

Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ
ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**«Аналіз енергетичних процесів в системі реактивної
потужності з транзисторними перетворювачами в
системах електропостачання»**

Виконала здобувачка вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕЕ-23МЗ
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Олександра ЩЕРБАКОВА
« ____ » _____2024 р.

Керівник роботи професор, к.т.н.
_____Петро ПЛЄШКОВ
« ____ » _____2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____Петро ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 20__ р.

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

Щербакова Олександра Олександрівна

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) **Аналіз енергетичних процесів в системі реактивної
потужності з транзисторними перетворювачами в системах
електропостачання**

**Analysis of energy processes in a reactive power system with transistor converters in
power supply systems**

2. Керівник роботи (проекту) Плєшков Петро Григорович, к.т.н., професор

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 12.12.2024 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) _____

**Вступ; Особливості споживання електричної енергії електротехнологічними
установками; Математичне відображення енергетичних процесів в трифазній
мережі змінного струму з нелінійним несиметричним навантаженням;
Дослідження електричних та енергетичних процесів в системі компенсації
реактивної потужності; Розробка системи компенсації реактивної
потужності з транзисторними перетворювачами; Техніко-економічні
розрахунки пропонованої системи; Висновки**

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>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>07.10.24</i>	
2	<i>Особливості споживання електричної енергії електротехнологічними установками</i>	<i>15.10.24</i>	
3	<i>Математичне відображення енергетичних процесів в трифазній мережі змінного струму з нелінійним несиметричним навантаженням</i>	<i>22.10.24</i>	
4	<i>Дослідження електричних та енергетичних процесів в системі компенсації реактивної потужності</i>	<i>04.11.24</i>	
5	<i>Розробка системи компенсації реактивної потужності з транзисторними перетворювачами</i>	<i>12.11.24</i>	
6	<i>Техніко-економічні розрахунки пропонованої системи</i>	<i>18.11.24</i>	
7	<i>Охорона праці в електроустановках</i>	<i>24.11.24</i>	
8	<i>Висновки</i>	<i>02.12.24</i>	
9	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	<i>08.12.24</i>	
10	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	<i>10.12.24</i>	

Дата видачі завдання
Підпис керівника _____

«____» _____ 2024 р.
Петро ПЛЄШКОВ

Завдання прийнято до виконання
Підпис здобувача _____

«____» _____ 2024 р.
Олександра ЩЕРБАКОВА

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 142 с.; 58 рис.; 4 табл.; 11 джерел.

Щербакова О.О. Аналіз енергетичних процесів в системі реактивної потужності з транзисторними перетворювачами в системах електропостачання. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024 рік.

Об'єктом досліджень є енергетичні процеси в системі реактивної потужності.

Предмет досліджень – системи електропостачання з тиристорними перетворювачами.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження енергетичних процесів в системі реактивної потужності з транзисторними перетворювачами.

В роботі розглянуто особливості споживання електричної енергії електротехнологічними установками, відмічено негативний вплив несинусоїдальної напруги та створеної нею реактивною потужністю.

Оскільки режими роботи мережі електротехнологічного обладнання є динамічними, у випадках зміни реактивної потужності з часом, то розробляються сучасні пристрої з тиристорним регулюванням і автоматизованими системами керування. Вони дозволяють підтримувати рівень реактивної потужності в заданому діапазоні навіть за мінливих умов роботи мережі. Проте тиристорні пристрої створюють вищі гармоніки, що потребує застосування силових фільтрів для зменшення їхнього впливу.

Для підвищення ефективності регулювання та зниження негативного впливу компенсуючих пристроїв на якість електроенергії використовується технологія подвійного перетворення енергії. Це ускладнює схему пристрою, але забезпечує кращу якість регулювання за рахунок широтно-імпульсного керування. Такий підхід особливо ефективний у мережах із навантаженням, яке має різко змінний характер. Водночас він сприяє мінімізації впливу на параметри мережі, підвищуючи стабільність і якість електропостачання.

Ключові слова: реактивна потужність, несиметричні навантаження, компенсація, енергетичні процеси, тиристорний перетворювач.

ABSTRACT

Qualification work: 142 p.; 58 fig.; 4 tables; 11 sources.

Shcherbakova O.O. Analysis of energy processes in a reactive power system with transistor converters in power supply systems. – Manuscript.

Master's thesis in specialty 141 "Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Electrical engineering systems of power consumption". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024.

The object of research is energy processes in a reactive power system.

The subject of research is power supply systems with thyristor converters.

The purpose of the qualification work is to study energy processes in a reactive power system with transistor converters.

The work considers the features of electrical energy consumption by electrotechnological installations, notes the negative impact of non-sinusoidal voltage and the reactive power created by it.

Since the operating modes of the electrical equipment network are dynamic, in cases of changes in reactive power over time, modern devices with thyristor regulation and automated control systems are being developed. They allow maintaining the level of reactive power in a given range even under changing network operating conditions. However, thyristor devices create higher harmonics, which requires the use of power filters to reduce their impact.

To increase the efficiency of regulation and reduce the negative impact of compensating devices on the quality of electricity, double energy conversion technology is used. This complicates the device circuit, but provides better quality of regulation due to pulse-width control. This approach is especially effective in networks with a load that has a sharply variable nature. At the same time, it helps to minimize the impact on network parameters, increasing the stability and quality of power supply.

Keywords: reactive power, asymmetric loads, compensation, energy processes, thyristor converter.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	6
1	ОСОБЛИВОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИМИ УСТАНОВКАМИ.....	8
1.1.	Аналіз роботи споживачів реактивної потужності.	8
1.2.	Вплив роботи електротехнологічного обладнання на якість електричної енергії	24
1.3.	Аналіз сучасних систем і комплексів для компенсації реактивної потужності.....	30
2	МАТЕМАТИЧНЕ ВІДОБРАЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ТРИФАЗНІЙ МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ З НЕЛІНІЙНИМ НЕСИМЕТРИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ.....	43
2.1.	Повна, активна і реактивна потужність.....	43
2.2.	Дослідження процесів обміну енергії в колах з несинусоїдальним струмом і напругою.....	52
2.3.	Математичне відображення енергетичних процесів в колах з напівпровідниковими пристроями.....	61
3	ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	68
3.1.	Моделювання роботи споживача електричної енергії.	68
3.2.	Моделювання роботи системи компенсації.....	74
3.3.	Моделювання трифазної системи електропостачання з системою компенсації.....	88
3.4.	Визначення енергетичних характеристик системи.....	94
4	РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ТРАНЗИСТОРНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ...	97

4.1.	Принципи побудови конденсаторних компенсаторів.....	97
4.2.	Сучасні датчики електричних величин.....	103
4.3	Вибір структури транзисторного перетворювача та силової частини компенсатора.....	108
4.4.	Розробка функціональної схеми пристрою компенсації.....	114
5	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ ПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ.....	123
6	ОХОРОНА ПРАЦІ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ.....	133
	ВИСНОВКИ.....	139
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	141

ВСТУП

У сучасній електроенергетиці широко застосовуються пристрої, що компенсують реактивну складову потужності. Зазвичай вони створюються на базі реактивних елементів, таких як реактори або конденсатори.

Реактивна потужність виникає через зсув фаз між синусоїдами напруги та струму в мережі (у випадку індуктивних елементів струм відстає від напруги по фазі). Її рівень характеризується коефіцієнтом потужності, який чисельно дорівнює косинусу кута між напругою і струмом. Значення коефіцієнта потужності для навантаження, яке може бути окремим енергоспоживачем або сукупністю пристроїв (наприклад, цілої системи), визначається як відношення активної потужності до повної потужності (P/S) у певний момент часу.

Для підвищення коефіцієнта потужності системи або установки одним із основних способів є зменшення споживання реактивної потужності шляхом її компенсації. Передача реактивної потужності через електромережу, починаючи від електростанції і до споживачів, створює додаткові навантаження на обладнання мережі, що призводить до зростання втрат активної потужності і зниження рівня напруги на шинах навантаження.

Для компенсації реактивної потужності застосовуються різні типи пристроїв, які базуються на статичних або синхронних компонентах. Основний принцип їхньої роботи полягає в тому, що в зоні ланцюга з індуктивним або ємнісним навантаженням розміщується додаткове джерело реактивної потужності. Це дозволяє здійснювати обмін енергією між цим джерелом і самим навантаженням у межах локальної ділянки мережі, зводячи до мінімуму проходження реактивної потужності через основні електромережі та уникаючи негативного впливу на їхнє функціонування.

Використання конденсаторних установок для компенсації реактивної потужності забезпечує такі переваги як зниження навантаження на лінії

електропередачі, трансформатори та розподільні пристрої, скорочення витрат на оплату споживаної електроенергії, можливість зменшення рівня вищих гармонік у мережі за рахунок використання певних типів установок, придушення мережових перешкод і зменшення несиметрії фаз, підвищення надійності та економічності розподільних електромереж.

Оскільки режим роботи мережі є динамічним, наприклад, у випадках зміни реактивної потужності з часом, розробляються сучасні пристрої з тиристорним регулюванням і автоматизованими системами керування. Вони дозволяють підтримувати рівень реактивної потужності в заданому діапазоні навіть за мінливих умов роботи мережі. Проте тиристорні пристрої створюють вищі гармоніки, що потребує застосування силових фільтрів для зменшення їхнього впливу.

Для підвищення ефективності регулювання та зниження негативного впливу компенсуючих пристроїв на якість електроенергії використовується технологія подвійного перетворення енергії. Це ускладнює схему пристрою, але забезпечує кращу якість регулювання за рахунок широтно-імпульсного керування. Такий підхід особливо ефективний у мережах із навантаженням, яке має різко змінний характер. Водночас він сприяє мінімізації впливу на параметри мережі, підвищуючи стабільність і якість електропостачання.

1 ОСОБЛИВОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИМИ УСТАНОВКАМИ

1.1. Аналіз роботи споживачів реактивної потужності.

Електротехнологічні установки поділяються на різні категорії залежно від їх призначення. Серед них виділяють електротермічні, електрозварювальні, електролізні, установки для електрофізичної та електрохімічної обробки, а також системи електроаерозольних технологій.

Електротермічні пристрої призначені для нагрівання матеріалів та обробки виробів за допомогою теплової енергії, яку отримують із електричної. До них належать установки, що працюють на принципі перетворення електроенергії в тепло через опір, індукцію, діелектричні властивості або за допомогою дуги та електронного променя.

Електрозварювальні установки використовуються для з'єднання металевих компонентів, забезпечуючи процес зварювання за рахунок електричного струму. Вони класифікуються за методом виділення теплової енергії на дугові, контактні, високочастотні, плазмові, електрошлакові, а також лазерні та електронно-променеві установки.

Електролізні системи застосовуються для виробництва хімічних речовин, таких як водень, кисень, хлор та інші, а також для отримання металів електролізом розчинів або розплавів солей. Їх використовують в процесах нанесення металевих покриттів і виготовлення копій методом гальванопластики.

Установки для електрофізичної обробки призначені для високоточної зміни поверхні матеріалів, таких як шліфування, полірування або зміцнення. Вони працюють за принципом локалізованого нагрівання, що викликає оплавлення або випаровування матеріалу через іскровий або дуговий розряд, контактний опір, а також вплив електронного або лазерного променя.

Кожен тип таких установок сприяє збільшенню ефективності та точності промислових процесів у своїй галузі застосування.

Установки електрохімічної обробки використовуються для обробки поверхонь і точного зняття матеріалу. Вони базуються на процесі анодного розчинення, під час якого матеріал із анода видаляється шляхом окислення.

Системи аерозольної технології працюють завдяки взаємодії електричних полів із зарядженими дисперсними частинками. Особливості їх руху в електричному полі визначають ефективність таких установок, які знаходять використання в різних галузях промисловості.

Електричні печі опору, як прямого, так і непрямого нагріву, широко використовуються на виробничих підприємствах. У печах непрямого нагріву тепло створюється нагрівачами та передається до матеріалу за допомогою випромінювання, конвекції, теплопровідності або їх комбінації. Ці пристрої поділяються на низькотемпературні (до 600–700 °C), середньотемпературні (600–1250 °C) і високотемпературні (понад 1250 °C).

Конструкція електропечей залежить від температурних меж. Для низько- та середньотемпературних установок використовують нагрівачі з металевих сплавів, наприклад, хромонікелевих чи металохромоалюмінієвих. У високотемпературних печах застосовують нагрівальні елементи з неметалевих матеріалів (графіт, карборунд, діоксид цирконію) чи тугоплавких металів (вольфрам, молібден, тантал). Зміни в матеріалах нагрівачів зумовлюють відмінності у конструкції печей і їх характеристиках.

Високотемпературні нагрівачі, через збільшення опору під час експлуатації, потребують живлення через трансформатори або автотрансформатори із широким діапазоном регулювання напруги. Печі непрямого нагріву зазвичай отримують живлення від мереж із напругою 0,22 або 0,38 кВ. У випадках, коли потрібне регулювання напруги (наприклад, для нагрівачів із карборунду чи молібдену), застосовують трансформатори.

Потужність таких печей варіюється залежно від призначення. Для плавлення кольорових металів потужність становить від 50 до 600 кВт, а для термообробки – від 5 до 10 000 кВт. Невеликі печі переважно однофазні, тоді як потужніші – трифазні або із кількома зонами нагріву.

Принципова схема головних кіл двозонної печі опору зображена на рисунку 1.1, а. В установках електричного опору та прямого нагріву тепло утворюється безпосередньо в матеріалі, який піддається нагріванню, за рахунок проходження через нього електричного струму. Такі установки використовують для обробки виробів із правильною формою перетину, таких як стрижні, прuti або дроти. Живлення здійснюється від мережі змінного струму частотою 50 Гц через знижувальний трансформатор.

Основними елементами обладнання являються знижувальні трансформатори, пристрої для контактування, механізми стиснення контактів, а також системи автоматичного регулювання процесу нагріву. Установки прямого нагріву потужністю 800–15 000 кВА при напрузі 6 або 10 кВ використовуються для графітації вугільних виробів, а установки потужністю 400–4000 кВА застосовуються для нагрівання скломаси. Для виробництва абразивів використовують установки потужністю до 2500 кВА, що живляться від мереж з напругою 0,38, 6 або 10 кВ. Існують як однофазні, так і трифазні печі, причому однофазні установки контактного нагріву, потужністю 10–2000 кВА, часто застосовуються для нагріву під плющення, кування або штампування.

Електричні печі опору можуть бути періодичної або безперервної дії. У печах першого типу вироби завантажуються в камеру і залишаються нерухомими під час поступового нагрівання. В печах безперервної дії вироби рухаються уздовж нагрівальної камери, досягаючи необхідної температури на виході.

Електропечі опору класифікуються на загальнопромислові та прецизійні. Прецизійні установки забезпечують високоточне підтримання температурного режиму або його зміни відповідно до заданої програми, що робить їх незамінними для процесів, якщо потрібна максимальна точність.

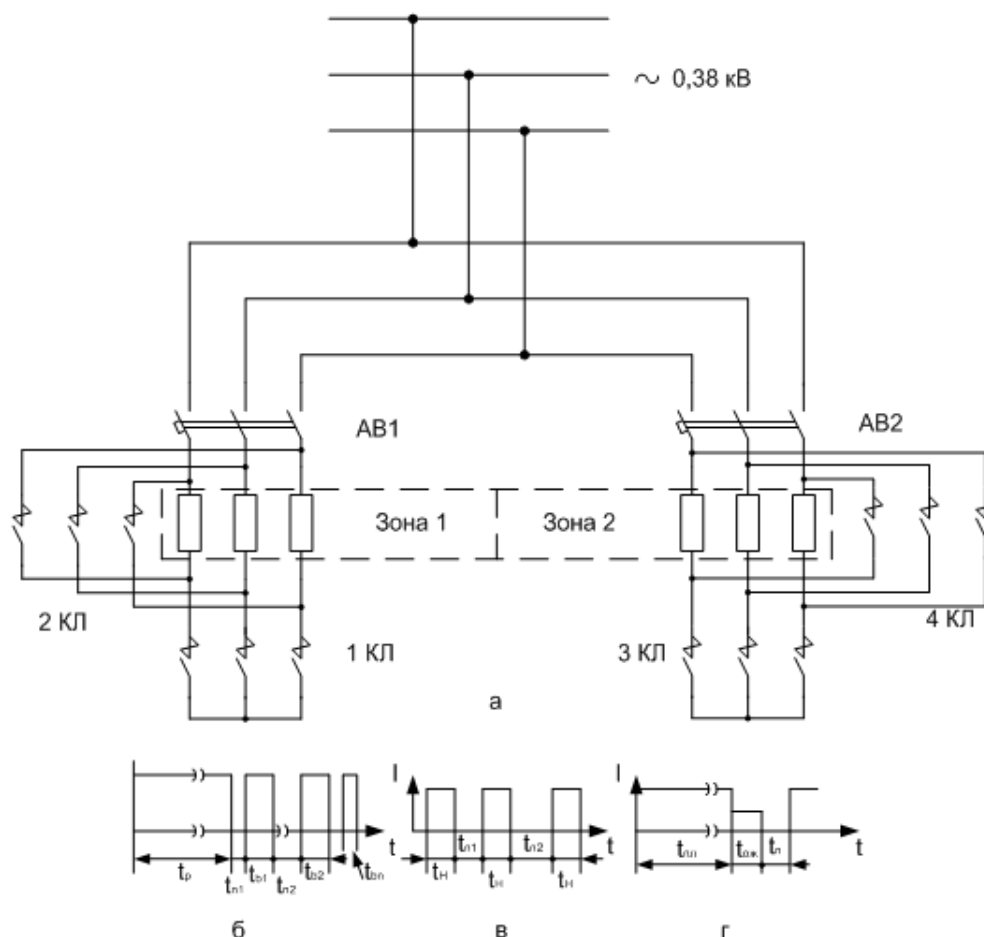


Рисунок 1.1- Принципова електрична схема головних кіл двозонної електропечі опору непрямого нагріву (а), графіки навантаження ЕПО непрямого нагріву (б), установки прямого нагріву (в) та індукційної печі (г), 1АВ-2АВ - вимикачі автоматичні; 1КЛ-4КЛ - контактори лінійні.

Для забезпечення плавного та безперервного регулювання температури у високотемпературних і прецизійних електропечах використовують тиристорні джерела живлення. Ці джерела можуть бути однофазними та трифазними. Однофазні моделі типу РНТТ призначені для вихідних струмів 63, 250 і 630 А. Трифазні модифікації також належать до типу РНТТ і підтримують вихідні струми 3×63 , 3×100 , 3×160 , 3×250 , 3×600 А при робочій напрузі 380 В.

На рисунку 1.2 представлена схема підключення трифазної електропечі опору до тиристорного джерела живлення типу РНТТ. Використання тиристорних регуляторів дозволяє точно підтримувати необхідний

температурний режим, що є критично важливим для процесів, які вимагають високої точності та стабільності температури.

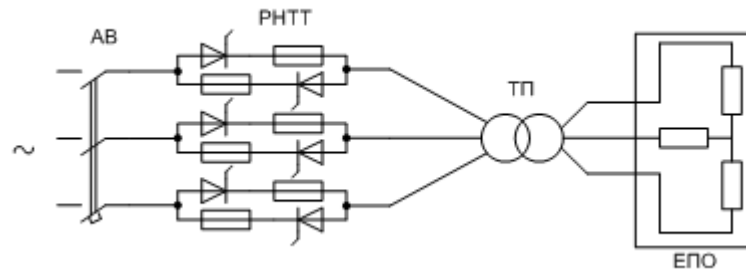


Рисунок 1.2 - Схема підключення мережі живлення ЕПО до тиристорного джерела живлення

АВ - автоматичний вимикач; РНТТ- трифазне тиристорне джерело живлення; ТП - понижуючий трансформатор

Електричне обладнання електропечей опору включає кілька основних компонентів: силову частину, апаратуру управління та вимірювання, а також пірометричне обладнання. До силової частини належать нагрівальні елементи, трансформатори (знижувальні та регульовальні), автотрансформатори, блоки живлення, електродвигуни механізмів і вентиляторів, а також силова комутаційна апаратура. Остання (автоматичні вимикачі, плавкі запобіжники, контактори) зазвичай розміщується в станціях управління.

Електричні печі опору працюють у тривалому режимі. Їх графік навантаження зазвичай має дві основні фази (рис.1.16). Перша — це період розігрівання $t_p = 0.5 \dots 15 \text{ год.}$, тривалість якого залежить від потужності печі, її робочої температури і способу передачі тепла. Друга фаза — це періоди включення нагрівачів $t_{e1}, t_{e2}, \dots, t_{en}$, що зазвичай тривають від 5 до 30 хвилин, із паузами $t_{n1}, t_{n2}, \dots, t_{nn}$ тієї ж тривалості. Загальний цикл роботи печей може тривати від однієї години до 48 годин. Однофазні печі невеликої потужності (наприклад, сушильні шафи або прецизійні печі) бажано рівномірно розподіляти по фазах для зниження несиметрії напруги.

Електропечі з тиристорними регуляторами можуть генерувати вищі гармоніки. Найбільш впливовими є 3, 5, 7, 9, 11 і 13-та гармоніки. Їх амплітуди залежать від методу регулювання. При фазоімпульсному регулюванні рівень 3-ї та 5-ї гармонік може досягати 80% від основної гармоніки, тоді як при широтно-імпульсному регулюванні цей рівень знижується до 15% і 10% відповідно.

Коефіцієнт потужності електропечей опору залежить від типу регуляторів. Для печей із електромагнітними контакторами він становить 0,95–1,0, а для печей із тиристорним регулюванням — 0,75–0,95, залежно від глибини регулювання.

Установки прямого нагріву відносяться до споживачів з повторно-короткочасним режимом роботи (рисунки 1.1, б). Час нагріву t_i , змінюється від 5 до 40 с., а час паузи $t_n = 5 \dots 60$ с.. Тривалість включення установок 20 - 60 %. Ці установки однофазні, тому при роботі вони створюють несиметрію напруги в мережі. Установки прямого нагріву при роботі створюють коливання і провали напруга, значення якої залежать від співвідношення потужності установок і джерел їх живлення. При включенні через тиристорні контактори установки прямого нагріву стають джерелами вищих гармонік струму:

$$I_v = I_{ном} / \sqrt{v}, \quad (1.1)$$

де $I_{ном}$ - номінальний струм установки; v - номер гармоніки.

Коефіцієнт потужності установок прямого нагріву 0,8-0,85.

Дугові печі призначені для плавки різних металів і сплавів та складаються з власне дугових і рудний-термічних печей. У дугових печах основна частина енергії виділяється в одній або декількох електричних дугах, що горять усередині пічного простору. Дугові печі бувають прямого і непрямого нагріву. У трифазних печах прямого нагріву дуги горять між електродами і металом, що розплавляється, в печах непрямого нагріву - між електродами над поверхнею металу. Найбільшого поширення набули дугові

печі прямого нагріву, вживані для плавки сталі. Дугові печі непрямого нагріву застосовуються для плавки кольорових металів, іноді - чавуну.

Дугові печі прямого нагріву для плавки сталі (ДСП) - випускаються місткістю 0,5; 1,5; 3; 6; 12; 25; 50; 100 т - і відповідно потужністю пічного трансформатора 0,63; 1,25; 2; 4; 8; 12,5; 32 і 50 МВА.

Печі місткістю 25 т і менш живиться напругою 6 або 10 кВ, місткістю 25, 50 і 100 т - напругою 35 кВ, місткістю 100 і 200т - напругою 110 кВ. Однолінійна схема головних кіл ДСП показана на рисунку 1.3. У печах великої потужності (45 МВА і більш) електропічний трансформаторний агрегат складається з регульовального автотрансформатора і нерегульованого пічного знижувального трансформатора.

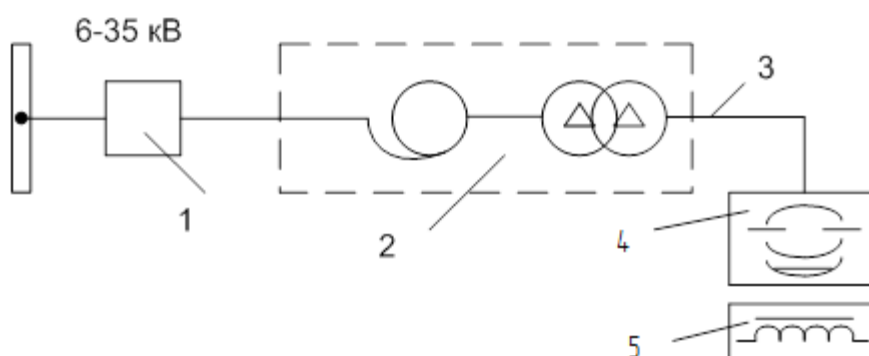


Рисунок 1.3 - Однофазна схема мережі ДСП

1 - вимикач високовольний; 2 - трансформатор електропічний; 3 - коротка мережа; 4- піч; 5 - пристрій електромагнітного змішування металу

У печах малої та середньої потужності напруга регулюється перемиканням ступенів на пічному трансформаторі з боку високої напруги. Це дозволяє адаптувати вторинну напругу до різних етапів технологічного процесу. Через наявність експлуатаційних коротких замикань пічні трансформатори повинні мати високу динамічну стійкість, що дозволяє витримувати струми, які перевищують номінальні в 1,2–1,5 рази.

Для стабільного горіння дуги та зниження струмових ударів під час коротких замикань реактивний опір пічного контуру повинен бути не

меншим за 30–35%. У печах малої потужності, де індуктивний опір короткої мережі є недостатнім, доцільно збільшувати реактивний опір трансформатора. Для трансформаторів зі стрижневим осердям напруга короткого замикання зазвичай складає 7–8%.

У печах із місткістю до 12 тонн, де трансформатори мають потужність до 9 МВА, для компенсації недостатнього реактивного опору трансформатора та короткої мережі послідовно з трансформатором встановлюється реактор. Зазвичай він розташовується в одному баку з трансформатором.

Трансформатори потужністю до 5000 кВА охолоджуються природним маслом, тоді як для потужностей понад 5000 кВА використовується масляно-водяне охолодження з примусовою циркуляцією масла.

Для печей місткістю до 25 тонн трансформатори забезпечують регулювання напруги в діапазоні 50–65% із 12 ступенями перемикавання. Перемикавання здійснюється дистанційно, але без навантаження або після відключення печі з боку живлення. У печах із місткістю понад 25 тонн передбачено 23 ступені регулювання, що дозволяють змінювати напругу під навантаженням. Крім того, трансформатори такого типу забезпечують перемикавання первинних обмоток із трикутника на зірку.

Для електромагнітного перемішування розплавленого металу в дугових сталеплавильних печах місткістю від 25 тонн під днищем встановлюється статор змінного струму, який живиться від тиристорного перетворювача зі зниженою частотою (0,5–2 Гц). Потужність таких пристроїв варіюється в межах 500–1500 кВА, що забезпечує рівномірний розподіл температури та хімічну однорідність розплаву.

Важливими складовими електроустаткування дугових сталеплавильних печей (ДСП) є механізми переміщення електродів, підйому та повороту зведення, відкоту та обертання ванни. Для переміщення електродів використовуються електромеханічні або гідравлічні приводи. У разі електромеханічного приводу застосовуються двигуни постійного струму з

регулюванням частоти обертання, що забезпечує точність позиціонування. Усі ДСП оснащуються автоматичними регуляторами активної потужності, серед яких найпоширенішими є тиристорні регулятори типу АРДМТ.

Однофазні дугові печі непрямого нагріву випускаються потужністю від 175 до 400 кВА з напругою живлення 6 або 10 кВ. Ці печі використовуються переважно для плавки кольорових металів.

ДСП із твердим завантаженням шихти працюють у різкозмінному режимі. Графік їхнього навантаження (рис.1.4) ділиться на три основні періоди: розплавлення, окислення та відновлення (рафінування).

Період розплавлення характеризується найбільшою нерівномірністю струму через короткі замикання, обвали шихти та експлуатаційні умови. У цей час споживається 50–80% усієї енергії, потрібної для плавки. Тривалість розплавлення залежить від місткості печі, потужності трансформатора, марки сталі та методу ведення процесу, займаючи від 35 до 65% загального часу плавки. Цей період триває від 50 хвилин до 4 годин 30 хвилин. Період окислення триває від 20 до 80 хвилин, а період відновлення – від 40 до 90 хвилин.

Під час плавки ДСП може бути значна кількість відключень від мережі через технологічні операції чи аварійні зупинки, що досягає до 10 випадків за одну плавку. Тривалість таких відключень варіюється від 1 до 20 хвилин.

У процесі роботи ДСП виникають різні види електромагнітних перешкод: відхилення та коливання напруги через зміни реактивної потужності, несиметрія та несинусоїдальність струмів і напруги. Ці явища впливають на якість електроенергії та вимагають спеціальних заходів компенсації.

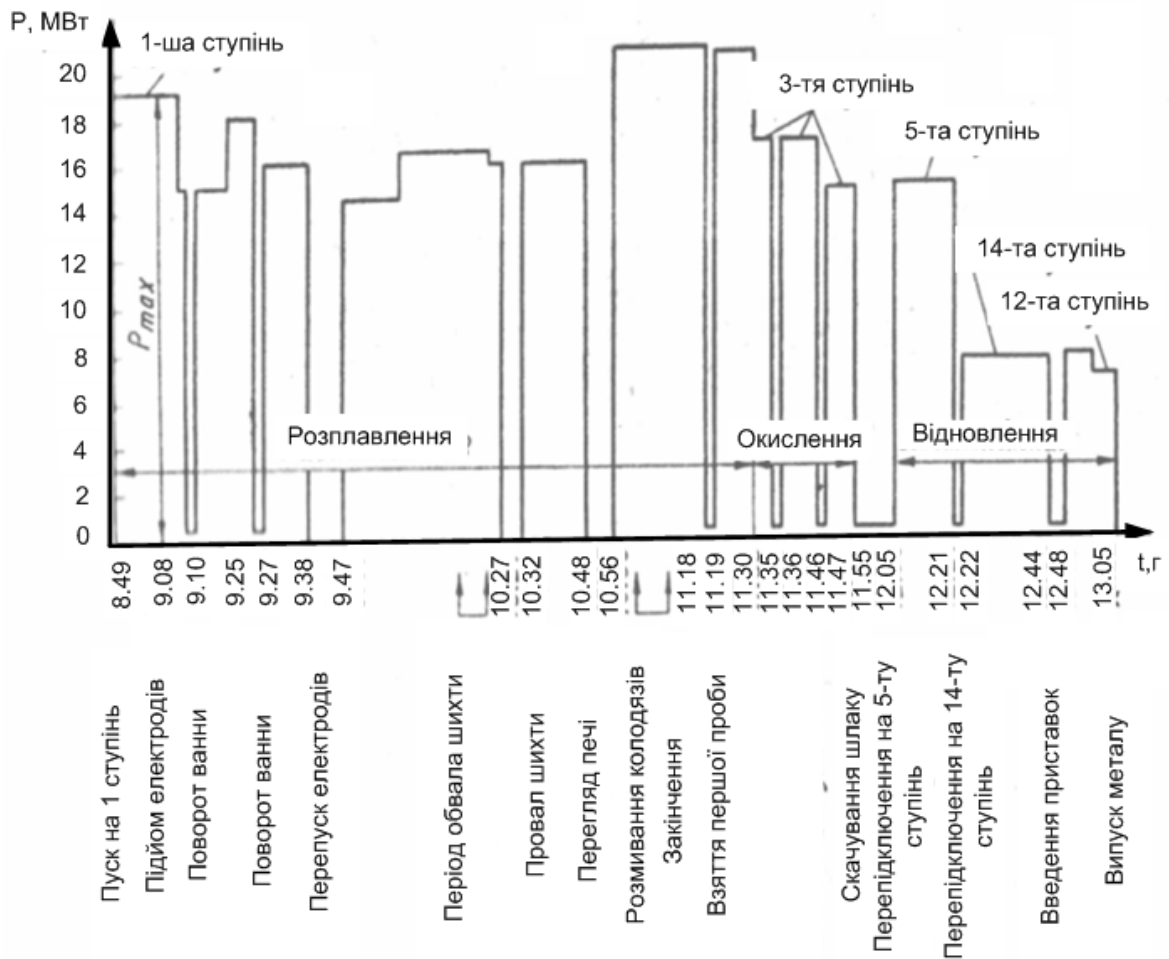


Рисунок 1.4 - Графік навантаження ДСП місткістю 100 т

Коливання напруги в мережі, до якої підключена дугова сталеплавильна піч (ДСП), викликаються коливаннями струму в печі. Основні причини таких коливань включають:

1. Короткі замикання та розриви дуги, викликані зсувами масивних шматків шихти під час плавки. Інтенсивність і частота таких кидків залежать від розміру шматків у шихті.
2. Періодичний характер регулювання процесу плавки. Через пружність несучих частин електродів та невелике демпфування, що застосовується в системі регулювання, виникають власні коливання електродів, що призводять до коливань дуги, що відбуваються синхронно з ними. Частота таких коливань змінюється в діапазоні від 0,5 до 1 Гц.

3. Особливості електричної дуги, що також викликають коливання струму з частотою від 2 до 10 Гц і амплітудою $\pm 15\%$.

Найбільш сильні й часті коливання струмів відбуваються під час періоду розплавлення шихти. Коливання струмів різних фаз виникають не одночасно, що призводить до несиметрії навантаження. Коливання струмів під час розплавлення не є стаціонарними через зміну стану шихти, умов горіння дуги та перехідних процесів, зокрема при комутаційних операціях та різких обвалах шихти. Якщо розглядати процес у сталому режимі, то його можна розкласти на окремі стаціонарні ділянки тривалістю 2-5 хвилин.

Коливання струмів ДСП спричиняють коливання напруги в мережі. Ці коливання зазвичай становлять 2-4% при напрузі 35 кВ і 3-12% при 6 і 10 кВ, з частотою коливань від 0,5 до 1 Гц. Хоча більшість ДСП є трифазними споживачами, однак дуги фаз і їх зміни є не синфазними, що призводить до несиметрії напруги в мережі. Коефіцієнт несиметрії напруги може досягати 2-2,6% в мережах 110 і 35 кВ, і 1-4% в мережах 6 і 10 кВ.

У період розплавлення струми та проти-ЕДС дуг сильно спотворені, що призводить до генерації гармонік, зокрема 2-ї, 3-ї, 4-ї, 5-ї, 7-ї, 9-ї і 10-ї.

Вибір електротехнологічної установки для насосної станції визначається її здатністю забезпечувати подачу води для населених пунктів. Насосна станція є комплексом гідротехнічних споруд та устаткування, що дозволяє подати воду з джерел до напірного басейну або безпосередньо до місця споживання. Станція складається з декількох насосних агрегатів, які можна включати чи вимикати в залежності від потреби в подачі води (Рис.1.5).

Для таких станцій використовуються відцентрові насоси з відповідною потужністю, а також трансформатори для живлення власних потреб (системи освітлення, релейно-контакторної апаратури тощо). У насосних станціях для передачі електричної енергії з напругою понад 1000 В використовуються високовольні вимикачі для включення, відключення та перемикання

електричних кіл під навантаженням, що дозволяє працювати в нормальних і аварійних режимах з великими струмами.

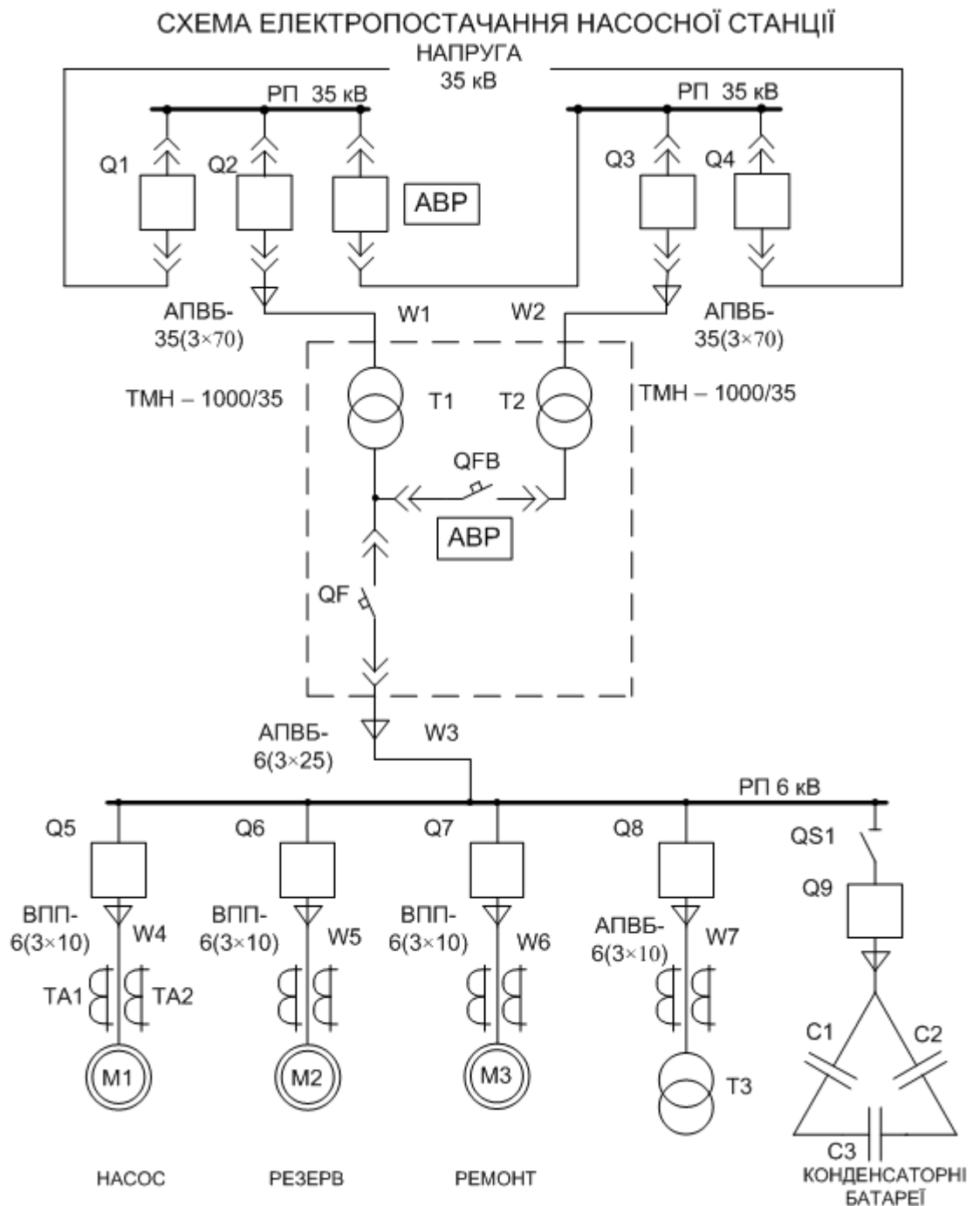


Рисунок 1.5 - Схема електропостачання насосної станції

Для ліній електропередач використовують кабельні лінії, іноді з глибинним виконанням, що забезпечує надійність і безпеку передачі електроенергії в насосній станції.

Схема електропостачання насосної станції, яка живиться від напруги 35 кВ, передбачає використання двох незалежних джерел живлення, що є вимогою для забезпечення надійності електропостачання станції. Враховуючи, що насосна станція належить до 1 категорії електропостачання, для забезпечення безперебійної роботи в системі передбачено використання пристрою автоматичного введення резерву (АВР). У разі відключення одного з джерел живлення система автоматично перемикається на резервне джерело.

При наявності двох джерел живлення в системах електропостачання часто використовується розімкнена схема. Це дозволяє автоматично підключити споживача до іншого джерела, якщо одне з них вийшло з ладу, що забезпечує надійність і безперервність подачі електричної енергії.

Насосна станція працює в умовах непостійного споживання води протягом доби. Це зумовлює зміни в електричному споживанні енергії, оскільки потужність насосів змінюється залежно від потреб у водопостачанні в різний час доби. Графік споживання електричної енергії насосною станцією протягом доби, представлений на рисунку 1.6, показує залежність потужності від кількості працюючих насосів.

У графіку (рис.1.6), де показано споживання електричної енергії для одного насоса, позначена потужність, яку споживає один насос в залежності від часу доби. Крім того, графік для двох насосів відображає потужність, яку споживає система, коли працюють два насоси одночасно. Це дозволяє побачити динаміку змін потреби в електричній енергії і забезпечити оптимальне управління режимом роботи насосної станції для ефективного використання електричної енергії. Аналіз роботи насосної станції проводиться протягом однієї робочої доби. На рисунку 1.8 $P_{H1}, кВт$ - це потужність одного насоса, а $P_{H2}, кВт$ - потужність двох насосів.

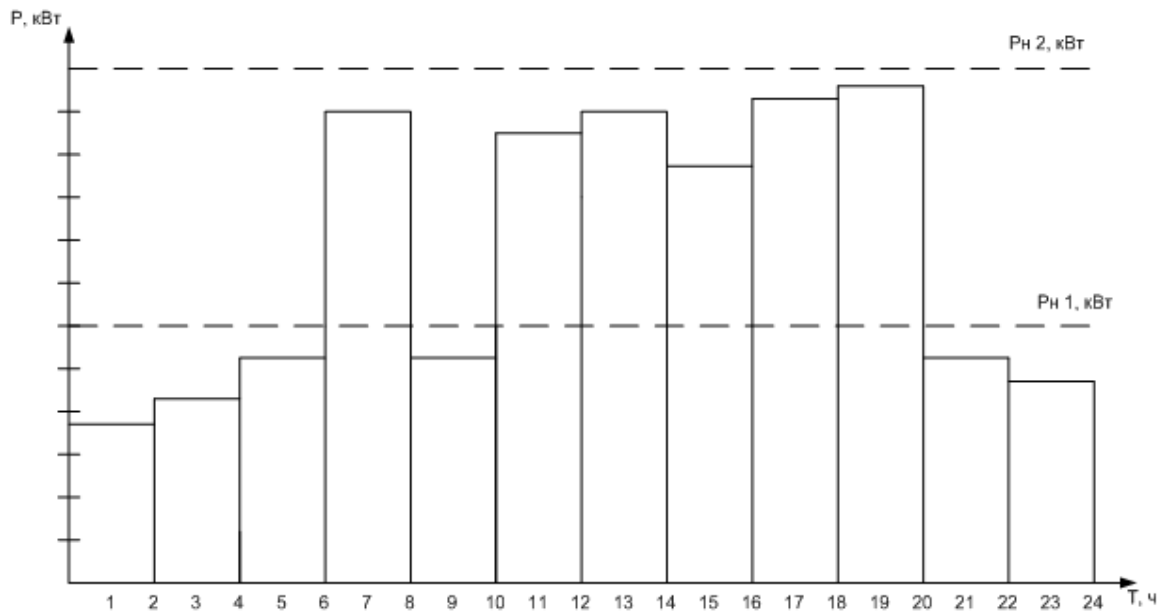


Рисунок 1.6 - Графік електроспоживання за добу

Аналіз роботи насосної станції показує, що споживання води впродовж доби відрізняється за своїм характером, що впливає на навантаження на електродвигуни насосів. У перші години доби (з 0 до 6 годин) споживання води мінімальне, тому для забезпечення потреб цілком достатньо одного насоса. У цей час навантаження на насос мінімальне, і він працює на низьких оборотах.

Протягом періоду з 6 до 8 годин споживання води різко зростає, і один насос вже не здатен забезпечити необхідний обсяг подачі води, тому включаються два насоси. У цьому випадку, коли працює два насоси, сумарне споживання електричної енергії зростає, що призводить до зміни активної та реактивної потужності.

З 8 до 10 годин споживання води знову скорочується, і потреба в двох насосах відпадає. Один насос здатний забезпечити необхідну подачу води, тому другий насос виводиться в резерв.

Період з 10 до 20 годин характеризується підвищеним споживанням води, що знову вимагає введення в роботу другого насоса для забезпечення стабільного водопостачання. У цей час навантаження на кожен з насосів

значно зростає, що знову веде до змін в споживаній активній та реактивній потужності.

Після 20 годин і до 24 годин споживання води знову скорочується, і на цьому проміжку часу достатньо працювати лише одному насосу, хоча його завантаження не буде рівномірним, оскільки потреба в подачі води змінюється залежно від часу доби.

Це нерівномірне завантаження насосів протягом доби призводить до змін в активній та реактивній потужності в різні часи доби. Такі коливання споживаної потужності є нелінійними і відображаються у вигляді зміни реактивних та активних складових потужності, які в свою чергу змінюються в залежності від кількості працюючих насосів і їх завантаження. Змінюючись на кожному проміжку часу, ці коливання можуть впливати на стабільність роботи електричної мережі і потребують врахування при проектуванні системи управління насосною станцією.

Але при різному завантаженні насоса значення $\cos\varphi$ змінюється і ця залежність стає нелінійною (рисунок 1.7), а це приводить до зміни реактивних і активних складових потужності, які будуть різними на кожному проміжку часу.

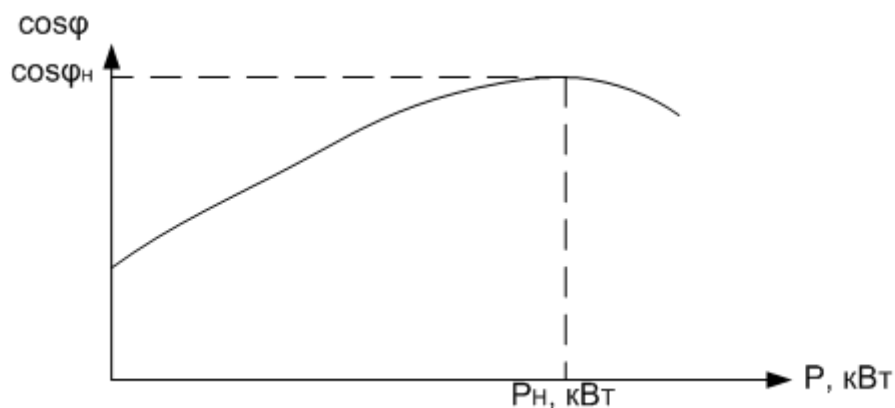


Рисунок 1.7 - Робоча характеристика АД, залежність $\cos\varphi$ від потужності.

Зміна потужності споживання насосної станції протягом доби дійсно призводить до зміни коефіцієнта потужності $\cos\varphi$, що є важливим показником для визначення ефективності роботи електричної системи.

Графік зміни коефіцієнта потужності, зображений на рисунку 1.8, показує, як змінюється значення активної та реактивної потужності залежно від роботи насосів протягом доби. Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$, який є співвідношенням між активною та загальною потужністю, коливається в залежності від навантаження на насосі. Коли насос працює на повну потужність (наприклад, коли працюють два насоси), $\cos\varphi$ знижується, оскільки зростає значення реактивної потужності, потрібної для підтримки роботи двигунів. В періоди, коли навантаження зменшується (наприклад, вночі чи в години зменшеного споживання води), реактивна потужність зменшується, а $\cos\varphi$ наближається до одиниці, що свідчить про більш ефективне використання електричної енергії.

Такі зміни в $\cos\varphi$ впливають на якість електропостачання і потребують контролю та регулювання через систему автоматизації. У моменти, коли $\cos\varphi$ значно зменшується, можуть виникати проблеми з ефективністю роботи електричних мереж, такі як підвищення втрат енергії або погіршення стабільності напруги. Тому важливо враховувати ці зміни при проектуванні і управлінні системою електропостачання насосної станції, зокрема використовуючи пристрої компенсації реактивної потужності для підтримки стабільного коефіцієнта потужності.

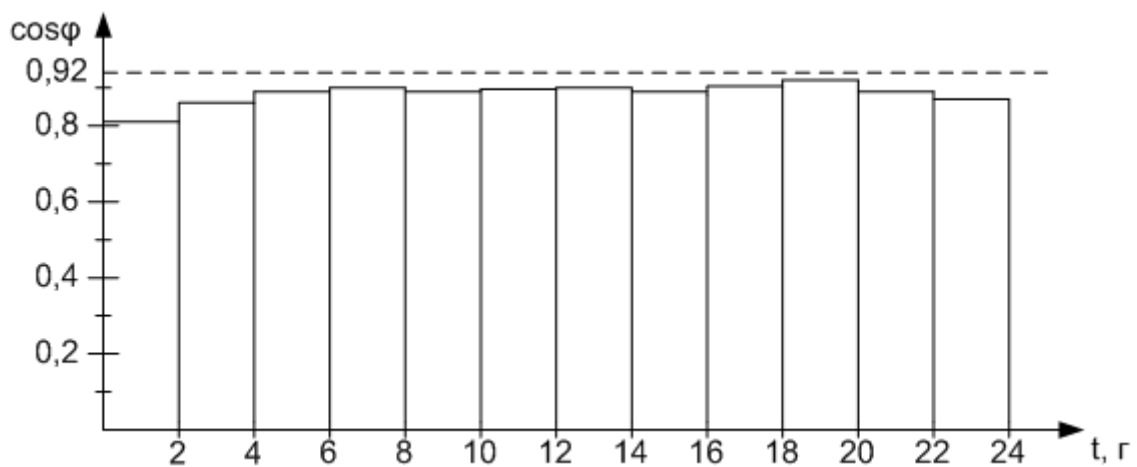


Рисунок 1.8 – Зміна $\cos\varphi$ АД протягом доби

Компенсація реактивної потужності є важливою складовою управління електроспоживанням на підприємствах і в енергетичних системах, оскільки вона дозволяє зменшити негативний вплив реактивної енергії на систему електропостачання.

Як відомо, реактивна потужність, хоча і не виконує корисної роботи, вона необхідна для створення електромагнітних полів, що дозволяють працювати електродвигунам і трансформаторам. Проте її передача по мережі від споживача до джерела живлення (електростанції) спричиняє ряд проблем. Витрати енергії в мережах зростають, що пов'язано з додатковим навантаженням на мережеве обладнання, зокрема на трансформатори, лінії передачі та комутаційні апарати. Знижується пропускна здатність мережі, оскільки значна частина реактивної потужності не виконує корисної роботи, але все одно потребує передачі через мережу. Збільшуються втрати активної енергії через появу додаткових струмів, які протікають по мережі для підтримки реактивної потужності, що спричиняє теплові втрати у проводах і кабелях. Знижується напруга на споживачах. Реактивна потужність викликає зниження напруги в мережах, що може призвести до нестабільної роботи обладнання, особливо в тих випадках, коли на мережі велике навантаження. Знижується надійність електропостачання. Система стає більш вразливою до коливань напруги і змін у навантаженні.

Тому компенсувати реактивну потужність безпосередньо на об'єктах споживачів – це ефективний спосіб знизити навантаження на мережу, зменшити втрати енергії, стабілізувати напругу та підвищити загальну ефективність енергетичної системи.

1.2. Вплив роботи електротехнологічного обладнання на якість електричної енергії .

Відповідно до стандарту ДЕСТ 13109-97, якість електричної енергії визначається за такими параметрами:

- стале відхилення напруги δU_y ;
- амплітуда змін напруги δU_t ;
- доза флікера P_f ;
- показник відхилення синусоїдальної форми напруги K_U ;
- коефіцієнт гармонійної складової напруги n -го порядку $K_{U(n)}$;
- коефіцієнт несиметрії напруги за оберненою послідовністю K_{2U} ;
- коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю K_{0U} ;
- відхилення від номінальної частоти Δf ;
- тривалість провалу напруги Δt_n ;
- величина імпульсної напруги U_{imp} ;
- коефіцієнт короткочасного перенапруження K_{perU} .

Відповідно до ДЕСТ 13109-97, на якість електроенергії впливають як споживачі, так і компанія, що здійснює енергозабезпечення. До параметрів, які залежать від енергозабезпечуючої організації, належать відхилення напруги δU_y , відхилення частоти Δf , провал напруги Δt_n , імпульс напруги U_{imp} та коефіцієнту тимчасового перенапруження K_{perU} .

Споживачі з нелінійним навантаженням впливають на коефіцієнт спотворення синусоїдальної форми напруги K_U та коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$.

Споживачі з несиметричним навантаженням формують коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю K_{2U} та коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю K_{0U} .

Щоб проаналізувати параметри якості електроенергії, несинусоїдальну періодичну функцію потрібно представити у вигляді тригонометричного ряду, відповідно до теореми Фур'є. Перш за все, слід визначити постійну складову напруги для кожної фази:

$$Au_{0a,b,\epsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n u_{ia,b,\epsilon} , \quad (1.2)$$

де n - масив значень;

синусноідальну складову напруги по кожній фазі:

$$Au_{ka,b,\epsilon} = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^n u_{ia,b,\epsilon} \cdot \sin(k \cdot i \cdot p) , \quad (1.3)$$

де k - порядок гармоніки від 1 до m ,

p - кутовий крок $p = 2\pi \cdot 50 \cdot T_d$

T_d - термін дискретизації

косинусну складову напруги на кожній фазі:

$$Bu_{ka,b,\epsilon} = \frac{2}{n} \cdot \sum_{i=0}^n u_{ia,b,\epsilon} \cdot \cos(k \cdot i \cdot p) . \quad (1.4)$$

А також потрібно обчислити міжфазні складові напруги.

Значення постійної складової напруги:

$$Au_{0ab,b\epsilon,ca} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n u_{iab,b\epsilon,ca} , \quad (1.5)$$

Величина синусної складової напруги:

$$Au_{kab,b\epsilon,ca} = \frac{2}{n} \sum_{i=0}^n u_{iab,b\epsilon,ca} \cdot \sin(k \cdot i \cdot p) , \quad (1.6)$$

Величина косинусної складової напруги:

$$Bu_{kab,b\epsilon,ca} = \frac{2}{n} \cdot \sum_{i=0}^n u_{iab,b\epsilon,ca} \cdot \cos(k \cdot i \cdot p) . \quad (1.7)$$

Діючі значення міжфазної напруги та напруги по кожній фазі напруги визначається як:

$$U_{ab,b\epsilon,ca} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (u_{iab,b\epsilon,ca})^2} ; \quad (1.8)$$

$$U_{a,b,\epsilon} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (u_{ia,b,\epsilon})^2} . \quad (1.9)$$

Значення напруги прямої послідовності:

$$U_1 = \sqrt{\frac{1}{12} \cdot \left[\left[\sqrt{3} \cdot U_{ab} + \sqrt{4 \cdot U_{bc}^2 - \left(\frac{U_{bc}^2 - U_{ca}^2}{U_{ab}} \right) + U_{ab}} \right]^2 + \left(\frac{U_{bc}^2 - U_{ca}^2}{U_{ab}} \right) \right]}$$

Значення напруги зворотної послідовності:

$$U_2 = \sqrt{\frac{1}{12} \cdot \left[\left[\sqrt{3} \cdot U_{ab} - \sqrt{4 \cdot U_{bc}^2 - \left(\frac{U_{bc}^2 - U_{ca}^2}{U_{ab}} \right) + U_{ab}} \right]^2 + \left(\frac{U_{bc}^2 - U_{ca}^2}{U_{ab}} \right) \right]};$$

Значення напруги нульової послідовності:

$$U_0 = \frac{1}{6} \sqrt{\left(\frac{U_{bc}^2 - U_{ca}^2}{U_{ab}} - 3 \frac{U_{ca}^2 - U_a^2}{U_{ab}} \right) + \left[\sqrt{4U_{bc}^2 - \left(U_{ab} + \frac{U_{bc}^2 - U_{ca}^2}{U_{ab}} \right)^2} - 3 \sqrt{4U_b^2 - \left(U_{ab} + \frac{U_b^2 - U_a^2}{U_{ab}} \right)^2} \right]}$$

Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%; \quad (1.10)$$

Припустиме значення коефіцієнта K_{2U} становить 2% та 4%.

Коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю:

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3}U_0}{U_1} \cdot 100\% \quad (1.11)$$

Припустиме значення коефіцієнта K_{0U} в точках загального приєднання 4-х проводної мережі номінальною напругою 0,38 кВ становить 2% та 4%.

Величина викривлення синусоїдальності кривої напруги становить:

для міжфазної напруги:

$$K_{U_{ab,bc,ca}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^m MU_{kab,bc,ca}}}{U_{ab} \cdot U_{bc} \cdot U_{ca}} \cdot 100\%; \quad (1.12)$$

де MU_k - амплітуди міжфазних гармонік напруги;

на кожну фазу напруги

$$K_{U_{a,b,c}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^m MU_{ka,b,c}}}{U_a U_b U_c} \cdot 100\% . \quad (1.13)$$

Коефіцієнт несинусоїдальності напруги на шинах будь-якого споживача електроенергії не повинен перевищувати 5%.

На сучасних підприємствах поширені навантаження з нелінійними вольт-амперними характеристиками, до яких належать тиристорні перетворювачі, обладнання для дугового та контактного зварювання, електродугові сталеплавильні й руднотермічні печі, а також газорозрядні лампи. Такі навантаження живляться струмом із мережі, форма якого стає несинусоїдальною, а це призводить до нелінійних спотворень напруги в мережі, тобто до появи несинусоїдальних режимів.

Несинусоїдальні режими негативно впливають на роботу електрообладнання, релейного захисту, систем автоматизації, телемеханіки та зв'язку. Вони призводять до економічних втрат через погіршення енергетичних характеристик, зниження надійності мережі та скорочення терміну експлуатації обладнання.

Основні аспекти проблеми несинусоїдальності включають:

- оцінювання електромагнітної сумісності джерел гармоній і навантажень;
- визначення кількісних характеристик гармонік струму, що генеруються різними нелінійними навантаженнями, і прогнозування їх рівнів у мережах;
- заходи щодо зменшення рівнів гармоній.

Одним із методів зменшення рівня гармоній є збільшення кількості фаз випрямлення. Чим більше фаз у схемі випрямлення, тим ближчою стає форма струму перетворювача до синусоїдальної. Наприклад, у шестифазній схемі випрямлення у струмі перетворювача переважають 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25-

та гармоніки, а у дванадцятифазній схемі – 11, 13, 23, 25-та гармоніки. Розрахунки показують, що при переході на 12-фазний режим випрямлення несинусоїдальність напруги мережі зменшується приблизно в 1,4 разу.

Хоча збільшення кількості фаз випрямлення є ефективним способом зниження рівня гармонік у струмі й напрузі мережі, такі пристрої є складними, дорогими та менш надійними. На сьогодні 12-фазний режим випрямлення є найпоширенішим.

Збільшення кількості фаз випрямляча можна досягти також шляхом створення еквівалентного багатозфазного режиму для групи вентильних агрегатів, залишаючи кожен із них у 6-фазній схемі. Наприклад, для реалізації 12-фазного еквівалентного режиму в двомостовому перетворювачі одну обмотку анодного трансформатора з'єднують у трикутник, а іншу – у зірку. У результаті в первинних обмотках трансформаторів обох агрегатів виникають гармоніки порядків $\nu = 6k \pm 1$, але в живильну мережу надходять лише гармоніки порядків $\nu = 12k \pm 1$. Решта гармонік циркулює між первинними обмотками трансформаторів.

Зменшення рівня гармонік за допомогою живильної мережі досягається переважно оптимальною побудовою схеми електропостачання, що забезпечує допустимий рівень гармонік напруги на шинах споживача. Серед поширених способів:

- використання трансформаторів перетворювачів із підвищеною напругою (110–220 кВ);
- живлення нелінійних навантажень через окремі трансформатори або їх підключення до окремих обмоток триобмоткових трансформаторів;
- підключення синхронних або асинхронних двигунів паралельно нелінійним навантаженням.

Фільтри для гармонік складаються з індуктивностей і ємностей, з'єднаних послідовно, та налаштовуються на певну частоту гармоніки. Однак через наявність активних опорів у компонентах і можливу неточність налаштування повна фільтрація гармонік зазвичай недосяжна. Одночасно

такі фільтри можуть бути джерелом реактивної потужності та використовуватися для компенсації реактивного навантаження.

1.3. Аналіз сучасних систем і комплексів для компенсації реактивної потужності.

Усі електроприймачі змінного струму є споживачами як активної, так і реактивної потужності (РП). До таких споживачів відносяться пристрої, які використовують змінне магнітне поле для своєї роботи, зокрема асинхронні двигуни, індукційні печі, зварювальні трансформатори, випрямлячі та інші аналогічні пристрої. Крім того, до них належать елементи електричної мережі — трансформатори, лінії електропередачі, реактори тощо.

Компенсація реактивної потужності на місці споживання є ефективним і економічним методом підвищення пропускної здатності мережі. Коли електрична енергія передається через проводи та кабелі, в мережі присутні дві основні складові: активна і реактивна потужність. Активна потужність перетворюється в корисну енергію, таку як механічна, теплова та інші види енергії. Реактивна потужність не сприяє виконанню корисної роботи, але необхідна для створення електромагнітних полів, які важливі для нормальної роботи електродвигунів і трансформаторів. Її виробництво може здійснюватися безпосередньо на місці споживання, тобто без потреби в транспортуванні через мережу. Однак якщо ця енергія передається від електростанції до споживача, вона створює додаткове навантаження на електричне обладнання, що зменшує пропускну здатність мережі для активної потужності. Це призводить до збільшення втрат активної енергії, зниження напруги в мережі, зростання витрат електроенергії та зниження надійності живлення. В результаті знижується експлуатаційний ресурс електричних установок, що вимагає більших витрат на їх обслуговування та ремонт.

Електротехнологічні установки, такі як печі, установки для контактної зварки, перетворювачі, зазвичай мають нерівномірне споживання реактивної потужності протягом доби, що супроводжується її коливаннями, які в свою чергу призводять до коливань напруги. Через нерівномірний розподіл потужності по фазах і нелінійність вольт-амперної характеристики навантаження, можуть виникати несиметрія і несинусоїдальність в живлячій напрузі, а також струми зворотної послідовності. Одним із найбільш ефективних рішень цієї проблеми є використання пристроїв для компенсації реактивної потужності, які дозволяють зберігати оптимальне співвідношення між реактивною та активною потужністю в електротехнологічних установках.

Найбільше навантаження на споживання потужності виникає у період розплавлення шихти в дугових сталеплавильних печах (ДСП). Цей етап супроводжується частими короткими замиканнями (КЗ), значними спотвореннями струму і низьким коефіцієнтом потужності. Для печей типу ДСП-50 середній коефіцієнт потужності становить $\cos\varphi=0,76$, для моделей ДСП-100 і ДСП-200 цей показник знижується до 0,72-0,73, а для проєктованих печей з трансформаторами потужністю 100-140 МВА коефіцієнт потужності очікується на рівні $\cos\varphi=0,6-0,65$.

Під час коротких замикань відбуваються різкі коливання активної потужності, що призводить до значних спадів напруги і флікеру, що, в свою чергу, створює перешкоди для роботи інших споживачів електроенергії. Коефіцієнт потужності печі залежить від реактивного опору короткої мережі. Для зменшення кратності струму під час експлуатаційних КЗ у печах малої потужності штучно збільшують реактивний опір пічного контуру, використовуючи дроселі на стороні високої напруги пічного трансформатора. У таких печах коефіцієнт потужності не перевищує значення 0,91-0,92, а з урахуванням несинусоїдальності напруги він може знижуватись до 0,88-0,9.

Для компенсації реактивної потужності в мережах з ДСП потрібно також поліпшувати якість напруги. Для зменшення впливу цих установок на якість електропостачання використовуються швидкодіючі синхронні компенсатори, статичні джерела реактивної потужності, установки продольно-ємної компенсації, реактори та інші раціональні схеми компенсації.

Поперечна компенсація реактивної потужності полягає у підключенні компенсуючих пристроїв паралельно з навантаженням. При цьому, якщо індуктивний опір та ємність з'єднані в паралель, струм в основній частині ланцюга є геометричною сумою струмів, які протікають через індуктивний і ємнісний компоненти. Оскільки індуктивний струм відстає від напруги, а струм, що проходить через ємність, випереджає його, то в результаті правильно підібраної ємності загальний струм буде менший за струм індуктивного навантаження.

Застосування джерел реактивної потужності для покращення коефіцієнта потужності дозволяє збільшити пропускну здатність ліній і підвищити активне навантаження на трансформатори, не збільшуючи їх повну потужність.

Поперечна компенсація реактивної потужності призводить не тільки до зниження струму в навантаженні і відповідно до зменшення втрат активної потужності, але й до збільшення рівня напруги в мережі, що сприяє зменшенню втрат в елементах системи електропостачання.

Схеми підключення батарей конденсаторів (БК) при поперечній компенсації реактивної потужності для пічних установок зображені на рисунку 1.9. Оскільки напруга пічних установок значно нижча за стандартну напругу БК, пряме підключення їх до печі є неефективним. Батарея конденсаторів може бути підключена через підвищувальний трансформатор, що приєднується до сторони з нижчою напругою пічного трансформатора (рисунк 1.9, а). Найбільш ефективним є підключення батареї конденсаторів якомога ближче до електродів, що дозволяє знизити втрати в короткій

мережі. В схемі на рисунку 1.9, б БК підключається до напруги регулювальної обмотки пічного трансформатора. В схемі на рисунку 1.9, в БК приєднується до спеціальної обмотки пічного трансформатора, а на рисунку 1.9, г БК підключена безпосередньо перед пічним трансформатором.

Поперечна компенсація є процесом паралельного підключення компенсуючих пристроїв до електричної системи для коригування реактивних параметрів ліній електропередачі (ЛЕП) та зменшення споживаної реактивної потужності в системі. Для ЛЕП великої протяжності поперечну компенсацію зазвичай здійснюють за допомогою електричних реакторів, які встановлюють на підстанціях або в пунктах перемикачів. Реактори поглинають реактивну потужність, що виникає через розподілену ємність ЛЕП. Включення реакторів покращує розподіл напруги вздовж ЛЕП, підвищує пропускну здатність мережі, зменшує внутрішні перенапруження і дозволяє забезпечити стабільні режими роботи ЛЕП, такі як холостий хід, синхронізація або автоматичне повторне включення. Поперечна компенсація в електричних мережах може здійснюватися через батареї конденсаторів, синхронні компенсатори та синхронні електродвигуни.

Повздовжня компенсація ємності є ефективним способом підвищення пропускну здатності для ЛЕП напругою 220-750 кВ, а також покращує статичну і динамічну стійкість електричних систем. Повздовжню компенсацію також застосовують для стабілізації напруги в довгих повітряних мережах 6-35 кВ, наприклад, в системах електропостачання промислових підприємств або при швидких змінах навантаження, таких як часті пуски двигунів з великими пусковими струмами чи робота зварювальних агрегатів.

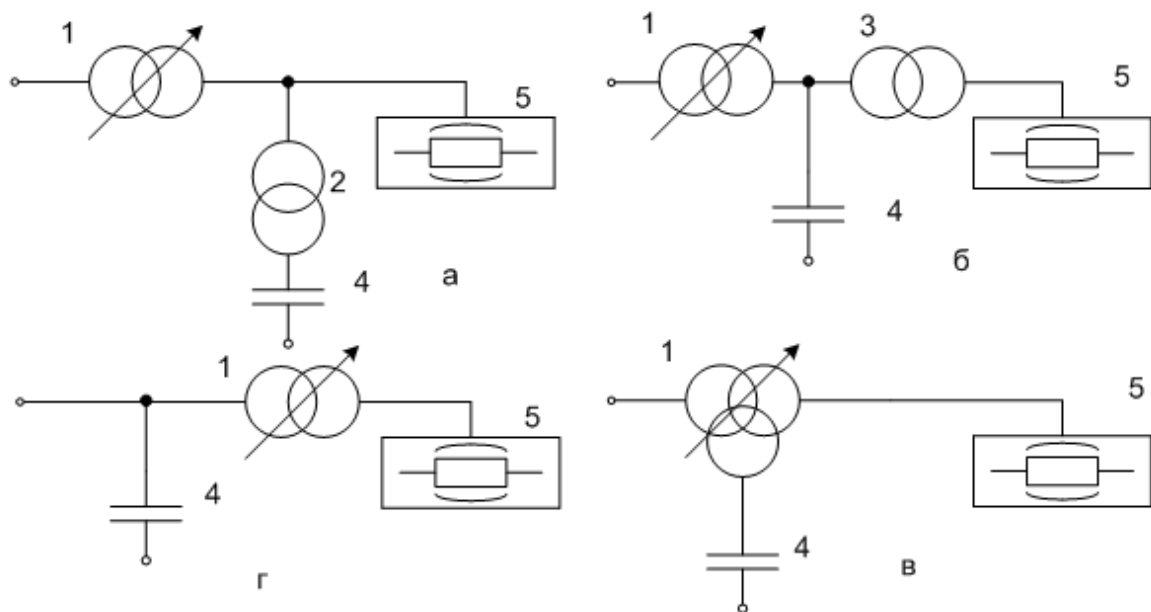


Рисунок 1.9 - Схема поперечної компенсації реактивної потужності
 1 – пічний трансформатор; 2 – підвищуючий трансформатор; 3 – регулюючий трансформатор; 4 – БК; 5 – піч

До недоліків повздовжньої компенсації можна віднести значне збільшення струму короткого замикання в безпосередній близькості до місця установки компенсуючих пристроїв, а також ймовірність виникнення резонансних явищ в електричній системі, таких як самозбудження або саморозгойдування. Встановлена потужність компенсуючих пристроїв обмежена вимогами для забезпечення надійної роботи релейного захисту електричних ліній, а також через ризик виникнення зазначених резонансних явищ. У випадку повздовжньої компенсації реактивної потужності батареї конденсаторів підключаються послідовно з навантаженням. Якщо опір навантаження має індуктивний характер, то споживана реактивна потужність визначається наступним чином:

$$Q_H = I^2 \cdot x_H \quad (1.14)$$

Послідовно включена БК буде генерувати потужність:

$$Q_C = I^2 \cdot x_C \quad (1.15)$$

Тоді сумарна реактивна потужність:

$$Q = Q_H - Q_C = I^2(x_H - x_C) \quad (1.16)$$

Коефіцієнт потужності навантаження при повздовжній компенсації:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P_H} = \frac{Q_H}{P_H} - \frac{I^2 \cdot x_C}{P_H} = \operatorname{tg} \varphi_H - \frac{I^2 \cdot x_C}{P_H} \quad (1.17)$$

Вираз показує, що шляхом повздовжньої компенсації можна знижувати $\operatorname{tg} \varphi$ навантаження.

При послідовному включенні БК з лініями електропередачі також знижуються втрати напруги:

$$\Delta U_{\kappa} = \frac{P_r + Q(x - x_C)}{U} = \Delta U - \frac{Q \cdot x_C}{U} \quad (1.18)$$

де ΔU , ΔU_{κ} - втрати напруги в лініях до та після компенсації реактивної потужності.

Повздовжня компенсація реактивної потужності застосовується при різко змінних навантаженнях, оскільки забезпечує автоматичне коригування напруги відповідно до зміни струму навантаження. Однак використання цього методу може призвести до виникнення резонансних явищ, особливо при коротких замиканнях.

Схеми підключення батарей конденсаторів (БК) при повздовжній компенсації в пічних установках зображені на рисунку 1.10. У схемі на рисунку 1.10, а БК підключена через розділовий трансформатор; на рисунку 1.10, б – до обмотки вищої напруги вольтодобавочного трансформатора. У схемі на рисунку 1.10, в БК підключена між регулюючим і пічним трансформатором, а в схемі на рисунку 1.10, г – безпосередньо до живлячої мережі. Важливо зазначити, що підключення конденсаторів безпосередньо в коротку мережу є недоцільним через високі струми, що можуть досягати декількох десятків кілоампер.

Важливо зазначити, що в схемі на рисунку 1.10, г підвищується напруга на первинній обмотці пічного трансформатора на величину

$\Delta U(\cos \varphi_k / \cos \varphi - 1)$, що залежить від коефіцієнтів потужності для руднотермічних печей. При цьому напруга на вході пічного трансформатора може збільшитися на 20-50%. Включення батареї конденсаторів (БК) за схемою повздовжньої компенсації реактивної потужності в деяких випадках може призвести до зниження загальної потужності трансформаторів. Тому найбільш доцільним варіантом є підключення БК між регулювальним і пічним трансформатором.

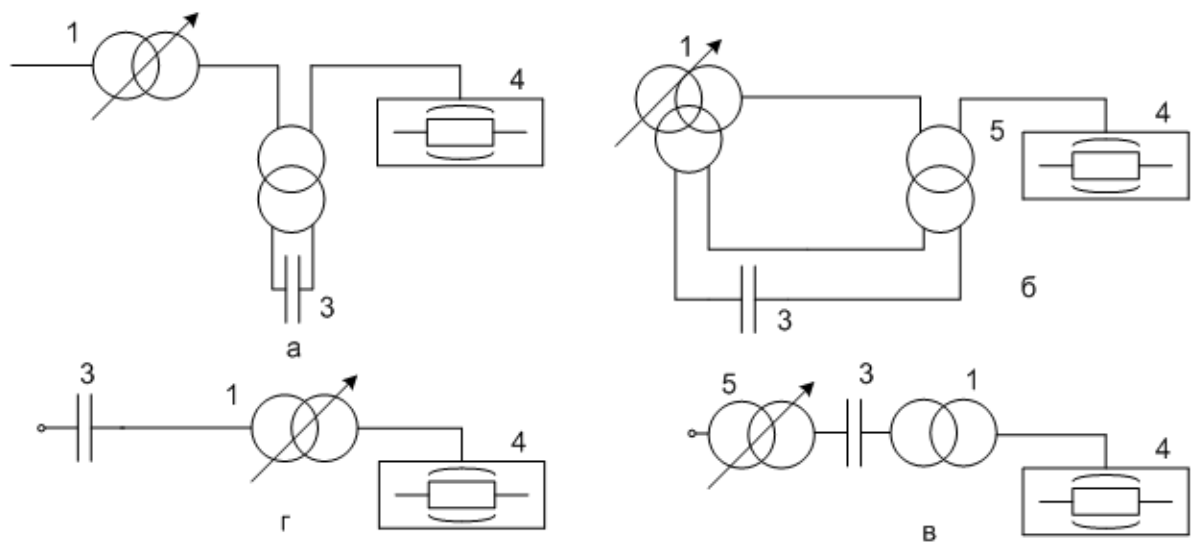


Рисунок 1.10 - Схема повздовжньої компенсації реактивній потужності
1 – пічний трансформатор; 2 – роздільний трансформатор; 3 – Батарея конденсаторів; 4 – піч; 5 – трансформатор вольтодобавочний; 6 – автотрансформатор

Для підвищення коефіцієнта потужності потужність БК можна визначити з наступного виразу:

$$Q_c = P_{cp} (tg \varphi - tg \varphi_{mp}) \quad (1.19)$$

де P_{cp} - величина середньорічного активного навантаження;

$tg \varphi_{mp}$ - очікуваний коефіцієнт потужності.

Потужність БК доцільно визначається, виходячи з балансу реактивної потужності. Середня потужність БК при цьому:

$$Q_c = 3 \cdot I_x^2 - S \cdot \sin \varphi \quad (1.20)$$

У електричних печах з повздовжньою компенсацією реактивної потужності можуть виникати аварійні режими через кілька факторів. Основними причинами таких ситуацій є короткі замикання в короткій мережі, перевантаження струму пічного контура, ферорезонансні коливання, перенапруження при розшунтованні компенсуючих пристроїв та внутрішні пошкодження батареї конденсаторів (БК).

Якщо під час аварії відбувається різке підвищення напруги, БК повинна бути негайно розряджена через іскровий проміжок і зашунтована за допомогою високовольтного вимикача. Потужність БК у системах з повздовжньою компенсацією виявляється сумарною з потужністю пічного трансформатора, що призводить до появи ферорезонансних коливань, відмінних від тих, що виникають у лініях електропередачі. У разі підключення БК до ланцюга вольтодобавочних або роздільних трансформаторів ці коливання можуть виникати на основній частоті мережі, що часто призводить до відключення пічної установки.

З метою запобігання ферорезонансним коливанням під час проектування вольтодобавочних та роздільних трансформаторів необхідно передбачити використання сталі з низькими значеннями індукції.

Статичні тиристорні компенсатори реактивної потужності (СТК) використовуються для вирішення проблем, пов'язаних з великими коливаннями реактивної потужності в системах передачі та розподілу електричної енергії. Типова схема таких пристроїв включає батареї конденсаторів, які налаштовані для фільтрації вищих гармонік і працюють у складі фільтрокомпенсуючих кіл (ФКЛ). Вони можуть бути постійно підключені або комутовані через вимикачі. Також до схеми додаються трифазні реактори, керовані тиристорами, що утворюють тиристорно-реакторну групу (ТРГ).

Кут запалення тиристорів регулюється таким чином, щоб струм у реакторах синхронізувався зі струмом навантаження або коригував реактивну потужність. Вибір потужності і конфігурації системи СТК

залежить від особливостей конкретного об'єкта, параметрів електричної мережі, типу навантаження та вимог щодо якості електроенергії.

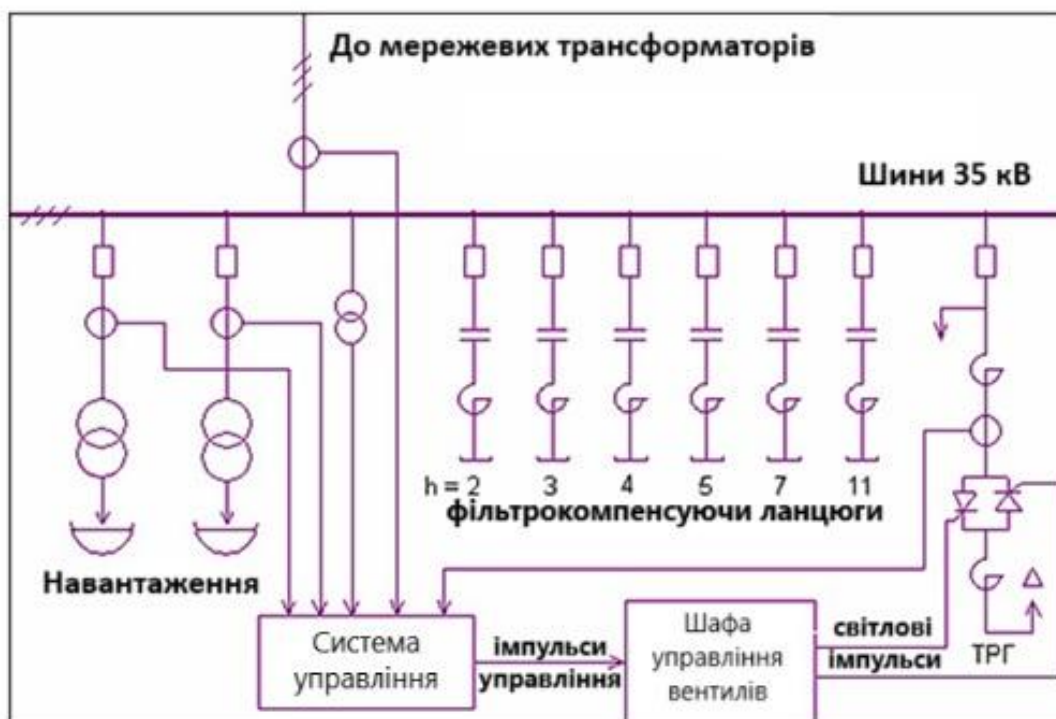


Рисунок 1.11 - Схема включення статичного тиристорного компенсатора реактивної потужності

Для управління потоками реактивної потужності розробляються програми використання батарей статичних конденсаторів (БСК). Схема їх підключення до електричної мережі показана на рисунку 1.12. Вона дозволяє ефективно компенсувати реактивну потужність, що споживається навантаженням, за допомогою автоматичного регулювання та підключення чи відключення батарей в залежності від потреб системи.

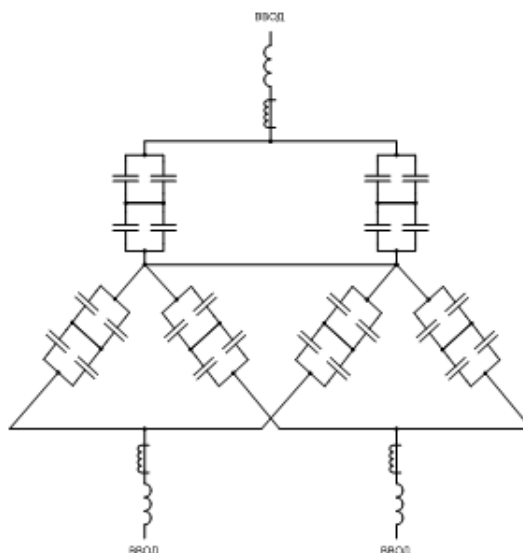


Рисунок 1.12 - Електрична схема підключення батарей статичних конденсаторів

Батареї статичних конденсаторів (БСК) дозволяють ефективно постачати реактивну енергію в мережу, включаючись безпосередньо в систему. Це призводить до зміщення фази, компенсуючи реактивну потужність, яку споживач витрачає через свої пристрої. Для зниження надмірної реактивної потужності в лініях застосовуються керовані шунтуючі реактори (КШР), які поступово регулюють споживану потужність.

Схема підключення КШР показана на рисунку 1.13, де управління індуктивністю реактора здійснюється для точного коригування рівня реактивної потужності.

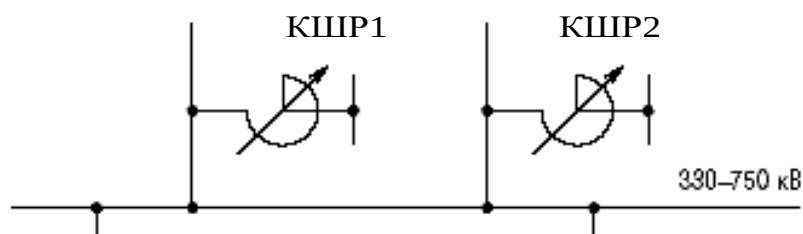


Рисунок 1.13 - Схема з'єднання керованих шунтуючих реакторів

Комплексне використання батарей статичних конденсаторів (БСК) разом з керованими шунтуючими реакторами (КШР) дозволяє ефективно

контролювати баланс між реактивною та активною потужністю в енергетичному вузлі. Це підвищує стійкість навантаження споживачів до просідань напруги, викликаних короткими замиканнями в мережі, і забезпечує стабільність напруги в межах 1-1,5% від заданої величини.

Конденсаторні установки на промислових підприємствах, як правило, працюють цілодобово і рідко відключаються під час малих навантажень. Без належного регулювання потужності таких установок зниження навантаження може призвести до підвищення напруги в мережі. Це може скоротити термін експлуатації як самих конденсаторів, так і іншого електрообладнання, а також спричинити перевитрату електроенергії. Надлишково включені конденсаторні установки можуть змінити ємність фаз і спричинити додаткові втрати енергії в мережі, що постачає підприємство (Рис.1.14).

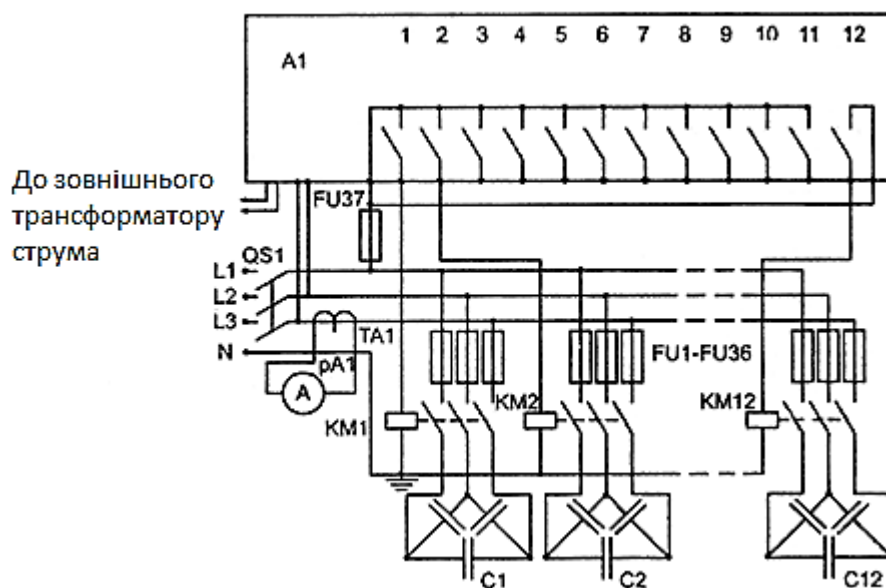


Рисунок 1.14 - Схема електрична підключення комплексної конденсаторної установки

У великих установках, де потрібна більша потужність або висока напруга, використовують батареї конденсаторів з паралельним і послідовно-паралельним з'єднанням елементів. Збільшення номінальної напруги конденсаторної батареї досягається шляхом послідовного з'єднання елементів, а для збільшення потужності застосовують паралельне з'єднання.

Зазвичай конденсатори підключаються до мережі за схемою трикутника. Для розрядження енергії, що накопичується в конденсаторах при їх відключенні, використовується автоматичне розрядження через постійно включений активний опір, наприклад, трансформатор напруги.

Перевагами конденсаторів є їх проста експлуатація (відсутність рухомих частин), легкість монтажу завдяки малому вазі, а також низькі втрати активної потужності на виробництво реактивної потужності (від 2,5 до 5 Вт/кВАр).

Проте є й недоліки. Реактивна потужність, що генерується конденсаторами, залежить від напруги. Також вони мають недостатню стійкість до струмів короткого замикання і перенапружень, чутливі до спотворень форми кривої напруги, і не можуть забезпечити плавне регулювання потужності.

Силові конденсатори — це спеціальні однофазні або трифазні ємності для вироблення реактивної потужності, потужність яких коливається від 5 до 100 кВАр, а номінальна напруга — від 220 В до 10 кВ.

Конденсаторні установки на підприємствах зазвичай працюють безперервно, рідко відключаючись при малому навантаженні. Відсутність регулювання потужності таких установок може призвести до підвищення напруги в мережі, що, в свою чергу, скорочує термін служби як самих конденсаторів, так і решти електрообладнання, сприяючи перевитратам електроенергії. Це підвищує експлуатаційні витрати, оскільки знижується ресурс електроустановок, і необхідно більше коштів на їх обслуговування.

Розширення виробництва, а також збільшення енергоспоживання створюють додаткові проблеми для енергетичних систем, серед яких: обмеження можливості підключення нових об'єктів до енергомережі, погіршення якості електроенергії (зниження напруги, провали напруги при коротких замиканнях), а також знос і перевантаження мереж. Це ускладнює приєднання нових споживачів або забезпечення приросту виробничих потужностей для існуючих.

Найефективніше рішення цих проблем — це використання пристроїв компенсації реактивної потужності, які допомагають уникнути перевищення співвідношення споживаної реактивної та активної потужності. Компенсація реактивної потужності дозволяє зберегти стабільність напруги в мережі та забезпечити ефективне використання електроенергії.

2 МАТЕМАТИЧНЕ ВІДОБРАЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ТРИФАЗНІЙ МЕРЕЖІ ЗМІННОГО СТРУМУ З НЕЛІНІЙНИМ НЕСИМЕТРИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

2.1. Повна, активна і реактивна потужність.

Змінний струм можна представити як сукупність двох складових: активної та реактивної.

Активна складова – це частина струму, яка витрачається на виконання корисної роботи, наприклад, у електродвигунах або інших приймачах електроенергії. Вона перебуває у фазі з напругою.

Реактивна складова – це компонент струму, що перпендикулярний вектору напруги. Її поява в мережі здебільшого обумовлена потребою електроприймачів (таких як двигуни, трансформатори чи індукційні печі) у змінному магнітному полі, для створення якого необхідний реактивний струм. У такому разі його називають індуктивним.

Векторна діаграма напруги і струму для ланцюга синусоїдального струму, що містить активний опір і індуктивність, показана на рисунку 2.1. На цьому ж рисунку показано розкладання вектора струму I на дві складові – активну I_a , співпадаючу по фазі з напругою U , прикладеною до ланцюга, і реактивну I_p , таку, що відстає від напруги на 90° .

Активна складова струму, як видно з рис.2.1 визначається як добуток повного струму на косинус кута φ , утвореного векторами напруги та повного струму:

$$I_a = I \cdot \cos \varphi \quad (2.1)$$

Реактивна складова струму дорівнює добутку повного струму на синус того ж кута:

$$I_p = I \cdot \sin \varphi \quad (2.2)$$

У змінному струмі прийнято розрізняти три види потужності: активна потужність – виконує корисну роботу, реактивна потужність – пов’язана із створенням магнітних і електричних полів, повна потужність – визначається як результат взаємодії напруги та струму.

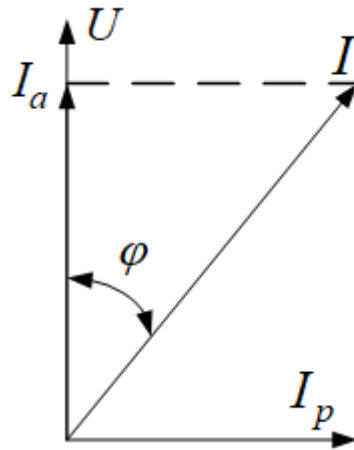


Рисунок 2.1 - Векторна діаграма струмів і напруги з активно-індуктивним навантаженням

Активна потужність P - це добуток напруги і активної складової струму:

$$P = U \cdot I_a = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2.3)$$

Активна потужність використовується для виконання корисної роботи електричними приймачами, такими як електродвигуни, нагрівальні прилади тощо. Вона характеризує ефективне перетворення електричної енергії в інші види енергії (механічну, теплову тощо).

Реактивна потужність - це добуток напруги та реактивної складової струму:

$$Q = U \cdot I_p = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (2.4)$$

Реактивна потужність характеризує обмін енергією між джерелом і електричним полем, а також між магнітним полем індуктивних або ємнісних елементів у мережі. Ця потужність не виконує корисної роботи, але необхідна для забезпечення нормального функціонування багатьох електричних пристроїв.

Повна потужність S становить:

$$S = U \cdot I \quad (2.5)$$

Формули (2.3) - (2.5) справедливі для однофазного струму. Для трифазного струму активна, реактивна та повна потужність визначаються за наступними формулами:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi; Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi; S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

З цих виразів слідує, що

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (2.6)$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (2.7)$$

Формули (2.6) і (2.7) ілюструють, що не вся повна потужність, передавана мережею, використовується ефективно, а тільки її частина, пропорційна навантаженню.

Миттєва потужність у ланцюзі, що містить лише котушку індуктивності, визначається добутком миттєвих значень напруги і струму:

$$p_L = U \cdot I_L \sin 2\omega \cdot t \quad (2.8)$$

Як показано в приведених виразах і графіку на рисунку 2.2, миттєва потужність p_L у ланцюзі, що містить тільки котушку індуктивності, є змінною функцією часу, яка змінюється по синусоїдальному закону з подвійною частотою 2ω . Потужність коливається між від'ємними та додатними значеннями $\pm UI_L$, що відповідає процесу накопичення та повернення енергії в індуктивному елементі.

Середнє значення потужності (активна потужність) за період визначається як середнє значення миттєвої потужності за один повний період T . Для синусоїдальної миттєвої потужності, як показано вище:

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T p_L \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I \sin 2 \cdot \omega \cdot t \cdot dt = 0 \quad (2.9)$$

Оскільки миттєва потужність змінюється по синусоїдальному закону з подвоєною частотою і має середнє значення нуль, для чистої індуктивності середнє значення потужності за період буде рівне нулю:

Оскільки миттєва потужність P_L змінюється по синусоїдальному закону з подвоєною частотою і має середнє значення нуль, в ланцюзі, що містить тільки індуктивність, то площа позитивної півхвилі синусоїди p_L рівна площі її негативної півхвилі, це добре ілюструється на рисунку 2.2.

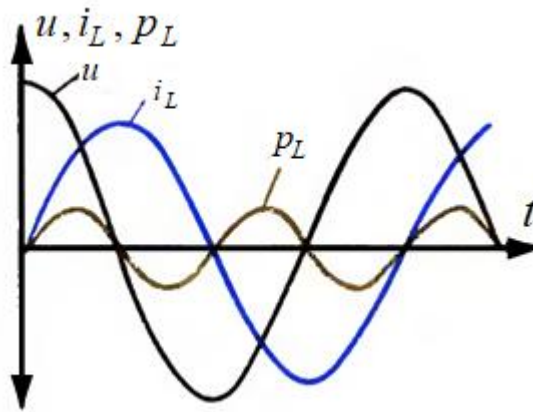


Рисунок 2.2 - Графіки напруги, струму і потужності в колі з індуктивним навантаженням

Оскільки середня потужність ланцюга з індуктивним навантаженням дорівнює нулю, це означає, що ланцюг не споживає активної потужності від генератора. Між генератором і котушкою індуктивності відбувається періодичний обмін енергією, яка не перетворюється на інші форми енергії, як механічну чи теплову. У першому позитивному напівперіоді синусоїди P_L енергія надходить від генератора в котушку індуктивності і зберігається в ній у вигляді магнітного поля. У другому (негативному) напівперіоді ця енергія повертається з котушки назад до генератора. Такий процес повторюється кожного напівперіоду струму.

Тепер розглянемо ланцюг, що складається тільки з ємності (рис.2.3а). У такому ланцюзі струм і напруга перебувають у фазовому зсуві на 90° , і вектор струму випереджає вектор напруги (рис. 2.3б). Миттєва потужність цього ланцюга змінюється відповідно до цієї фази, що також має свої особливості, схожі на ланцюг з індуктивним навантаженням, де енергія періодично обмінюється між джерелом і ємністю:

$$\begin{aligned} p_c &= u \cdot i_c = U_M \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \cdot I_{cM} \sin \omega \cdot t = \\ &= UI_c \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) - U \cdot I \cos\left(2\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) = -U \cdot I \sin 2\omega \cdot t \end{aligned} \quad (2.10)$$

Виразу (2.10) відповідають графіки i_c , u , p_c , наведені на рисунку 2.3в.

З виразу (2.8) та графіка на рисунку 2.3, в витікає, що миттєва потужність p_c , як і p_L , є знакозмінною функцією часу, яка змінюється за синусоїдальним законом з подвійною частотою. При цьому миттєва потужність в ланцюзі з ємністю негативна, по відношенню до миттєвої потужності в ланцюзі з індуктивністю, про що свідчить мінус перед правою частиною рівняння (2.8).

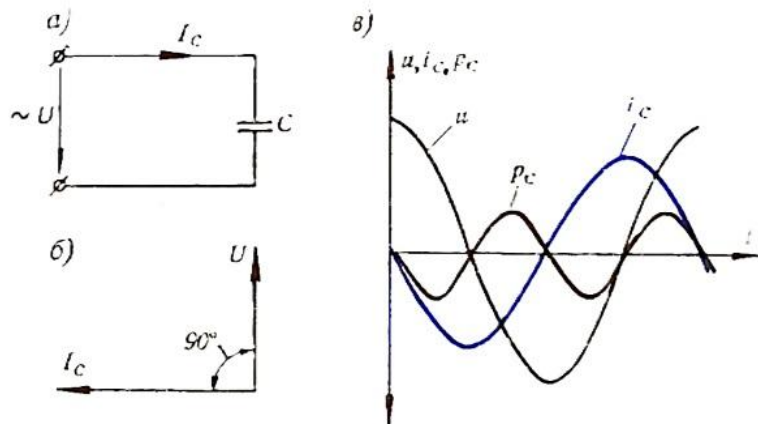


Рисунок 2.3 - Схема простого кола з ємнісним навантаженням (а), векторна діаграма струму та напруги (б) і графіки напруги, струму і потужності (в).

Середня або активна потужність в колі, що складається лише з ємності, як і в колі з індуктивністю, дорівнює нулю. Це означає, що в таких ланцюгах

не відбувається перетворення енергії в корисну роботу. Натомість, енергія лише циркулює між джерелом струму і приймачем.

Процес зниження реактивної потужності, яка постійно циркулює між джерелом струму і приймачем, називається компенсацією реактивної потужності. Це важливо, оскільки зниження рівня реактивної потужності призводить до зменшення реактивного струму в мережах і генераторах, що, в свою чергу, покращує їх ефективність.

Окрім класичних підходів до теорії потужності, в даний час широко застосовуються новітні теорії, зокрема концепція, запропонована О.А. Маєвським, щодо складових повної потужності в трипровідній системі з трифазним джерелом симетричної синусоїдальної напруги:

$$\begin{aligned}u_a &= U_m \cdot \sin \omega \cdot t, \\u_b &= U_m \cdot \sin \left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3} \right), \\u_c &= U_m \cdot \sin \left(\omega \cdot t - \frac{4\pi}{3} \right),\end{aligned}\tag{2.11}$$

$$u_a + u_b + u_c = 0,\tag{2.12}$$

де U_m - амплітуда фазної напруги;

t - час;

$$\omega = 2\pi \cdot f,\tag{2.13}$$

де ω - значення кутової координата;

f - значення частоти мережі

Навантаження в такій системі, в загальному випадку, є нелінійним і може бути розкладене на три джерела струму: основну гармоніку, вищі гармоніки та субгармоніки. Основна гармоніка струму має ту саму частоту, що і частота мережі, а також може мати асиметрію за фазою. Період, за який повторюються процеси в системі, включає ціле число періодів напруги живлячої мережі.

Активна потужність P в такій системі визначається як середнє значення миттєвої потужності за один період живлячої напруги. Вона відповідає за кількість енергії, що перетворюється в інші форми енергії (наприклад, механічну або теплову) і характеризує корисну роботу навантаження, включаючи як корисну потужність, так і втрати в установці.

Реактивна потужність Q , або потужність зрушення, виникає через зсув фази основної гармоніки струму відносно напруги мережі. Це зрушення створює реактивну складову струму, яка не бере участь у передачі активної потужності навантаженню, оскільки її середнє значення миттєвої потужності за період дорівнює нулю.

Середні значення активної P_{Σ} і реактивної Q_{Σ} потужностей у системі залишаються незмінними або змінюються з постійною швидкістю в межах періоду повторюваності, що набагато перевищує період самого струму. Оскільки напруга в мережі синусоїдальна, то середня активна і реактивна потужності визначаються тільки величинами основних гармонік струму і мають сталу величину:

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{2} U_m \sum_{a,b,c} I_{1ma,b,c} \cos \varphi_1, \quad (2.14)$$

$$Q_{\Sigma} = \frac{1}{2} U_m \sum_{a,b,c} I_{1ma,b,c} \sin \varphi_1, \quad (2.15)$$

де $I_{1ma,b,c}$ - амплітуди основних гармонік струму у фазах відповідно a, b, c ;

φ_1 - кут зсуву основної гармоніки фазного струму відповідно фазної напруги.

Оскільки нульовий провід в системі відсутній, в будь-який момент часу $i_a + i_b + i_c = 0$.

Теорія О.А. Маєвського оперує чотирма складовими повної потужності:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2 + T_{\Sigma}^2 + H_{\Sigma}^2}, \quad (2.16)$$

де S_{Σ} , P_{Σ} , Q_{Σ} , T_{Σ} , H_{Σ} - відповідно середні значення повної, активної, реактивної потужностей, та потужності спотворення і потужності несиметрії за період повторюваності для трьох фаз.

Повна потужність S , яка споживається навантаженням, завжди перевищує активну потужність із-за існування неактивних складових потужності, які, створюючи негативний ефект, приводять до збільшення втрат в живлячій мережі і в джерелі. Відомі три негативні складові повної потужності: реактивна потужність, потужність викривлення і потужність несиметрії. Сумарна повна потужність, що розраховується на основі діючих значень фазних струмів:

$$S_{\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} U_m \sqrt{\sum_{a,b,c} I_{\partial a,b,c}^2}, \quad (2.17)$$

$I_{\partial a,b,c}$ - діюча величина фазних струмів з урахуванням гармонік.

Середня активна потужність визначається відповідно (2.12) або через пряму інтеграцією миттєвої активної потужності:

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt, \quad (2.18)$$

де p - значення миттєвої активної потужності

$$p = u_a \cdot i_a + u_b \cdot i_b + u_c \cdot i_c \quad (2.19)$$

T - період повторюваності, що являє собою ціле число періодів напруги живлячої мережі T_s .

Середня реактивна потужність визначається відповідно (2.14) або шляхом інтегрування:

$$Q_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T q dt \quad (2.20)$$

де q - значення миттєвої реактивної потужності

$$q = -\frac{du_a}{dt} i_a - \frac{du_b}{dt} i_b - \frac{du_c}{dt} i_c \quad (2.21)$$

Узагальнюючи, $p \neq P_{\Sigma}$ та $q \neq Q_{\Sigma}$

Потужність несиметрії H обумовлена додатковими втратами енергії, пов'язаними з нерівномірним розподілом струму по фазах багатофазного кола. В однофазних і багатофазних симетричних перетворювачах потужність несиметрії дорівнює нулю. Потужність несиметрії, спричинена несиметрією основних гармонік живлячого струму, визначається співвідношенням:

$$H_{\Sigma} = \sqrt{S_{осн\Sigma}^2 - P_{\Sigma}^2 - Q_{\Sigma}^2} \quad (2.22)$$

де $S_{осн\Sigma}$ - значення сумарної повної потужності.

$$S_{осн\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} U_m \sqrt{\sum_{a,b,c} I_{1a,b,c}^2},$$

$I_{1a,b,c}$ - діюче значення основних гармонік фазних струмів.

Неважко переконатися, що при умові $I_{1a} = I_{1b} = I_{1c}$ потужність несиметрії дорівнює нулю.

Потужність викривлення T обумовлена вищими гармоніками струму. Пов'язане з цими гармоніками середнє значення миттєвої потужності за період також дорівнює нулю, проте гармоніки викликають додаткові втрати енергії в живлячій мережі. Потужність викривлення визначається співвідношенням:

$$T_{\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} U_m \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{ka,b,c}^2}, \quad (2.23)$$

де $I_{ka,b,c}$ - діюче значення гармоніки струму k -того порядку відповідно до частоти мережі.

Для скорочення споживання реактивної потужності в системах електропостачання використовуються різноманітні пристрої та установки. Статичні тиристорні компенсуючі пристрої надають можливість регулювати

компенсацію реактивної потужності в реальному часі, адаптуючи її до змін навантаження. Батареї статичних конденсаторів компенсують реактивну потужність в мережах, стабілізують напругу та зменшують втрати. Управляючі шунтуючі реактори використовуються для зниження реактивної потужності в умовах змінних навантажень. Комплексні конденсаторні установки поєднують кілька методів компенсації потужності для досягнення оптимальних результатів у складних системах. Синхронні конденсатори, використовуючи магнітне поле, компенсують реактивну потужність в великих енергетичних системах. Конденсаторні батареї встановлюються для компенсації реактивної потужності на рівні підстанцій або великих споживачів електроенергії.

Застосування даних установок має кілька важливих переваг. Вони дозволяють розвантажити живлячі лінії електропередачі, трансформатори та розподільчі пристрої, скорочуючи навантаження на основні елементи енергосистеми. Крім того, зменшуються витрати на оплату електроенергії завдяки оптимізації використання енергії. Використання цих установок також дозволяє знизити рівень вищих гармонік, покращуючи якість електроенергії. Вони також сприяють запобіганню мережових перешкод, зменшенню несиметрії фаз і підвищенню надійності та економічності розподільних мереж.

2.2. Дослідження процесів обміну енергії в колах з несинусоїдальним струмом і напругою.

Якість електроенергії разом із надійністю електропостачання та його економічністю є ключовими вимогами до системи виробництва, передачі та споживання електроенергії. Сучасне інтенсивне виробництво спричиняє зростання потужності нелінійних, несиметричних та різко змінних навантажень, особливо на промислових підприємствах. Паралельно збільшується використання однофазних електроприладів у побуті, що

призводить до значного зростання рівня електромагнітних перешкод у мережах.

Такі перешкоди, що відрізняються за природою, характером і інтенсивністю, негативно впливають на силові електроустановки, системи автоматики, телемеханіки, зв'язку та релейного захисту. Це часто спричиняє зниження надійності електропостачання, підвищення втрат електроенергії та погіршення якості продукції. Побутові електроприлади також дуже чутливі до погіршення якості електроенергії. Вони нерідко виходять з ладу через роботу в умовах низькоякісного електропостачання, що створює додаткові незручності для споживачів.

Несиметрія напруги є однією з ключових характеристик якості електроенергії, що впливає на економічність та надійність електропостачання. Вона оцінюється двома показниками: коефіцієнтом несиметрії напруги за зворотною послідовністю і коефіцієнтом за нульовою послідовністю.

Несиметричним режимом багатозфазної електричної системи називають стан, коли умови роботи однієї або декількох фаз відрізняються. Такий режим знижує пропускну здатність елементів мережі, викликає додатковий нагрів електричних машин, збільшує втрати активної потужності та енергії. Несиметрія струмів у системі породжує несиметрію напруги, що призводить до змін фазної і лінійної напруги. Таким чином, несиметрія напруги також погіршує показник відхилення напруги.

Існують короткочасні та тривалі несиметричні режими. Короткочасна несиметрія зазвичай виникає через аварійні ситуації, такі як короткі замикання, обриви з замиканням на землю або відключення фази при однофазному автоматичному повторному включенні. Тривала несиметрія, своєю чергою, зумовлена несиметрією елементів електропередачі або підключенням несиметричних, зокрема однофазних, навантажень.

Несиметричні навантаження, поглинаючи струми і потужність прямої послідовності, одночасно генерують струми зворотної і нульової

послідовностей. Ці струми, проходячи через елементи систем електропостачання, створюють додаткові втрати напруги відповідних послідовностей. Їх взаємодія з напругою різних послідовностей призводить до появи спотворюючих потоків потужності, які спрямовані у зворотний бік.

Основний потік потужності прямої послідовності рухається від електростанцій до споживачів, де більша його частина використовується для перетворення в інші види енергії. Проте частина цієї потужності трансформується в потужності спотворення зворотної і нульової послідовностей, що спрямовані від навантаження в електромережу. Найбільші величини цих спотворень спостерігаються поблизу несиметричного навантаження і поступово зменшуються з віддаленням від нього.

Варто зазначити, що струми нульової послідовності виникають лише в системах з глухозаземленою нейтраллю, таких як мережі високої напруги або низьковольтні розподільчі мережі.

Несиметрія напруги є ключовою характеристикою електричної енергії, оскільки впливає на роботу майже всіх типів електроприймачів. Вона проявляється у виникненні струмів і напруги не лише прямої, але й зворотної та нульової послідовностей.

Якість електроенергії залежить не тільки від її виробництва, а й від транспортування до споживачів і способу її використання електроустановками. Таким чином, причинами виникнення несиметрії напруги можуть бути як енергозабезпечуючі організації, так і споживачі з несиметричним навантаженням.

Несинусоїдальна періодична функція $f(\omega \cdot t)$ з періодом 2π може бути представлена у вигляді суми постійної складової та нескінченного ряду синусоїдальних компонентів із частотами, кратними основній. Ці компоненти називаються гармоніками. Складова, період якої дорівнює періоду вихідної функції, є основною гармонікою, тоді як компоненти з кратними частотами з другої до n -ю — вищими гармоніками.

Відповідно до теореми Фур'є, миттєве значення функції $f(\omega \cdot t)$ може бути представлене тригонометричним рядом:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{v=1}^n a_v \cdot \cos v \cdot \omega \cdot t + b_v \cdot \sin v \cdot \omega \cdot t; \quad (2.24)$$

де A_0 - величина постійної складової;

v - номер порядку гармоніки;

a, b - коефіцієнти ряду Фур'є;

n - номер останньої врахованої гармоніки.

Коефіцієнти ряду Фур'є визначаються за формулою:

$$a_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega \cdot t) \cos(v \cdot \omega \cdot t) d\omega t; \quad (2.25)$$

$$b_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega \cdot t) \sin(v \cdot \omega \cdot t) d\omega t. \quad (2.26)$$

Амплітуду n -ї гармоніки обчислюють за виразом:

$$A_v = \sqrt{a_v^2 + b_v^2}, \quad (2.27)$$

а початкову фазу n -ї гармоніки

$$\varphi_v = \arctg\left(\frac{b_v}{a_v}\right). \quad (2.28)$$

Струми вищих гармонік, проходячи через елементи електричної мережі, створюють додаткові падіння напруги на їх опорах. Це викликає накладання цих падінь на основну синусоїдальну напругу, що призводить до спотворення її форми.

Миттєва потужність в умовах несинусоїдальних струмів і напруги на інтервалі повторюваності процесів визначається як сукупність складових, зумовлених впливом основної гармоніки та вищих гармонік:

$$P(t) = U(t) \cdot I(t) = \sum_{m=0}^{m=k_i} I_m \cdot \cos(\Omega_m t + \varphi_m) \times \sum_{n=0}^{n=k_u} U_n \cdot \cos(\Omega_n t + \varphi_n), \quad (2.29)$$

де U_n , I_m - амплітудні величини гармонік напруги і струму.

Перетворивши залежності (2.6), отримуємо наступний результат:

$$\begin{aligned}
 P(t) = U(t) \cdot I(t) = & \sum_{m=m_1}^{m=k_j} I_{a_m} \cdot \cos \Omega_{m_a} t \cdot \sum_{n=n_1}^{n=k_u} U_{a_n} \times \\
 & \times \sin \Omega_{n_b} t - \sum_{m=m_1}^{m=k_j} I_{b_m} \cdot \sin \Omega_{m_b} t \cdot \sum_{n=n_1}^{n=k_u} U_{a_n} \times \\
 & \times \cos \Omega_{n_a} t - \sum_{m=m_1}^{m=k_j} I_{a_m} \cdot \cos \Omega_{m_a} t \cdot \sum_{n=n_1}^{n=k_u} U_{b_n} \times \sin \Omega_{n_b} t = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t),
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

де $P_{1,2,3,4}(t)$ - складові миттєвої потужності, отримані з окремого доданку в правій частині (2.30);

I_{a_m} , I_{b_m} , U_{a_n} , U_{b_n} - значення амплітуд ортогональних складових струму і напруги.

Операція виділення складових потужності є досить складним процесом, що пов'язано з множенням рядів гармонік і необхідністю врахування того, що кожен добуток формує дві компоненти з різними частотами.

Для ілюстрації механізму розрахунку складових потужності можна розглянути приклад із врахуванням лише кількох гармонік: першої, третьої, п'ятої та сьомої. У цьому випадку значення параметрів підготовлюються для подальшого множення, представлені у вигляді складових типу U та I, кожна з яких характеризується амплітудою та фазою відповідних гармонік.

Підготовлені до множення параметри $i_{a_1} - i_{b_7}$, $U_{a_1} - U_{b_7}$ показані, наприклад, на рисунку 2.1, що демонструє процес взаємодії між гармоніками різних частот, які формують кінцеві складові потужності системи.

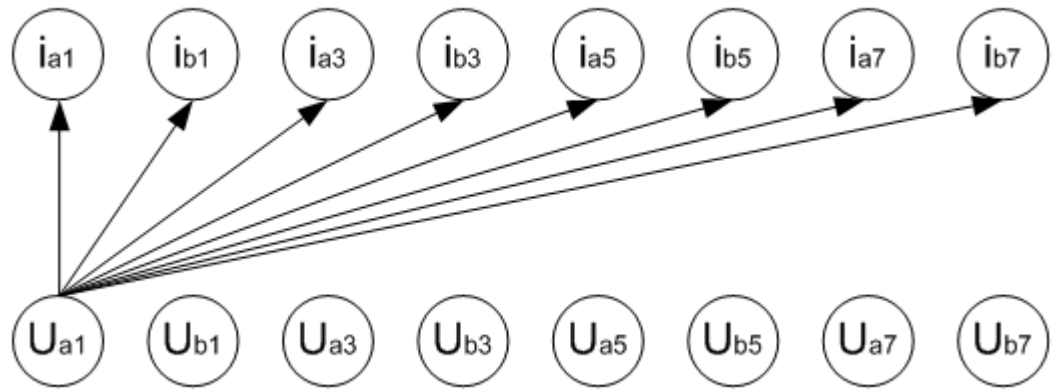


Рисунок 2.4 – Діаграма послідовності виділення складових потужності.

Як показує рисунок 2.4, для визначення повного набору складових потужності необхідно виконати множення кожної гармоніки у виразі для напруги на кожен гармоніку у виразі для струму. Це забезпечує розрахунок усіх можливих взаємодій між гармоніками.

Слід зауважити, що незалежно від специфіки фізичних процесів у системі, потужність завжди визначається як добуток двох параметрів — напруги та струму. Обидва параметри можуть бути представлені у вигляді множників, які відповідають складовим гармонікам. Завдяки цьому підхід до визначення компонент складових потужності є універсальним і не залежить від природи процесів, що відбуваються в елементі системи.

Розглянемо приклад визначення складових потужності в джерелі живлення, коли відомі значення напруги і струму. Для спрощення припустимо, що у виразах для напруги і струму представлені лише дві гармоніки:

$$I(t) = I_{a_1} \cdot \cos \Omega t + I_{b_1} \cdot \sin \Omega t + I_{a_m} \cdot \cos m\Omega t + I_{b_m} \cdot \sin m\Omega t ;$$

$$U(t) = U_{a_1} \cdot \cos \Omega t + U_{b_1} \cdot \sin \Omega t + U_{a_m} \cdot \cos m\Omega t + U_{b_m} \cdot \sin m\Omega t.$$

Миттєва потужність:

$$\begin{aligned}
 P(t) = & U_{a_1} \cdot I_{a_1} \cdot \cos^2 \Omega t + U_{a_1} \cdot I_{b_1} \cdot \cos \Omega t \cdot \sin \Omega t + \\
 & + U_{a_1} \cdot I_{a_m} \cdot \cos \Omega t \cdot \cos m\Omega t + U_{a_1} \cdot I_{b_m} \cdot \cos \Omega t \times \\
 & \times \sin m\Omega t + U_{b_1} \cdot I_{a_1} \cdot \sin \Omega t \cdot \cos \Omega t + \\
 & + U_{b_1} \cdot I_{b_1} \cdot \sin^2 \Omega t + U_{b_1} \cdot I_{b_m} \cdot \sin \Omega t \cdot \sin m\Omega t + \\
 & + U_{b_1} \cdot I_{a_m} \cdot \cos m\Omega t \cdot \sin \Omega t + U_{a_m} \cdot I_{a_1} \times \\
 & \times \cos m\Omega t \cdot \cos \Omega t + U_{a_m} \cdot I_{b_1} \cdot \cos m\Omega t \cdot \sin \Omega t + \\
 & + U_{a_m} \cdot I_{a_m} \cdot \cos^2 m\Omega t + U_{a_m} \cdot I_{b_m} \cdot \cos m\Omega t \times \\
 & \times \sin m\Omega t + U_{b_m} \cdot I_{a_1} \cdot \cos \Omega t \cdot \sin m\Omega t + U_{b_m} \cdot I_{b_1} \times \\
 & \times \sin m\Omega t \cdot \sin \Omega t + U_{b_m} \cdot I_{a_m} \cdot \sin m\Omega t \cdot \cos m\Omega t + \\
 & + U_{b_m} \cdot I_{b_m} \cdot \sin^2 m\Omega t.
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

Виконавши деякі перетворення, отримуємо:

$$\begin{aligned}
 P(t) = & U_{a_1} \cdot I_{a_1} + U_{b_1} \cdot I_{b_1} + U_{a_m} \cdot I_{a_m} + \\
 & U_{b_m} \cdot I_{b_m} + (U_{a_1} \cdot I_{a_1} - U_{b_1} \cdot I_{b_1}) \cdot \cos 2\Omega t + \\
 & (U_{a_m} \cdot I_{a_m} - U_{b_m} \cdot I_{b_m}) \cdot \cos 2m\Omega t + \\
 & + (U_{a_1} \cdot I_{b_1} + U_{b_1} \cdot I_{a_1}) \cdot \sin 2\Omega t + (U_{a_m} \cdot I_{b_m} + \\
 & + U_{b_m} \cdot I_{a_m}) \cdot \sin 2m\Omega t + (U_{a_1} \cdot I_{a_m} + U_{a_m} \cdot I_{a_1}) \times \\
 & \times \cos(m-1)\Omega t + (U_{a_1} \cdot I_{a_m} + U_{a_m} \cdot I_{a_1}) \times \\
 & \times \cos(m+1)\Omega t + (U_{b_1} \cdot I_{b_m} + U_{b_m} \cdot I_{b_1}) \times \\
 & \times \cos(m-1)\Omega t - (U_{b_1} \cdot I_{b_m} + U_{b_m} \cdot I_{b_1}) \times \\
 & \times \cos(m+1)\Omega t + (U_{a_1} \cdot I_{b_m} + U_{b_m} \cdot I_{a_1}) \times \\
 & \times \sin(m-1)\Omega t + (U_{a_1} \cdot I_{b_m} + U_{b_m} \cdot I_{a_1}) \times \\
 & \times \sin(m+1)\Omega t + (U_{b_1} \cdot I_{a_m} + U_{a_m} \cdot I_{b_1}) \times \\
 & \times \sin(m-1)\Omega t + (U_{b_1} \cdot I_{a_m} + U_{a_m} \cdot I_{b_1}) \times \\
 & \times \sin(m+1)\Omega t = P_0 + P_1 \cdot \cos 2\Omega t + \\
 & + P_m \cdot \cos 2m\Omega t + Q_1 \cdot \sin 2\Omega t + \\
 & + Q_m \cdot \sin 2m\Omega t + P_{m-1} \cdot \cos(m-1)\Omega t + \\
 & + P_{m+1} \cdot \cos(m+1)\Omega t + Q_{m-1} \cdot \sin(m-1)\Omega t + \\
 & + Q_{m+1} \cdot \sin(m+1)\Omega t.
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

З останнього виразу:

$$P_0 = P_{0_1} + P_{0_m} = U_{a_1} \cdot I_{a_1} + U_{b_1} \cdot I_{b_1} + U_{a_m} \cdot I_{a_m} + U_{b_m} \cdot I_{b_m}; \quad (2.33)$$

$$P_1 = U_{a_1} \cdot I_{a_1} - U_{b_1} \cdot I_{b_1}; \quad (2.34)$$

$$P_m = U_{a_m} \cdot I_{a_m} - U_{b_m} \cdot I_{b_m}; \quad (2.35)$$

$$Q_1 = U_{a_1} \cdot I_{b_1} + U_{b_1} \cdot I_{a_1}; \quad (2.36)$$

$$Q_m = U_{a_m} \cdot I_{b_m} + U_{b_m} \cdot I_{a_m}; \quad (2.37)$$

$$P_{m-1} = U_{a_1} \cdot I_{a_m} + U_{a_m} \cdot I_{a_1} + U_{b_1} \cdot I_{b_m} + U_{b_m} \cdot I_{b_1}; \quad (2.38)$$

$$P_{m+1} = U_{a_1} \cdot I_{a_m} + U_{a_m} \cdot I_{a_1} - U_{b_1} \cdot I_{b_m} - U_{b_m} \cdot I_{b_1}; \quad (2.39)$$

$$Q_{m-1} = U_{a_1} \cdot I_{b_m} + U_{b_m} \cdot I_{a_1}; \quad (2.40)$$

$$Q_{m+1} = U_{a_1} \cdot I_{b_m} + U_{b_m} \cdot I_{a_1}. \quad (2.41)$$

Для узагальнення висновків зазначимо, що миттєва потужність на активному опорі визначається через квадрат струму $I^2(t)$, який є інформативним сигналом. Використання цього підходу дозволяє отримати значення миттєвої потужності, які безпосередньо пов'язані з характеристиками електричного кола:

$$\begin{aligned} I^2(t) = & I_{a_1}^2 + I_{b_1}^2 + I_{a_m}^2 + I_{b_m}^2 + (I_{a_1}^2 - I_{b_1}^2) \times \\ & \times \cos 2\Omega t + (I_{a_m}^2 - I_{b_m}^2) \cdot \cos 2m\Omega t + I_{a_1} \cdot I_{b_1} \times \\ & \times \sin 2\Omega t + I_{a_m} \cdot I_{b_m} \cdot \sin 2m\Omega t + (I_{a_m} \cdot I_{a_1} + \\ & + I_{b_1} \cdot I_{b_m} \cdot \cos(m-1)\Omega t + (I_{a_m} \cdot I_{a_1} - \\ & - I_{b_1} \cdot I_{b_m} \cdot \cos(m+1)\Omega t + (I_{b_1} \cdot I_{a_m} - \\ & - I_{a_1} \cdot I_{b_m} \cdot \sin(m-1)\Omega t + (I_{b_1} \cdot I_{a_m} + \\ & + I_{a_1} \cdot I_{b_m} \cdot \sin(m+1)\Omega t. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Аналізуючи отримані результати для миттєвої потужності можна зазначити наступне:

- якщо інтегрувати $P(t)$ на обумовленому інтервалі, то всі складові, які змінюються в часі, при інтеграції дадуть нульовий результат:

$$P_i = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = P_0 = P_{0_1} + P_{0_m} \quad (2.43)$$

тобто інтеграл від миттєвої потужності дорівнює активній потужності, споживаній в нормальному режимі; частоти косинусної і синусної складових миттєвої потужності $k = m_u \pm n_i$, де m_u і n_i - порядок гармонійних складових напруги і струму (в даному випадку частоти складових дорівнюють 0; 2; $m \pm 1$);

- при визначенні складових миттєвої потужності необхідно враховувати як синусну складову (реактивну потужність), так і косинусну - знакозмінну складову миттєвої потужності одночастотних компонент напруги і струму;

- миттєві значення різночастотних компонентів напруги і струму утворюють косинусні і синусні складові миттєвої потужності, частоти яких рівні сумі і різниці частот компонентів;

- визначення діючого значення потужності на інтервалі повторюваності процесів дозволяє отримати результат, що включає всі складові миттєвої потужності (2.10), - (2.18);

- синусні і косинусні складові миттєвої потужності в результаті частотних перетворень формуються з двох елементарних компонент: перша - результат добутку одночастотних складових напруги і струму $k = 2m$ (при $m = m_u = m_i$); друга - результат твору різночастотних складових напруги і струму (при цьому).

Основна особливість частотного перетворення потужності полягає в тому, що потужність спотворення, як окрема величина, зникає в результаті перетворень. Вона трансформується в синусні та косинусні складові миттєвої потужності, кожна з яких відповідає певним частотам.

2.3. Математичне відображення енергетичних процесів в колах з напівпровідниковими пристроями.

Напівпровідникові перетворювачі використовуються в промисловості, зокрема в чорній і кольоровій металургії, а також у хімічній галузі. Серед споживачів постійного струму на підприємствах можна назвати регульовані електроприводи, електролізні установки, гальванічні ванни, електрифіковані залізничні системи, магнітні сепаратори та інші технологічні установки.

На промислових підприємствах найпоширенішими є трифазні мостові схеми. Вони часто є основою для побудови більш складних багатомостових перетворювачів. У мостовому перетворювачі, коли первинна обмотка трансформатора з'єднана за схемою «зірка», форма кривої струму мережі залежить від кута управління α , який задається імпульсно-фазовою системою управління, а також від кута комутації γ .

Порядок гармонік струмів мережі визначається виразом:

$$\nu = k \cdot p \pm 1 \quad (2.44)$$

де p - кількість фаз перетворювача;

$k = 1, 2, 3, \dots, n$ - номер гармонік

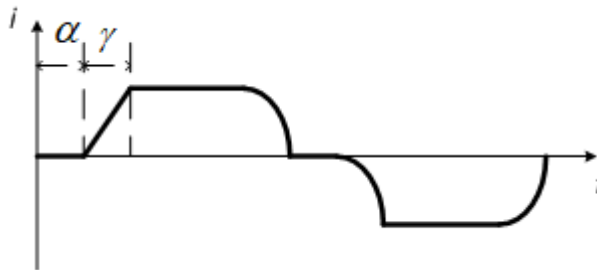


Рисунок 2.5 – Графік кривої струму

Для мостового перетворювача, в якого $p = 6$,

$$\nu = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, \dots$$

Амплітуда n-ї гармоніки представляється виразом:

$$I_{um} = \sqrt{I_{ua}^2 + I_{up}^2} \quad (2.45)$$

де

$$I_{\alpha} = \frac{2\sqrt{3}E_m}{\nu \cdot \pi X_K} \sin \frac{\nu\pi}{3} \times$$
$$\times \left\{ \frac{1}{\nu+1} \sin \left[(\nu+1) \frac{\gamma}{2} \right] \sin [(\nu+1)\psi] - \frac{1}{\nu-1} \sin \left[(\nu-1) \frac{\gamma}{2} \right] \sin [(\nu-1)\psi] \right\} \quad (2.46)$$

$$I_{\psi} = \frac{2\sqrt{3}E_m}{\nu \cdot \pi X_K} \sin \frac{\nu\pi}{3} \times$$
$$\times \left\{ -\frac{1}{\nu+1} \sin \left[(\nu+1) \frac{\gamma}{2} \right] \cos [(\nu+1)\psi] + \frac{1}{\nu-1} \sin \left[(\nu-1) \frac{\gamma}{2} \right] \cos [(\nu-1)\psi] \right\} \quad (2.47)$$

де E_m - амплітуда ЕРС живлячої енергетичної системи;

$\psi = \alpha + \gamma/2$ - кут зсуву по фазі поміж кривими ЕРС 1-ої гармоніки струму мережі.

В практичних розрахунках ψ зручно знаходити за виразом:

$$\psi = \arccos \frac{U_d}{U_{d0}}; \quad (2.48)$$

де U_d и U_{d0} - середні величини випрямленої напруги перетворювача відповідно режимів навантаження і холостого ходу.

Амплітудні спектри струмів перетворювачів можуть містити як основні (канонічні) гармоніки ($n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$), так і додаткові (анормальні) гармоніки ($n = 2, 3, 4, 6, 8, \dots$). Основною причиною появи таких додаткових гармонік є асиметрія управлінських імпульсів, яка є властивою для всіх систем управління. Як правило, амплітуди анормальних гармонік менші порівняно з канонічними.

На основі трифазної мостової схеми реалізуються різні типи перетворювачів, що застосовуються в електроприводах, зокрема:

- тиристорний електропривод на основі вентильного двигуна;
- асинхронний вентильний каскад;

- вентильний електропривод з компенсацією;
- електропривод на базі асинхронного двигуна з частотним регулюванням обертів.

Нелінійність вольт-амперної характеристики дуги викликає генерацію струмів вищих гармонік в дугових печах. Форма струмових кривих печей сильно залежить від режиму горіння дуги в різні етапи плавки. На початковій стадії розплавлення струм коливається між значеннями, які відповідають режимам холостого ходу і короткого замикання, що призводить до значних відхилень від синусоїдальної форми кривої. Коли з'являється рідкий метал, плавка продовжується в режимі короткої дуги, і коливання струму зменшуються. Форма струмової кривої покращується і наближається до синусоїдальної.

У порівнянні з вентильними перетворювачами тієї ж потужності рівень гармонік, які генеруються дуговими печами, є в 3-4 рази меншим. Для практичного використання важливо знати рівень гармонік під час періоду розплавлення металу.

Струми гармонік для практичних розрахунків рекомендують приймати:

$$I_v = \frac{I_{n,T}}{\sqrt{2}}; \quad (2.49)$$

де $I_{n,T}$ - номінальне значення струму пічного трансформатора.

Рівень гармонік струму, що генеруються електродуговими печами, включає як канонічні (5, 7, 11, 13 гармоніки), так і неканонічні (2, 3, 4, 6 гармоніки). Основні причини появи аномальних гармонік полягають у постійних змінах умов горіння дуги печі, а також в неповному вирівнюванні опорів в короткозамкнутій мережі. Внаслідок цього еквівалентне діюче значення струмів вищих гармонік за рахунок аномальних гармонік зростає в 1,8–2 рази, хоча їх значення залишається відносно невеликим, і не перевищує 10% від струму першої гармоніки.

У струмах дугових електропечей також присутні аномальні гармоніки. Дугові вакуумні печі отримують живлення від вентильних перетворювачів,

які працюють за 6-фазною схемою з використанням зрівняльного реактора. Крива струму в таких системах схожа на криву мостових перетворювачів, однак рівень аномальних гармонік тут значно вищий ($I_2 \approx 8\%$, $I_3 \approx 6\%$).

Що стосується однофазних електрошлакових печей, то їх можна вважати практично лінійними навантаженнями, оскільки переплавка електроду відбувається за рахунок нагріву злитка в шарі розплавленого електропровідного шлаку.

Руднотермічні печі функціонують із шунтованою дугою, завдяки чому нелінійність дуги практично не проявляється. Це призводить до того, що вміст вищих гармонік в струмі таких печей є незначним. Рівні 2, 3 і 5 гармонік струму не перевищують 1–1,5%, а інших гармонік виявляється набагато менше.

Для зварювальних установок часто використовуються напівпровідникові випрямлячі як джерела живлення. Струми вищих гармонік, що генеруються такими зварювальними випрямлячами, варіюються залежно від режиму роботи зварювальних установок.

Установки контактного електрозварювання підключаються до мережі за допомогою тиристорних ключів. Для плавного регулювання зварювального струму вентильні пристрої забезпечуються системами фазового регулювання. Використання фазового регулювання призводить до спотворення форми струму, що споживається зварювальними машинами. При розкладі струму основними гармоніками є 1, 3 і 5. Окрім непарних гармонік, присутні також парні гармоніки. Їх поява пояснюється розкидом кутів регулювання вентилів. Однак вплив парних гармонік на несинусоїдальність струмів зварювальних машин є незначним.

В установках дугового чи контактного електрозварювання струми гармонік визначаються для одиничної установки:

$$I_v = S_{ном.Т} \cdot K_3 \cdot \sqrt{TB} / (v^2 \cdot U_H) \quad (2.50)$$

де $S_{ном.Т}$ - потужність трансформатора;

K_z – коефіцієнт завантаження трансформатора;

TB – період ввімкнення.

Вищі гармоніки в системах електропостачання підприємств є небажаними через кілька важливих причин. По-перше, вони викликають додаткові втрати в електричних машинах, трансформаторах і мережах, що може призводити до зниження ефективності системи електропостачання. По-друге, гармоніки ускладнюють компенсацію реактивної потужності за допомогою батарей конденсаторів, оскільки вони створюють додаткові навантаження на компенсуючі пристрої. По-третє, вони можуть сприяти погіршенню якості ізоляції електричних машин і апаратів, що скорочує їхній термін служби. Крім того, гармоніки можуть впливати на роботу пристроїв автоматики, телемеханіки та зв'язку, призводячи до збоїв або неефективної роботи.

Особливо важливою проблемою є вплив вищих гармонік на роботу асинхронних двигунів. У разі подачі несинусоїдальної напруги коефіцієнт потужності асинхронного двигуна значно знижується, а обертаючий момент на валу також зменшується, що може впливати на його продуктивність і стабільність роботи.

Що стосується додаткових втрат активної потужності в обмотках асинхронного двигуна, то вони обумовлені проходженням струмів вищих гармонік. Ці втрати можна визначити за допомогою відповідної формули, що враховує вплив гармонік на споживану потужність в обмотках двигуна:

$$\Delta P_{\text{н.с.м}} = 3 \sum_{v=3}^n I_v^2 (R_{1,v} + R_{2,v}'); \quad (2.51)$$

де $R_{1,v}, R_{2,v}'$ - активний опір статора та приведений активний опір ротора на частоті n -ї гармоніки.

Додаткові втрати активної потужності в трансформаторах, кабельних і повітряних лініях та реакторах визначаються за формулою:

$$\Delta P_{н.с.} = 3 \sum_{v=3}^n I_v^2 \cdot R_v \quad (2.52)$$

Найбільш значний вплив вищих гармонік виявляється на роботу батарей конденсаторів. Конденсатори, працюючи в умовах несинусоїдальної напруги, часто зазнають перевантажень струмами вищих гармонік. Внаслідок цього вони можуть швидко виходити з ладу, що проявляється у вигляді сплечень або навіть вибухів. Основною причиною руйнування конденсаторів є те, що струми вищих гармонік створюють додаткові навантаження на елементи конденсаторів, що може призвести до їх перегріву та механічних пошкоджень.

Особливо небезпечним є виникнення резонансного режиму в мережі на частоті однієї з гармонік. У цьому випадку амплітуда струмів вищих гармонік може значно зрости, що в свою чергу підвищує навантаження на конденсатори і прискорює їх руйнацію.

Додаткові втрати активної потужності в конденсаторах:

а) додаткові втрати активної потужності в діелектричних елементах силового конденсатора:

$$\Delta P_{н.с.д.к.} = 2\pi \cdot f \cdot C_{ном} \cdot U_v^2 \cdot \operatorname{tg} \delta_v; \quad (2.53)$$

б) додаткові втрати активної потужності внаслідок зовнішніх гармонік в ізоляції корпусу силових конденсаторів:

$$\Delta P_{н.с.и.к.} = 2\pi \cdot f \cdot C_{ном} \cdot U_v^2 \cdot \operatorname{tg} \delta_v \sum_{v=1}^n \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 v; \quad (2.54)$$

в) додаткові втрати активної потужності внаслідок зовнішніх гармонік в пластинах конденсаторів:

$$\Delta P_{н.с.п.к.} = I_v^2 \cdot R_{\varepsilon, v} = (2\pi \cdot f \cdot C_{ном} \cdot U_{ном})^2 \cdot R_{\varepsilon} \cdot K_{n, l, v} \left(\frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 v. \quad (2.55)$$

де $K_{n,l,v}$ - коефіцієнт, що враховує вплив поверхневого ефекту на ділянці.

R_e - величина опору e -тої ділянки.

Вищі гармоніки в системах електропостачання підприємств є небажаним явищем по ряду негативних наслідків. Вони спричиняють додаткові втрати в електричних машинах, трансформаторах і мережах, ускладнюють компенсацію реактивної потужності через батареї конденсаторів, зменшують термін служби ізоляції електричних машин та апаратів, а також погіршують роботу пристроїв автоматизації.

Особливо це впливає на асинхронні двигуни, де в умовах несинусоїдальної напруги значно понижується коефіцієнт потужності і обертаючий момент на валу. Викривлення форми кривої напруги також негативно позначається на виникненні і протіканні іонізаційних процесів в ізоляції електричних машин і трансформаторів.

При наявності газових включень в ізоляції виникає іонізація, в результаті чого утворюються об'ємні заряди, які потім нейтралізуються. Цей процес супроводжується розсіюванням енергії, що призводить до електричної, механічної та хімічної дії на навколишній діелектрик. Внаслідок цього розвиваються місцеві дефекти в ізоляції, що погіршує її електричну міцність, збільшує діелектричні втрати і скорочує термін служби обладнання.

Вищі гармоніки мають найбільший вплив на роботу батарей конденсаторів. Коли конденсатори працюють на несинусоїдальній напрузі, вони можуть швидко виходити в аварійний режим через спучення або навіть вибухи. Це відбувається через перевантаження струмами вищих гармонік, які зазвичай виникають при резонансному режимі в мережі на частоті однієї з гармонік. Резонансний ефект посилює вплив цих гармонік, що призводить до перегріву і руйнування конденсаторів.

Згідно із законом електромагнітних сил, на провідник із струмом, розташований у магнітному полі, діє електромагнітна сила F_{np} . Її напрямок визначається за допомогою правила лівої руки. Електромагнітні сили, що впливають на провідники обмотки ротора, створюють електромагнітний момент, який обертає ротор у тому ж напрямку, що й магнітний потік. У результаті ротор починає обертатися в бік руху магнітного потоку, досягаючи швидкості, яка трохи менша за швидкість обертання поля $n_2 < n_1$. Звідси походить назва "асинхронний двигун", оскільки його обертання не є синхронним із магнітним полем.

Для досягнення високого коефіцієнта корисної дії частота обертання ротора в номінальних умовах відрізняється від частоти магнітного поля лише незначно, у сторону зменшення. Це відхилення визначається показником ковзання S :

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (3.1)$$

Ковзання являється безрозмірною величиною, вона дорівнює швидкості обертання магнітного потоку ротора n_1 . Номінальне ковзання дорівнює $S_H = 0,02 \div 0,08$. Причому для АД значної потужності – 0,02, а для невеликої – 0,08.

Індукована електрорушійною силою частота в обмотці ротора дорівнює:

$$f_{2S} = f_1 \cdot S, \quad (3.2)$$

де f_1 - частота мережі живлення.

$$S = (n_1 - n_2) / n_1 = 1, \quad f_{2S} = f_1$$

При умові $n_2 = n_1$, то $S = 0$ $f_{2S} = 0$.

Індуктовану ЕРС в обмотці обертаючого ротора можна записати:

$$E_{2S} = 4,44 W_{\phi} \cdot \Phi_m \cdot K_{\phi 2} \cdot f_{2S} = 4,44 W_{\phi} \cdot \Phi_m \cdot K_{\phi 2} \cdot f_1 \cdot S = E_2 \cdot S, \quad (3.3)$$

де ЕРС нерухомого ротора:

$$E_2 = 4,44 W_\phi \cdot \Phi_m \cdot K_{o\phi 2} \cdot f_1 \quad (3.4)$$

Фаза обмотки ротора характеризується активним опором, який, якщо ігнорувати поверхневий ефект (витіснення струму до поверхні провідника), залишається незмінним. Цей опір не залежить від того, чи ротор перебуває у стані обертання, чи залишається нерухомим, тобто не залежить від частоти роторної ЕРС. Таким чином, величина опору залишається постійною, отже $r_2 = const$.

Індуктивний опір розсіювання фази обертаючого ротора:

$$X_{p2s} = \omega_{2s} \cdot L_{p2} = 2\pi \cdot f_{2s} \cdot L_{p2} = 2\pi \cdot f_1 \cdot S \cdot L_{p2} = X_{p2} \cdot S, \quad (3.5)$$

де X_{p2} - індуктивний опір розсіювання фази для нерухомого ротора.

В такому випадку роторний струм фази обертаючого ротора за законом Ома:

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{r_2 + jX_{p2s}} = \frac{E_2 \cdot S}{r_2 + jX_{p2} \cdot S} = \frac{E_2}{\frac{r_2}{S} + jX_{p2}}. \quad (3.6)$$

Отже, асинхронний двигун (АД) з обертовим ротором можна розглядати шляхом заміни роторної обмотки (вторинної) на еквівалентну, приведену до первинної обмотки. Параметри, приведені до первинної сторони, позначаються штрихами. При цьому струм фази приведенного ротора еквівалентний фазному струму ротора для моделі нерухомого асинхронного двигуна:

$$I'_{2s} = \frac{E'_2}{\frac{r'_2}{S} + jX'_{p2}}. \quad (3.7)$$

Коефіцієнт приведення по ефективній кількості витків називають коефіцієнтом приведення ЕРС K_E :

$$K_E = \frac{W_1 \cdot K_{\phi 1}}{W_2 \cdot K_{\phi 2}}. \quad (3.8)$$

Повна роторна мрс при приведенні залишається постійною:

$$m_2 \cdot W_2 \cdot K_{\phi 2} \cdot I_2 = m'_2 \cdot W'_2 \cdot K'_{\phi 2} \cdot I'_2. \quad (3.9)$$

Якщо ротор є короткозамкнутим, то $m_2 = z_2$, де z_2 - кількість пазів ротора.

Кількість витків фази короткозамкнутого ротора приймають як половину витка і $K_{\phi 2} = K_{\phi 2}$, при тому, що скіс пазів виконаний на роторі.

Відмітимо, що приведені параметри роторної обмотки дорівнюють параметрам обмотки статора, тобто

$$m_2 \cdot W_2 \cdot K_{\phi 2} \cdot I_2 = m_1 \cdot W_1 \cdot K_{\phi 1} \cdot I'_2, \quad (3.10)$$

звідки слідує, що

$$I'_2 = \frac{I_2}{\frac{m_1 \cdot W_1 \cdot K_{\phi 1}}{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{\phi 2}}} = \frac{I_2}{K_I}, \quad K_I = \frac{m_1 \cdot W_1 \cdot K_{\phi 1}}{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{\phi 2}}, \quad (3.11)$$

де K_I - коефіцієнт приведення струму.

Запишемо рівняння ЕРС фази роторної обмотки в приведених параметрах:

$$-E'_2 = -E'_1 = -I'_2 \cdot \frac{r'_2}{S} - I'_2 \cdot jX'_{p2}, \quad (3.12)$$

де $K_I \cdot K_E = K_Z$ - коефіцієнт приведення опору та $r'_2 = K_Z \cdot r_2$ $X'_{p2} = K_Z \cdot X_{p2}$

Для фазної обмотки статора рівняння равенства напруги матиме вид:

$$U_1 = -E_1 + I_1 \cdot r_1 + I_1 \cdot jX_{p1}, \quad (3.13)$$

де U_1 - фазна напруга обмотки статора; E_1 - протиЕРС; r_1 - величина активного опору, а X_{p1} - індуктивний опір розсіяння фазної обмотки статора.

У програмному середовищі Matlab/Simulink за допомогою бібліотеки SimPowerSystem створено модель ідеальної системи електропостачання зі споживачем, роль якого виконує асинхронний двигун. У моделі реалізовано вимірювання активної та реактивної потужностей, струмів і напруг у кожній фазі, а також струму в обмотці статора та швидкості обертання ротора двигуна.

Для дослідження взято асинхронний двигун з такими характеристиками: потужність 215 НР (160 кВт), номінальна напруга 400 В і швидкість обертання 1500 об/хв. Модель системи електропостачання з підключеним до неї двигуном зображена на рисунку 3.2.

На основі моделі проведено аналіз режимів роботи двигуна. Побудовано графіки, які відображають зміну швидкості обертання ротора в часі, час розгону двигуна до номінальної швидкості, струм у статорній обмотці в різних режимах роботи, а також рівні споживання активної та реактивної потужностей. Це дало змогу оцінити характеристики двигуна та ефективність його роботи в системі.

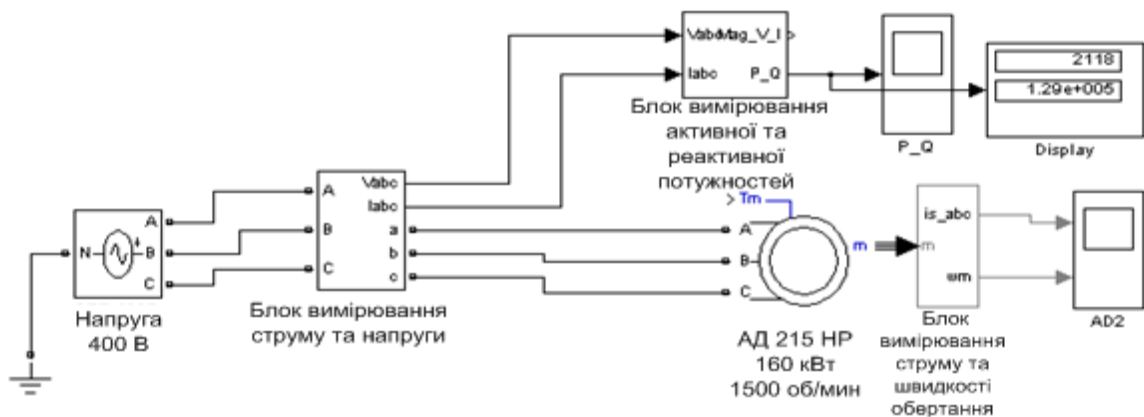


Рисунок 3.2 - Модель ідеальної системи електропостачання з АД в якості навантаження

Рисунок 3.3 демонструє графік запуску АД зі швидкістю обертання $\omega, \text{с}^{-1}$ і струмом $I_{ABC}, \text{А}$ в обмотці статора.

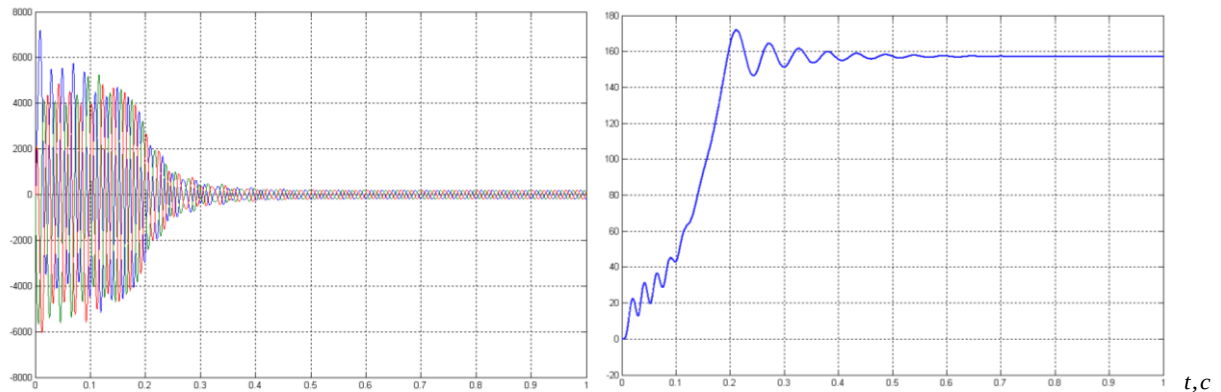


Рисунок 3.3 - Швидкість обертання АД та струм в обмотці статора

На рисунку 3.4 зображено графік, який демонструє споживання активної та реактивної потужностей асинхронним двигуном під час пуску та роботи в режимі холостого ходу. Графік відображає динаміку змін потужностей у часі: на етапі пуску видно різке збільшення споживання як активної, так і реактивної потужностей, а після досягнення режиму холостого ходу потужності стабілізуються на певному рівні. Це дозволяє проаналізувати перехідні процеси в роботі двигуна та його енергоспоживання в різних режимах.

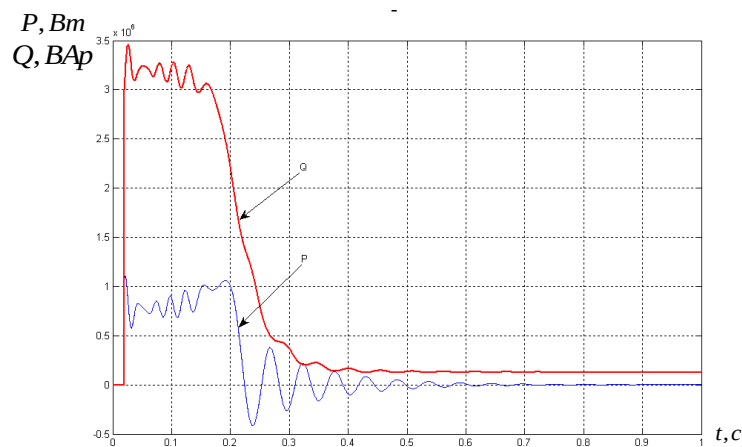


Рисунок 3.4 - Активна і реактивна потужності споживання АД

Асинхронний двигун з номінальною потужністю 160 кВт і швидкістю обертання ротора 1480 об/хв у режимі холостого ходу споживає активну

потужність 2,1 кВт та реактивну потужність 129 кВАр. Через значне споживання реактивної потужності виникає необхідність оптимізації режимів роботи двигуна для підвищення коефіцієнта потужності та наближення його до одиниці. Це досягається шляхом врахування споживання реактивної потужності, а також шляхом впровадження методів компенсації, таких як використання конденсаторних батарей або регулювання робочих режимів двигуна.

3.2. Моделювання роботи системи компенсації.

Рівень напруги в електричній системі є індикатором балансу реактивної потужності. Якщо система відчуває дефіцит реактивної потужності, напруга у споживачів знижується нижче номінального рівня. У разі надлишку реактивної потужності напруга перевищує номінальне значення.

Конденсаторні установки з плавним регулюванням потужності є більш економічно вигідними порівняно з установками із постійною потужністю. Використання останніх за умов зниження навантаження на підприємствах призводить до зайвих електричних втрат. Крім того, залишення таких конденсаторів у роботі в нічний час, наприклад, на підприємствах із двозмінним графіком роботи, сприяє підвищенню напруги в мережі. Це може скоротити термін експлуатації як самих конденсаторів, так і іншого обладнання.

Застосування сучасних методів регулювання ємності конденсаторних установок дозволяє досягти кращих результатів. Основною перевагою нових пристроїв є здатність плавно регулювати ємність компенсаційного конденсатора за допомогою керованих силових ключів. На відміну від традиційних систем із стрибкоподібним регулюванням ємності, такі пристрої усувають явища перекомпенсації або недокомпенсації реактивної потужності. Завдяки цьому забезпечується стабільна робота живильної мережі без зайвих втрат і перевантажень.

У програмному середовищі Matlab/Simulink змодельовано однофазну систему електропостачання із системою компенсації реактивної потужності, що представлена на рисунку 3.5. В цій моделі є генератор змінної напруги 220 В, який забезпечує електричну енергію для системи, а також споживач електричної енергії, який споживає активну та реактивну потужність від генератора. До складу системи входить конденсаторна батарея C1, що використовується для компенсації реактивної потужності, та індуктивність L1, що створює індуктивний компонент ланцюга для компенсації реактивної потужності. Для вимірювання значень напруги в системі використовується датчик напруги, а для вимірювання струму в колі застосовуються датчики струму. Комутатор конденсаторної батареї управляє підключенням і відключенням батареї для корекції реактивної потужності.

Модель включає блок розрахунку діючого значення струму, який обчислює середнє значення струму в системі, та блок розрахунку значення 1-ї гармоніки струму і кута зсуву струму від напруги по 1-й гармоніці для аналізу спотворень струму та визначення фазового зсуву. Крім того, передбачений блок контролю споживання активної і реактивної потужності, що дозволяє моніторити та контролювати споживану активну та реактивну потужність у системі.

Ця модель дозволяє проводити дослідження ефективності компенсації реактивної потужності та її вплив на енергоспоживання, а також забезпечує контроль за параметрами електричної системи в реальному часі.

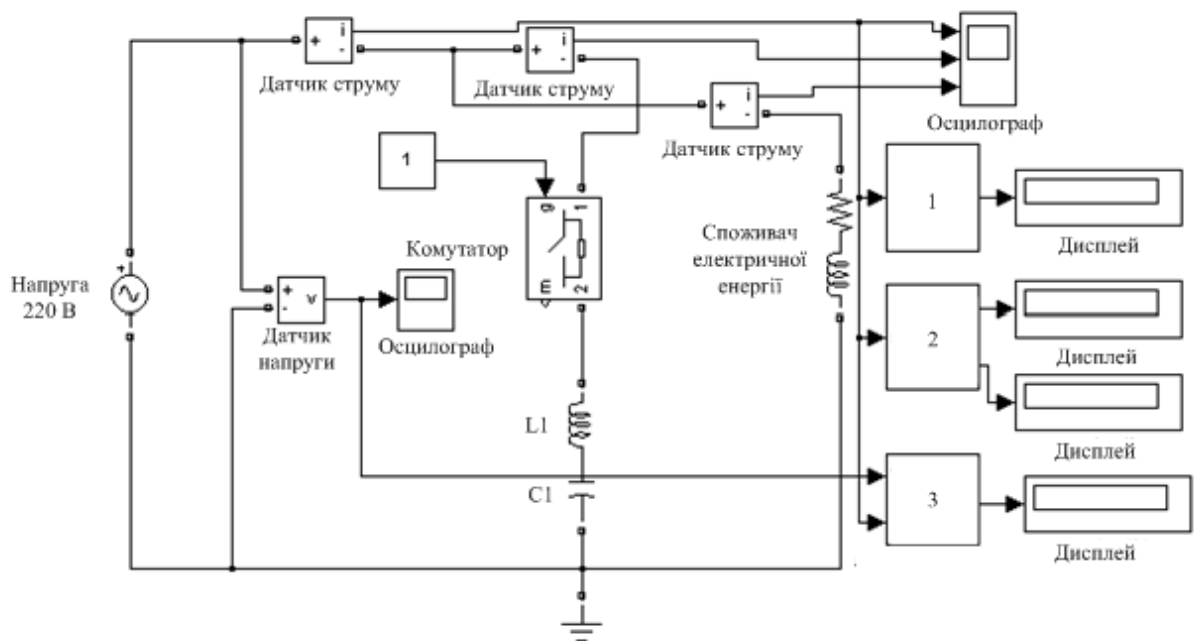


Рисунок 3.5 - Модель однофазної системи електропостачання з конденсаторною батареєю

Для аналізу споживання активної та реактивної потужностей асинхронний двигун представлено в якості споживача в спрощеній схемі заміщення: активний опір $R=1.41\Omega$ та індуктивний опір – $L=0.0058Гн$. В результаті моделювання за відсутності конденсаторної батареї споживач електричної енергії споживає активну потужність $P=12.7кВт$, реактивної потужність $Q=16.5кВАр$. Розрахуємо величину ємності конденсаторної батареї для однофазної системи електропостачання за формулою (3.1). Реактивна потужність однофазного конденсатора дорівнює:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_K \cdot U^2 \cdot 10^{-3} = \omega \cdot C_K \cdot U^2 \cdot 10^{-3} \text{ кВАр},$$

де C_K - ємність однофазного конденсатора, мкФ;

U - лінійна напруга зажимів конденсатора кВ;

ω - величина кутової частоти, c^{-1} .

Тобто:

$$C_K = \frac{Q}{\omega \cdot U^2 \cdot 10^{-3}};$$

$$C_K = 1084 \mu\text{кФ}$$

Таким чином для компенсації реактивної потужності потрібно встановити конденсаторну батарею ємністю $C_K = 1084 \mu\text{кФ}$. При підключенні ємності для згладжування імпульсів струму встановлюємо індуктивність $L = 0.00001 \text{ Гн}$.

На рисунку 3.6 зображено графіки мережевих напруги та струму без компенсації та з компенсацією.

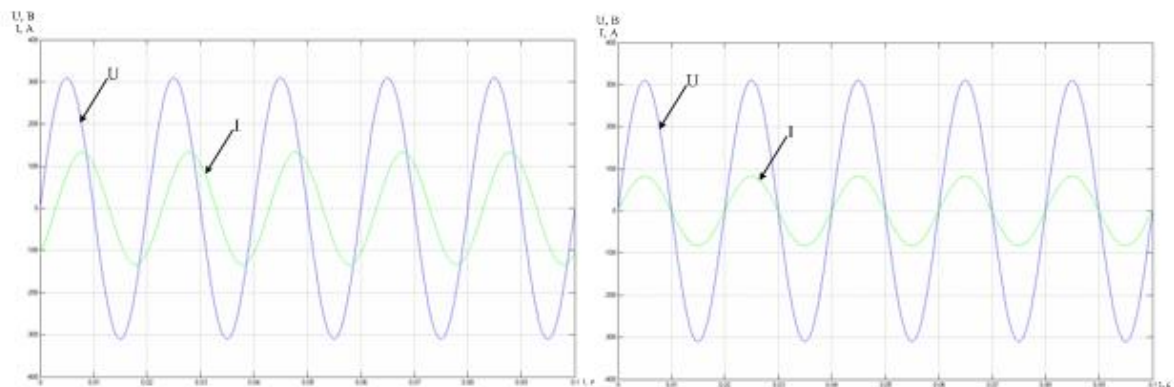


Рисунок 3.6 - Графіки мережевих напруги та струму.

Візуально можна спостерігати, що конденсаторна батарея компенсує реактивну потужність, оскільки вона зменшує вплив індуктивного навантаження на мережу, що призводить до поліпшення фазового співвідношення між струмом і напругою. Для того щоб переконатися в тому, що компенсація реактивної потужності дійсно відбувається в мережі, необхідно визначити кут відставання струму від напруги. Це можна зробити, використовуючи блок для розрахунку кута відставання струму від напруги по 1-й гармоніці. До компенсації кут відставання по першій гармоніці складав $\varphi_1 = -52.1^\circ$, після компенсації $\varphi_1 = 0.17^\circ$.

При компенсації реактивної потужності необхідно також враховувати характер змін навантаження підприємства. Якщо навантаження підприємства піддається значним коливанням споживаної як активної, так і реактивної потужності, то окрім компенсуючих пристроїв потрібно встановити систему для регулювання значення ємності конденсаторних батарей. Це дозволить ефективно підтримувати стабільність в мережі, адаптуючи компенсацію до змін у навантаженні.

На основі проведеного аналізу сучасних систем та вибору структури транзисторного перетворювача, була розроблена модель системи управління в програмному середовищі Matlab/Simulink/SimPowerSystem, яка представлена на рисунку 3.7. У цій моделі система управління включає кілька ключових елементів: генератор управляючих сигналів, який дозволяє змінювати параметри сигналу, такі як частота, кут управляючого сигналу та величина скважності. Частота визначає швидкість роботи системи, кут управляючого сигналу регулює фазовий зсув між сигналами, а величина скважності впливає на тривалість включення та вимикання сигналів. Всі ці параметри дозволяють точно налаштувати енергоспоживання в системі.

До складу системи також входить управляючий транзистор, який здійснює перемикання сигналів та контролює потужність, що передається через систему. Крім того, в моделі використовуються чотири діоди, що формують випрямлений струм, стабілізуючи потужність, яка надходить до компенсуючих пристроїв.

Таким чином, ця система управління дозволяє динамічно регулювати величину ємності конденсаторних батарей і забезпечувати стабільність електричної мережі, що є важливим фактором при значних коливаннях споживання потужності на підприємстві.

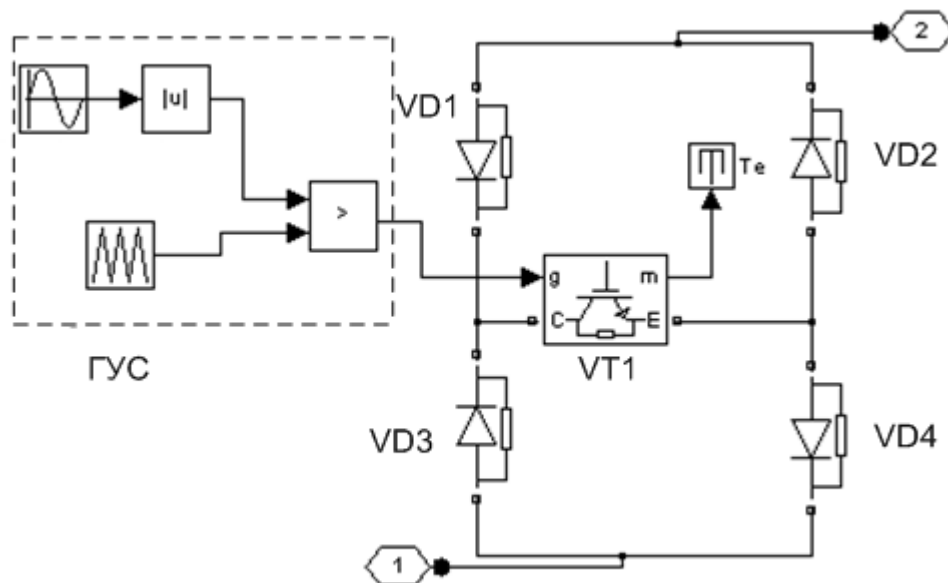


Рисунок 3.7 - Модель системи управління компенсатора.

Режими управління компенсатора дійсно залежать від частоти модуляції та величини скважності управляючих сигналів. Частота модуляції визначає швидкість перемикання транзисторів, що дозволяє точно регулювати потужність, яку постачає конденсаторна батарея для компенсації реактивної потужності. Чим вища частота модуляції, тим швидше відбувається корекція, але також виникають втрати на високих частотах.

Для моделювання трьох систем компенсації з різними значеннями індуктивності, в кожній з яких величини індуктивності позначено як $L_1 = 0.001 \Gamma_H$, $L_2 = 0.0001 \Gamma_H$, $L_3 = 0.00001 \Gamma_H$ ми можемо використовувати програмне середовище Matlab/Simulink (Рис.3.8)

При зміні частоти модуляції на інтервалі від $f = 500 \dots 5000 \Gamma_{\text{ц}}$, та величини скважності $m = 0.2 \dots 0.8$ моделювання передбачає контроль наступних параметрів:

- діючу величину струму в мережі I_{RMS}^M та в пристрої управління I_{RMS}^n ,
- величину струму першої гармоніки в мережі I_1^M та в пристрої управління I_1^n ,

– кут зсуву струму відносно напруги по першій гармоніці φ_1^M в мережі і в пристрої управління φ_1^n .

По умові моделювання, споживач має величину діючого струму - $I_{RMS}^c = 94,6A$, величину струму першої гармоніки - $I_1^c = 133,8A$ та величину кута зсуву напруги відносно струму по першій гармоніці - $\varphi_1^c = -52,5^\circ$.

По умовам моделювання в системі електропостачання діюча величина струму має знаходитись в межах від 90-100 А, а величина зсуву струму відносно напруги наближатися до нуля.

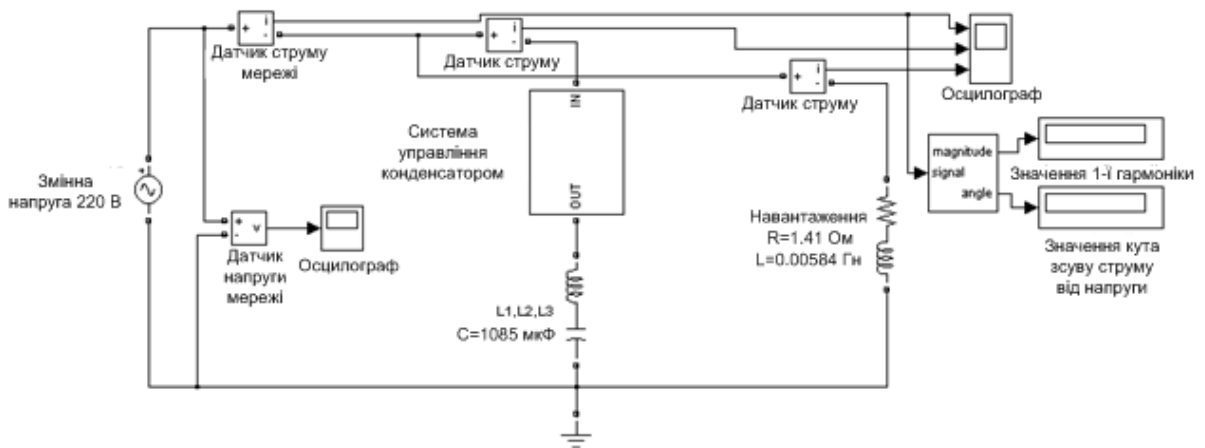


Рисунок 3.8 - Модель управляючої системи компенсації

Маючи зазначені діапазони в ході експерименту відповідно до величини індуктивності $L_1 = 0.001Гн$, зміни частоти модуляції та величини сквапності, будуємо графіки в тримірному просторі (рисунки 3.9 – 3.10), де величина x - дорівнює частоті модуляції f , величина y - дорівнює величині сквапності m та z - значенням діючого значення струму - I_{RMS}^M , величині струму по першій гармоніці - I_1^M та куту зсуву напруги відносно струму по першій гармоніці φ_1^M . Для області величин сквапності $m=0.6-0.8$ та області частот $f=500-1000Гц$ в результаті експерименту отримали величини, що дорівнюють $I_{RMS} = 0$, $I_1 = 0$ та $\varphi_1 = 0$, тому величину площі, яка знаходиться в цьому діапазоні приймаємо некоректною.

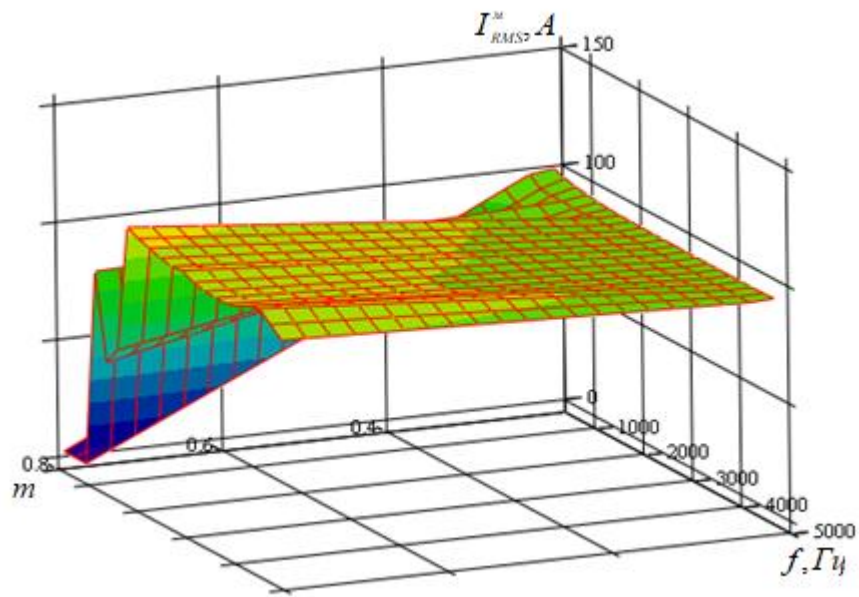


Рисунок 3.9 - Діючі значення струмів I_{RMS}^m для індуктивності $L_l = 0.001\Gamma_H$

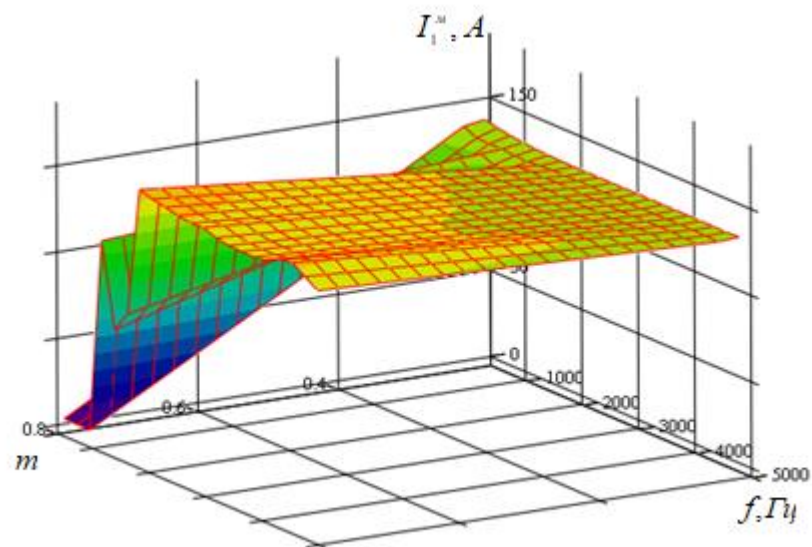


Рисунок 3.10 - Значення першої гармоніки струмів I_1^m для індуктивності $L_l = 0.001\Gamma_H$

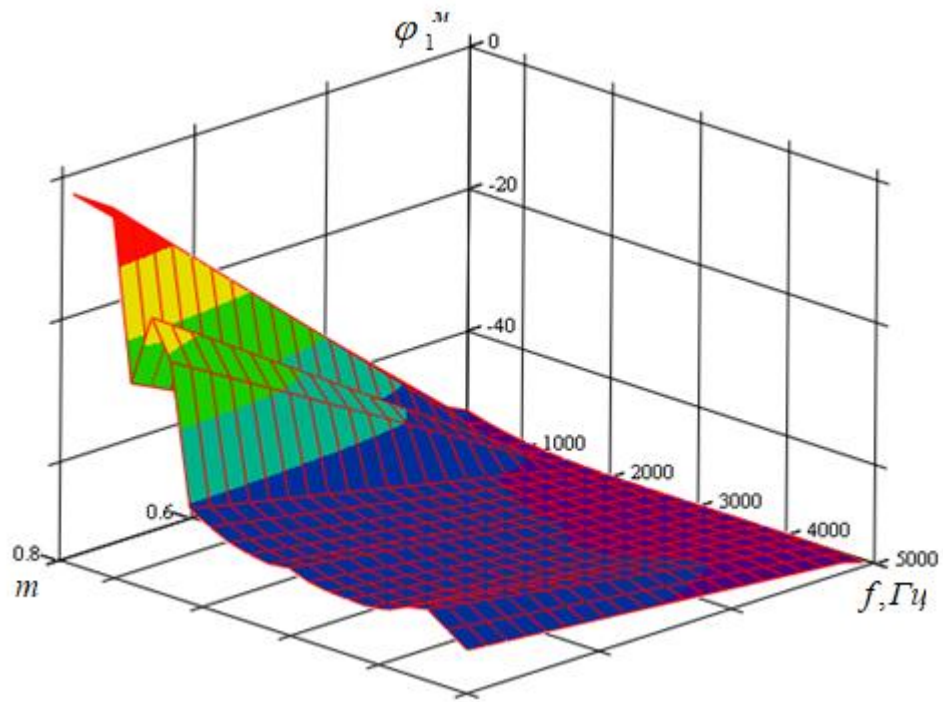


Рисунок 3.11 - Кути зсуву струму відносно напруги φ_1'' для індуктивності $L_1 = 0.001 \Gamma_H$

Для величини індуктивності $L_1 = 0.001 \Gamma_H$ відповідно отриманих даних на графіках рисунків 3.9 – 3.11 видно, що значення діючого значення струму мережі I_{RMS}'' (рис. 3.9) знаходиться в межах 50-100 А, в області частот від 500 до 2000 Гц та значень скважності від 0,2 до 0,6. Величини струмів першої гармоніки I_1'' (рис. 3.10) знаходяться в діапазоні від 70 до 140 А, для області частоти від 500 до 2000 та значень скважності від 0,2 до 0,6. Значення кутів зсуву напруги відносно струму мережі по першій гармоніці φ_1'' (рис.3.11) знаходиться в межах від -40° до -20° , характерною для області частот від 500 до 1000 Гц та значень скважності від 0,4 до 0,6.

На основі отриманих експериментальних даних відповідно до величини індуктивності $L_2 = 0.0001 \Gamma_H$ та зміни частоти модуляції і величини скважності побудовано графіки також в тримірному просторі (рис.3.12 – 3.14), де величина x - дорівнює частоті модуляції f , величина y - дорівнює величині скважності та z - дорівнює величинам діючого значення струму - I_{RMS}'' ,

значенню струму по першій гармоніці - I_1^M та куту зсуву напруги відносно струму по першій гармоніці φ_1^M .

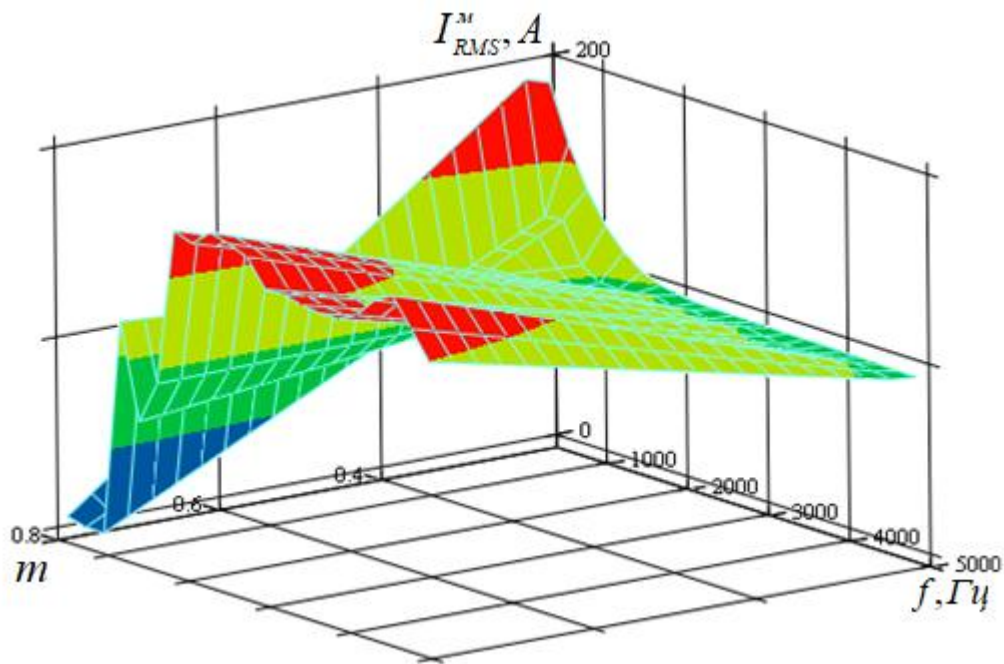


Рисунок 3.12 - Діючі значення струмів I_{RMS}^M для індуктивності $L_2 = 0.0001 \Gamma_H$

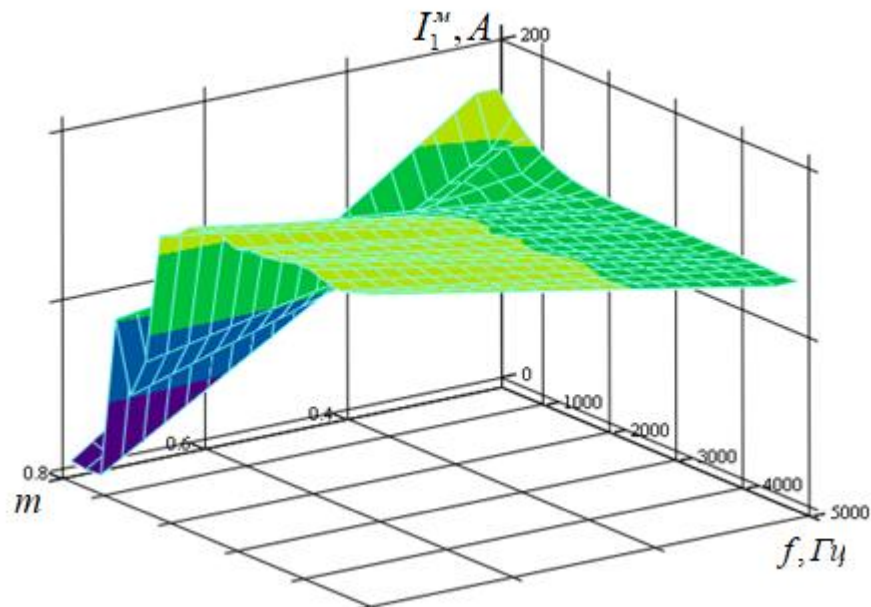


Рисунок 3.13 - Величини першої гармоніки струмів I_1^M для індуктивності $L_2 = 0.0001 \Gamma_H$

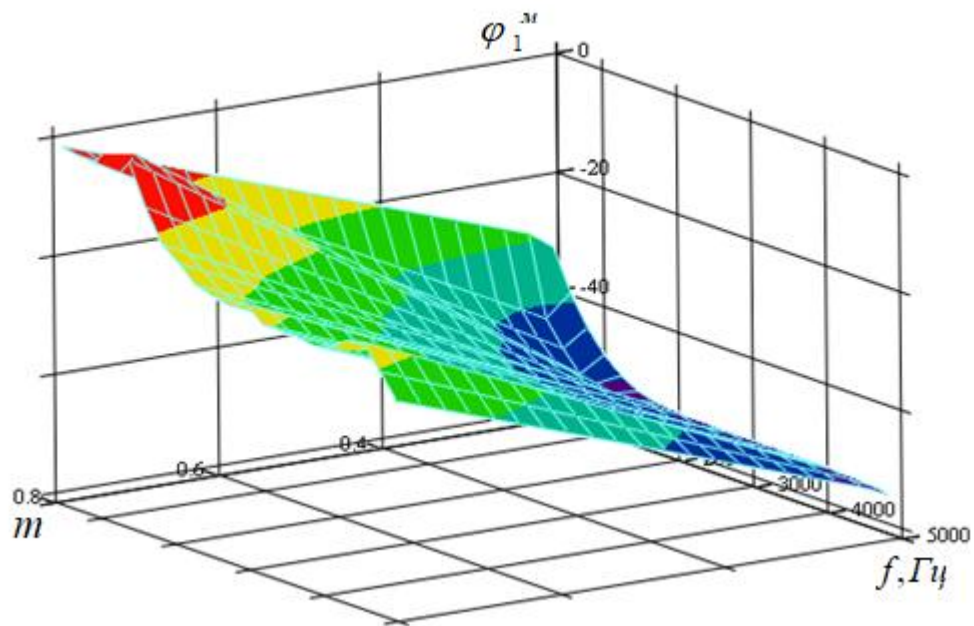


Рисунок 3.14 - Кути зсуву струму від напруги φ_1^M для індуктивності

$$L_2 = 0.0001 \text{ Гн}$$

Для величини індуктивності $L_2=0,0001\text{Гн}$, згідно з отриманими даними на графіках рисунків 3.12, 3.13 та 3.14, спостерігаються наступні результати в залежності від частоти модуляції та величини скважності.

У першому випадку для діючого струму мережі I_{RMS}^M на рисунку 3.12 в області частот від 2000 до 5000 Гц та величина скважності від 0,2 до 0,4 значення діючого струму знаходиться в діапазоні від 100 до 120 А. При збільшенні величини скважності (до 0,6 та більше) діючий струм збільшується до діапазону від 100 до 200 А, що вказує на зростання потужності в мережі при більшій скважності.

Другий момент стосується струму першої гармоніки I_1^M на рисунку 3.13, де в діапазоні частот від 500 до 2000 Гц та величині скважності від 0,2 до 0,4 значення струму першої гармоніки коливається в межах від 100 до 150 А. При збільшенні скважності до 0,6 величина струму першої гармоніки зростає до діапазону 100-200 А, що свідчить про підвищення пульсацій струму при високих значеннях скважності.

Що стосується кута зсуву напруги від струму по першій гармоніці φ^M_1 на рисунку 3.10, то для частот від 500 до 1000 Гц та величин скважності від 0,2 до 0,6 кут зсуву струму від напруги знаходиться в діапазоні від -40° до -20° , що свідчить про значне відставання струму від напруги. При збільшенні частоти модуляції до 1000-5000 Гц і величини скважності від 0,4 до 0,8 кут зсуву зменшується до діапазону від -20° до 0° , що означає наближення струму до синхронізації з напругою.

Загалом, збільшення величини скважності та частоти модуляції впливає на діючі значення струму, струм першої гармоніки та кут зсуву, що має значення для регулювання компенсації реактивної потужності та поліпшення якості енергоспоживання в мережі.

На основі отриманих експериментальних даних для величини індуктивності $L_3=0,0001\text{Гн}$ та зміни частоти модуляції і величини скважності, будується графік в тривимірному просторі, представлені на рисунках 3.15-3.17. Величина x на цих графіках відповідає частоті модуляції f , величина y — величині скважності, а величина z — це значення, що змінюється залежно від обраних параметрів: діюче значення струму I^M_{RMS} , струм першої гармоніки I^M_1 та кут зсуву напруги від струму по першій гармоніці φ^M_1 .

Графіки дозволяють візуалізувати, як ці величини взаємопов'язані з частотою модуляції та скважністю, що є корисним для аналізу ефективності роботи компенсаторів реактивної потужності, а також для вивчення змін струмів та фазових характеристик в залежності від параметрів системи компенсації.

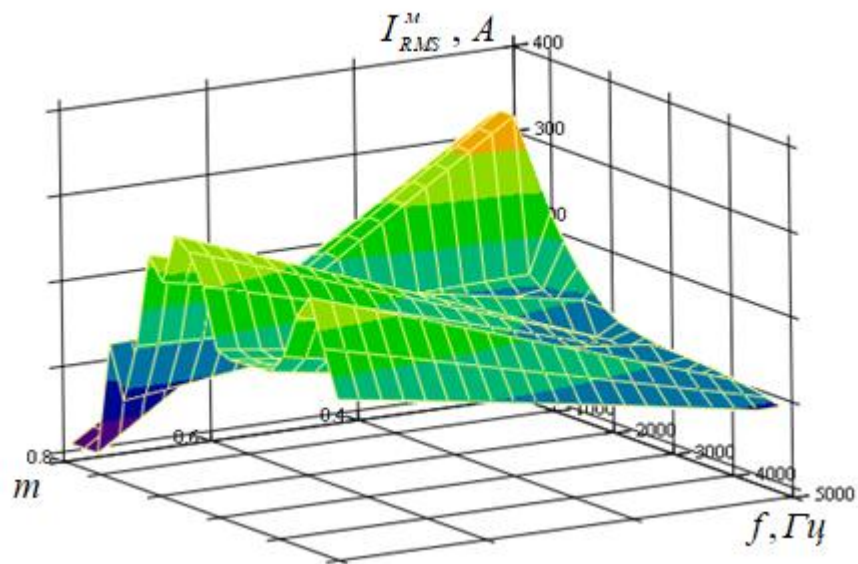


Рисунок 3.15 - Діючі значення струмів I_{RMS}^M для індуктивності $L_3=0,0001\Gamma H$

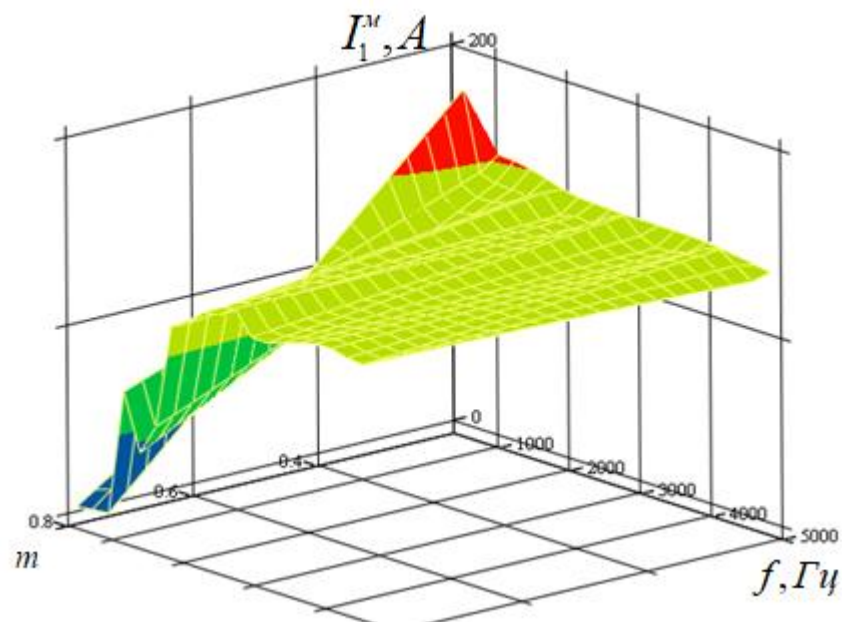


Рисунок 3.16 - Величини першої гармоніки струмів I_1^M для індуктивності $L_3=0,0001\Gamma H$

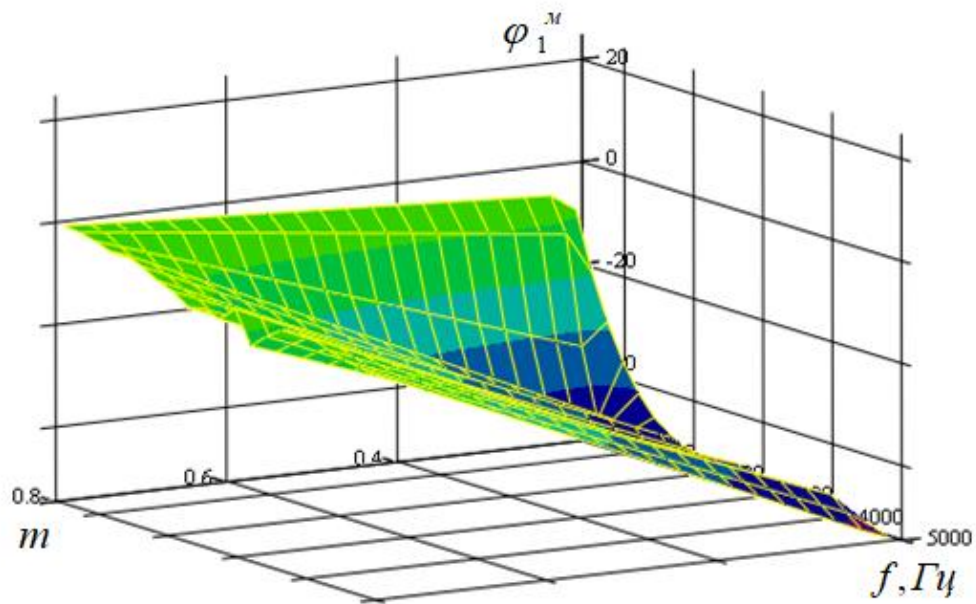


Рисунок 3.17 - Кути зсуву струму від напруги $\varphi_1^м$ для індуктивності

$$L_3=0,0001\text{Гн}$$

Для величини індуктивності $L_3=0,00001\text{Гн}$ згідно отриманих даних на графіках рисунків 3.15–3.17 видно, що величина діючого значення струму мережі $I_{RMS}^м$ знаходиться в діапазоні 200-320 А в області частот від 500 до 2000 Гц та величини скважності від 0,2 до 0,3. Область, в якій діюче значення струму знаходиться в діапазоні від 100-150 А, характерно для частоти модуляції від 2000-5000 Гц та величини скважності від 0,2 до 0,3. Значення струмів першої гармоніки I_{m1} знаходиться в діапазоні від 100 до 150 А, для області частот від 1500 до 5000 при діапазоні 0,2-0,8. Величини кутів зсуву напруги від струму мережі по першій гармоніці $\varphi_1^м$ знаходяться в діапазоні від -50° до -20° , характерними для області частот від 1250 до 5000 Гц та величин скважності від 0,2 до 0,6, при збільшенні величини скважності від 0,6-0,8 значення кута знаходиться в діапазоні від -20° до 0° .

Отже, в результаті проведеного експерименту, в залежності від величини індуктивності, частоти модуляції та величини скважності, спостерігається зміна діючих значень струмів, величин струмів першої гармоніки та величини кута зсуву напруги від струму по першій гармоніці. Для величини індуктивності $L_1=0,001\text{ Гн}$, при збільшенні частоти модуляції

та величини скважності, діючі значення струмів мережі та величини струмів першої гармоніки зменшуються, однак збільшується величина зсуву струму від напруги по першій гармоніці. Для величини індуктивності $L_2=0,0001 \text{ Гн}$, в області частот від 500 до 1000 Гц та величин скважності від 0,2 до 0,6, спостерігається тенденція до наближення величини зсуву напруги від струму по першій гармоніці до нуля, однак чим ближче значення до нуля, тим більше збільшуються значення діючих струмів та величини струмів першої гармоніки. Для величини індуктивності $L_3=0,0001 \text{ Гн}$, при збільшенні частоти модуляції та величини скважності, діючі значення струмів мережі, величини струмів першої гармоніки та величина зсуву струму від напруги по першій гармоніці зменшуються, але значення струмів залишаються занадто великими.

3.3. Моделювання трифазної системи електропостачання з системою компенсації.

Для дослідження режимів електроспоживання в даній системі використовується модель трифазної системи електропостачання з системою компенсації. У якості споживача електричної енергії розглядається асинхронний двигун насосної станції потужністю 160 кВт, номінальна напруга якого становить 400 В, а швидкість обертання ротора — 1480 об/хв. Відомо, що активний опір статора АД складає $r_s=0,01373 \text{ Ом}$, індуктивний опір статора — $l_s=0,000152 \text{ Ом}$, активний опір ротора — $r_s=0,007728 \text{ Ом}$, індуктивний опір ротора — $l_s=0,000152 \text{ Ом}$. Інерція ротора дорівнює $J=2,9 \text{ кл}\cdot\text{м}^2$, кількість пар полюсів — $p=2$.

Враховуючи, що навантаження на асинхронному двигуні змінюється протягом часу, дослідження проводиться для періоду в одну секунду. Зміна навантаження представлена на рисунку 3.4. Модель системи містить генератор змінної напруги з номінальною напругою 400 В, блоки

вимірювання струму та напруги по кожній фазі, систему компенсації з підсистемою з транзисторним перетворювачем, споживача електричної енергії (асинхронний двигун) і блоки для вимірювання струму в статорній обмотці АД та швидкості обертання ротора. Модель, що включає всі компоненти системи, представлена на рисунку 3.18.

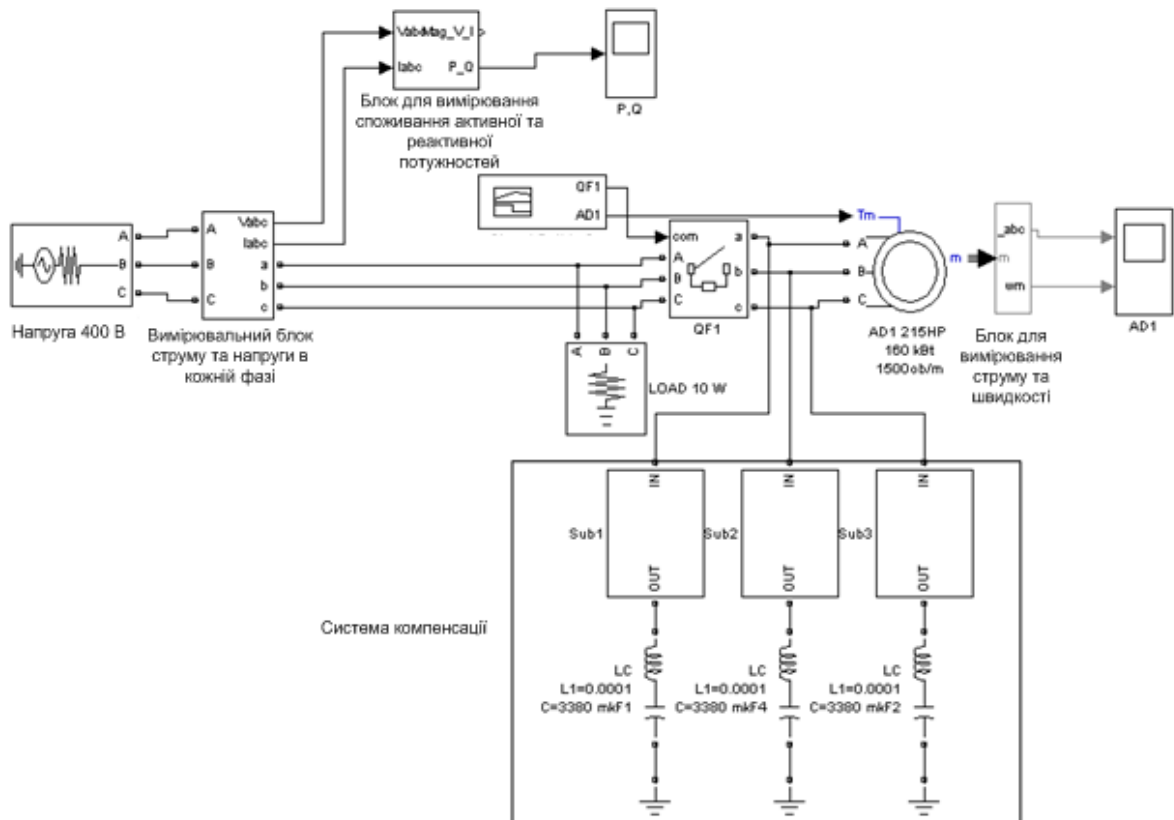


Рисунок 3.18 - Модель трифазного споживача та система компенсації

Момент та швидкість обертання АД зображено на рисунку 3.19. Припустимо, що при проведенні експерименту на інтервалі часу 1 с АД має номінальну швидкість обертання $\omega = 157 \text{ c}^{-1}$.

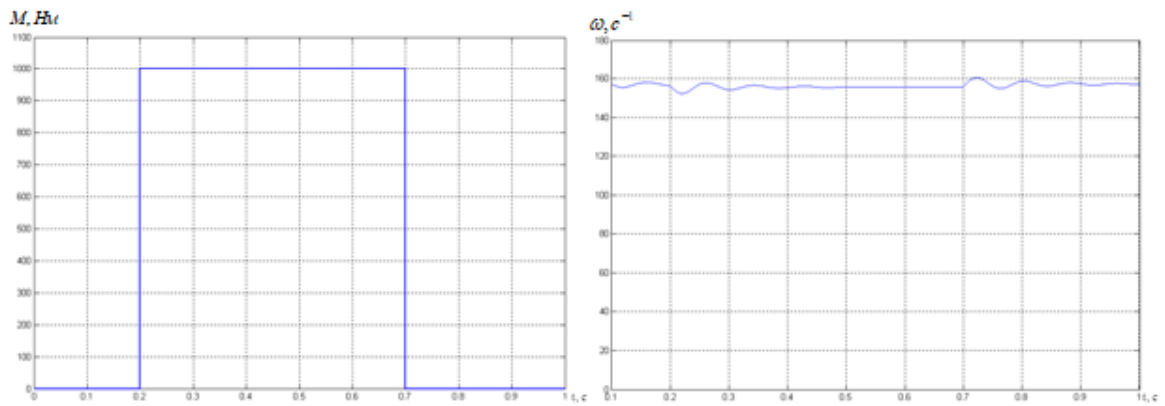


Рисунок 3.19 - Момент та швидкість обертання АД

Процес споживання активної та реактивної потужності асинхронним двигуном (АД) без системи компенсації та з системою компенсації показує важливі аспекти роботи енергетичної системи. На рисунку 3.20 представлені графіки зміни споживання потужностей в залежності від зміни навантаження на АД. Спостерігається, що в початковий та кінцевий моменти часу, коли двигун вже розігнався, АД перебуває в режимі мінімального навантаження. Коливання, що присутні на графіках, вказують на перехідні процеси, пов'язані зі зміною навантаження.

На інтервалі часу від 0,2 до 0,7 спостерігається зміна навантаження, що призводить до відповідної зміни споживання потужностей. При цьому споживання реактивної потужності перевищує споживання активної потужності. Оскільки реактивна потужність є важливим елементом для коригування параметрів роботи системи, на основі отриманих даних про її споживання, можна розрахувати значення ємності для компенсації реактивної потужності згідно з формулою (3.1). В результаті розрахунку для кожної фази отримано значення ємності конденсаторної батареї 3380 мкФ.

Аналіз моделі системи компенсації, описаний у п. 3.2, показує, що найбільш ефективний режим роботи системи компенсації спостерігається в області низької частоти модуляції (900-1000 Гц), з величиною скважності в межах від 0,4 до 0,6 та індуктивністю 10^{-4} Гн. Це забезпечує найбільш

стабільну роботу системи з мінімальними коливаннями та оптимальним використанням енергетичних ресурсів.

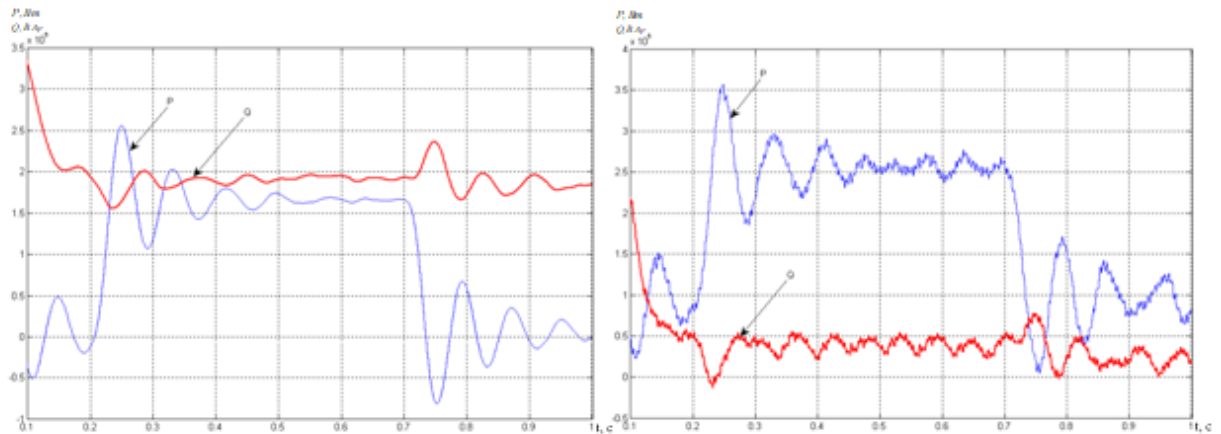


Рисунок 3.20 - Графік споживання активної та реактивної потужностей перед та після компенсації

На рисунку 3.21 видно графік струму в статорній обмотці асинхронного двигуна (АД). З отриманого графіку можна зробити висновок, що пристрій для компенсації реактивної потужності ефективно компенсує реактивну потужність. Це підтверджується зменшенням величини струму, який протікає через статорну обмотку після компенсації.

Якщо відбулася компенсація реактивної потужності, то, відповідно до теорії, має зменшитися струм, що протікає по статорній обмотці двигуна. Це відбувається тому, що система компенсації знижує необхідність у додатковій реактивній потужності, що, в свою чергу, зменшує загальний струм, необхідний для підтримання роботи двигуна. Таким чином, процес компенсації покращує ефективність роботи АД, знижуючи його енергоспоживання та втрати потужності в електричній мережі.

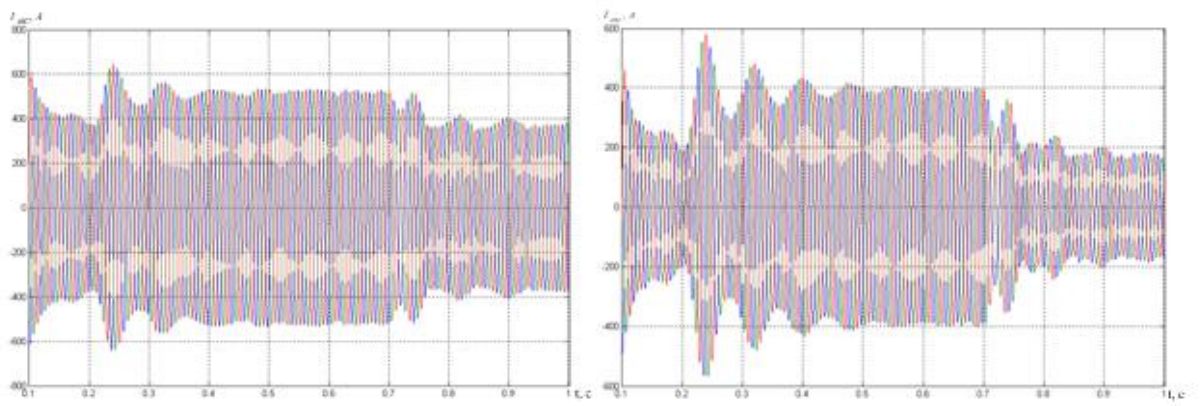


Рисунок 3.21 - Струм в обмотці статора АД до та після компенсації

На рисунку 3.22 показано графік струму споживання протягом одного періоду, в момент часу між 0,6 і 0,62 с, коли навантаження найбільше і перехідний процес вже завершено. З графіків видно, що до встановлення системи компенсації струм, який протікав по статорній обмотці асинхронного двигуна, був значно більший, досягаючи амплітудного значення 500 А. Після встановлення системи компенсації струм, що протікав по статорній обмотці, зменшився і не перевищував 400 А амплітудного значення.

Це свідчить про ефективність системи компенсації реактивної потужності, оскільки зменшення струму в обмотці двигуна вказує на зниження втрат енергії та покращення його енергетичних характеристик. Компенсація реактивної потужності дозволяє зменшити потребу в додатковому струмі, необхідному для створення магнітного поля, що сприяє зниженню навантаження на електричну мережу і підвищує ефективність роботи асинхронного двигуна.

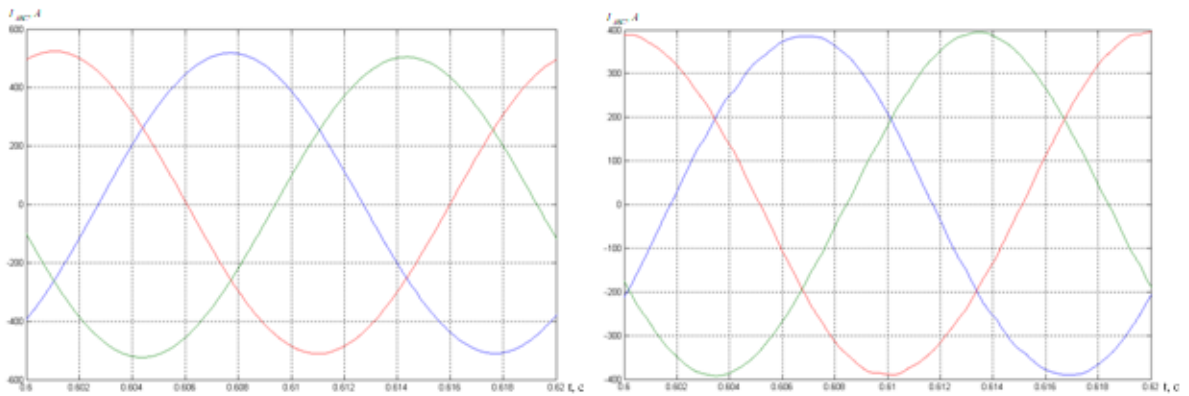


Рисунок 3.22 - Струм в статорній обмотці АД за один період до та після компенсації

Отже, компенсація реактивної потужності призводить до кількох позитивних ефектів для системи електропостачання. Підвищується коефіцієнт потужності двигуна, що зменшує навантаження на електричну мережу, дозволяючи більш ефективно використовувати активну потужність. Компенсація також зменшує потребу в реактивній потужності, що сприяє зниженню навантаження на джерела енергії, такі як трансформатори та генератори. Зниження споживання реактивної потужності дозволяє зменшити втрати активної потужності в елементах системи, таких як обмотки двигуна і трансформатори, підвищуючи загальну ефективність роботи системи. Зменшення потреби в реактивній потужності також знижує струм, що проходить через кабельні лінії, що зменшує нагрівання кабелів і знижує навантаження на електричні мережі. Зниження струму в кабелях призводить до меншого перетину провідників, що зменшує втрати енергії в процесі її передачі. Таким чином, компенсація реактивної потужності дозволяє не лише підвищити ефективність роботи асинхронних двигунів, але й знизити витрати енергії, зменшити навантаження на мережу та покращити загальну економічність системи електропостачання.

3.4. Визначення енергетичних характеристик системи

Система компенсації реактивної потужності на базі транзисторного перетворювача дійсно здатна зменшити споживання реактивної потужності, однак її вплив на напругу в мережі системи електропостачання слід ретельно дослідити.

Коли система компенсації реактивної потужності на основі транзисторного перетворювача вводиться в роботу, вона здатна автоматично регулювати рівень реактивної потужності, зменшуючи його до мінімуму, що дозволяє підтримувати стабільність напруги в мережі. Система може допомогти зберегти рівень напруги на постійному рівні, навіть у випадку зміни навантаження або інших факторів, що впливають на мережу.

На рисунку 3.23 буде видно, що без компенсації напруга може коливатися протягом часу, зокрема на інтервалі одного періоду, з помітними коливаннями в моменти змін навантаження. Водночас після введення системи компенсації реактивної потужності ці коливання зменшуються, і напруга стабілізується, що дозволяє зменшити негативний вплив на обладнання, підвищуючи його ресурс і ефективність роботи.

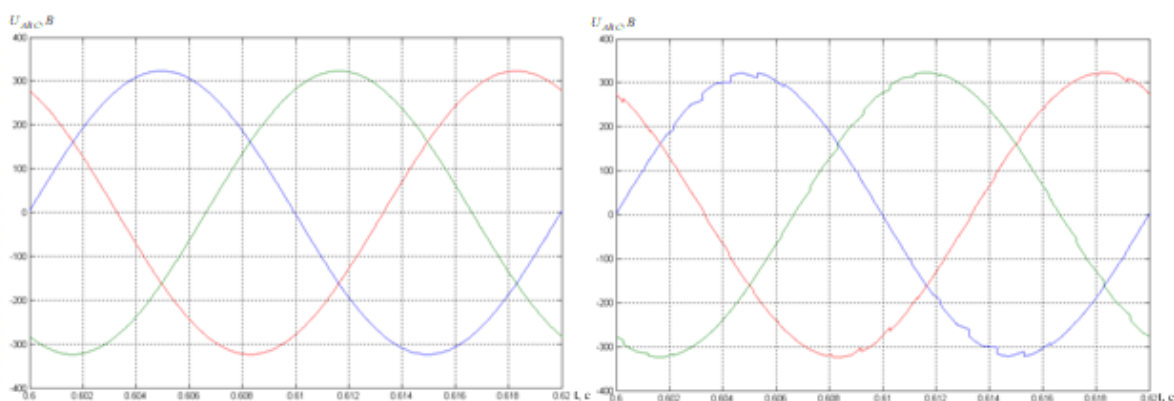


Рисунок 3.23 - Напруга мережі без системи компенсації та з компенсацією

Із графіків напруги до та після компенсації видно, що система компенсації реактивної потужності має значний вплив на форму кривої напруги. Вона стабілізує напругу, зменшуючи коливання, але через вплив транзисторного перетворювача можуть виникати непотрібні гармонічні коливання, що погіршують якість напруги.

Для усунення цих ефектів, крім установки системи компенсації реактивної потужності, важливо додатково використовувати фільтри, налаштовані на резонансну частоту комутації пристрою компенсації. Такі фільтри допомагають зменшити або навіть усунути високочастотні гармоніки, які можуть виникати під час роботи перетворювачів, покращуючи якість напруги та забезпечуючи більш стабільну роботу системи.

На рисунку 3.24 показано струм в мережі з встановленням системи компенсації реактивної потужності. В результаті впливу компенсаційної системи на струм можна побачити зміну його форми. Це може проявлятися в зменшенні амплітуди струму або зміні його частотного спектра. Після введення системи компенсації та фільтрації гармонік, струм в мережі має стати більш стабільним, зменшиться рівень високочастотних коливань, що може позитивно вплинути на ефективність роботи всього електричного обладнання.

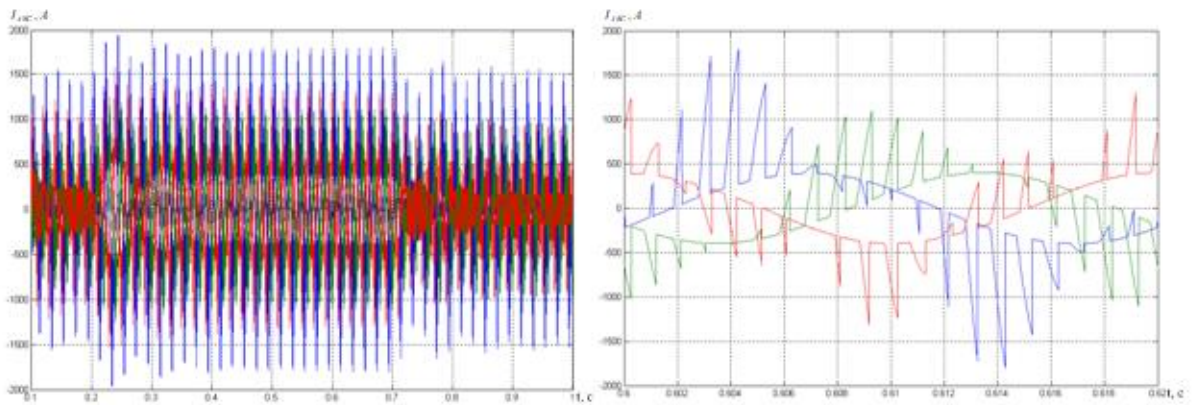


Рисунок 3.24 - Струм в мережі з системою компенсації

Система компенсації реактивної потужності, разом із зміною форми кривої напруги, також суттєво впливає на форму кривої струму. Це пов'язано з перехідними процесами, які виникають під час комутації елементів системи компенсації, що можуть призводити до пульсацій струму в мережі. Ці пульсації створюють додаткові навантаження на мережу і негативно впливають на стабільність роботи електричних пристроїв.

Для мінімізації цих ефектів необхідно не лише встановити систему компенсації реактивної потужності, але й передбачити фільтрацію для усунення пульсацій струмів та згладжування напруги. Спеціалізовані фільтри, налаштовані на відповідні частоти, допомагають зменшити рівень пульсацій та гармонічних коливань, покращуючи загальну якість струму та напруги в мережі. Це дозволяє знизити вплив пульсацій на чутливі елементи електричних систем та забезпечити стабільну роботу як системи компенсації, так і інших споживачів електричної енергії в мережі.

4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ З ТРАНЗИСТОРНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

4.1. Принципи побудови конденсаторних компенсаторів

Згідно з ДЕСТ 1282-58, сучасні конденсатори, що використовуються для підвищення коефіцієнта потужності, виробляються з номінальними напругами 0,22; 0,38; 0,5; 1,05; 3,15; 6,3 і 10,5 кВ. Основна частина пристрою — конденсаторний блок — складається з набору секцій, які об'єднуються в пакет. У конденсаторах з напругою до 1,05 кВ секції з'єднані паралельно, а для напруг, що перевищують цей рівень, застосовується паралельно-послідовне з'єднання. Пристрої, розраховані на 0,22; 0,38 і 0,5 кВ, зазвичай виготовляються трифазними зі схемою з'єднання фаз у формі трикутника. Інші моделі виконуються однофазними. Внутрішні з'єднання секцій конденсаторів показано на рисунку 4.1.

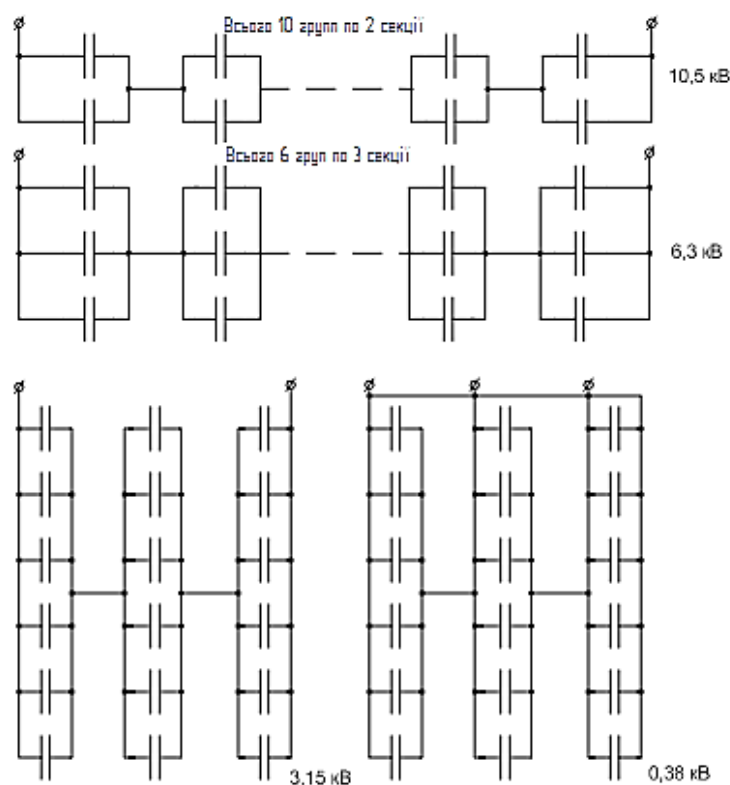


Рисунок 4.1 - Внутрішні з'єднання конденсаторів

До основних конструктивних елементів конденсатора відносяться: виймальна частина, корпус, сталева кришка, вивідні ізолятори.

Кожна секція являє собою окремий конденсатор, що складається з металевих обкладок, розділених ізоляційними шарами, і оснащена двома виводами для підключення до інших секцій.

Реактивна потужність однофазного чи трифазного конденсатора, сполученого трикутником, дорівнює:

$$Q = 2\pi \cdot f \cdot C_K \cdot U^2 \cdot 10^{-3} = \omega \cdot C_K \cdot U^2 \cdot 10^{-3} \cdot (\text{кВАр}) \quad (4.1)$$

де C_K - ємність однофазного конденсатора /сума ємностей трьох фаз трифазного конденсатора, з'єднаного трикутником, мкф;

U - лінійна напруга на затискачах конденсатора, кВ;

ω - кутова швидкість с^{-1} .

Реактивна потужність конденсатора залежить від його ємності, квадрата напруги на затискачах та частоти струму. Відповідно, фактична потужність конденсатора визначається реальним рівнем напруги на його затискачах.

Конденсаторні установки підключаються до мережі або через окремий апарат управління, який забезпечує лише вмикання і вимикання конденсаторів, або через спільний апарат управління разом з електроприймачем. У випадку підключення через спільний апарат управління на відгалуженні до конденсаторів встановлюють роз'єднувач (рубильник), що дає можливість відключати обладнання для обслуговування або ремонту, не припиняючи роботи трансформатора чи електродвигуна. Для конденсаторних батарей і секцій з напругою понад 1000 В використовуються вимикачі, які можуть бути масляними або повітряними.

При паралельному з'єднанні однофазних конденсаторів, коли фази батареї з'єднані трикутником, її номінальна напруга відповідає номінальній напрузі окремих конденсаторів (рисунки 4.2 А). Використання з'єднання фаз зіркою дозволяє створювати установки, здатні працювати з напругою, яка

перевищує номінальну напругу окремих конденсаторів у 1,73 рази. Трифазні батареї, з'єднані за схемою зірки, можуть мати нейтраль, яка або ізольована, або заземлена. Усі трифазні конденсатори в складі батарей підключаються паралельно (рисунок 4.2 Б).

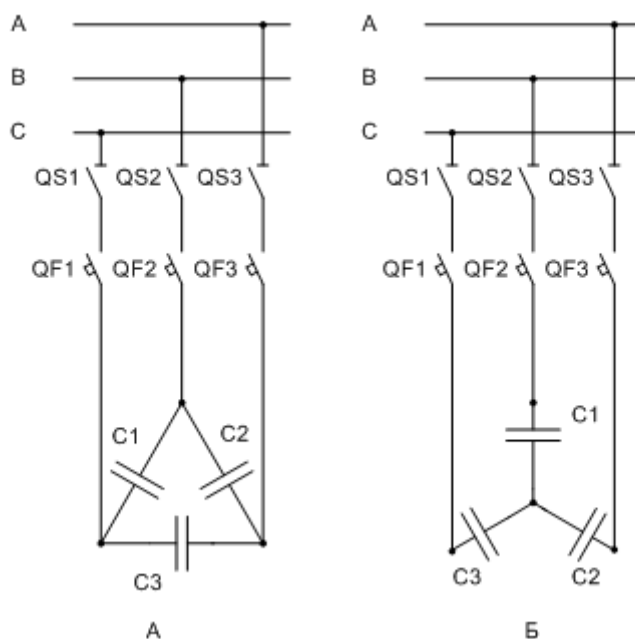


Рисунок 4.2 - Схеми підключення конденсаторних батарей з'єднаних:

А - в трикутник, Б - в зірку.

Усі три фази конденсаторної установки повинні мати однакову ємність, незалежно від схеми їх з'єднання. Це забезпечує симетрію струмів і напруг у системі. При з'єднанні фаз батареї за схемою зірки рівність ємностей також необхідна для досягнення однакового рівня напруги на всіх фазах.

Конденсатори марок КМ, КМВ, КС і КСВ призначені для роботи у закритих приміщеннях і розраховані на експлуатацію при температурі повітря від -35° до $+35^{\circ}\text{C}$ на висоті до 1000 метрів над рівнем моря. Вони можуть працювати до 4 годин на добу при підвищенні напруги до 110% від номінального значення і збільшенні струму до 130% від номіналу. Відхилення ємності від каталожного значення допускається в діапазоні від -5% до +15%.

Тангенс кута діелектричних втрат (власних втрат конденсатора) при температурі $+20^{\circ}\text{C}$ і частоті 50 Гц не повинен перевищувати 0,0045 для конденсаторів напругою до 0,5 кВ і 0,003 для решти паперово-масляних конденсаторів. Для пристроїв із соволовим діелектриком ці показники становлять 0,005 і 0,0035 відповідно.

Конденсатори характеризуються дуже низькими питомими втратами активної потужності, які становлять 0,0025—0,0050 кВт на кожен кіловольт-ампер реактивної потужності. Потужність одного елемента (банки) зазвичай знаходиться в межах 4—10 кВАр.

На промислових підприємствах штучна компенсація реактивної потужності для підвищення коефіцієнта потужності зазвичай здійснюється за допомогою конденсаторів та спеціальних конденсаторних установок (рисунк 4.4).

Переваги використання конденсаторів у порівнянні з іншими методами компенсації реактивної потужності такі:

- 1) Низькі питомі втрати активної потужності на одиницю реактивної потужності.
- 2) Простота обслуговування, оскільки в конструкції відсутні рухомі та труться елементи.
- 3) Легкість монтажу завдяки невеликій вазі та відсутності необхідності у фундаменті.
- 4) Можливість розміщення обладнання практично в будь-якому сухому приміщенні.

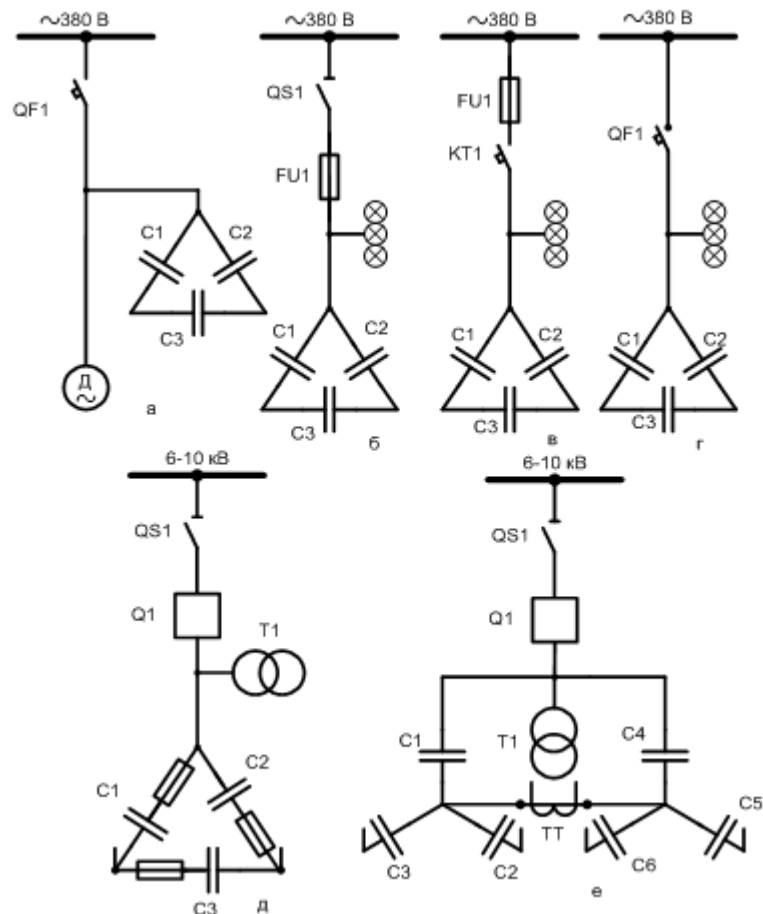


Рисунок 4.4 - Варіанти приєднань конденсаторних установок
а – зі спільним вимикачем; б – через роз’єднувач та запобіжник; в – через запобіжник та контактор; г – через автоматичний вимикач; д – через вимикач високої напруги; е – у вигляді подвійної зірки через вимикач високої напруги

Недоліки конденсаторів полягають в тому, що вони мають:

- 1) короткий термін служби (приблизно 8—10 років);
- 2) достатньо тендітні (легко пошкоджуються при струмах к. з. та при напрузі вище $1,1U_H$);
- 3) відсутність можливості ремонту (відновлення пошкоджених конденсаторів недоцільно).

Батареї конденсаторів зазвичай підключаються до трифазної мережі за схемою трикутника. Після відключення конденсаторів енергія, накопичена в

них, повинна розрядитися через активний опір. Величина цього опору має бути такою, щоб запобігти перенапруженням на затискачах конденсаторів.

Переважна більшість конденсаторних установок виконується у трифазному виконанні. Однофазні установки застосовуються рідше і здебільшого для індивідуальної компенсації реактивної потужності.

Батареї середньої та великої потужності зазвичай розділяють на секції за допомогою роз'єднувачів, тоді як підключення до шинної системи здійснюється через загальний вимикач. Секціонування батарей забезпечує можливість огляду або ремонту окремих банок без необхідності відключати всю батарею. Крім того, секціонування дозволяє грубо регулювати підключену потужність батареї під час експлуатації. Кількість секцій і співвідношення їх потужностей залежать як від необхідного рівня точності регулювання, так і від характеру графіка споживання реактивної потужності.

У практиці промислового електропостачання батареї зазвичай поділяють на дві або три рівні за потужністю секції, що відповідає основним вимогам до експлуатації. Батареї з напругою до 1000 В підключаються автоматичними вимикачами або контакторами.

Якщо батарея розділяється на кілька трифазних секцій або груп, кожна з них повинна складатися з однакового числа однофазних конденсаторів. Однофазні конденсатори зазвичай з'єднують між собою за схемою трикутника.

Конденсаторні установки поділяються на індивідуальні, групові та централізовані.

Індивідуальні установки, як правило, застосовуються в мережах з напругою до 500 В. У таких випадках конденсатори підключаються безпосередньо до затискачів асинхронних двигунів, які є основними споживачами реактивної потужності на промислових підприємствах. Хоча цей спосіб є найбільш раціональним за призначенням, він має суттєвий недолік: при відключенні двигуна від мережі автоматично відключається і компенсуючий пристрій, що погіршує роботу конденсаторів.

Групові установки зазвичай зустрічаються в мережах до 500 В. Конденсатори підключаються до групових розподільчих щитків у цехах. У цьому випадку ефективність використання встановленої потужності конденсаторів дещо зростає. Однак, як і при індивідуальній компенсації, можливі часті відключення компенсуючих пристроїв, хоч це буває рідше.

Централізовані установки передбачають підключення батарей конденсаторів на стороні високої напруги трансформаторної підстанції. Цей підхід забезпечує значно вищу ефективність використання потужності конденсаторів у порівнянні з індивідуальними та груповими установками.

При груповій компенсації конденсаторна батарея підключається до групових збірок або шин високої напруги через вимикачі або вимикачі навантаження. Захист кожного конденсатора здійснюється плавкими запобіжниками, які встановлюються в ланцюг кожного елемента окремо. Щоб зменшити додаткові втрати, батарею конденсаторів розміщують якомога ближче до шин цехової підстанції.

Підключення батарей конденсаторів до шин низької напруги через резервний трансформатор не рекомендується, оскільки це знижує віддачу реактивної потужності на 8—12% і збільшує питомі втрати установки на 0,5—2%.

4.2. Сучасні датчики електричних величин.

Технічні рішення для вимірювання струмів мають певні недоліки. Струмові шунти не забезпечують гальванічної розв'язки. Трансформатори струму і котушки Роговського не можуть вимірювати постійний струм. Датчики, які працюють на основі ефекту Холла з розімкненим контуром, характеризуються низькою точністю та вузьким частотним діапазоном.

У датчиках АВВ використовується ефект Холла замкнутого контуру, що забезпечує високу точність у частотному діапазоні до кількох десятків кілогерців. Цей метод також гарантує гальванічну розв'язку між вимірювальним сигналом і первинним ланцюгом.

Принцип дії ефекту Холла замкнутого контуру полягає в тому, що первинний провідник проходить через чутливий елемент, створюючи магнітний потік. Цей потік компенсується магнітним полем, яке генерує вторинна обмотка. Компенсація здійснюється з високою точністю відповідно до формули, що залишається справедливою у будь-який момент часу:

$$N_P I_P = N_S I_S, \quad (4.2)$$

де $N_P I_P$ — кількість витків та струм первинної обмотки датчика;

N_S і I_S — кількість витків та струм вторинної обмотки датчика.

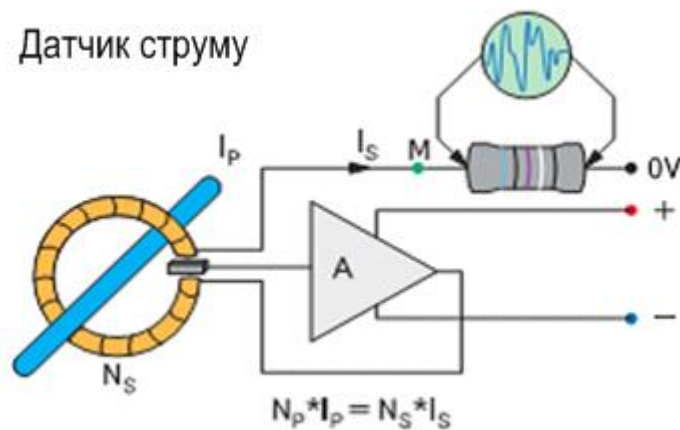


Рисунок 4.4 - Принцип роботи датчика струму з ефектом Холу замкнутого контура

У більшості випадків первинний елемент, наприклад кабель або струмова шина, відповідає співвідношенню $N_S = 1$. При підключенні резистора до ланцюга вторинного струму, який є вимірювальним сигналом, утворюється напруга, пропорційна первинному струму. Постійна компенсація магнітного потоку первинного ланцюга дозволяє датчику коректно функціонувати навіть за умов перевантаження, точно фіксувати миттєві зміни струму та забезпечувати високу точність вимірювань у широкому діапазоні температур.

Принцип роботи датчика напруги, що базується на ефекті Холла в замкнутому контурі, аналогічний. У середині такого датчика в первинний ланцюг вбудований резистор. Коли до входних контактів датчика прикладається напруга, струм резистора трансформується у вторинний струм, який пропорційний напрузі первинного ланцюга (рисунок 4.5).

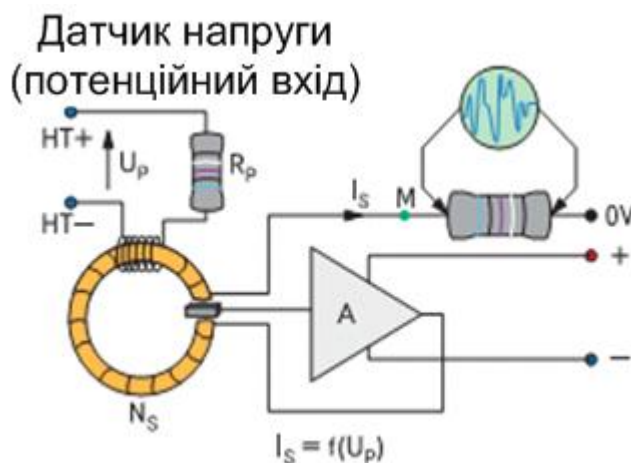


Рисунок 4.5 - Схема роботи датчика напруги з ефектом Холу в замкнутому контурі

Нове покоління датчиків напруги розроблене за повністю електронною технологією, що не потребує використання магнітопроводу. В середині такого датчика знаходиться друкована плата з електронними компонентами. Вимірювана напруга безпосередньо подається на входні клеми датчика, де вона знижується дільником напруги, після чого за допомогою спеціального підсилювача з гальванічною розв'язкою та інших електронних компонентів перетворюється у вторинний струм (рисунок 4.6).

Компанія АВВ пропонує широкий асортимент датчиків струму різних розмірів для промисловості з номінальними значеннями вимірюваних струмів від 5 до 100 А, від 100 до 2000 А, а також для електротяги від 50 до 6000 А. Серед моделей є серії CS (від 300 до 2000 А), ЕА (від 100 до 2000 А), НК (від 50 до 1000 А) і абсолютно нове покоління датчиків струму серії NCS (від 2 до 40 кА), що можуть бути використані в різних сферах застосування.

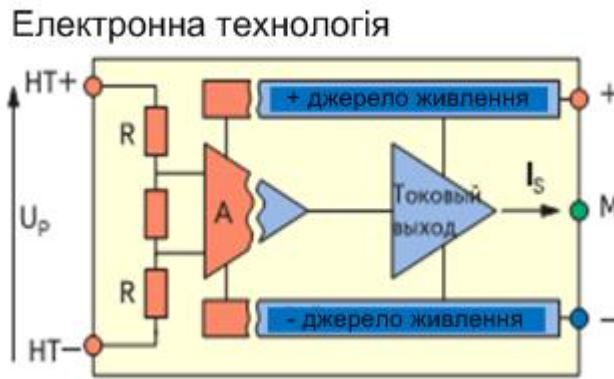


Рисунок 4.6. Принцип роботи датчика напруги, виконаної на основі електронної технології.

Для більшості датчиків струму можливі різні варіанти виконання, що дозволяє їх адаптацію під специфічні вимоги споживачів. На замовлення можна змінити кількість витків вторинної обмотки, напругу живлення і тип вихідного роз'єму. Також є можливість додаткових налаштувань, таких як датчики для різних напрямків установки або оснащення додатковим екраном для захисту від сильних електромагнітних полів.

Датчики напруги компанії ABB представлені серіями VS (повністю електронні) для вимірювання напруги в діапазоні від 50 до 4200 В, а також серією EM (ефект Холла замкнутого контуру) для діапазону від 600 до 5000 В. Калібровані датчики напруги серії EM010 вже мають інтегрований резистор, що дозволяє безпосередньо подавати вимірювану напругу на вхідні контакти. Також є версії датчиків цієї серії, які не калібруються, і в яких замовник самостійно вибирає вхідний опір для забезпечення первинного струму 10 мА.

Новітні датчики струму компанії ABB Entrelec серії NCS призначені для вимірювання великих струмів від 2 до 40 кА і відповідають вимогам промислових і електротягових застосувань. Ці датчики мають два струмових виходи та два потенційних виходи, конструкція є повністю електронною і не містить магнітопровода (рисунок 4.7).

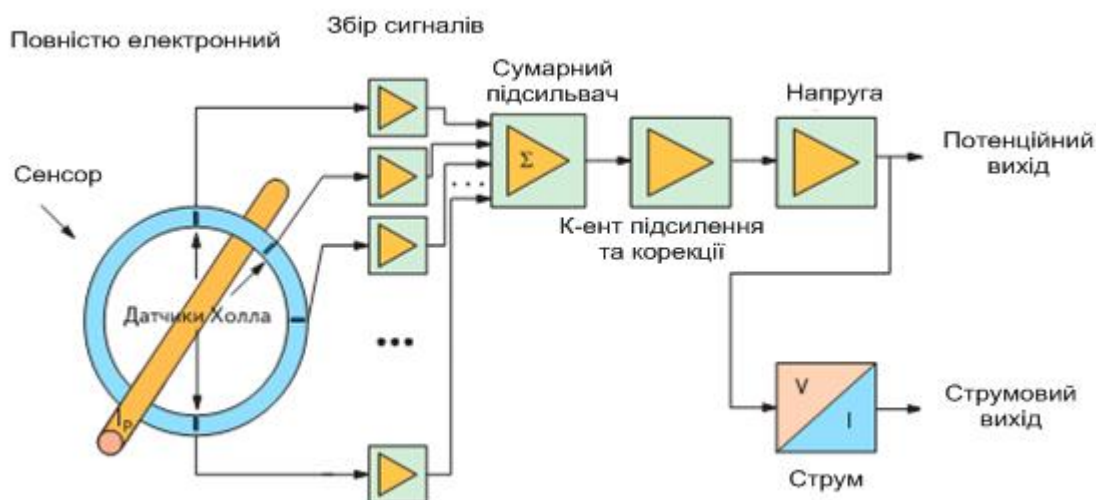


Рисунок 4.7. Схема роботи датчика струму NCS.

Принцип роботи датчиків струму заснований на законі Ампера. Через датчик проходить первинний провідник, і кілька чутливих елементів, які використовують ефект Хола, генерують невелику напругу, що пропорційна магнітному полю (від 2,5 до 5 В). Далі ці сигнали фільтруються для виключення впливу спотворень від живлячого ланцюга та високочастотного обладнання. Після цього сигнал підсилюється, що дозволяє напрузі зрости до 12 В. Наступним етапом є налаштування коефіцієнта посилення, що визначає номінал датчика, а також корекція нульового значення. Останній етап полягає у перетворенні напруги в струм для струмових виходів.

Оскільки в цих датчиках відсутній магнітопровід, вони є легшими і зручнішими для монтажу в порівнянні з пристроями інших типів. АВВ пропонує два варіанти датчиків з діаметром отвору 125 і 165 мм. Варто зазначити, що ці датчики можуть витримувати максимальний струм протягом тривалого часу, тому що відсутність магнітопроводу усуває проблеми з розсіюванням тепла. Крім того, універсальність їх застосування завдяки можливості вибору типу охоплення первинного провідника дозволяє використовувати ці датчики в різних конфігураціях силових установок.

4.3 Вибір структури транзисторного перетворювача та силової частини компенсатора.

Низький коефіцієнт потужності при роботі пристрою є свідомством додаткового завантаження мережі, збільшеного вмісту гармонік в споживаному струмі, збільшеного рівня перешкод, як на вході перетворювача, так і на його виході. Найкраще навантаження для мережі створюється при коефіцієнті потужності ($\cos\varphi$) що дорівнює 1. Для мережі таке навантаження еквівалентне резистору, споживаючому, як відомо, тільки активну потужність. Коли співвідношення між миттєвою напругою мережі і струмом, що відбирається від мережі ($I_{\text{мережі}}$), є постійною величиною, навантаження для мережі є аналогом резистора і коефіцієнт $\cos\varphi$ буде дорівнювати 1. Як тільки це співвідношення відхилятиметься від постійного значення, це означає, що між u і i є фазовий зсув або в струмі містяться вищі гармоніки (ВГ). Можуть бути присутніми обидва явища — фазовий зсув і ВГ в струмі, кожне з них зробить свій вплив на зниження $\cos\varphi$.

Численне сучасне устаткування промислових і комерційних технологій, використовуване в широкому діапазоні потужностей, вимагає трифазного живлення змінного струму з необхідною амплітудою і частотою. Останніми роками у зв'язку з розвитком в створенні швидкодіючих силових напівпровідникових приладів намітилася тенденція до створення більш довершених топологій перетворювачів змінного струму. До таких топологій, в першу чергу, відносяться матричні і гібридні структури. Це пояснюється прагненням вирішити наступні основні завдання:

- поліпшення енергетичних показників системи (коефіцієнта потужності і ккд);
- мінімізація вищих гармонік вхідного і вихідного струмів для забезпечення вимог ЕМС по входу і виходу перетворювача;
- поліпшення габаритні показників перетворювачів за рахунок зниження величин використовуваних реактивних елементів;

- розширення потужностного діапазону перетворювачів.

Однією з найпоширеніших на сьогоднішній день технологій перетворення змінного струму є системи з подвійним перетворенням енергії (ППЕ), які включають в себе ланку постійного струму в своїй конструкції. Ця ланка постійного струму відповідає за накопичення енергії з початкового джерела змінного струму, при цьому вона може містити не лише реактивні елементи (ємності та індуктивності), але й регулятор напруги постійного струму (знижуючий або підвищуючий — бустер).

Вхідний каскад перетворювача (випрямляч) відокремлюється від вихідного каскаду (інвертора) завдяки проміжній ланці постійного струму. Ця ланка зазвичай включає в себе конденсатори великої ємності, які служать для згладжування пульсацій і накопичення необхідної енергії для живлення інвертора. Розмір ємності конденсаторів визначається з урахуванням потреби в підтримці динамічних характеристик інвертора, зокрема, мінімального коливання вихідної напруги в перехідних режимах, а також максимальної здатності перетворювача витримувати перевантаження. Для ланки постійного струму з напругою 720-800 В ємність накопичувальних конденсаторів зазвичай становить 470-660 мкФ на кожен 1 кВА вихідної потужності інвертора, щоб забезпечити достатню енергію для інвертора під час коливань навантаження та зниження напруги в мережі. Отже, ланка постійного струму має вплив на спектр вхідного струму системи завдяки своїй ємності, що виявляється в характері її впливу на випрямляч.

Однією з сучасних архітектур ППЕ, яка використовується в джерелах безперебійного живлення (ДБЖ), представлена на рисунку 4.8. На ньому умовно зображена схема мостового випрямляча і мостового інвертора. Відмінною рисою цієї структури є використання некерованого випрямляча VD1, VD2 і регулятора підвищення напруги (бустера) РН-БУС в ланці постійного струму.

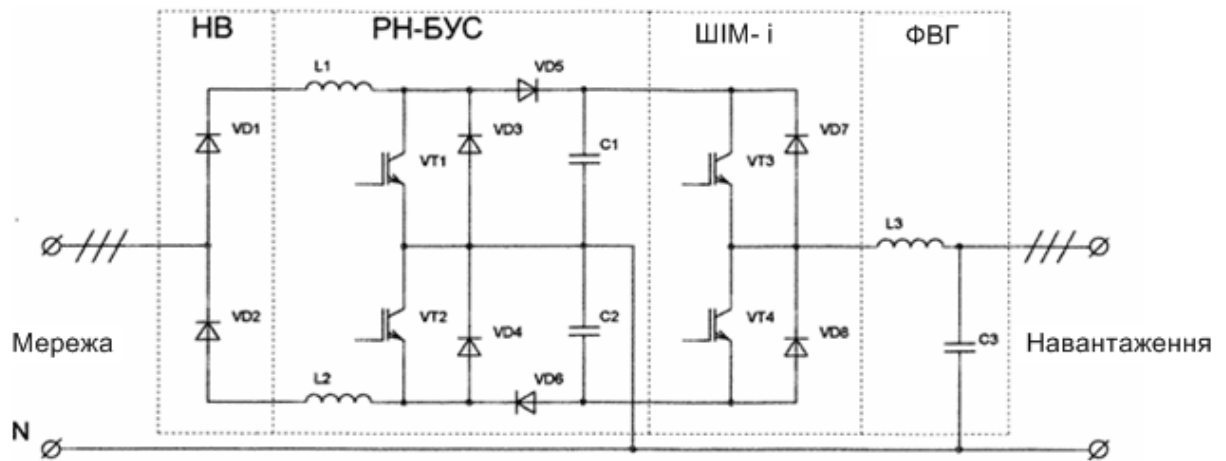


Рисунок 4.8 - Система ППЕ з бустером.

Диференціальна схема бустера базується на двох IGBT-транзисторах VT1, VT2, діодах VD5, VD6, дроселях L1, L2 і накопичувальних конденсаторах C1, C2. Цей перетворювач виконує наступні основні функції:

- підтримує стабільну напругу живлення інвертора в межах $\pm(360-400)$ В, що необхідно для отримання номінальної вихідної напруги 220/380 В;
- забезпечує балансування напруги між позитивною та негативною шинами постійного струму, що запобігає появі постійної складової в вихідній напрузі.

ШІМ-інвертор у цій схемі працює на IGBT-транзисторах VT3, VT4, які керуються імпульсними широтно-імпульсними сигналами, що модулюються за синусоїдальним законом. Широко застосовуються ШІМ-інвертори, які у поєднанні з вихідними фільтрами формують синусоїдальну напругу основної частоти.

При оцінці енергетичних показників систем подвійного перетворення енергії, коли вхідний каскад використовує або некерований, або керований випрямляч, потрібно враховувати, що такий перетворювач є необоротним нелінійним чотирьохполюсником, який містить ланку постійного струму, що відокремлює первинне джерело живлення від навантаження. Коефіцієнт потужності в таких системах є важливим показником, який характеризує

вплив реактивної потужності та потужності спотворення на загальну енергетичну ефективність системи.

Системи подвійного перетворення енергії (ППЕ) мають два коефіцієнти потужності: вхідний ($K_{вх}$), який відображає ефективність використання енергії з мережі, і вихідний ($K_{вих}$), що визначає ефективність живлення навантаження. У загальному випадку ці коефіцієнти мають різні значення, оскільки залежать від характеристик конкретної системи та її компонентів.

Струми реактивної потужності і потужності спотворення в вхідному контурі системи, зокрема в мостовому схемі трифазного випрямляча, можуть впливати на параметри вхідного струму, що споживається від мережі. Вони також залежать від ефективності фільтра ланки постійного струму та ступеня навантаження системи.

Основними недоліками систем ППЕ з діодними або тиристорними випрямлячами є:

- Великі розміри і маса, зокрема через використання великих електролітичних конденсаторів в ланці постійного струму.
- Обмежений температурний діапазон через високі напруги в ємностях.
- Обмеження по потужності через втрати при перемиканні у IGBT ШІМ-інверторах і виникнення небажаних електромагнітних перешкод під час комутації силових ключів.
- Низький вхідний коефіцієнт потужності через спотворення синусоїдальності вхідного струму, що вимагає введення пасивних фільтрів гармонік, що збільшує масогабаритні показники і може призводити до резонансних явищ у системі.

Розвиток сучасних Гнучких систем передачі енергії змінного струму (FACTS) почався близько 15 років тому. Це стало можливим завдяки появі потужних електронних компонентів, таких як IGBT, GTO і IEGT, які дозволяють реалізувати нові можливості для управління і компенсації параметрів енергетичних систем.

До сьогоднішнього дня широко використовуються класичні системи FACTS, що базуються на тиристорних компонентах з управлінням по струму. Такі системи дозволяють ефективно регулювати параметри енергетичних мереж. Однак останніми роками з'явилися сучасні системи FACTS, які використовують новітні компоненти, здатні до управління по напрузі. Це значно розширює можливості таких систем, зокрема для більш точного і швидкого коригування реактивної потужності в енергетичних мережах.

Найважливішою характеристикою FACTS є їх здатність поглинати або повертати реактивну потужність в залежності від потреби в системі. Це дозволяє підтримувати стабільність напруги та покращувати ефективність роботи енергетичної мережі в цілому. Таку функціональність ефективно ілюструє рисунок 4.9, який демонструє, як FACTS впливають на реактивну потужність в мережі.

На рисунку 4.9 зображені - V_0 – напруга вторинної обмотки трансформатора, V_g – основна гармоніка напруги перетворювача на виході. Перетворювач працює в режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що пояснює необхідність встановлення фільтра між перетворювачем і мережею. Напруга мережі V_0 і вихідна напруга перетворювача знаходяться в фазовому співвідношенні. У разі виникнення будь-якої різниці між цими напругами, це призводить до падіння напруги на реакторі повздовжньої компенсації, який також має фазову співзвучність з мережею (UL). Знак цієї напруги відповідає знаку різниці між вихідною і мережною напругою $V_0 - V_g$.

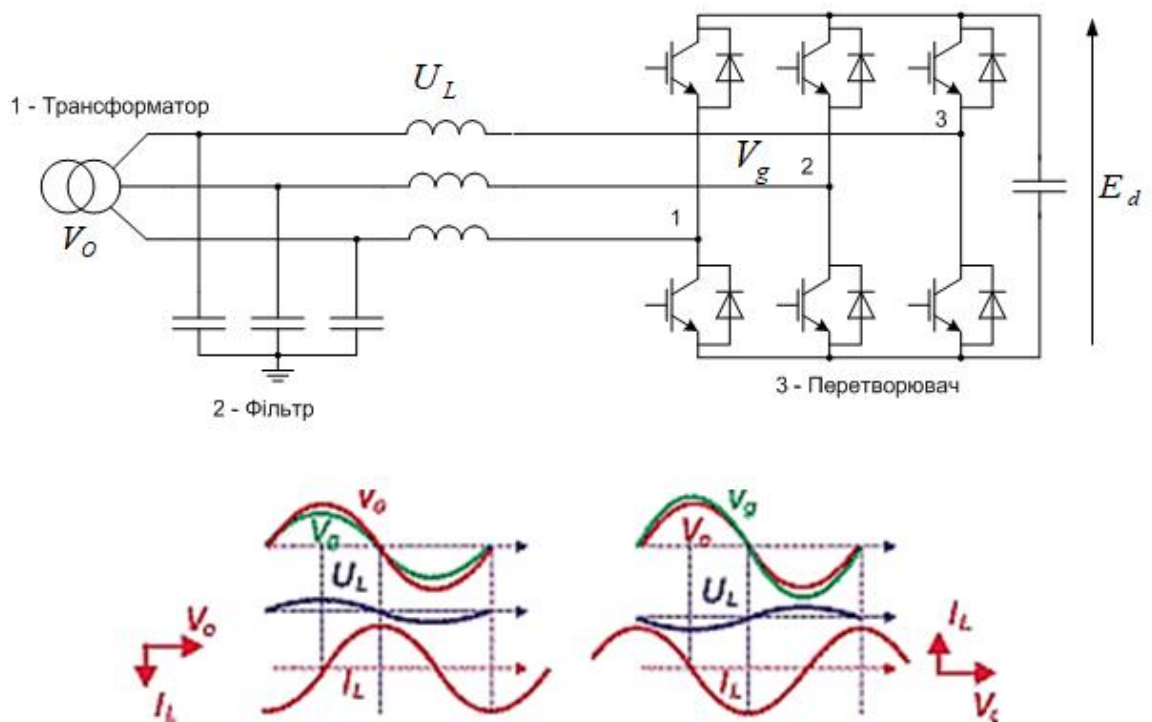


Рисунок 4.9 - Принцип роботи FACTS

Результуючий струм I_L має фазовий зсув на 90° щодо напруги. Якщо значення струму менше напруги ($I_L < U$), ($V_g < V_0$), система функціонує в індуктивному режимі, а при значенні струму більше напруги ($I_L > U$), ($V_g > V_0$) — в ємнісному режимі.

На основі описаної структури були розроблені і вже використовуються сучасні пристрої подовжньої та поперечної компенсації.

Для подальшого вдосконалення перетворювачів була розроблена структура, в якій відсутнє подвійне перетворення енергії, наявні фільтри вищих гармонік, і система є економічно ефективною. На рисунку 4.10 представлена структура транзисторного перетворювача, де система управління, як генератор сигналів, визначає не лише ширину, але й частоту управляючих сигналів. Транзистори (VT1-VT3), індуктивності (L1-L3), ємності (C1-C3) та фільтри вищих гармонік (ФВГ) з послідовно з'єднаними

індуктивностями та ємностями налаштовані на частоту модуляції конденсаторної батареї.

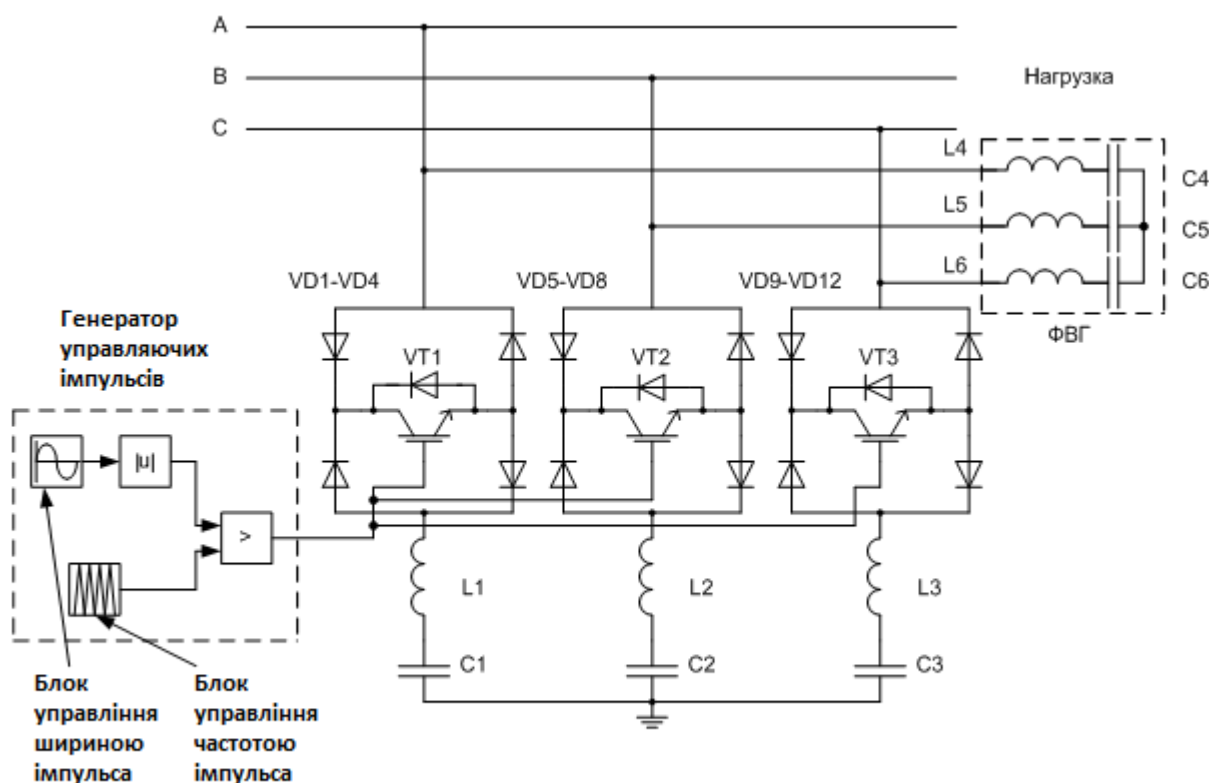


Рисунок 4.10 - Система транзисторного перетворювача

4.4. Розробка функціональної схеми пристрою компенсації.

Функціональна дія компенсаційного пристрою полягає в тому, що система для підвищення коефіцієнта потужності налаштовує еквівалентну ємність через частотну імпульсну модуляцію, яка визначає підключення або відключення конденсаторної батареї від мережі. Це регулювання враховує поточні зміни коефіцієнта форми напруги та кута зсуву фази струму стосовно заданих значень для кожної фази мережі.

У процесі роботи здійснюється моніторинг напруги та струму як в мережі, так і в навантаженні. Для кожної фази мережі задаються конкретні значення коефіцієнта потужності та форми напруги. На основі виміряних

значень струму та напруги визначається зсув фаз та коефіцієнт форми напруги в мережі.

Поточні значення коефіцієнтів потужності та форми порівнюються з граничними значеннями. Розраховуються відхилення цих параметрів від заданих норм. На основі цих розрахунків коригується частота імпульсної модуляції для регулювання підключення або відключення конденсаторної батареї. Якщо поточні значення коефіцієнтів потужності або форми перевищують задані ліміти, система управління генерує сигнал про неможливість компенсації реактивної потужності.

Система електропостачання (рисунок 4.11), складається зі змінного джерела електричної енергії е.р.с. E_ϕ з активною вкладовою та реактивною складовою внутрішнього опору $R_{\text{вн}}$ та $X_{\text{вн}}$, повна потужність якого пропорційна сумарній повній потужності всіх споживачів $S_{\text{сум}}$, ввімкнених до точки загального приєднання. В системі на початковому моменті роботи задаються діючі значення напруги кожної фази $U_{\text{дА}}^{\text{зад}}$, $U_{\text{дВ}}^{\text{зад}}$, $U_{\text{дС}}^{\text{зад}}$, та діючі величини струму $I_{\text{дА}}^{\text{зад}}$, $I_{\text{дВ}}^{\text{зад}}$, $I_{\text{дС}}^{\text{зад}}$, значення коефіцієнту потужності системи $\varphi_{\text{А}}^{\text{зад}}$, $\varphi_{\text{В}}^{\text{зад}}$, $\varphi_{\text{С}}^{\text{зад}}$, та коефіцієнти форми напруги $K_{\text{фА}}^{\text{зад}}$, $K_{\text{фВ}}^{\text{зад}}$, $K_{\text{фС}}^{\text{зад}}$. В системі мережі в точці підключення, проводиться вимірювання напруги в кожній фазі $U_{\text{А}}$, $U_{\text{В}}$, $U_{\text{С}}$ та струмів мережі $I_{\text{А}}$, $I_{\text{В}}$, $I_{\text{С}}$ та навантаження $I_{\text{нА}}$, $I_{\text{нВ}}$, $I_{\text{нС}}$. Обчислюється струм системи компенсації $I_{\text{кА}}$, $I_{\text{кВ}}$, $I_{\text{кС}}$. Вимірювання проводять дискретно в i -й момент протягом часу дискретизації $T_{\text{д}}$, з діапазоном 1...100 мкс. Період вимірювань T обирається рівним 0,02с. В результаті отримують масив із N значень по кожному параметру з кутовим кроком $p = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot T_{\text{д}}$

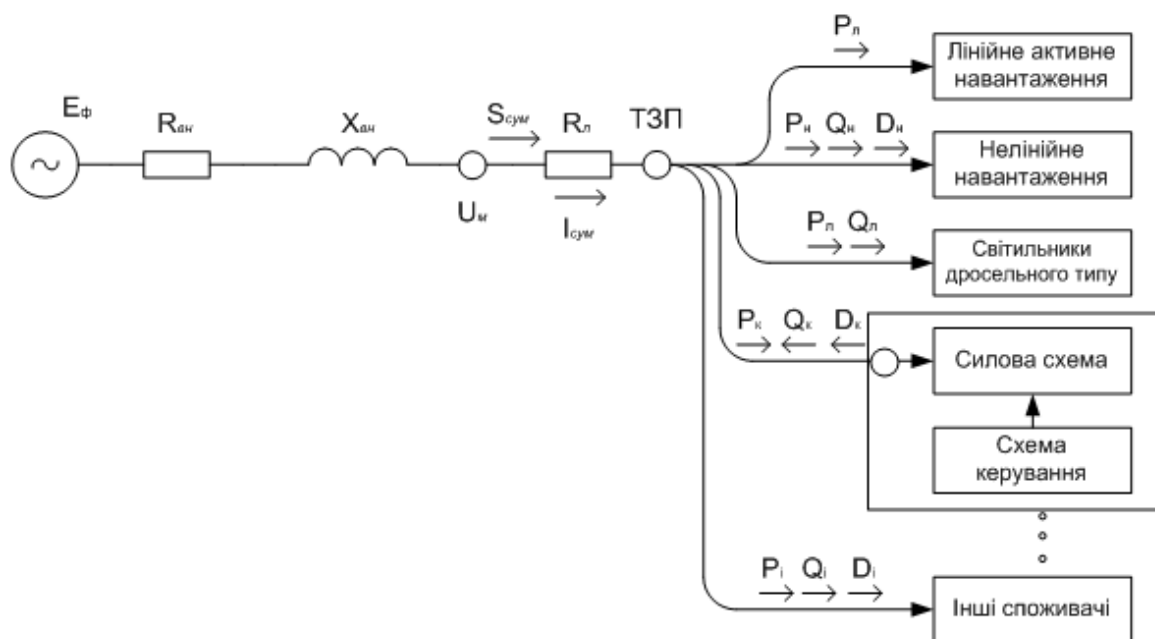


Рисунок 4.11 - Система електропостачання з компенсуючим пристроєм

Споживачі, представлені на рисунку 4.11, включають такі елементи (стрілки вказують напрямок передачі потужності):

- Лінійне навантаження, яке споживає лише активну потужність $P_{\text{л}}$
- Нелінійне навантаження, що споживає активну потужність $P_{\text{н}}$, реактивну потужність $Q_{\text{н}}$ та потужність спотворення $D_{\text{н}}$.
- Світильники дросельного типу, які споживають активну $P_{\text{с}}$ та реактивну потужність $Q_{\text{с}}$.
- Компенсуючий пристрій, що є джерелом вторинного електропостачання з компенсацією спотворень в живлячій мережі, і споживає активну $P_{\text{к}}$, реактивну $Q_{\text{к}}$ та потужність спотворення $D_{\text{к}}$.
- Інші споживачі, які в загальному випадку споживають активну $P_{\text{і}}$, реактивну потужність $Q_{\text{і}}$ і потужність спотворення $D_{\text{і}}$.
- Вхідна напруга мережі $U_{\text{м}}$, яка забезпечує живлення для всієї системи.

Функціональна схема пристрою компенсації реактивної потужності, показана на рисунку 4.12, включає такі складові:

- Вимірювальна система, що складається з датчиків струму (ДС) та датчиків напруги (ДН).
- Система управління, до якої входять аналоговий комутатор (АК), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), пристрій зв'язку (ПЗ), електронно-обчислювальна машина (ЕОМ) і блок управління ключами (БУК).
- Система компенсації, яка включає конденсаторні батареї (С1-С3), реактори (L1-L3), управляючий транзистор та навантаження.

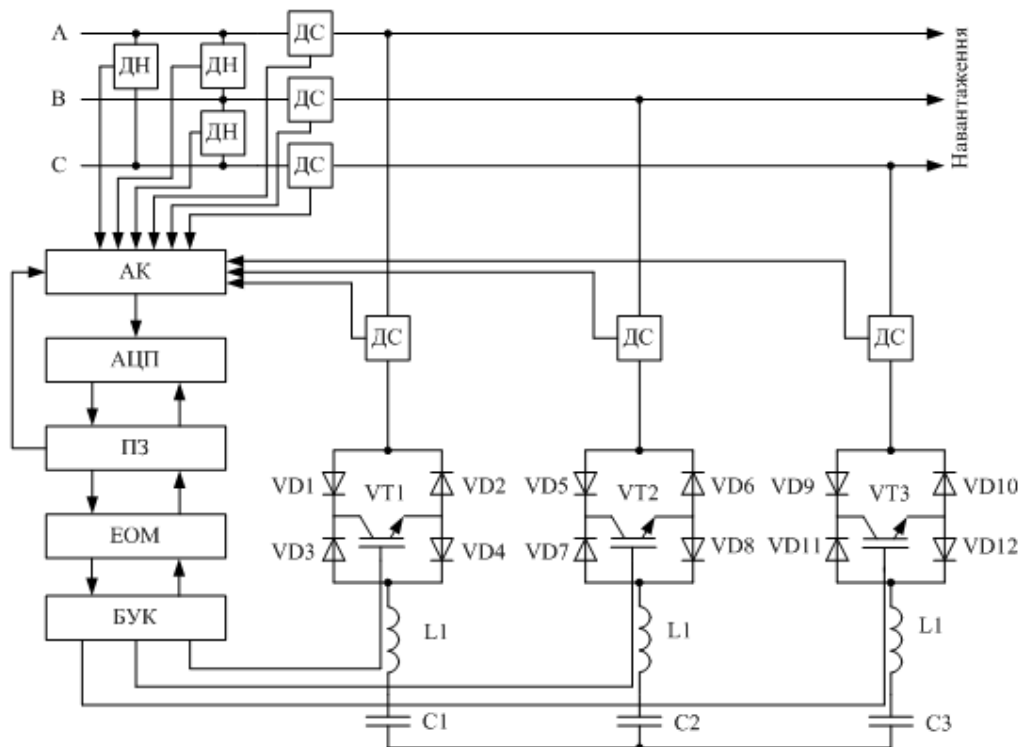


Рисунок 4.12 - Функціональна схема пристрою компенсації

З метою знаходження кута зсуву струму від напруги для кожної фази, використовуючи отримані значення напруги U_{Ai} , U_{Bi} , U_{Ci} та струму I_{Ai} , I_{Bi} , I_{Ci} мережі для кожної фази, визначаються гармонійні складові вказаних параметрів. Обчислюються на підставі розкладання в ряд Фур'є наступні величини:

- постійні складові напруги та струму (середнє значення) для кожної фази:

$$AU_{A0} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Ai} ; AI_{A0} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Ai} ; \quad (4.3)$$

$$AU_{B0} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Bi} ; AI_{B0} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Bi} ; \quad (4.4)$$

$$AU_{C0} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Ci} ; AI_{C0} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Ci} ; \quad (4.5)$$

- синусні складові напруги та струму для кожної фази:

$$AU_{Ak} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Ai} \cdot \sin(k \cdot i \cdot p) ; AI_{Ak} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Ai} \cdot \sin(k \cdot i \cdot p) ; \quad (4.6)$$

$$AU_{Bk} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Bi} \cdot \sin(k \cdot i \cdot p) ; AI_{Bk} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Bi} \cdot \sin(k \cdot i \cdot p) ; \quad (4.7)$$

$$AU_{Ck} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Ci} \cdot \sin(k \cdot i \cdot p) ; AI_{Ck} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Ci} \cdot \sin(k \cdot i \cdot p) ; \quad (4.8)$$

- косинусні складові напруги та струму для кожної фази:

$$BU_{Ak} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Ai} \cdot \cos(k \cdot i \cdot p) ; BI_{Ak} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Ai} \cdot \cos(k \cdot i \cdot p) ; \quad (4.9)$$

$$BU_{Bk} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Bi} \cdot \cos(k \cdot i \cdot p) ; BI_{Bk} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Bi} \cdot \cos(k \cdot i \cdot p) ; \quad (4.10)$$

$$BU_{Ck} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{Ci} \cdot \cos(k \cdot i \cdot p); BI_{Ck} = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^N I_{Ci} \cdot \cos(k \cdot i \cdot p). \quad (4.11)$$

З отриманих складових значень струму та напруги обчислюються амплітуди напруги MU_{Ak} , MU_{Bk} , MU_{Ck} та струму MI_{Ak} , MI_{Bk} , MI_{Ck} k -ї гармоніки для кожної фази:

$$MU_{Ak} = \sqrt{(AU_{Ak})^2 + (BU_{Ak})^2}; MI_{Ak} = \sqrt{(AI_{Ak})^2 + (BI_{Ak})^2}; \quad (4.12)$$

$$MU_{Bk} = \sqrt{(AU_{Bk})^2 + (BU_{Bk})^2}; MI_{Bk} = \sqrt{(AI_{Bk})^2 + (BI_{Bk})^2}; \quad (4.13)$$

$$MU_{Ck} = \sqrt{(AU_{Ck})^2 + (BU_{Ck})^2}; MI_{Ck} = \sqrt{(AI_{Ck})^2 + (BI_{Ck})^2}; \quad (4.14)$$

та фазовий кут напруг φU_{Ak} , φU_{Bk} , φU_{Ck} та струмів φI_{Ak} , φI_{Bk} , φI_{Ck} k -ї гармоніки для кожної фази:

$$\varphi U_{Ak} = \arctg \frac{AU_{Ak}}{BU_{Ak}}; \varphi I_{Ak} = \arctg \frac{AI_{Ak}}{BI_{Ak}}; \quad (4.15)$$

$$\varphi U_{Bk} = \arctg \frac{AU_{Bk}}{BU_{Bk}}; \varphi I_{Bk} = \arctg \frac{AI_{Bk}}{BI_{Bk}}; \quad (4.16)$$

$$\varphi U_{Ck} = \arctg \frac{AU_{Ck}}{BU_{Ck}}; \varphi I_{Ck} = \arctg \frac{AI_{Ck}}{BI_{Ck}}; \quad (4.17)$$

Із знайдених складових значень фазового кута напруги першої гармоніки φU_{A1} , φU_{B1} , φU_{C1} для кожної фази та фазового кута струму першої гармоніки φI_{A1} , φI_{B1} , φI_{C1} для кожної фази знаходиться різниця між заданим

значенням коефіцієнту потужності та поточним значенням коефіцієнту потужності для кожної фази:

$$\Delta \varphi_A = \varphi_A^{\text{зад}} - (\varphi U_{A1} - \varphi I_{A1}); \quad (4.18)$$

$$\Delta \varphi_B = \varphi_B^{\text{зад}} - (\varphi U_{B1} - \varphi I_{B1}); \quad (4.19)$$

$$\Delta \varphi_C = \varphi_C^{\text{зад}} - (\varphi U_{C1} - \varphi I_{C1}). \quad (4.20)$$

Обчислюються поточні значення коефіцієнта форми напруги – відношення діючого значення напруги $U_{\partial A}$, $U_{\partial B}$, $U_{\partial C}$ до його середнього значення U_{cA} , U_{cB} , U_{cC} для кожної фази:

$$K_{\phi A} = \frac{U_{\partial A}}{U_{cA}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0} U_{Ai}^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=0} U_{Ai}}; \quad (4.21)$$

$$K_{\phi B} = \frac{U_{\partial B}}{U_{cB}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0} U_{Bi}^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=0} U_{Bi}}; \quad (4.22)$$

$$K_{\phi C} = \frac{U_{\partial C}}{U_{cC}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0} U_{Ci}^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=0} U_{Ci}}. \quad (4.23)$$

Обчислені значення коефіцієнту форми напруги зрівнюються із заданими значеннями для кожної фази:

$$\Delta K_{\phi A} = K_{\phi A}^{\text{зад}} - K_{\phi A}; \quad (4.24)$$

$$\Delta K_{\phi A} = K_{\phi A}^{зад} - K_{\phi A}; \quad (4.25)$$

$$\Delta K_{\phi A} = K_{\phi A}^{зад} - K_{\phi A}. \quad (4.26)$$

В результаті порівняння виявлено зміну частоти модуляції підключення та відключення стану конденсаторної батареї за відповідною фазою.

Обчислюється відхилення напруги $\Delta U_{\partial A}$, $\Delta U_{\partial B}$, $\Delta U_{\partial C}$ по кожній фазі:

$$\Delta U_{\partial A} = U_{\partial A}^{зад} - U_{\partial A}; \quad (4.27)$$

$$\Delta U_{\partial B} = U_{\partial B}^{зад} - U_{\partial B}; \quad (4.28)$$

$$\Delta U_{\partial C} = U_{\partial C}^{зад} - U_{\partial C}. \quad (4.29)$$

При умові, що модуль поточного діючого значення напруги не відповідає нерівності $|\Delta U_{\partial A}| < 0,1 \cdot U_{\partial A}^{зад}$, або $|\Delta U_{\partial B}| < 0,1 \cdot U_{\partial B}^{зад}$, або $|\Delta U_{\partial C}| < 0,1 \cdot U_{\partial C}^{зад}$ система компенсації відключається та видається попереджувальний сигнал.

Використання пристрою веде до зміни режиму роботи енергетичної системи. Загальний струм, що споживається системою I_{Σ} і втрати активної ΔP потужності в точці загального приєднання будуть змінюватися. Якщо система обладнана джерелом вторинного електропостачання, яке здійснює компенсацію викривлень у живлячій мережі, то таке джерело споживатиме лише активну потужність, тобто $Q_k = 0$ і $D_k = 0$:

$$I_{\Sigma} = \frac{S_{\Sigma M}}{U_M} = \frac{\sqrt{(P_{\pi} + P_{\kappa} + P_{\epsilon} + P_i)^2 + (Q_{\kappa} + Q_{\epsilon} + Q_i)^2 + (D_{\kappa} + D_i)^2}}{U_M}; \quad (4.30)$$

$$\Delta P = I_{\Sigma}^2 \cdot (R_{\epsilon\kappa} + R_{\kappa\epsilon}) = (R_{\epsilon\kappa} + R_{\kappa\epsilon}) \times \left[\frac{(P_{\pi} + P_{\kappa} + P_{\epsilon} + P_i)^2 + (Q_{\kappa} + Q_{\epsilon} + Q_i)^2 + (D_{\kappa} + D_i)^2}{U_M^2} \right]. \quad (4.31)$$

За умов використання пристрою, сумарний струм I_{Σ} , що споживається системою, а також втрати активної потужності ΔP в точці

загального приєднання будуть залежати від роботи всіх споживачів. Якщо джерело вторинного електропостачання з компенсацією спотворень в трьохфазній мережі змінного струму споживає тільки активну потужність, а в мережу генерується реактивна потужність $Q_k < 0$ та потужність спотворень $D_k < 0$, то результатом буде зменшення реактивної потужності, що знижує її негативний вплив на енергетичну ефективність. Втрати активної потужності у точці загального приєднання будуть знижені, оскільки джерело компенсує частину спотворень, зменшуючи навантаження на основне джерело живлення. Загальний споживаний струм буде відповідати лише активній потужності, зменшуючи загальне енергоспоживання і покращуючи коефіцієнт потужності системи:

$$I_{\Sigma} = \frac{S_{\Sigma}}{U_{\Sigma}} = \frac{\sqrt{(P_{\Sigma} + P_{\Sigma} + P_{\Sigma} + P_{\Sigma} + P_i)^2 + (Q_{\Sigma} + Q_{\Sigma} - Q_k + Q_i)^2 + (D_{\Sigma} - D_k + D_i)^2}}{U_{\Sigma}} \quad (4.32)$$

$$\Delta P = I_{\Sigma}^2 \cdot (R_{\Sigma} + R_{\Sigma}) = (R_{\Sigma} + R_{\Sigma}) \times \left[\frac{(P_{\Sigma} + P_{\Sigma} + P_{\Sigma} + P_{\Sigma} + P_i)^2 + (Q_{\Sigma} + Q_{\Sigma} - Q_k + Q_i)^2 + (D_{\Sigma} - D_k + D_i)^2}{U_{\Sigma}^2} \right]. \quad (4.33)$$

Таким чином, з виразів (4.30) та (4.32) можна зробити висновок, що в результаті роботи пристрою для підвищення коефіцієнту потужності та коефіцієнту форми напруги система здійснює компенсацію реактивної потужності та потужності спотворень, що забезпечує кілька позитивних ефектів:

- зниження втрат активної потужності в енергетичній системі;
- компенсація неактивної складової, включаючи реактивну потужність та потужність спотворень, що входить до складу загальної потужності;
- покращення показників якості електроенергії.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ ПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ

Впровадження пристроїв для управління компенсацією реактивної потужності слід підтвердити аналізом економічної доцільності нового обладнання. Система управління на основі транзисторного перетворювача з покращеними регулювальними властивостями коефіцієнта потужності має такі ключові переваги:

1. Зниження втрат потужності в електропостачальній системі.
2. Скорочення струму, що протікає через лінії електропередач.
3. Зменшення витрат на оплату реактивної енергії.
4. Розвантаження мережі за рахунок зниження реактивної потужності.

Новим обладнанням в даному контексті є пристрій для плавного регулювання ємності конденсаторної батареї, який дозволяє ефективно компенсувати реактивну потужність. Така компенсація сприяє зниженню споживання реактивної потужності, що, у свою чергу, підвищує коефіцієнт потужності системи.

Об'єктом впровадження обирається насосна станція, яка забезпечує водопостачання населених пунктів. У складі насосної станції зазвичай функціонує кілька насосних агрегатів, які можна запускати чи зупиняти залежно від обсягу необхідної подачі води. Оскільки навантаження на насосах змінюється відповідно до споживання води населенням, система управління повинна забезпечувати гнучкість компенсації реактивної потужності.

Насосні агрегати оснащені асинхронними двигунами номінальною потужністю 200 кВт. Як відомо, основними споживачами реактивної потужності на підприємствах є:

- асинхронні двигуни — 65–70%;
- трансформатори — 20–25%;

- повітряні електромережі, а також інші пристрої (реактори, індуктивні апарати тощо) — близько 10%.

Споживання реактивної потужності асинхронними двигунами залежить від їх коефіцієнта завантаження та номінального коефіцієнта потужності. Це вимагає врахування змінного характеру навантаження для забезпечення ефективної роботи системи компенсації.

Для розрахунку зекономленої електроенергії внаслідок зменшення втрат потужності під час використання системи компенсації реактивної потужності необхідно врахувати змінний характер роботи насосної станції. Це зумовлено нерівномірним споживанням води протягом доби, що впливає на режим роботи насосів і, відповідно, на споживання електроенергії двигунами, як показано на рисунку 5.1.

Аналіз графіка роботи насосної станції свідчить про те, що завантаженість насосів протягом доби варіюється, і не завжди одночасно працюють два насоси. Залежно від ступеня завантаження насосів змінюється $\cos\varphi$. Ця залежність є нелінійною, що призводить до змін активних і реактивних компонентів потужності у різні часові проміжки.

Зміна потужності споживання обумовлює зміну значення $\cos\varphi$, динаміка якого представлена на рисунку 5.2. З урахуванням цих змін розрахунок зекономленої електроенергії потребує розподілу добового періоду на часові інтервали, визначення потужностей у кожному інтервалі та інтеграції їх значень з урахуванням компенсації реактивної потужності.

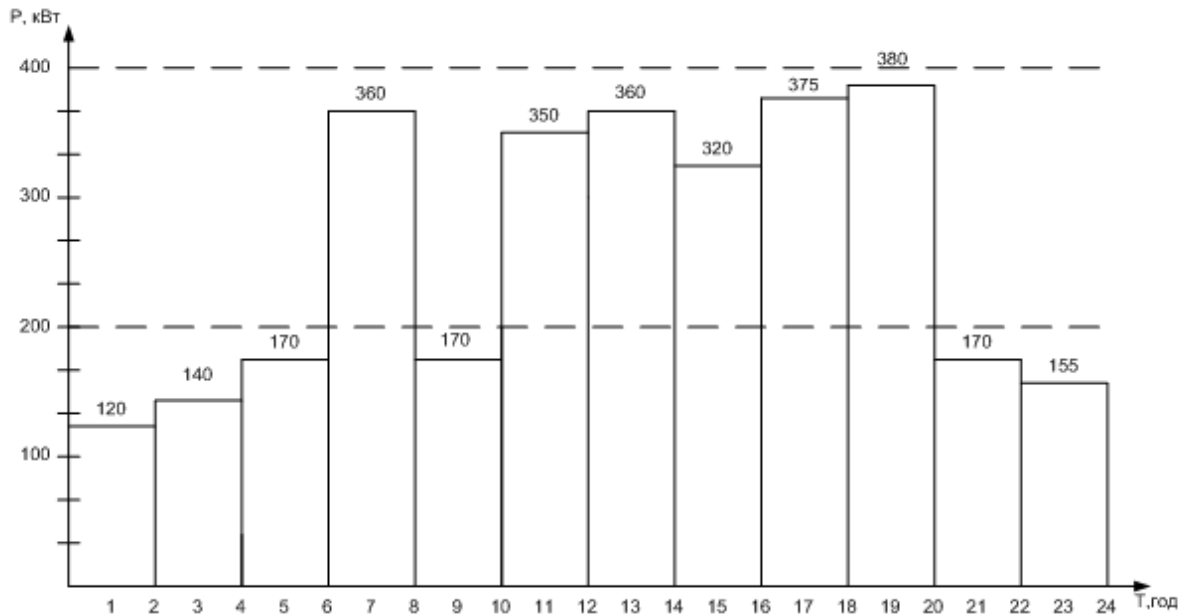
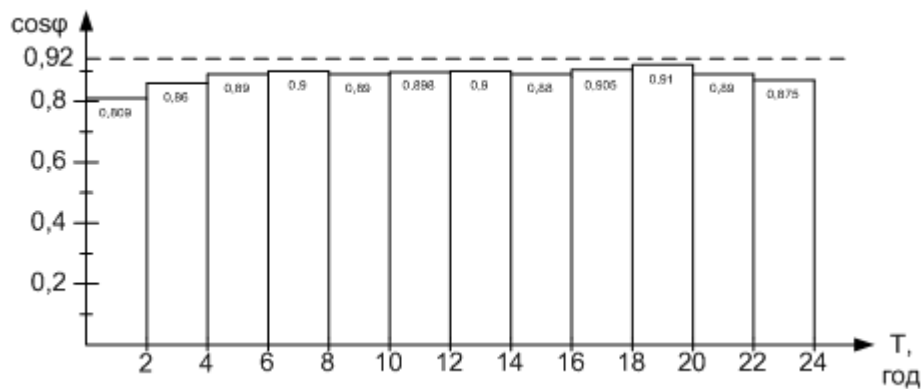


Рисунок 5.1 - Графік електроспоживання за добу



Рисунку 5.2 - Зміна cosφ залежно від часу доби

На насосній станції компенсація реактивної потужності проводиться на ділянці від насоса до розподільного пристрою. Тому розрахунок економії втрат потужності проводиться тільки на цій ділянці (рисунок 5.3).

Визначимо втрати потужності в системі електропостачання для кожного інтервалу часу з урахуванням того, що компенсована потужність досягатиме значення $\cos\varphi = 0.999$.

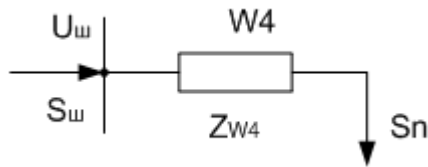


Рисунок 5.3 – Схема заміщення розімкненої ділянки

Втрати потужності розраховуємо відповідно методики [2].

$$\Delta P = \frac{(103,3^2 + (75,039 - 70,4)^2) \cdot 0,077}{6^2}; \Delta P = 22,81 Bm \quad (5.1)$$

$$\Delta Q = \frac{(103,3^2 + (75,039 - 70,4)^2) \cdot 1,76 \cdot 10^{-3}}{6^2}; \Delta Q = 0,523 BAp \quad (5.2)$$

Всі розрахункові значення запишемо в таблиці 5.1

Таблиця 5.1 - Визначення потужності і втрат.

Час	$P_{роз}, \kappa Bm$	$Q_{роз}, \kappa BAp$	Втрати потужності без компенсації		Втрати потужності з компенсацією	
			$\Delta P, Bm$	$\Delta Q, BAp$	$\Delta P, Bm$	$\Delta Q, BAp$
0 – 2	103,31	75,049	34,787	0,807	22,82	0,533
2 – 4	128,095	76,01	47,331	1,094	35,079	0,814
4 – 6	160,97	82,47	69,601	1,605	55,206	1,275
6 – 8	344,71	166,71	312,772	7,177	253,996	5,831
8 – 10	160,97	82,47	69,787	1,609	55,391	1,279
10 – 12	334,41	163,81	295,805	6,789	239,044	5,488
12 – 14	344,71	166,71	312,772	7,177	253,996	5,831
14 – 16	299,61	161,71	247,278	5,677	191,882	4,407
16 – 18	361,01	169,71	339,464	7,789	278,585	6,394
18 – 20	367,81	167,61	348,525	7,997	289,179	6,637
20 – 22	160,97	82,47	69,787	1,609	55,391	1,279
22 – 24	144,31	79,81	58,016	1,339	44,52	1,03

Зниження струму в мережі приводить до зменшення падіння напруги в лінії L3 та відповідно закону Ома становить:

$$\Delta U_{L3} = \sqrt{3} I_i \cdot Z, \quad (5.3)$$

де I_i - струм кабельної лінії для i –го інтервалу часу;

Z - повний опір кабельній лінії.

$$I_i = \frac{\sqrt{P_{роз}^2 + Q_{роз}^2 - Q_{БЛЖ}^2}}{U_n}, \quad (5.4)$$

де $P_{роз}, Q_{роз}$ - розрахункові величини активної і реактивної потужності;

U_n - значення номінальної напруги ділянки (6000 В);

Розрахунки зведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Значення струму та падіння напруги в лінії

Години доби	$P_{роз}, кВт$	$Q_{роз}, кВАр$	Струм і напруга без компенсації		Струм і напруга з компенсацією	
			$I_i, А$	$\Delta U_{W4}, В$	$I_i, А$	$\Delta U_{W4}, В$
0 – 2	103,31	75,049	21,29	2,841	17,244	2,303
2 – 4	128,095	76,01	24,833	3,313	21,379	2,853
4 – 6	160,97	82,47	30,112	4,015	26,818	3,577
6 – 8	344,71	166,71	63,825	8,501	57,518	7,662
8 – 10	160,97	82,47	30,152	4,021	26,864	3,583
10 – 12	334,41	163,81	62,07	8,268	55,799	7,433
12 – 14	344,71	166,71	63,825	8,501	57,518	7,662
14 – 16	299,61	161,71	56,752	7,56	49,993	6,661
16 – 18	361,01	169,71	66,493	8,856	60,237	8,024
18 – 20	367,81	167,61	67,374	8,973	61,371	8,175
20 – 22	160,97	82,47	30,152	4,021	26,864	3,583
22 – 24	144,31	79,81	27,493	3,667	24,084	3,213

Під час розрахунків втрат активної та реактивної потужності слід оцінити ефективність впровадження системи компенсації реактивної потужності на насосній станції. Для цього порівнюється використання некерованих і керованих конденсаторних батарей. У таблиці 5.3 наведено

дані про споживання активної та реактивної потужності залежно від режиму роботи насосної станції. Також представлено такі показники: $Q_{кп}$ - значення реактивної потужності некерованої батареї, $Q_{п}$ - величина споживаної реактивної потужності після компенсації цією батареєю, $Q_{укп}$ - параметри реактивної потужності керованої батареї та $Q_{с}$ - величина реактивної потужності після її застосування для компенсації.

Таблиця 5.3. Показники реактивної потужності.

Час	$P_{роз},$ кВт	$Q_{роз},$ кВАр	$Q_{кп},$ кВАр	$Q_{п},$ кВАр	$Q_{укп},$ кВАр	$Q_{с},$ кВАр
0 – 2	103,31	75,049	87,01	-11,95	70,41	4,65
2 – 4	128,095	76,01	87,01	-10,99	70,26	5,76
4 – 6	160,97	82,47	87,01	-4,53	75,26	7,22
6 – 8	344,71	166,71	87,01	79,71	151,26	15,46
8 – 10	160,97	82,47	87,01	-4,53	75,26	7,22
10 – 12	334,41	163,81	87,01	76,81	148,81	15,01
12 – 14	344,71	166,71	87,01	79,71	151,31	15,41
14 – 16	299,61	161,71	87,01	74,71	148,31	13,41
16 – 18	361,01	169,71	87,01	82,71	153,56	6,16
18 – 20	367,81	167,61	87,01	80,61	151,16	16,46
20 – 22	160,97	82,47	87,01	-4,53	75,26	7,22
22 – 24	144,31	79,81	87,01	-7,19	73,36	6,46

З аналізу даних таблиці 5.3 видно, що використання некерованої конденсаторної батареї для компенсації реактивної потужності призводить до появи режимів недокомпенсації або перекомпенсації. Це обумовлено тим, що навантаження у споживача змінюється і не залишається постійним.

Споживання активної потужності відповідно графіку навантажень за перший інтервал часу складе:

$$W_P = t \cdot P_{п}, \quad (5.5)$$

де t – інтервал часу 2 год.;

$P_{п}$ - величина активної потужності 1 – го інтервалу часу.

$$W_p = 2 \cdot 103,305 = 206,61 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Споживання реактивної потужності відповідно графіку навантажень за перший інтервал часу становить:

$$W_Q = t \cdot Q_{II} = 2 \cdot 75,045 = 150,09 \text{ квар} \cdot \text{год}, \quad (5.6)$$

де Q_{II} - значення реактивної потужності 1 – го інтервалу.

$$W_Q = 2 \cdot 75,045 = 150,09 \text{ квар} \cdot \text{год}$$

Наступні результати розрахунків наведено у таблиці 5.4. У ній також вказані показники споживання реактивної потужності після застосування некерованої конденсаторної батареї (КБ) та після використання керованої КБ для компенсації.

Таблиця 5.4. Споживання активної і реактивної потужності.

Час	Споживання потужності залежно від графіка навантажень		Споживання реактивної потужності після компенсації некерованою КБ	Споживання реактивної потужності після компенсації керованою КБ
t г.	$W_p, \text{кВт} \cdot \text{ч}$	$W_Q, \text{кВАр} \cdot \text{ч}$	$W_{Qn}, \text{кВАр} \cdot \text{ч}$	$W_{Qc}, \text{кВАр} \cdot \text{ч}$
0 – 2	206,7	150,18	-23,82	4,74
2 – 4	256,27	152,1	-21,9	5,85
4 – 6	322,02	165,02	-8,98	7,31
6 – 8	689,5	333,5	159,5	15,55
8 – 10	322,02	165,02	-8,98	7,31
10 – 12	668,9	327,7	153,7	15,1
12 – 14	689,5	333,5	159,5	15,5
14 – 16	599,3	323,5	149,5	13,5
16 – 18	722,1	339,5	165,5	6,25
18 – 20	735,7	335,3	161,3	16,55
20 – 22	322,02	165,02	-8,98	7,31
22 – 24	288,7	159,7	-14,3	6,55
Всього за 24	5821,6	2948,9	1036,06	120,42

Витрати на споживання активної потужності протягом складуть:

$$З_p = T_\phi \cdot t \cdot W_{P_\Sigma}, \quad (5.7)$$

де T_ϕ - тариф на електроенергію(4,7 грн);

t - період роботи насосної станції за 1 рік(8736 ч)

W_{P_Σ} - сумарна активна потужність, споживана насосною станцією
(5821,5 кВт)

$$З_p = 4,7 \cdot 8736 \cdot 5821,5 = 238861 \text{ тис.грн.}$$

Плата за споживання і генерацію реактивної потужності визначається:

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 \quad (5.8)$$

де Π_1 - основна плата спожитої та генеруємої реактивної потужності;

Π_2 - надбавка за недостатнє оснащення засобами компенсації;

$$\Pi_1 = (WQ_{cn} + K \cdot WQ_z) \cdot D \cdot T, \quad (5.9)$$

де WQ_{cn} - споживання реактивної енергії в точці обліку, $\text{кВАр} \cdot \text{год}$;

WQ_z - генерація реактивної енергії в мережу електропередавальної організації в точці обліку;

$D = 0,087$ - ЕЕРП для підприємств, який враховує характеризує частку впливу реактивного перетікання в точці обліку на техніко-економічні показники, $\text{кВАр} / \text{кВт}$;

$T = 4,7$ - середньозважена фактична ціна на ринку, $\text{грн} / \text{кВт} \cdot \text{год}$.

$$\Pi_2 = \Pi_1 \cdot C_{\text{баз}} \cdot (K_\phi - 1), \quad (5.10)$$

де Π_1 - основна плата;

$C_{\text{баз}} = 1$ - нормативний базовий коефіцієнт стимулювання капітальних вкладень в засоби компенсації;

K_ϕ - коефіцієнт, що залежить від фактичного коефіцієнта потужності споживача $\tan\phi$. При розрахунках вводиться зона нечутливості надбавки Π_2 до споживання реактивної потужності при умові $\cos\phi = 0.97$ ($\tan\phi = 0.25$). Надбавка враховується, якщо фактичний коефіцієнт потужності менше значення $\cos\phi$. Для даної системи $\cos\phi = 0,884$ ($\tan\phi = 0,528$) коефіцієнт $K_\phi = 1,078$

Плата за споживану реактивну енергію при некерованій компенсації.
 Споживання реактивної потужності протягом року $WQ_{cn} = 10509408 \text{кВАр} / \text{год}$, генерація $WQ_g = 23482368 \text{кВАр}$:

Основна плата спожитої реактивної енергії:

$$\Pi_1 = (10509408 + 3 \cdot 23482368) \cdot 0,087 \cdot 4,7 = 29235,5 \text{тис.грн.}$$

Надбавка за недостатнє оснащення електричної мережі споживача засобами компенсації реактивної потужності:

$$\Pi_2 = 29235,5 \cdot 1 \cdot (1 - 1) = 0$$

Повна плата за спожиту реактивну потужність некерованої системи:

$$\Pi_{nc} = 29235,5 \text{тис.грн.}$$

Плата за споживану реактивну енергію при керованій компенсації.
 Значення реактивної потужності, що споживається протягом року складає $WQ_{cn} = 905014656 \text{кВАр} / \text{год}$, генерація $WQ_g = 18240768 \text{кВАр}$

основна плата спожитої реактивну енергію:

$$\Pi_1 = (905014656 + 3 \cdot 18240768) \cdot 0,087 \cdot 4,7 = 26077 \text{тис.грн.},$$

Надбавка за недооснащення засобами компенсації реактивної потужності:

$$\Pi_2 = 26077 \cdot 1 \cdot (10121 - 1) = 315,5 \text{тис.грн.},$$

Повна плата за спожиту реактивну потужність керованої системи:

$$П_{КС} = 26077 + 315,5 = 26392,5 \text{ тис. грн.},$$

Система управління компенсацією реактивної потужності, побудована на транзисторному перетворювачі з покращеними регулювальними властивостями коефіцієнта потужності, є вигідним інвестиційним рішенням для оптимізації системи електропостачання. Впровадження такої системи дозволяє знизити втрати потужності, зменшити струми у лініях електропередач, скоротити витрати на оплату реактивної енергії та зменшити навантаження мережі реактивною потужністю.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Вимоги безпеки при користуванні конденсаторними установками.

Ця глава визначає вимоги до конденсаторних установок, які працюють з напругою від 0,22 кВ до 10 кВ при частоті 50 Гц. Вони використовуються для компенсації реактивної потужності та регулювання напруги, приєднуючись паралельно до індуктивних елементів електромережі споживача.

Розташування, експлуатація та захист конденсаторних установок повинні відповідати нормам Правил улаштування електроустановок (ПУЕ).

Дозволяється використання спільної пускової апаратури для конденсаторних батарей без автоматичного регулювання потужності разом із пусковими пристроями технологічного обладнання. Це забезпечує можливість реалізації індивідуальної або групової компенсації реактивної потужності.

Конденсаторна установка повинна перебувати в технічному стані, що гарантує її стабільну та тривалу роботу.

Режим роботи конденсаторної установки має бути автоматизованим, якщо ручне керування не дозволяє досягти необхідного рівня якості електроенергії.

Умови праці під час експлуатації конденсаторних установок та застосування засобів індивідуального захисту повинні відповідати вимогам НПАОП 40.1-1.21-98 та розділам 6.17, 6.19 цих Правил.

Тип, потужність, місце установки та режим роботи компенсувальних пристроїв визначаються проектною або спеціалізованою організацією відповідно до технічних умов електропередавальної компанії щодо приєднання електроустановок. Вибір враховує технічні характеристики та режими роботи електроустановок споживачів, а також відповідність чинним нормативним документам з компенсації реактивної потужності.

Розташування конденсаторів та режими їх роботи повинні забезпечувати мінімізацію втрат активної потужності від реактивних навантажень, з одночасним дотриманням вимог для підтримки необхідного рівня напруги на входах споживачів.

У паспорті конденсаторної батареї повинна бути зазначена інформація про кожен конденсатор, включаючи порядковий номер, заводський номер, дату установки, номінальну напругу, потужність і ємність, відповідно до даних, вказаних на паспортній табличці виробника та на табличці батареї в цілому.

У приміщеннях або шафах, де розташовані конденсаторні батареї (незалежно від їх місця розташування), повинні бути наявні наступні елементи:

- однолінійна принципова схема конденсаторної установки, яка включає номінальні значення сили струму плавких вставок запобіжників для захисту окремих конденсаторів, батареї або її частини, а також значення уставки реле максимального струму, якщо застосовується захисне реле;
- стаціонарні пристрої для пофазного вимірювання струму, причому для установок потужністю до 400 кВ•А допускається використання одного перемикаючого пристрою за фазами;
- термометр або датчик для вимірювання температури навколишнього повітря;
- спеціальна штанга для контрольного розрядження конденсаторів;
- резервний запас запобіжників відповідно до номінальних струмів плавких вставок;
- первинні засоби пожежогасіння, кількість і вид яких визначаються згідно з вимогами НАПБ А.01.001-2004 та іншими нормативними документами з пожежної безпеки.

Пристрої для вимірювання температури повинні бути встановлені в найгарячішій частині батареї, посередині між конденсаторами. Це

забезпечить можливість спостереження за показниками без необхідності вимикати установку та знімати огорожу.

Якщо температура навколишнього повітря в місці установки конденсаторів є нижчою за гранично допустиму мінімальну температуру, зазначену на паспортній табличці, увімкнення конденсаторної установки заборонено.

Конденсаторну установку можна вмикати лише після того, як температура навколишнього повітря підніметься до значення, вказаного на паспорті.

Температура навколишнього повітря в місці розташування конденсаторів не повинна перевищувати максимально допустиму температуру, вказану на їх паспортних табличках. Якщо температура перевищує це значення, необхідно вжити заходів для покращення вентиляції. Якщо протягом години температура не знижується, установку слід вимкнути.

Щоб уникнути перевантаження електричних мереж споживачів реактивною потужністю, якщо такий режим не погоджений з електропередавальною компанією, конденсаторні установки повинні бути відключені від мережі в неробочі години підприємства.

Для установок на напругу понад 1 кВ розрядні пристрої повинні бути постійно підключені до конденсаторів, при цьому в колі між резисторами та конденсаторами не повинно бути комутаційних апаратів.

Для конденсаторних установок на напругу до 1 кВ, з метою економії електроенергії, рекомендується використовувати схему без постійно підключених розрядних пристроїв, забезпечуючи автоматичне приєднання розрядних пристроїв при вимкненні конденсаторів.

Якщо для секціонування конденсаторної батареї використовуються комутаційні апарати, що вимикають окремі секції під напругою, на кожній секції слід встановити окремий комплект розрядних пристроїв.

Для конденсаторів, що мають вбудовані розрядні резистори, додаткові зовнішні розрядні пристрої не потрібні.

Увімкнення та вимкнення конденсаторних установок на напругу 1 кВ і більше за допомогою роз'єднувачів заборонено.

Всі операції щодо увімкнення та вимкнення батарей конденсаторів повинні виконуватись згідно з вимогами цих Правил та ПБЕЕС.

Заборонено вмикати конденсаторну батарею, якщо напруга на збірних шинах перевищує максимальне допустиме значення для конкретного типу конденсаторів.

Перед вимкненням конденсаторної установки необхідно перевірити стан розрядного пристрою за допомогою зовнішнього огляду.

Заміна згорілих або несправних запобіжників має відбуватись на вимкненій конденсаторній батареї після контрольного розряду всіх конденсаторів за допомогою спеціальної штанги.

Якщо встановлено індивідуальний захист, контрольне розрядження здійснюється шляхом почергового з'єднання між собою всіх виводів кожного конденсатора, який входить до складу вимкненої батареї. У разі наявності групового захисту розряджається кожна група конденсаторів, а за умов загального захисту замикаються відповідні шини в ошиновці батареї.

При вимкненні конденсаторної установки повторне її увімкнення для конденсаторів на напругу понад 1 кВ дозволяється не раніше ніж через 5 хвилин після вимкнення, а для конденсаторів на напругу 660 В і нижче — не раніше ніж через 1 хвилину.

Увімкнення конденсаторної установки, яка була вимкнена через дію захисту, дозволяється лише після з'ясування та усунення причини, яка спричинила її вимкнення.

Огляд конденсаторної установки без вимкнення має проводитися з такою періодичністю:

- на об'єктах із постійним чергуванням працівників — не рідше одного разу на добу;
- на об'єктах без постійного чергування працівників — не рідше одного разу на місяць.

Під час огляду конденсаторної установки необхідно перевірити:

- справність огорожі, цілісність замків, відсутність сторонніх предметів;
- чистоту, відсутність пилу, бруду, тріщин на ізоляторах;
- температуру навколишнього повітря в найгарячішому місці приміщення, де розташована батарея;
- відсутність спучування стінок конденсаторів та слідів витікання просочувальної рідини (масла, совтола тощо); наявність таких плям не є підставою для виведення конденсаторів з експлуатації, але їх необхідно взяти під нагляд;
- цілісність плавких вставок у запобіжниках відкритого типу (зовнішнім оглядом);
- значення сили струму та рівномірність навантаження окремих фаз батареї конденсаторів;
- значення напруги на шинах конденсаторної установки або на шинах найближчої розподільчої установки (РУ);
- справність кола розрядного пристрою;
- справність всіх контактів (зовнішнім оглядом) електричної схеми увімкнення батареї конденсаторів (струмопровідних шин, заземлення, роз'єднувачів, вимикачів тощо);
- наявність і справність блокування для безпечної експлуатації;
- наявність і справність засобів захисту (наприклад, спеціальної штанги) та засобів гасіння пожежі.

Позачергові огляди конденсаторних установок повинні проводитись у таких випадках:

- при виникненні розрядів (тріску) у конденсаторних батареях;
- при підвищенні напруги на затискачах або температури навколишнього повітря до значень, близьких до гранично допустимих.

Результати таких оглядів повинні бути зафіксовані в оперативному журналі.

Експлуатація конденсаторних батарей забороняється в наступних випадках:

- якщо напруга на виводах одиничного конденсатора перевищує 110 % від його номінальної напруги або напруга на шинах, до яких приєднано конденсаторні батареї, перевищує 110 % від номінальної напруги конденсаторів;

- якщо температура навколишнього повітря знаходиться поза межами гранично допустимих значень для конденсаторів цього типу, згідно з паспортними даними конденсаторних установок;

- при спучуванні стінок конденсаторів;

- при нерівномірному навантаженні фаз конденсаторної установки понад 10 % від середнього значення сили струму;

- при збільшенні сили струму батареї понад 30 % від її номінальної потужності;

- при краплинному витіканні просочувальної рідини;

- при пошкодженні фарфорового ізолятора.

Конденсатори, просочені трихлордифенілом, повинні бути позначені на корпусі розпізнавальним знаком у вигляді жовтого рівностороннього трикутника, розташованого поруч з табличкою з паспортними даними.

При технічному обслуговуванні таких конденсаторів необхідно вжити заходів, щоб запобігти потраплянню трихлордифенілу в навколишнє середовище. Якщо конденсатори, просочені трихлордифенілом, вийшли з ладу, і немає можливості їх утилізації, їх слід знищувати (захоронювати) у спеціально визначених місцях, що відповідають вимогам санітарно-епідеміологічних служб.

Капітальний ремонт конденсаторних установок має проводитися не рідше ніж один раз на 8 років. Поточні ремонти повинні проводитися щорічно.

ВИСНОВКИ

Аналіз показав, що сучасні системи компенсації реактивної потужності мають обмежену ефективність у керуванні струмом компенсації. Існуючі рішення включають управлінську, вимірювальну та керуючу підсистеми. У системах із дискретним регулюванням ємності компенсація реактивної потужності зменшується, однак часто виникають режими як недокомпенсації, так і перекомпенсації. Тому особливу увагу слід приділяти системам, що дозволяють плавно регулювати ємність конденсаторних батарей.

Математичне моделювання енергетичних процесів у трифазних мережах змінного струму показує, що сучасні комплекси з перетворювальними пристроями можуть поліпшувати роботу технологічних об'єктів, але при цьому вони погіршують якість електричної енергії. Важливо, щоб ці системи враховували вплив спотворень напруги та несинусоїдальних складових на якість енергопостачання. Зниження якості електричної енергії веде до погіршення енергетичних показників, зменшення надійності електричних мереж та скорочення терміну експлуатації електрообладнання.

На основі проведеного аналізу була розроблена функціональна схема системи компенсації реактивної потужності на основі транзисторного перетворювача, яка включає в себе такі основні компоненти: систему вимірювання (що складається з датчиків струму та напруги), систему управління (що включає блоки аналогового комутатора, аналого-цифрового перетворювача, пристрій зв'язку, електронно-обчислювальну машину та блок управління ключами) та систему компенсації, до складу якої входять транзистори, конденсаторні батареї та індуктивні елементи. Також була розроблена алгоритм роботи пристрою компенсації реактивної потужності.

Для аналізу режиму роботи цієї системи була створена модель однофазної системи, на основі якої проведено низку експериментів.

Використовуючи отримані експериментальні дані, були побудовані графіки, що показують діюче значення струму в мережі, величину 1-ї гармоніки струму, кут зсуву струму відносно напруги, а також коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму. Завдяки цьому аналізу були побудовані графіки, що дозволяють вибрати найбільш оптимальні режими роботи системи.

Для дослідження режимів роботи в трифазній системі електропостачання була розроблена модель трифазної системи компенсації, що включає систему електропостачання, вимірювальну систему, систему компенсації та споживача електричної енергії. У результаті проведених досліджень були побудовані графіки споживання активної та реактивної потужностей, а також струму споживача електричної енергії. Аналіз отриманих графіків показав, що система компенсації сприяє зменшенню споживання реактивної потужності та знижує амплітудні значення струму, споживаного споживачем.

Результати моделювання системи компенсації реактивної потужності показали, що розроблена структура моделі на основі транзисторного перетворювача забезпечує плавне регулювання еквівалентної ємності конденсаторної батареї. У системі електропостачання не виникають режими недокомпенсації або перекомпенсації. Проте, у мережі спостерігаються пульсації струму та спотворення форми напруги. Тому, крім встановлення системи компенсації, необхідно також передбачити встановлення фільтрів, налаштованих на резонансну частоту модуляції цієї системи компенсації.

Техніко-економічні розрахунки ефективності системи компенсації показали, що її впровадження призводить до зниження втрат як активної, так і реактивної потужності, що, у свою чергу, позитивно впливає на економічні показники.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кваліфікаційна робота магістра: метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
2. Електротехнічні системи електроспоживання / [Плешков П. Г., Зінзура В. В., Гарасьова Н. Ю., Котиш А. І., Величко Т. В., Плешков С. П.]; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова П. Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2021.– 209 с.
3. Енергетичний інжиніринг та менеджмент : в 3-х ч. Ч. 1. Проектування ефективних енергетичних систем / П.Г. Плешков, С.В. Серебренніков, О.І. Сіріков, І.В. Савеленко; під редакцією Заслуженого працівника освіти України, кандидата технічних наук, професора Плешкова П.Г. – М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2018.– 156 с.
4. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посіб. / [Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П.Г. та ін.] ; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Кіровоград : КНТУ, 2015. – 287 с. ISBN 978-966-402-076-0
5. Плешков С. П. Енергоефективний електропривод у промисловості та сільськогосподарському виробництві: навч. посіб. / Плешков С. П., Серебренніков С.В. - Кіровоград: КНТУ, 2016.- 156 с.
6. Технічні та організаційні вимоги до побудови автоматизованих систем обліку електроенергії на об'єктах НЕК «Укренерго» (друга редакція) // Затв. наук.-техн. радою НЕК «Укренерго», протокол від 22 вересня 2005 року № 6.

7. Сусіденко В. Т. Інформаційні системи і технології в обліку. [текст] навч. посіб. / В. Т. Сусіденко. – К.: «Центр учбової літератури», 2016. – 224 с.
8. Підконтрольна експлуатація обладнання насосних станцій : навчальний посібник / В. О. Панченко, В. Ф. Герман, О. В. Івченко та ін. ; за загальною редакцією В. О. Панченка. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 270 с.
9. Дьяков А.Ф., Овчаренко Н.І., Мікропроцесорний релейний захист і автоматика електроенергетичних систем. – М: МЕІ, 2000. – 197 с.
10. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М., Якість електричної енергії на промислових підприємствах. – К: Техніка, 1981. – 157 с.
11. Оптимізація режимів роботи статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності при їх живленні напругами полігональної форми за критерієм мінімуму питомої споживаної активної потужності – Ю.В. Грицюк, М.В. Петухов, Б.С. Рогальський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 2. – с. 46, 55.