

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНИ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем

(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота**

другий (магістерський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему Підвищення ефективності електроспоживання ТОВ «Машинобудівний завод «Квік»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1412  
спеціальності 141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

(назва освітньої програми)

Голєв Є О.

(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц., Друбєцька Т.І.

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

Рецензент д.т.н., проф., Артемчук В.В.

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

Запоріжжя  
2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерний навчально-науковий інститут \_\_\_\_\_  
Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем  
Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень  
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)  
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри  
д.т.н., доц. В.Л. Коваленко  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Голеву Євгену Олександровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Підвищення ефективності електроспоживання  
ТОВ «Машинобудівний завод «Квік»

керівник роботи Друбецька Т.І., к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 01 » травня 2023 року № 639 - с

Строк подання студентом роботи 01 грудня 2023 р.


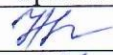





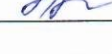
2 Вихідні дані до роботи Загальна встановлена потужність споживачів,  
підприємства 1261 кВт; розподіл електричного навантаження за ділянками:  
електроапарати для технологічних процесів- 136 кВт, потужність  
електродвигунів, - 871 кВт, потужність систем освітлення – 170 кВт год роботи  
трансформаторів на рік – 8760 годин.

3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно  
розробити) 1) Сутність проблеми забезпечення якості електроенергії за  
наявності нелінійних споживачів. 2) Аналіз схемних та конструктивних рішень  
для зниження рівнів вищих гармонік 3) Розробка алгоритму прийняття рішення  
щодо вибору фільтрокомпенсуючого пристрою на основі техніко-економіч  
критеріїв. 4) Охорона праці та техногенна безпека.

4 Перелік графічного матеріалу 1) Аналіз ефективності енергоспоживання  
ділянки цеху 2) План ділянки. 3) Схеми однолінійна 4) Схеми і криві струму і  
миттєвої потужності 5) Сучасні вимоги до якості електроенергії 6) Структура

сучасного тиристорного компенсатора реактивної потужності 7) Схеми фільтрів 8) Алгоритм вибору ФКП 9) Методика визначення економічної ефективності запропонованих заходів 10) Охорона праці та техногенна безпека

### 5 Консультанти розділів роботи

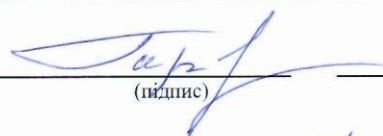
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Друбецька Т.І. к.т.н. доцент		
Розділ 2	Друбецька Т.І. к.т.н. доцент		
Розділ 3	Друбецька Т.І. к.т.н. доцент		
Розділ 4	Друбецька Т.І. к.т.н. доцент		

6 Дата видачі завдання 01.09.2023 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Сутність проблеми забезпечення якості електроенергії за наявності нелінійних споживачів	30.09.2023	
2	Аналіз схемних та конструктивних рішень для зниження рівнів вищих гармонік	15.10.2023	
3	Розробка алгоритму прийняття рішення щодо вибору фільтрокомпенсуючого пристрою на основі техніко-економічних критеріїв	25.10.2023	
4	Охорона праці та техногенна безпека	10.11.2023	

Студент

  
(підпис)

Є.О. Голєв

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи

  
(підпис)

Т.І. Друбецька

(ініціали та прізвище)

### Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

  
(підпис)

І.І. Бандуренко

(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Голєв Є. О. Підвищення ефективності електроспоживання ТОВ «Машинобудівний завод «Квік».

Кваліфікаційна випускна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник Т.І. Друбецька. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2023.

Досліджено особливості існуючих методів зниження рівня гармонік струму та компенсації реактивної потужності в електропостачанні промислових підприємств. Проведено оцінку ефективності та перспектив схемних та конструктивних рішень для зменшення рівнів вищих гармонік та компенсації реактивної потужності.

Ключові слова: РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ, ВИЩІ ГАРМОНІКИ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИЙ ПРИСТРІЙ, ВЕНТИЛЬНЕ НАВАНТАЖЕННЯ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

## ABSTRACT

Golev E. O. Improving the efficiency of electricity consumption of Kvik Machine-Building Plant LLC.

Qualification final work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, supervisor T.I. Drubetska. Zaporizhzhya National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebni, Department of Electrical Engineering and Energy Efficiency, 2023.

The features of existing methods of reducing the level of current harmonics and compensation of reactive power in the power supply of industrial enterprises are

studied. An assessment of the efficiency and prospects of circuit and design solutions to reduce the levels of higher harmonics and compensate for reactive power is carried out.

Key words: REACTIVE POWER, HIGHER HARMONICS FILTER COMPENSATING DEVICE, VALVE LOAD, , POWER QUALITY

## ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Суть проблеми забезпечення якості електроенергії за наявності нелінійних споживачів .....	11
1.1 Нормалізація показників, що характеризують несинусоїдальні режими.....	11
1.2 Проблеми вищих гармонік у сучасних системах електропостачання.....	17
1.2.1 Вплив більш високих гармонік напруги і струму.....	17
1.3 Методи зменшення рівня гармонік струму в системах.....	28
1.3.1 Монтаж лінійних дроселів.....	29
1.3.2 Застосування пасивних фільтрів.....	32
1.3.3 Використання спеціальних розділових трансформаторів.....	34
1.3.4. Застосування магнітних синтезаторів.....	35
1.3.5 Застосування фільтрів активних гармонік.....	37
1.3.6 Гібридний фільтр.....	40
2 Аналіз схемо-конструкторських рішень для зменшення вищих гармонік.....	42
2.1 Удосконалення форми кривої струму.....	42
2.2 Регулятори, що використовують компенсаційний принцип .....	46
2.3 Трансформатори фазоповоротні.....	49
3. Розробка алгоритму прийняття рішення щодо вибору фільтро-компенсуючого пристрою за техніко-економічними критеріями .....	55
3.1 Загальні положення .....	55
3.1.1 Фактори економічної ефективності при техніко-економічному аналізі енергозберігаючих енергетичних проектів.....	58
3.2 Економіко-правові питання.....	63
3.3 Приклад застосування результатів дослідження на прикладі ТОВ «Квік».....	67

3.3.1 Коротка характеристика підприємства.....	68
3.3.2 Огляд споживачів електричної енергії.....	69
3.4 Аналіз енергоспоживання.....	70
3.4.1 Особливості встановлених електроприймачів та електрообладнання ТОВ «Квік».....	70
3.4.2 Динаміка споживання електричної енергії.....	73
3.5 Оцінка частки споживачів у погіршенні якості електроенергії.....	75
3.6 Вибір компенсаційних пристроїв реактивної потужності.....	80
4 Охорона праці та техногенна безпека.....	84
4.1 Аналіз потенційних і шкідливих чинників виробничого середовища....	84
4.2 Технічні рішення по гігієні праці і виробничій санітарії.....	85
4.2.1 Природне і штучне освітлення .....	86
4.2.2 Санітарно - побутові приміщення .....	88
4.2.3 Шум і вібрація в ділянки .....	89
4.3 Заходи з поліпшення умов праці .....	90
4.4 Електробезпека... ..	91
4.5 Засоби індивідуального захисту.....	93
4.6 Інженерні рішення щодо забезпечення умов роботи з точки зору електробезпеки .....	94
4.7 Пожежна безпека.....	100
4.8 Охорона навколишнього середовища.....	101
Висновки.....	103
Перелік посилань.....	105

## ВСТУП

В процесі проектування та експлуатації систем промислового електропостачання виникає ключове питання щодо компенсації реактивної потужності та зниження рівня вищих гармонік, що передбачає вибір фільтрокомпенсуючого пристрою (ФКП). При цьому важливо керуватися техніко-економічними розрахунками та обґрунтуваннями. Враховуючи, що на підприємстві може вже використовуватися різне обладнання з різним завантаженням та різними вихідними даними, універсальних рекомендацій щодо вибору ФКП не існує.

Початковим етапом вибору ФКП є збір та аналіз вихідних даних. Важливо враховувати технічні та економічні аспекти, адаптуючи нормовані показники до конкретного випадку.

Це дослідження має актуальність через необхідність системного підходу до визначення методів вибору ФКП, їх взаємозв'язку та взаємодії. Розробка алгоритму дозволить оптимізувати процес прийняття рішень, підвищити ефективність виробничих процесів і мінімізувати витрати часу на вибір оптимального ФКП.

Хоча існують окремі дослідження економічної ефективності інвестицій в енергетику, їхня взаємодія та взаємовплив, відсутність єдиної методики свідчить про потребу в комплексному підході до вибору ФКП. Попри існуючий інтерес до цієї проблематики, роботи поки що залишаються розрізненими, а їхні результати не враховуються в комплексі.

Таким чином, важливо зауважити, що незважаючи на існуючий обсяг публікацій, присвячених аспектам вибору ФКП та компенсації реактивної потужності, вони залишаються частковими та розсіяними. Дослідження окремих аспектів ефективності інвестицій в енергетику та впливу факторів на вибір ФКП демонструють, що необхідна системна методологія, яка враховує різноманітні техніко-економічні аспекти та нормативні вимоги.



У зв'язку з вищевикладеним, метою даного магістерського дослідження є розробка алгоритму вибору ФКП на основі техніко-економічних критеріїв для оптимізації процедури прийняття рішень та підвищення ефективності виробничих процесів. Це обґрунтується необхідністю інтеграції розрізаних підходів та досліджень в комплексну методологію, яка надасть змогу враховувати всі необхідні аспекти при виборі ФКП.

Враховуючи різноманіття умов та обладнання на промислових підприємствах, розробка універсального алгоритму, який би враховував усі можливі сценарії вибору та експлуатації ФКП, є невиконаною задачею. Тому запропонований алгоритм повинен бути модульним та гнучким, адаптованим до конкретних умов та вимог кожного підприємства.

Такий алгоритм сприятиме не лише оптимізації витрат на енергоспоживання, а й сприятиме забезпеченню сталого та ефективного функціонування систем електропостачання промислових об'єктів.

Об'єкт дослідження - вплив ступеня несинусоїдальності навантажень промислових підприємств на вибір показників фільтрокомпенсуючого обладнання.

Предмет дослідження - техніко-економічні показники видів фільтрокомпенсуючих пристроїв.

Мета даного магістерського дослідження полягає у розробці методологічного підходу до вибору фільтрокомпенсуючих пристроїв (ФКП) з урахуванням повного спектру неактивних складових електричної потужності на промислових підприємствах. Для досягнення цієї мети визначено ряд завдань:

1. Аналіз існуючих методів придушення гармонік струму та компенсації реактивної потужності; дослідити різні способи компенсації реактивної потужності та придушення гармонік у системах електроживлення промислових підприємств.

2. Аналіз впливу вищих гармонік на комп'ютерне та офісне обладнання: розглянути вплив вищих гармонік на роботу комп'ютерного та офісного обладнання в сучасних системах електроживлення.

3. Оцінка ефективності схемних і конструктивних рішень для компенсації реактивної потужності та придушення гармонік: проаналізувати та оцінити ефективність різних схемних та конструктивних рішень для зниження рівнів вищих гармонік та компенсації реактивної потужності.

4. Вибір методу оцінки компенсуючого пристрою та визначення пайового внеску споживачів у погіршення якості електричної енергії: визначити метод оцінки компенсуючого пристрою з реактивної потужності та пайового внеску споживачів у погіршення якості електричної енергії на основі економічного критерію.

5. Обґрунтування методу обліку впливу гармонік струму нелінійних споживачів: обґрунтувати метод обліку впливу гармонік струму нелінійних споживачів на системи електроживлення.

6. Розробка процедури прийняття рішення щодо вибору фільтрокомпенсуючого пристрою: розробити процедуру прийняття рішення щодо вибору фільтрокомпенсуючого пристрою на основі техніко-економічних критеріїв.

Методи дослідження включають теоретичний аналіз, синтез, термінологічний аналіз, економічний аналіз, системний підхід та декомпозицію. Інформаційна база включає стандарти, матеріали офіційних установ, дані з мережі Інтернет, бібліотечний фонд монографій та періодичних видань.

Отримані результати та висновки магістерської роботи можуть бути застосовані для оптимізації енергоспоживання промислових підприємств та удосконалення практики вибору фільтрокомпенсуючого обладнання.

# 1 СУТЬ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗА НАЯВНОСТІ НЕЛІНІЙНИХ СПОЖИВАЧІВ

## 1.1 Нормалізація показників, що характеризують несинусоїдальні режими

Стандарт ГОСТ 13109-97, який є дійсним у Вірменії, Білорусі, Казахстані, Киргизії, Молдові, Таджикистані, Туркменістані та Узбекистані, встановлює норми якості електричної енергії в електричних мережах трифазного та однофазного струму частотою 50 Гц.

Ці норми поширюються на мережі всіх класів напруги, що живлять споживачів усіх галузей народного господарства.

Коефіцієнти за напругою характеризують відхилення від синусоїдальної форми напруги. Вони визначаються як відношення амплітуди або середнього значення гармоніки напруги до амплітуди або середнього значення основної гармоніки. Окремі гармоніки напруги - це складові синусоїдальної напруги, що мають частоту, кратну частоті основної гармоніки.

Таблиця 1.1 містить норми для амплітудного та середнього відхилення окремих гармонік напруги. Відхилення від норм якості електричної енергії може призвести до порушення роботи електроустаткування, зниження його надійності та терміну служби, а також до погіршення якості продукції, що виробляється.

Таблиця 1.1 - Значення коефіцієнту  $k_U$ , % за напругою

Нормально допустиме значення $k_U$ , % при $U_{ном}$ , кВ				Гранично допустиме значення $k_U$ , % при $U_{ном}$ , кВ			
0,38	6-20	35	110-330	0,38	6-20	35	110-330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Гранично допустиме значення  $k_U$  приймається рівним півторакратному значенню порівняно з наведеним у таблиці 1.2.

Розрахунковий час, протягом якого зазначені ПКЕ повинні відповідати нормам (таблиця 1.1 і 1.2) становить 24 години. Значення  $U_{ex}$  і  $k_U$ , відповідні

ймовірності 95%, також не повинні перевищувати нормально допустимих значень, наведених у зазначених таблицях.

Стандарт ГОСТ 13109-97 відповідає стандартам МЕК щодо рівнів електромагнітних перешкод (ЕМБ) у системах електропостачання (СЕС) та методів вимірювання ЕМ-перешкод.

Наразі в електротехнічній практиці найбільше поширення набули два стандарти: європейський стандарт EN 50160 та американський стандарт IEEE Std 519. У деяких країнах використовуються стандарти МЕК.

У багатьох європейських країнах прийняті без змін або з несуттєвими змінами норми EN 50160, розроблені Європейським комітетом нормалізації в галузі електротехніки (CENELEK) та прийняті в 1994 році.

Згідно з EN 50160, у нормальних режимах в кожен добу в будь-якому 10-хвилинному інтервалі протягом 95% часу усереднені величини діючих значень вищих гармонік (ВГ) напруги повинні бути менше або дорівнювати величинам, наведеним у таблиці 1.2.

Резонансні явища можуть призвести до появи великих величин окремих гармонік, однак коефіцієнт несиметричного струму (кнс) напруги, що живить, з урахуванням усіх гармонік до 40-го порядку включно, повинен бути менше або дорівнювати 8%.

Значення 3 і 9-й гармонік відносяться до однофазних електричних мереж. У трифазних трипровідних електричних мережах ці значення приймають вдвічі меншими наведених у таблиці 1.3.

У документі величини ВГ порядків  $v > 25$  не наведені, оскільки вони зазвичай малі і їх прогнозування досить ускладнене у зв'язку з резонансними явищами. Норми EN 50160 розроблені для мереж низької напруги - трипровідних мереж 230 В і мереж середньої напруги 1 - 35 кВ.

У документі позначено зростання рівнів інтергармонік як наслідок розширення використання перетворювачів частоти і подібних пристроїв. Допустимі їх рівні не наводяться; необхідне накопичення даних.

Таблиця 1.2 – Значення окремих гармонік

Непарні гармоніки $U_v, \%$ , не кратні 3, при $U_{ном}, \text{кВ}$					Непарні гармоніки $U_v, \%$ , кратні 3, при $U_{ном}, \text{кВ}$					Парні гармоніки $U_v, \%$ , при $U_{ном}, \text{кВ}$				
$v$	0,38	6-20	35	110 - 330	$v$	0,38	6-20	35	110 - 330	$v$	0,38	6-20	35	110 - 330
5	6,0	4,0	3,0	1,5	3	5,0	3,0	3,0	1,5	2	2,0	1,5	1,0	0,5
7	5,0	3,0	2,5	1,0	9	1,5	1,0	1,0	0,4	4	1,0	0,7	0,5	0,3
11	3,5	2,0	2,0	1,0	15	0,3	0,3	0,3	0,2	6	0,5	0,3	0,3	0,2
13	3,0	2,0	1,5	0,7	21	0,2	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,3	0,3	0,2
17	2,0	1,5	1,0	0,5	>21	0,2	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,3	0,3	0,2
19	1,5	1,0	1,0	0,4						12	0,2	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,0	1,0	0,4						>12	0,2	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1,0	1,0	0,4										
>2	0,2	0,2	0,2	0,2										
5	+	+	+	+										
	+	+	+	+										
	1,3x	0,8x	0,6x	0,2x										
	X25	X25	X25	X25										
	/n	/n	/n	/n										

З 1994 року стандарт EN 50160 має статус норм ФРН; ці норми прийняті також (з 15.06.1995 р.) в якості національного стандарту Норвегії. У Данії також прийняті норми EN 50160, проте усереднені значення ВГ в десятихвилинних інтервалах не повинні перевершувати наведених у таблиці 1.3 значень, без урахування допустимого зменшення на 5%. EN 50160 прийнятий також в якості польського стандарту.

Американський стандарт IEEE Std 519 розроблений американським національним інститутом стандартизації (ANSI) та інститутом інженерів

електриків і електронників (IEEE). Крім власного стандарту, представлені також керівництво для користувача і рекомендації для практики.

Таблиця 1.3 - Величини ВГ для мереж низької напруги

Непарні ВГ				Парні ВГ	
Некратні трьом		Кратні трьом		Номер (порядок)	Напруга ВГ, %
Номер (порядок)	Напруга ВГ, %	Номер (порядок)	Напруга ВГ, %		
5	6				
7	5				
11	3,5	3	5	2	2
13	3	9	1,5	4	1
17	2	15	0,5	6-24	0,5
19	1,5	21	0,5		
13	1,5				
25	1,5				

Стандарт включає в себе таблиці гранично допустимих значень  $k_{nc}$  ВГ струму, що генеруються споживачами розподільних мереж (таблиця 1.4), мереж середнього (69-161 кВ) і вищого (161 кВ і більше) напружень (таблиця 1.5 і 1.6), а також гранично допустимих спотворень напруги (таблиця 1.7).

Таблиця 1.4 - Гранично допустимі значення  $k_{nc}$

Максимально допустимі величини непарних ВГ у відсотках від струму навантаження в розподільних мережах						
$I_v/I_l$	$v < 11$	$11 \leq v < 17$	$17 \leq v < 23$	$23 \leq v < 35$	$35 \leq v$	$k_{nc}$
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
21000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Таблиця 1.5 - Максимально допустимі величини непарних ВГ

Максимально допустимі величини непарних ВГ у відсотках від струму навантаження, при U = 69-161 кВ						
$I_v/I_l$	$v < 11$	$11 \leq v < 17$	$17 \leq v < 23$	$23 \leq v < 35$	$35 \leq v$	$k_{nc}$
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	1,5
20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50-100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100-1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

Таблиця 1.6 - Максимально допустимі величини непарних ВГ по відношенню до струму навантаження

Максимально допустимі величини непарних ВГ у відсотках від струму навантаження при U > 161 кВ						
$I_v/I_l$	$v < 11$	$11 \leq v < 17$	$17 \leq v < 23$	$23 \leq v < 35$	$35 \leq v$	$k_{nc}$
<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$\geq 50$	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Таблиця 1.7 - Величини окремих ВГ напруги

Напруга енергосистеми	Величини окремих ВГ напруги	$k_{nc}$
- 69 кВ	3,0	5,0
69 - 161 кВ	1,5	2,5
> 161 кВ	1,0	1,5

У документі зазначається, що в короткочасному режимі (наприклад, у пускових режимах) допустимі значення ВГ струму, наведені в таблиці 1.4, можуть бути збільшені на 50%. Рівною мірою це стосується і характеристики несинусоїдальності напруги. При наявності в мережі ВП допустимі рівні

основних ВГ струму можуть бути збільшені в  $q/6$  разів, де  $q$  - пульсність перетворювача (наприклад, для 12-пульсного перетворювача допускається збільшення в 2 рази допустимих значень 11; 13; 23 і 25-й гармонік тощо). допустимі рівні інших ВГ можуть бути збільшені на 25%.

Австралійський стандарт у розділі, що відноситься до електрообладнання промисловості (AS 2279.2), має три частини. Перша і третя частини визначають можливість і порядок підключення електрообладнання до мережі. У другій частині дані норми, що визначають допустимі значення окремих ВГ і  $k_U$  (таблиця 1.8).

Таблиця 1.9 представляє вимоги щодо обмеження ВГ струму великих споживачів (МА/кВт).

Таблиця 1.8 - Норми, що визначають допустимі значення окремих ВГ і  $k_U$

Тип електричної мережі	Напруга у вузлі мережі, кВ	$k_{нси}$ , %	Рівні ВГ напруги, %	
			Непарні	Парні
Розподільча	<33	5	4	2
Живляча	22, 33 і 66	3	2	1
Системоутворююча	$\geq 100$	1,5	1	0,5

Ці споживачі зобов'язані знижувати рівні ВГ струму нижче зазначених значень за їх рахунок. Стандарт ПАР («ESKOM») заснований на стандартах МЕК з урахуванням умов експлуатації енергосистем в Південній Африці і поширюється на мережі напругою 1,1 - 44 кВ. Допустиме значення  $k_U$  становить 5%, кожній з парних ВГ порядків < 14 становить 4%, непарних - 2%. Величини ВГ 14-25го порядків не повинні перевершувати половини значень ВГ - < 13, вище 25-го - 0,25% цих значень. У цьому стандарті вказано допустимий рівень інтергармонік напруги, рівний 1%.

МЕК розроблено низку стандартів, що нормують рівні ЕМБ в електричних мережах. Стандарт ІЕС 1000-2-4 відноситься до мереж нижчої і середньої напруги; допустимі рівні ВГ визначені залежно від класу електричної мережі; розрізняють три класи.



Таблиця 1.9 - Допустимий рівень інтергармонік напруги

Напруга мережі, кВ	Граничні значення струмів ВГ, $E$ мА/кВт							
	5	7	11	13	17	19	23	>23
6,6	3,5	2,5	1,6	1,3	1,0	0,9	0,76	0,70
22	1,8	1,3	0,82	0,69	0,53	0,47	0,39	0,36
33	1,2	0,86	0,55	0,46	0,35	0,32	0,26	0,24
66	0,59	0,42	0,27	0,23	0,17	0,16	0,13	0,12
7	0,50	0,36	0,23	0,19	0,15	0,13	0,11	0,10
110	0,35	0,25	0,16	0,13	0,10	0,09	0,07	0,07
154	0,25	0,18	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05	0,05
220	0,17	0,12	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03
275	0,14	0,10	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02

Перший клас - електричні мережі з обладнанням, вельми чутливим до різного роду неполадок (наприклад ФКП, БК тощо) Другий клас належить до вузлів живлення з боку ЕС і вузлів внутрішньозаводської мережі. Третій клас відноситься тільки до внутрішньозаводських мереж з СхП. Допустимі значення  $k_{нс}$  для мереж першого класу становить 5%, для другого 8% і третього - 10%. У стандарті не вказані допустимі значення ВГ струмів. Стандарт не поширюється на електричні мережі високої напруги.

## 1.2 Проблеми вищих гармонік у сучасних системах електропостачання

Рівень складності обладнання постійно підвищується. Тому системи забезпечення якості електропостачання (наприклад, Джерела Безперебійного Живлення, ІБП/UPS) повинні бути розроблені таким чином, щоб вони були здатні впоратися з широким спектром проблем, починаючи від провалів, коливань, викидів напруги, високочастотних шумів, імпульсних перешкод і

закінчуючи забезпеченням електроживленням при Одну з таких проблем становлять спотворення форми напруги, викликані гармонічними складовими струму, що споживається нелінійним навантаженням.

Велика частина комп'ютерного та офісного обладнання являє собою нелінійне електричне навантаження, що створює спотворення в живлячій мережі. Сумарний ефект цих навантажень виражається в спотворенні напруги, яке впливає на інше обладнання, що отримує електроживлення від того ж джерела. Це може викликати перегрів і розсинхронізацію в інших пристроях, збої в комунікаціях і мережах передачі даних, пошкодженні апаратури та інші небажані ефекти.

Ступінь викривлень може бути визначена коефіцієнтом спотворення синусоїдальності  $k_U$  відношенням чинного значення вищих гармонічних до чинного значення основної (першої) гармоніки і коефіцієнтом амплітуди (хрест-фактором) навантаження  $k_a$  - відношенням пікового значення споживаного струму до його чинного значення.

### 1.2.1 Вплив більш високих гармонік напруги і струму

Останні можуть бути розділені на ефекти миттєвого і тривалого виникнення. Проблеми миттєвого виникнення включають:

- спотворення форми живлячого напруження;
- падіння напруги в розподільчій мережі;
- ефект гармонік, кратних трьом (у трифазних мережах);
- резонансні явища на частотах вищих гармонік;
- наводки в телекомунікаційних і керуючих мережах;
- підвищений акустичний шум в електромагнітному обладнанні;
- вібрація в електромашинних системах.

Проблеми тривалого виникнення включають:

- нагрів і додаткові втрати в трансформаторах і електричних машинах;
- нагрів конденсаторів;
- нагрів кабелів розподільної мережі.

Розглянемо детальніше причини виникнення зазначених ефектів та можливі шляхи і засоби їх вирішення:

Форма напруги, що живить. Підвищене значення коефіцієнта амплітуди вказує на те, що є великий пік споживаного струму за половину періоду мережевої частоти. Чим вище пікове значення струму і менше його тривалість за напівперіод напруги мережі, тим більше його спотворення. Коефіцієнт амплітуди струму даного навантаження змінюється в залежності від характеру джерела електроживлення, в той час як здатність самого джерела до забезпечення навантажень з великим коефіцієнтом амплітуди визначається його повним внутрішнім опором і його здатністю забезпечувати пікові значення споживаного від нього струму.

Для багатьох пристроїв, що виконують функції джерел електроживлення, така здатність може бути досягнута тільки шляхом завищення номінальних параметрів цього обладнання. Зокрема, в сучасних генераторних установках змінного струму надперехідний реактивний опір становить приблизно 15%, що проводить досить несприятливий вплив на форму напруги, якщо не використовуються спеціальні обмотки або потужність генератора не буде обрана завідомо завищеною.

Сучасні Джерела безперебійного живлення (ІБП/UPS) здатні контролювати форму напруги на кожному напівперіоді синусоїди. В даний час в переважній більшості систем безперебійного живлення практично будь-якої потужності використовуються інвертори на біполярних транзисторах з ізольованим затвором (IGBT) при високочастотному широтно-імпульсному методі їх управління. Такі системи мають здатність живлення навантажень з високими коефіцієнтами амплітуди струму (3 і вище) за рахунок перемикачів на високій частоті і коригування форми напруги на кожному напівперіоді. Ця здатність віддавати струм з високими піковими значеннями може призводити до

того, що форма напруги на виході ІБП з подвійним перетворенням енергії помітно краще, ніж у промислової мережі на вході системи.

Слід враховувати, що форма струму через високий відсотковий зміст вищих гармонік буде сильно відрізнятися від синусоїдальної. Форми струмів для однофазного (рисунок 1.1) і трифазного (рисунок 1.2) випрямлячів характеризуються певним процентним вмістом непарних високочастотних гармонік (таблиця 1.10).

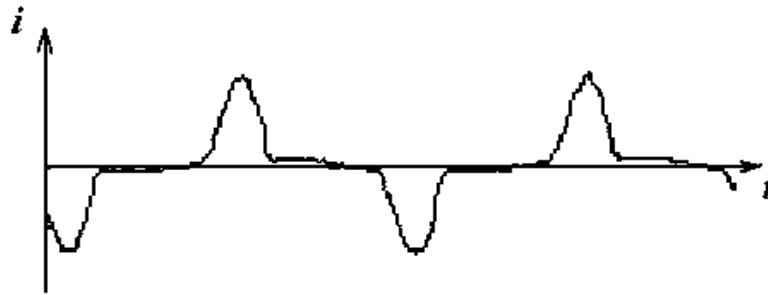


Рисунок 1.1 - Форма струму однофазного випрямляча

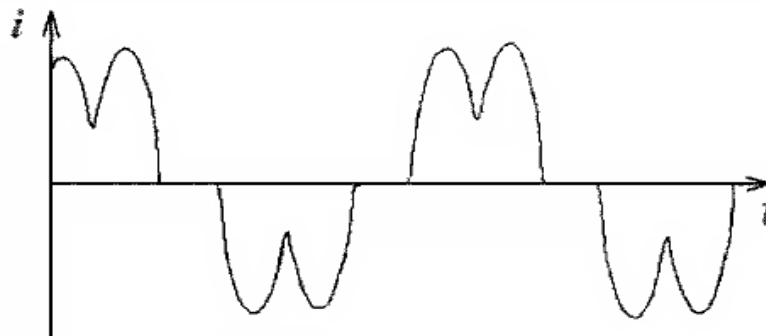


Рисунок 1.2 - Форма струму трифазного випрямляча

Падіння напруги в розподільчій мережі. Більшість ІБП здатна жити навантаження з високим значенням коефіцієнта амплітуди, причому коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги не перевищує 3-6%. Однак це рівень спотворень напруги, отримуваний при замірах на вихідних клеммах самих ІБП, але не в місцях підключення навантаження.

Повний опір розподільної мережі має значною мірою індуктивний характер. Тому при дуже високому вмісті гармонік струмів відповідне падіння напруги на кабелях і проводах стає набагато вище гранично допустимих значень,

і в типових розподільних системах з кабельними трасами довжиною понад 100 метрів може відбуватися сильне спотворення напруги на навантаженні. Прикладом таких спотворень може бути графіки струму і напруги на вході однофазного випрямляча залежно від величини відносної реактивної складової опору вхідного фідера або внутрішнього опору джерела живлення випрямляча (рисунок 1.3).

Таблиця 1.10 - Спектральний склад струму на вході ІБП (приклад - при 100% навантаженні для ІБП без вхідного фільтра і коректора коефіцієнта потужності)

Номер гармоніки, $n$	Однофазний ІБП, $I_n/I_1$ (%)	Трифазний ІБП, $I_n/I_1$ (%)
1	100	100
3	65,7	-
5	37,7	33
7	12,7	2,7
9	4,4	-
11	5,3	7,3
13	2,5	1,6
15	1,9	-
17	1,8	2,6

Ефект гармонік кратних трьом. Вищі гармоніки струму кратні трьом (тобто 3, 9, 15, 21 і т. д.), що визначають високе значення коефіцієнта амплітуди і генеруються однофазними навантаженнями, мають специфічний результуючий вплив у трифазних системах.

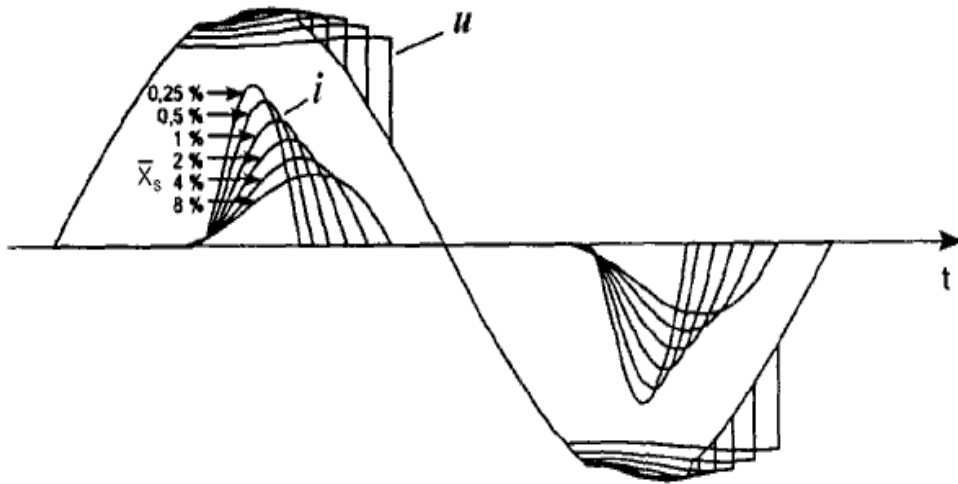


Рисунок 1.3 - Форми напруги і струму на вході безтрансформаторного однофазного випрямляча залежно від відносної реактивної складової опору вхідного фідера

У збалансованій (симетричній) трифазній системі гармонічні (синусоїдальні) струми у всіх трьох фазах зрушені на 120 градусів по відношенню один до одного, і в результаті сума струмів у нейтральному провіднику дорівнює нулю. Отже, не виникає і падіння напруги на провіднику нейтральності в кабелі.

Це твердження залишається справедливим для більшості гармонік. Однак деякі з них мають напрямок обертання вектору струму в той самий бік, що й основна гармонія (перша, «фундаментальна», тобто 50 Гц), тобто вони мають пряму послідовність. Інші ж обертаються в зворотному напрямку і, таким чином, мають зворотну послідовність. Це не відноситься до гармонік, кратних трьом:

$$n = 3 (2 k + 1), \quad (1.1)$$

де  $k = 0, 1, 2,$

У трифазних колах вони зрушені на 360 градусів один до одного, збігаються по фазі і утворюють нульову послідовність. Непарні гармоніки, короткі треті, підсумовуються в провіднику нейтралі (рисунок 1.4).

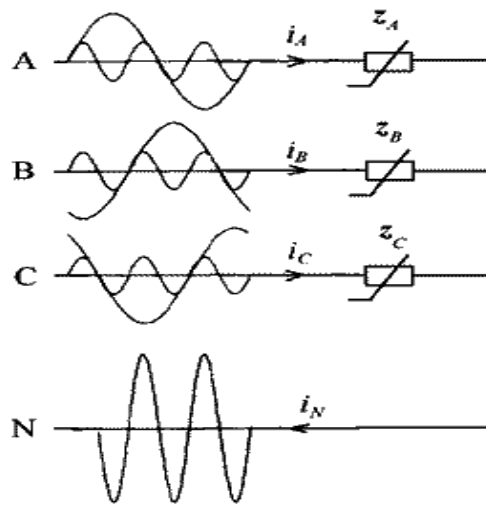


Рисунок 1.4 - Процес створення струму нейтралів при нелінійному навантаженні

В результаті, з урахуванням того, що вони становлять велику частку в чинному значенні фазних струмів, загальний струм у нейтралях може перевищувати фазні струми.

$$I_N = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2}. \quad (1.2)$$

Так, наприклад, при фазних струмах рівних 37 А, струм нейтралі становить 55 А при частоті, що дорівнює 150 Гц. [2]. Неправильно спроектовані чотирипровідні кабелі трифазних мереж можуть перегріватися аж до займання, підтверджуючи тим самим необхідність збільшення перерізу провідників нейтралів трифазних кабелів мережі електроживлення комп'ютерного обладнання. Гармоніки, кратні третьої, призводять до падінь напруги як у нейтралях, так і у фазних провідниках, викликаючи спотворення форми напруги на інших навантаженнях, підключених до цієї мережі. Крім зазначеного вище, в міжфазних напругах трифазної мережі будуть відсутні гармоніки, кратні трьом, у зв'язку з чим співвідношення між фазною і міжфазною напругою при несинусоїдальних струми стає менше, ніж 3.

Резонансні явища на частотах вищих гармонік. При наявності вищих гармонік в електричних колах із зосередженими і розподіленими параметрами, якими можуть бути представлені блоки, вузли і розподільні мережі системи електроживлення, виникає небезпека появи резонансних явищ. При виникненні резонансного або близького до нього режиму на будь-якій вищій гармоніці струму або напруги ця складова виявляється більше, ніж амплітудне значення першої гармоніки струму (напруги) на тих же ділянках кола. Це може позначитися на працездатності окремих елементів та вузлів системи. Наводки в телекомунікаційних і керуючих мережах. Коли телекомунікаційні або керуючі мережі проходять поблизу силових мереж, по яких протікають струми вищих гармонік, в перших можуть наводитися перешкоди і спотворення інформаційного сигналу. Величина спотворення залежатиме від частоти вищих гармонік, довжини паралельних ділянок мереж і відстані між ними.

Акустичний шум. У трансформаторах, дроселях та інших електромагнітних елементах вищі гармоніки струму, створюючи електродинамічні зусилля, викликають додаткові акустичні шуми.

Вібрація в електромашинних системах. Наявність вищих гармонік у напрузі живлення індукційних електродвигунів є причиною виникнення в магнітному потоці складових на частотах вищих гармонік, які в свою чергу будуть наводити гармоніки ЕДС і, як наслідок цього, в обмотках ротора з'являються вищі гармоніки струму. Ці гармоніки будуть взаємодіяти з основним магнітним потоком, створюючи додаткові механічні моменти на валу електричної машини. У результаті створюються гармонічні пульсації обертового моменту на валу двигуна. В екстремальних випадках може виникнути вібрація на резонансній частоті обертової маси ротора, що призводить до накопичення втоми металу і можливого розриву валу електродвигуна.

Нагрів і додаткові втрати в трансформаторах і електричних машинах. Додаткові втрати, що викликають перегрів трансформаторів при наявності вищих гармонік, виникають через скін-ефект в міді обмотки (збільшення активного опору обмотки з зростів частоти), а також збільшенням втрат на



гістерезису і вихорі струми в магнітопроводі трансформатора.

В електричних машинах, крім аналогічних втрат у статорі (втрати в міді і магнітопроводі), через значну різницю в швидкостях обертових магнітних полів, створюваних вищими гармоніками, і швидкістю обертання ротора виникають додаткові втрати в демпферних обмотках ротора і магнітопроводі електричної машини.

Нагрів конденсаторів. Додаткові втрати при наявності вищих гармонік в конденсаторах обумовлені збільшенням «кута втрат» в діелектриці і зростанням діючого значення струму конденсатора. Виникаючий перегрів в конденсаторі може призводити до пробою діелектрика. Крім цього, конденсатори чутливі до перевантажень, що викликаються присутністю вищих гармонік напруги.

Нагрів кабелів розподільної мережі. Додаткові втрати в кабелях силової мережі, що призводять до підвищення температури провідників, при наявності вищих гармонік струму викликаються наступними основними причинами:

- збільшенням чинного значення негармонічного струму;
- збільшенням активного опору провідника через скін-ефект;
- збільшенням втрат у діелектриці ізоляції кабелю.

Можливі засоби вирішення проблеми:

Різні методи можуть використовуватися, щоб спробувати послабити вплив проблем, що викликаються вищими гармоніками струму при навантаженнях з високим значенням коефіцієнта амплітуди.

Забезпечення симетричного режиму роботи трифазної системи. У першу чергу необхідно домогтися, наскільки це можливо, збалансованості навантажень по фазах. При цьому забезпечується мінімальний струм у провіднику нейтралі і мінімальний вміст гармонік у вихідному напруженні ІБП. Відповідні схеми контролю та управління в ІБП будуть підтримувати номінальне чинне значення вихідного напруження, в той же самий час прагнучи забезпечити його синусоїдальну форму. Не завжди можливо одночасно виконати обидві ці функції. У загальному випадку незбалансоване навантаження впливає на напругу, викликаючи його спотворення. Хоча воно і відносно мало за

величиною, але так само додається до загальних спотворень у кабелі. Зазвичай переважають ті спотворення напруги, які згенеровані в розподільчій мережі.

Одним з раціональних способів симетрування однофазних навантажень у трифазній мережі є використання ІБП з подвійним перетворенням енергії при трифазному вході і однофазному виході (3ф/1ф). У цьому випадку розвантажується нейтраль, оскільки вона не бере участі в роботі трифазного випрямляча на вході ІБП, що знаходиться в нормальному режимі перетворення напруги. Однак цей ефект зникає при переході ІБП на режим «Вурасс».

Включення до системи трансформатора з обмотками «трикутник-зірка». Цей метод використовувався на практиці, але не завжди з успіхом. Передбачалося, що в цьому випадку трансформатор не пропускає гармоніки, кратні третьої, і що відсутність провідника нейтралі на боці первинної обмотки виключає падіння напруги на нейтралі. Але таке твердження виявилось правильним лише частково. Збалансовані гармоніки, кратні третьої, наводять відповідні магнітні потоки в стрижнях сердечника трансформатора і, якщо вони рівні за величиною і збігаються за фазою, то напруги, наведені в первинній обмотці, будуть скомпенсовані. Крім цього будь-який трансформатор має індуктивність розсіювання, яка додається до існуючого повного вхідного опору розподільної мережі. Це може надавати ефект зменшення коефіцієнта амплітуди струму навантаження і сумарного значення коефіцієнта спотворень синусоїдальності струму. Однак спотворення напруги збільшується, а досягне максимальне значення напруги постійного струму для живлення інвертора ІБП знижується.

Використання фільтрів придушення гармонік. Третя гармонія є домінуючою за своїм найбільш несприятливим впливом в однофазних колах. Включення у схему фільтра, який має низький повний опір на частоті цієї гармоніки, знижує нелінійне навантаження, що генерується. Застосування таких фільтрів у разі систем безперебійного живлення найбільш успішно для компенсації ефекту незбалансованих навантажень, які мають тенденцію генерувати високі рівні гармонік. Фільтри можуть бути встановлені як всередині

ІБП, так і розташовані на вихідному кінці кабелю (тобто на боці навантаження). Тоді струми третьої гармоніки циркулюють між навантаженням і фільтром, частково знижуючи сумарний струм у провіднику нейтралі.

Однак таке підключення не дає остаточного вирішення проблеми, якщо на виході ІБП підключені розподілені навантаження. Цей фільтр захищає лише частину навантаження, до якого він безпосередньо підключений. Тому схема підключення повинна бути такою, щоб фільтр захищав все навантаження, а не тільки його частину. Це може викликати труднощі за вартістю обладнання та необхідною займаною площею при розстановці додаткових пристроїв у декількох ділянках розподільної мережі на різних поверхах будівлі.

Особливе значення мають фільтри, що встановлюються на вході ІБП. Шестинапівперіодні (шестипульсні) випрямлячі, що застосовуються в трифазних ІБП, створюють високий рівень п'ятої гармоніки струму в живлячій мережі. Для зниження гармонійного складу споживаного струму і підвищення коефіцієнта потужності системи у фазні дроти включають індуктивні опори (дроселі). Підвищенням ефективності придушення вищих гармонік струму є включення вхідного фільтра ІБП, налаштованого на п'яту гармоніку.

Застосування дванадцятинапівперіодного випрямляча в ІБП. Для зниження величини коефіцієнта спотворення синусоїдальності вхідного струму трифазних ІБП до рівня менше 10% використовують 12-напівперіодні (12-пульсного) випрямлячі.

Зниження повного опору розподільчій мережі. Це один з ефективних методів зниження нелінійних спотворень. Кабелі та збірні шини мають повний опір, який прямо пов'язаний з довжиною ліній. Збільшення перерізу кабелів (проводів) знижує активний опір розподільної мережі, але не знижує її індуктивність. Максимальний ефективний переріз жив кабелів (проводів) становить приблизно 95 кв. мм. З подальшим збільшенням перерізу кабелів їх індуктивність залишається відносно постійною. Очевидно, що більш ефективним буде використання паралельно з'єднаних кабелів (дротів). При можливості використання децентралізованої системи безперебійного живлення

слід розглянути поділ всього інсталюваного обладнання (тобто пристроїв, що входять до складу захищеного навантаження) на секції, кожна з яких буде заживлена від окремого джерела безперебійного живлення (ІБП).

Слід пам'ятати про те, що під час профілактичних, ремонтних і т. п. робіт системи безперебійного живлення повинні і можуть бути переключені в режим обходу (Bypass). При цьому можливе зростання рівня спотворень, оскільки нелінійне навантаження безпосередньо буде підключене до первинного джерела змінної напруги (генератор, трансформатор підстанції тощо). Форма напруги мережевого електроживлення часто буває спотворена через інші навантаження, що не належать до критичних, але мають характеристики, подібні до комп'ютерного та офісного обладнання. Спотворення форми напруги електроживлення, згенеровані іншим обладнанням, додадуться до спотворень від комп'ютерного навантаження, яке було переключено на живлення безпосередньо від мережі (на час профілактики або ремонту ІБП), створюючи, таким чином, більш високі рівні спотворень.

### 1.3 Методи зменшення рівня гармонік струму в системах

Гармоніки струму, створювані нелінійними навантаженнями, можуть являти собою серйозні проблеми для систем електроживлення. Гармонічні складові являють собою струми з частотами, кратними основною частотою джерела живлення. Вищі гармоніки струму, що накладаються на основну гармоніку, призводять до спотворення форми струму. У свою чергу спотворення струму впливають на форму напруги в системі електроживлення, викликаючи неприпустимі впливи на навантаження системи.

Найбільш поширеним обладнанням, що генерує вищі гармоніки струму в мережу, є:

- статичні перетворювачі (випрямлячі, системи безперебійного живлення, тиристорні регулятори, імпульсні джерела живлення тощо);
- газорозрядні освітлювальні пристрої та електронні баласты;
- електродугові печі постійного і змінного струму;
- зварювальні апарати;
- пристрої з електромагнітними елементами, що насичуються;
- електродвигуни змінного струму з регульованою швидкістю обертання;
- спеціальні медичні прилади тощо.

Зазначені пристрої є генераторами вищих гармонік струму в системі електроживлення. Залежно від місця свого підключення і процентного співвідношення з лінійними навантаженнями в цій системі вони тим чи іншим чином будуть впливати на інші навантаження. Збільшення загального діючого значення струму при наявності вищих гармонічних в системі призводить до перегріву всього обладнання розподіленої мережі електроживлення, зниження коефіцієнта потужності, зниження електричного і механічного ККД навантажень, погіршення характеристик захисних автоматів і завищення необхідної потужності автономних електроенергетичних установок.

Розглянемо основні способи придушення вищих гармонік струму шляхом застосування:

- лінійних дроселів;
- пасивних фільтрів;
- гібридних фільтрів гармонік.

### 1.3.1 Монтаж лінійних дроселів

Найпростішим способом зниження рівня нелінійних навантажень вищих гармонік струму у зовнішню мережу є послідовне включення лінійних дроселей

(рисунок 1.5). Такий дросель має мале значення індуктивного опору на основній частоті 50 Гц і значні величини опорів для вищих гармонік, що призводить до їх ослаблення. При цьому знижується коефіцієнт амплітуди (хрест-фактор)  $k_a$  і коефіцієнт спотворення  $k_u$  вхідного струму.

Коефіцієнт амплітуди:

$$K_a = \frac{I_{um}}{I}, \quad (1.3)$$

де  $I_{um}$  - амплітуда імпульсу струму,

$I$  - чинне значення несинусоїдального струму.

$$I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n \geq 2} I_n^2}, \quad (1.4)$$

де  $I_1$  - чинне значення основної (першої) гармоніки струму,

$I_n$  - чинне значення n-ої гармоніки струму.

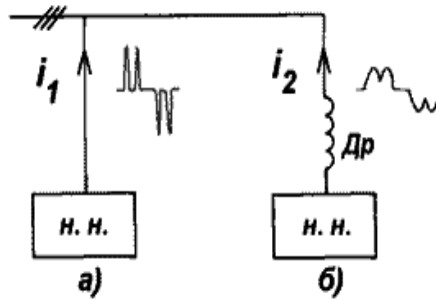
Коефіцієнт спотворення струму:

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} I_n^2}}{I_1} \quad (1.5)$$

У таблиці 1.11 наведено значення коефіцієнта спотворення струму на вході трифазного мостового випрямляча при різних значеннях відносного індуктивного опору дроселя на основній частоті ( $X_{dp}$ ).

Таблиця 1.11 - Значення коефіцієнта спотворення струму на вході трифазного мостового випрямляча

$X_{dp}, \%$	1	2	3	4	5	8
$k_u, \%$	75	52	45	40	35	28



а) без дроселя; б) під час послідовного включення дроселя

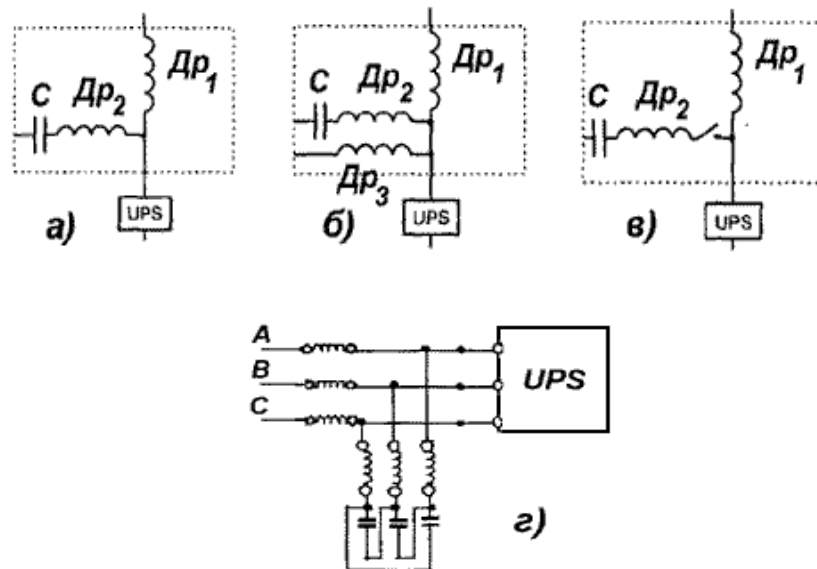
Рисунок 1.5 - Криві струмів нелінійних навантажень

### 1.3.2 Застосування пасивних фільтрів

Застосування послідовно включених лінійних дроселів у ряді випадків не дозволяє зменшити гармонічні спотворення струму до бажаних меж. У цьому випадку доцільно застосування пасивних LC-фільтрів, налаштованих на певний порядок гармонік. Для поліпшення гармонічного складу споживаного струму такі фільтри знайшли широке застосування в системах з ІБП. Підключення фільтра на вході шестинапівперіодного випрямляча при 100% навантаженні ІБП забезпечує зниження коефіцієнта спотворення струму до величини 8-10%. Значення цього коефіцієнта в системі без фільтра може досягати 30% і більше. На рисунку 1.6 г наведена реалізація трифазного LC-фільтра, що застосовується як опціональний пристрій в 3-х фазних UPS.

Розрізняють такі різновиди пасивних фільтрів:

- некомпенсований LC-фільтр;
- скомпенсований LC-фільтр;
- некомпенсований LC-фільтр з комутатором.



- а) некомпенсований LC-фільтр; б) компенсований LC-фільтр;  
 в) некомпенсований LC-фільтр з комутатором; г) трифазний варіант LC-фільтр

Рисунок 1.6 - Пасивні фільтри

Некомпенсований фільтр містить подовжню індуктивність  $Dr_1$  і поперечний коло, що складається з послідовно включених індуктивності  $Dr_2$  і ємності  $C$ , налаштованих на певну гармоніку (рисунок 2а). Якщо фільтр налаштований на 5-ту гармоніку, то опір поперечного кола близько до нуля і струм, що споживається від джерела, не буде містити цю гармоніку. Брак такого фільтра є наступним. При використанні в якості первинного джерела живлення дизель-генераторну установку (ДДУ) з обмеженою установчою потужністю, останній може забезпечити відносно низьке значення ємнісної складової струму навантаження (10-30%).

При включенні ІБП на ДДУ, коли здійснюється «м'який» старт випрямляча, активна потужність, яка споживається навантаженням, дорівнює нулю і генератор ДДУ виявляється навантаженим тільки на ємнісний опір фільтра. Значна ємнісна складова споживаного від генератора струму може призвести до порушення нормальної роботи генераторної системи і відключення ДДУ. Отже, можливість використання некомпенсованих фільтрів LC повинна бути проаналізована з точки зору узгодження характеристик генератора і параметрів фільтра.



Скомпенсований фільтр містить додаткову поперечну індуктивність  $Dp3$ , що сприяє тому, що фільтр щодо генератора має індуктивний характер (рисунок 1.6б). Це знижує ємнісну складову споживаного струму і полегшує роботу генератора в пусковому і встановленому режимах. Однак наявність  $Dp3$  призводить до зниження коефіцієнта потужності системи в цілому.

Нескомпенсований фільтр з комутатором зручний при використанні ДДУ обмеженої потужності, співмірної з потужністю ІБП. Поперечний коло фільтра з'єднується автоматично тільки після виходу ІБП на номінальний режим (рис. 1.6в).

Таким чином, не потрібно застосування ДДУ завищеної потужності і не знижується коефіцієнт потужності системи.

### 1.3.3 Використання спеціальних розділових трансформаторів

Розділовий трансформатор з обмотками «трикутник-зірка» дозволяє ефективно боротися з гармоніками, кратними третьою, при збалансованому навантаженні. Для ослаблення впливу несиметрії навантаження і зменшення струму нейтралі застосовують «перехресну» (зигзагоподібну) систему обмоток, де вторинна обмотка кожної фази розбита на дві частини і розміщена на різних стрижнях магнітопроводу трансформатора.

При несинусоїдальних струмах зростають втрати в трансформаторах головним чином за рахунок втрат на вихорові струми, що вимагає збільшення їх установчої потужності або застосування спеціальних К-фактор трансформаторів. К-фактор трансформатори відрізняються від стандартних тим, що мають додаткову теплоємність, що дозволяє витримати нагрівання, викликане вищими гармоніками струму. Крім того, спеціальна конструкція такого трансформатора дозволяють звести до мінімуму втрати на вихорі струми і втрати через паразитну ємність.

К-фактор являє собою коефіцієнт, що характеризує внесок вищих гармонік у процес нагріву трансформатора. Якщо К-фактор дорівнює одиниці, то це означає, що навантаження лінійне і в колу протікає синусоїдальний струм. Значення К-фактору вище одиниці вказують на додаткові теплові втрати при нелінійних навантаженнях, які трансформатор здатний безпечно розсіяти. Ваговий коефіцієнт гармоніки несинусоїдального струму:

$$K_n = \frac{I_n}{I} \quad (1.6)$$

Сума квадратів вагових коефіцієнтів гармонік при врахуванні всіх вищих гармонік дорівнює одиниці. Обмеження числа вищих гармонік при розрахунку К-фактору призводить до певного зменшення цього параметра. Нижче наводиться таблиця розрахунку К-фактору для нелінійного навантаження типу однофазного мостового випрямляча з урахуванням вищих гармонік струму до  $n = 11$ .

З таблиці 1.11 випливає, що при коефіцієнті спотворення струму:

$$K_u = \sqrt{(1,595 - 1)} \cdot 100\% = 77,1\% \quad (1.7)$$

Таблиця 1.12 – Значення параметрів при коефіцієнті спотворення струму

$n$	$I_n, \%$	$I_{n2}$	$K_n$	$K_{n2}$	$K_{n2} \times n_2$
1	100	1	0,792	0,626	0,626
3	65,7	0,432	0,52	0,27	2,434
5	37,7	0,142	0,298	0,089	2,226
7	12,7	0,016	0,101	0,01	0,495
9	4,4	0,002	0,035	0,001	0,098
11	5,3	0,003	0,042	0,002	0,213
Сума		1,595		0,998	6,092

Маємо К-фактор = 6,092. У світовій практиці зустрічаються характерні значення К-фактору: 4, 9, 13, 20. У приміщеннях, що мають нелінійні

навантаження, і комп'ютерних залах К-фактор зазвичай становить 4-9. У зонах з телекомунікаційним обладнанням, високою концентрацією однофазних комп'ютерних терміналів К-фактор може досягати значень 13-17.

#### 1.3.4. Застосування магнітних синтезаторів

Магнітний синтезатор забезпечує захист навантаження від різних спотворень електроживлення, зокрема, від провалів і викидів напруги, імпульсних і високочастотних перешкод, наявності вищих гармонік, що викликають спотворення синусоїдальної форми вхідної напруги.

Розглянемо принцип роботи магнітного синтезатора. У будь-який момент часу п'ять з шести сердечників блоку трансформаторів знаходяться в режимі насичення і являють собою короткозамкнуті контури. Коли осердя шостого трансформатора насичується, напруга на цьому трансформаторі падає практично до нуля, при цьому змінюється полярність напруги на черговому трансформаторі на зворотну, викликаючи перехід його сердечника в ненасичений стан і формування першого імпульсу в синтезованій напрузі наступного напівперіоду.

Таке послідовне переключення імпульсних трансформаторів виробляє серію певних імпульсів напруги, що використовуються як блоки для формування синтезованої напруги. Варіант реалізації принципової схеми магнітного синтезатора наведено на рисунку 1.7.

Ця напруга надходить на навантаження через фільтри, налаштовані на другу і третю гармоніки, що забезпечує коефіцієнт спотворення вихідної напруги не вище 4% незалежно від ступеня спотворення напруги на вході магнітного синтезатора. Трифазна вихідна напруга подається до навантаження через Zig-Zag трансформатор, що формує нейтральне вихідне коло і забезпечує зниження впливу асиметрії навантаження на роботу синтезатора. Навіть повністю неузгоджене але фазам навантаження (100% асиметрія) не призводить до змін

вихідної напруги більш ніж + 5%, (2%. При цьому вихідне коло, включаючи нейтральний, повністю ізольований від вхідного кола електроживлення.

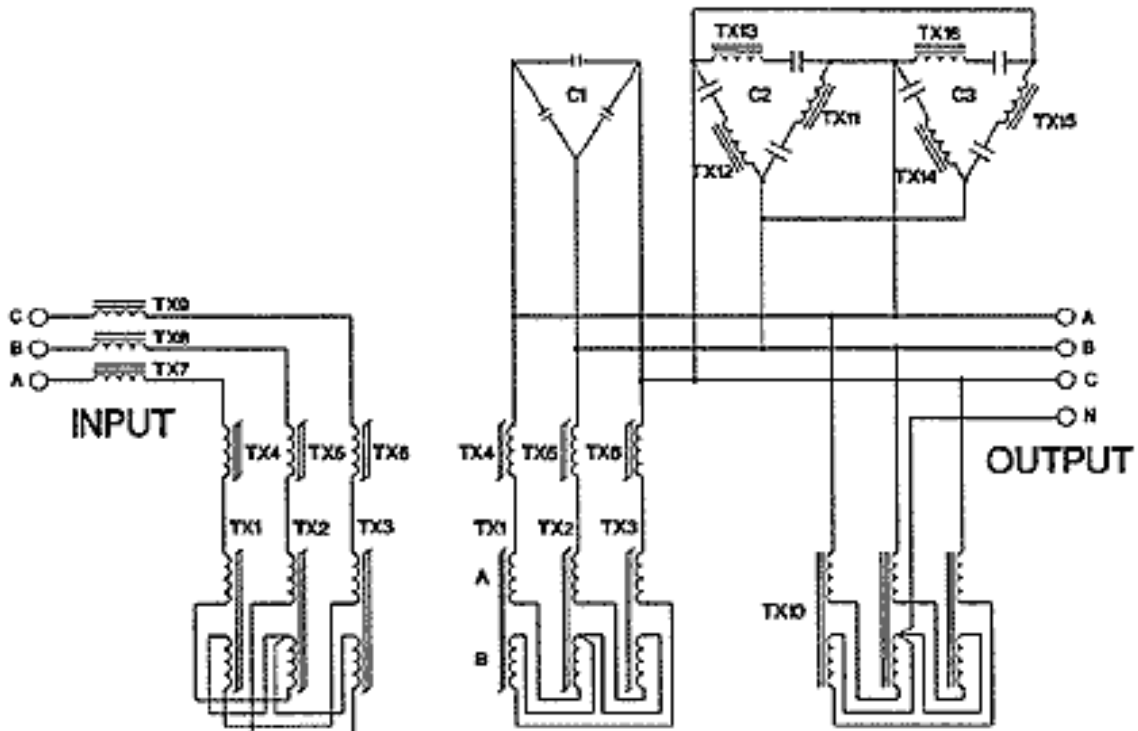


Рисунок 1.3 - Варіант реалізації схеми магнітного синтезатора

На рисунку 1.8 представлені регулювальні характеристики при різних величинах завантаження магнітного синтезатора. Як видно з сімейства регулювальних характеристик, відхилення вихідної напруги від номінального значення не перевищує 5% при зміні навантаження від 0 до 100% і вхідної напруги в межах 40%.

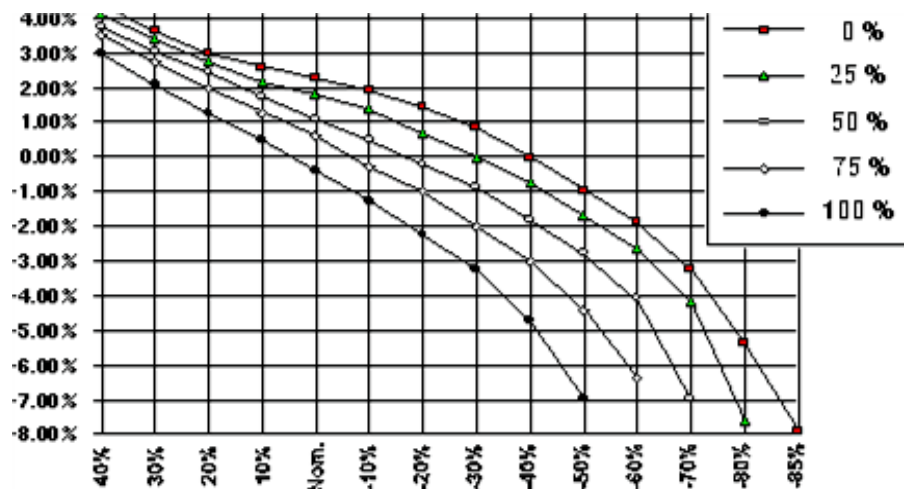


Рисунок 1.8 - Регулювальні характеристики магнітного синтезатора

При цьому магнітний синтезатор поглинає вищі гармоніки струму, створювані нелінійними навантаженнями, підключеними на його виході. Коефіцієнт спотворення струму на вході магнітного синтезатора не перевищує 8%, незалежно від спотворення струму навантаження.

### 1.3.5 Застосування фільтрів активних гармонік

Активний фільтр гармонік АФ підключається паралельно нелінійному навантаженню (рисунок 1.9).

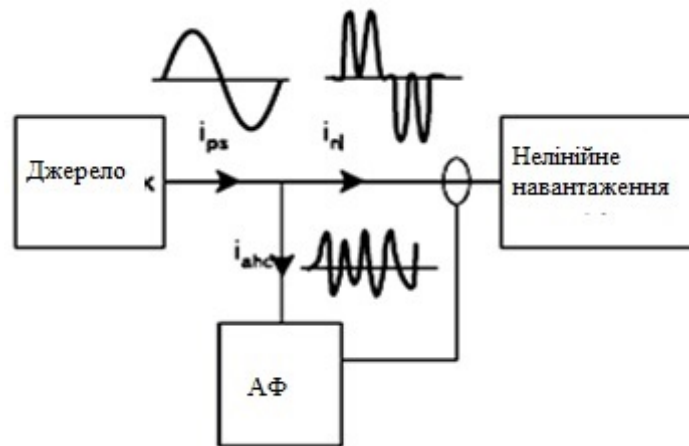
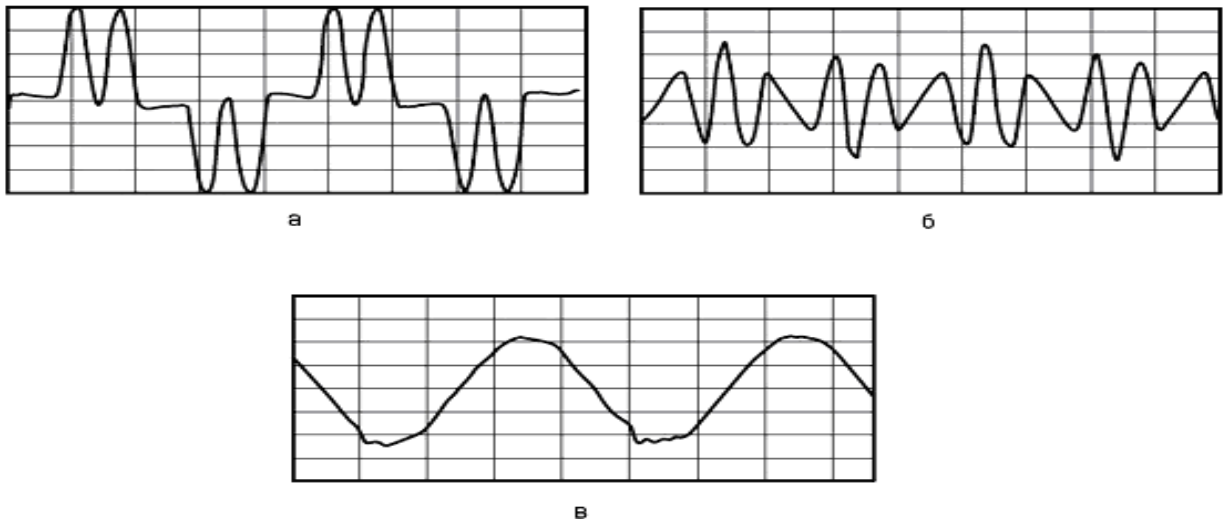


Рисунок 1.9 - Схема активного фільтра

Принцип дії АФ заснований на аналізі гармонік струму нелінійного навантаження і генеруванні в розподільчу мережу таких же гармонік струму, але з протилежною фазою. Як результат цього, вищі гармонічні складові струму нейтралізуються в точці підключення АФ. Це означає, що вони не поширюються від нелінійного навантаження в мережу і не спотворюють напруги первинного джерела енергії. Струм нелінійного навантаження містить основну і вищі гармоніки:

Підвищене значення струму, пояснюється тим, що АФ практично забезпечує компенсацію гармонік не вище 25-ої і може бути налаштований на

компенсацію гармонік нижче зазначеного порядку, тоді як у складі струму навантаження можуть бути присутні гармоніки більш високого порядку.



а) струм навантаження; б) струм АФ; в) струм джерела

Рисунок 1.10 - Криві струмів у системі з АФ

Структурна схема АФ наведена на рисунку 1.11. До складу АФ входять такі вузли: IGBT-перетворювач, пристрій управління і контролю, блок захисту і «м'якого» пуску і струмові датчики. Перетворювач АФ містить трифазний перетворювач на IGBT-транзисторах, які комутуються з тактовою частотою 16 кГц, два конденсатори і лінійні дроселі в кожній фазі (Др1). Пристрій управління і контролю складається з блоку аналізу гармонік струму, блоку установки номерів компенсованих гармонік, блоку управління перетворювачем і моніторингу.

На аналізатор гармонік надходять сигнали з швидкодіючих датчиків струму навантаження (ДТ1) і струму АФ (ДТ2). Блок захисту і «м'якого» пуску містить швидкодіючі запобіжники і за допомогою контактора і баластного опору забезпечує плавний заряд конденсаторів у період включення АФ. Застосування АФ забезпечує значне зниження коефіцієнта амплітуди струму в розподільчій мережі порівняно з існуючими коефіцієнтами струму нелінійних навантажень. Це, в свою чергу, сприяє збільшенню коефіцієнта потужності системи і зменшенню втрат на ділянках розподільної мережі.

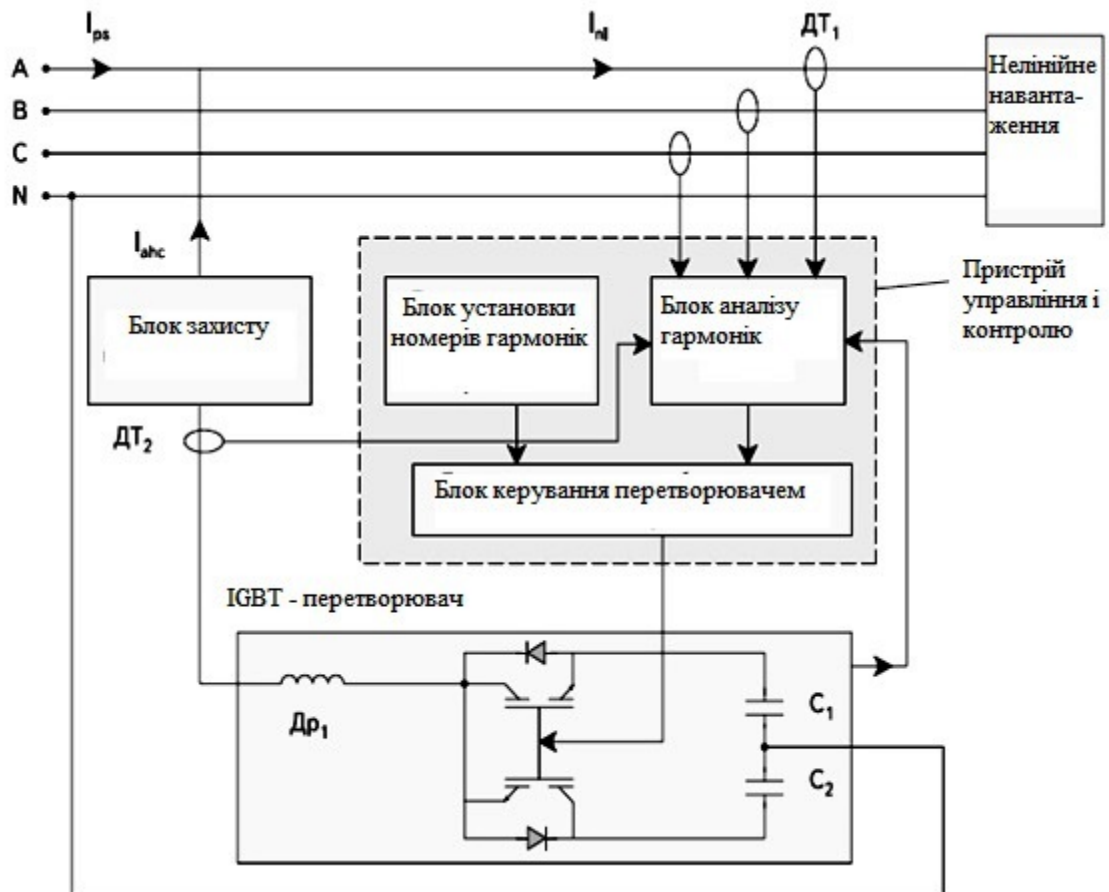


Рисунок 1.11 - Структурна схема АФ (умовно зображено силовий коло однієї фази)

### 1.3.6 Гібридний фільтр

Як зазначалося вище, АФ позбавлені низки недоліків, властивих ФКП. Однак встановлена потужність АФ виявляється значною, порівнянною з потужністю нелінійних навантажень, рівень ВГ яких мінімізується за допомогою АФ. Це пояснюється - у разі поздовжнього АФ - протіканням повного струму споживача через пристрій АФ (або наявністю повної напруги мережі на затисках пристрою паралельного АФ). Так, наприклад, якщо навантаженням лінії є 6-пульсний мостовий перетворювач, потужність АФ досягає 30% активної потужності ВП. Тому при великих потужностях ВП використання АФ виявляється

економічно не доцільним. Альтернативним рішенням є використання схем, в яких АФ включається послідовно або паралельно резонансним фільтром.

На рисунку 6.5 представлена схема паралельної гібридної системи компенсації ВГ, на рисунку 6.6 - послідовної (поздовжньої).

Система (рисунок 6.5) називається паралельною, оскільки сукупність активних і резонансних фільтрів включена паралельно до джерела. Трифазна мережа з індуктивностями  $L_s$  навантажена 6-пульсним мостовим ВП, що живить споживача з параметрами  $R_0, L_0$ . Встановлено ФКП 5-й і 7-й гармонік і один демпфійований широкосмуговий фільтр. АФ включено послідовно з ФКП через трансформатори струму. Малий фільтр  $C_k, L_k$  служить для придушення ВГ досить високого порядку, що генеруються АФ; останній виконує роль керованого джерела напруги (управління АФ описано вище).

В обох системах встановлена потужність АФ виявляється значно меншою, ніж при використанні тільки АФ, тобто АФ грає роль допоміжного пристрою, що забезпечує як би додаткову «підчистку» кривих напруги і струму джерела, спотворюваних нелінійним споживачем.

Особливості роботи ГФ можна проілюструвати за допомогою їх схем заміщення (рисунок 1.12 і 1.13).

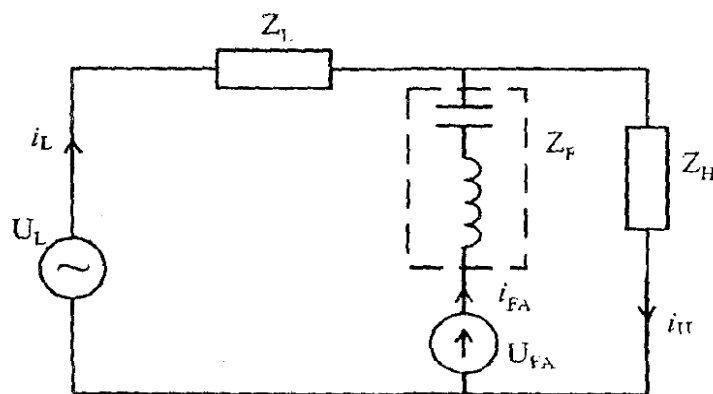


Рисунок 1.12 - Схема заміщення ГФ

Схема заміщення для  $i$ -ої гармоніки (рисунок 1.13).



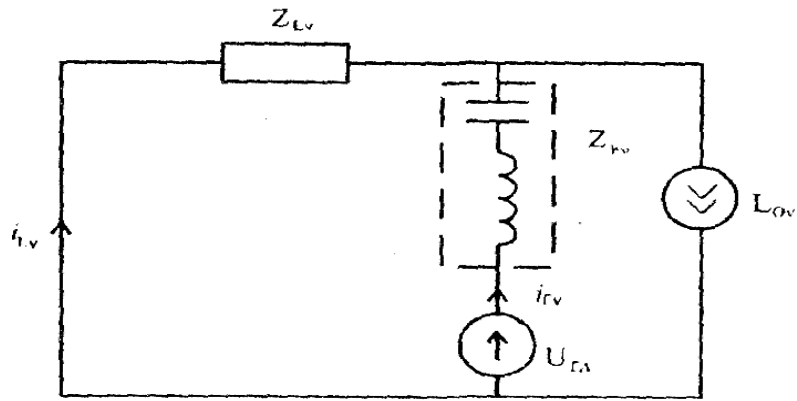


Рисунок 1.13 - Схема заміщення ГФ для чотирьох гармоніки

За допомогою цієї схеми можна досить просто показати ефективність дії гібридної системи завдяки введенню додаткового джерела.

З рівняння, складеного за другим законом Кірхгофа, випливає:

$$i_{Lv}(z_{Lv} + K) = i_{Fv}z_{Fv}, \quad (1.8)$$

Зазначимо, що, у разі послідовної гібридної системи результат виявляється ідентичним. Схема заміщення для обох варіантів гібридних систем представлена на рисунок 1.14.

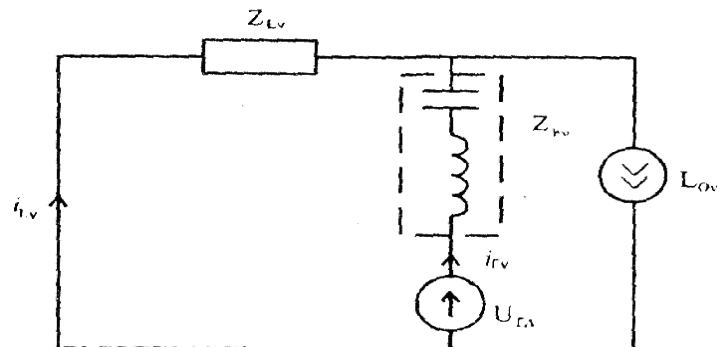


Рисунок 1.14 - Схема заміщення для обох варіантів гібридних систем.

Таким чином, додаткове кероване джерело напруги обумовлює збільшення опору живильній мережі, тобто зростання електричної віддаленості її від нелінійного навантаження. При «сильному» регулюванні ВГ, що генеруються нелінійними навантаженнями, замикаються, в основному через ФКП. При цьому робота ФКП залежить від величини  $K$ .

## 2.1 АНАЛІЗ СХЕМО-КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК

### 2.1 Удосконалення форми кривої струму

Одним з перспективних способів зниження несинусоїдальності в електричних мережах є поліпшення форми кривої мережевого струму ВП. Цього можна досягти компенсацією ВГ магнітного потоку трансформатора перетворювача, накладанням струмів 3, 9, 15-й і ВГ більш високих порядків на струми обмоток трансформатора або забезпеченням спеціальних законів управління СхП.

У першому випадку в третинній обмотці трансформатора ВП створюється магніторушійна сила (МРС) ВГ (рисунок 2.1).

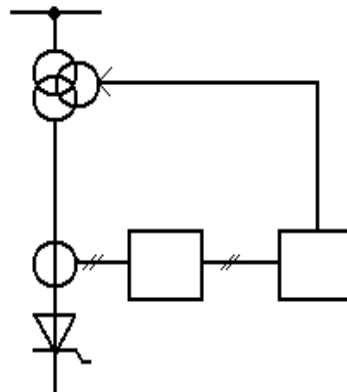


Рисунок 2.1 - Схема компенсації ВГ магнітного потоку трансформатора ВП

Магнітний потік, обумовлений цією МДЗ, має напрямок, протилежний напрямку основного потоку в трансформаторі; в результаті ВГ магнітного потоку певною мірою компенсуються. Фільтр 1 є загороджувальним для першої гармоніки. Підсилювач 2 посилює струми ВГ. При реалізації схеми, наведеної на рисунку 2.1, можуть бути придушені канонічні і неканонічні ВГ потоку і мережевих струмів ВП і навіть інтергармоніки. Застосування описаної схеми в деяких випадках (наприклад, для ліній електропередачі) може бути пов'язане з меншими витратами, ніж у разі використання звичайних перетворювачів і ФКП.

Недоліками схеми є її складність, необхідність застосування триобмоткових трансформаторів, а швидкодія щонайменше на порядок менше, ніж звичайних схем автоматичного управління частотою обертання електроприводу. Схема може виявитися доцільною для потужних СхП, що працюють у «спокійному» режимі.

Введення струму 3-ї або кратної трьом непарної гармоніки можливе в нульових і мостових схемах перетворювачів (рисунок 2.2, а), а також у схемах з зрівняльним реактором (рисунок 2.2, б).

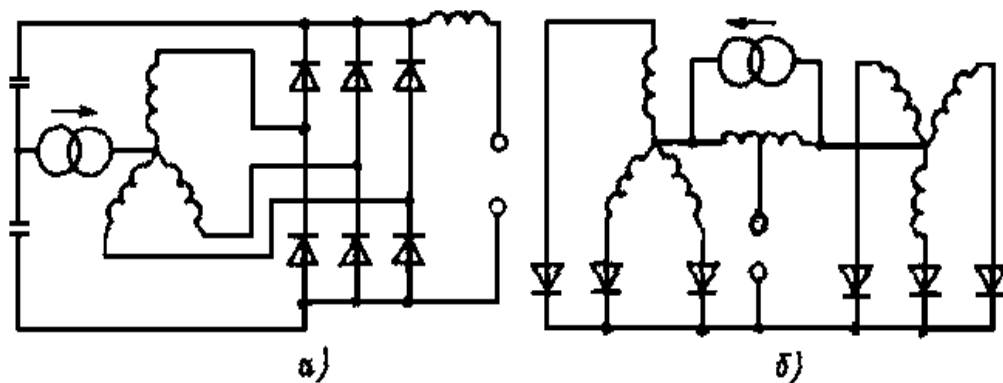


Рисунок 2.2 - Схеми перетворювача з накладанням струму зворотної частоти

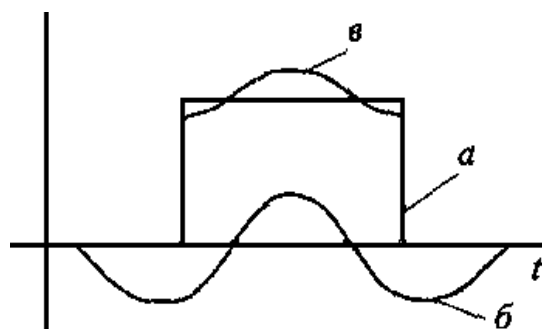


Рисунок 2.3 - Криві випрямленого струму (а); струму 3-ї гармоніки (б) і мережевого струму (в)

На рисунку 2.3 показані криві струмів мостового ВП при накладанні струму 3-ї гармоніки; крива мережевого струму, яка за відсутності джерела 3-ї гармоніки повторює криву випрямленого струму, виявляється досить близькою

до синусоїди. Змінюючи значення та фазу накладеного струму, можна знизити до нуля ту чи іншу гармоніку мережевого струму (наприклад 5-у, 7-у) при одночасному істотному зменшенні значень інших ВГ канонічних порядків.

Джерелом накладеного струму для СхП невеликої потужності служить звичай генератор низькочастотних коливань з підсилювачем; для потужних ВП використовуються синхронні генератори. При роботі ВП тільки в режимі випрямляча джерело струму може бути замінений резистором. Однак для реверсивних ВП використання резисторів не є можливим, оскільки при інвертуванні джерело струму має працювати в генераторному режимі.

Застосування спеціального джерела струму або резистора пов'язане з додатковими втратами, що досягають 10% енергії, споживаної ВП. Ця обставина, а також додаткове ускладнення схеми послужило причиною того, що ВП з накладенням струму широкого поширення не отримали. Однак роботи з удосконалення таких схем ведуться.

В останні роки розроблені схеми, що дозволяють здійснювати введення додаткових струмів ВГ за допомогою спеціальних схем безпосередньо від СхП. З цією метою починають використовуватися також мікропроцесорні схеми управління СхП.

Управління ВГ мережевого струму. У складних перетворювальних пристроях, що складаються з груп послідовно або паралельно з'єднаних одно- або двохмостових ВП, іноді використовуються спеціальні закони управління, при яких забезпечується зниження або придушення однієї з двох гармонік мережевого струму. На деяких підприємствах такі пристрої використовуються в поєднанні з вимірювачами АЧХ мережі для придушення ВГ, на частотах яких можливі резонансні або близькі до них явища.

Як відомо, навіть при однаковому навантаженні двох ВП наявність різниці між кутами управління призводить до зменшення окремих гармонік. Це дає можливість регулювати рівень ВГ у спектрі мережевого струму шляхом зміни різниці між кутами управління ВП.

У СЕС підприємств використовуються також системи екстремального управління та регулятори на основі коригованих законів управління тиристорними електроприводами.

## 2.2 Регулятори, що використовують компенсаційний принцип

В основу роботи регуляторів цього типу покладено принцип компенсації ВГ. Стосовно електроприводів постійного струму, що живляться від тиристорних перетворювачів, реалізація режиму компенсації вимагає великих обурень по каналу управління тиристорним приводом і великих змін режимів. Тому регулятори ВГ струму тиристорних приводів розглядаються в сукупності з режимами і параметрами електроприводів.

При реалізації регулятора можуть бути поставлені різні завдання. Наприклад, зниження значення напруги або струму, зменшення площі комутаційного провалу напруги, зниження амплітуди однієї або декількох ВГ.

Ефективність роботи регуляторів істотно підвищується, якщо є можливість прогнозування резонансу на частотах окремих гармонік і зниження рівня цих гармонік. На рисунку 2.4 наведена функціональна схема регулятора ВГ струму. У розглянутому регуляторі, призначеному для керування двохмостовим перетворювачем, використано адаптивний резонансний критерій управління.

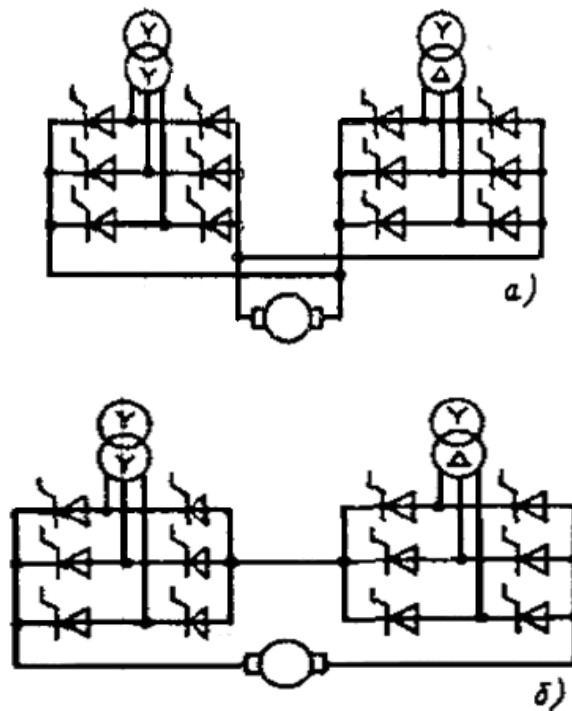
Основні блоки регулятора: 6 - комутатор; 10 - блок управління; 14-датчик резонансної гармоніки; 13-ключі; 11 - блок фіксованих затримок; 18 - блок синхронізація. Блок 12 формує матрицю-рядок, чисельне значення елементів якої дорівнює напівперіоду гармоніки. Блоки 15-17 формують матрицю-стовпчик коду пріоритетною резонансною гармонікою.

Вихідний сигнал із системи автоматичного керування електроприводом 1 надходить на систему імпульсно-фазового управління 2, що формує послідовність керуючих імпульсів  $u(t)$ , яка надходить на розподільник 3,



значення. Її рівень був знижений шляхом зміни програми комп'ютера, керуючого технологічним процесом. Збільшення пульсності ВП. Для досягнення цього можливі два шляхи: використання трансформаторів ВП зі спеціальним виконанням обмоток, що дозволяють реалізувати потрібний багатопульсний режим перетворення; забезпечення еквівалентного багатопульсного режиму групи ВП, кожен з яких має схему з меншою пульсністю.

На рисунку 2.5 показано схеми з'єднання обмоток форматорів ВП для отримання 12-пульсного режиму. Вторинні обмотки трансформатора (їх може бути дві і чотири) з'єднуються в зірку і трикутник; до цих обмоток підключаються трифазні випрямлювальні мости, які з'єднуються послідовно або паралельно. Такі трансформатори застосовуються, зокрема, для ВП потужних тиристорних електроприводів прокатних станів.



а) паралельному; б) послідовне

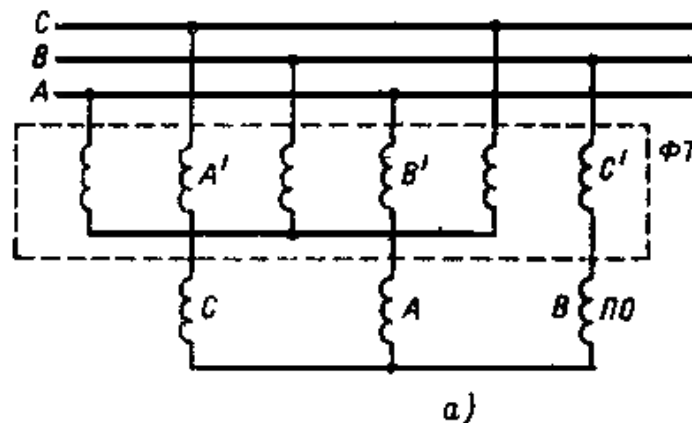
Рисунок 2.5 - Схема з'єднання обмоток трансформатора мостового ВП для отримання 12-пульсного режиму при з'єднанні мостів

Еквівалентні або умовні багатопульсні схеми забезпечують взаємну компенсацію на шинах джерела живлення не характерних ВГ струму. Так, за умовної 12-пульсної схеми компенсуються 5; 7; 17; 19-та та інші ВГ.

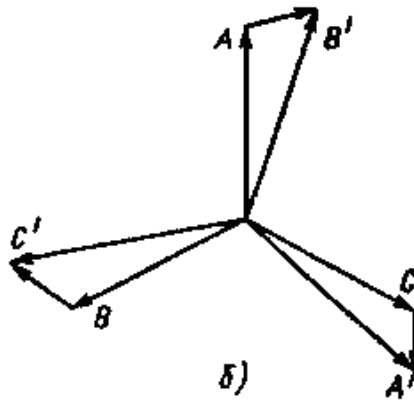
У більшості випадків умовний 12-пульсний режим здійснюється на базі двох однакових 6-пульсних ВП при з'єднанні мережевої обмотки одного трансформатора в зірку, іншого в трикутник. Компенсацію 5-ї, 7-ї та інших ВГ можна пояснити наступним чином.

Вектори 5-ї гармоніки струму утворюють симетричну систему зворотної послідовності; отже, щодо векторів напруги основної частоти вони обертаються з частотою, рівною  $6^\circ$ , де - кругова частота мережі. Вектори 7-ї гармоніки утворюють систему прямої послідовності і обертаються в той же бік, що і вектори напруги живлячої системи; частота обертання векторів струму гармонік відносно тієї ж системи векторів напруги також складе 6 осередків. При з'єднанні мережевих обмоток двох ВП в зірку і трикутник зрушення по фазі між векторами напружень становить  $30^\circ$ , отже, вектори ВГ струмів однойменних фаз, зрушені на кут  $30 \times 6 = 180^\circ$ , опиняться в протифазі і будуть взаємно компенсуватися на шинах підстанції. Рівною мірою це відноситься до 17-ї і 19-ї гармонік.

Зсув за фазою між векторами напружень, що підводяться до трансформатора, може бути забезпечений при використанні спеціального фазоповоротного трансформатора, який підключається перед трансформатором ВП (рисунок 6.15). Як видно з векторної діаграми, фаза напруги на мережевій обмотці трансформатора ВП визначається співвідношенням значень напруги мережі і фазоповоротного трансформатора. За допомогою фазоповоротних трансформаторів можна здійснити еквівалентні багатопульсні режими з великою пульсністю (18, 24 тощо). так, при роботі двох 12-пульсних перетворювачів може бути отриманий умовний 24-пульсний режим ВП.







а) схема; б) векторна діаграма

Рисунок 2.6 - ВП з фазоповоротним трансформатором для утворення еквівалентного багатопульсного режиму

Таблиця 2.1 - Значення кута відступу між тими, що одночасно працюють ВПП

Еквівалентна пульсність	Кількість ВП з еквівалентною 12-пульсною схемою	$\delta$
24	2	$\pm 15^\circ$
36	3	$\pm 10^\circ; 0; -10^\circ$
48	4	$\pm 15^\circ; +7,5^\circ; 0; -7,5^\circ$

Ефект зниження рівнів ВГ за допомогою умовних багатопульсних схем проявляється повною мірою лише при однаковому завантаженні ВП групи і симетрії СІФУ. Ці умови виконуються повною мірою при паралельній роботі ВП на боці випрямленої напруги.

### 2.3 Трансформатори фазоповоротні.

За спеціальними технічними вимогами електропромисловістю СНД випускаються фазоповоротні трансформатори на напругу 10 кВ, прохідну

потужність 32 МВ·А 7,5°. Кут 15° виходить при каскадному з'єднанні двох фазоповоротних трансформаторів з 7,5°. Еквівалентний багатопульсний режим ВП можна також забезпечити, якщо однакові ВП, підключені до одного вузла мережі, працюють з однаковим навантаженням; при відмінності навантажень повна компенсація ВГ, не характерних для багатопульсного режиму, не відбувається.

Якщо відхилення струму навантаження двох ВП, що працюють в еквівалентному багатопульсному режимі,  $\Delta I_{d1*}$  складають  $\Delta I_{d2*}$  і, то еквівалентне значення некомпенсованої гармоніки струму в  $\Delta I_{v*}$  частках струму 1-ї гармоніки одного ВП при даному навантаженні знаходиться за виразом

$$\Delta I_{v*} = \frac{(\Delta I_{d1*} - \Delta I_{d2*})X_*}{v\gamma \sin(\alpha + \frac{\gamma}{2})} \quad (2.1)$$

Формула (2.1) застосовна при  $\Delta I_{d1*} - \Delta I_{d2*} \leq 0,04$ . Похибка цієї формули не перевершує 10% при 5; 7 і 15%, при 11; 13 - наявність похибки пояснюється в першу чергу неврахуванням фазових співвідношень між ВГ.

При асиметрії керуючих імпульсів або при неоднаковому налаштуванні СІФУ двох ВП, що працюють в еквівалентному багатопульсному режимі, значення некомпенсованих ВГ може бути ще більшим.

Широке застосування 12-пульсних еквівалентних схем випрямлення в потужних установках (4000 кВт і більше) і промислове використання схем 24- і 48-пульсного випрямлення в установках більшої потужності (відповідно 20... 100 МВт) обумовлює необхідність підвищення ефективності цих схем до теоретично можливого рівня, визначеного суворою компенсацією неканонічних ВГ мережевого струму. Тому знаходять застосування СІФУ підвищеної точності, що забезпечують за рахунок малої асиметрії істотне зниження рівнів неканонічних ВГ. Такі прецизійні СІФУ мають асиметрію близько 0,3 ел.град, що приблизно

на порядок менше асиметрії аналогових СІФУ, побудованих на традиційних принципах вертикального управління.

Зниження рівнів ВГ засобами живлячої мережі досягається в основному раціональною побудовою схеми електропостачання, при якому забезпечується допустимий рівень ВГ напруги на шинах споживача. Найбільш поширеними засобами є: застосування трансформаторів ВП з підвищеною напругою 110-220-330 кВ; живлення нелінійних навантажень від окремих трансформаторів або підключення їх до окремих обмоток триобмоткових трансформаторів; підключення паралельно нелінійним навантаженням синхронних і асинхронних двигунів. Застосування в перетворювальних агрегатах трансформаторів з первинною напругою 110-220 кВ виключає вплив різкозмінних навантажень на споживачів розподільних мереж 0,4-10 кВ. Перешкодою до використання таких трансформаторів може бути поява неприпустимих напружень ВГ в основних мережах ЕС. Розгляньмо це питання, детальніше.

На рисунку 2.7 показана схема районної підстанції 220 кВ, до шин якої крім трансформатора ВП приєднані також лінії зв'язку з районними електростанціями і тупикова лінія з навантаженням. Вхідний опір цієї  $S_n$  лінії для почесної гармоніки

$$X_{\text{exv}} = Z_c (\nu \alpha l + \text{arctg} \frac{X_{\text{nv}}}{Z_c}) \quad (2.2)$$

де  $Z_c$  - хвильовий опір лінії (400 Ом);

$\nu$  - коефіцієнта фази (0,06 град/км);  $l$  - довжина лінії, км.

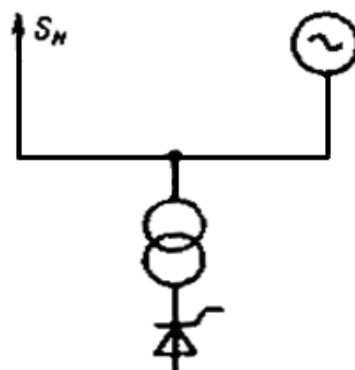


Рисунок 2.7 - Схема районної підстанції

Приймаючи опір навантаження тупикової лінії пропорційним опору узагальненого навантаження:

$$X_{nv} = 0,45 \frac{U^2}{S_{ном}} \nu \quad (2.3)$$

$$S_{ном} \approx \left( \frac{0,1}{0,2} \right) S_k \quad (2.4)$$

отримуємо з похибкою не більше 2%:

$$X_{exv} = -Z_c \operatorname{ctg} \nu \alpha l \quad (2.5)$$

Опір генераторних кіл:

$$X_{zv} = k_{\nu z} \nu X_k \quad (2.6)$$

де  $X_k$  - опір короткого замикання на шинах підстанції;  $k_{\nu z}$  - коефіцієнт, що враховує нелінійність  $X_{zv}$  характеристики ( $\nu$ );

Умова виникнення резонансу струмів:

$$\operatorname{tg} \frac{\nu \alpha l}{Z_c} = \frac{1}{k_{\nu z} \nu X_k} \quad (2.7)$$

звідки:

$$l = \frac{1}{\nu \alpha} \operatorname{arctg} \frac{Z_c}{k_{\nu z} \nu X_k} \quad (2.8)$$

У потужних ЕС  $S_k (> 3000 \text{ МВ} \cdot \text{А})$  резонанс струмів на частотах 11-13-й гармонік можливий при  $l = 60 - 80 \text{ км}$ .

Напруга лід-ї гармоніки на паралельному резонансному контурі:

$$\frac{U_v}{U_{ном}} \approx \frac{S_{np}}{S_{\kappa}} \frac{k_v}{k_R} \nu \sqrt{\nu} \quad (2.9)$$

При виникненні резонансу, як відомо, комутація вентилів відбувається теоретично миттєво; в цьому випадку можливе пошкодження вентилів. Резонансні підвищення напруги на частотах ВГ можливі також у вузлах основних мереж ЕС, до яких не підключені ВП. Таким чином, застосування трансформаторів ВП з вищою напругою 110-220-330 кВ за певних умов може призвести до виникнення значної напруги 11-13-й гармонік (щонайменше 17-19-й). І в загальному випадку таке рішення неприйнятно. Якщо на підприємстві є блок-станція або синхронний компенсатор, підключений через трансформатор до шин 110-220-330 кВ, і відсутні споживчі приєднання 110-220-330 кВ значної довжини, підключення трансформатора ВП до шин 110-220-330 кВ цілком допустимо. При виділенні нелінійних навантажень (зокрема, ВП) на одну секцію (систему шин), підключену до двохмоточного трансформатора, виникає випадок, аналогічний попередньому. За відсутності БК і підключення синхронного компенсатора (двигуна) до шин 10 кВ опір навантаження почесної гармоніки:

$$X_{nv} \approx \frac{17}{S_o} \nu \quad (2.10)$$

де  $S_o$  - потужність двигуна компресора.

Відносне значення напруги – гармоніки:

При резонансі:

$$U_{v*} = \frac{U_v}{U_1} \approx 0.3 \frac{S_{np}}{S_o} \nu k_v \quad (2.11)$$

При  $S_n \geq S_{np}$   $k_{11013} \approx 0,05$  виявляється  $U_{v*} \leq 0,03$ . Однак якщо  $S_n \approx S_o$ , відносні значення напруги 11-13-й гармонік на частоті резонансу можуть скласти 10 - 20%; того ж порядку буде напруга на шинах 110 - 220 кВ. Установка ФКП 11-ї гармоніки виключить це явище. Зазначимо, що при виникненні режиму резонансу напружень в мережах 110 – 220 – 330 кВ можливі значні (до 7 - 8%)

підвищення напруги на частотах ВГ в цих мережах і в мережі підприємства. Тому, якщо від шин 110 – 220 – 330 кВ живляться споживчі приєднання, доцільно в мережі підприємства встановити ФКП.

### 3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ЩОДО ВИБОРУ ФІЛЬТРО-КОМПЕНСУЮЧОГО ПРИСТРОЮ ЗА ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНИМИ КРИТЕРІЯМИ

#### 3.1 Загальні положення

Одним з основних питань, що вирішуються при проектуванні та експлуатації систем промислового електропостачання, є питання про компенсацію реактивної потужності та зниження рівня вищих гармонік, що включає розрахунок і вибір фільтрокомпенсуючих пристроїв.

Кількісні та якісні зміни, що відбуваються в промисловому електропостачанні за останні роки, надають цьому питанню особливу значимість.

Вибір фільтрокомпенсуючих пристроїв проводиться на підставі техніко-економічного порівняння варіантів. Серед технічно прийнятних варіантів економічно доцільним буде той, який забезпечує мінімум наведених річних витрат:

$$Z = \kappa_{н.э} K + C_э = \min, \quad (3.1)$$

де  $\kappa_{н.э}$  - нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;  $C_э$  - експлуатаційні витрати.

Наведені витрати підраховуються за формулою:

$$Z = \sum_{i=1}^n (\kappa_{н.э} + \kappa_{а.р.о.i}) K_i + c_{а.м} \sum_{i=1}^n \Delta P_i, \quad (3.2)$$

де  $K_i$  - вартість  $i$ -го елемента схеми;  $\kappa_{а.р.о.i}$  - коефіцієнт щорічних відрахувань на амортизацію, ремонт та обслуговування  $i$ -го елемента;  $c_{а.м}$  - питома вартість втрат активної потужності;  $\Delta P_i$  - втрати активної потужності в  $i$ -му елементі.

Визначення втрат активної енергії в системі електропостачання при різних способах компенсації реактивної потужності проводиться за допомогою коефіцієнта зміни втрат  $\kappa_{u,n}$  :

$$\kappa_{u,n} = \sum_{i=1}^n \kappa_{u,n,i} , \quad (3.3)$$

де  $\kappa_{u,n,i}$  - коефіцієнт зміни втрат  $i$ -ї ланки системи електропостачання.

Коефіцієнт зміни втрат  $\kappa_{u,n,i}$  окремої ланки може бути визначений на підставі наступних розрахунків. При передачі активної  $P$  і реактивної  $Q$  потужностей через ланку з опором  $R_i$  втрати  $\Delta P_1$  потужності визначаються виразом (5-4). Якщо за рахунок компенсуючих пристроїв передана через ланку потужність знижена на  $Q_{\kappa,y}$  , то втрати потужності будуть рівні:

$$\Delta P_2 = \Delta P_a + \Delta P'_p + \Delta P_{\kappa,y} = \Delta P_a + \frac{(Q - Q_{\kappa,y})^2 R}{U^2} + \Delta P_{\kappa,y} , \quad (3.4)$$

де  $\Delta P_{\kappa,y}$  - втрати активної потужності в компенсуючих пристроях;  $\Delta P'_p$  - втрати потужності, викликані передачею реактивної потужності, рівної різниці  $Q - Q_{\kappa,y}$  .

Зниження втрат активної потужності визначається з виразу:

$$\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = \frac{Q_{\kappa,y} (2Q - Q_{\kappa,y})}{U^2} - \Delta P_{\kappa,y} . \quad (3.5)$$

Розділивши отриманий результат на потужність компенсуючого пристрою  $Q_{\kappa,y}$  , отримаємо коефіцієнт зміни втрат активної потужності  $i$ -го ланки:

$$\kappa_{u,n,i} = \frac{Q_{\kappa,y} (2Q - Q_{\kappa,y}) R_i}{Q_{\kappa,y} U^2} - \frac{\Delta P_{\kappa,y}}{Q_{\kappa,y}} = \frac{\Delta P_p}{Q} \left( 2 - \frac{Q_{\kappa,y}}{Q} \right) - \frac{\Delta P_{\kappa,y}}{Q_{\kappa,y}} . \quad (3.6)$$

Величина  $\kappa_{u,n,i}$  залежить від віддаленості промислового підприємства від джерела живлення і знаходиться в межах 0,02 - 0,12кВт/квар і більше.



З урахуванням сказаного, у загальному випадку наведені витрати, пов'язані з установкою засобів компенсації реактивної потужності, її генеруванням і передачею, розраховуються за формулою:

$$Z = Z_0 + Z_{y1}Q + Z_{y2}Q^2, \quad (3.7)$$

де  $Q$  - реактивна потужність, що генерується джерелом, МВар;

$Z_0$  - постійна складова витрат, не залежна від реактивної потужності, що генерується, грн;

$Z_{y1}$  - питомі витрати на 1 МВар реактивної потужності, грн/ МВар;

$Z_{y2}$  - питомі витрати на 1 МВар генерованої потужності, грн/ МВар.

### 3.1.1 Фактори економічної ефективності при техніко-економічному аналізі енергозберігаючих енергетичних проектів

Сучасний рівень розвитку силової електроніки (перетворювальної техніки), програмних та апаратних засобів управління забезпечують технічні передумови широкого впровадження багатofункціональних, широко-регульованих, надійних вентильних електроприводів змінного струму, які за технічними показниками не поступаються вентильним приводам постійного струму, а за економічними, як правило, перевершують їх. Перетворювальна частина таких приводів виконана на повністю керованих (замкнених) вентилях.

Основним стримуючим фактором широкого застосування універсальних за своїми можливостями сучасних перетворювальних установок продовжує залишатися нестача вільних фінансових коштів у підприємств. З іншого боку, різноманіття варіантів технічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності електромеханічних систем, що забезпечують той чи інший технологічний процес, вимагає достатньої аргументації при виборі критеріїв

ефективності розглянутих варіантів. Крім об'єктивності самої оцінки цим буде забезпечена можливість обмежитися не найскладнішим варіантом перетворювальної частини приводу, прийнявши, наприклад, прості варіанти регульованого напругою приводу змінного струму або навіть нерегульованого, але з керованим пуском.

У простих випадках, коли мова йде про порівняння способів управління приводом, наприклад, між варіантами енергетичної оптимізації при регулюванні напруги на статорі двигуна у функції змінного навантаження (досягнення мінімуму втрат, мінімуму споживаного струму, максимуму ККД вибір режиму управління може бути проведений за критерієм мінімуму вартості годинного споживання повної енергії двигуна. Очевидно, що такий підхід до оцінки ефективності режиму управління приводів допустимий при несуттєвості відмінності за варіантами управління показників технологічного процесу, малому впливі режиму роботи перетворювальної частини приводу на втрати в електропостачальній лінії та спотворення форми живлячого напруження. Сказане відноситься і до оцінки варіантів частотно-керованих приводів при названих обмеженнях впливу цих варіантів управління на хід технологічного процесу і ступінь впливу перетворювача частоти на показники роботи електропостачальної лінії.

У більш загальних випадках доводиться порівнювати варіанти, пов'язані із заміною нерегульованого приводу на регульований. Тут традиційно підхід до оцінки варіантів передбачає, як правило, порівняння наведених витрат, що залежать від початкових капіталовкладень, нормативного терміну їх окупності та експлуатаційних витрат. При рівних базових капітальних витратах у варіантах на перетворювальну частину деякі фахівці пропонують користуватися показником щорічних наведених витрат електродвигуна (ПЗ) зі структурою витрат:

$$ПЗ = (C_{эд} + C_{кy}) [1 + T_n (K_a + K_{об})] + C_a, \quad (3.8)$$

де  $C_{\text{до}}$   $C_{\text{ку}}$  - відповідно вартість електродвигуна і компенсуючого пристрою, що забезпечує досягнення у приводу нормального значення  $\text{tg}\varphi = 0,484$  ;  $K_a$  - частка витрат на амортизацію;  $K_{\text{об}}$  - нормативна частка витрат на обслуговування при експлуатації;  $C_a$  - вартість витрат енергії в двигуні, що визначається фактичним значенням ККД двигуна;  $T$  - нормативний термін окупності двигуна (зазвичай 5 років).

Брак показника (1) очевидний, він не враховує вартість додаткових ремонтів і витрат на відновлення електрообладнання, викликаних неякісністю споживання (перетворення) електроенергії в перетворювальній частині системи (приводу). Не можна вважати оптимальним варіант, при якому мінімальні витрати енергії будуть досягнуті за рахунок погіршення режимів роботи електрообладнання (в першу чергу електромеханічного перетворювача).

Споживачі, в силу властивих їм характеристик впливають на живильну енергосистему, причому згаданий вплив залежить від показників якості перетворення енергії, як окремо взятим споживачем, так і їх результуючою дією.

Можливість визначення показників якості перетворення енергії і, особливо, його складових, дозволяє встановити техніко-економічні показники електротехнічних установок і комплексів, реалізувати заходи з ефективного використання обладнання.

Відмінність якості споживаної енергії та якості процесів перетворення викликана тими обставинами, що традиційно якість споживаної енергії визначається у вузлі навантаження, наприклад, на підстанції, що живить кілька, іноді велика кількість споживачів. Визначення показників якості споживання енергії не регламентовано.

Очевидний факт, що узагальнений показник якості електроенергії не дає уявлення про характеристики/енергоспоживання окремо взятих споживачів. У зв'язку з цим стає очевидною необхідність оцінювання показників якості перетворення потужності, насамперед електромеханічними перетворювачами, що є основою сучасних систем електроприводу. Очевидно також і те, що кожен

з перетворювачів енергії має свої показники, причому їх структура залежить від характеру фізичних процесів, що лежать в основі процесів перетворення енергії.

Зі сказаного випливає, що показники якості перетворення енергії, як і показники якості споживаної енергії, в кількісному відношенні відповідають досягнутому рівню розвитку техніки, технології вимірювання енергетичних параметрів, математичного апарату, що описує згадані процеси. Зміна показників неякісності перетворення призводить до зміни енергетичних впливів, їх інтенсифікації, підвищеного, прискореного старіння електричної машини.

Можна стверджувати, що прискорений знос електротехнічного агрегату викликаний відхиленнями показників перетворення енергії від запланованих конструктивними особливостями цього агрегату і неякісність перетворення енергії є причиною швидкої (прискореної) деградації електромеханічного перетворювача, У сформованій практиці, при класифікації причин, що викликають з ладу електричних машин вказують дві з них - механічні, пов'язані, в основному, з виходом з ладу підшипників і замикання, пов'язані з руйнуванням ізоляції.

Конкретним прикладом оцінки впливу неякісності перетворення електроенергії в живильному двигун автономному інверторі напруги і самому двигуні є емпіричні коефіцієнти  $K_{\varepsilon_1} = F_1(p, f_2)$  і  $K_{\varepsilon_2} = F_2(p, f_2)$  визначають ступінь зниження наявної корисної потужності  $P_2$  асинхронного двигуна серії 4А від числа пар полюсів  $p$  і вихідної частоти  $f_2$  інвертора з амплітудним регулюванням:

$$P_2 = K_{\varepsilon_1} \cdot K_{\varepsilon_2} \cdot P_{кат}, \quad (3.9)$$

де  $P_{кат}$  - каталожна (номінальна) потужність на валу.

Розрахунковий вираз для оцінки шкоди, обумовлено додатковими втратами потужності і скороченням терміну служби ізоляції електрообладнання, внаслідок дії вищих гармонік напруги, засноване на використанні статистичних коефіцієнтів.

Математична інтерпретація набору показників:

- коефіцієнт ефективності використання споживаної енергії;
- коефіцієнт нерівномірності тепловиділення і токового завантаження фаз;
- коефіцієнти варіації моменту і неякісності його перетворення;
- коефіцієнт погіршення вібраційних характеристик,

безпосередньо пов'язані з якістю поданого на двигун напруги і можуть бути покладені в основу системи оцінки ймовірності безвідмовної роботи двигуна, терміну служби двигуна, а, отже, і ремонтних витрат.

Згідно міждержавного стандарту ГОСТ 13109-97 нормально допустиме значення коефіцієнта несинусоїдальності напруги - кнс, обумовленого наявністю в напрузі вищих гармонік і характеризує спотворення кривої напруги мереж загального призначення на висновках електроприймачів напругою 0,38 кВ обмежується 8% з інтегральною ймовірністю 0,5% за

У конкретних випадках для шин живлення потужних нелінійних та (або) різкоперемінних навантажень, підключених за схемами глибокого введення (шини перетворювачів прокатних станів, дугових електропечей в. т.п.), допустиму несинусоїдальність встановлюють виходячи з умов нормальної роботи перетворювачів. З цим пов'язано обмеження несинусоїдальності на більш високих рівнях напруги в стандартах деяких країн.

Так у Швеції для мереж 0,25-0,43 кВ допустиме значення кнс відповідає 4%, для мереж 3,3 - 24 кВ-3%, 36-72 кВ - 2%, вище 84кВ - 1%. В Японії для мереж 1 - 66 кВ і більше - відповідно 2 і 1%. За ГОСТ 13109-97 нормально допустиме значення кнс для мереж 6-20 кВ відповідає 5%, 35 кВ-4%, 110-330 кВ-2%.

Саме для випадків індивідуального підключення перетворювальної техніки з найбільшою достовірністю може бути виділена частка витрат, необхідних для досягнення допустимого рівня спотворюючого впливу на мережу (мінімального рівня електромагнітної сумісності з мережею) в порівнюваних варіантах перетворювачів і способів управління ними.

Повинна з'явитися складова, пов'язана з компенсацією збитку, викликаного неякісним перетворенням енергії в силовому тракті

електроприводу, а замість вартості компенсатора реактивної потужності  $C_{ку}$  повинна бути присутня вартість функціонального повного компенсатора неактивних складових повної потужності  $C_{кнс}$ . Такі компенсатори виконують на основі силових АФ, і називають силовими активними компенсаторами (САК).

Активний фільтр складається з го перетворювача змінного/постійного струму, виконаного на ключах з двосторонньою провідністю і ємнісного або індуктивного накопичувача енергії на стороні постійного струму. Такі перетворювачі у вітчизняній літературі називають ще активними випрямлячами або зверненими інверторами з ШИМ. Силовий АФ може підключатися паралельно або послідовно з нелінійним споживачем.

Основні втрати активної енергії для порівнюваних варіантів електроприводу будуть визначатися втратами в двигуні, перетворювальній ланці і в САК. Якщо зрівняні варіанти приводу, відрізняються ступенем забезпечення меж керованості технологічного процесу, то виникає завдання визначення економії втрат енергії при переході від некерованого технологічного процесу або керованого енергетично неефективними засобами до керованого за рахунок використання регульованого приводу. Економія  $W_a$  енергії за час роботи  $T_p$  може бути визначена за виразом:

$$\Delta W_a = \int_0^{T_p} \left[ \left( \frac{P_{ТА}(t) + \Delta P_{ТЕХ.p}(p)}{\eta_{ТА}(p) \cdot \eta_{ЭД}(p)} + \Delta P_{КВ}(p) \right) - \left( \frac{P_{ТА}(t)}{\eta_{np}(p) \cdot \eta_{ТА}(p) \cdot \eta_{ЭД}(p)} + \Delta P_{САК}(p) \right) \right] dt, \quad (3.10)$$

де  $P_{ТА}(t)$  корисна (вихідна) потужність технологічного агрегату, обумовлена вимогами технології;

$\Delta P_{ТЕХ.p}(p)$  - втрати потужності на технологічне регулювання (не електричними засобами);

$\Delta P_{КВ}(p)$  - втрати в компенсуючому пристрої нерегульованого приводу;

$\eta_{ТА}(p), \eta_{ЭД}(p)$  ККД технологічного агрегату та електродвигуна, відповідно;

$\eta_{np}(p)$  - ККД перетворювальної частини приводу;

$\Delta P_{САК}(p)$  - втрати в САК. Прикладом втрат потужності на технологічне регулювання є втрати на створення перепаду тиску на засувці (заслінці) при дросельному регулюванні насосів, вентиляторів, димососів.

Для випадків потужних перетворювачів, як правило з радіальною схемою електроживлення, при розрахунку досягнутої економії активної електроенергії, а потім і економії плати за користування електроенергією, необхідно додатково враховувати втрати, що виникають в електропостачальній лінії.

### 3.2 Економіко-правові питання

Економічний аспект проблеми ВГ. У багатьох випадках рівні ВГ перевершують межі, допустимі згідно з міжнародним, національним або галузевим стандартом; ця обставина тягне за собою необхідність впровадження технічних рішень, що забезпечують зниження рівнів ВГ до допустимих меж. Багатоваріантність можливих рішень (централізована або децентралізована корекція несинусоїдального режиму за допомогою ФКП; встановлення регульованих ФКП, АФ або ГФ; використання схемних рішень; збільшення пульсності ВП та ін.) обумовлює необхідність економічного зіставлення варіантів, що забезпечують задоволення технічних вимог. Очевидно, що в розгляд не можуть включатися варіанти збереження неприпустимого рівня несинусоїдальності як такого, що не відповідає нормативним вимогам. У силу ступеневого характеру типорозмірів і параметрів необхідного електрообладнання оптимізація рішень, як правило, виявляється непотрібною і некоректною. Сказане відноситься до проблеми ВГ в СЕС підприємств в цілому яка не є оптимізаційною, бо достатньо знизити рівень несинусоїдальності в СЕС підприємств до допустимих значень. Зіставлення варіантів мінімізації рівнів ВГ можливе на основі різних економічних критеріїв. Найбільш поширеним підходом є застосування методу наведених витрат. Наведені витрати 3 являють

собою суму річних витрат  $B$  (включаючи амортизаційні відрахування на реновацію) і наведені капітальні витрати  $ЕК$ , де  $ЕК$  - норматив ефективності капітальних витрат  $K$ :

$$Z = EK + B. \quad (3.11)$$

Значення  $E$  дорівнює величині, зворотній терміну окупності  $T_{ок}$ :

$$E = \frac{1}{T_{ок}}. \quad (3.12)$$

Наведена вище формула для  $Z$  використовується для статичних умов, тобто у разі вкладення коштів протягом одного-двох років та практичній сталості щорічних витрат. На практиці в більшості випадків використовується ця формула.

Якщо вкладення коштів і будівництво здійснюється протягом ряду років і має місце зміна витрат за роками розрахункового періоду, використовується формула:

$$Z = E \sum_{t=1}^{T_1} \frac{(EK_t + \Delta B_t)}{(1+E)^t}, \quad (3.13)$$

де  $\Delta B_t$  - приріст витрат у поточному році в порівнянні з попереднім. У деяких, досить простих випадках, зіставленню підлягають тільки капітальні витрати  $K$ .

Визначення розподілу потужності ФКП БК, необхідної для покриття дефіциту РМ в мережі, що відповідає мінімуму витрат на спорудження ФКП:

$$K = \sum_{p=1}^n K_p = \min, \quad (3.14)$$

При дотриманні умови:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{p=1}^n Q_p, \quad (3.15)$$

де  $Q_{\Sigma}$  - дефіцит РМ в мережі.



Відшукування умовного мінімуму функціоналу  $K$  зручно проводити методом невизначених множників Лагранжа. Допоміжна функція Лагранжа:

$$v = K + \lambda(Q_\Sigma - \sum_{p=1}^n Q_p) \quad (3.16)$$

Прирівнюючи нулю приватні похідні, отримаємо:

$$\frac{\partial K}{\partial Q_1} = \frac{\partial K}{\partial Q_2} = \dots = \frac{\partial K}{\partial Q_n} \quad (3.17)$$

Представляючи останній вираз у вигляді:

$$\frac{\partial K}{\partial Q_p} = \frac{\partial K}{\partial Q_{np}} \frac{\partial Q_{np}}{\partial Q_p} = \lambda_p - \frac{\eta_p}{Q_{np}^2}; \quad (3.18)$$

$$Q_\Sigma = k_u^2 \sum_{p=1}^n a_p^2 Q_{np}, \quad (3.19)$$

$$\lambda_p = \Lambda + \Delta \frac{a_p^2}{v_p} \quad (3.20)$$

$$\eta_p = \frac{9I_v^2 U_{np}^2}{v_p} \quad (3.21)$$

Шляхом спільного вирішення рівнянь для  $\partial K$  і  $Q_\Sigma$  знайдемо  $Q_{np}$  за умовою мінімуму витрат на ФКП.

Для випадку встановлення двох ФКП вираз  $Q_{n1}$  для має вигляд:

$$Q_{n1} = \frac{1}{a_1 k_u} \left( \sqrt[6]{-\frac{\tau}{2} + \sqrt{-\frac{3}{2}\sqrt{\frac{\tau}{2} - \frac{\pi}{2}} - \frac{\Psi}{4\sqrt{-\frac{\tau}{2}}}}} \right), \quad (3.22)$$

$$\left. \begin{aligned} \pi &= \frac{\eta_2 - \eta_1}{\lambda_1} - \frac{1}{2} Q_\Sigma^2; & \psi &= \frac{\eta_1 + \eta_2}{\lambda_1} Q_\Sigma; \\ \tau &= \frac{\pi^2}{108} + \frac{\pi\mu}{3} - \frac{\psi^2}{8}; & \mu &= \frac{Q_\Sigma^4}{16} + \frac{Q_\Sigma^2}{4} \frac{\eta_2 - \eta_1}{\lambda_1}. \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Розрахунки за отриманими формулами дозволяють укласти, що при оптимальному (з точки зору витрат на спорудження ФКП) розподілі потужності БК виявляється  $Q_{n1} \geq Q_{n2}$  для  $\nu_2 > \nu_1$  при  $Q_{\Sigma} = 5000$  квар;  $\nu_1 = 5$ ;  $\nu_2 = 7$ ;  $U_{np} = 6,6$  кВ;  $I_5 = 7$ А;  $I_7 = 45$ А;  $\Lambda = 4$  дол/квар; при 10 дол/квар виходить  $Q_{n1} = 2515$  квар, тобто практично потужність БК обох ФКП виявляються однаковими.

### 3.3 Приклад застосування результатів дослідження на прикладі ТОВ «Квік»

#### 3.3.1. Коротка характеристика підприємства

ТОВ «Машинобудівний завод «Квік» почала свою діяльність з 1993 року і, на сьогоднішній день включає в себе багато різних напрямків бізнесу, серед яких: будівельний, автомобільний, шинний тощо.

На території підприємства розташовано кілька виробничих цехів, які потребують електроенергію у великих об'ємах, серед яких і механічний, що спеціалізується на ремонтних та відновлювальних роботах.

В даний час в номенклатурі підприємства:

- комплекти устаткування (міні-заводи для виробництва труб електрозварювань).
- гамма ліній продольного і поперечного розкрою.
- станки для виготовлення відкритого профілю.
- преса просічно-витяжні для виготовлення суцільнотягнутих ришток із сталевого листа.
- ножиці гільйотинні для різання листового металу.
- вальци для гнучкі фланців і дуг з прокатного профілю (смуга, уголок, швелер).

- станки ножовочно-відрізні.
- преси брикетування деревних відходів, торфу і ін.
- кромкогиби гідромеханічні.
- вальци правильні і гібочні.
- обладнання для виробництва силових трансформаторів.
- склади малогабаритні автоматизовані типа РСБК-50.
- установки для виготовлення будівельних блоків з ґрунту.
- устаткування для виготовлення витих стрічкових магнітопроводів.
- установки вакуумного напилення алюмінію на папір або плівку.
- товари народного вжитку(санки дитячі, візки, овочева тара і ін.).
- обладнання і металоконструкції по спеціальних замовленнях.

Виконання виробничої програми забезпечують наступні цеха та ділянки:

Цех спеціальних металевих конструкцій.

Цех оснащено необхідним технологічним обладнанням та оснащенням:

- машинами для термічної різки листового металу типу «Кристал», в т.ч. із неіржавіючої сталі товщиною 5-60 мм;
- гільотинними ножицями (товщина різки до 20 мм, ширина до 3150 мм);
- пресами для холодної штамповки (потужність 250 і 160 тс);
- пресами листозгибаючими;
- профілезгибаючими та просечними стаканами;
- кронкострогальними стаканами для підготовки кромки під зварювання;
- спеціалізованим інструментом для ремонту теплотехнічного обладнання;
- зварювальними постами для ручного електродугового зварювання в середовищі вуглекислого газу та аргона.

В складі ділянки знаходяться такі ділянки:

- ділянка підготовки виробництва;
- ділянка зборочно-зварювальних робіт;

- ділянка виготовлення протипожежних дверей;
- ділянка ремонту теплотехнічного обладнання.

Механічна ділянка.

Цех оснащено універсальними металоріжучим обладнанням: токарними, фрезерними, свердлильними, долбіжними, заточними та відрізними верстатами. В складі цеха знаходяться такі ділянки:

- станкова ділянка;
- ділянка зборки-зварювання оснащення, малих архітектурних форм.

### 3.3.2 Огляд споживачів електричної енергії

Споживачів можна класифікувати за принципом перетворення електричної енергії в інші види, за такими групами:

1. Загальнопромисловий електропривод, де відбувається перетворення електричної енергії в механічну. Такий вид приймачів зустрічається на всіх промислових підприємствах, де для електропривода на сучасних верстатах застосовуються всі види двигунів. Потужність двигунів надзвичайно різноманітна і коливається від часток до сотень кіловат і більше.

2. Група електротехнологічних установок:

а) електротермічні - перетворення електричної енергії в теплову (до них відносяться: печі опору, індукційні печі і установки, дугові електричні печі, печі електрошлакового переплаву, установки електроннопроменевого нагріву, контактна і дугове зварювання);

б) електрохімічні - перетворення електричної енергії в хімічну (до них відносяться: установки електролізу, гальваніка, електрохімічна обробка, анодування);

в) електрофізичні - перетворення електричної енергії в різні види механічної енергії, яка використовується для обробки виробів (до них відносяться: ультразвукова обробка, магнітоімпульсна обробка, електростатичні фільтри).

3. Освітлювальні установки (перетворення електричної енергії в світло): лампи розжарювання, люмінесцентні, газорозрядні.

Окремим видом навантаження є установки для вентиляції виробничих приміщень. Вентиляцією називається сукупність заходів і пристроїв, що використовуються при організації повітрообміну для забезпечення заданого стану повітряного середовища в приміщеннях і на робочих місцях відповідно до СНіП (будівельними нормами і правилами). Системи вентиляції забезпечують підтримку допустимих метеорологічних параметрів в приміщеннях різного призначення.

Класифікація систем вентиляції:

При всьому різноманітті систем вентиляції, обумовленому призначенням приміщень, характером технологічного процесу, видом шкідливих виділень і т.ін., їх можна класифікувати за наступними характерними ознаками [11]:

1. За способом створення тиску для переміщення повітря:
  - з природним;
  - з штучним (механічним);
2. За призначенням:
  - приточна;
  - витяжна;
3. За зоною обслуговування:
  - місцева;
  - загальнообмінна;
4. За конструктивним виконанням:
  - канална;
  - безканална.

### 3.4 Аналіз електроспоживання ділянки

#### 3.4.1 Особливості встановлених електроприймачів та електрообладнання ТОВ «Квік»

Основними споживачами електричної енергії ділянки є технологічне та зварювальне обладнання. Вони живляться від трифазної мережі з частотою 50 Гц напругою 0,38 кВ. Також проектом передбачається загальне робоче та аварійне освітлення напругою 220 В.

Структура споживачів, які споживають електроенергію представляється на рисунку 3.1 так: електроприводи - 62%, електричний транспорт - 9%, електротермія та електротехнології - 8%, освітлення та інші споживачі - 21%.

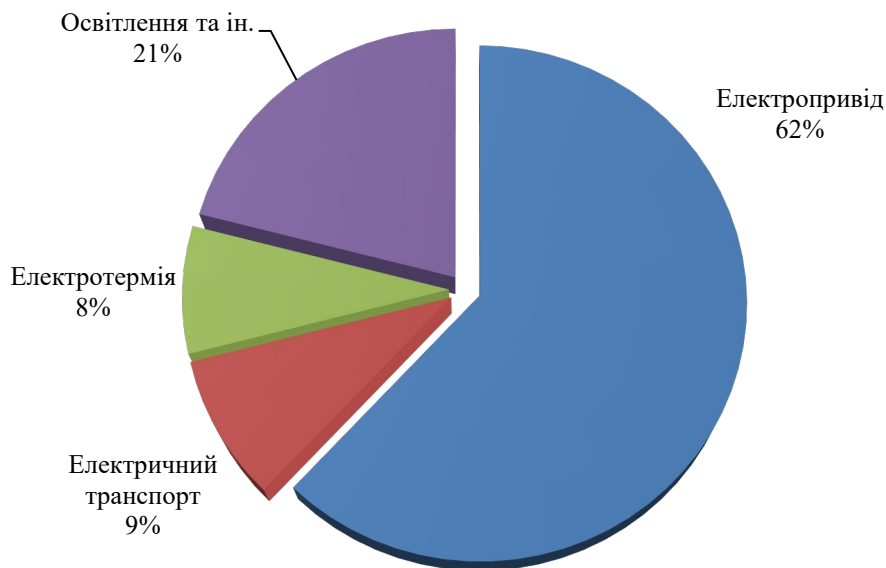


Рисунок 3.1 – Діаграма співвідношення електроенергоспоживання обладнання ТОВ «Машинобудівний завод «Квік»

Процентне співвідношення витрат електричної енергії на живлення споживачів ТОВ «Машинобудівний завод «Квік» наведено в таблиці 3.1.

Ця електроенергія на пром підприємствах широко застосовується для приводів різних механізмів, для освітлення, для різних електротехнологічних

установок, в які входять: електротермічні, електрозварювальні, установки електролізу та інше.

Таблиця 3.1 – Структура споживачів ділянки

№	Назва	Встановлена потужність	Відсоткове співвідношення, %
1	Загальна встановлена потужність електрообладнання, кВт	1261	100
2	Електроапарати для технологічних процесів, кВт:		
	- ел.печі	136	5,6
	-нагрівання і термообробка:		
	-нагрівальні пристрої	113	0,74
	- електрозварювання	223	12,27
3	Загальна потужність електродвигунів, кВт:	871	100
	- обробка металів різанням	410	54,4
	- електрифікований транспорт	222	22,26
	- вентиляція і кондиціонування	239	25,83
4	Загальна потужність систем освітлення	170	100
	- зовнішнє	31	15,96
	- внутрішнє	139	84,039

Основні електроприймачі підприємства:

– технологічне обладнання (всього близько 180 шт.: станки, преси, електричні пічі, компресори стисненого повітря – 4 шт.);

– зварювальне обладнання (близько 100 од., в т.ч. зварювальні випрямлячі типу ВС-600 – 9 шт., ВДУ-506У – 14шт., КИУ-501 – 8шт., ВДУЧ-350 – 3шт., ВДМ-1001 – 6шт., «КЕМРІ» - 1шт., ВДУ-1201 – 2шт., ВКСМ-1000 – 1шт., ВДУ-504 – 4шт., ВДУ-1202 – 2шт., обладнання для зварювання MIG/MAG ВАРИО

СТАР 457/2 – 2шт., обладнання дугового зварювання УДГУ-251 АС/ДС – 1шт., УДГУ-301, газоплазморізальна машина ППлКП - 2шт);

– освітлення (освітлення у виробничих цехах – світильники з люмінесцентними лампами типу ДРЛ-1000 та ДРЛ-700 – 70 шт., освітлення цехів – з люмінесцентними лампами типу ДРЛ-400 (30 шт.) і ДРЛ-250 (10 шт.), освітлення периметру – з люмінесцентними лампами типу ДРЛ-250 (30 шт.) і ДРЛ-125 (30 шт.); освітлення в адміністративних і побутових приміщеннях виконано світильниками з люмінесцентними лампами типу ЛБ-36 (50 шт.); освітлення в туалетах, КНС, побутових приміщеннях – з лампами розжарювання (50) шт.).

З таблиці 3.1 видно, що великий відсоток споживання електроенергії припадає на електродвигуни, більшу частину яких складають асинхронні двигуни.

#### 3.4.2 Динаміка споживання електричної енергії

Динаміка споживання електроенергії у 2018-2019 р. наведена у таблиці 3.2. Дані про місячне споживання електроенергії основними споживачами та тарифи на електроенергію 2017 р.[2] представлені в таблиці 3.3 і динаміка місячного споживання електроенергії на рисунку 3.2.

Таблиця 3.2 - Динаміка споживання електроенергії в 2017-2019 р.

	Роки		
Споживання електроенергії, млн. кВт·год	7,36	7,52	8,11
Витрати, млн. грн.	7,65	7,83	8,43



Таблиця 3.3 - Річне споживання електроенергії в 2019 р.

Місяць 2019 р.	Споживання електроенергії, млн. кВт·год	Витрати, млн. грн.
Січень	6,52	11,8664
Лютий	6,38	11,6116
Березень	6,12	11,1384
Квітень	5,98	10,8836
Травень	6,72	12,2304
Червень	6,14	11,1748
Липень	6,05	11,011
Серпень	6,76	12,3032
Вересень	6,85	12,467
Жовтень	6,97	12,6854
Листопад	6,51	11,8482
Грудень	7,2	13,104
Усього	78,2	142,324

млн.кВт·год

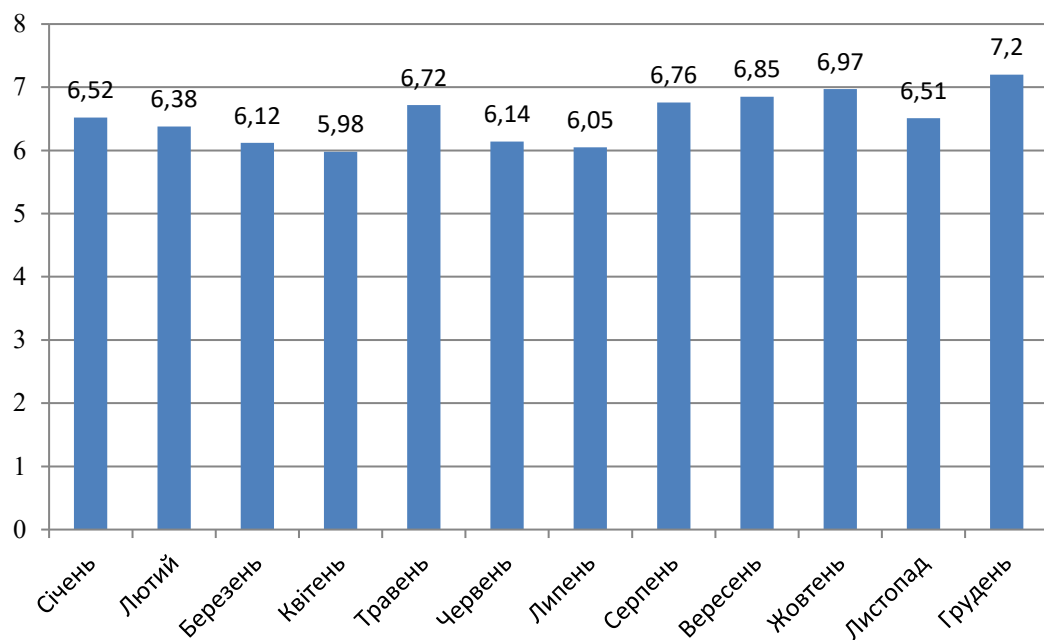


Рисунок 3.2 - Динаміка помісячного споживання електроенергії в 2019 р.

Таблиця 3.4 – Обладнання ділянки

№	Найменування	Потужність $P$ , кВт	Кількість $n$ , штук	Коефіцієнт використання
1	2	3	4	5
1	Відрізні верстати	10	1	0,12
2	Токарно-карусельні верстати	28	2	0,13
3	Вальцепроточні верстати	14	4	0,12
4	Зварювальні перетворювачі	14	2	0,2
5	Токарно-гвинторізні верстати	28	6	0,12
6	Перетворюв. автоматич. зварювання	28	3	0,5
7	Протяжний верстат	10	1	0,14
8	Точильно-шліфувальні верстати	10	2	0,13
9	Калорифери	14	2	0,75
10	Вентилятор	28	1	0,57
11	Шліфувальні верстати	7	1	0,12
12	Шліфувальні верстати	10	2	0,12
13	Горизантально-фрезерні верстати	28	2	0,17
14	Вертикально-свердильний верстат	7	1	0,17
15	Токарно-револьв. верстат	14	1	0,18
16	Стругальні верстати	14	3	0,17
17	Універсально-фрезерні верстати	14	2	0,12

З вищенаведених даних видно, що протягом останніх 3 років споживання електроенергії підприємством стабільно збільшується. Це пов'язано з ростом випуску товарної продукції і розширенням її асортименту. Обладнання ділянки наведено в таблиці 3.4.

Приріст обсягу електроспоживання в 2019 р. у порівнянні з 2015 р. склав 10%.

### 3.5 Оцінка частки споживачів у погіршенні якості електроенергії

Електроенергія, що відпускається постачальником - енергопостачальною організацією (як правило, енергосистемою), є товаром, якість якого оцінюється за допомогою ряду показників, у тому числі і характеризують його несинусоїдальність. Споживачі ЕЕ, які володіють нелінійними вольт- і веберактивними характеристиками і є джерелами ВГ, роблять певний внесок у погіршення КЕ, в розглядуваному випадку - додаткове спотворення кривих напруги і струму в точці підключення споживача до мережі (шин) енергопостачальної організації. Наявність економічних взаємин між постачальником і споживачем ЕЕ передбачає відповідальність споживача за погіршення КЕ в розмірах, що залежать від його пайового внеску в погіршення КЕ (в даному випадку - рівня несинусоїдальності). Очевидно, при оцінці пайового внеску споживача повинна відніматися частина, обумовлена несинусоїдальністю напруги енергосистеми, створюваної, очевидно, іншими нелінійними споживачами.

Приклад розрахунку рівня вищих гармонік на шинах КТП 0,4 кВ.

На компресорній станції з чотирма синхронними двигунами типу STD-8000-2 встановлені тиристори збудливі пристрої типу TVU-2-247-320 потужністю 79 кВ з ККД = 93,7%, з  $\cos \varphi = 0,47$  трансформаторами типу TSP-160/0,5-68 з первинною напругою 380 В. Живлення тиристорних пристроїв

проводиться від шин 0,4 кВ КТП з трансформаторами 4 по 1000 кВ·А. Від кожної секції шин 0,4 кВ живляться шість асинхронних двигунів типу АО-83-4 потужністю 55 кВт з ККД = 91% і коефіцієнтом потужності 0,89. Кратність пускового струму 6,5.

Крім того, від кожної секції живиться трансформатор потужністю 100 кВ·А напругою  $U_k = 5,5\% \quad 380/220/127 \text{ В}$ .

Струм тиристорного пристрою на боці 380 В, А:

$$I = \frac{160}{3 \cdot 0,38} = 242,5$$

і для двох пристроїв  $2 \cdot 242,5 = 485 \text{ А}$ .

Визначаємо умовні еквівалентні опору вищим гармонікам. Оскільки напруга вищої гармоніки:

$$U_v = I_v \cdot x_v = \frac{I^{(1)}}{v} \cdot xv = I_1 x \quad (3.24)$$

то умовний еквівалентний опір визначається як опір першої гармоніки струму. Для зручності розрахунку ведемо в мОм при напрузі 0,4 кВ.

Реактивний опір системи:

$$x_c = \frac{U^2 \cdot 1000}{S_k} = \frac{0,4^2}{150} = 1,07 \quad \text{мОм.}$$

Реактивний опір трансформатора 1000 кВ·А:

$$x_T = \frac{U_k U_n^2 \cdot 1000}{100 \cdot S_T} = \frac{5,5 \cdot 0,4^2 \cdot 1000}{100 \cdot 1} = 8,8 \quad \text{мОм.}$$

Результуючий реактивний опір системи і трансформатора на шинах 0,4 кВ:

$$x_{рез} = 1,07 + 8,8 = 9,87 \quad \text{мОм.}$$

Пускова потужність асинхронного двигуна:

$$S_n = \frac{P \cdot 6,5}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{55 \cdot 6,5}{0,91 \cdot 0,89} = 440 \text{ кВ} \cdot \text{А.}$$

Повний опір двигуна при пуску:

$$z_\partial = \frac{U^2 \cdot 1000}{S_n} = \frac{0,38^2 \cdot 1000}{440} = 328 \text{ мОм.}$$

Коефіцієнт потужності при пуску приймається рівним 0,37.

Реактивний опір двигуна при пуску:

$$z_\partial \sin \varphi_n = 328 \cdot 0,93 = 306 \text{ мОм.}$$

При включенні шести двигунів їх еквівалентний опір  $306/6 = 51$  мОм.

Реактивний опір трансформатора 100 кВ· А:

$$x_T = \frac{U_k U_n^2 \cdot 1000}{100 \cdot S_T} = \frac{10 \cdot 0,4^2}{100 \cdot 0,1} \cdot 1000 = 160 \text{ мОм.}$$

Складаємо схему заміщення, в якій тиристорні пристрої відіграють роль генератора вищих гармонік, а система, асинхронні двигуни і трансформатор 100 кВ· А служать опорами для них. У нашому випадку  $x_{рез} = 9,87$  мОм, і  $x_2 = 51$  мОм,  $x_3 = 160$  мОм.

Загальний еквівалентний умовний опір:

$$\frac{x_{рез} \cdot x_2 \cdot x_3}{x_{рез} \cdot x_2 + x_{рез} \cdot x_3 + x_2 \cdot x_3} = \frac{9,87 \cdot 51 \cdot 160}{9,87 \cdot 51 + 51 \cdot 160 + 9,87 \cdot 160} = 7,9$$

Чинне значення гармонік напруги визначаємо за формулою:

$$U_{\partial v} = \frac{k_{н.г} I_{эн} x_{эн} \sqrt{n_v}}{U\phi} 100\%. \quad (3.25)$$

У нашому  $U_\phi = 220$  випадку сума номінальних струмів тиристорних пристроїв  $I_{\text{ен}} = 486$  А,  $x_{\text{д1}} = 0,0079$  Ом,  $n = 4$  при шестифазній схемі випрямлення -  $k_{\text{н.г}} = k_u k_\phi k_\delta$  гармонічний коефіцієнт використання. Приймаємо коефіцієнт використання з розрахунку навантажень тиристорних пристроїв ; коефіцієнт, що враховує  $k_u = 1$  неспівпадіння фаз гармонік окремих перетворювачів, і коефіцієнт, що  $k_\phi = 0,9$  враховує вплив гармонік трансформаторів, аномальних гармонік перетворювачів і т.  $k_\delta = 1,3$  ін.

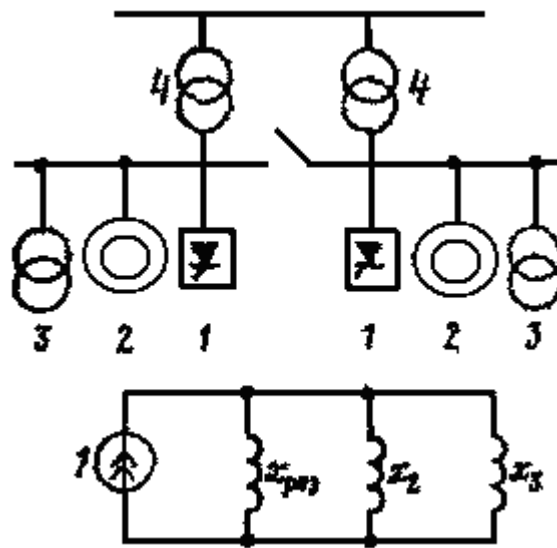


Рисунок 3.3 - Схема заміщення.

Підставляючи ці значення у формулу, отримуємо:

$$U_{\text{эв}} = \frac{0,9 \cdot 1,3 \cdot 485 \cdot 0,0079 \sqrt{4}}{220} \cdot 100 = 4,1\% < 5\%$$

що допустимо по ГОСТ.

У разі відключення одного трансформатора 1000 кВ· А і живлення всього навантаження від іншого трансформатора 1000 кВ· А реактивний опір асинхронних двигунів і трансформаторів 100 кВ· А зменшиться в 2 рази.

Умовний еквівалентний опір:

$$x_{\text{д1}} = \frac{9,87 \cdot 25,5 \cdot 80}{9,87 \cdot 25,5 + 25,5 \cdot 80 + 80 \cdot 9,87} = 6,85 \text{ мОм.}$$

Чинне значення вищих гармонік напруги при роботі чотирьох тиристорних пристроїв з струмом  $4 \cdot 242,5 = 970$  А:

$$U_{\%v} = \frac{0,9 \cdot 1,3 \cdot 970 \cdot 0,00685 \sqrt{4}}{220} \cdot 100 = 7,05\%$$

що неприпустимо за ГОСТ, і може бути допущено тільки для короткочасного режиму роботи на період відновлення живлення від двох трансформаторів.

### 3.6 Вибір компенсуючого обладнання з реактивної потужності

Питомі витрати компенсуючих пристроїв розраховуються за наведеними нижче формулами:

а) синхронні двигуни:

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= (\kappa_{н.э} + \kappa_{а.р.о.і}) \kappa_{с.д}; \\ Z_{y1} &= c_{а.м} \frac{\kappa_1}{Q_{ном}}; Z_{y2} = c_{а.м} \frac{\kappa_2}{Q_{ном}^2 N_{с.д}} \end{aligned} \right\}; \quad (3.26)$$

де  $\kappa_1$   $\kappa_2$  - розрахункові коефіцієнти з формули втрат активної потужності в синхронних двигунах;  $N_{с.д}$  - кількість однотипних синхронних двигунів у групі;

б) конденсатори:

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= (\kappa_{н.э} + \kappa_{а.р.о.і}) K_{в.у} + (\kappa_{н.э} + \kappa_{а.р.о.і}) K_{р.у}; \\ Z_{y1} &= (\kappa_{н.э} + \kappa_{а.р.о.і}) \kappa_{у.к.б} \frac{1}{K_{р.н}} + c_{а.м} \Delta P_{к.б.у}; \\ Z_{y2} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

де  $K_{\epsilon,y}$   $K_{p,y}$  - вартості ввідного та регулюючого пристроїв, грн.;  $K_{y,k,b}$  - питома вартість конденсаторних батарей, грн/Мвар;

в) синхронний компенсатор:

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= 0; \\ Z_{y1} &= (\kappa_{н.э} + \kappa_{a.p.o}) \frac{K_{c.k}}{Q_{ном}} + c_{a.m} \frac{\Delta P_x}{Q_{ном}}; \\ Z_{y2} &= c_{a.m} \frac{\Delta P_k}{Q_{ном}^2}, \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

де  $K_{c.k}$  - повна вартість встановлення синхронного компенсатора;  $\Delta P_k$   $\Delta P_x$  - номінальні втрати х. х. і к. з. синхронного компенсатора.

Потрібна потужність компенсуючих пристроїв  $Q_{к,y}$  вибирається з урахуванням економічно обгрунтованої найбільшої реактивної потужності  $Q_{э,c}$  яка може бути передана з енергосистеми в режимі її найбільших активних навантажень в мережу промислового підприємства, тобто має дотримуватися умова:

$$Q_{к,y} = Q_{\Sigma} - Q_{э,c}, \quad (3.29)$$

де  $Q_{\Sigma}$  - розрахункове значення загальної споживаної реактивної потужності протягом максимального активного навантаження енергосистеми.

В результаті установки на підприємстві компенсуючих пристроїв зменшується струм, що споживається з енергосистеми:

$$I_{н.к} = \frac{\sqrt{P^2 + (Q - Q_{к,y})^2}}{\sqrt{3}U} \quad (3.30)$$

Зекономлена потужність підраховується за формулою:

$$P_{с.э.м} = (I_{\delta.к}^2 - I_{н.к}^2) R_{э,c}, \quad (3.31)$$

де  $I_{\delta.к}$   $I_{н.к}$  струм в елементах енергосистеми до і після компенсації відповідно;  $R_{э,c}$  - загальний активний опір елементів енергосистеми.



У першому наближенні зниження втрат активної потужності можна підрахувати за допомогою  $\kappa_{и.л}$ , який задається енергосистемою у відповідній точці мережі, тобто:

$$P_{с.э.м} = Q_{к.у} \kappa_{и.л} \quad (3.32)$$

Як правило  $P_{с.э.м} \succ P_{к.у}$ .

Вибір потужності компенсуючого пристрою повинен бути обґрунтований техніко-економічними розрахунками. Встановлену потужність компенсуючого пристрою, що забезпечує мінімум річних наведених витрат, можна визначити з виразу:

$$Z = \left( \frac{Q - Q_{к.у}}{U} \right)^2 R_{э.с} c_{а.м} + (\kappa_{и.э} + \kappa_{а.р.о}) \kappa_{у.к.у} Q_{к.у} + \Delta P_{у.к.у} Q_{к.у} c_{а.м}, \quad (3.33)$$

де  $\kappa_{у.к.у}$   $\Delta P_{у.к.у}$  - питомі вартість і втрати активної потужності компенсуючих пристроїв.

Для визначення економічно доцільної встановленої потужності  $Q_{к.у.э.к}$  диференціюємо рівняння і прирівнюємо його до нуля:

$$\frac{dZ}{dQ_{к.у}} = 0$$

В результаті отримуємо:

$$Q_{к.у.э.к} = Q - \frac{(\kappa_{и.э} + \kappa_{а.р.о}) \kappa_{у.к.у} + \Delta P_{у.к.у} c_{а.м}}{2R_{э.с} c_{а.м}} U^2 \quad (3.34)$$

Як показали розрахунки за алгоритмом (рисунок 3.4), при потужності компенсуючого пристрою менше 5000 квар при напрузі 6 кВ і 10000 квар при напрузі 10 кВ економічно доцільною є встановлення статичних конденсаторів. Якщо необхідна потужність компенсуючого пристрою більше зазначених величин, то слід провести техніко-економічні розрахунки, враховуючи графік споживання реактивного навантаження та вимоги енергосистеми з метою виявлення ефективності застосування синхронних компенсаторів.

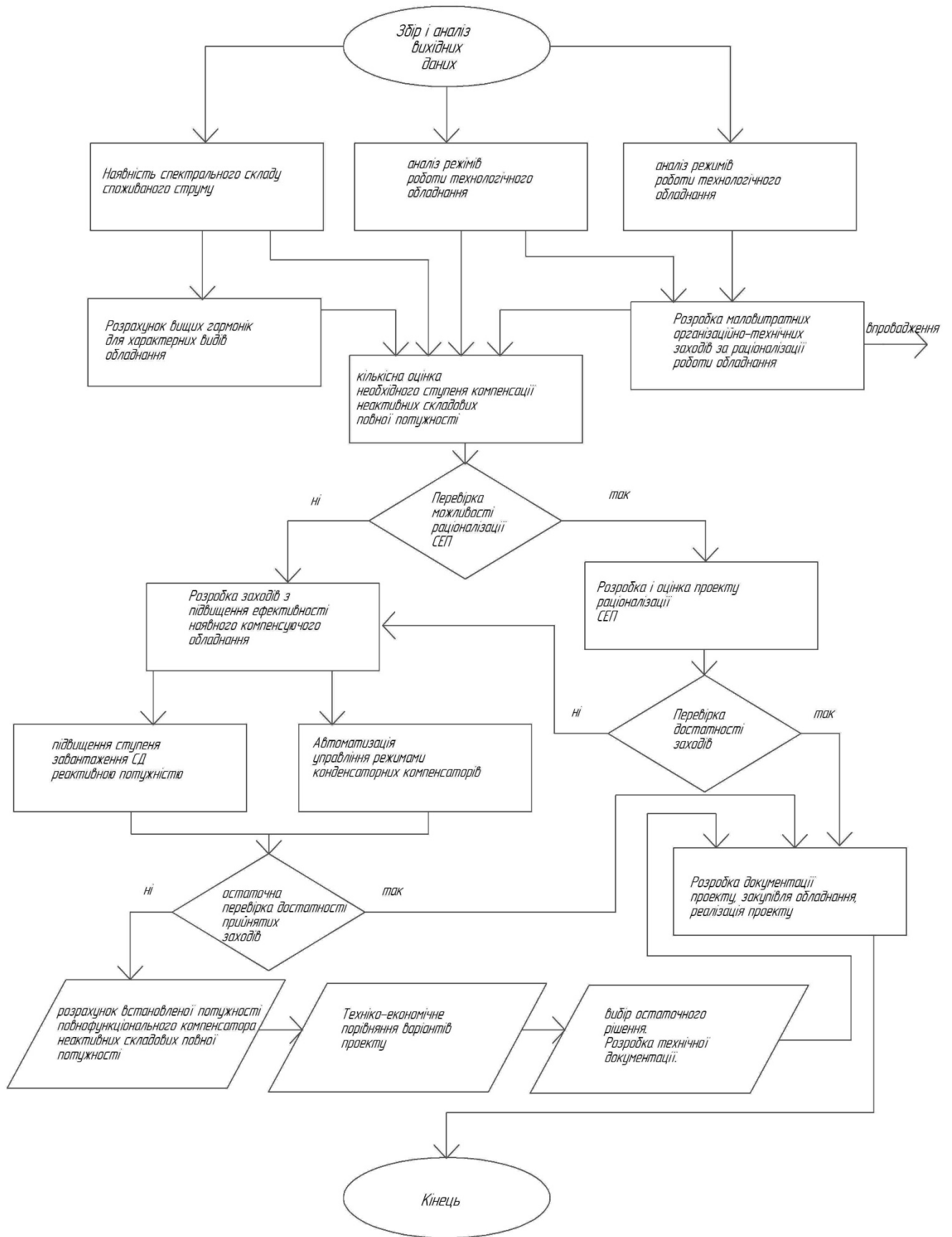


Рисунок 3.4 – Алгоритм вибору ФКП на основі техніко-економічного критерію

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1 Аналіз потенційних і шкідливих чинників виробничого середовища

В дипломній роботі розглядаються питання економічної доцільності заходів підвищення енергоефективності ТОВ «Машинобудівний завод «Квік». Охорона праці при будівництві і експлуатації забезпечується прийняттям рішень у відповідності до відповідних норм і правил.

Виконання будівних, електромонтажних і налагоджувальних робіт виконується у відповідності до діючих правил ПУЕ, а також у відповідності до діючих «Будівельних норм і правил», які затверджені Держбудом.

В умовах експлуатації обладнання ливарного ділянки, існують наступні потенційні небезпеки: комутаційні, імпульсні перенапруги; перехід вищої напруги на сторону нижчої; хибна дія персоналу при оперативних переключеннях; можливість випадкових дотиків до частин, що перебувають під напругою; пошкодження ізоляції електроустановок; короткі замикання в електроустановках.

Обслуговування обладнання ділянки здійснюється черговим оперативним персоналом у складі п'яти чоловік. Ремонтно-експлуатаційне обслуговування здійснюється спеціалізованими ремонтними бригадами. Електротехнологічний персонал виробничих цехів і дільниць, що не входить до складу енергослужби, яка здійснює експлуатацію електротехнологічних установок і має групу з електробезпеки II і вище, у своїх правах та обов'язках прирівнюється до електротехнічного; в технічному відношенні вона підпорядковується енергослужбі підприємства.

Керівники, в безпосередньому підпорядкуванні яких знаходиться електротехнологічний персонал, повинні мати групу з електробезпеки не нижче, ніж у підлеглого персоналу. Вони повинні здійснювати технічне керівництво цим персоналом та контроль за його роботою.

У відповідності до ПТЕ для забезпечення норм охорони праці передбачається ряд захисних заходів, направлених на забезпечення безпечних умов праці в ливарному ділянці.

Виникнення короткого замикання в електроустановках, може привести до ушкодження обладнання і створити небезпеку ураження людей електрострумом. Для забезпечення безпеки людей та запобігання ушкодження обладнання проектом передбачено такі заходи: розташування обладнання з дотриманням нормативних відстаней між струмоведучими частинами та землею; використання обладнання без конструктивних недоліків; застосування надійного заземлення з відповідною нормативною величиною опору; встановлення релейного захисту окремих елементів обладнання.

#### 4.2 Технічні рішення по гігієні праці і виробничій санітарії

Для виключення можливостей випадкових торкань, або небезпечного наближення до струмоведучих частин, відповідно до проекту передбачені наступні заходи згідно з вимогами ПТЕ: індивідуальні засоби захисту від ураження електричним струмом, ізолюючі та вимірювальні електрокліщі; вказівники напруги, ізолюючі пристрої і засоби для ремонтних робіт; діелектричні рукавички, гумові килими, ізолюючі підставки, та переносні заземлення, плакати та попереджувальні знаки. В процесі експлуатації, ізолюючі засоби захисту періодично проходять випробування підвищеною напругою згідно ПТЕ.

У зв'язку з тим, що ливарний цех віддалений від інших забудов, спеціальні заходи щодо шумозахисту навколишньої території в проекті не застосовуються відповідно до ГОСТ 12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности». Основні небезпечні фактори роботи електромонтера наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Оцінка факторів виробничого та трудового процесу електромонтера

№ п/п	Фактори виробничого середовища та трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	III клас: шкідливі та небезпечні умови, характер праці.			Довготри- валість дії фактору за зміну %
				1 ступ.	2 ступ.	3 ступ.	
1	3-4 кл. небезпеки напруженість електром. поля, кВ	5	7,5	1,5р	-	-	85
2	Вібрація локальна, дБ	92	95	3	-	-	80
3	Шум, дБА	80	90	-	10	-	80
4	Мікроклімат: -температура повітря, °С	27	31	-	4	-	90
	-Швидкість руху повітря, м/с	0,3	0,5	-	-	-	90
	-Відносна волога,%	65	64	-	-	-	90
5	Тяжкість та напруженість праці	Категорія середньої важкості 2б; помірно-напружена					

Отже, як видно з таблиці, умови праці відносяться до середньої тяжкості, праця помірно-напружена і потребує заходів з її поліпшення і полегшення.

#### 4.2.1 Природне і штучне освітлення

Приміщення ТОВ «Машинобудівний завод «Квік» забезпечено достатнім природним світлом, а у нічний час - електричним освітленням. Місця, що з технічних

причин не можна забезпечити природним світлом, забезпечені електричним освітленням. Освітленість відповідає СНіП 2-4-79 «Природне і штучне освітлення».

Характеристика приміщення ділянки:

- характер робіт	постійне
спостереження	
- розряд зорової роботи	8
- підрозряд роботи	В
- контрастність об'єкта розпізнавання	велика
- тіло	світле
- коефіцієнт природної освітленості $E_n$	
При верхньому і комбінованому. освітленні	0,9%
- коефіцієнт природної освітленості $E_n$	
При звичайному освітленні	0,3%

Для створення сприятливих умов праці важливе значення має раціональне освітлення. Незадовільне освітлення ускладнює проведення робіт, веде до зниження продуктивності праці та працездатності очей, і може бути причиною їх захворювань і нещасних випадків.

На промислових підприємствах штучне освітлення поділяється на робоче (для проведення робіт у темний час доби або в місцях без достатнього природного освітлення), аварійне (для проведення роботи при аварійному відключенні робочого освітлення), евакуаційне (аварійне освітлення для евакуації людей із приміщення при аварійному відключенні робочого освітлення) і охоронне. При необхідності частина світильників того чи іншого виду освітлення використовуються для чергового освітлення. Застосовуються дугові ртутні лампи (ДРЛ).

Штучне освітлення проектується двома системами: загальне (рівномірного або локалізоване з урахуванням розташування робочих місць) і комбіноване, коли до загального освітлення додається місцеве. Застосування одного місцевого освітлення не допускається, тому що різкий контраст між яскраво освітленими і неосвітленими місцями стомлює око сповільнює швидкість роботи і нерідко є

причиною нещасних випадків. Для штучного освітлення використовуються стельові лампи типу ДРЛ-150, або світильники типу «Астра». Для місцевого освітлення використовуються лампи накаливання потужністю 150 Вт і світильники НСП-200.

У відповідності зі СНиП II-4-79 «Естественное и искусственное освещение» на території підстанції забезпечуються наступні норми освітленості: приміщення апаратного зв'язку - 150 лк; приміщення щита керування - 100 лк; зовнішнє освітлення - 0,5 лк. Зовнішнє освітлення підстанції, що реконструюється виконане прожекторними лампами типу СЗГ, які встановлені на спеціальних щоглах. Світильники типу СЗЛ встановлені на стійці СВ-95-1 на висоті 7 м ; світильники типу СЗЛ, призначені для підсвічування трансформатора. Внутрішнє здійснюється на напрузі 220 В люмінесцентними лампами і лампами накаливання.

#### 4.2.2 Санітарно - побутові приміщення

При улаштуванні санітарно-побутових приміщень у дипломній роботі керуємося СНиП 2.09.04-87 «Адміністративні і побутові будинки». Конструкція стін, вікон, стель тощо у виробничому приміщенні відповідає нормам санітарії, і забезпечує сприятливі умови праці робочому персоналу.

До числа побутових відносяться приміщення для задоволення санітарних і побутових потреб працівників під час їхнього перебування на роботі: приміщення для прийому їжі, гардеробні, душові, вбиральні, умивальні, питного водопостачання і комору для інвентарю. На території підприємства обладнані санітарні пункти, укомплектовані аптечками й іншими медичними препаратами.

### 4.2.3 Шум і вібрація ділянки

Робота устаткування, а також пульсація потужного електричного поля всередині печей ливарного ділянки створюють шум і вібрацію. Тому існують різні види шуму. Серед них розрізняють механічні (вентилятори, двигуни), аеродинамічні (газоходи, насоси, вентилятори), гідродинамічні (трубопроводи). Найбільший шум - у електролізному ділянки, середній - на робочому місці оператора, найменший - у побутових і допоміжних приміщеннях.

Сильний шум має шкідливий вплив на здоров'я людей. Тривалий шум пригнічуючи діє на центральну нервову систему і через неї на весь організм. Це свідчить про необхідність розроблення і впровадження заходів для ослаблення шуму і захисту від нього обслуговуючого персоналу.

З метою зменшення шуму застосовують звукоізолюючі конструкції:

- звукоізоляційна місця керування поста оператора електролізера;
- звукоізоляція трубопроводу.

Джерелом вібрації в ливарному ділянки слугують насоси, двигуни, печні трансформатори тощо. Гранично припустимий рівень вібрації 92 дБ. Вплив вібрації приводить до різних порушень здоров'я людини і може стати причиною вібраційної хвороби. Загальна вібрація впливає на нервову, серцево-судинну систему людини, відбувається порушення у вестибулярному апараті, порушується обмін речовин, виникають головні болі, погіршується сон і та ін.

Як захисні міри використовують віброізоляцію. Для ослаблення передачі вібрацій і шуму по воздуховодах і трубопроводах, приєднання їх до вентиляторів і насосів відбувається за допомогою гнучкої вставки з прогумованої тканини. Під джерелом вібрації встановлений міцний фундамент.

Відповідно до ГОСТ 12.1.012-90 «Вибрация. Общие требования безопасности», на проектуваній підстанції захист від вібрацій здійснюється застосуванням віброгасіння, зниження рівня вібрації шляхом установки трансформаторів на фундаменти.



### 4.3 Заходи з поліпшення умов праці

Відповідно до вимог охорони праці виконане компонування устаткування ділянки, а також визначено комплекс заходів щодо охорони праці. Застосовано засоби контролю за параметрами системи автоматичного регулювання технологічними процесами, а також системи протиаварійних мір і блокувань. Електроустаткування і заходи щодо його безпечної експлуатації. Умови безпечної експлуатації залежать значною мірою від захищених пристроїв.

Відповідно до ГОСТ 12.1.009-76 «ССБТ. Электробезопасность. Термины и определения» обладнання котельні забезпечено робочою ізоляцією - електрична ізоляція струмоведучих частин електроустановки, що забезпечує її нормальну роботу і захист від поразки електричним струмом.

Згідно ГОСТ 12.2.007.0-75 «ССБТ. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности» електротехнічні вироби котельні по способу захисту людини від поразки електричним струмом відносяться до 1 класу в якому є робоча ізоляція, а також є елемент для заземлення. З урахуванням вимог «Правил устрою електроустановок», НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів», ГОСТ 12.2.007.0-75 «ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности» обладнання котельні забезпечено від перевантажень автоматизованою системою керування. Для запобігання ураження електричним струмом при дотику до металевих струмоведучих частин, які можуть виявитися під напругою в результаті пошкодження ізоляції, слід використовувати захисне заземлення. Для розподілення електроенергії котельні встановлюють модульну шафу з автоматичним вимикачем, магнітним пускачем.

Перед пуском електродвигунів, подається попереджувальний сигнал. Особи, що обслуговують електроустановки мають кваліфікаційну групу не нижчу 3-ої. Усі частини, які проводять струм, ізольовані. Як захисну ізоляцію застосовують теплостійкі лаки, плівки, емалеві й олійні фарби, а також

блокування апаратів для запобігання помилкових операцій за допомогою автоматичних вимикачів.

Захисне заземлення електроприймачів виконується сталевими трубами, опір пристрою, що заземлює, не перевищує 4 Ом. На проводах комутаційних апаратів чітко зазначені положення «включено» і «виключено». Для захисту від короткого замикання використовують швидкодіючий релейний захист і вимикачі, плавкі запобіжники.

У ділянки впровадженій комплекс організаційних заходів спрямованих на профілактику аварійних ситуацій. До таких заходів відноситься чіткий розподіл обов'язків між обслуговуючим персоналом, закріплення обслуговування окремих одиниць устаткування за конкретними працівниками, розроблення посадових інструкцій для всіх категорій працівників і періодична перевірка знань персоналу.

З метою профілактики аварійних ситуацій, такий об'єкт, як електролізний цех, підлягає періодичному огляду й іспиту обладнання місцевими органами Держгорпромнагляд. Для запобігання витoku газу через зварні й болтові з'єднання, запірну арматуру, газопровід у зборі проходити іспит Держнаглядохоронпраці України.

Дотримання всіх норм і правил техніки безпеки приводить до значного зниження нещасних випадків на виробництві.

#### 4.4 Електробезпека

Для забезпечення електробезпеки обслуговуючого персоналу і нормальної роботи систем РЗА, ПА і АСУ ТП виконується захисне і робоче заземлення пристроїв цих систем згідно з вимогами ПУЕ.

Для вимірювальних кіл трансформаторів струму і трансформаторів напруги повинні використовуватись кабелі з металевією оболонкою або

оболонкою і бронєю. В одному контрольному кабелі не припускається об'єднання кіл різних класів по рівню випробувальної напруги, вимірювальних кіл напруги і струму, кіл управління с колами вимірів і сигналізації, а також з силовими колами.

Рекомендується кабельні лінії різного призначення прокладати по різних трасах, виконуючи з'єднання кабелів горизонтальними заземлювачами. Металеві оболонки і броня кабелів повинні заземлюватись в місці вводу в будівлю релейного щита ,а також в місцях кінцевого розділення кабелів. Металеві коробки, по яких прокладаються кабелі слід заземлювати через 5-10 метрів.

Для кіл міжмашинного обміну повинні застосовуватись тільки екрановані симетричні кабелі. Ці кабелі повинні прокладатись на якомога більшій відстані від силових кіл.

Взагалі, в залежності, від характеру діяння ЕМІ на лінії зв'язку і підімкнену до них релейну апаратуру можуть бути рекомендовані наступні способи захисту:

- застосування дводровових симетричних ліній зв'язку, добре ізольованих між собою та від землі;
- виключення застосування однодротових зовнішніх ліній зв'язку;
- екранування підземних кабелів з мідною, алюмінієвою, свинцевою оболонкою або прокладання їх в сталевих конструкціях, трубах;
- електромагнітне екранування блоків та вузлів апаратури;
- використання різного роду захисних вхідних пристроїв і грозозахисних засобів (троси, заземлюючі контури і т. ін.).

Як заходи захисту від прямого дотику застосовані: ізоляція струмоведучих частин; огороження і оболонки; бар'єри; розміщення поза зоною досяжності. Як заходи захисту у разі непрямого дотику застосовані: Автоматичне відключення живлення; ізолювальні зони; система зрівнювання потенціалів; електричне відокремлення кіл.

Існуючі та проєктовані заходи захисту від ураження електричним струмом відповідають вимогам ДСН 3.3.6.037, ДСНІП 239-96, ГОСТ 12.1.002-84, Д СанПіН 3.3.6-2002.

Струмоведучі частини повністю покриті ізоляцією, яка може бути усунена тільки шляхом руйнування. Ізоляція струмоведучих частин електрообладнання повинна відповідати стандартам або технічним умовам на це електрообладнання. Струмопровідні частини електрообладнання і ошиновка знаходяться поза зоною досяжності на висоті не менше 3,2 м від рівня землі.

Розподільний пристрій 6кВ і розташоване в окремому приміщенні. Струмоведучі частини РП вміщені в оболонки, якими забезпечується ступінь захисту не менше IP2X за ГОСТ 14254.

Для електрообладнання, яке може зберігати електричний заряд після відключення (наприклад, конденсатори), для запобігання дотику до нього повинен бути виконаний попереджувальний напис. Перед дотиком до струмоведучих частин відключених конденсаторних батарей необхідно провести додатковий розряд замиканням висновків накоротко і на корпус металевою шиною з заземлювальним провідником, укріпленої на ізолюючій штанзі.

Для забезпечення автоматичного відключення живлення необхідно виконати систему заземлення і основну систему зрівнювання потенціалів, а також забезпечити координацію характеристик захисних пристроїв, які здійснюють це відключення.

#### 4.5 Засоби індивідуального захисту

Для захисту органів слуху застосовують зовнішні і внутрішні противошуми (антифони). Як зовнішні противошуми рекомендують використовувати шумозахисні навушники, які покривають вушну раковину, як

внутрішні противошуми – заглушки, вкладиші, які вставляють в зовнішній слуховий прохід.

Ступінь ослаблення шуму залежить від конструкції противошуму і частоти. Заглушки послаблюють шум на 5-7 дБ при частотах до 500 Гц і на 15 дБ при частотах понад 3000 Гц. Протишуми конструкції МІОТ послаблюють шум до 8 дБ при частотах до 500 Гц і до 55 дБ при частотах 5000-7000 Гц.

Для захисту від низькочастотних шумів придатні заглушки – кліпси, які представляють собою гумові пробочки з плоскою торцевою поверхнею, які закріплені на обідку з сталевого дроту, що пружинить, діаметром 1,5-2 мм. Для захисту від тепловиділень на об'єкті застосовують щільні матеріали з тканини, а також захисні рукавички.

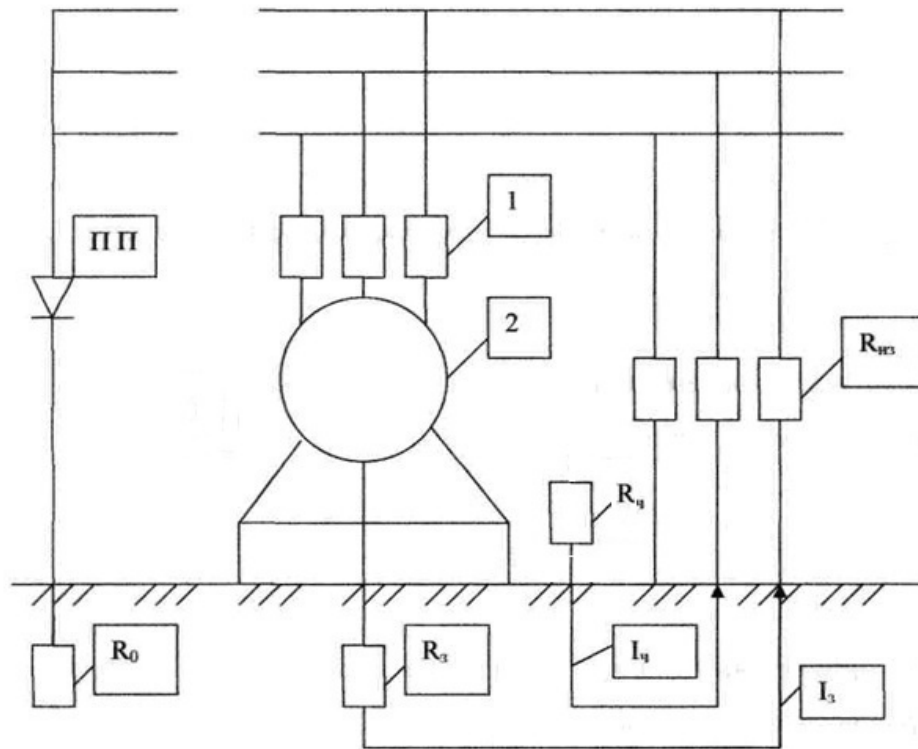
Для захисту органів дихання використовують фільтр типу «тюльпан». Інших засобів індивідуального захисту не передбачається.

#### 4.6 Інженерні рішення щодо забезпечення умов роботи з точки зору електробезпеки

Відкриті провідні частини електроустановки за допомогою захисних провідників повинні бути приєднані до системи заземлення. В ділянки застосований тип системи заземлення TN-C.

Захисне заземлення та заземлення системи блискавкозахисту будівель та споруд фабрики здійснюється за допомогою одного спільного заземлювального пристрою. В якості заземлюючих пристроїв використовуються природні і штучні заземлювачі, з'єднані сталевую смугою 40x4. Опір заземлювального пристрою, який є спільним для високовольтних і низьковольтних електроприймачів, не повинно перевищувати 0,5 Ом в будь-який час року.

Принципова схема заземлення електрообладнання показана на рисунку 4.1.



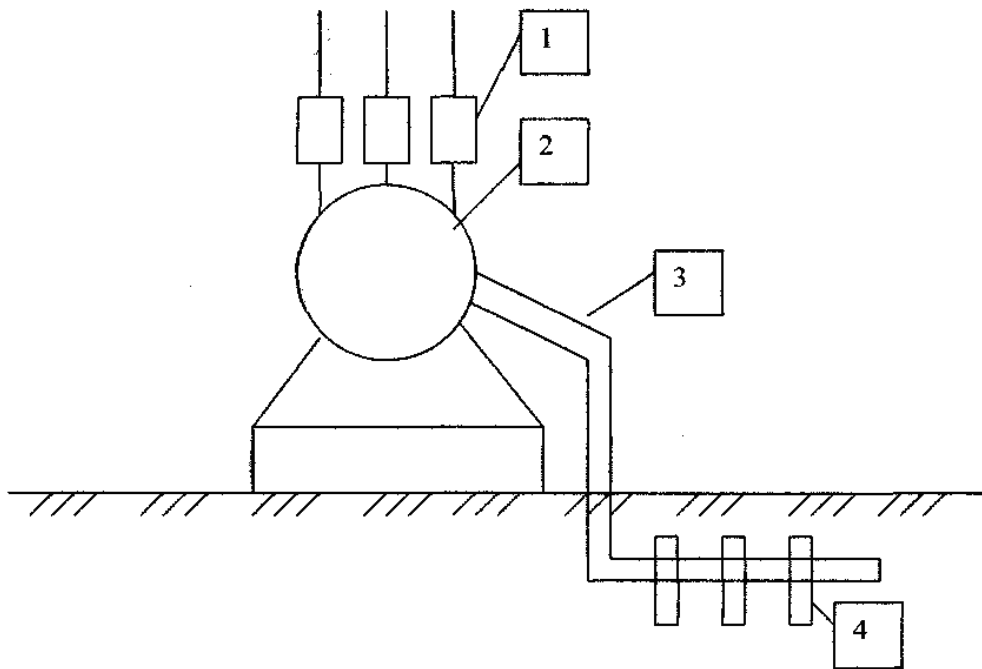
ПП - пробивний запобіжник;  $R_0$  - заземлення нульової крапки трансформатора;  $R_z$  - заземлюючий пристрій;  $R_{iz}$  - опір ізоляції;  $I_z$  - струм, замикання на землю;  $I_q$  - струм, що протікає через людину; 1 - плавкі вставки; 2 - електродвигун

Рисунок 4.1 Принципова схема захисного заземлення

Поразка людини електричним струмом може трапитися не тільки при дотику її до струмоведучих частин, але і в результаті контакту з металевими корпусами електроустаткування, яке випадково опинилося під напругою в наслідок пошкодження ізоляції. Для попередження подібних випадків поразки електричним струмом широко використовують захисне заземлення і занулення. Для розрахунку заземлюючого прибудові спочатку визначаємо опір розтікання струму одного вертикального електроду.

Прийmemo як заземлення вертикальні електроди стрижньові завдовжки 10 м і діаметром 11 мм Питомий опір ґрунту в місці розташування заземлень 100 Ом·м.

Схема заземлюючого пристрою показана на рисунку 4.2.



1 - плавкі вставки; 2 - електродвигун; 3 - сполучна смуга; 4 – трубчасте заземлення

Рисунок 4.2 Виконання заземлюючого пристрою

У кожній споруді виконана основна система зрівнювання потенціалів, яка реалізована шляхом приєднання до головної заземлювальної шини електроустановки таких провідних частин: захисних провідників; заземлювальних провідників пристроїв захисного та блискавко заземлень; металевих труб комунікацій; металевих частин каркаса будинку (споруди) і металевих конструкцій виробничого призначення; металевих частин систем вентиляції та кондиціонування; основних металевих частин будівельних конструкцій; металевих оболонок, екранів і броні кабелів.

Всі з'єднання виконуються зварюванням. Відкрито прокладені магістралі заземлення покриваються антикорозійною фарбою.

Глибина розташування середини електрода від поверхні землі:

$$t = t_0 + \frac{1}{2};$$

де  $t_0$  – відстань від верхньої точки трубчастого заземлення до поверхні землі, м ( $t_0$  = від 0,5 до 1 м).

У нашому випадку  $t_0 = 0,5$  м.

По-перше розрахуємо:  $t = 0,5 + \frac{10}{2} = 5,5$  м;

$$R_e = \frac{\rho}{(2\pi \cdot l)} \cdot \left[ \left( \ln \cdot \frac{2l}{d} \right) + \frac{1}{2} \cdot \ln \left( \frac{4t+l}{4t-l} \right) \right] \quad (4.1)$$

де  $R_E$  – опір розтіканню струму одного вертикального електроду, Ом

$\rho$  – питомий опір ґрунту в місці розташування заземлень, Ом·м

$l$  – довжина трубчастого електроду, м

$d$  – діаметр трубчастого електрода, м

$t$  – глибина розташування середини електрода від поверхні землі, м

Тепер ми маємо всі показники для розрахунку  $R_E$ :

$$R_e = \frac{100}{(2 \cdot 3,14 \cdot 10)} \cdot \left[ \left( \ln \frac{2 \cdot 10}{0,011} \right) + \frac{1}{2} \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot 5,5 + 10}{4 \cdot 5,5 - 10} \right) \right] = 9,07 \text{ Ом.}$$

Знайдену величину  $R_e$  порівнюємо з допустимим опором заземлюючого приборуду  $R_{дон}$ .

$R_e$  (9,07 Ом) >  $R_{дон}$  (4 Ом), тобто потрібно шукати необхідну кількість вертикальних електродів.

Для цього спочатку підрахуємо попередню кількість заземлень без урахування сполучної штиби (повинен бути цілим числом) по формулі:

$$n' = \frac{R_e}{R_{дон}} \quad (4.2)$$

де  $R_{дон}$  – допустимий опір заземлюючого пристрою, визначається залежно від напруги струму, який поданий на електроустановку.



У даному випадку: 4 Ом для установок з напругою до 1000 В.

$$n' = \frac{9.07}{4} \approx 3 \text{ шт.}$$

Потім встановлюємо потрібну кількість вертикальних електродів:

$$n = \frac{n'}{\eta_e}, \quad (4.3)$$

де  $n$  - коефіцієнт використання вертикальних електродів, який враховує обопільне екранування.

Для вибору цього коефіцієнту приймаємо значення відношення відстані між електродами до їх довжини «параметр  $a$ » і вибираємо  $a$  залежно від попередньої кількості заземлень  $n_1$  і «параметру  $a$ ».

Прийmemo  $a = 1$ . Заземлення розміщені в ряд. Тоді,:

$$n = \frac{3}{0.73} \approx 5 \text{ шт.}$$

Знаючи кількість заземлень, знаходимо довжину сполучної штиби ( $L$ ), яка сполучає всі вертикальні стрижньові електроди по формулі:

$$L = a \cdot n \cdot l, \quad (4.4)$$

де  $a$  – значення відношення відстані між електродами до їх довжини.

Розраховуємо довжину сполучної штиби:

$$L = 1 \cdot 5 \cdot 10 = 50 \text{ м.}$$

Розраховуємо опір розтіканню струму сполучної штиби без урахування екранування по формулі:

$$R_u = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left[ \ln \frac{2 \cdot L^2}{b \cdot t_0} \right], \quad (4.5)$$

де  $b$  – ширина сполучної штиби, м  $b=d$ .

$$R_u = \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \cdot \left[ \ln \frac{2 \cdot 50^2}{0,011 \cdot 0,5} \right] = 3,64 \text{ Ом.}$$

Останнім визначаємо загальний опір заземлюючого пристрою  $R_3$ , який складається з опору вертикальних електродів і опору сполучної штиби:

$$R_3 = \frac{R_e \cdot R_u}{R_e \cdot \eta_u + R_u \cdot \eta_l \cdot n} \quad (4.6)$$

де коефіцієнт використання сполучної штиби  $\eta_u = 0,72$ .

Розраховуємо загальний опір заземлюючого пристрою  $R_3$ :

$$R_3 = \frac{9,07 \cdot 3,64}{9,07 \cdot 0,72 + 3,64 \cdot 0,72 \cdot 5} = 1,68 \text{ Ом.}$$

Набуте значення  $R_3$  порівнюємо з  $R_{дон}$ .

$R_3$  (1,68 Ом) <  $R_{дон}$ (4 Ом), тобто опір заземлюючого пристрою менше допустимого опору.

Висновок: заземлення розраховане згідно з нормами і воно забезпечує безпеку працівників.

#### 4.7 Пожежна безпека

Відповідно до вимог СНиП 2.01.02-85 «Строительные нормы и правила противопожарные нормы» за ступенем вогнестійкості будівельних конструкцій цех відноситься до категорії "Г". Проектом передбачається можливість швидкої евакуації людей із приміщення ділянки. Ливарний цех має два евакуаційних виходи в протилежних боках будівлі. Двері зі службових і допоміжних приміщень відкривається убік ділянки. Мається також два пожежних сходи.

Гасіння пожеж на підстанції передбачається міською пожежною командою, а також первинними засобами гасіння пожежі, які встановлені на протипожежних щитах згідно таблиці 4.1.

Таблиця 4.2 – Первинні засоби вогнегасіння на підстанції

Найменування Споруди	Найменування та тип засобів вогнегасіння	Кіл-сть шт.
ВРУ – 35 кВ	Ящик з піском	2
	Щит с первинними засобами вогнегасіння	2
	Вогнегасник ОУ 8	2
ЗРУ-10 кВ	Вогнегасник ОУ 8	4
	Пересувний вогнегасник ОУ 80	1
ЗПК	Вогнегасник ОУ 2	4

До первинних засобів пожежогасіння в ділянки належать: пінні вогнегасники ОВП -10, порошкові вогнегасники ОП-5, ОП-7, пожежний інвентар (покривало з теплоізоляційної полотнини, шухляди з піском, діжки з водою, пожежні відра, совкові лопати, багри, ломи, сокири та ін.). У ділянки мається внутрішній протипожежний водопровід з пожежними кранами і рукавами, а також є пожежні щити, в комплект яких входять: два вогнегасники, шухляда з піском, два ломи, три багри, дві лопати. Для персоналу ділянки проводяться

протипожежні навчальні заходи раз у квартал; інструктаж із Охорони праці і пожежної безпеки. Ступінь вогнестійкості усіх будівель згідно СНиП2.01.02-85 “Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений” приймається II. До будівель і споруд забезпечуються під’їзди пожежних машин.

Прийнятий обсяг протипожежних заходів забезпечує вимоги ГОСТ12.1.004 – 91 «Пожарная безопасность. Общие требования».

#### 4.8 Охорона навколишнього середовища

Стан навколишнього середовища в Україні викликає серйозну стурбованість, оскільки є результатом економічних помилок і екологічних прорахунків, оскільки вже не можливе самовідновлення і самоочищення природного середовища, йде активна деградація і небезпечне знищення запасів природних ресурсів [10]. .

У зв'язку з цим сформульовані основні шляхи виходу України з важкої екологічної кризи:

- розробка комплексних програм по охороні природи на основі моніторингових спостережень;
- збільшення витрат на охорону природи і прискорення темпів будівництва природоохоронних об'єктів
- заборона відступу від проектів, які завдають шкоди навколишньому середовищу і інше.

Проектовані об'єкти системи електропостачання фабрики, шкідливих джерел впливу на навколишнє середовище не мають.

Електрообладнання ділянки за технологічним процесом воду і повітря не споживає, тому викидів забруднюючих атмосферу і воду немає.

Електромагнітне випромінювання від електрообладнання та кабельних ліній промислової частоти знаходиться в межах допустимих санітарних норм СН 245-75.

Радіаційне випромінювання від установлюваного електрообладнання, підвищує природний фон відсутній.

Низький рівень шуму і вібрації від встановленого електрообладнання забезпечується їх конструктивними рішеннями за рахунок низької потреби механічної енергії і становить 20 дБ, що не перевищує допустимі норми по СНіП П-12-77 «Захист від шуму».

При будівництві максимально зберігаються зелені насадження і рослинний покрив у місцях спорудження фундаментів і установки опор, після будівництва зелені насадження і рослинний покрив відновлюється.

При аварійних ситуаціях у проєктованій системі електропостачання відсутні шкідливі викиди небезпечні для життя і здоров'я людей.

Враховуючи екологічну безпеку об'єкта, заходи з охорони навколишнього середовища не передбачаються.

## ВИСНОВКИ

Основними результатами магістерського дослідження є теоретичні узагальнення та рекомендації щодо вирішення практичних проблем, пов'язаних з розробкою методологічного підходу до вибору фільтрокомпенсуючих пристроїв (ФКП) для систем електроживлення промислових підприємств.

У результаті дослідження було проведено аналіз існуючих способів придушення гармонік струму та компенсації реактивної потужності в системах електроживлення промислових підприємств. Було виявлено, що існує широкий спектр схемних і конструктивних рішень для вирішення цих завдань.

Також було проведено аналіз впливу вищих гармонік в сучасних системах електроживлення промислових підприємств. Було встановлено, що вищі гармоніки можуть призводити до таких негативних наслідків, як зниження надійності електроустаткування, зростання втрат енергії, погіршення якості продукції, а також підвищення ризику виникнення пожеж.

На основі проведеного аналізу було розроблено метод оцінки ефективності ФКП для зниження рівнів вищих гармонік і компенсації реактивної потужності. Цей метод базується на економічному критерії та дозволяє оцінити ефективність ФКП з урахуванням таких факторів, як вартість ФКП, економія енергії та зниження ризику аварій.

Крім того, у роботі було обґрунтовано метод обліку впливу гармонік струму нелінійних споживачів з використанням схем заміщення на частотах аналізованих гармонік струму. Цей метод дозволяє більш точно оцінити вплив нелінійних споживачів на рівень вищих гармонік в системі електроживлення.

Нарешті, було обґрунтовано структуру повної процедури прийняття рішення щодо вибору ФКП на основі техніко-економічних критеріїв. Ця процедура включає в себе такі етапи, як:

- Аналіз існуючої системи електроживлення та визначення вимог до ФКП.
- Розрахунок ефективності різних варіантів ФКП.

- Вибір оптимального варіанту ФКП.

Розроблений методологічний підхід до вибору ФКП може бути використаний для вирішення практичних проблем у системах електроживлення промислових підприємств. Він дозволяє більш точно оцінити ефективність ФКП та вибрати оптимальний варіант ФКП для конкретних умов.

Ось деякі конкретні приклади того, як результати дослідження можуть бути використані на практиці:

- Метод оцінки ефективності ФКП може бути використаний для порівняння різних варіантів ФКП та вибору найбільш ефективного з точки зору економічного критерію.

- Метод обліку впливу гармонік струму нелінійних споживачів може бути використаний для оцінки впливу цих гармонік на рівень вищих гармонік в системі електроживлення.

- Структура повної процедури прийняття рішення щодо вибору ФКП може бути використана для розробки методичних рекомендацій для підприємств з метою підвищення ефективності їх систем електроживлення.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Жежеленко І. В. Вищі гармоніки в системах електропостачання промислових підприємств. – 4-е вид., перероблене і доповнене – М.: Енергоатоміздат, 2000. – 331 с.
2. Жежеленко І. В., Саєнко Ю. Л. Якість електроенергії на промислових підприємствах. - 4-е вид., перероблене і доповнене - М.: Енергоатоміздат, 2005. – 261 с.
3. Жежеленко І. В., Шиманський О. Б. Електромагнітні перешкоди в системах електропостачання промислових підприємств. Київ, видавництво «Віща школа», 1986. – 119 с.
4. Омельчук А.О., Козирський А.В. та ін. Щодо участі синхронних двигунів у компенсації реактивної потужності // Промелектро. – 2005. - № 5. – С. 39 - 43.
5. Мустафа Г.М., Кутейнікова А.Ю. та ін. Применение гібридних фільтрів для підвищення якості електроенергії. – 1995. - № 10. Р. 33-39.
6. Закладний О.М., Закладний О.О. Сучасні методи регулювання якості електроенергії // Промелектро. – 2007. – № 2. – С. 25-30.
7. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навч. посіб. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
8. Довідник з проектування блоків живлення / Ред. Ю.Г. Барибіна. Москва, Видавництво «Енергоатоміздат», 1990. – 576 с.
9. Довідник з розрахунку електричних мереж / Під редакцією І.Ф. Шаповалова. – Київ, Видавництво «Будівельник», 1986. - 224 с.
10. Зінов'єв Г.С. Основа силової електроніки: Учебник [Основи силової електроніки: Підручник]. Новосибірськ: НСТУ Публ., 1999. Частина 1. – 199 с.
11. Федоров А.А., Рістеїн Е.М. Електропостачання промислових підприємств. М.: Видавництво «Енергія», 1981. – 360 с.



12. Федоров А.А., Каменєва В.В. Основи електропостачання промислових підприємств. М.: Видавництво «Енергоатоміздат», 1987. – 368 с.
13. Заал Р. Довідник з розрахунку фільтрів.- М.: Радіо і зв'язок, 1983. 752 с.
14. Грайсух М.В., Лазарєв С.С. Розрахунки по електропостачанню промислових підприємств. М., Видавництво «Енергія», 1977. 312 с.
15. Трошин В. А. Оптимізація режимів споживання електроенергії промисловими підприємствами. Частина 1. Красноярськ, 1970 рік. — 77 с.
16. Агунов А.В. Статичний компенсатор неактивних силових складових з повною компенсацією гармонійних складових струму навантаження. – 2002. – № 2. Р. 47–50.
17. Розанов Ю.К. Сучасні методи регулювання якості електроенергії засобами силової електроніки. – 1999. - № 4. Р. 28-32.
18. Розанов Ю.К., Рябчицький М.В. Сучасні методи підвищення якості електроенергії. – 1998. - № 3. Р. 10-16.
19. Розанов Ю.К., Рябчицький М.В., Квасюк А.А. та ін. Силова електроніка та якість електроенергії. – 2002. - № 2. Р. 16-23.
20. Прня Р. Якість напруги – нове у вирішенні задачі компенсації реактивної потужності // Електротехніка. – 1999. – № 4. – С. 32-34.
21. Масленніков Г.К., Дубінський Є.В. Забезпечення якості електроенергії в системах електропостачання загального призначення. – 2002. – № 1. Р. 47-50.
22. Зорін В.В. Концепція компенсації реактивної потужності в розподільчих електричних мережах // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2005. - № 3. – С. 24-26.
23. Прокопчик В. В. Підвищення якості електропостачання та ефективності електрообладнання підприємств з безперервними технологічними процесами. - Гомель: Гомельське державне технічне видавництво. Університет, 2002. – 283 с.
24. Іллінський Н.Ф., Рожановський Ю.В. та ін. Енергосбережна технологічна техніка електрособєнія народного хазяїства: Prakt. Переваги Під редакцією В.А. Венікова. Москва, Видавництво «Вища школа», 1989. 127 с.

25. Браславський І.Ю. Про зниження електроспоживання асинхронних електроприводів з тиристринними перетворювачами напруги [On Reduction electric Consumption of Asynchronous Electric Drive with tiristrone voltage [Про зниження електроспоживання асинхронних електроприводів з тиристринними перетворювачами напруги]. – 1988. - № 11. Р58-60.

26. Сінчук О.М., Алпатов А.В. Про критерії оцінки оптимальності роботи електроприводів, що виконуються системою ТПН-АД. Наукові праці КДПУ // КДПУ. – 2003. – № 2. Р. 56-59.

27. Родкін Д.І., Чорний А.П., Мартиненко В.А. Обґрунтування критеріїв якості перетворення енергії в електромеханічних системах. Наукові праці КДПУ // КДПУ. – 2002. – № 1. Р. 81-85.

28. Родькин Д.И., Корнет В.Н. К теории электропривода с емкостным накопителем // Вісник Кременчутського державного політехнічного університету: Зб. Наукових праць КДПУ // КДПУ. – 2000. – № 2. – С. 149-151.

29. Родкін Д.І. Розкладання складових полігармонічних сигналів. – 2003. - № 2. Р. 34-37.

30. Стульніков Г. В. Експериментальне дослідження впливу відхилень напруги на продуктивність механізмів окремих галузей промисловості. - 1972. - № 103. - Р. 91—96.

31. Константинов Б. А., Багієв Г. А., Воскобойніков Д. М., Зайцев Г. З., Піковський П. А. Основи підвищення якості електричної енергії в промисловості. - Рига: Латвійський республіканський інститут науково-технічної інформації, 1972. - 63 с. : іл.

32. Александров Н.А., Краснов В.С., Роговий В.І. Асинхронні двигуни частотно-регульованих електроприводів. Автоматизований електропривод, силові напівпровідникові прилади, перетворювальне обладнання / Під загальною редакцією Н.Ф. Ільїнського, І.А. Непмана, М.Г. Юнкова. Москва, Видавництво «Енергоатоміздат», 1983. - 470 с.

33. Колб А.А. Система автоматичного регулювання якості електроенергії на базі повністю керованих інверторів з релейно-векторним керуванням. Наукові праці КДПУ // КДПУ. – 2004. – № 25. Р. 37-41.

34. Луговой А.В., Родькин Д.И., Черный А.П. и др. Энергосберегающее оборудование для систем нерегулируемого электропривода // Вісник Кременчутського державного політехнічного університету: Зб. Наукових праць КДПУ // КДПУ. – 2000. – № 1. – С. 15-23.

35. Гітельсон С. М. Економічні рішення при проектуванні електропостачання промислових підприємств. М., Видавництво «Енергія», 1971. – 256 с.

36. Єрмілов А. А. Основи електропостачання промислових підприємств. М., Видавництво «Енергія», 1976. – 368 с.

37. Липкін Б. Ю. Електропостачання промислових підприємств і установок. 4-е вид., перероблене і доповнене, М., Видавництво «Вища школа», 1990. – 576 с.

38. Шидловськ Л. К., Кузнецов В. Підвищення якості енергії в електромережах. – Київ, Видавництво «Наукова думка», 1985. – 258 с.