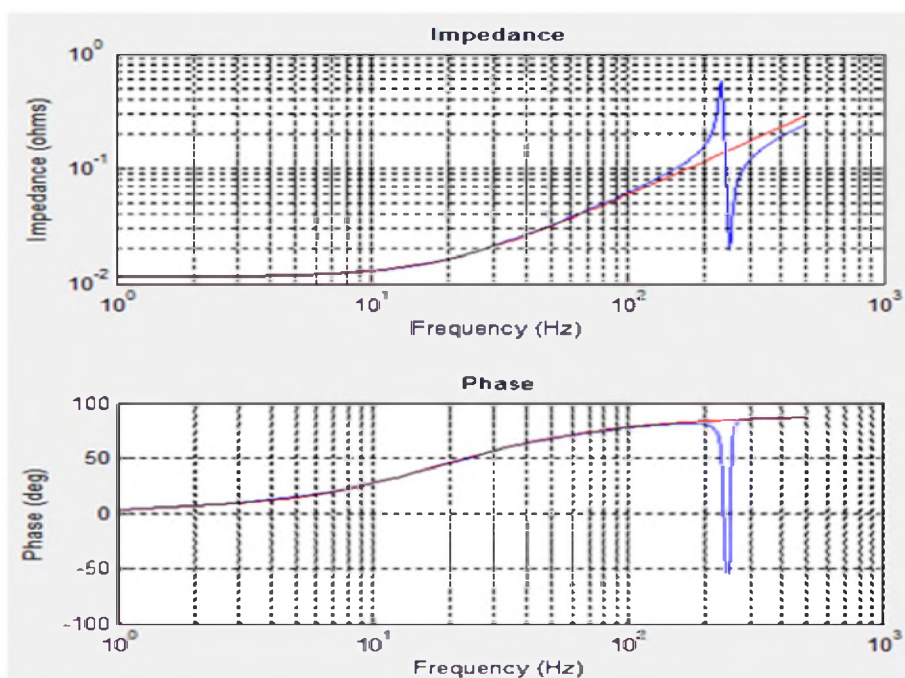


в)

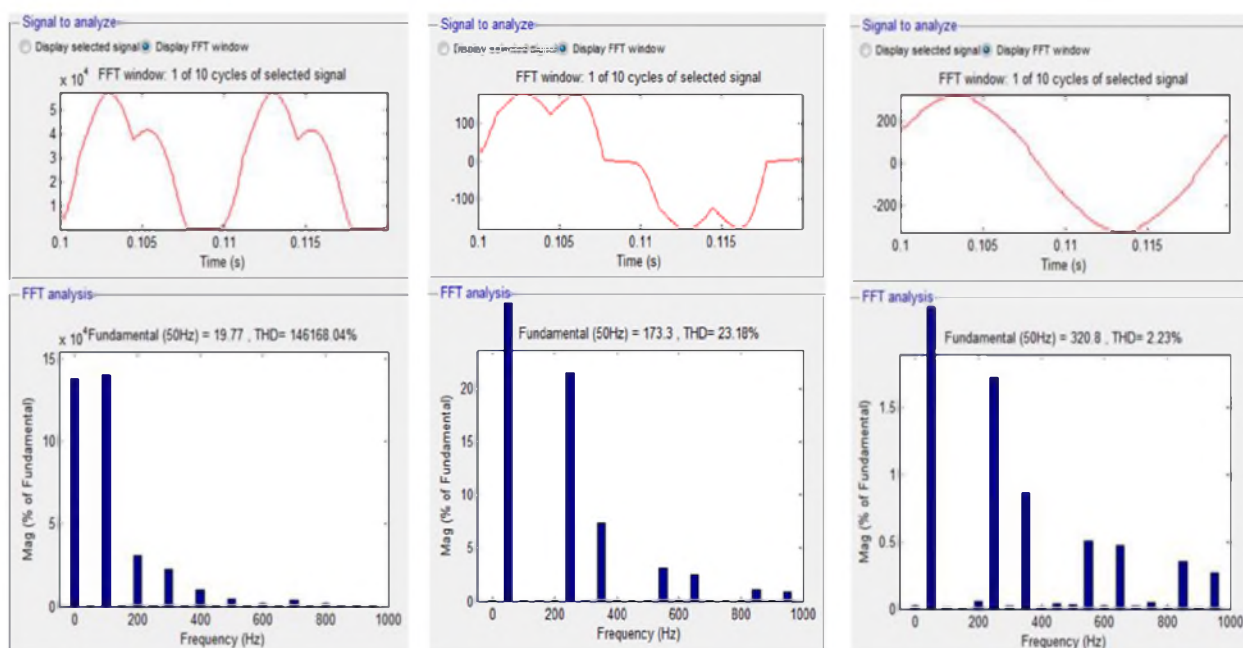
Спектральний гармонійний склад ділянки цеху зі зварювальною установкою без фільтрокомпенсуючого пристрою при дослідженні повної схеми електропостачання цеху: а) потужності; б) струму; в) напруги



Спектральний гармонійний склад ділянки цеху зі зварювальною установкою з фільтрокомпенсуючим пристроєм при дослідженні повної схеми електропостачання цеху: а) потужності; б) струму; в) напруги



Графіки імпедансу при дослідженні повної схеми електропостачання цеху (без та з фільтрокомпенсуючим пристроєм)

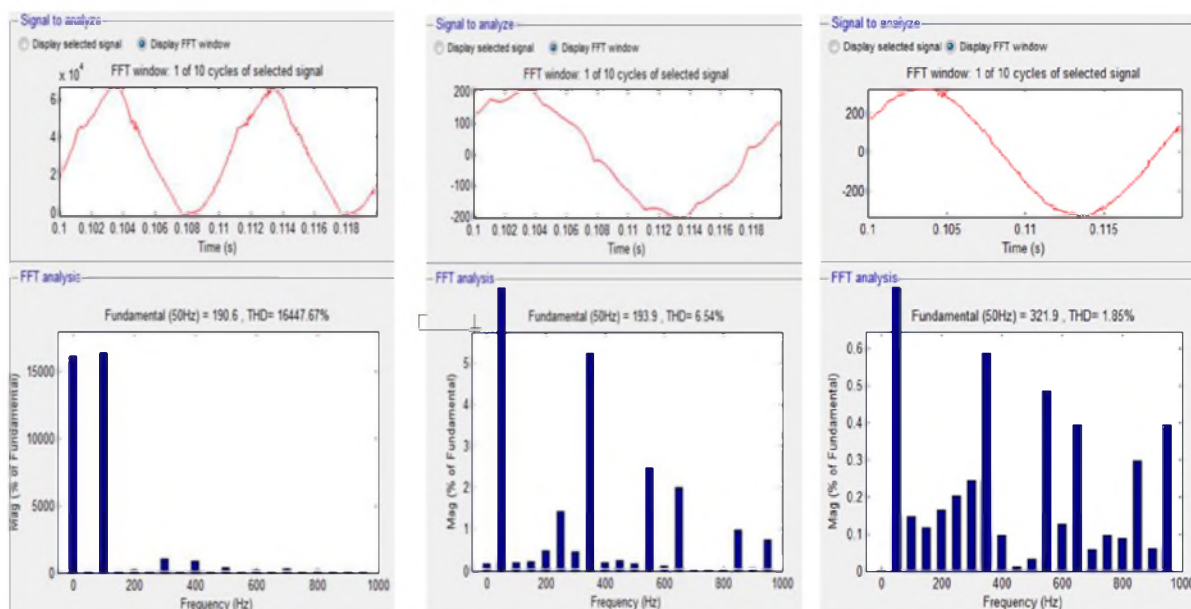


а)

б)

в)

Спектральний гармонійний склад ділянки цеху зі зварювальною установкою без фільтрокомпенсуючого пристрою при дослідженні електропостачання цеху без еквівалентного навантаження шини ШРА4: а) потужності; б) струму; в) напруги

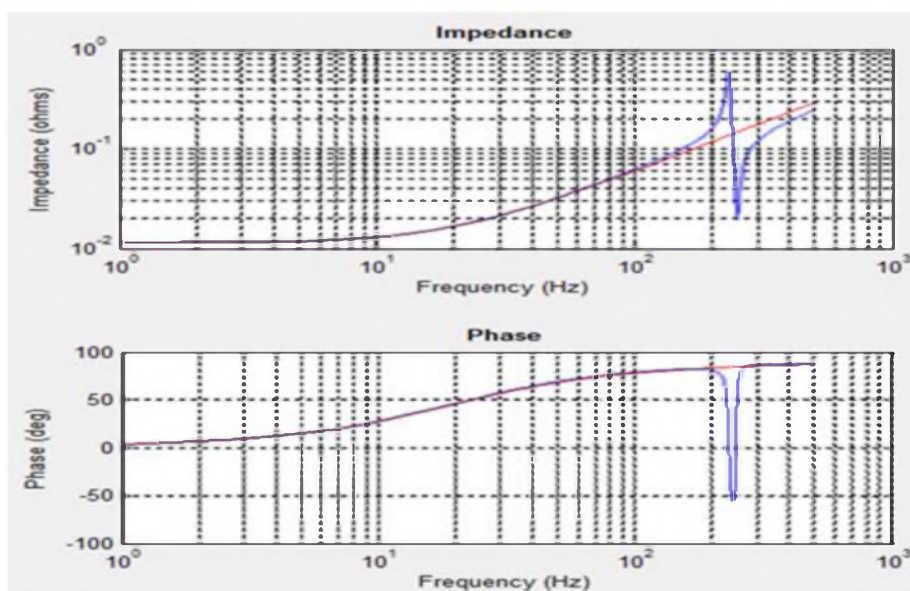


а)

б)

в)

Спектральний гармонійний склад ділянки цеху зі зварювальною установкою з фільтрокомпенсуючим пристроєм при дослідженні схеми електропостачання цеху без лінійного навантаження шини ШРА4: а) потужності; б) струму; в) напруги



Графіки імпедансу при дослідженні схеми електропостачання цеху без еквівалентного навантаження шини ШРА4 (без та з фільтрокомпенсуючим пристроєм)

ДОДАТОК Г. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____
