

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“___” _____2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
«Компенсація реактивної потужності в електричних
мережах з нелінійними навантаженнями
Compensation of reactive power in electrical networks
with non-linea loads»

Виконав здобувач вищої освіти
ІІ курсу магістратури, групи ЕЕ-21М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Дмитро Кучеренко
«___» _____2022 р.

Керівник роботи
к.т.н, доцент
_____Олександр СІРІКОВ
«___» _____2022 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва та транспорту

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма

Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Петро ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

_____ Кучеренку Дмитру Петровичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Компенсація реактивної потужності в електричних мережах з нелінійними навантаженнями

Compensation of reactive power in electrical networks with non-linear loads

2. Керівник роботи Сіріков Олександр Іванович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 01.12.2022 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою роботи є підвищення економічності експлуатації систем електропостачання, шляхом компенсації реактивної потужності за умов наявності нелінійного електричного навантаження та вищих гармонік струму і напруги. Завдання роботи: теорія потужностей; коефіцієнт потужності та його вплив на джерело живлення; характеристики навантаження; зниження рівня вищих гармонік; фільтрокомпенсуючий пристрій, як засіб компенсації реактивної потужності і зменшення рівня вищих гармонік; охорона праці; економічна ефективність впровадження фільтрокомпенсуючого пристрою.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н., доц. Савеленко І.В.</i>		
<i>Економічна частина</i>	<i>к.е.н., доц. Журило І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>14.10.22</i>	
2	<i>Теорія потужностей</i>	<i>21.10.22</i>	
3	<i>Коефіцієнт потужності та його вплив на джерело живлення</i>	<i>28.10.22</i>	
4	<i>Характеристики навантаження</i>	<i>04.11.22</i>	
5	<i>Зниження рівня вищих гармонік</i>	<i>11.11.22</i>	
6	<i>Фільтрокомпенсуючий пристрій, як засіб компенсації реактивної потужності і зменшення рівня вищих гармонік</i>	<i>18.11.22</i>	
7	<i>Охорона праці</i>	<i>22.11.22</i>	
8	<i>Економічна ефективність впровадження фільтрокомпенсуючого пристрою</i>	<i>25.11.22</i>	
9	<i>Висновки</i>	<i>29.11.22</i>	
10	<i>Література</i>	<i>30.11.22</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2022 р.

Підпис керівника

_____ Сіріков О.І.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2022 р.

Підпис здобувача

_____ Кучеренко Д.П.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кучеренко Д.П. Компенсація реактивної потужності в електричних мережах з нелінійними навантаженнями.

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2022.

Метою роботи є підвищення економічності експлуатації систем електропостачання, шляхом компенсації реактивної потужності за умов наявності нелінійного електричного навантаження та вищих гармонік струму і напруги.

В роботі розглянута сучасна теорія електричної потужності. За умов нелінійної вольт-амперної характеристики навантаження виникає потужність викривлення. Вона подібна до реактивної потужності, тому необхідно її враховувати при компенсації. Постійний перетік енергії між споживачем та джерелом призводить до негативних процесів в системах електропостачання серед яких втрата активної потужності та завантаження системи електропостачання реактивними струмами.

Аналіз характеристик навантаження показує, що основними причинами появи вищих гармонік є широке впровадження випрямлячів, які є першою ланкою, як для звичайних побутових приладів, так і потужних промислових перетворювачів частоти.

Аналіз способів боротьби з вищими гармоніками показує, що на стадії проектування можливе впровадження схемних рішень, а на стадії діючих систем електропостачання найбільш економічно вигідним є використання фільтрокомпенсуючих пристроїв, що крім зниження рівня вищих гармонік дозволяють компенсувати реактивну потужність. В роботі наведена методика вибору та розрахунку фільтрокомпенсуючого пристрою.

Ключові слова: нелінійне навантаження, вищі гармоніки, компенсація реактивної потужності, фільтрокомпенсуючий пристрій.

Kucherenko D.P. Compensation of reactive power in electrical networks with non-linear loads.

Qualification work for the second (master's) level of higher education in specialty 141 «Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics», educational and professional program «Electrical engineering systems of electricity consumption», Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2022.

The purpose of the work is to increase the efficiency of operation of power supply systems by compensating reactive power in the presence of non-linear electrical load and higher current and voltage harmonics.

The work deals with the modern theory of electric power. Under the conditions of a non-linear current-voltage characteristic of the load, distortion power occurs. It is similar to reactive power, so it must be taken into account during compensation. The constant flow of energy between the consumer and the source leads to negative processes in power supply systems, including loss of active power and loading of the power supply system with reactive currents.

The analysis of the load characteristics shows that the main reasons for the appearance of higher harmonics are the widespread introduction of rectifiers, which are the first link, both for ordinary household appliances and powerful industrial frequency converters.

The analysis of methods of combating higher harmonics shows that at the design stage it is possible to implement circuit solutions, and at the stage of operating power supply systems, the most economically beneficial is the use of filter-compensating devices, which, in addition to reducing the level of higher harmonics, make it possible to compensate for reactive power. The method of selection and calculation of the filter-compensating device is given in the work.

Keywords: non-linear load, higher harmonics, reactive power compensation, filter compensating device.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРІЯ ПОТУЖНОСТЕЙ	10
1.1 Активна потужність.....	10
1.2 Повна потужність.....	10
1.3 Реактивна потужність.....	14
1.4 Приймачі та джерела реактивної потужності	15
1.5 Потужність – часова та частотна область	16
1.5.1 Частотна область.....	16
1.5.2 Часова область.....	18
РОЗДІЛ 2 КОЕФІЦІЄНТ ПОТУЖНОСТІ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ	19
2.1 Загальні положення	19
2.2 Мета корекції коефіцієнта потужності.....	23
2.3 Основні джерела спотворень потужності	24
2.4 Методи компенсації реактивної потужності.....	25
РОЗДІЛ 3 ХАРАКТЕРИСТИКИ НАВАНТАЖЕННЯ.....	30
3.1 Загальні поняття про гармоніки	30
3.2 Лінійні та нелінійні навантаження.....	32
3.3 Аналіз Фур'є	35
3.4 Види нелінійних навантажень	39
3.4.1 Перетворювачі АС-DC	40
3.4.2 Люмінесцентне освітлення	43
3.5 Резонансні явища	45
3.5.1 Паралельний резонанс.....	45
3.5.2 Послідовний резонанс	48

	7
РОЗДІЛ 4 ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК.....	50
4.1 Огляд методів зниження вищих гармонік.....	50
4.2 Перетворювачі частоти	52
4.3 Фільтри вищих гармонік	53
РОЗДІЛ 5 ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИЙ ПРИСТРІЙ, ЯК ЗАСІБ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ І ЗМЕНШЕННЯ РІВНЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК ...	60
5.1 Методика вибору фільтрокомпенсуючого пристрою	60
5.2 Розрахунок силового резонансного фільтра	65
5.3 Розрахунок фільтрокомпенсуючого пристрою.....	69
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ	79
6.1 Розрахунок заземлюючого обладнання.....	79
6.2 Грозозахист.....	80
6.3 Організаційні заходи при виконанні робіт в електроустановках підстанцій, електростанцій, на кабельних лініях та лініях зв'язку	82
6.4. Організаційні заходи при виконанні робіт на повітряних лініях електропередачі.....	84
7. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧОГО ПРИСТРОЮ.....	87
7.1. Визначення додаткових капіталовкладень.....	87
7.2. Визначення експлуатаційних витрат	88
7.3. Визначення економічної ефективності.....	91
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	94

ВСТУП

Протягом останніх років інтерес до компенсації реактивної потужності зростає, головним чином через те, що постачальник енергії стягує з клієнта плату за реактивну потужність. Крім того, ціна на енергоносії зростає, що змушує промислові підприємства та побутових споживачів мінімізувати споживання енергії, в тому числі і реактивної. Метою є мінімізація потоку реактивної потужності в системах постачання та розподілу, усунення або мінімізація плати за реактивну потужність. По суті, постачальники енергії хочуть, щоб їхні клієнти компенсували реактивну потужність. Є кілька рішень, які дозволяють вирішити проблему компенсації реактивної потужності. Одним з них є компенсуючий пристрій на основі силових конденсаторів. Це найпопулярніший компенсуючий пристрій, в основному з економічних причин, вони відносно дешеві в порівнянні, наприклад, з активними фільтрами або компенсацією за допомогою електродвигунів.

Актуальність роботи. З'являється все більше споживачів енергії, які використовують пристрої з нелінійною вольт-амперною характеристикою, що впливає на якість електроенергії, що постачається енергопостачальником. Цей тип пристроїв, підключених до мережі, генерує гармоніки вищого порядку, які, у свою чергу, є основною причиною спотворення напруги. Гармоніки стали найбільш значимою причиною погіршення якості електроенергії, і проблема досі не вирішена, оскільки вона посилюється.

Основним моментом підвищення якості електроенергії є розуміння проблеми споживачами та постачальниками енергії. Щоб описати джерела спотворення потужності, необхідно визначити, які параметри потужності впливають на якість електричної енергії.

Мета роботи і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення економічності експлуатації систем електропостачання, шляхом компенсації реактивної потужності за умов наявності нелінійного електричного навантаження та вищих гармонік струму і напруги.

Для досягнення вказаної мети потрібно розв'язати наступні задачі:

- розглянути теорію електричних потужностей;
- розглянути визначення коефіцієнту потужності та його вплив на джерело живлення;
- розглянути електричні характеристики навантаження (споживачів);
- проаналізувати способи зниження рівня вищих гармонік;
- розглянути теорію фільтрокомпенсуючого пристрою, як засобу компенсації реактивної потужності та зменшення рівня вищих гармонік.

Об'єкт дослідження. Компенсація реактивної потужності в електричних мережах з нелінійними електричними навантаженнями.

Предмет дослідження. Теоретичні засади та способи компенсації реактивної потужності в електричних мережах з нелінійними електричними навантаженнями.

Методи досліджень базуються на використанні: аналізу та систематизації при розгляді теоретичних засад виникнення вищих гармонік в електричних мережах з нелінійними навантаженнями, розгляді способів компенсації реактивної потужності в мережах з нелінійними електричними навантаженнями за наявності вищих гармонік струму та напруги.

Основні практичні результати, їх значення.

1. Розглянуті сучасні підходи до теоретичних засад виникнення вищих гармонік в електричних мережах з нелінійними навантаженнями, що дозволяє розробляти сучасні фільтрокомпенсуючі пристрої на базі перетворювальної техніки.

2. Проаналізовані способи компенсації реактивної потужності в мережах з нелінійними навантаженнями, що дозволяють обрати найбільш доцільний спосіб з врахуванням конкретних умов експлуатації.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРІЯ ПОТУЖНОСТЕЙ

1.1 Активна потужність

«Потужність – це міра енергії в одиницю часу. Отже, потужність дає швидкість споживання енергії або її виробництва. Одиницями потужності є ват (Вт). Загальна кількість енергії споживана приладом визначається, як потужність, помножена на кількість часу, протягом якого він був включений; ця енергія може бути виражена в одиницях ват-години Вт·год (або, частіше, кіловат-години кВт·год). Потужність, що розсіюється елементом схеми – приладом чи просто проводом – визначається, як добуток його опору на квадрат струму через нього:

$$P = I^2 R.$$

Термін «розсіюється» означає, що електрична енергія перетворюється на тепло. Це тепло може бути частиною призначеної функції приладу (як і в будь-якому електричному нагрівальному пристрої), або його можна вважати як втрати (як при резистивному нагріванні ЛЕП); фізичний процес однаковий. Інший, більш загальний спосіб обчислення потужності – це добуток струму та напруги:

$$P = IV.$$

Для резистивного елемента, можна застосувати закон Ома, щоб побачити, що формули $P = I^2 R$ та $P = I^2 R$ складають те ж саме:» [1]

$$P = IV = I(IR) = I^2 R.$$

1.2 Повна потужність

Застосування простої формули стає більш проблематичним, коли напруга та струм змінюються з часом, як це відбувається в системах змінного струму. У

найбільш короткому, але абстрактному позначенні, потужність, струм і напруга є комплексними величинами, і рівняння для потужності виглядає як [1]

$$S = I^*V$$

де S – уявна потужність, а зірочка позначає комплексне спряження струму I , що означає, що для цілей обчислення знак (позитивний чи від’ємний) його уявної складової має бути змінений на протилежний. В інтересах розвитку концептуального розуміння змінної потужності, розглянемо потужність, напругу та струм, як реальні величин, що змінюються в часі. Фундаментальний та правильний спосіб інтерпретувати, коли I і V змінюються в часі, тобто застосування миттєвих умов. Миттєва потужність дорівнює миттєвому добутку струму та напруги. Іншими словами, у будь-який момент потужність дорівнює помноженню напруги на струм у цей момент. Це виражається записом кожної змінної, як функції часу, [1]

$$P(t) = I(t)V(t),$$

де t є однаковим у всьому рівнянні (тобто однаковий момент).

Однак миттєва потужність, як така зазвичай нам не дуже корисна. У системах живлення нам, як правило, потрібно знати про потужність, що передається або споживається в масштабі часу, значно більшому за 1/50 секунди. Тому нам потрібен вираз для потужності, усередненої за повними циклами змінного струму та напруги. Розглянемо спочатку випадок чисто резистивного навантаження. Напруга і струм знаходяться в фазі; вони коливаються одночасно. Середню потужність (середній добуток напруги та струму) можна отримати, взявши середні значення (середньоквадратичні значення) кожного з них і потім помноживши їх разом [1]. Таким чином,

$$P_{\text{ave}} = I_{\text{RMS}} V_{\text{RMS}}.$$

Потужність для резистивного навантаження показана на рис. 1.1. Тепер розглянемо навантаження з реактивним опором. Відносний час напруги та струму було зміщено; їхні максимуми вже не збігаються. Фактично, одна величина іноді є негативною, тоді як інша позитивна. У результаті миттєва потужність, що передається або споживається (добуток напруги та струму), іноді є від'ємною, що показано на рис. 1.2.

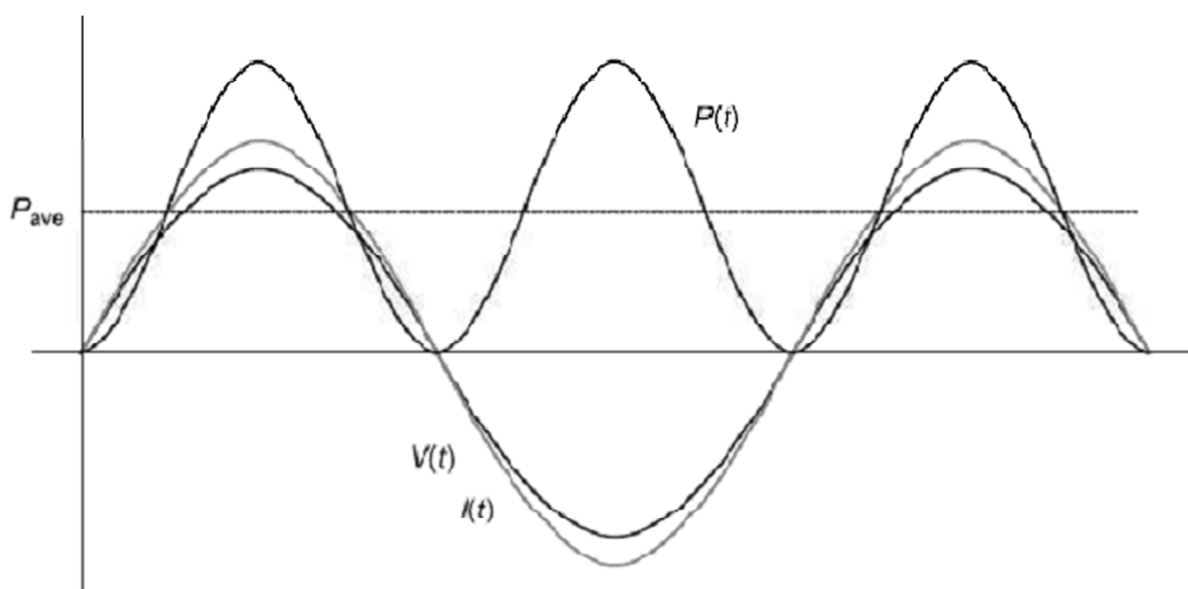


Рис. 1.1. Потужність, як добуток напруги та струму, що співпадають по фазі [1].

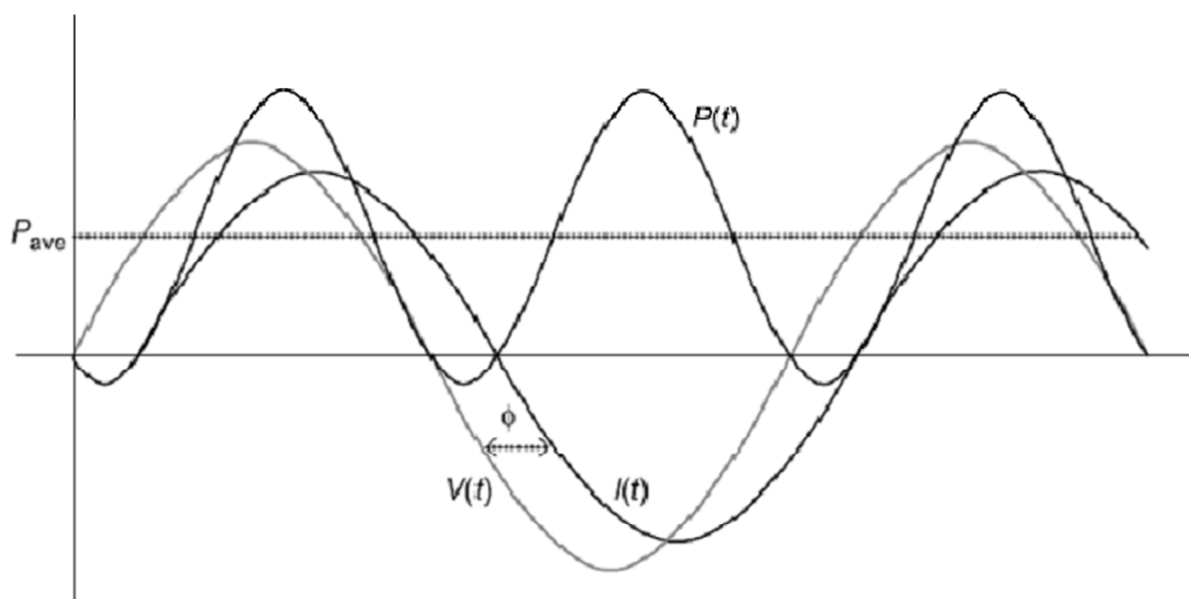


Рис. 1.2. Потужність, як добуток напруги та струму, струм відстає від напруги на фазовий кут ϕ [1].

Ми можемо інтерпретувати негативну миттєву потужність, як таку що тече «назад» уздовж лінії електропередачі або виходить із навантаження назад у генератор. [1]

Енергія, яка передається вперед і назад, належить електричним або магнітним полям в навантаженнях та генераторах. Оскільки миттєва потужність іноді негативна, середня потужність є менша, ніж при чисто резистивному навантаженні. Середня потужність безпосередньо пов'язана з величиною фазового зсуву між напругою та струмом. Зменшення середньої потужності внаслідок зсуву фази визначається косинусом кута зсуву:

$$P_{\text{ave}} = I_{\text{RMS}} V_{\text{RMS}} \cos \phi.$$

Коефіцієнт $\cos \phi$ називається коефіцієнтом потужності. Це ж рівняння також можна записати як

$$P_{\text{ave}} = (1/2) I_{\text{max}} V_{\text{max}} \cos \phi,$$

Воно є ідентичним попередньому, оскільки кожне середньоквадратичне значення пов'язане з максимальним значенням (амплітудою) коефіцієнтом $1/\sqrt{2}$. Це рівняння є вірним для будь-якого виду навантаження. В особливому випадку, коли є лише активний опір і немає зсуву фази, ми маємо $\phi = 0$ і $\cos \phi = 1$. В іншому особливому випадку, коли навантаження є суто реактивним (без активного опору взагалі), фазовий зсув буде $\phi = 90$ і $\cos \phi = 0$, що означає, що потужність лише коливається туди-сюди, але не розсіюється (середня потужність дорівнює нулю).

Існують інші аспекти переданої потужності, які ми хочемо уточнити. Добуток струму і напруги, незалежно від їх фазового зсуву, називається повною потужністю і позначається символом S . Її величина визначається як [1]

$$S = I_{\text{RMS}} V_{\text{RMS}}.$$

Незважаючи на те, що уявна й реальна частина фізично мають однакові одиниці, вони виражаються по-різному, щоб зберегти очевидну відмінність. Таким чином, одиниці повної потужності називаються вольт-амперами (ВА). Уявна потужність важлива в контексті вибору потужності електротехнічного обладнання.

1.3 Реактивна потужність

Отже, ми можемо визначити те, що є різницею між уявною та реальною потужністю, а саме реактивну потужність. Реактивна потужність – це компонент потужності, який коливається вперед і назад через лінії, обмінюючись між електричним і магнітним полями і не розсіюючись. Він позначається символом Q , а його величина задається [1]

$$Q = I_{\text{RMS}} V_{\text{RMS}} \sin \phi.$$

Знову ж таки, для чисто резистивного випадку, де $\phi = 0$ то $\sin \phi = 0$, тоді реактивної потужності взагалі не буде. Реактивна потужність вимірюється у варах (також пишеться Вар або VAR), для реактивної вольт-амперної потужності. Ми можемо представити потужність у вигляді вектора в комплексній площині, а саме стрілку довжини S (повна потужність), яка утворює кут ϕ з реальною віссю. Це показано на рис. 1.3 нижче. Кут ϕ дорівнює різниці фаз між напругою та струмом. [1]

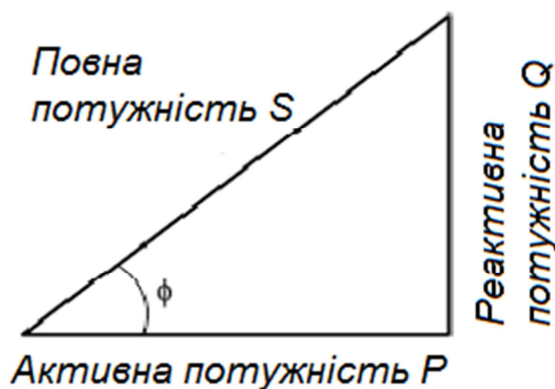


Рис. 1.3. Трикутник потужності [1].

1.4 Приймачі та джерела реактивної потужності

Пристрої, які споживають реактивний індуктивний струм, прийнято називати приймачами реактивної потужності, а пристрої, що споживають реактивний ємнісний струм, – джерелами реактивної потужності. [2]

Велика частина промислового обладнання споживає реактивну потужність. Це електродвигуни, трансформатори, провідники, дроселі, перетворювачі, дугові печі та силова електроніка. У довільному контурі без джерела енергії реактивна потужність пов'язана з частотою та піковим значенням енергії, що періодично накопичується в магнітному та електричному полях елементів кола. [2]

Реактивна потужність індуктивних і ємнісних елементів, Q_R і Q_L відповідно, може бути виражена як:

$$Q_L = UI \sin(\pi/2) = \omega L I^2 = \omega L I_m^2 / 2 = \omega \varepsilon_{mM}, \quad (1.1)$$

$$Q_C = UI \sin(-\pi/2) = -U \omega C U = -\omega C U_m^2 / 2 = \omega \varepsilon_{mE}, \quad (1.2)$$

де ε_{mM} і ε_{mE} максимальне значення енергії, що зберігається в магнітному полі індуктивних елементів кола та електричному полі ємнісних елементів. [2]

Виходячи із закону збереження енергії, вхідна реактивна потужність у ланцюзі без джерела енергії дорівнює алгебраїчній сумі реактивних потужностей індуктивних та ємнісних елементів, включених у ланцюг, тобто: [2]

$$Q = \Sigma(Q_L + Q_C) = \omega \Sigma(\varepsilon_{mM} - \varepsilon_{mE}). \quad (1.3)$$

Розглядаючи будь-яке електричне коло, відомо, що вироблена реактивна енергія дорівнює спожитій. Більшість навантажень у промисловості є навантаженнями, для роботи яких потрібна індукційна реактивна енергія. З цієї причини потреба в реактивній потужності набагато більша, ніж може виробити генератор. Тому існують пристрої, які є додатковими джерелами для індуктивної реактивної потужності. До таких пристроїв відносяться: батареї конденсаторів, синхронні двигуни, силові електронні джерела реактивної потужності. Взаємодія

компенсаційних пристроїв з лінійними ланцюгами призводить до зменшення реактивної складової живлячого струму. [2]

1.5 Потужність – часова та частотна область

Існує багато теорій про потужність в електричних колах, але є дві групи, на які їх можна розділити. Одна з них розглядає частотну область, а друга стосується часових областей. Перш ніж пояснювати ці два підходи, необхідно ввести одне визначення, а саме потужність спотворення. Потужністю спотворення виникає, коли миттєві значення напруги і струму на затискачах ланцюга не відповідають закону Ома. Потужність спотворення можна визначити на основі активної та повної потужності

$$D^2 = S^2 - P^2. \quad (1.4)$$

Потужність спотворення лінійного електричного кола часто називають потужністю фазового зсуву, тому що фазовий зсув між напругою та струмом викликає цю потужність.

1.5.1 Частотна область

а) Теорія Буденау

Теорія потужності в частотній області була опублікована в 1927 році Буденау. Він ввів два рівняння для потужності в нелінійних електричних колах, що живляться синусоїдальною напругою, з періодичними несинусоїдальними формами струму. Буденау визначив реактивну потужність як [2]:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n. \quad (1.5)$$

Він також представив компонент потужності, так звану потужність спотворення D , описавши її наступним чином:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2. \quad (1.6)$$

б) теорія Харашима

Харашім припустив, що синусоїдальну напругу та струм навантаження можна виразити наступними формулами [2]:

$$u = A \sin \omega t, \quad (1.7)$$

$$i = B_1 \sin \omega t + C_1 \cos \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} C_n \cos(n\omega t), \quad (1.8)$$

$$u = B_1 \sin \omega t + C_1 \cos \omega t + \sum_{n=2}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} C_n \cos(n\omega t). \quad (1.9)$$

Струм навантаження містить активну та реактивну складові основної гармоніки та суму гармонік вищого порядку. Суму можна розглядати як складову спотворення струму. Наведені вище формули свідчать, що якщо відомі значення струму навантаження та амплітуда активної складової, то можна визначити реактивну складову струму навантаження [2].

$$i_q = i - B_1 \sin \omega t. \quad (1.10)$$

Амплітуду активної складової струму навантаження можна визначити за значенням активної потужності навантаження [2]

$$\begin{aligned} & \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} u i dt = \\ & = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} A \sin \omega t \left[\sum_{n=1}^{\infty} B_{2n-1} \sin(2n-1)\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} C(2n-1)\omega t \cos(2n-1)\omega t \right] dt = \quad (1.11) \\ & = \left(\frac{A}{2} \right) B_1 \end{aligned}$$

1.5.2 Часова область

Теорія Фріза

Теорія Фрайза 1932 року припускає, що повна потужність S електричного кола містить дві складові потужності, активну складову P і реактивну складову Q , які описуються такими формулами [2]:

$$S = IU, \quad (1.12)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt, \quad (1.13)$$

$$Q^2 = S^2 - P^2. \quad (1.14)$$

Відповідно до теорії, все інше, крім активної потужності, вважається реактивною потужністю і має бути вилучено з кола. Миттєве значення струму приймача можна представити як суму активної (i_r) та реактивної (i_q) складових струму навантаження [2]

$$i = i_r + i_q, \quad i_r = \frac{P}{\|u\|^2} u, \quad i_q = i - i_r. \quad (1.15)$$

РОЗДІЛ 2

КОЕФІЦІЄНТ ПОТУЖНОСТІ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ

2.1 Загальні положення

Визначення коефіцієнта потужності характеризується з ланцюгами синусоїдального струму. У лінійному ланцюзі змінного струму, що живиться від синусоїдальної напруги, коефіцієнт потужності називається $\cos\varphi$, де φ є кутом зсуву фази між синусоїдальною формою сигналу напруги живлення та синусоїдальною формою струму, тобто [2, 3]:

$$\lambda = \cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{UI \cos\varphi}{UI}. \quad (2.1)$$

Отже, можна сказати, що коефіцієнт потужності електричного кола показує, яку частину енергії може отримати коло від джерела живлення. Іншими словами, якщо приймач здатний отримати всю потужність, що надходить від джерела, то значення коефіцієнта потужності дорівнює одиниці. Така ситуація можлива, коли виконується закон Ома. Основною причиною того, що значення коефіцієнта потужності менше одиниці, є те, що електричне коло накопичує певну частину енергії. Крім того, спотворення форми сигналу струму відносно форм сигналу напруги призводить до того, що значення коефіцієнта потужності буде менше одиниці. Практично існує багато схем, які можуть мати обидві згадані характеристики, наприклад, тиристорний регулятор з навантаженням RL . У такому випадку коефіцієнт потужності можна виразити як: [2, 3]

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt}{\frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T u^2(t)dt \int_0^T i^2(t)dt}}. \quad (2.2)$$

В синусоїдальних електричних колах, які спричиняють несинусоїдальний періодичний струм, необхідно враховувати дві складові коефіцієнта потужності, тобто компонент, пов'язаний із зсувом фаз між першою гармонікою струму та напругою, який називається $\cos \varphi$. Другий компонент пов'язаний із спотворенням форми струму відносно форми напруги та позначається як γ . Коефіцієнт фазового зсуву та коефіцієнт спотворення виражаються відповідно наступними формулами [2]:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (2.3)$$

$$\gamma = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2}}, \quad (2.4)$$

де: I_1 – середньоквадратичне значення основної гармоніки струму, I – середньоквадратичне значення струму, що протікає в колі.

Щоб оцінити вміст гармонік вищого порядку в синусоїдальному струмі або напруги, було введено коефіцієнт THD (загальне гармонічне спотворення) [2]:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} A_n^2}{A_1^2}}. \quad (2.5)$$

Де n позначає гармонійний порядок, індекс «1» – основну або першу гармоніку A . Буква « A » означає струм або напругу.

Існує можливість виразити вміст гармонік у формі сигналу струму або напруги за допомогою коефіцієнта спотворення напруги або струму, який визначається такою формулою:

$$\gamma = \frac{A_1}{A}, \quad (2.6)$$

де: A_1 – середньоквадратичне значення першої гармоніки, A – середньоквадратичне значення аналізованого сигналу.

Можна помітити, що існує зв'язок між двома величинами, тобто:

$$THD^2 = \left(\frac{1}{\gamma} \right)^2 - 1. \quad (2.7)$$

Можна також визначити індивідуальний коефіцієнт гармонійних спотворень HD , який описується відношенням гармоніки порядку « n » сигналу A до основної або першої гармоніки цього сигналу

$$HD = \frac{A_n}{A_1}. \quad (2.8)$$

Коефіцієнт HD дає більш чітку оцінку впливу гармоніки n -го порядку на форму сигналу A . Тому коефіцієнт потужності буде подано як [2]:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \gamma \cos \varphi = \frac{I_1}{I} \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{P}{U \sum_{k=0}^{\infty} I_k^2}, \quad (2.9)$$

Значення коефіцієнта потужності навантажень, які взаємодіють з енергосистемою, впливає на режими напруги. Крім того, ступінь використання енергогенеруючих і передаючих блоків залежить від значення коефіцієнта потужності підключених до мережі навантажень. Усі пристрої, включені в систему живлення, визначають максимальний струм, який може протікати через них, не спричиняючи збоїв у роботі через нагрівання. У трифазних ланцюгах для пристрою з номінальною потужністю P значення струму можна розрахувати за [2]:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U\lambda}, \quad (2.10)$$

Наведена вище залежність говорить про те, що для конкретного електроприладу з номінальним струмом I_n при постійному рівні напруги U відношення номінальної потужності P_n до коефіцієнта потужності є постійним. Якщо зменшити значення коефіцієнта потужності, то в результаті буде обмежений потік активної потужності, що, у свою чергу, зменшить здатність передачі енергії фідерів, трансформаторів, а також апаратів, які генерують енергію [2].

Зменшення значення коефіцієнта потужності навантаження, підключеного до мережі, викликає підвищення напруги якоря живлячого генератора. Тому доводиться мати справу з падінням напруги, яке генерується. Щоб протидіяти падінню напруги, потрібно посилити збудження. Але це рішення також має обмеження через обмеження температури ротора. Тому необхідно зменшити активну потужність навантаження. Тому активна потужність генератора, як функція зміни коефіцієнта потужності зменшується набагато швидше, ніж це видно з формул. [2]

Напруга живлення електричних навантажень строго залежить від падінь напруги вздовж фідера. Для синусоїдального струму падіння напруги в фідері опору R і реактивного опору X розраховується як: [2]

$$\Delta P = RI\cos\varphi - XI\sin\varphi, \quad (2.11)$$

Падіння напруги особливо спостерігається в лінії високої напруги, де співвідношення X/R більше 1. Втрати потужності в лінії електропередачі обернено пропорційні квадрату коефіцієнта потужності при постійному значенні переданої активної потужності. Розглянемо живлення з опором R і струмом I , що протікає через нього, викликаючи падіння напруги ΔU та втрати активної потужності ΔP , тоді [2]

$$\Delta P = I \Delta U = I^2 R. \quad (2.12)$$

Для трифазної системи втрати активної потужності можна знайти за формулою

$$\Delta P = 3I^2 R. \quad (2.13)$$

Підставляючи (2.10) значення струму електроприладу до ΔP рівняння (2.12), можна отримати

$$\Delta P = \frac{P^2 R}{U^2 \cos \varphi}, \quad (2.14)$$

Необхідно зауважити, що реактивна потужність має такі ж наслідки для лінії, як і активна потужність. Втрати активної потужності, викликані електричним навантаженням номінальної потужності P і Q , підключеним до лінії, розраховуються як: [2]

$$\Delta P = \left(\frac{P^2}{U^2} + \frac{Q^2}{U^2} \right) R. \quad (2.15)$$

Наведена вище формула показує, що при постійному значенні опору лінії, втрата потужності та напруги збільшується при збільшенні реактивної потужності [2].

2.2 Мета корекції коефіцієнта потужності

В більшості випадках навантаження має індуктивний характер, що обумовлює превалювання індуктивного струму в мережі. Щоб запобігти цьому, певна кількість реактивної потужності повинна бути подана в мережу для компенсації реактивних навантажень. У більшості випадків компенсація реактивної потужності проводиться з економічних причин. Промисловий завод, який споживає занадто багато реактивної потужності, певним чином намагається

її компенсувати. Коли в мережі відсутні будь-які компенсатори, постачальник енергії повинен надати всю реактивну потужність, яка була спожита. Тому енергопостачальники в такому випадку беруть плату з покупця. Основними цілями компенсації реактивної потужності є [4]:

- підтримання $\text{tg}\delta$, визначеного постачальником енергії, щоб уникнути оплати;
- споживання енергії стає дешевшим;
- покращення якості електроенергії;
- зниження втрат електроенергії;
- зменшення перерізу проводів;
- зниження потужності трансформаторів, а також втрат в них;
- менший спад напруги живлячій мережі.

2.3 Основні джерела спотворень потужності

Характерною особливістю електроенергії є те, що її якість безпосередньо залежить від кінцевого споживача. Факторами, які найбільше впливають на якість електроенергії, є: несправності в енергосистемі, мережі підстанцій, а також включення та відключення навантажень великої потужності. Крім того, встановлення великої кількості нелінійних навантажень, таких як освітлення, електронні пристрої, керований електропривод великої потужності має негативні наслідки. Можна виділити три групи джерел гармонік в енергосистемі [5]:

- дугові пристрої, такі як дугові печі, зварювальні апарати тощо;
- пристрої з феромагнітними осердям, такі як трансформатори, електродвигуни або генератори;
- електронні та силові електронні пристрої.

Споживачі електроенергії використовують велику кількість пристроїв, що перетворюють енергію. Ці пристрої дуже часто складаються з конденсаторів, фільтрів, випрямлячів. Сучасні комп'ютери, телевізори та освітлення також впливають на форму кривої струми. Нелінійні навантаження створюють гармоніки вищого порядку, особливо 3-ю, 5-ю, 7-му тощо. Наявність гармонік

струмів викликають нелінійне падіння напруги на опорі, що призводить до спотворення кривої напруги [5].

В ідеальній системі живлення форма хвилі струму та напруги є строго синусоїдальною. У випадку, коли в системі є нелінійні навантаження, форми сигналів спотворюються. В результаті нелінійних навантажень може виникнути проблема зі збільшенням середньоквадратичного струму конденсаторів для компенсації реактивної потужності. Пристроями, схильними до гармонік, є, крім іншого, трансформатори. Наявність гармонік збільшує втрати потужності осердя трансформатора. Спотворені струми можуть спричинити [5]:

- більшу потужність живлення;
- більші втрати потужності в ЛЕП;
- некоректну роботу захисту;
- перегрів трансформаторів і двигунів;
- несправність конденсаторів компенсації реактивної потужності;
- збільшення сили струму в нейтральному провіднику;
- завади для чутливих пристроїв;
- менший термін служби ізоляції.

2.4 Методи компенсації реактивної потужності

Небажане значення коефіцієнта потужності, викликане індуктивним навантаженням, підключеним до живильної мережі, можна виправити (компенсувати) за допомогою навантажень, які мають ємнісні властивості. На практиці існує дві групи способів компенсації реактивної потужності в електричних мережах, які зображені на рис. 2.1.

Для нескладних електричних мереж, де є невелика кількість індуктивних навантажень, природний метод компенсації може бути достатньо задовільним, особливо коли бажані параметри мережі не є надмірними. У випадку великих електромереж зазначеного методу недостатньо, тому виникає потреба у покращенні параметрів мережі за допомогою методів штучної компенсації реактивної потужності. [4]

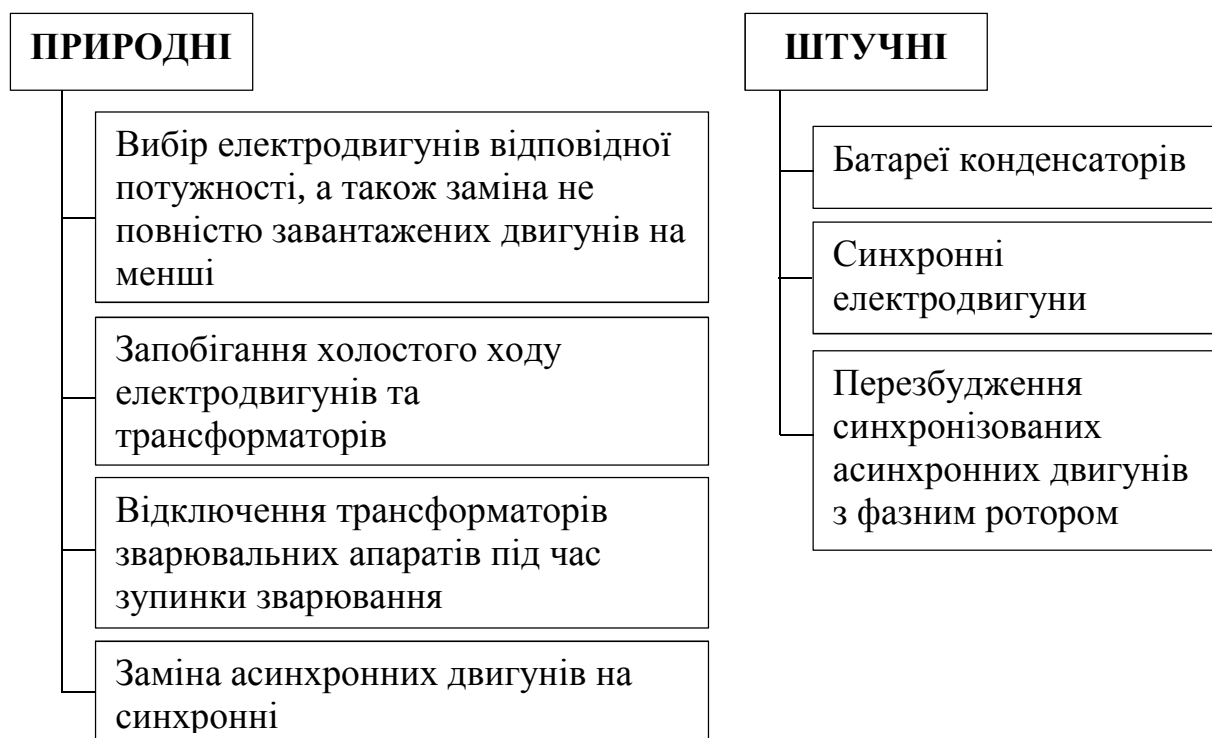


Рис. 2.1. Способи для природної та штучної компенсації реактивної потужності [4].

Існує кілька можливих конфігурацій схем компенсації реактивної потужності, однак можна виділити три основні методи: [6]

- Індивідуальна (фіксована) корекція коефіцієнта потужності – застосовується на практиці шляхом підключення силового конденсатора безпосередньо до клем пристрою, який потрібно компенсувати. Завдяки цьому рішення мінімізується навантаження на електромережу, оскільки реактивна потужність генерується на затискачах пристрою. Цей спосіб усуває контрольні пристрої, оскільки конденсатор вмикається і вимикається за допомогою того ж перемикача, що і пристрій. Основним недоліком цього методу є те, що конденсатор не використовується, коли пристрій не працює. Крім того, типорозмірів конденсаторів, що пропонуються виробниками, не завжди достатньо для задоволення вимог.

На рис. 2.2 показано підключення батарей конденсаторів (СВ) в електричній системі. Зауважимо, що кожен вимикач підключається безпосередньо до окремого навантаження.

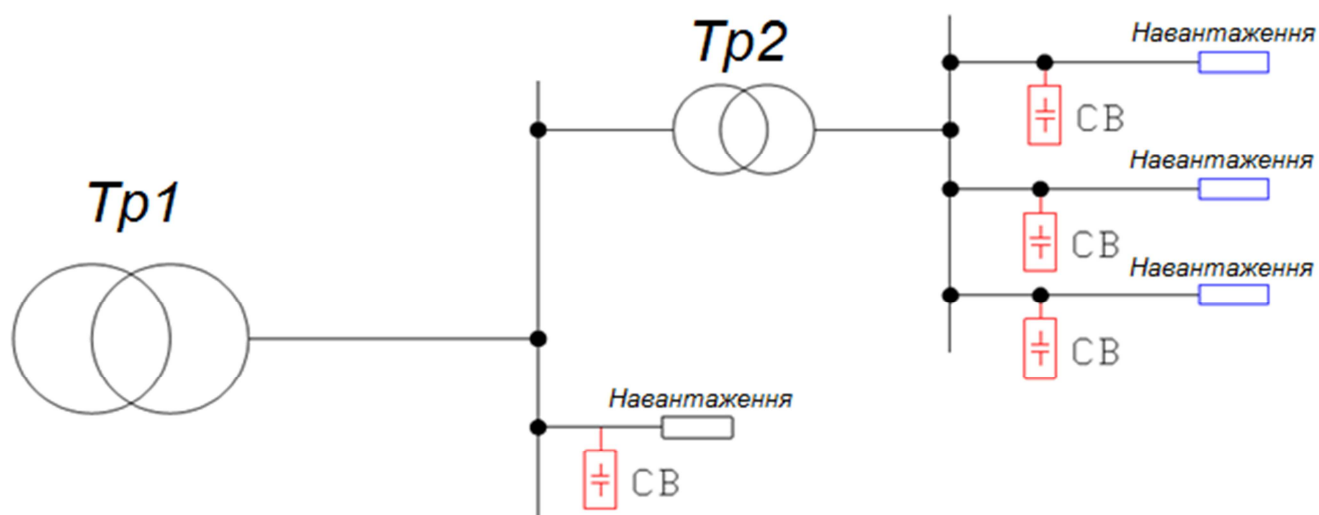


Рис. 2.2. Схема корекції коефіцієнта потужності з фіксованою батареєю конденсаторів.

• Групова корекція коефіцієнта потужності – цей спосіб більш ефективний, ніж попередній. Він передбачає компенсацію групи навантажень, що живляться одним і тим же розподільним пристроєм. Конденсаторна батарея зазвичай контролюється пристроєм на основі мікропроцесора, який називається регулятором коефіцієнта потужності. Крім того, цей метод змушує застосувати захист для силових конденсаторів.

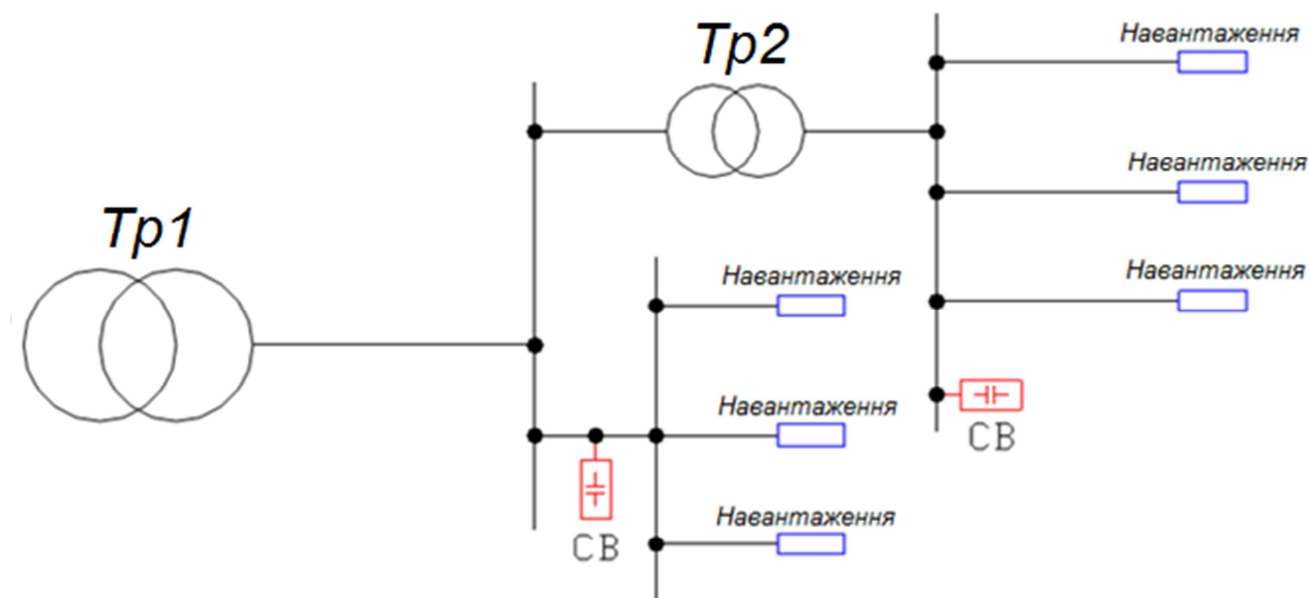


Рис. 2.3. Схема групової корекції коефіцієнта потужності.

• Об'ємна компенсація – цей метод передбачає використання одного компенсаційного пристрою для всього об'єкта (всередині трансформаторної станції або в розподільній станції). Це рішення мінімізує загальну реактивну

потужність, яку необхідно встановити, і коефіцієнт потужності можна підтримувати на тому ж рівні за допомогою автоматичного регулювання, що робить коефіцієнт потужності близьким до бажаного. Недоліком є те, що живильна та розподільна мережа, трансформатор, а також мережа живлення всього обладнання навантажена реактивним струмом (рис. 2.4).

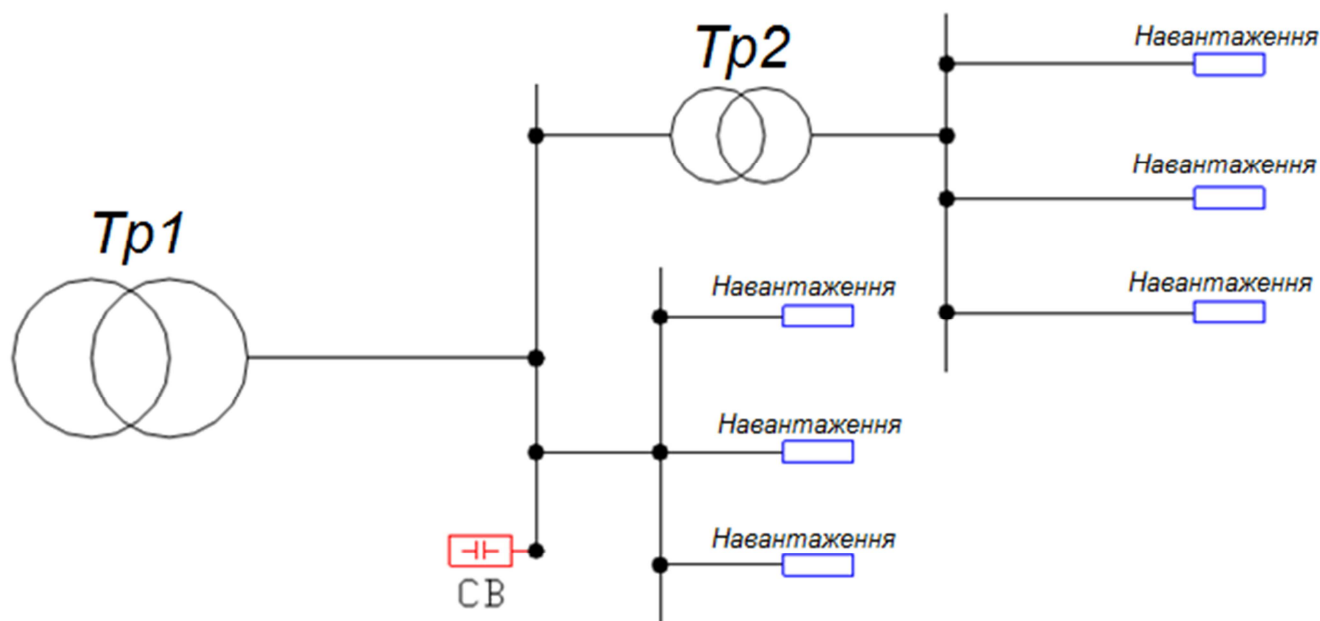


Рис. 2.4. Схема корекції масового коефіцієнта потужності.

Такий спосіб компенсації вимагає від батареї конденсаторів широкого діапазону регулювання потужності, який можна визначити 24-годинними вимірюваннями на місці установки вимикача. Це не найкраще рішення для великої електричної системи, особливо коли відстань між джерелом і нелінійними приймачами велика. Чим більша відстань, тим більші втрати в системі передачі. З цієї причини найбільш часто використовуваним методом корекції коефіцієнта потужності є групова компенсація, тоді як для нелінійних навантажень великої потужності застосовується одиночна компенсація. [4, 6]

По суті, кожен метод може бути застосований для компенсації реактивної потужності в електромережі, але кожен з різною ефективністю. Щоб застосувати на практиці той чи інший метод, необхідно виконати деякі умови. Фактори, які вирішують вибір такі [3, 4, 6]:

- Кількість приймачів у мережі та скільки з них потребує компенсації;
- Необхідний рівень компенсації мережі;

- Розмір і складність мережі;
- Можливість установки конденсаторних батарей;
- Тип обладнання, що підключене до компенсованої мережі, та його характер (індуктивне/ємнісне);
- Наявність гармонік вищого порядку.

Іноді, залежно від факторів, перерахованих вище, потрібно застосувати більше ніж один метод, щоб відповідати вимогам до корекції коефіцієнта потужності [3, 4].

Переваги та недоліки кожного з розглянутих методів наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Переваги та недоліки методів корекції коефіцієнта потужності

Метод	Переваги	Недоліки
Індивідуальний	– Компенсація в місці споживання РП – Мінімізує навантаження на мережу – Мала потужність конденсатора – Без регулятора для керування	– Підтримує потрібний $\text{tg}\varphi$ лише для однієї одиниці обладнання – Вимкнення під час пристрою припиняє роботу конденсаторної батареї – Велика кількість компенсуючих одиниць – Не компенсує всю мережу
Груповий	– Менша кількість батарей конденсаторів порівняно з методом індивідуальної компенсації – Окремі частини мережі компенсуються	– Потребує контролюючих пристроїв (регуляторів) – Дорожче, ніж масова компенсація з точки зору більшої кількості батарей конденсаторів
Масовий	– Найдешевший спосіб – Обмежена кількість батарей конденсаторів	– Забезпечує постійне значення $\text{tg}\varphi$ лише на вводі – Мережа всередині об'єкта недостатньо скомпенсована – Ризик спотворень і виникнення явища резонансу
Моторна компенсація	– Без додаткових спотворень – Ефективний метод компенсації	– Найдорожчий спосіб компенсації – Втрати енергії на перезбудження синхронних і синхронізованих двигунів – Скорочений термін служби електродвигуна – Мережа не повністю компенсована

РОЗДІЛ 3

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАВАНТАЖЕННЯ

Осцилограми напруги, яка генерується на електростанціях і потім трансформується до рівня напруги передачі, як правило, дуже близькі до ідеальних (тобто синусоїдальних) і мають дуже незначні спотворення. Характер основних передавальних пристроїв, такі як лінії електропередачі, кабелі та трансформатори є досить лінійними, тому вони викликають невеликі спотворення напруги або струму. Однак частотно-регулюючі приводи та джерела безперебійного живлення, які використовують електронні пристрої для випрямлення змінного струму на постійний, а потім інвертування назад на змінний – нелінійні пристрої. Існує ряд електричних навантажень, які є нелінійними, такими є джерела живлення з імпульсним режимом роботи, люмінесцентні світлові баласты та перетворювачі частоти електроприводів, які використовуються в різних цілях, як у промисловості, так і в побуті. Генеровані нелінійні струми призводять до викривлених напруг і струмів, які можуть негативно впливати на роботу системи електропостачання різними способами.

Оскільки кількість навантажень, що створюють гармоніки за останні роки зросла, стає все більш необхідним усунути їх вплив під час будь-яких приєднань або реконструкцій. Щоб адекватно оцінити їх вплив слід пам'ятати про два важливі поняття відносно гармонік в енергосистемі. По-перше, це природа створення гармонійного струму навантажень (нелінійних навантажень), другий – шлях, по якому протікають гармонічні струми та, як розвиваються результуюча гармонічна напруга.

3.1 Загальні поняття про гармоніки

Гармоніки – це синусоїдальні напруги або струми з частотами, які є цілими кратними до основної частоти, на яку розроблена система електропостачання. Будь-яку періодичну форму хвилі струму або напруги можна отримати за допомогою підсумовування синусоїди основної частоти та гармонік. Відповідно,

зміна амплітуди, фази або частоти гармоніки призводить до зміни кривої струму або напруги в результаті синтезу (накладання) гармонік. Частоти вище основної називаються гармоніками, частоти нижче основної називаються субгармоніками. Гармоніки кратні основній частоті показані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 Частоти гармонік.

Гармоніка	Частота
1	50 Гц
2	100 Гц
3	150 Гц
4	200 Гц
5	250 Гц
6	300 Гц
7	350 Гц
8	400 Гц
9	450 Гц
10	500 Гц
11	550 Гц
13	600 Гц
...	...
49	2450 Гц

Крім того, активні пристрої та перешкоди в системах викликають нелінійні спотворення, це так звані інтергармоніки. Визначення для них дається стандартом ІЕС (ІЕС 1000-2-1:1990, 1990): «Між гармоніками промислової частоти напруги і струму, можна спостерігати частоти, які не є цілим числом основної. Вони можуть виглядати, як дискретні частоти або як широкопasmовий спектр».

В даний час вплив субгармонік і інтергармонік не настільки значний через наявність лише невеликої кількості електрообладнання, яке їх виробляє. Таким чином, ця робота зосереджена лише на впливі спотворюючих гармонік. У разі використання випрямляча, як нелінійного навантаження наявність гармонік буде залежати від кількості вентильних перемикачів (лінійних діодів), що використовуються в ланцюзі.

3.2 Лінійні та нелінійні навантаження

Завданням електроенергетичної компанії є забезпечення своїх споживачів синусоїдою напругою при досить постійній величині. Це завдання ускладнюється тим, що існують нелінійні струми. Вони можуть виникати від будь-яких з трьох причин:

- несинусоїдальна генерація напруги;
- нелінійні пристрої, що використовуються для передачі електричної енергії;
- пристрої нелінійного навантаження.

Лінійне навантаження

Лінійний елемент в енергосистемі – це компонент, у якому сила струму пропорційна напрузі в будь-який момент часу. Загалом це означає, що форма хвилі струму (синусоїдальна) буде такою ж, як і напруга (рис. 3.1). Типові приклади лінійного навантаження: конденсатори для підвищення коефіцієнта потужності, двигуни та резистивні навантаження, такі як нагрівальні опори, лампи розжарювання.

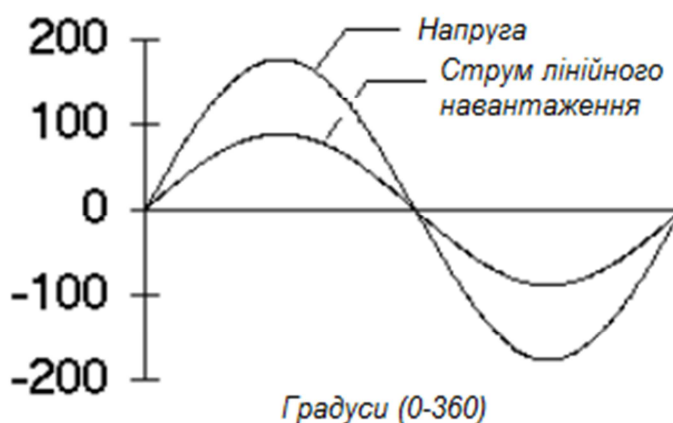


Рис. 3.1. Осцилограми напруги та струму для лінійних навантажень. [7]

Нелінійне навантаження

З іншого боку, нелінійні навантаження змінюють форму хвилі струму від синусоїди до іншої форми (рис. 3.2). Природа нелінійних навантажень генерувати гармоніки в поточній формі сигналу. Це спотворення форми сигналу струму, що призводить до спотворення форми сигналу напруги, особливо якщо мережа

живлення слабка (великий опір) і частка несинусоїдальних струмів досить висока. За цих умов осцилограма напруги більше не пропорційна струму (рис. 3.2).

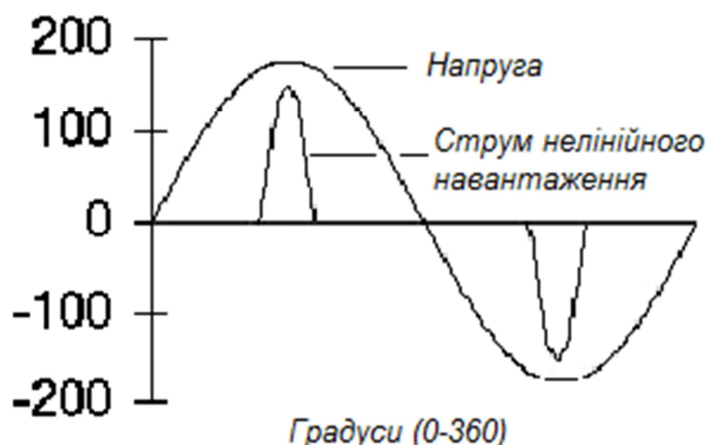


Рис. 3.2. Осцилограми напруги та струму для нелінійних навантажень. [7]

Типові приклади нелінійних навантажень включають: випрямлячі (джерела живлення, газорозрядне освітлення, блоки безперебійного живлення), двигуни з регульованою швидкістю, феромагнітні пристрої, двигуни постійного струму та дугове обладнання (дугові печі). [8]

Типи форми сигналу

Струм, споживаний нелінійними навантаженнями, не є синусоїдальним, але все ж є періодичним, це означає, що поточна хвиля залишається незмінною від циклу до циклу. Математично періодичні хвилі можна описати як серію синусоїдальних форм, які були підсумовані (рис. 3.3).

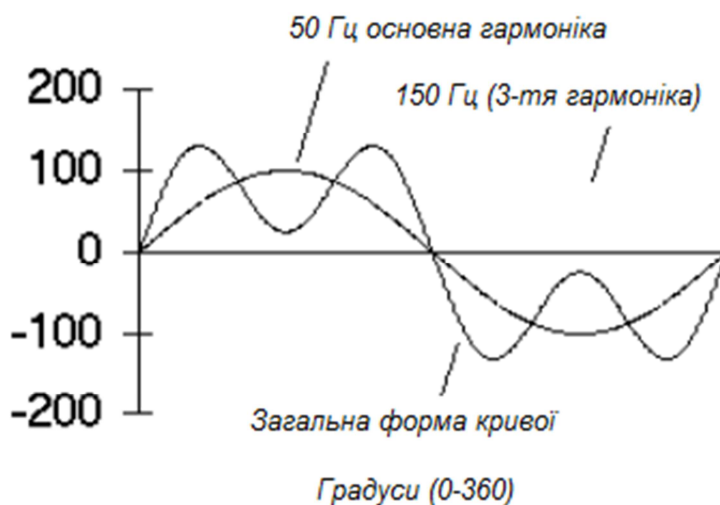


Рис. 3.3. Форма сигналу з симетричними гармонійними складовими. [7]

Вміст гармонік визначає різні типи форм хвилі. Або лише непарні гармоніки або парні та непарні гармоніки можуть бути присутніми у формі сигналу. Так звані симетричні хвилі містять лише непарні гармоніки, а несиметричні хвилі – парні і непарні гармоніки. Симетрична хвиля – це така, в якій позитивна частина хвилі ідентичний негативній частині хвилі. Несиметрична хвиля визначається як хвиля, яка містить постійну складову (або зсув) або навантаження; це таке що позитивна частина хвилі відрізняється від негативної частини. [7]

Більшість елементів енергосистеми симетричні. Однак деякі нормально симетричні пристрої здатні створювати рівні гармоніки через компонент невідповідності або збою. Типовим прикладом несиметричної хвилі є півхвиля випрямляча. Іншим поширеним джерелом парних гармонік є дугова піч, яка поперемінно генерує як парні, так і непарні гармоніки.

Звичайний мультиметр дасть велику похибку вимірювання при спробі виміряти змінний струм, споживаний несинусоїдальним навантаженням. Для вимірювання активної або реактивної потужності слід використовувати ватметр/варметр, призначений для належної роботи з несинусоїдальними струмами. [7]

Потік гармонік

Коли нелінійне навантаження генерує струми, ці струми проходять через усі опори між джерелом та навантаженням, як показано на рис. 3.4.

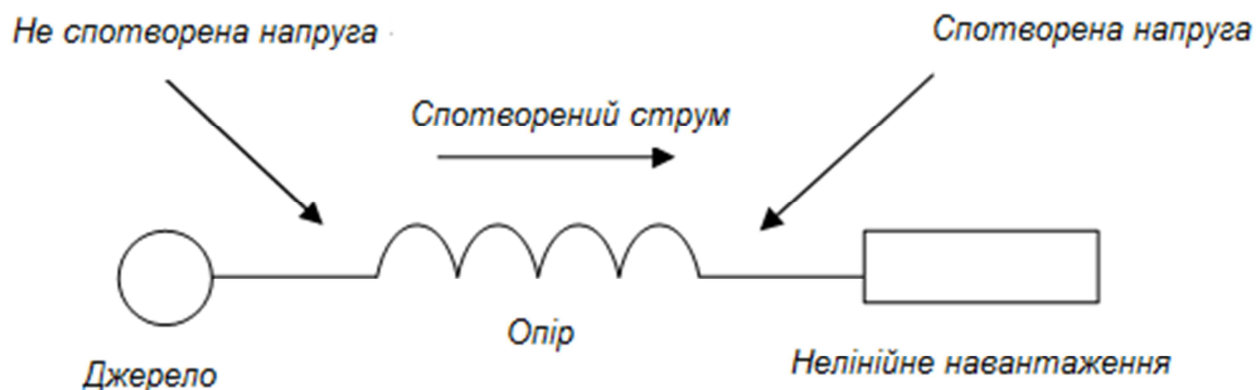


Рис. 3.4. Нормальний перебіг гармонійних струмів.

Таким чином, внаслідок протікання несинусоїдального струму гармонічні напруги створюються опором системи для кожної гармоніки. Спотворення напруги відбувається шляхом підсумовування всіх цих напруг та додавання до номінальної напруги. Очевидно, що параметрами, які впливають на величину спотворення напруги, є опір джерела та вироблені гармонічні струми. Наприклад, якщо опір джерела низький, спотворення напруги, спричиненої гармоніками струму, будуть низькими. За [7] можна сказати наступне: якщо значна частина навантаження стає нелінійною (гармонійний струм зростає) та/або коли переважає резонансний стан (опір системи збільшується), напруга може різко зрости.

3.3 Аналіз Фур'є

Теорію рядів Фур'є вперше представив французький фізик і математик Жозеф Фур'є у своїй статті «Аналітична теорія тепла», яка була опублікована в 1882 р. Він доводить, що будь-яка несинусоїдальна періодична функція в інтервалі часу T може бути представлений сумою основного та ряду вищих порядків гармонічних складових на частотах, які є цілими кратні фундаментальній складовій. Ряд встановлює зв'язок між функцією в часовій та частотній областях. Цей вираз називається рядом Фур'є.

За допомогою ряду Фур'є може бути будь-яка форма сигналу напруги чи струму відтворитися з основної частотної складової та суми гармонійних складових.

$$V(t) = V_0 + \sum_{h=1}^N V_h \sin(h2\pi ft + \theta_h). \quad (3.1)$$

де h – цілий множник, f – основна частота, t – час, θ_h – фазовий кут, V_h – амплітудне значення напруги, V_0 – постійна складова, $V(t)$ – є несинусоїдальна періодична функція напруги.

Ряд Фур'є також можна використовувати для розкладання форми хвилі на основні та гармонічні компоненти. Це принцип використовується для гармонічного аналізу в енергетиці. Форма хвилі записується, а величини гармонік – обчислюються.

Середньоквадратичне значення (RMS)

Середнє квадратичне значення, також відоме під назвою ефективне значення. Рівняння (3.2) показує, як знайти середньоквадратичне значення форми хвилі струму, де амплітуда кожної гармоніки є відомою.

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^N I_h^2}. \quad (3.2)$$

де I_h – амплітуда гармонійного струму порядку h , I_{RMS} – середньоквадратичне значення всіх гармонік плюс основна складова струму.

Повне гармонійне спотворення (THD)

Загальний термін, який використовується по відношенню до гармонік, це *THD* (Total Harmonic Distortion) або загальне гармонійне спотворення. Повне гармонійне спотворення – це внесок усіх струмів гармонічної частоти в фундаментальний або першій. *THD* використовується для опису спотворення напруги або струму і розраховується наступним чином:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}. \quad (3.3)$$

де I_1 – середньоквадратичне значення основної складової струму.

Чисельник визначає середньоквадратичне значення струму за рахунок усіх гармонік і є середньоквадратичним значенням лише основної складової струму. Наведене вище рівняння є визначення *THD* за версією IEEE (інститут інженерів електротехніки та електроніки). Однак, стандарти IEC (міжнародна електротехнічна комісія) має інше формулювання, яке наведено нижче (IEEE Std. 1159-1995, 1995):

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{RMS}}. \quad (3.4)$$

Різниця між двома визначеннями полягає в знаменнику. В рівнянні (3.4) знаменник – це середньоквадратичний струм, обумовлений усіма гармоніками та основною складовою струму.

Крест-фактор (CF) і форм-фактор (FF)

Двома іншими мірами викривлення є крест-фактор (CF – коефіцієнт амплітуди) і форм-фактор (FF – коефіцієнт форми). Коефіцієнт амплітуди – це відношення піку форми сигналу до його середньоквадратичного значення. Для синусоїдальної форми сигналу, CF коефіцієнт амплітуди буде квадратним коренем з 2 або 1,414. [9]

$$Crest_{Factor} = \frac{I_{peak}}{I_{RMS}}. \quad (3.5)$$

де I_{peak} це пікове значення струму.

Коефіцієнт форми або коефіцієнт спотворення – це відношення середньоквадратичного значення форми сигналу до середньоквадратичного значення основного компонента сигналу. Для лінійної синусоїдальної форми сигналу форм-фактор буде 1,0. [9]

$$Form_{Factor} = \frac{I_{RMS}}{I_1}. \quad (3.6)$$

Симетричні компоненти – це математичний інструмент, який використовується для аналізу в енергетичних системах. Гармонічні порядки можна розділити на компоненти прямої, зворотної та нульової послідовності [9]. Данні компоненти прямої послідовності мають прямий порядок фаз і включають наступні гармонічні порядки: 1-й (фундаментальний або основний), 4-й, 7-й, 10-й і т. д. Компоненти зворотної послідовності мають зворотній порядок фаз і включають наступні гармонічні порядки: 2-й, 5-й, 8-й, 11-й і т. д. Нульова послідовність має усі три компоненти в однаковій фазі та включає наступні гармонічні порядки: 3-й, 6-й, 9-й, 12-й тощо. Їх фаза та амплітуда має прямий порядок, а сума компонентів зворотної послідовності дорівнює нулю в нейтралі

або землі. Пряма послідовність компонентів нульової послідовності складуються в нейтралі або землю. Тому гармоніки нульової послідовності діляться на 3.

Коефіцієнт спотворення (DF) і коефіцієнт потужності (PF)

Існує два різних типи коефіцієнта потужності, які необхідно враховувати, коли форми сигналів напруги та струму не є ідеально синусоїдальними. У схемах, що мають тільки синусоїдальні струми і напруги, ефект коефіцієнта потужності виникає тільки через різницю фаз між струмом і напругою. Це відомо як «коефіцієнт потужності». Коефіцієнт викривлення – інший варіант подання THD, що визначається наступним чином:

$$DF = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}}. \quad (3.7)$$

Коефіцієнт спотворення зменшуватиметься зі збільшенням вмісту гармонік.

Згідно з деякими уявленнями [10], справжній коефіцієнт потужності PF є показником, що вимірює, наскільки ефективно передається енергія. Для ефективної передачі енергії від джерела до навантаження бажано максимізувати середнє значення потужності, одночасно мінімізуючи середньоквадратичне значення струму та напруги (і, отже, мінімізуючи втрати). Він визначається як:

$$PF_{true} = \frac{P_{avg}}{V_1 I_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2}}, \quad (3.8)$$

де P_{avg} – середня потужність, V_1 і I_1 – середньоквадратичне значення основної складової напруги та струму, THD_V – загальне гармонійне спотворення напруги, THD_I – загальне гармонійне спотворення струму.

Точне рівняння справедливе, як для синусоїдальних, так і для несинусоїдальних випадків. Очевидно, що якщо немає гармонік, то THD_V і THD_I дорівнюють нулю.

3.4 Види нелінійних навантажень

Щоб оцінити вплив гармонік у мережі, спочатку необхідно знайти їх джерела та визначати реальні характеристики створених гармонік різними видами навантаження. Цей розділ має на меті широко описати використовувані види нелінійних навантажень. Поділ джерел гармонік можна зробити відповідно до наступних категорій. [11]

- Велика кількість нелінійних навантажень малої потужності.

Ця категорія складається в основному з однофазних діодних мостових випрямлячів, які забезпечують живлення більшості побутових електроприладів. Ще одним нелінійним навантаженням, що широко використовується є газорозрядна лампа. Хоча окремий вплив достатньо малий, їх накопичений ефект може бути значним, враховуючи їх велику кількість та відсутність фазового рознесення.

- Потужні нелінійні навантаження, що безперервно та випадково змінюються.

Основним споживачем цієї категорії є дугова піч з номінальною потужністю в десятки мегават, яка підключена безпосередньо до високовольтної мережі. Основні складнощі моделювання виникають через характер опору пічної дуги, який випадково змінюється та є надзвичайно асиметричним.

- Потужні статичні перетворювачі та електронні пристрої передачі енергії системного рівня.

Особливістю цих пристроїв і, таким чином, основною причиною значних складнощів є їх великі розміри. Робота перетворювача значною мірою залежить від якості джерела живлення, яка сама по собі значною мірою залежить від перетворювальної установки.

Нижче наведені конкретні приклади нелінійного навантаження описані в порядку зменшення їх впливу.

3.4.1 Перетворювачі АС-DC

Як неодноразово зазначалося вище, найпоширенішим гармонійним джерелом є випрямлячі різної потужності. На рис. 3.5 показано, як працює перша ступінь імпульсного джерела живлення.

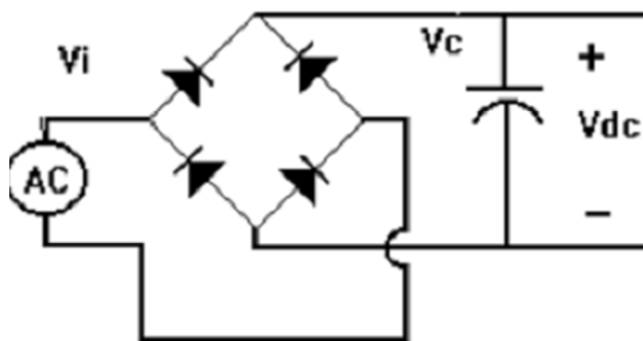


Рис. 3.5. Перша ступінь типового перетворювач АС-DC.

Змінна напруга перетворюється на постійну напругу, яка далі перетворюється на інші напруги, які потрібні для роботи обладнання. Випрямляч складається з напівпровідникових приладів (наприклад, діодів), які проводять струм лише в одному напрямку. Для цього напруга на одному виводі повинна бути більшою, ніж на іншому. Ці пристрої подають струм в конденсатор, на якому значення напруги в будь-який момент часу залежить від того, скільки енергії від нього забирає решта джерела живлення. Певні типи навантажень генерують типові сигнатури гармонічного спектру, які можуть вказати на відповідне джерело. В табл. 3.2 наведені приклади таких пристроїв та їх гармонійні сигнатури.

Таблиця 3.2. Типові гармоніки для різних перетворювачів

Тип пристрою	Кількість фаз	Наявні гармоніки
Напівперіодий випрямляч	1	2, 3, 4, 5, 6, 7...
Двохперіодний випрямляч	2	3, 5, 7, 9...
Трифазний, двохперіодний	6	5, 7, 11, 13, 17, 19...
(2) трифазний, двохперіодний	12	11, 13, 23, 25, 35, 37...

З'єднання для різних схемних рішень випрямлячів показано на рис. 3.6.

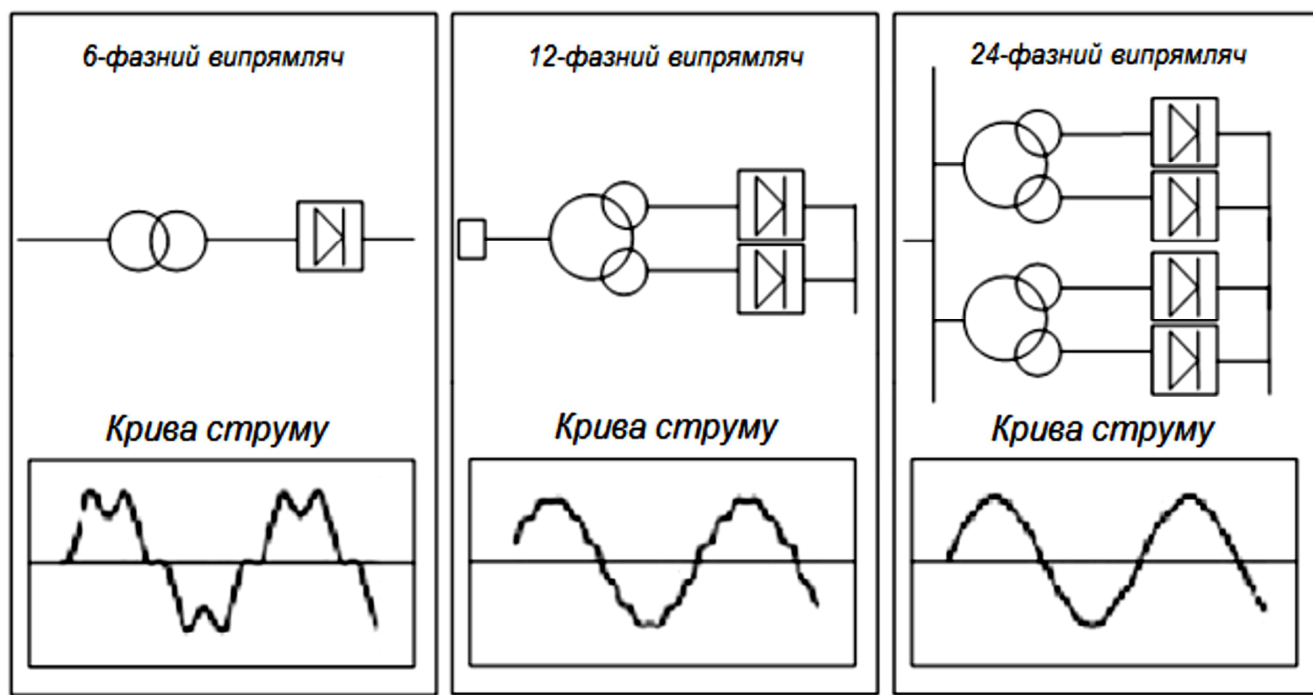


Рис. 3.6. Гармоніки в струмі для різних конструкцій випрямлячів.

Найбільшій поширеною схемою випрямляча в 3-фазних мережах змінного струму є 6-фазний діодний міст. Він складається з шести некерованих випрямлячів або діодів та індуктивності, яка разом з конденсатором утворює фільтр низьких частот для згладжування пульсацій постійного струму. Індуктивність може бути на стороні постійного або змінного струму, або її взагалі можна не використовувати. 6-фазний випрямляч простий та дешевий, але він генерує велику кількість низьких гармонік 5, 7, 11, особливо з малою індуктивністю фільтру. Якщо більша частина навантаження складається з 6-фазних випрямлячів, живлячий трансформатор потрібний з завищеною потужністю і виконання вимог стандартів до якості електроенергії може бути ускладненим. Часто потрібна фільтрація вищих гармонік.

12-фазний випрямляч утворюється шляхом паралельного з'єднання двох 6-фазних випрямлячів для живлення загальної шини постійного струму. Вхід до випрямлячів забезпечується одним трьохобмотковим трансформатором. Вторинні обмотки трансформатора мають фазовий зсув на 30° . Перевага такого розташування полягає в тому, що деякі гармоніки є на стороні живлення у протилежній фазі і таким чином компенсуються. В теорії гармонійна складова з

найнижчою частотою, яка спостерігається на первинній обмотці трансформатора, - це 11-й. Основними недоліками є необхідність використання спеціальних трансформаторів та більш висока вартість, ніж у 6-фазного випрямляча.

Принцип роботи 24-фазного випрямляча також показаний на рис. 3.6. Він має два 12-фазних випрямляча з'єднаних паралельно з двома трьох обмотковими трансформаторами з кутом зсуву фаз в 15° . Перевага полягає в тому, що практично всі низькочастотні гармоніки виключаються але недоліком є висока вартість. У разі високої потужності одного пристрою або установки з декількома пристроями, 24-фазна система може бути найекономічнішим рішенням із найменшими гармонійними спотвореннями. [12] Співвідношення гармонік до основної напруги показано на рис. 3.7 для різних типів випрямлячів, що описані вище.

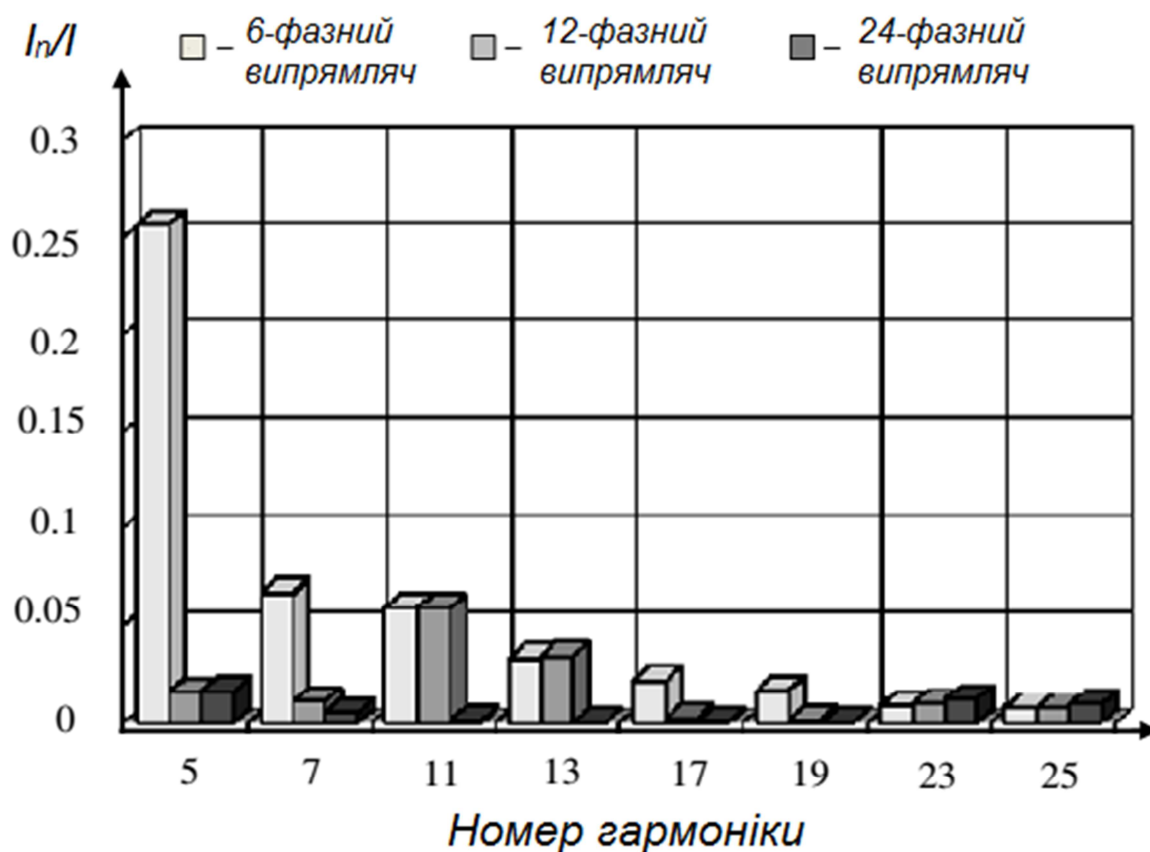


Рис. 3.7. Гармонійні складові різних типів випрямлячів. [12]

Випрямляч з фазовим керуванням утворюється шляхом заміни діодів 6-фазного випрямляча на тиристори. Оскільки для переходу тиристора в провідний стан потрібен імпульс запуску, фазовий кут, з якого тиристор стає провідним

може бути затримано. При затримці кута спрацьовування понад 90° напруга на шині постійного струму стає негативною. Це забезпечує рекуперативний потік енергії від шини постійного струму назад до джерела живлення.

Стандартні схеми інверторів постійного струму не дозволяють змінювати полярність. В більш поширених схемах інверторів постійного струму є з'єднання іншого тиристорного моста зустрічно першому, щоб забезпечити зміну полярності струму. В цій конфігурації перший міст працює в випрямляючому режимі, а інший у регенераційному режимі.

Криві струму випрямлячів з фазовим керуванням подібні до 6-фазних діодних випрямлячів, але оскільки вони споживають потужність з змінним зсувом фазний коефіцієнт потужності та загальний коефіцієнт потужності при частковому навантаженні є достатньо низький. Знижений коефіцієнт потужності викликає високий повний струм, а абсолютні гармонічні струми вище, ніж у діодного випрямляча.

На додаток до цих проблем перетворювачі з фазовим керуванням викликають провали у формі сигналу напруги мережі. Кутове положення цих провалів змінюється разом із кутом відкривання.

3.4.2 Люмінесцентне освітлення

Хоча деякі з цих навантажень є потужними точковими джерелами гармонік, розташованими переважно у промислових зонах, житлові та комерційні навантаження також генерують постійно зростаючий рівень гармонік, як від традиційних електромагнітних баластів, так і від нових, з більшою потужністю, наприклад, ламп підвищеної ефективності. Люмінесцентні лампи можуть бути джерелом вищих гармонік, так як баласты є нелінійними індуктивностями. В них переважає третя гармоніка (табл. 3.3). Тенденція в усьому світі на користь розвитку промисловості люмінесцентного освітлення. Багато країн заохочують впровадження КЛЛ (компактних люмінесцентних ламп) освітлення або навіть повністю витіснити лампи розжарювання.

Таблиця 3.3. Гармонійний спектр для баластів люмінесцентного освітлення. [13]

Гармоніка	Електромагнітний баласт		Електронний баласт	
	Фаза	Нейтраль	Фаза	Нейтраль
Струм THD	12,8	171,2	16,3	44,0
3	10,6	169,8	3,6	11,9
5	6,7	16,6	11,7	31,6
7	1,6	3,3	5,2	3,7
9	0,8	12,7	3,9	20,1
11	0,2	2,3	3,5	2,0
13	0,3	2,5	3,4	4,1
15	0,1	3,4	2,1	10,1
17	0,1	0,0	2,1	3,2
19	0,0	0,7	2,2	3,1
21	0,0	0,5	2,0	9,6
23	0,0	0,0	1,7	1,5
25	0,0	0,4	1,9	3,7
27	0,0	0,0	1,7	8,2
29	0,0	0,0	1,5	3,0
31	0,0	0,0	1,5	3,5
33	0,0	0,0	1,4	6,4
Напруга THD	2,7		3,7	
3	0,6		0,4	
5	2,6		3,7	
7	0,3		0,3	
9	0,0		0,2	
11	0,0		0,1	

В табл. 3.3 наведені дані гармонійних складових струму та напруги для електромагнітних та електронних баластів [13]. В результаті, можна відмітити наступне:

- THD напруги для електромагнітних баластів становив у середньому 2,67%. Майже всі спотворення через наявність п'ятої гармоніки.
- THD напруги для електронних баластів становив у середньому 3,70%. Більша частина спотворень також через наявність п'ятої гармоніки.
- Збільшення спотворення напруги пояснюється збільшенням струму п'ятої гармоніки.
- П'ята гармоніка струму збільшилася на 73% при заміні електромагнітних баластів на електроні.

3.5 Резонансні явища

Системи живлення здатні поглинати значну кількість спотворень струму без наслідків, і спотворення, які створені навантаженням, можуть бути нижчими за рівень регламентований стандартами. Проте сукупний ефект багатьох промислових навантажень разом узятих можуть впливати на систему електропостачання. Проблеми виникають тоді коли вони, зазвичай, пов'язані з резонансними явищами.

3.5.1 Паралельний резонанс

Кожен ланцюг, що містить і ємності, і індуктивності, має одну або декілька резонансних частот. Коли одна з цих частот дорівнює частоті, що створюється в енергосистемі, виникають резонансні явища. Може з'явитися така ситуація, що напруга та струм на цій частоті зростуть до значних значень. Це є причиною більшості проблем із гармонійними спотвореннями в системах електропостачання. На рис. 3.8 наведена типова схема з потенційним виникненням паралельного резонансу.

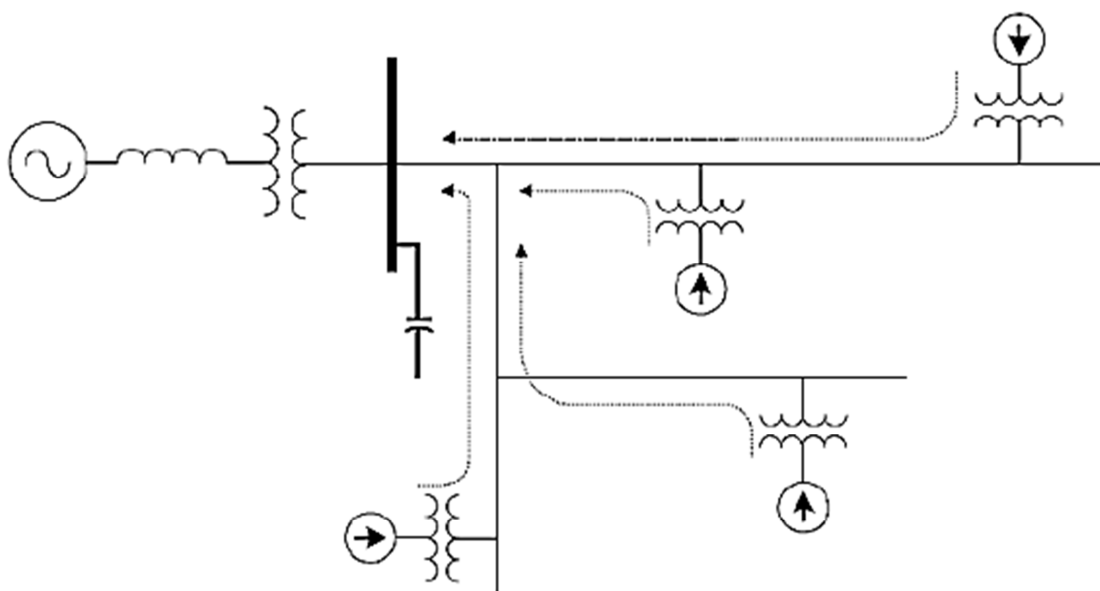


Рис. 3.8. Схема з потенційними виникненням паралельного резонансу. [14]

З точки зору джерел гармонік шунтовий конденсатор з'являється паралельно з еквівалентною індуктивністю системи електропостачання (індуктивності джерела і трансформатора) для гармонічної частоти, як показано

на рис. 3.9 б. Паралельний резонанс виникає тоді коли реактивний опір ємності X_C системи електропостачання компенсує індуктивний. Частота, на якій відбувається це явище, називається паралельною резонансною частотою. Її можна за виразом [14]:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C} - \frac{R^2}{4L_{eq}^2}} \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C}} \quad (3.9)$$

де R – активний опір еквівалентного джерела та трансформатора, L_{eq} – індуктивний опір еквівалентного джерела та трансформатора, C – ємність батареї конденсаторів, f_p – паралельна резонансна частота.

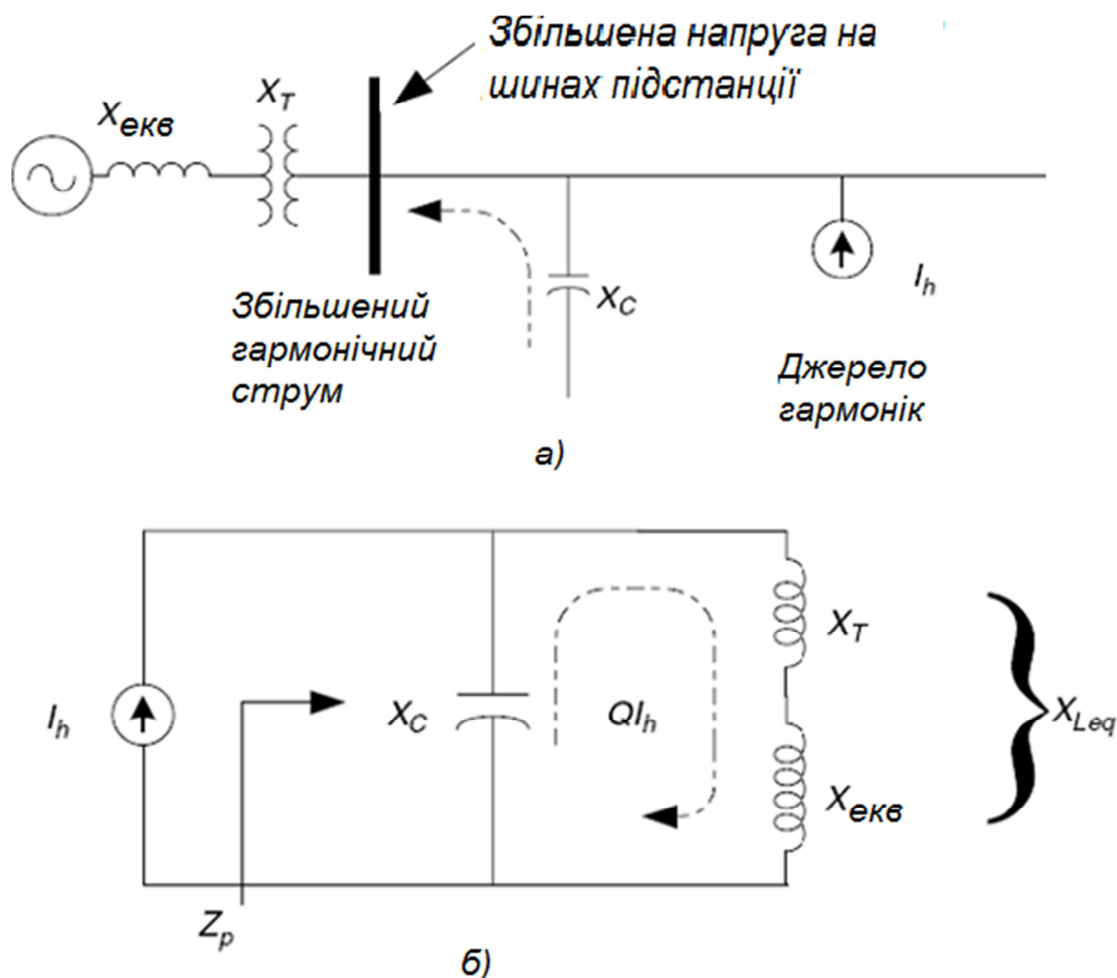


Рис. 3.9. Виникнення явища паралельно резонансу

а – спрощена схема електропостачання; б – паралельний резонансний контур для джерела гармонік. [14]

На резонансній частоті повний опір паралельної комбінації еквівалентної індуктивності та ємності, для джерела гармонічного струму стає дуже великим, тобто:

$$Z_p = \frac{X_C(X_{Leq} + R)}{X_C + X_{Leq} + R} = \frac{X_C(X_{Leq} + R)}{R} \approx \frac{X_{Leq}^2}{R} = \frac{X_C^2}{R} = QX_{Leq} = QX_C \quad (3.10)$$

де X_C – ємнісний опір батареї конденсаторів, Q – добротність резонансного контуру.

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}, \quad (3.11)$$

$$R \ll X_{Leq} \quad (3.12)$$

Необхідно зазначити, що реактивний опір у цьому рівнянні розраховується на резонансній частоті. Добротність резонансного контуру Q визначає гостроту частотної характеристики. Q суттєво змінюється в залежності від місця розташування в системі електропостачання. Так, добротність може бути менше 5 на розподільчому приєднанні та більше 30 на вторинній шині потужного понижувального трансформатора. Зрозуміло, що під час паралельного резонансу невеликий гармонійний струм може спричинити велике падіння напруги на опорі, що можна виразити наступним рівнянням:

$$V_p = QX_{Leq}I_h \quad (3.13)$$

де V_p – падіння напруги під час паралельного резонансу, I_h – амплітуда гармонійного струму h порядку.

Напруга на батареї конденсаторів буде збільшена та сильно спотворена. Розглянемо поведінку схеми електропостачання під час паралельного резонансу. Струм, що протікає в батареї конденсаторів або в системі електропостачання визначається за такими формулами [14]:

$$I_{res} = \frac{V_p}{X_C} = \frac{QX_C I_h}{X_C} = QI_h, \quad (3.14)$$

$$I_{res} = \frac{V_p}{X_{Leq}} = \frac{QX_{Leq} I_h}{X_{Leq}} = QI_h, \quad (3.15)$$

Отже, струми, що протікають в батареї конденсаторів та в системі електропостачання (тобто через трансформатор) також буде збільшено в Q разів. Це явище може призвести до виходу з ладу конденсатора, перегорання запобіжника або перегріву трансформатора.

3.5.2 Послідовний резонанс

Існують певні випадки, коли шунтуючий конденсатор та індуктивність трансформатора або розподільчої лінії можуть утворювати послідовний LC -ланцюг для джерела гармонійних струмів. Якщо резонансна частота відповідає характерній гармонічній частоті нелінійного навантаження, LC -ланцюг буде притягувати велику частину гармонійного струму, який генерується в системі електропостачання. Споживач, який не має нелінійного навантаження, але використовує конденсатори для корекції коефіцієнта потужності таким чином відчує значні гармонічні спотворення напруги через сусідні джерела гармонік. Ця ситуація показана на рис. 3.10.

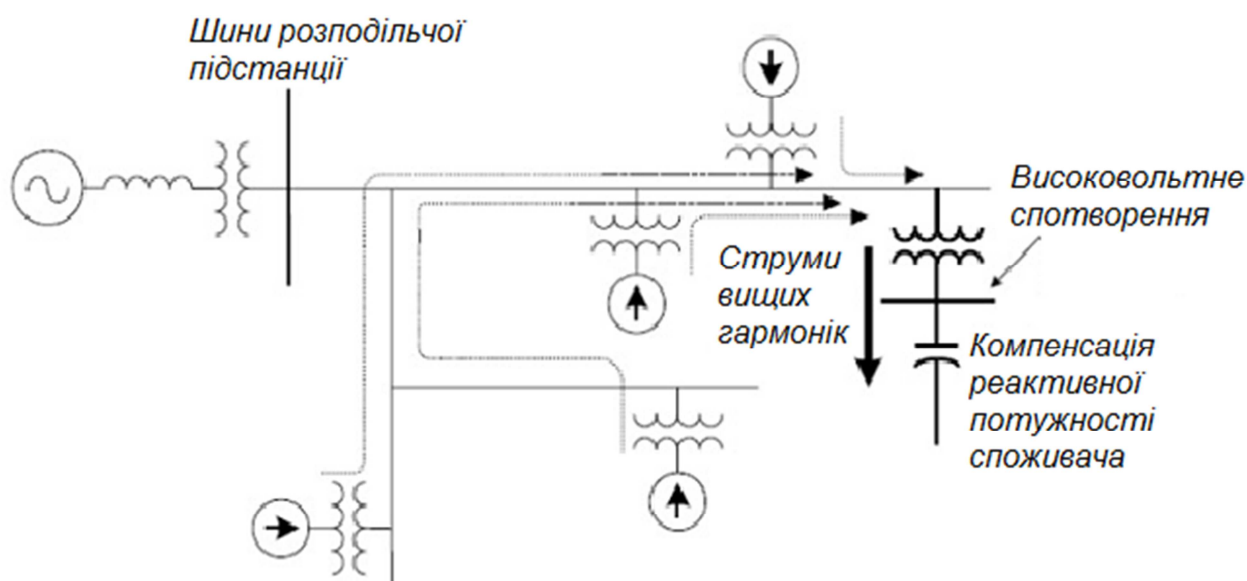


Рис. 3.10. Схема з потенційними виникненням послідовного резонансу. [14]

При виникненні резонансу конденсатор корекції коефіцієнта потужності утворює послідовне коло з трансформатором та джерелами вищих гармонік. Еквівалентна схема електропостачання наведена на рис. 3.11.

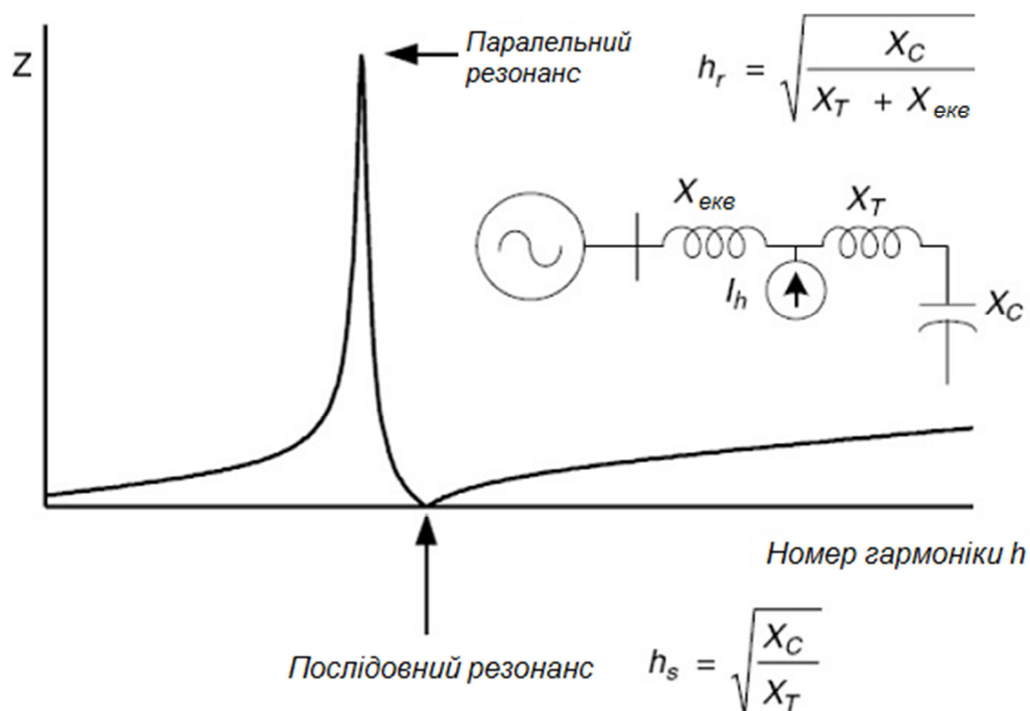


Рис. 3.11. АЧХ схеми електропостачання з послідовним резонансом. [14]

Джерело гармонік, показане на рис. 3.11, представляє загальну кількість гармонік, створених іншими навантаженнями. При резонансі ємнісний опір конденсатора дорівнює індуктивному опору трансформатора. Послідовний опір комбінації індуктивності трансформатора та батареї конденсаторів дуже малий (теоретично нульовий) та обмежений власним активним опором. Таким чином гармонійний струм, що відповідає резонансній частоті, буде вільно протікати в цьому контурі. Напруга на конденсаторі корекції коефіцієнта потужності збільшується та сильно спотворюється, що видно з наступного рівняння:

$$V_s = \frac{X_C}{X_T + X_C + R} V_h \approx \frac{X_C}{R} V_h, \quad (3.16)$$

де V_h – гармонічна напруга, що відповідає гармонійному струму I_h , V_s – напруга на батареї конденсаторів; R – опір послідовного резонансного контуру (малий в порівнянні з реактивним опором).

РОЗДІЛ 4

ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК

4.1 Огляд методів зниження вищих гармонік

Профілактика виникнення вищих гармонік, як відомо є найкращий спосіб боротьби з їх появою. Головна ідея запобігання полягає у виборі обладнання та способів його установки таким чином, щоб мінімізувати рівень вищих гармонік у будь-якому окремому об'єкті чи навіть частині схеми. Погіршення якості електроенергії, які є результатом вищих гармонік, виникають, коли нове обладнання необдуманно підключається до старих систем електропостачання. Втім, навіть у межах існуючих системи, проблеми з гармоніками часто можна вирішити за допомогою простих схемних рішень. Перелічимо деякі з них:

- ремонт поганого або відсутнього заземлення на окремому обладнанні або об'єкті в цілому,
- підключення кількох навантажень на різні відгалуження,
- додавання додаткових ланцюгів, щоб ізолювати чутливе обладнання від того, що спричиняє гармонійні спотворення.

Якщо проблеми неможливо вирішити методами профілактики, існують два основних варіанти: зробити підсилення системи електропостачання, щоб витримати гармоніки або встановити пристрої для зменшення або усунення гармонік. Підсилити систему електропостачання можливо наступними шляхами:

- встановлення подвійних нульових проводів або встановлення окремої нейтралі для кожної фази,
- встановлення потужних трансформаторів або спеціальних трансформаторів здатних працювати з нелінійним навантаженням (дозволяють більше розсіювання тепла від гармонічних струмів),
- використання спеціальних автоматичних вимикачів та панелей керування розроблених для роботи в мережі з вищими гармоніками (передбачене запобігання перегріву через гармоніки).

Зазвичай ці методи більше підходить для нових об'єктів, оскільки витрати на реконструкцію існуючого об'єкта можуть бути значними. Перелічимо методи зменшення гармонік відповідно від дешевих до дорогих:

- пасивні фільтри гармонік,
- розділові трансформатори,
- трансформатори зниження гармонік,
- активні фільтри.

Більш детальна інформація про рішення для зменшення рівня гармонік розглянута в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Аналіз методів зменшення вищих гармонік.

Рішення	Найкраще застосування	Примітки
Підсилення системи електропостачання	Нові об'єкти	Прості, відносно низькі капітальні витрати, але не усувають проблему
Пасивний фільтр	Для схем, які включають трифазні навантаження, де є необхідність компенсації реактивної потужності	Низька вартість, але вимагає аналізу; не адаптується до змін у системі електропостачання
Окремий трансформатор	На окремих гілках від обладнання, чутливого до вищих гармонік	Ізолює, але не усуває проблему
Трансформатор зменшення гармонік	На помірно або сильно завантаженому трансформаторі з високим вмістом гармонік у системі та/або де критичні навантаження підтримуються джерелом безперебійного живлення	Зменшує втрати енергії в трансформаторі; вартість: від \$25 до \$30/кВА
Система придушення гармоній	Для ланцюгів лише з однофазним навантаженням і існуючих або нових установок з високими вимогами до надійності	Усуває джерело проблеми та знижує витрати електроенергії; вартість: приблизно від \$80 до \$120/кВА
Активний фільтр гармонік	Для ланцюгів, які включають трифазні навантаження; може бути нерівномірність напруги між фазами	Адаптується до змін у системі; саморегулюється, щоб уникнути перевантаження; вартість: близько \$500/кВА

4.2 Перетворювачі частоти

Якщо говорити про перетворювачі частоти для електроприводу, то зниження рівня гармонік можна здійснити шляхом схемних рішень системи перетворювача або за допомогою зовнішнього фільтрування. Схемні рішення можна здійснити різними способами, наприклад:

- підсилення системи електропостачання,
- використання 12 і більше фазного перетворювача,
- використання керованого випрямляча,
- покращення внутрішньої фільтрації в накопичувачі.

Типова система перетворювача частоти та відповідні параметри його складових показані на рис. 4.1. Змінюючи параметри, можна визначити вплив на рівень гармонік, а також їх наявність в системі електропостачання. Ці параметри та результати наведені в табл. 4.2, за [12]. Основна залежність, яка використовується в аналізі, полягає в тому, що гармоніки напруги – це гармоніки струму, помножені на опір джерела живлення. Також враховується той факт, що гармоніки струму залежать від конструкції перетворювача.

Таблиця 4.2. Різні фактори та їх вплив на рівень вищих гармонік.

Причина	Наслідок
Чим більший двигун	тим вище гармоніка струму
Чим вище навантаження двигуна	тим вище гармоніки струму
Чим більша індуктивність в колі постійного або змінного струму	тим нижчі гармоніки струму
Чим більша кількість фаз у випрямлячі	тим нижчі гармоніки струму
Чим потужніший трансформатор	тим менші гармоніки напруги
Чим менший опір трансформатора	тим менші гармоніки напруги
Чим вища потужність короткого замикання	тим менші гармоніки напруги

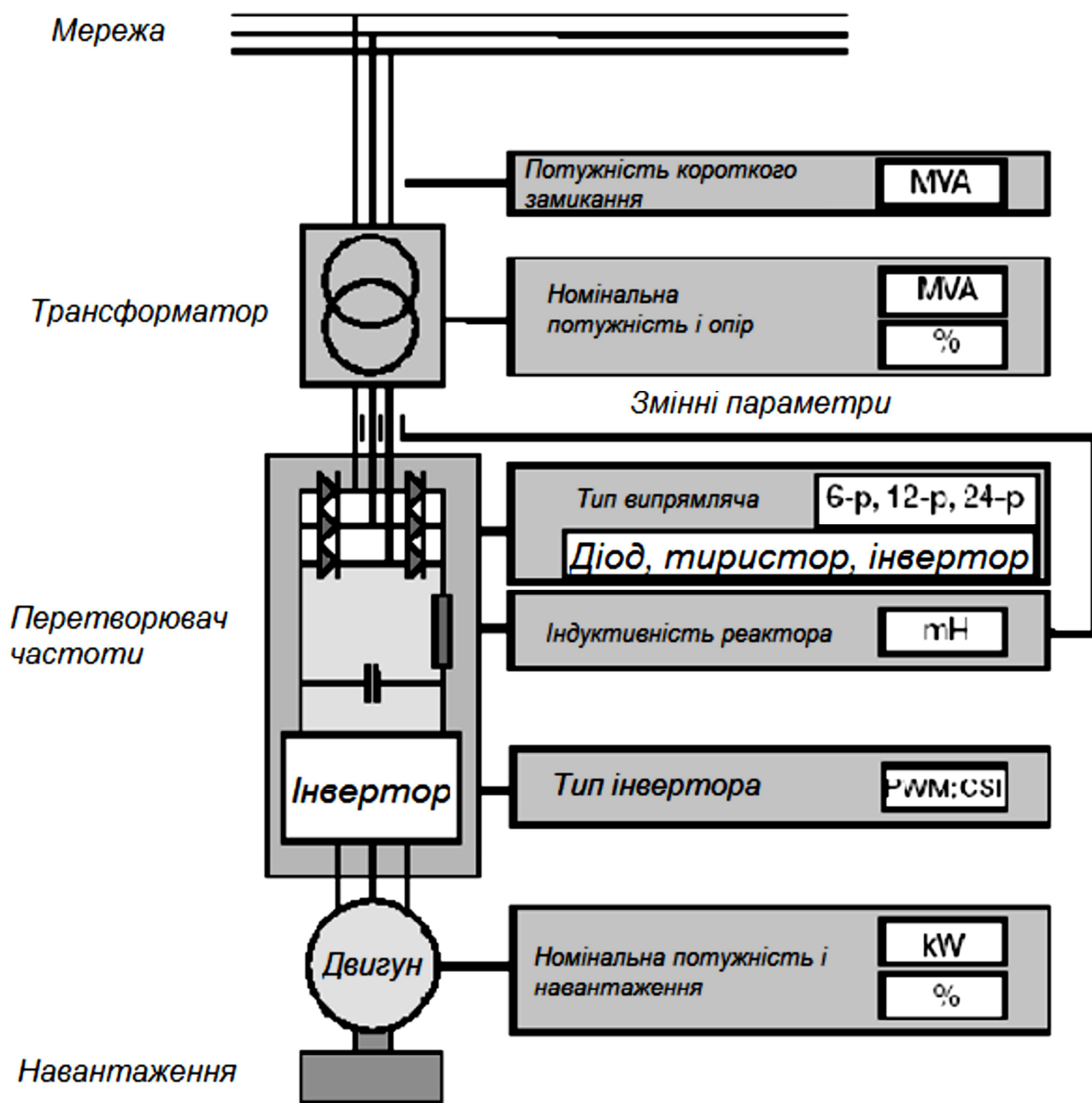


Рис. 4.1. Характеристики системи перетворювача частоти, що впливають на рівень гармонік. [12]

4.3 Фільтри вищих гармонік

Пасивні фільтри гармонік

Фільтрування – це метод згладжування струму споживання протягом кожного циклу змінного струму та зменшення загальних гармонійних струмів. Ця фільтрація використовується, коли гармонічні спотворення поступово збільшуються, або як початкове рішення в новій електричній установці. Фільтри гармонік можуть використовуватися, як на промислових підприємствах, так і на

конкретних електроустановках. Існує два основних методи: пасивний і активний фільтри.

Пасивні фільтри включають пристрої, які забезпечують шляхи з низьким опором для перенаправлення гармонік на землю, і пристрої, які створюють шлях з вищим опором, щоб ускладнити потік гармонік через нього. Обидва ці пристрої змінюють характеристики повного опору ланцюгів, де вони встановлені. Недолік пасивних фільтрів полягає в тому, що вони не можуть адаптуватися до змін в електричних системах, в яких вони працюють. Іншими словами, зміни в електричній системі (наприклад, включення або відключення конденсаторів компенсації реактивної потужності або підключення більшої кількості нелінійних навантажень) можуть призвести до їх перевантаження або створення «резонансів», які можуть фактично підсилювати, а не послаблювати гармоніки.

Пасивні фільтри за конструкцією можна розділити на одно- та багато- частотні. Принцип пасивного фільтра з настроєною одною частотою показано на рис. 4.2. Налаштований пасивний фільтр слід застосовувати до одної найнижчої гармонічної складової (п'ята гармоніка для промислового навантаження), де в системі є значна генерація гармонік. Мета таких фільтрів полягає в тому, що гармоніки вище налаштованої частоти поглинаються, а гармоніки нижче цієї частоти можуть бути посилені.

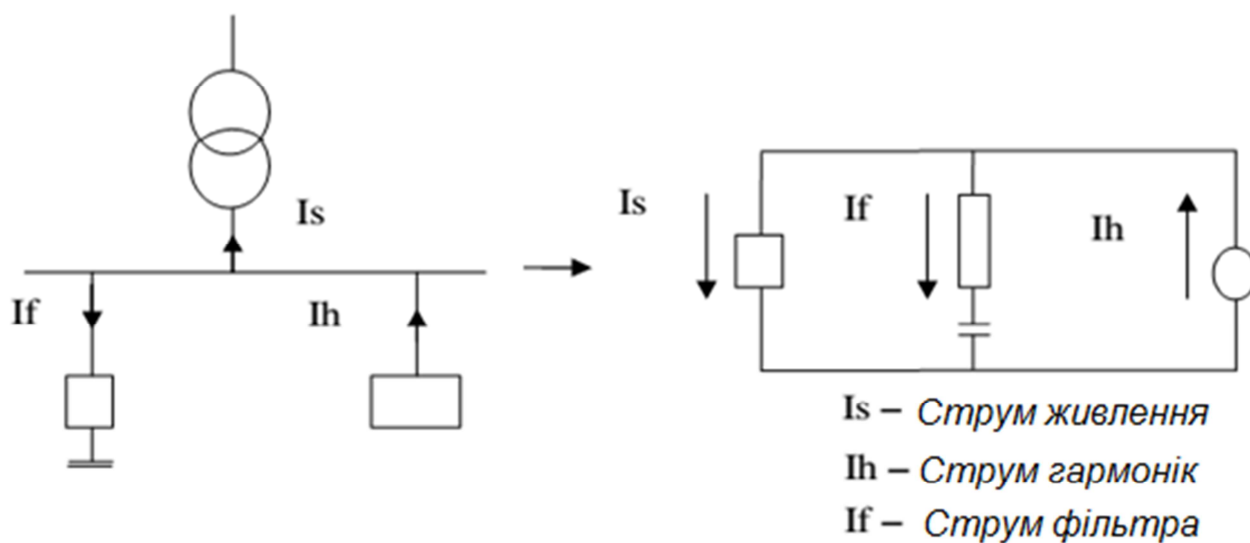


Рис. 4.2. Одночастотний пасивний фільтр.

Мету застосування одночастотного пасивного фільтра можна зазначити в наступному:

- Настроєний на одну частоту поглинання;
- Поглинання гармонік вище налаштованої частоти;
- Гармоніки нижче налаштованої частоти можуть бути посилені;
- Гармонійне зниження обмежене можливою надмірною компенсацією реактивної потужності.

Цей тип фільтра складається з котушки індуктивності, включеної послідовно з батареєю конденсаторів і найкраще розташування пасивного фільтра поблизу навантажень, що генерують гармоніки. Це спосіб зниження вищих гармонік, зазвичай, не використовується для нових установок.

Принцип настроєного багаточастотного фільтра показано на рис. 4.3. Цей фільтр має кілька ланцюгів, налаштованих на дві або більше гармонійних складових, які повинні бути найнижчі суттєві гармоніки в системі. Фільтри з кількома частотами налаштування краще поглинають гармоніки, ніж фільтри з одною частотою.

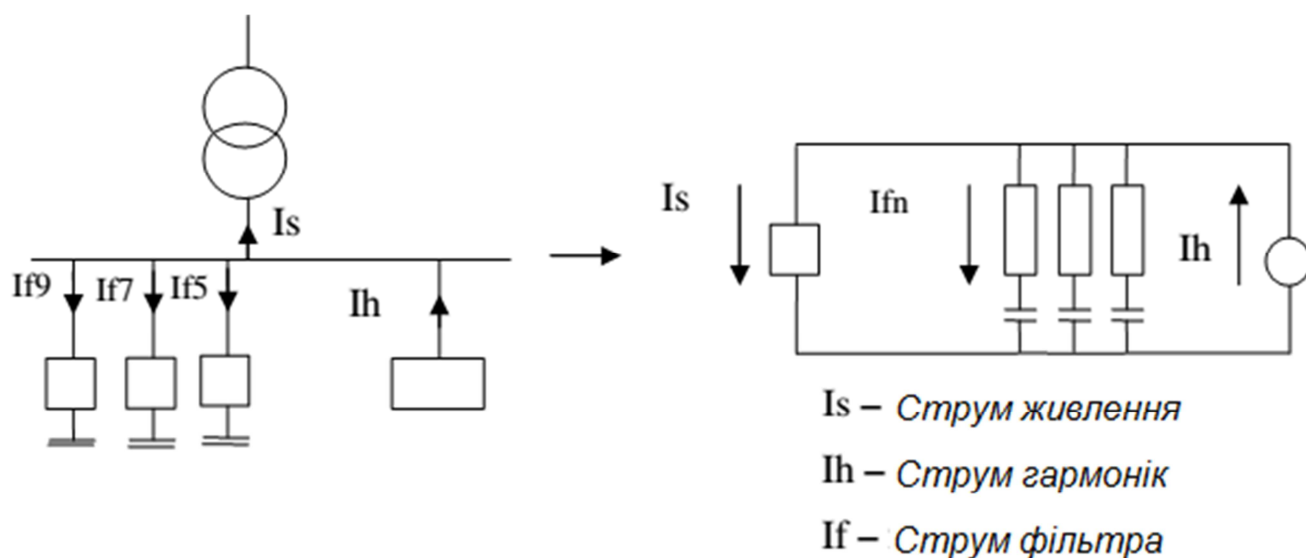


Рис. 4.3. Налаштований багаточастотний пасивний фільтр.

Мета застосування налаштованого багаточастотного пасивного фільтра полягає в наступному:

- Ємнісний характер ланцюга нижче налаштованої частоти та індуктивний вище частоти налаштування;
- Краще поглинання гармонік;
- Врахування можливого підсилення гармонік фільтром;
- Обмеження, що накладаються реактивною потужністю, яка видається та енергосистемою.

Багаточастотні пасивні фільтри часто використовуються для великих установок приводів постійного струму де спеціальний трансформатор живить всю установку. Пасивна фільтрація має один суттєвий недолік, вона призводить до втрат активної потужності так, як непотрібні гармоніки перетворюються на тепло у фільтрах.

Переваги та недоліки пасивних фільтрів

Головна перевага пасивних резонансних фільтрів перед активними – це вартість, а головний недолік – необхідність тривалого ретельного аналізу мережі при проектуванні для вибору оптимального рішення. Іншим слабким місцем пасивних резонансних фільтрів є те, що завжди є небезпека перевантаження через збільшення навантаження з підвищенням вмістом гармонік та інших джерел спотворень.

Пасивні фільтри мають обмежені можливості щодо зменшення сигналів на високих частотах, тобто чим вищий порядок гармоніки, тим нижча ефективність фільтра. Крім того, не так просто компенсувати гармоніку у разі динамічних змін гармонійних спотворень.

Активні фільтри гармонік

Активні фільтри, навпаки, постійно коригують свою поведінку у відповідь на гармонічний вміст струму в ланцюзі, де вони встановлені, і ще одна істотна особливість: вони не викликають резонансу. Ці фільтри розроблені для повного діапазону очікуваних робочих умов після встановлення, не вимагаючи подальших налаштувань оператором. Загальна схема активних фільтрів представлена на рис. 4.4.

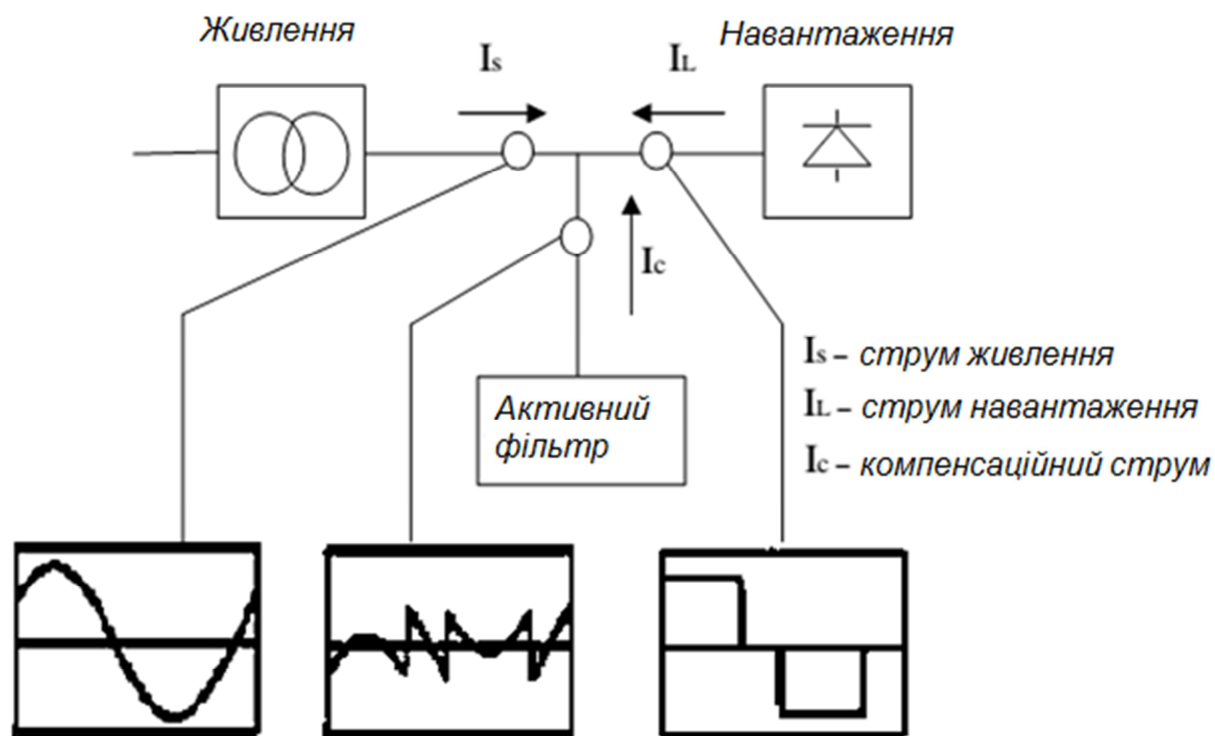


Рис. 4.4. Принципова схема зовнішнього активного фільтра. [12]

Активний фільтр компенсує гармоніки, створені нелінійними навантаженнями генеруючи ті самі гармонічні компоненти в протилежній фазі, як показано на рис. 4.5. Зовнішні активні фільтри найбільше підходять для кількох невеликих нелінійних навантажень. Вони відносно дорогі порівняно з іншими методами.

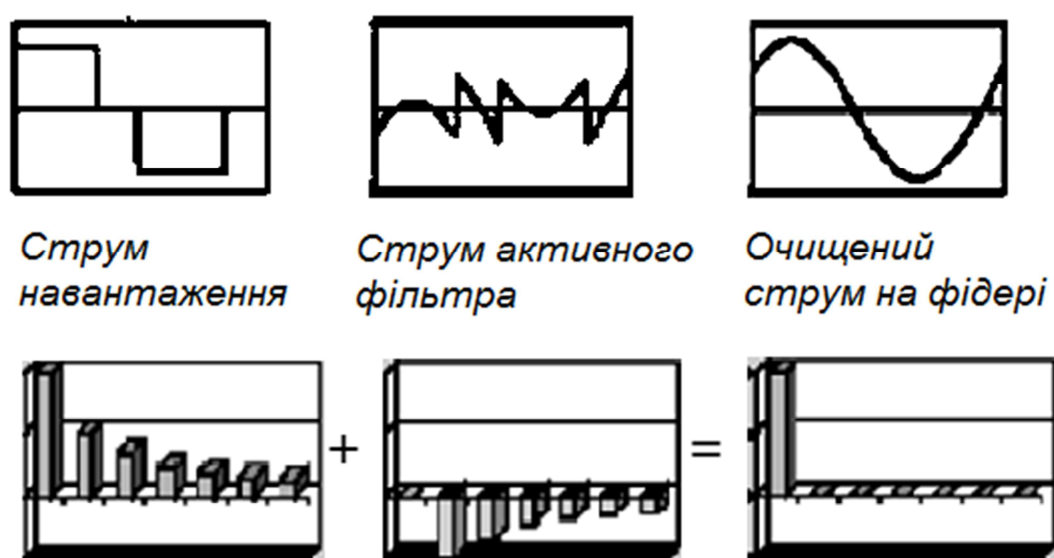


Рис. 4.5. Зовнішній активний фільтр сигналів і гармонік. [12]

Ізоляційні трансформатори

Ізоляційні трансформатори – це фільтруючі пристрої, які розподіляють гармоніки в конкретному ланцюзі, в якій вони встановлені, таким чином захищаючи обладнання, що розташоване вище від впливу гармонік. Ці трансформатори не усувають проблему в ланцюзі, що генерує гармоніки, але вони можуть запобігти виникненню гармонік в інших точках системи електропостачання та їх впливу на більш чутливе обладнання.

Трансформатори зменшення гармонік

Використання трансформаторів зменшення гармонік усуває проблемні гармоніки. Дані трансформатори можуть бути економічно ефективними при їх правильному застосуванні, оскільки вони можуть, як підвищити надійність, так і зменшити втрати електроенергії. Правильне застосування полягає в тому, що застосовується для трансформаторів, які мають велике або помірне навантаження та де присутні високі рівні гармонійних струмів. Крім того, трансформатори зменшення гармонік дуже ефективні в підтримці критичних навантажень, які резервуються джерелами безперебійного живлення. Джерела безперебійного живлення і резервні генератори, як правило, мають високий внутрішній опір, що призводить до спотворення високої напруги під нелінійним навантаженням. Через це обладнання, яке бездоганно працює при живленні від мережі, може вийти з ладу, коли вмикається резервна система під час відключення мережі.

Альтернативні методи (інжекція струму)

Сучасна техніка інжекції детально описана [19]. Методика, заснована на введенні 3-ї гармоніки струму в міжфазний трансформатор перетворювачів. Повинні бути доступні дві групи перетворювачів. Крім того, джерело 3-ї гармоніки струму підключається між нейтральними точками двох груп, як показано на рис. 4.6. Інжектований струм циркулює всередині двох груп перетворювачів і вторинної обмотки трансформатора. Вибір відповідного фазового зсуву та величини введеного струму призводить до компенсації однієї гармоніки струму та значного зменшення інших гармонік. Порядок обнуленої гармоніки визначається величиною інжектованого струму. Джерела струму в

розроблених схемах підключаються через вторинні обмотки перетворювального трансформатора, що дозволяє застосовувати цю методику для будь-якого типу перетворювача. Ця схема не страждає від проблем, пов'язаних з фільтрацією, зокрема від впливу опору системи. Хоча ця схема не усуває повністю більше ніж одну гармоніку, вона забезпечує значне покращення якості електричної енергії. [19]

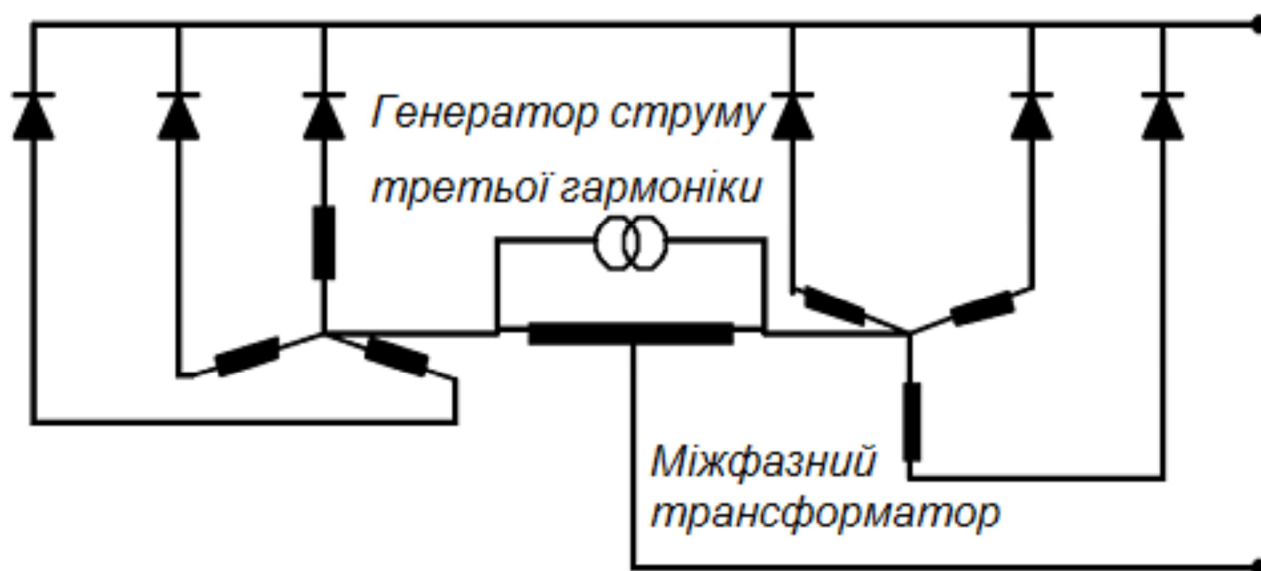


Рис. 4.6. Принцип усунення гармонік методом гармонічної інжекції. [19]

РОЗДІЛ 5

ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИЙ ПРИСТРІЙ, ЯК ЗАСІБ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ І ЗМЕНШЕННЯ РІВНЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК

5.1 Методика вибору фільтрокомпенсуючого пристрою

Зниження рівнів вищих гармонік та компенсація реактивної потужності в електричних мережах є частиною комплексної задачі зменшення впливу нелінійних навантажень та підвищення ефективності систем електропостачання. Воно засновується на використанні багатофункціональних пристроїв, що забезпечують зменшення рівнів вищих гармонік та компенсацію реактивної потужності. Таким багатофункціональним пристроєм є силовий резонансний фільтр вищих гармонік, відомий під назвою фільтрокомпенсуючий пристрій (ФКП). Ці пристрої можуть використовуватися для шунтування струмів вищих гармонік і, в той же час є джерелами реактивної потужності на основній частоті.

При паралельному з'єднанні LC -ланцюгів, налаштованих на частоти окремих гармонік, утворюється багаточастотний ФКП. Компенсація реактивної потужності в цьому випадку може бути здійснена за допомогою БК ФКП, при цьому встановлена потужність БК використовується майже 80-90%. Отже, ФКП є достатньо простими та економічним засобом компенсації реактивної потужності в умовах нелінійних навантажень, що обумовило їх широке застосування. Розглянемо принцип дії ФКП більш детально.

Схеми електричних з'єднань фільтрокомпенсуючих пристроїв наведені на рис. 5.1. Найбільше розповсюдження отримала схема наведена на рис. 5.1, б.

В електричних мережах з 12-фазними випрямлячами, як правило, встановлюються фільтрокомпенсуючі пристрої налаштовані на 11 і 13 гармоніку, а з 6-фазними відповідно на 5, 7, 11 та 13 гармоніки. В системах електропостачання з дуговими сталеливарними печами використовуються фільтрокомпенсуючі пристрої налаштовані на 2, 3, 4 та 5 гармоніки.

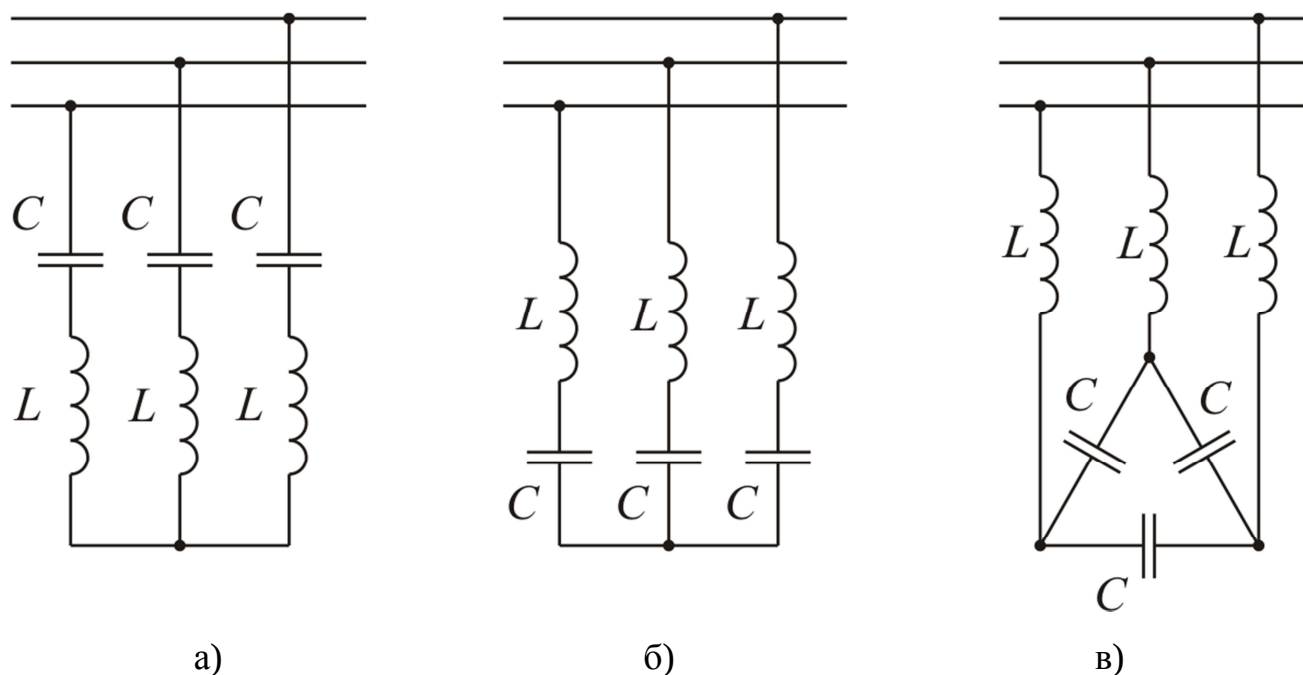


Рис. 5.1. Схеми фільтрокомпенсуючих пристроїв

Технічними умовами експлуатації батарей конденсаторів дозволяється перевищення напруги та струму від номінального значення на деяку величину c_u та c_i . В залежності від конструкції конденсаторів $c_u = 1$ або $c_u = 1,1$; $c_i = 1,3$ або $c_i = 1,5$. Вразі експлуатації конденсаторів в мережах з нелінійними навантаженнями можуть висуватися додаткові вимоги, що обмежують їх потужність номінальним значенням.

Вибір та розрахунок фільтрокомпенсуючих пристроїв ведуть, як правило, з урахуванням лише реактивних опорів. Це пов'язано з тим, що добротність контуру ФКП, яка на практиці $Q_\phi \geq 20$, а при $Q_\phi \geq 6$ відносне відхилення від частоти резонансу $\frac{f}{f_{рез}} \approx 1$. Яке може бути розраховане за відомим значенням добротності ФКП Q_ϕ за формулою

$$\frac{f}{f_{рез}} = \sqrt{\frac{2 - \frac{1}{Q_\phi^2}}{2}}.$$

Зробимо припущення, що в ланцюгу фільтрокомпенсуючого пристрою протікає лише струм 1-ї та ν_p -ї гармонік. Тоді вираз для потужності БК ФКП ν -ї

гармоніки, за умови що напруга на конденсаторах не перевищує допустимого або номінального значення, знаходиться з співвідношення:

$$V_s = \frac{X_C}{X_T + X_C + R} V_h \approx \frac{X_C}{R} V_h, \quad (5.1)$$

$$K_Q a_p k_u \leq c_u, \quad (5.2)$$

де

$$a_p = \frac{v_p^2}{v_p^2 - 1}, \quad K_Q = 1 + \frac{Q_p}{S_\kappa} \quad (5.3)$$

де v_p – номер гармоніки налаштування фільтрокомпенсуючого пристрою з потужністю БК Q_p .

$$k_u = \frac{U_m}{U_{ном.p}}, \quad (5.4)$$

де U_m – максимально допустиме значення напруги на шинах підстанції; $U_{ном.p}$ – номінальна напруга батарей конденсаторів фільтрокомпенсуючого пристрою.

Після включення фільтрокомпенсуючого пристрою напруга в електричній мережі збільшиться пропорційно коефіцієнту a_p (при $v = 5$ $a_p = 1,042$; $v = 7$ $a_p = 1,03$; $v = 11$ $a_p = 1,008$; $v = 13$ $a_p = 1,006$).

Отже, максимальна напруга на батареї конденсаторів складе:

$$U_{БК \max} = U_c k_u K_Q a_p, \quad (5.5)$$

де U_c – номінальна напруга мережі.

Струмове перевантаження батареї конденсаторів фільтрокомпенсуючого пристрою невідбудеться, якщо виконається нерівність

$$\sqrt{I_{1p}^2 + \Sigma I_{vp}^2} \leq c_i I_{ном.p}, \quad (5.6)$$

де I_{1p} та I_{vp} – струми відповідно 1-ї та v_p -ї гармонік в колі фільтрокомпенсуючого пристрою; $I_{ном.p}$ – номінальний струм батареї конденсаторів.

У випадку використання декількох фільтрокомпенсуючих пристроїв через кожний з них пройде струми основної частоти та гармоніки, на яку він налаштований, а також незначні струми інших вищих гармонік, тобто

$$I_{vp} = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{vk(p)}^2}. \quad (5.7)$$

Значення потужності батареї конденсаторів фільтрокомпенсуючого пристрою v_p -ї гармоніки з'єданого в зірку може бути знайдене за формулою:

$$Q_p \geq \frac{\sqrt{3} U_{ном.p} I_{vp}}{\sqrt{c_i^2 - a_p^2 k_u^2}}, \quad (5.8)$$

Для зручності практичного застосування (5.8) може бути спрощене:

$$Q_p \geq 1,2 k_C U_{ном.p} I_{vp}, \quad (5.9)$$

де k_C – коефіцієнт схеми ($k_C = \sqrt{3}$ при з'єднанні конденсаторів в трикутник і $k_C = 3$ при з'єднанні в зірку).

Ємнісний X_C і індуктивний X_L опір на основній частоті визначаються за формулами

$$X_C = \frac{U_{ном}^2}{Q_{БК}}, \quad X_L = \frac{X_C}{v_p^2}, \quad (5.10)$$

де $U_{ном}$ – номінальна напруга батареї конденсаторів, кВ; $Q_{БК}$ – її номінальна потужність, кВар.

Потужність батареї конденсаторів в схемі фільтрокомпенсуючих пристроїв менша, за номінальну при номінальній напрузі на величину $\frac{100}{v_p^2}$, %. Отже, реактивна потужність батареї конденсаторів в фільтрокомпенсуючому пристрої на 10-15 % менше від номінальної.

Також необхідно врахувати обмеження по потужності батареї конденсаторів за умовою

$$Q_p \geq Q_{1p} + Q_{vp}, \quad (5.11)$$

де Q_{1p} та Q_{vp} – реактивна потужність батареї конденсаторів відповідно на частотах 1-ї та v_p -ї гармоніки.

Вона виконується, якщо виконується нерівність

$$a_p^2 k_u^2 + \sum_{p=2}^n \left(\frac{I_{vp}}{I_{ном.p}} \right)^2 \frac{1}{v_p^2} \leq 1. \quad (5.12)$$

Припускаючи, що через фільтрокомпенсуючий пристрій протікають лише струми основної частоти та v_p -ї гармоніки, відсутність перевантаження батареї конденсаторів по потужності виконується при виконанні нерівності:

$$K_Q a_p k_u \leq \sqrt{1 - \frac{0,7}{v_p}}. \quad (5.13)$$

5.2 Розрахунок силового резонансного фільтра

Силовий резонансний фільтр являє собою пристрій, що підключається паралельно обмоткам живильного трансформатора, і має істотно менший опір на обраній частоті, ніж опір обмоток трансформатора. У цьому випадку струм гармоніки замикається двома паралельними гілками з різними опорами. Оскільки струм гармоніки, що протікає по обмотках трансформатора, при використанні фільтра зменшується, то знижується рівень гармоніки напруги на виводах трансформатора [15].

На рис. 5.2 наведено схему заміщення фази силового трансформатора з підключеним фільтром вищих гармонік та батареєю конденсаторів. Фільтр вищих гармонік є джерелом реактивної потужності. Якщо цієї потужності не вистачає для компенсації, необхідно додатково встановити батарею конденсаторів. Усе це істотно впливає на розподіл струмів вищих гармонік силової ланцюга. Тому при зміні схеми необхідно щоразу проводити перерахунок гармонік напруги на виводах трансформатора, а також проводити оцінку навантаження конденсаторів по струму та напрузі, як в елементах фільтра, так і батареї конденсаторів.

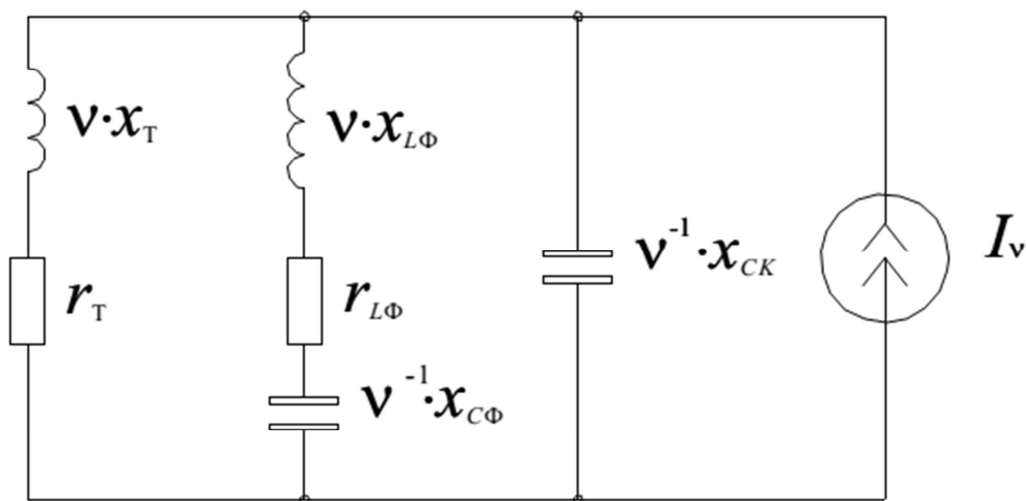


Рис. 5.2. Схема заміщення фази трансформатора з підключеним фільтром та батареєю конденсаторів.

Як елемент із залежним від частоти опором зазвичай використовується ланцюг пасивних елементів – послідовно з'єднані котушка індуктивності та конденсаторна батарея. Струм котушки та потужність конденсаторів визначається

величиною струму гармоніки, на придушення якої налаштовується фільтр, а величина індуктивності котушки визначається виходячи з наступного співвідношення:

$$2\pi f_1 v L = \frac{1}{2\pi f_1 v C}. \quad (5.14)$$

При розрахунках елементів фільтра можна знехтувати активним опором обмоток силового трансформатора. У цьому випадку схема заміщення фази трансформатора з встановленим фільтром обраної гармоніки набуде вигляду, представленого на рис. 5.3.

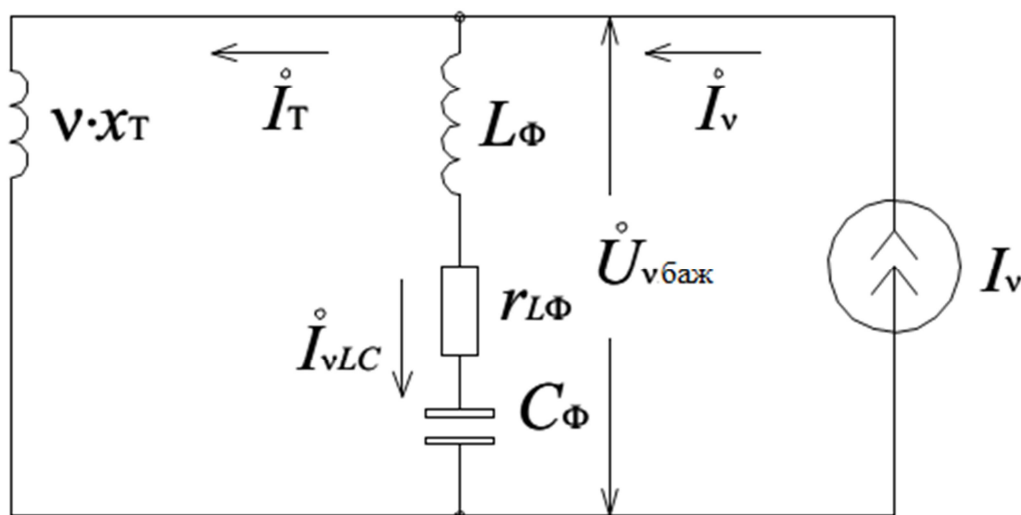


Рис. 5.3. Розрахункова схема заміщення.

Відповідно до наведеної на рис. 5.3 схемою, з урахуванням того, що на резонансній частоті реактивний опір у плечі фільтра дорівнює нулю, бажаний рівень напруги на виводах трансформатора n -ї гармонійної складової дорівнюватиме:

$$\dot{U}_{v\text{баж}} = \dot{I}_v \frac{j r_{L\Phi} v x_T}{r_{L\Phi} + j v x_T}. \quad (5.15)$$

Звідки отримаємо:

$$\dot{U}_{\text{вбаз}}(r_{L\Phi v} + jv x_T) = \dot{I}_v(jr_{L\Phi v} v x_T); \quad (5.16)$$

$$\dot{U}_{\text{вбаз}} r_{L\Phi v} + j\dot{U}_{\text{вбаз}} v x_T = j\dot{I}_v r_{L\Phi v} v x_T; \quad (5.17)$$

$$r_{L\Phi v}(j\dot{I}_v v x_T - \dot{U}_{\text{вбаз}}) = j\dot{U}_{\text{вбаз}} v x_T; \quad (5.18)$$

$$r_{L\Phi v} = \left| \frac{j\dot{U}_{\text{вбаз}} v x_T}{j\dot{I}_v v x_T - \dot{U}_{\text{вбаз}}} \right|; \quad (5.19)$$

Струм, що протікає по фільтру, можна визначити за формулою

$$I_{LCv} = \left| I_v \frac{jv x_T}{r_{L\Phi v} + jv x_T} \right|. \quad (5.20)$$

Кількість конденсаторів у фільтрі визначатиметься величиною струму, обчисленого за формулою (5.20). Якщо виходити з того, що номінальний струм конденсатора дорівнює

$$I_{\text{ном}} = \frac{Q_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}}. \quad (5.21)$$

отримаємо

$$N_{Cv} = \frac{I_{LCv}}{I_{\text{ном}}}. \quad (5.22)$$

Округливши отриману кількість конденсаторів до найближчого цілого значення, отримаємо ємність у плечі фільтра

$$C_{\Phi v} = C'_{\text{ном}} N_{Cv}. \quad (5.23)$$

де $C'_{\text{ном}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{ном}}} \frac{Q_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}^2}$ – приведена номінальна ємність фаз конденсаторів при з'єднанні в зірку.

Розрахункова індуктивність фільтра складе:

$$L_{\Phi v} = \frac{1}{(2\pi f_1 v)^2 C_{\Phi v}}. \quad (5.24)$$

Після вибору реактивних елементів фільтра необхідно розрахувати величину реактивної потужності, яку фільтр генерує на основній частоті:

$$Q_{\Phi 1_v} = \text{Im} \left(\frac{U_1^2}{r_{L\Phi v} + j2\pi f_1 L_{\Phi v} - \frac{j}{2\pi f_1 C_{\Phi v}}} \right). \quad (5.25)$$

Потужність конденсаторної батареї, що встановлюється додатково до фільтра, визначається різницею між необхідною потужністю конденсаторної батареї та потужністю, що генерується фільтром на основній частоті. Після вибору всіх елементів компенсуючого пристрою проводиться розрахунок гармонійного складу напруги на шинах підстанції з використанням методики викладеної в [17]. Якщо гармонічний склад напруги не задовольняє вимогам [21], проводиться розрахунок додаткового плеча фільтра, налаштованого на відповідну гармоніку. Якщо гармонічний склад напруг задовольняє вимогам [21], проводиться перевірка конденсаторів у фільтрі та додаткової батареї по струму, що діє і амплітуді напруги. Напруги на конденсаторах, що розташовуються в плечах фільтра, визначаємо, виходячи з припущення, що по плечу фільтра, налаштованого на обрану гармоніку, переважно протікають струми першої

гармоніки і тієї гармоніки, на яку налаштований фільтр. У цьому випадку складові напруги, які присутні на затискачах конденсаторів у фільтрі з урахуванням того, що вони з'єднані в трикутник, можна визначити за такими формулами:

$$U_{Cv} = I_{LCv} \frac{\sqrt{3}}{2\pi f_1 v C_{\Phi v}}; \quad (5.26)$$

$$U_{C1_v} = \frac{Q_{\Phi 1_v}}{U_1} \frac{\sqrt{3}}{2\pi f_1 C_{\Phi v}}. \quad (5.27)$$

Амплітуда напруги на конденсаторах фільтра n-ї гармоніки

$$U_{mC_v} = \max(\sqrt{2}U_{C1_v} \sin(2\pi f_1 t) + \sqrt{2}U_{Cv} \sin(2\pi f_1 vt)). \quad (5.28)$$

Під час перевірки конденсатори фільтра повинні задовольняти умові:

$$U_{mC_v} \leq 1,1\sqrt{2}U_{ном}. \quad (5.29)$$

Якщо конденсатори не проходять перевірку, необхідно вибрати конденсатори з вищою номінальною напругою.

5.3 Розрахунок фільтрокомпенсуючого пристрою

Проведемо розрахунок фільтрокомпенсуючого пристрою для цеху механічної обробки. Виміряний рівень коефіцієнтів гармонійних складових напруги становив:

$$k_{U(5)} = 5,3\%;$$

$$k_{U(7)} = 3,2\%;$$

$$k_{U(11)} = 2,2\%;$$

$$k_{U(13)} = 1,5\%.$$

Рівень інших коефіцієнтів – менше 0,5 %.

Гармонічний склад напруги на обмотках силового трансформатора повинен бути відповідно до [21].

Розрахунок починаємо з вибору пригнічуваної за допомогою фільтра гармоніки. Оскільки установка фільтра впливає на величину сусідніх гармонік напруги, найзручніше почати з розрахунку фільтра 5-й гармоніки з наступною оцінкою необхідності установки інших фільтрів. До встановлення фільтра рівень напруги 5-ї гармоніки становить 20,6 В. Встановимо бажаний рівень напруги цієї гармоніки на рівні 10 В.

$$r_{L\Phi 5} = \left| \frac{j\dot{U}_{5\text{баж}} 5x_T}{j\dot{I}_5 5x_T - \dot{U}_{5\text{баж}}} \right| = \left| \frac{j10 \cdot 5 \cdot 9,953 \cdot 10^{-3}}{j239 \cdot 5 \cdot 9,953 \cdot 10^{-3} - 10} \right| = 0,032 \text{ Ом};$$

$$I_{LC5} = \left| I_5 \frac{j5x_T}{r_{L\Phi 5} + j5x_T} \right| = \left| 239 \frac{j5 \cdot 9,953 \cdot 10^{-3}}{0,032 + j5 \cdot 9,953 \cdot 10^{-3}} \right| = 201 \text{ А};$$

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{Q_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}} = \frac{50000}{\sqrt{3} \cdot 425} = 67,9 \text{ А};$$

$$N_{C5} = \frac{I_{LC5}}{I_{\text{НОМ}}} = \frac{201}{67,9} = 2,9.$$

Округлюємо отриману кількість конденсаторів до 3:

$$C_{\Phi 5} = \frac{1}{2\pi f_{\text{НОМ}}} \frac{Q_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}^2} N_{C5} = \frac{1}{2\pi 50} \frac{50000}{425^2} 3 = 2643 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$L_{\Phi 5} = \frac{1}{(2\pi f_1 5)^2 C_{\Phi 5}} = \frac{1}{(2\pi 50 \cdot 5)^2 2643 \cdot 10^{-6}} = 0,153 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Після вибору реактивних елементів фільтра необхідно розрахувати величину реактивної потужності, яку фільтр генерує на основній частоті:

$$Q_{\Phi 1_5} = \operatorname{Im} \left(\frac{U_1^2}{r_{L\Phi 5} + j2\pi f_1 L_{\Phi 5} - \frac{j}{2\pi f_1 C_{\Phi 5}}} \right) =$$

$$= \operatorname{Im} \left(\frac{395,8^2}{0,032 + j2\pi \cdot 50 \cdot 0,153 \cdot 10^{-3} - \frac{j}{2\pi \cdot 50 \cdot 2643 \cdot 10^{-6}}} \right) = 135,4 \cdot 10^3 \text{ вар.}$$

Додатково до фільтра потрібно встановити конденсаторну батарею потужністю

$$Q_{KB} = 250 - Q_{\Phi 1_5} = 250 - 135,4 = 114,6 \text{ кВар.}$$

Вибираємо 2 конденсатори по 50 кВар, що включаються паралельно фільтру 5-ї гармоніки ($N_C = 2$).

Частотна характеристика мережі, що відповідає схемі, що зображена на рис. 5.2, набуде наступного вигляду:

$$z(v) = \left(\frac{1}{r_T + jv x_T} + \frac{1}{jv 2\pi f_1 L_{\Phi 5} + \frac{1}{jv 2\pi f_1 C_{\Phi 5}}} + jv 2\pi f_1 C_{\text{ном}} N_C \right)^{-1}.$$

Розрахункова амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) мережі з встановленим фільтром представлена на рис. 5.4. Де для порівняння також наведено АЧХ мережі зі встановленими конденсаторами без фільтра.

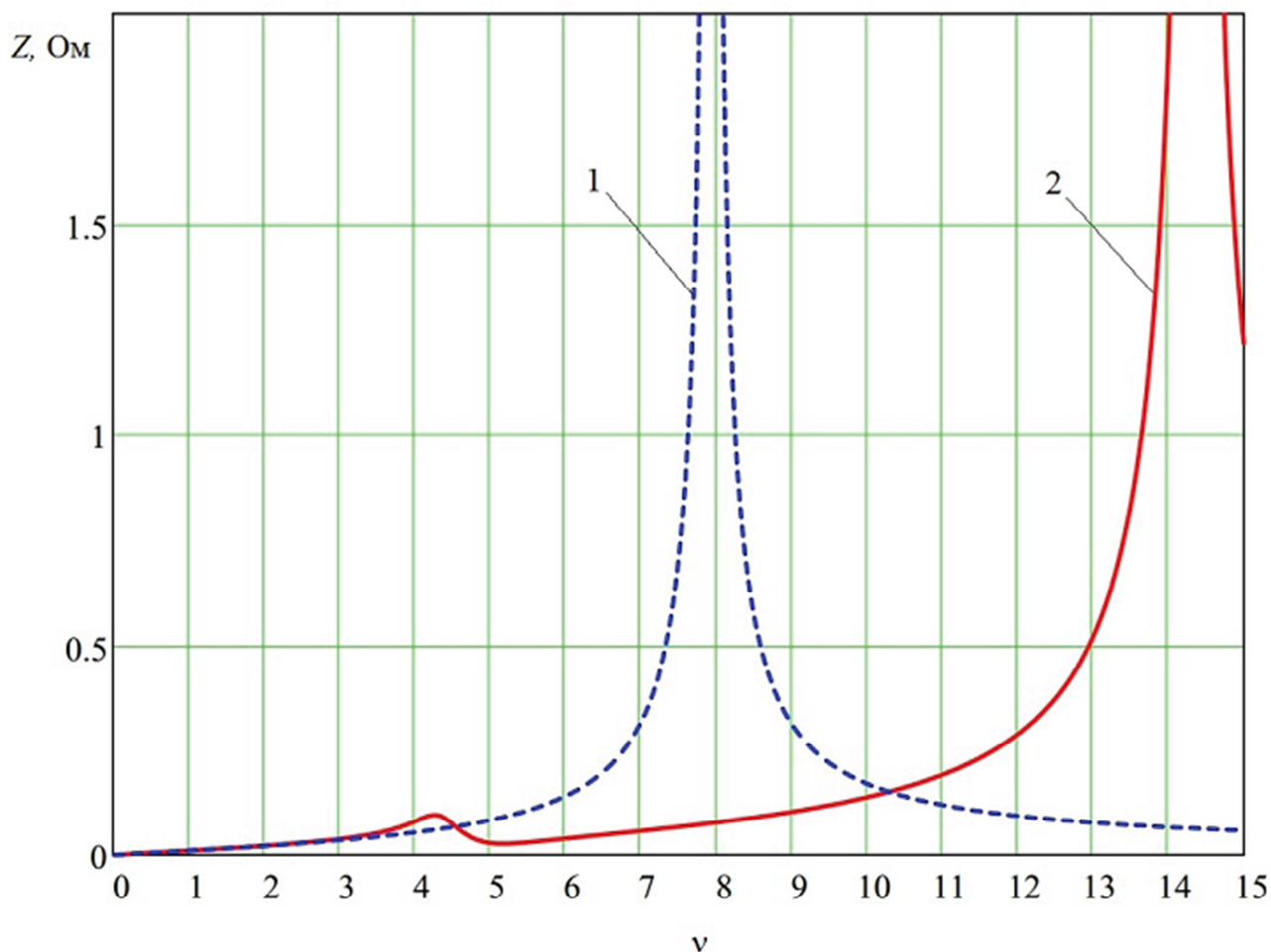


Рис. 5.4. Амплітудно-частотні характеристики мережі:

1 – до застосування фільтра, 2 – після застосування фільтра

За допомогою отриманої характеристики визначаємо гармонійний склад напруги на виводах трансформатора. Рівень гармонійних складових напруги після застосування фільтра 5-ї гармоніки:

$$U_5 = \sqrt{3} I_5 Z(5) = 11,664 \text{ В};$$

$$U_7 = \sqrt{3} I_7 Z(7) = 10,257 \text{ В};$$

$$U_{11} = \sqrt{3} I_{11} Z(11) = 14,814 \text{ В};$$

$$U_{13} = \sqrt{3} I_{13} Z(13) = 23,41 \text{ В}.$$

Коефіцієнти гармонійних складових напруги:

$$k_5 = \frac{U_5}{U_1} 100 = 2,947\%;$$

$$k_7 = \frac{U_7}{U_1} 100 = 2,592\%;$$

$$k_{11} = \frac{U_{11}}{U_1} 100 = 3,743\%;$$

$$k_{13} = \frac{U_{13}}{U_1} 100 = 5,915\%.$$

Коефіцієнт несинусоїдності напруги:

$$k_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} U_v^2}}{U_1} 100 = 8,024\%.$$

Розрахунки показали, що для задоволення вимог [21] необхідно встановити також і фільтр 11 гармоніки. Допустимий рівень напруги становить 7,6 В (2 % від напруги основної гармоніки). Встановимо бажаний рівень напруги 11-ї гармоніки на рівні 3,8 В. Тоді

$$r_{L\Phi 11} = \left| \frac{j\dot{U}_{11\text{баз}} 11x_T}{j\dot{I}_{11} 11x_T - \dot{U}_{11\text{баз}}} \right| = 0,067 \text{ Ом};$$

$$I_{LC11} = \left| I_{11} \frac{j11x_T}{r_{L\Phi 11} + j11x_T} \right| = 38,404 \text{ А};$$

$$N_{C11} = \frac{I_{LC11}}{I_{\text{ном}}} = \frac{38,4}{67,9} = 0,565.$$

Округлюємо отриману кількість конденсаторів до 1. Індуктивність у плечі фільтра буде:

$$L_{\Phi 11} = \frac{1}{(2\pi f_1 11)^2 C_{\Phi 11}} = 0,095 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Величина реактивної потужності, яку фільтр 5-ї та 11-ї гармонік генерує на основній частоті, дорівнює

$$Q_{\Phi 1_5_11} = \text{Im} \left(\frac{U_1^2}{r_{L\Phi 5} + j2\pi f_1 L_{\Phi 5} - \frac{j}{2\pi f_1 C_{\Phi 5}}} + \frac{U_1^2}{r_{L\Phi 11} + j2\pi f_1 L_{\Phi 11} - \frac{j}{2\pi f_1 C_{\Phi 11}}} \right) = 224,2 \cdot 10^3 \text{ вар.}$$

Додатково до фільтра потрібно встановити конденсаторну батарею потужністю

$$Q_{\text{КБ}} = 250 - Q_{\Phi 1_5_11} = 250 - 224,2 = 25,8 \text{ кВар.}$$

Вибираємо 1 конденсатор потужністю 50 квар, що включає паралельно фільтрам 5-й і 11-й гармонік ($N_C = 1$). Частотна характеристика мережі набуде наступного вигляду:

$$z(v) = \left(\frac{1}{r_T + jv x_T} + \frac{1}{jv 2\pi f_1 L_{\Phi 5} + \frac{1}{jv 2\pi f_1 C_{\Phi 5}}} + \frac{1}{jv 2\pi f_1 L_{\Phi 11} + \frac{1}{jv 2\pi f_1 C_{\Phi 11}}} + jv 2\pi f_1 C_{\text{НОМ}} N_C \right)^{-1}.$$

Розрахункова амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) мережі із встановленими фільтрами 5-ї та 11-ї гармонік представлена на рис. 5.5. Де, як і на рис. 5.4 для порівняння наведена АЧХ мережі з встановленими конденсаторами без фільтра. Рівень гармонійних складових напруги після застосування фільтрів 5-ї та 11-ї гармонік:

$$U_5 = \sqrt{3} I_5 Z(5) = 11,625 \text{ В};$$

$$U_7 = \sqrt{3} I_7 Z(7) = 10,732 \text{ В};$$

$$U_{11} = \sqrt{3} I_{11} Z(11) = 4,426 \text{ В};$$

$$U_{13} = \sqrt{3} I_{13} Z(13) = 3,366 \text{ В}.$$

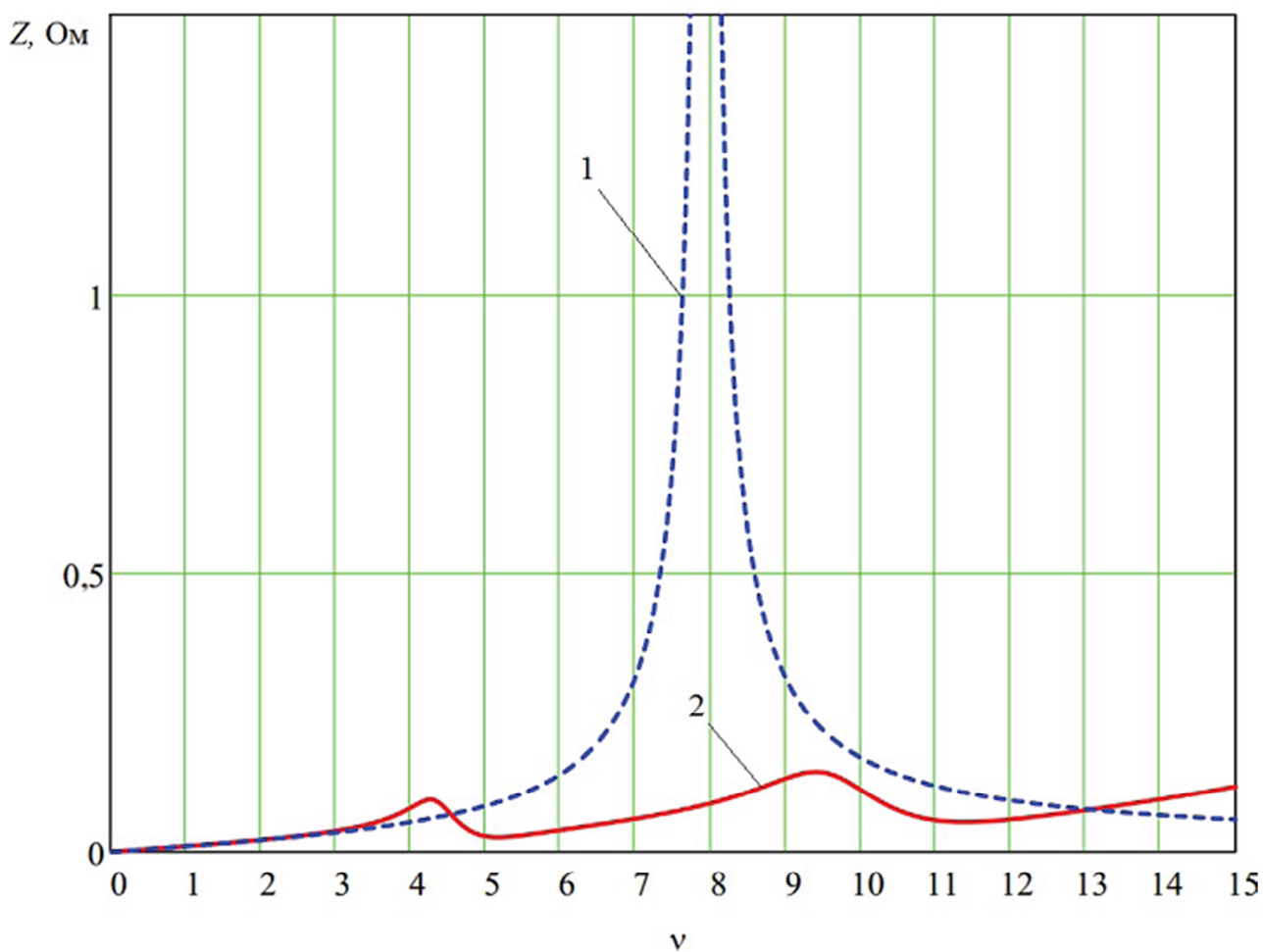


Рис. 5.5. АЧХ мережі з встановленими фільтрами 5-ї та 11-ї гармонік:

1 – до застосування фільтра, 2 – після застосування фільтра

Коефіцієнти гармонійних складових напруги:

$$k_5 = \frac{U_5}{U_1} 100 = 2,937\%;$$

$$k_7 = \frac{U_7}{U_1} 100 = 2,711\%;$$

$$k_{11} = \frac{U_{11}}{U_1} 100 = 1,118\%;$$

$$k_{13} = \frac{U_{13}}{U_1} 100 = 0,895\%.$$

Коефіцієнт несинусоїдності напруги:

$$k_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} U_v^2}}{U_1} 100 = 4,237\%.$$

У наведеному прикладі розрахунку не враховувалися гармоніки струму вище 13-ї, оскільки вони відповідно до розрахункового завдання мають нульове значення. При використанні даних, отриманих в ході реальних вимірювань, необхідно враховувати всі гармоніки струму аж до 40-ї включно, оскільки АЧХ за частотою, на яку налаштовується фільтр, має висхідний характер. Проведемо перевірку вибраних конденсаторів по діючому струму та амплітуді прикладеної напруги. Лінійні струми першої гармоніки через конденсатори фільтрів будуть відповідно:

$$I_{C1_5} = \left| \frac{U_1}{\sqrt{3} \left(R_{\Phi 5} + j2\pi f_1 L_{\Phi 5} - \frac{j}{2\pi f_1 C_{\Phi 5}} \right)} \right| = 263,39 \text{ А};$$

$$I_{C1_11} = \left| \frac{U_1}{\sqrt{3} \left(R_{\Phi 11} + j2\pi f_1 L_{\Phi 11} - \frac{j}{2\pi f_1 C_{\Phi 11}} \right)} \right| = 63,773 \text{ A.}$$

Діючі значення струмів у конденсаторах фільтрів становитимуть:

$$\begin{aligned} I_{C5} &= \frac{1}{N_{C5}} \sqrt{f_1 \int_0^{f_1^{-1}} (\sqrt{2})^2 [I_{C1_5}^2 \sin^2(2\pi f_1 t) + I_{LC5}^2 \sin^2(2\pi f_1 5t)] dt} = \\ &= \frac{1}{3} \sqrt{50 \int_0^{50^{-1}} (\sqrt{2})^2 [263,4^2 \sin^2(2\pi 50t) + 201,0^2 \sin^2(2\pi 50 \cdot 5t)] dt} = 82,8 \text{ A;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{C11} &= \frac{1}{N_{C11}} \sqrt{f_1 \int_0^{f_1^{-1}} (\sqrt{2})^2 [I_{C1_11}^2 \sin^2(2\pi f_1 t) + I_{LC11}^2 \sin^2(2\pi f_1 11t)] dt} = \\ &= \frac{1}{1} \sqrt{50 \int_0^{50^{-1}} (\sqrt{2})^2 [63,8^2 \sin^2(2\pi 50t) + 38,4^2 \sin^2(2\pi 50 \cdot 11t)] dt} = 74,4 \text{ A.} \end{aligned}$$

Співвідношення діючих струмів, що протікають через конденсатори, та їх номінальних струмів для фільтрів 5-ї та 11-ї гармонік становитимуть 1,219 та 1,096 відповідно. Вибрані конденсатори проходять по допустимому струмовому навантаженню.

Проведемо перевірку конденсаторів за допустимою величиною перенапруги. Падіння напруги на конденсаторах фільтрів 5-ї та 11-ї гармонік при протіканні струмів відповідних гармонічних складових будуть:

$$\begin{aligned} U_{C5} &= \frac{I_{LC5}}{\sqrt{3} \left(2\pi f_1 5 \frac{C_{\Phi 5}}{3} \right)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 201}{2\pi 50 \cdot 5 \cdot 2643 \cdot 10^{-6}} = 62,9 \text{ B;} \\ U_{C1_5} &= \frac{Q_{\Phi 1_5}}{U_1} \frac{\sqrt{3}}{2\pi f_1 C_{\Phi 5}} = \frac{\sqrt{3} I_{C1_5}}{2\pi f_1 C_{\Phi 5}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 263,4}{2\pi 50 \cdot 2643 \cdot 10^{-6}} = 412,0 \text{ B;} \end{aligned}$$

$$U_{C11} = \frac{I_{LC11}}{\sqrt{3} \left(2\pi f_1 11 \frac{C_{\Phi 11}}{3} \right)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 38,4}{2\pi 50 \cdot 11 \cdot 881,1 \cdot 10^{-6}} = 21,9 \text{ В};$$

$$U_{C1-11} = \frac{Q_{\Phi 1-11}}{U_1} \frac{\sqrt{3}}{2\pi f_1 C_{\Phi 11}} = \frac{\sqrt{3} I_{C1-11}}{2\pi f_1 C_{\Phi 11}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 63,8}{2\pi 50 \cdot 881,1 \cdot 10^{-6}} = 399,0 \text{ В}.$$

Амплітуди напруги на конденсаторах фільтрів складуть:

$$U_{mC-5} = \max(\sqrt{2}U_{C1-5} \sin(2\pi f_1 t) + \sqrt{2}U_{C5} \sin(2\pi f_1 5t)) = \\ = \sqrt{2} \max(412 \sin(2\pi 50_1 t) + 62,9 \sin(2\pi 50 \cdot 5t)) = 671,6 \text{ В};$$

$$U_{mC-11} = \max(\sqrt{2}U_{C1-11} \sin(2\pi f_1 t) + \sqrt{2}U_{C11} \sin(2\pi f_1 11t)) = \\ = \sqrt{2} \max(399 \sin(2\pi 50t) + 21,9 \sin(2\pi 50 \cdot 11t)) = 569,2 \text{ В}.$$

Співвідношення прикладених амплітуд напруг до конденсаторів фільтрів 5-ї та 11-ї гармонік і номінальних напруг складають 1,117 і 0,947 відповідно. Напруга на конденсаторах фільтра 5-ї гармоніки перевищує допустимий рівень. Необхідно вибрати конденсатори з вищою номінальною напругою КПС-0,44-50-ЗУЗ.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Розрахунок заземлюючого обладнання

Всі металічні частини електроустановок, нормальні які не знаходяться під напругою, але які можуть опинитися під напругою за рахунок пошкодження ізоляції, повинні надійно з'єднуватися з землею. Заземлення обов'язкове в зовнішніх установках при напрузі вище 36 В змінного струму.

В мережі 110 кВ заземлюючий опір повинен мати в любий час року опір $R_3 \leq 0,5 \text{ Ом}$. В якості природних заземлювачів використовуємо систему грозозахисних тросів опори ВЛ-110 кВ з опором 1,2 Ом.

Опір штучних заземлювачів знаходимо за формулою:

$$R_u = \frac{R_e \cdot R_3}{R_e - R_3} = \frac{1,2 \cdot 0,5}{1,2 - 0,5} = 0,86 \text{ Ом}.$$

По таблиці визначаємо розрахунковий питомий опір ρ землі-сугменок ($\rho=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). В якості вертикальних електродів використовуємо кутові відрізки довжиною 5,1 м, шириною 0,045 м, заглибленні на 0,5 м в ґрунту і з'єднані горизонтальною смужкою.

Визначаємо опір розтікання струму одного вертикального заземлювача за формулою

$$\begin{aligned} R_{в.1} &= \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\ln \frac{2,1 \cdot L}{b} + \frac{1}{2} \ln \frac{4,2 \cdot t + L}{4,2 \cdot t - L} \right) = \\ &= \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 5,1} \cdot \left(\ln \frac{2,1 \cdot 5,1}{0,045} + \frac{1}{2} \ln \frac{4,2 \cdot 2,5 + 5,1}{4,2 \cdot 2,5 - 5,1} \right) = 18,7 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Визначаємо необхідну кількість електродів

$$n' = \frac{R_{B1}}{R_u \cdot \eta_B} = \frac{18,7}{0,87 \cdot 0,7} = 31 \text{ шт.}$$

де η_B – коефіцієнт використання.

Визначаємо опір розтікання струму горизонтальної смушки.

$$R_\Gamma = \frac{1}{\eta_\Gamma} \cdot \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{2 \cdot L^2}{b \cdot t} = \frac{100}{0,33 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 630} \cdot \ln \frac{2 \cdot 630^2}{0,04 \cdot 0,5} = 1,3 \text{ Ом.}$$

Уточнюємо опір вертикальних електродів з врахуванням опору горизонтальних:

$$R_B = \frac{R_\Gamma \cdot R_u}{R_\Gamma - R_u} = \frac{1,3 \cdot 0,86}{1,3 - 0,86} = 2,6 \text{ Ом.}$$

Уточнюємо кількість вертикальних електродів

$$n = \frac{R_{B1}}{R_B \cdot \eta_B} = \frac{18,7}{2,6 \cdot 0,7} = 5 \text{ шт.}$$

Перевірка:

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_\Gamma} + \frac{1}{R_p}} = \frac{1}{\frac{1}{1,2} + \frac{1}{1,3} + \frac{1}{2,6}} = 0,5 \text{ Ом.}$$

6.2 Грозозахист

Захист від прямих ударів блискавки в приміщення і будови віднесених по обладнанню грозозахисту до I категорії, повинні виконуватися окремо стоячими стержневими або тросовими громовідводами або ізольованими громовідводами,

які встановлюються на захищеній споруді.

Вказані блискавковідводи повинні забезпечувати зону захисту типу А. При цьому повинні бути забезпечені вимоги віддалення елементів громозахистів від захищеного спорудження і підземних металевих комунікацій.

Найменша допустима відстань від струмопроводу, окремо стоячого стержневого блискавковідводу або блискавковідводу, ізольованого від споруди вибирається в залежності від опору заземлення.

Приймаємо виконання захисту двома окремо стоячими металевими блискавковідводами стержневого типу висотою 15 м.

Визначаємо параметри зони захисту згідно методики, викладеної в [20], враховуючи, що в нашому випадку $L \geq h$

$$h_0 = 0,85 \cdot h = 0,85 \cdot 15 = 12,75 \text{ м},$$

$$r_0 = (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot h = (1,1 - 0,002 \cdot 15) \cdot 15 = 16,05 \text{ м}.$$

Зони захисту будуємо для 2^x рівнів:

$$h_{x1} = 4\text{м}; \quad h_{x2} = 8\text{м},$$

$$r_{x1} = (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot \left(h - \frac{h_{x1}}{0,85} \right) = (1,1 - 0,002 \cdot 15) \cdot \left(15 - \frac{4}{0,85} \right) = 11,01 \text{ м},$$

$$r_{x2} = (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot \left(h - \frac{h_{x2}}{0,85} \right) = (1,1 - 0,002 \cdot 15) \cdot \left(15 - \frac{8}{0,85} \right) = 5,98 \text{ м},$$

$$h_c = h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} h) \cdot (L - h) = 12,75 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot 15) \cdot (16 - 15) = 12,57 \text{ м},$$

$$r_{cx1} = r_0 \cdot \frac{h_c - h_{x1}}{h_c} = 16,05 \cdot \frac{12,57 - 4}{12,57} = 10,94 \text{ м},$$

$$r_{cx2} = r_0 \cdot \frac{h_c - h_{x2}}{h_c} = 16,05 \cdot \frac{12,57 - 8}{12,57} = 5,83 \text{ м}.$$

Зона захисту об'єкту зображена рис. 6.1.

членів бригади на різних робочих місцях в межах секції, що ремонтується;

Г) при одночасному або почерговому виконанні робіт на різних робочих місцях одного або декількох приєднань однієї електроустановки при:

1) Прокладанні та перекладанні силових і контрольних кабелів, перевірки приладів захисту та вимірювань, випробування електрообладнання;

2) Проведенні ремонтних робіт комутаційних апаратів одного приєднання, навіть, коли їх приводи знаходяться в другому приміщенні;

3) Проведення ремонтних робіт кабелів (не більше двох), що виконується у двох котлованах або в одному розподільчому пристрої, а також в розташованому поряд котловані, якщо розташування робочих місць дозволяє керівнику робіт здійснювати нагляд за усією бригадою одночасно.

II У випадку виконання роботи за одним нарядом на електричних двигунах або їхніх приєднаннях в розподільчому пристрої з шафами КРУ, оформлення переведення між робочими місцями не вимагається, а дозволяється розосередження бригади на різних робочих місцях. В розподільчому пристрої іншого конструктивного виконання допуск на роботу необхідно проводити з обов'язковим оформленням переведення між робочими місцями.

III Дозволяється видавати один наряд для проведення почергової однотипної роботи на декількох підстанціях або декількох приєднаннях однієї підстанції. До таких видів робіт належать: підтягування затискачів; протирання ізоляторів; відбір проб та доливання масла; перевірка пристроїв релейного захисту, автоматики та вимірювання; перемикання обмоток трансформаторів; випробування підвищеною напругою з застосуванням стороннього джерела; пошуки місця пошкодження КЛ; перевірка ізоляторів вимірювальною штангою; профілактичний ремонт однотипних КТП.

Допуск на кожну окрему підстанцію та на кожне окреме приєднання оформляється нарядом на кожну підстанцію та дозволяється вмикати після повного закінчення роботи за цим нарядом на ній.

Роботи в розподільчих пристроях, на ділянках повітряних та кабельних ліній:

1) Роботи на ділянках повітряних ліній, що розташовані на території розподільчого пристрою, повинні проводитися за нарядами, які видаються працівникам, що обслуговують повітряні лінії. При виконанні роботи на кінцевій опорі в електроустановки з місцевим оперативним персоналом черговий повинний проінструктувати бригаду.

2) Роботи на кінцевих муфтах кабельних ліній, що розміщені в розподільчих пристроях, та на кабельних лініях, що проходять на території, а також в кабельних каналах розподільчого пристрою, необхідно виконувати за нарядами, які видаються працівниками, що обслуговують дану кабельну лінію.

3) Роботи на пристроях зв'язку, що розміщені в розподільчих пристроях, повинні проводитися за нарядами, що видаються працівниками відповідної служби. Допуск на виконання робіт на таких пристроях здійснюють працівники, що обслуговують даний розподільчий пристрій.

6.4. Організаційні заходи при виконанні робіт на повітряних лініях електропередачі

1) На кожну ПЛ та на кожне коло багатоколової ПЛ видається окремий наряд. Дозволяється видавати один наряд на декілька ПЛ або кіл в наступних випадках:

- на роботи, якщо напругу знято з усіх кіл багатоколової ПЛ, або під напругою, якщо напруга не знімається з будь-якого кола багатоколової ПЛ;
- на роботи на ПЛ 0,4 кВ, якщо вони виконуються по чергово, а трансформаторні пункти, від яких подається живляться відключені;
- при ремонті секційного роз'єднувача різних ПЛ з зніманням напруги.

Встановлені на ПЛ заземлення забороняється знімати до повного закінчення усіх робіт.

2) На відключених ПЛ дозволяється розосереджувати бригади на відстань не більше ніж 2 км. Винятком є проведення робіт з монтажу та/або демонтажу проводів в межах анкерного прольоту значної довжини. При виконанні робіт, що здійснюються на струмопровідних частинах з напругою, бригада повинна бути на

одній або на двох суміжних опорах.

При виконанні робіт за розпорядженням в порядку поточної експлуатації:

1) Дозволяється в електроустановках виконувати за розпорядженням наступні роботи:

- О на електричних двигунах з від'єднанням кабелю, - якщо в кінці його є закоротка та заземлення;
- О на генераторі, від якого від'єднані шини та кабелі;
- О в розподільчих пристроях при викочених візках КРУ, у разі якщо шторки відсіків закриті і зачинені на замок.

2) Виконувати такі роботи під наглядом чергового або працівника з складу оперативно-виробничих працівників:

- О від'єднання або приєднання проводів, кабелів та шин від електричного двигуна або будь-якого іншого обладнання; роботи в розподільчих пристроях, та пристроях і колах релейного захисту;
- О від'єднання та приєднання повітряних та кабельних ліній 0,4 кВ, а також для КЛ усіх класів напруг, при фазуванні та перевірки їх цілісності;
- О термінові роботи з усунення несправностей, які загрожують нормальній роботі електроустановок та каналів.

3) Дозволяється за розпорядженням виконувати роботи з монтажу, ремонту і експлуатації вторинних кіл, засобів релейного захисту та автоматики, вимірювальних приладів, незалежно від того, чи перебувають вони під напругою чи ні. При цьому допускається:

- О працювати одноособово керівнику робіт з IV групою у випадках розміщення зазначених кіл і пристроїв в приміщеннях, де відсутні або повністю обгороджені струмопровідні частини напругою понад 1 кВ, або такі, що розташовані на висоті, яка не вимагає огороження;
- О керівнику робіт вмикати і вимикати з дозволу працівника, що видає дозвіл на підготовку робочого місця та на допуск до вищезазначених пристроїв, випробовувати засоби захисту, автоматики комутаційних апаратів.

4) Дозволяється одному працівнику з III групою допуску в

електроустановках електростанцій і підстанцій виконувати такі роботи при поточній експлуатації:

- О оновлення написів на огороженнях та кожухах обладнання поза камерами розподільчих пристроїв;
- О перевірку та замінювання сорбентів в повітроочищувальних фільтрах;
- О зняття показів лічильників або інших вимірювальних приладів;
- О спостереження за сушінням генераторів, трансформаторів та іншого електрообладнання.

7. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

Використання частотно-регульованого електроприводу дає можливість раціонального розв'язку енергетичних задач, в першу чергу – це значна економія води та енергоресурсів. Проте, їх застосування призводить до генерування електроприводом вищих гармонічних складових та спотворення синусоїдальної форми напруги та струму. Генеровані ними вищі гармоніки викликають додаткові втрати електроенергії в мережах, завдають шкоди роботі інших підприємств, приладам керування, порушують електромагнітну сумісність, негативно впливають на стійкість енергосистем.

Отже, використання напівпровідникових перетворювачів, що є основою регульованих електроприводів, потребує використання додаткових технічних засобів для придушення вищих гармонічних складових струму та напруги в мережі живлення, які генеруються ними. В роботі в якості таких пристроїв обрано встановлення фільтрокомпенсуючого пристрою на шинах 0,4 кВ підстанцій.

7.1. Визначення додаткових капіталовкладень

Визначимо вартість перетворювача частоти для одного двигуна, потужністю 15 кВт:

$$K_{\text{ПЧ}} = K_{\text{обл}} + K_{\text{мон}} = 42500 + 8500 = 51000 \text{ грн.},$$

де $K_{\text{обл}} = K_{\text{ТПЧ}} + K_{\text{ПР}} = 30000 + 12500 = 42500$ грн. – вартість обладнання;

$K_{\text{мон}} = 20\%K_{\text{обл}} = 0,2 \cdot 42500 = 8500$ грн. – вартість монтажу обладнання.

Вартість перетворювачів частоти для всіх електродвигунів, які встановлені на підстанції:

$$K_{\Sigma \text{ПЧ}} = \sum_{i=1}^n (K_{\text{ПЧ}} \cdot N_{\text{дв}}) = 21603168 \text{ грн.}$$

Визначимо витрати на придбання та встановлення на підстанції ФКП 0,4 кВ ($Q_{\text{БК5}} = 360$ кВар з конденсатором КС2-0,38-40-373 та реактором РТСТ-820-0,0505).

Капітальні вкладення на встановлення фільтрокомпенсуючого пристрою:

$$K_{\text{обл}} = K_{\text{ц}} + K_{\text{мон}} = 23764 + 4752,8 = 28516,8 \text{ грн.},$$

де $K_{\text{ц}}$ – вартість ФКП, $K_{\text{мон}} = 20\%K_{\text{обл}} = 0,2 \cdot 23764 = 4752,8$ грн. – вартість монтажу обладнання.

7.2. Визначення експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати визначаємо за умови роботи обладнання протягом року та згідно діючих тарифів і цін за одиницю виміру. Розрахунки виконуємо для двох варіантів, результати зводимо до табл. 7.2.

Розрахуємо заробітну плату персоналу (основну, додаткову, відрахування в соціальні фонди):

$$\begin{aligned} Z_{\text{одс}} &= \chi_{\text{пр}} O_{\text{р}} O_{\text{н}} (1 + 0,01 H_{\text{д}}) (1 + 0,01 H_{\text{с}}) = \\ &= 12 \cdot 5,7 \cdot 634,2 (1 + 0,01 \cdot 12) (1 + 0,01 \cdot 37) = 117006,81 \text{ грн.}, \end{aligned}$$

де $\chi_{\text{пр}}$ – необхідна кількість працівників, чол; $O_{\text{р}}$ – середньогодинна зарплата одного працівника, грн; $O_{\text{н}}$ – трудоемність (згідно річного плану-графіку ПЗР), нормогод; $H_{\text{д}}$ – відсоток додаткової зарплати, %; $H_{\text{с}}$ – відсоток відрахувань в соціальні фонди, %.

Вартість додатково встановленого обладнання та використаних матеріалів:

$$Z_{\text{обл}} = K_{\Sigma \text{пч}} + K_{\text{фкп}} = 21603168 + 28516,8 = 21631684,8 \text{ грн.}$$

Витрати на технічне обслуговування та ремонт:

$$Z_p = 40\%Z_{\text{обл}} = 0,4 \cdot 21631684,8 = 11245264,77 \text{ грн.}$$

Амортизаційні відрахування:

$$Z_{\text{ам}} = 15\%Z_{\text{обл}} = 0,15 \cdot 21631684,8 = 3244782,72 \text{ грн.}$$

Визначаємо вартість витрат води та електричної енергії для обох варіантів. Для цього використовуємо дані виконаних замірів витрати води і електроенергії протягом тижня для регульованого та нерегульованого електропривода на підстанції ТП №1 машинобудівного підприємства. Дані за виконаними замірами приведені в табл. 7.1.

Проведемо розрахунки на прикладі одного насосу, для всіх інших розрахунки аналогічні і кінцеві результати зведені в табл.7.2.

Таблиця 7.1. Залежність витрати енергії від типу електропривода насосного агрегату

День, час добы	Покази лічильників		Витрата за період замірів		Середньодобова витрата	
	води, м ³	електро- енергії, кВт·год	води, м ³	електро- енергії, кВт·год	води, м ³	електро- енергії, кВт·год
При використанні регульованого електропривода						
1-й день, 19.00	399213	154100	6583	1280	940,4	182,86
8-й день, 19.00	405796	155380				
При використанні нерегульованого електропривода						
1-й день, 19.00	405796	155380	8772	2140	1253,1	307,4
8-й день, 19.00	414568	157532				

Параметри асинхронного двигуна насосу:

тип АМ160S2У2: $P_{\text{ном}} = 15 \text{ кВт}$, $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$, $\eta = 88\%$, $I_{\text{ном}} = 29 \text{ А}$, $n_{\text{ном}} = 2910 \text{ об/хв.}$, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,9$.

Параметри насосу:

тип КМ100-80С, подача 100 м³/год, напір 32 м.

Аналіз замірів витрати води і електричної енергії показує, що:

1) вартість витрат води при роботі нерегульованого електропривода:

$$\begin{aligned} Z_{\text{в.нерег.}} &= E_{\text{в.нерег.}} \cdot T_p C_1 + E_{\text{в.нерег.}} \cdot T_p C_1 = \\ &= 1253,1 \cdot 252 \cdot 4,89 + 1253,1 \cdot 252 \cdot 3,18 = 125996698,8 \text{ грн.} \end{aligned}$$

2) вартість витрат води при роботі регульованого електропривода:

$$\begin{aligned} Z_{\text{в.рег.}} &= E_{\text{в.рег.}} \cdot T_p C_1 + E_{\text{в.рег.}} \cdot T_p C_1 = \\ &= 940,4 \cdot 252 \cdot 4,89 + 940,4 \cdot 252 \cdot 3,18 = 94555339,2 \text{ грн.} \end{aligned}$$

де $E_{\text{в.нерег.}}$, $E_{\text{в.рег.}}$ – відповідно середньодобові витрати води при використанні нерегульованого та регульованого електропривода; C_1 – вартість водопостачання, м³, C_2 – вартість водовідведення, м³, T_p – тривалість роботи насосного агрегату протягом року, днів.

Зазначимо, що друга складова у даних формулах відображає витрати на повторне очищення води внаслідок її витоку.

3) вартість витрат електроенергії при роботі нерегульованого електропривода:

$$Z_{\text{ел.нерег.}} = E_{\text{ел.нерег.}} \cdot T_p C_0 = 307,4 \cdot 252 \cdot 1,0324 = 37570,43 \text{ грн.}$$

4) вартість витрат електроенергії при роботі регульованого електропривода:

$$Z_{\text{ел.рег.}} = E_{\text{ел.рег.}} \cdot T_p C_0 = 182,86 \cdot 252 \cdot 1,0324 = 22349,15 \text{ грн.}$$

де $E_{\text{ел.нерег.}}$, $E_{\text{ел.рег.}}$ – відповідно середньодобові витрати електроенергії при використанні нерегульованого та регульованого електропривода; C_0 – вартість електричної енергії, кВт·год, T_p – тривалість роботи насосного агрегату протягом року, днів.

Таблиця 7.2. Розрахунок експлуатаційних витрат

Найменування статей витрат		Поз.	Сума витрат, грн (за варіантами)	
			Базовий	Новий
1	Заробітна плата персоналу (основна, додаткова, відрахування в соціальні фонди)	$З_{\text{одс}}$	—	117006,81
2	Вартість обладнання та матеріалів	$З_{\text{обл}}$	—	21631684,8
3	Витрати на технічне обслуговування та ремонт	$З_p$	—	11245264,77
4	Амортизаційні відрахування	$З_{\text{ам}}$	—	3244752,72
5	Вартість витрат води	$З_v$	125996698,8	94555339,2
6	Вартість витрат ел.ен.	$З_{\text{ел}}$	1427676,26	849267,67
Всього витрат за рік		$З_{\Sigma}$	127424375,1	97225450,81

7.3. Визначення економічної ефективності

Величина економічного ефекту при впровадженні частотнорегульованого електроприводу з встановленням фільтрокомпенсуючого пристрою:

$$E_{\text{еф}} = (З_{\Sigma\text{б}} - З_{\Sigma\text{н}}) - E_{\text{н}}З_{\Sigma\text{обл}} =$$

$$= (125996698,8 - 94555339,2) - 0,15 \cdot 36238709,1 = 27092714,51 \text{ грн.},$$

де $E_{\text{н}}$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Загальна сума витрат на встановлення додаткового обладнання для нового варіанту.

$$З_{\Sigma\text{обл}} = З_{\text{одс}} + З_{\text{обл}} + З_p + З_{\text{ам}} =$$

$$= 117006,81 + 21631684,8 + 11245264,77 + 3244752,72 = 36238709,1 \text{ грн.}$$

Орієнтовний період окупності додаткових капітальних вкладень при впровадженні частотнорегульованого електроприводу з встановленням фільтрокомпенсуючого пристрою за рахунок зниження експлуатаційних витрат:

$$T_{\text{ок}} = \frac{Z_{\Sigma \text{ обл}}}{Z_{\Sigma \text{ б}} - Z_{\Sigma \text{ н}}} = \frac{36238709,1}{125996698,8 - 94555339,2} = \frac{36238709,1}{30198924,29} \approx 1,2$$

Слід зазначити, що в розрахунки річної економії не ввійшов економічний ефект, пов'язаний зі скороченням аварійності водопровідної мережі за рахунок зниження та стабілізації тиску води на необхідному рівні та унеможливлення гідравлічних ударів під час плавного пуску регульованого електропривода.

Таким чином, з розрахунків видно, що впровадження даних заходів (ЧРЕП та ФКП) є економічно доцільними і період їх окупності не перевищує 7 років.

ВИСНОВКИ

Розглянувши проблему компенсації реактивної потужності за наявності нелінійних навантажень, можна зробити наступні висновки:

1. Широке впровадження імпульсних джерел живлення, економних джерел освітлення, як світлодіодних так і люмінесцентних, керованого електроприводу, які в своєму складі містять в першій ланці АС-DC перетворювачі тобто випрямлячі, призводять до перманентного (постійного) збільшення рівня вищих гармонік.

2. Викривлення форми струму навантаження або наявність вищих гармонік струму призводить до погіршення коефіцієнту потужності. Отже, призводить до збільшення споживання реактивної потужності, і як наслідок, необхідності збільшенню її компенсації.

3. Вищі гармоніки струму можуть призвести, як до паралельного, так і послідовного резонансу за участі ємності батареї конденсаторів корекції коефіцієнта потужності. Обидва явища призводять до збільшення викривлення кривої напруги, і крім того негативно впливають на стан батареї конденсаторів (збільшення напруги та струму вище номінального значення).

4. Компенсація реактивної потужності за наявності нелінійного навантаження вимагає сукупного розгляду проблем підвищення якості електроенергії та корекції коефіцієнта потужності.

5. Аналіз методів зменшення вищих гармонік показує, що найбільш економічно ефективним методом для вже діючих систем електропостачання є використання пасивних фільтрів. В той же час для нових електроустановок найбільш ефективними способами є різного роду схемні рішення.

6. Найбільш ефективним способом компенсації реактивної потужності в умовах нелінійних навантажень є комплексний підхід заснований на застосуванні фільтрокомпенсуючого пристрою. Зниження рівня вищих гармонік яким дозволяє, за необхідності, провести подальшу компенсацію реактивних навантажень звичайними батареями статичних конденсаторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Meier, Alexandra. Electric Power Systems: A Conceptual Introduction (Wiley Survival Guides in Engineering and Science). s.l. : Wiley - IEEE Press, 2006.
2. Ryszard Strzekecki, Henryk Supronowicz. Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy. Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000.
3. Praca Zbiorowa. Poradnik inżyniera elektryka. Tom 2. Warszawa : Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 1996, 1997, 2007.
4. Power Factor Correction - Design of automatic capacitor bank. Kęпка, Jakub. Wrocław : Wrocław University of Technology, 2010.
5. Reactive power under nonsinusoidal conditions. L, Czarnecki.: IEEE Tran. on Power Apparatus and Systems, 1983
6. A combined time-domain and frequency-domain approach to hybrid compensation in unbalanced nonsinusoidal systems. L, Czarnecki. Milan : IEEE Stresa - Italy, 1993.
7. Dugan R.C., Rizy D. T., 1988. "Harmonic Considerations for Electrical Distribution Feeders", National Technical Information Service, Report No. ORNL/Sub/81-95011/4 (Cooper Power Systems as Bulletin 87011, "Electrical Power System Harmonics, Design Guide")
8. Renner H., Sikulin M., 2007. Power Quality, Course material, Helsinki University of Technology.
9. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P., 1989. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. John Wiley & Sons.
10. Grady W.M., Gilleskie R. J., 1993. Harmonics and how they relate to power factor, Proc. Of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA '93).
11. Arrillaga J., Smith B.C., Watson R., Wood A., 2000. Power System Harmonic Analysis, John Wiley & Sons Ltd.
12. ABB, 2004. Guide to Harmonics with AC Variable Frequency Drives. [Article available at www.joliettech.com]

13. Tolbert L. M., Hollis H.D., Hale P.S., 1996. Survey of Harmonics Measurements in Electrical Distribution Systems, IEEE IAS annual meeting.
14. Ozdemir A., 2009. Effects of Harmonic Distortion on Power Systems. [Article available at <http://triton.elk.itu.edu.tr/~ozdemir/psh.pdf>]
15. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
16. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
17. Автоматизація контролю і управління якістю електроенергії: методичні вказівки для вивчення курсу "Автоматизація контролю і управління якістю електричної енергії" для студентів V-VI курсів спеціальності 8.090603 "Електротехнічні системи електроспоживання" /Укл.: канд. техн. наук, доц. П.Г. Пешков, канд. техн. наук, доц. А.Ю. Орлович, асистент О.А. Козловський. – Кіровоград: КДТУ, 2001 р. – 97 с.
18. Саенко Ю.Л. Методы компенсации реактивной мощности в сетях с нелинейными нагрузками / Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко, Е. В. Бараненко // Вісник Приазовського технічного університету. – 2013. – Вип. 26. – С. 204–210.
19. Maswood A.I., Naque M.H., 2006. Harmonics, Sources, Effects and Mitigation Techniques, School of EEE, Nanyang Technological University.
20. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. Учебное пособие для вузов.–М.: Энергоатомиздат, 1984.
21. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT) Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.