

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

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2023 р.

Кваліфікаційна робота
магістра

на тему Розробка та впровадження пристроїв для зниження впливу
реактивної енергії на роботу електричної мережі

Виконав студент 2 курсу, групи ЕЛКМ-22
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

_____ **Григорій КОВАЛЬОВ**

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Керівник

_____ **к.т.н., доц., І. ГРИЦЮК**

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

_____ (підпис)

Рецензент

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

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

_____ **Е. НЕМЦЕВ**

(підпис)

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

Студент

_____ (підпис)

_____ (дата)

_____ (дата)

ЛУЦЬК – 2023

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

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

«_____» _____ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Григорію КОВАЛЬОВУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Розробка та впровадження пристроїв для зниження впливу реактивної енергії на роботу електричної мережі

керівник роботи Ірина ГРИЦЮК, канд. техн. наук, доцент
(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 11 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Найменування дільниці
підприємства/кіл-ть споживачів, шт./одинична потужність споживача,
кВт/коєф-т використання споживача, k_v / коєф-т потужності одиничного
споживача, $\cos \phi$: «металевий цех»: 9/12,0/0,40/0,75; «ремонтно-ливарний
цех»: 19/90,0/0,50/0,70; «ковальсько-зварювальний цех»:
22/55,0/0,60/0,65; «ковальсько-штампувальний цех»: 25/40,0/0,70/0,60;
«механічний цех»: 22/39,0/0,45/0,70; «механозбірний цех»: 18/40,0/0,7/0,75;
«компресорна з насосною»: 8/30,0/0,65/0,80; «освітлення»: 50/4,0/0,8/0,95.
Регламентоване значення коефіцієнта потужності – $\cos \phi = 0,97$. Довжина
з'єднувальних ліній – 50 м. Загальні припустимі втрати напруги – до 500 В.
Значення напівгодинного струму в період максимуму енергоспоживання –
1000 А. Довжина кабельної лінії від ГПП до ЦПП – 3,0 км.

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

1. Огляд потоків енергії у електричних мережах.
 2. Визначення поняття «реактивна потужність», огляд методів її компенсації та вплив на якість електричної енергії.
 3. Огляд і аналіз пристроїв компенсації реактивної потужності.
 4. Розрахунок параметрів електропостачання нелінійних споживачів.
 5. Моделювання системи електропостачання без та з пристроями по компенсації реактивної потужності.
 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)
- Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 4	І. ГРИЦЮК, доц. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЄМЦЕВ		

7. Дата видачі завдання 2 жовтня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	02.10.23 – 15.10.23	
2.	Розділ 2	16.10.23 – 29.10.23	
3.	Розділ 3	30.10.23 – 12.11.23	
4.	Розділ 4	15.04.23 – 03.12.23	
5.	Розділ 5	04.12.23 – 10.12.23	
6.			

Студент _____
(підпис)

Григорій КОВАЛЬОВ
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ірина ГРИЦЮК
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Григорій КОВАЛЬОВ. Розробка та впровадження пристроїв для зниження впливу реактивної енергії на роботу електричної мережі / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2023.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі наведено загальні відомості про потоки енергії у електричних мережах, їх розподіл. Особлива увага приділена поняттю «реактивна потужність» та методам її компенсації та вплив на якість електричної енергії.

У другому розділі було виконано огляд пристроїв компенсації реактивної потужності.

У третьому розділі здійснено розрахунок параметрів електропостачання нелінійних споживачів.

У четвертому розділі було здійснено моделювання системи електропостачання без та з пристроями по компенсації реактивної потужності.

Ключові слова: електрична мережа, реактивна потужність, компенсація реактивної потужності, блоки конденсаторів, синхронні компенсатори, фільтр, компенсатор зі штучною комутацією, нелінійне навантаження, моделювання

SUMMARY

Grigory KOVALEV. Development and implementation of devices to reduce the impact of reactive power on the operation of the electrical network / Graduation qualifying work for obtaining an educational level «master» in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Lutsk, 2023.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four chapters, conclusions, a list of references and appendices.

The first chapter provides general information about energy flows in power grids and their distribution. Particular attention is paid to the concept of "reactive power" and methods of its compensation and impact on the quality of electricity.

Section two provides an overview of reactive power compensation devices.

In the third section, the parameters of power supply to nonlinear consumers are calculated.

In the fourth section, the power supply system was modeled without and with reactive power compensation devices.

Keywords: power grid, reactive power, reactive power compensation, capacitor banks, synchronous compensators, filter, artificially switched compensator, nonlinear load, modeling

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПОТОКИ ЕНЕРГІЇ У ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ	10
1.1 Розподіл потоків енергії у електричних мережах. Реактивна потужність	10
1.2 Методи компенсації реактивної потужності	16
1.3 Поняття якості електричної енергії	18
1.4 Аналіз літературних джерел з питань компенсації реактивної потужності	23
2 ОГЛЯД ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	28
2.1 Блоки конденсаторів	28
2.2 Синхронні компенсатори	31
2.3 Пасивні фільтри	33
2.4 Активні фільтри	36
2.5 Гібридні фільтри	38
2.6 Реактори	40
2.7 Компенсатори зі штучною комутацією	42
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НЕЛІНІЙНИХ СПОЖИВАЧІВ	45
3.1 Визначення електричних навантажень	45
3.2 Вибір кількості та потужності трансформаторів підстанцій	51
3.3 Розробка заходів по компенсації реактивної потужності	52
3.4 Схеми зовнішнього та внутрішнього електропостачання	57
4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ПРИСТРОЇВ ПО КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	59
4.1 Загальні принципи створення моделей	59

4.2 Складання моделі електричної мережі без застосування засобів компенсації реактивної потужності	60
4.3 Складання моделі електричної мережі при застосуванні засобів компенсації реактивної потужності	64
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	72
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	75
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	81

ВСТУП

Зростання загального попиту на електричну енергію висуває підвищені вимоги до параметрів надійності та ефективності роботи електричних мереж. Забезпечення принципів оптимального функціонування мереж вимагає здійснення ретельного аналізу роботи їх елементів, зокрема – вивчення впливу на її роботу спродукованої реактивної енергії, і яка є невід’ємною частиною електричних систем змінного струму, та створює значні проблеми, сприяє додатковим втратам, нестабільності напруги та зниженню ефективності роботи енергетичної системи.

Проблема «реактивної енергії» зростає через наявність значної кількості нелінійних навантажень, що притаманні сучасним споживачам – агрегатам, пристроям та приладам. Нелінійні споживачі здатні спотворити форму кривої струму, збільшити величину реактивної потужності в системі, викликаючи такі проблеми, як перегрів окремих частин та погіршення якості ізоляції обладнання. Реактивна потужність не є «безкоштовною» і вимагає оплати постачальникам, що говорить про необхідність вирішення зазначеної проблеми.

Основним способом боротьби з реактивною потужністю є розробка і впровадження пристроїв, які завдяки своїй структурі дозволяють здійснити компенсацію реактивної енергії та покращити якість електричної енергії. Для досягнення поставленої мети необхідним є здійснення теоретичних досліджень причин виникнення реактивної енергії, визначення наявних рішень, можливість використання сучасніші технологій і розробок для боротьби з реактивною енергією. Впровадження зазначених засобів та принципів дозволить збільшити стійкість, підвищити надійність та ефективність роботи електричних мереж.

Мета роботи – розробити та впровадити пристрої для зниження впливу реактивної енергії на роботу електричної мережі.

Завдання роботи:

- здійснити огляд розподілу потоків енергії у електричних мережах,
- здійснити огляд методів компенсації реактивної потужності,
- здійснити огляд пристроїв компенсації реактивної потужності,
- розрахувати параметри електропостачання нелінійних споживачів,
- здійснити процес моделювання системи електропостачання при впровадженні пристроїв по компенсації реактивної потужності.

Об’єкт досліджень – електричні процеси у трифазних мережах змінного струму з нелінійними споживачами.

Предмет досліджень – електричні параметри роботи мережі електропостачання.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПОТОКИ ЕНЕРГІЇ У ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Розподіл потоків енергії у електричних мережах. Реактивна потужність

Потужність у електричній мережі визначає кількість енергії за одиницю часу і показує «швидкість» споживання або виробництва енергії. Потужність, що притаманна споживачам, вказує на «швидкість використання» енергії. Загальна кількість енергії, що споживається споживачем, розраховується як добуток його потужності на час його роботи. Потужність, що розсіюється споживачем у вигляді тепла, визначається як добуток його загального опору та квадрата струму, що через нього протікає. Енергія, що переміщується по електричній системі, визначається електричним та/або магнітними полями [1].

Загальна потужність для ланцюга постійного струму розраховується як добуток струму та напруги, Вт [2]:

$$P = I \cdot U = I^2 \cdot R \quad (1.1)$$

де I – струм через опір R (Ом), А.

U – значення падіння напруги на опорі R , В.

У разі, коли струм і напруга змінюються в часі, ВА [2]:

$$S = \sqrt{\sum_{n=1}^m U_{CKB}^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^m I_{CKB}^2} \quad (1.2)$$

де U_{CKB} – середньоквадратичне значення n -ї складової напруги, В,

I_{CKB} – середньоквадратичне значення n -ї складової струму, А,

Спочатку розглянемо потужність, напругу та струм як реальні величини, що змінюються з часом, що характеризує їх миттєві значення. Значення миттєвої потужності визначається через добуток миттєвих значень струму та напруги – тобто, у будь-який момент часу потужність дорівнює добутку напруги та струму в цей момент, Вт [2]:

$$P(t) = I(t) \cdot U(t) \quad (1.3)$$

де t – визначений момент часу.

Миттєва потужність сама по собі не являє значного інтересу, через те, що зазвичай оперують її передачею або споживання на досить тривалих проміжках часу. Зазначене вимагає шукати способи та засоби, здатні визначити потужність, яка буде усередненим значення для визначеного циклу зміни струму та напруги. При цьому необхідно вважати на характер споживання (активний, індуктивний, ємнісний або їх комбінація)

Для випадку чисто активного навантаження, напруга та струм не відрізняються за фазою і середнє значення потужності можна визначити за середньоквадратичними їх значеннями, Вт [2]:

$$P = U_{скв} \cdot I_{скв} \quad (1.4)$$

При наявності реактивної складової, напруга та струм вже відрізняються за фазою, тому миттєва потужність іноді може бути від'ємною (не споживатися, а «виплюснутися» у мережу), Вт [2]:

$$P = U_{скв} \cdot I_{скв} \cdot \cos \varphi \quad (1.5)$$

де $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності.

Коли навантаження є чисто реактивним, фазовий зсув буде дорівнювати $\varphi = 90^\circ$ і $\cos\varphi = 0$, що означає, що потужність лише «коливається» по мережі між реактивними елементами та не розсіюється, при цьому середня потужність дорівнює нулю (рис. 1.1).

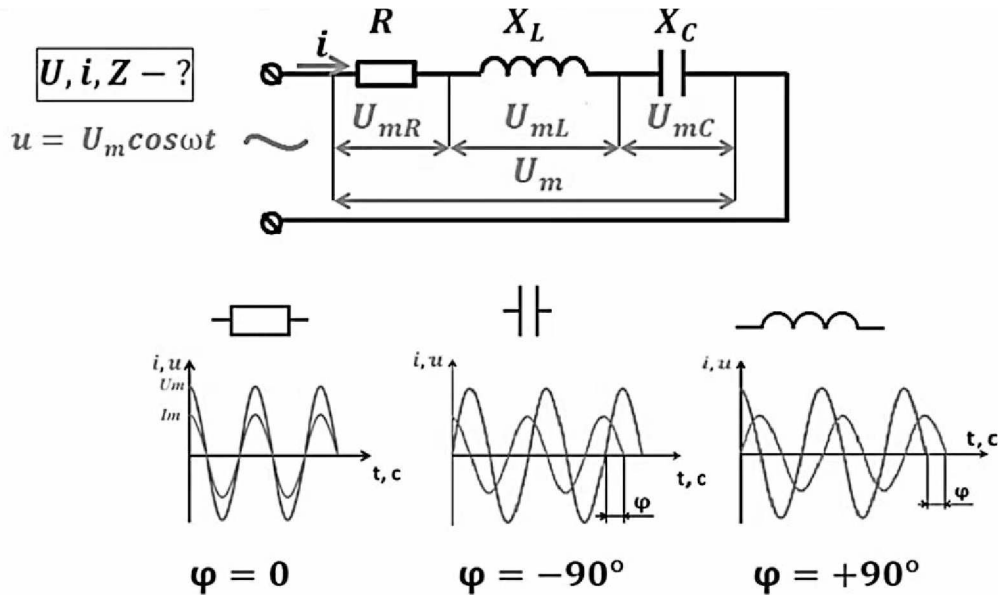


Рисунок 1.1 – Залежність у розташуванні між струмом і напругою в разі відповідних властивостей споживача

Середня потужність відповідає потужності, яка насправді передається або споживається навантаженням [2].

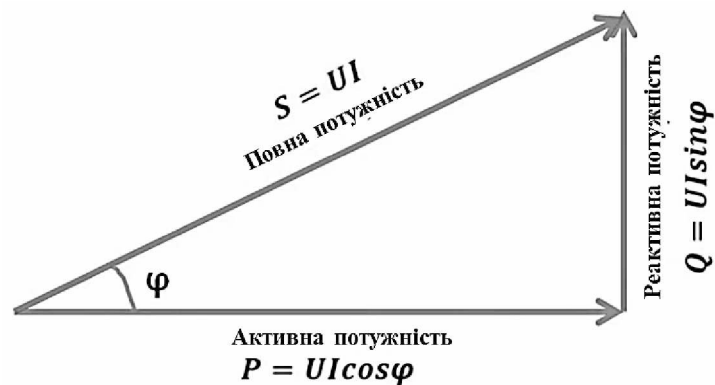


Рисунок 1.2 – Трикутник потужностей

Добуток струму і напруги, незалежно від їх фазового зсуву, називається повною потужністю, Вт [2]:

$$P = U_{\text{сер.}} \cdot I_{\text{сер.}} \quad (1.6)$$

де $U_{\text{сер.}}$ – середнє значення напруги, В,

$I_{\text{сер.}}$ – середнє значення струму, А,

При активній потужності і резистивному навантаженні діаграми напруги та струму мають точку перетину на координатній осі (рис. 1.2) – вважається, що фази напруги та струму збігаються.

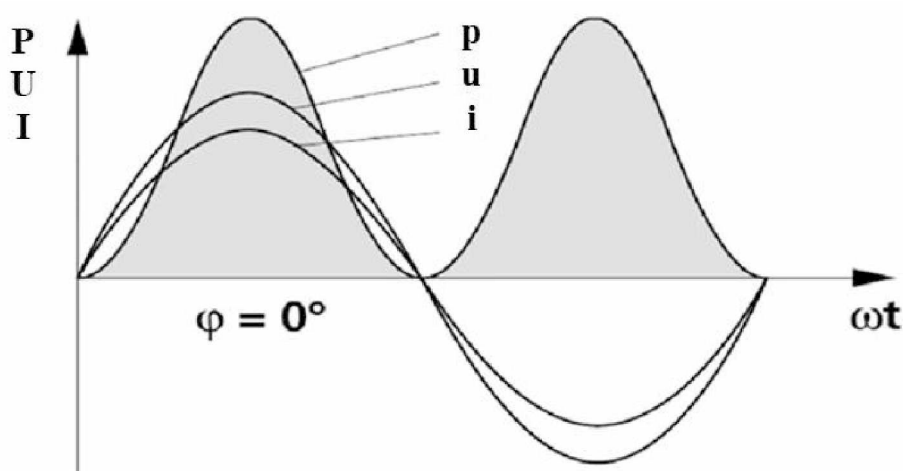


Рисунок 1.2 – Форми кривих потужності, напруги і струму при чисто активному навантаженні

Графік потужності, що визначається миттєвими показниками напруги та струму, відрізняється подвоєною частотою у порівнянні з частотою вихідної напруги – це можна пояснити тим, що добуток двох позитивних величин також є додатним. Корисна потужність являє собою енергетичне перетворення в інші – теплова, світлова або механічна.

У реальних умовах чисто резистивні елементи зустрічаються рідко. Найчастіше характер поведінки споживача має індуктивний характер (електродвигуни, трансформатори та інше). Реактивний струм відіграє

суттєву роль у створенні та зміні магнітних полів, не зникаючи і циркулюючи між джерелом та споживачем.

Реактивна потужність споживається пристроями з індуктивною складовою в режимі їх роботи без навантаження. При індуктивному навантаженні, струм за фазою відстає від напруги, що призводить до того, що потужність може набувати негативних значень (рис. 1.3, 1.4) [3].

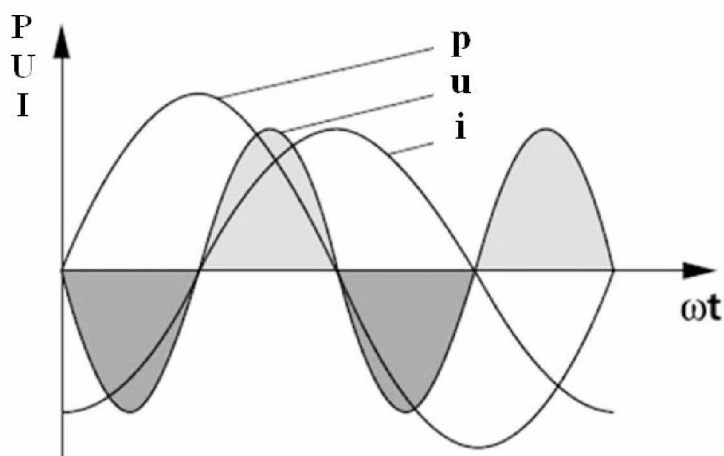


Рисунок 1.2 – Форми кривих потужності, напруги і струму при індуктивному навантаженні ($\varphi = 90^\circ$)

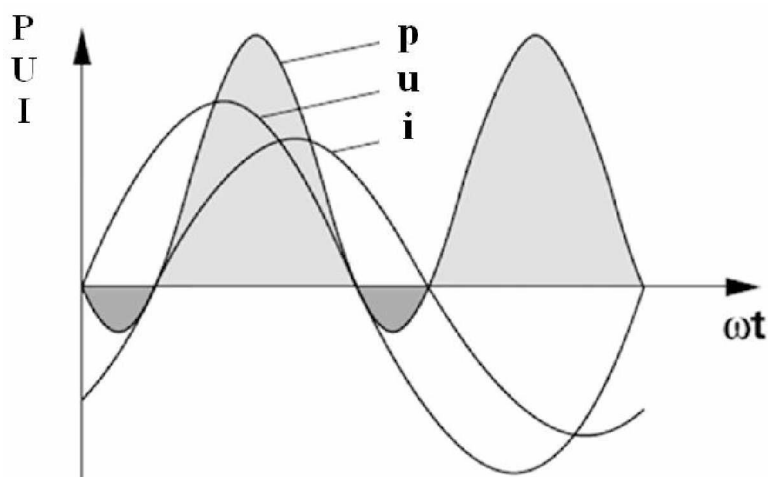


Рисунок 1.3 – Форми кривих потужності, напруги і струму при індуктивному навантаженні ($\varphi = 45^\circ$)

Для кількісної оцінки та характеризування активної та реактивної складових повної потужності вводяться поняття: коефіцієнт потужності та косинус і тангенс фазового кута. Фазовий кут (φ) відповідає геометричному куту між векторами струму і напруги [2].

Повна потужність є важливою складовою у контексті живлення споживачів, при цьому ключовим параметром, який визначає термічне обмеження потужності споживання, є значення струму. Однак на практиці зазвичай не зручно вказувати струм безпосередньо. Здебільшого робоче значення напруги споживачів відрізняється постійністю, а значення потужності може слугувати гарним показником струму на споживачі.

Для кращого розуміння процесів, що протікають у системі краще користуватися повною потужністю, ніж активною потужністю, оскільки вона не залежить від значення коефіцієнта потужності.

Через наявність реактивних споживачів у загальній потужності виокремлюється поняття «реактивна потужність», що дорівнює різниці між повною та активною потужностями [3].

Особливість реактивної потужності полягає у її можливості «коливатися» в лініях, переносячи та обмінюючись енергією між електричними та магнітними полями, вар [3]:

$$Q = U_{скв} \cdot I_{скв} \cdot \sin \varphi \quad (1.7)$$

Споживачі, які «виплескують» реактивний (індуктивний) струм, називаються джерелами реактивної потужності, а споживачі реактивного ємнісного струму, називаються споживачами реактивної потужності. Значне число промислового устаткування характеризується споживанням та продукуванням реактивної потужності – електродвигуни, трансформатори, кабелі, дроселі, перетворювачі, дугові печі, присрої електрозварювання, силова електроніка та інше.

Значення реактивної потужності пов'язано зі значенням частоти та значенням енергії, що періодично знаходиться в електромагнітних полях елементів електричної мережі. Більшість навантажень у промисловості продукує реактивну енергію, що потребує застосування заходів з її компенсації, та пристроїв, що виступають у якості додаткових джерел реактивної потужності (конденсатори, синхронні двигуни та інші).

1.2 Методи компенсації реактивної потужності

Для підвищення коефіцієнта потужності в індивідуальному порядку для конкретного нелінійного навантаження, можна скористатися відповідним навантажувальним пристроєм з відповідним реактивним характером поведінки [4].

Здійснюючи компенсацію реактивної потужності, можна збільшити пропускну спроможність мережі, тобто передавати нею збільшене значення активної потужності; зменшити втрати при передачі та обмежити рівень падіння напруги, підвищити надійність роботи мережі (рис. 1.4) [4].

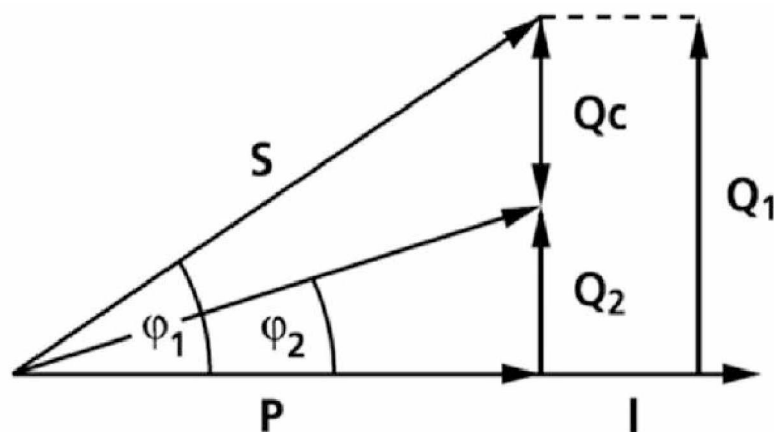


Рисунок 1.4 – Трикутник потужностей, що ілюструє дію компенсації

З практичної точки зору існує два методи компенсації реактивної потужності в електричних мережах [5]:

1. Природний [5]:

- встановлення електричних двигунів суворо відповідної до навантаження потужності,
- виключення неповної завантаженості двигунів,
- уникнення холостого ходу електричних машин,
- вимкнення нелінійних споживачів під час простоїв,
- заміна асинхронних двигунів синхронними двигунами.

2. Штучний [5]:

- застосування блоків конденсаторів,
- використання синхронних електродвигунів.

При підключенні компенсуючих пристроїв можна спостерігати й негативні наслідки:

- виникнення явищ резонансу,
- виникнення перехідних процесів,
- продукування вищих гармонік,
- тривале підвищення напруги,
- короточасні падіння напруги,
- виникнення перевантажень,
- спотворення у мережі,
- зменшення ефективності роботи обладнання,
- експлуатаційні проблеми.

Натомість, отримаємо підвищення якості електричної енергії у мережі шляхом впровадження заходів по компенсації, отримаємо [5]:

- обмеження значення реактивної потужності,
- можливість точного регулювання напруги на споживачах,
- фільтрація/обмеження вищих гармонік,
- симетризація фаз напруги,
- обмеження коливань напруги,

- зменшення флікера.

Для обрання виту, типу та типорозміру компенсуючого пристрою необхідно мати певні дані та врахувати певні фактори [5]:

- характеристики мережі (напруга, частота та інші),
- потреба в об'ємах реактивної потужності, що потребує компенсації,
- наявність динамічних навантажень,
- кількість і номер гармонік струму та напруги, що були спродуковані,
- параметри короткого замикання у місці майбутнього встановлення пристроїв компенсації,
- умови майбутньої роботи пристроїв компенсації (параметри навколишнього середовища),
- місце встановлення та взаємодія з сусіднім обладнанням,
- електромагнітна картина у місці встановлення пристроїв компенсації.

1.3 Поняття якості електричної енергії

Електроенергетична система при роботі повинна характеризуватися стабільністю, надійністю та здатністю до прогнозування. Стабільність системи обумовлена перш за все сталістю частоти напруги і для забезпечення цієї стабільності необхідна координація роботи між генеруючими та споживаючими потужностями. Потужні споживачі, пристрої комутації та силова електроніка можуть викликати гармонічні спотворення та коливання напруги в електричній системі [6].

Надійність – це здатність пристрою або системи виконувати покладені на нього функції з визначеними показниками визначений час. Концепція надійності не можлива без поняття безперервності обслуговування [7].

У відповідності до поняття надійності електричних мереж про її показники та оцінки безпеки електропостачання споживачів можна говорити за умови [7]:

- постійності обслуговування,
- зниження часу переривання електропостачання через ремонтні роботи,
- тривалість переривання через або оперативне втручання,
- значення часу, що потрібен для відновлення живлення,
- середня тривалість обслуговування для підтримання працездатності.

Серед факторів, що впливають на безперервність електропостачання споживачів, можна відзначити [7]:

- надійність окремих компонентів мережі,
- конфігурація електричної мережі,
- наявність чи відсутність нейтрального провідника,
- наявність засобів автоматизованого контролю,
- наявність, працездатність, чутливість, швидкодія та вибірковість дії захисних пристроїв,
- якість оперативного обслуговування.

Якість електропостачання можна оцінити кількісними показниками, шляхом оцінки визначених параметрів роботи окремих елементів та відповідність до стандартизованих значень. У більшості випадків, якість електропостачання оцінюється за [6]:

- формою синусоїдного сигналу напруги (струму),
- величиною частоти,
- значення амплітуди.

Система контролю якості електропостачання спирається на засоби вимірювання з визначенням оцінки якості для визначеного періоду часу. Зазначені системи можуть також включити засоби порівняння з контрольними показниками та визначати оптимальні режими роботи споживачів, підключених до даної мережі. У багатьох випадках, система

оцінки показників якості визначає: кількісні показники визначених параметрів, їх відхилення від нормованих значень, швидкість коливання показників, відхилення форми хвиль змінних показників та їх несиметричність у трифазних системах, коливання частоти [6].

Причини, що сприяють погіршенню якості електропостачання споживачів, викликаються внутрішніми обмеженнями у мережі та її конфігурацією, що перешкоджають отриманню оптимальних електричних параметрів; наявність оперативних порушень, які можуть несприятливо впливати на характеристики живлення (напругу – її частоту, амплітуду, форму хвилі та симетрію).

Якість електричної енергії має значний вплив на умови роботи мережі і має значні технологічні й економічні наслідки на постачання і забезпечення безпеки. Забезпечення оптимальності параметрів роботи електропостачання може бути покращено завдяки здійсненню комплексного моніторингу та покращенні стратегії управління [6].

Сьогодення відрізняється широким впровадженням і використанням пристроїв електроніки, що мають індуктивний характер навантаження. Зазначене вимагає необхідності компенсувати певний обсяг реактивної потужності, що «коливається» в мережі для належного її функціонування, а іноді може бути викликано економічними міркуваннями. Промислові підприємства, що характеризуються суттєвою виробкою реактивної потужності, повинні впроваджувати засоби її компенсації або додатково сплачувати за її об'єм.

Серед основних цілей по компенсації реактивної потужності можна визначити [8]:

- підтримання визначеного значення коефіцієнта потужності,
- підвищення якості електропостачання,
- зменшення втрат,
- зниження витрат на електричне обладнання меншої встановленої потужності,

- зниження вартості провідників для подачі електричної енергії,
- зменшення показників падіння напруги в мережі,
- зниження вартості спожитої електричної енергії.

З ростом кількості нелінійних споживачів, знижується якість електричної енергії у електричній мережі. Це пов'язано з тим, що нелінійні пристрої, підключені до мережі, генерують вищі гармоніки, які є причиною спотворення форми напруги.

Загалом, основні параметри якості електричної енергії погіршуються через [6]:

- наявність нелінійних навантажень,
- недостатня електромагнітна сумісність пристроїв,
- погіршення електромагнітної картини електропостачання.

Основними факторами, що впливають на якість електричної енергії, є [6]:

- наявність збоїв у електромережі,
- підключення, відключення та переключення потужних споживачів,
- застосування значної кількості нелінійних навантажень.

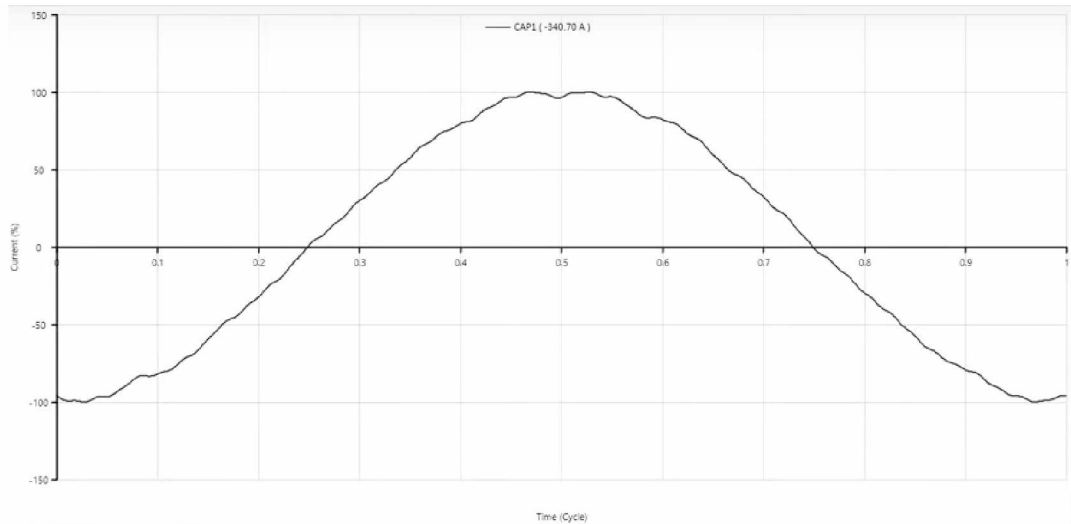
Джерелами гармонійних коливань в електричній мережі є:

- дугові сталеплавильні печі та зварювальні пристрої,
- електромагнітні пристрої (трансформатори, електричні машини),
- пристрої силової електроніки (випрямлячі, перетворювачі),
- нелінійні електронні пристрої.

Нелінійні навантаження перетворюють отриману електричну енергію з відмінними від початкового виду характеристиками. Під час перетворення можна здійснювати процеси керування потоками енергії для отримання позитивних результатів, направлених на економію енергії з одночасним підвищенням ефективності.

У ідеальній системі, що маємо при відсутності нелінійних навантажень, форми хвилі струму та напруги має «чистий синус». Нелінійні навантаження здатні спотворювати ці форми (рис. 1.5).

а)



б)

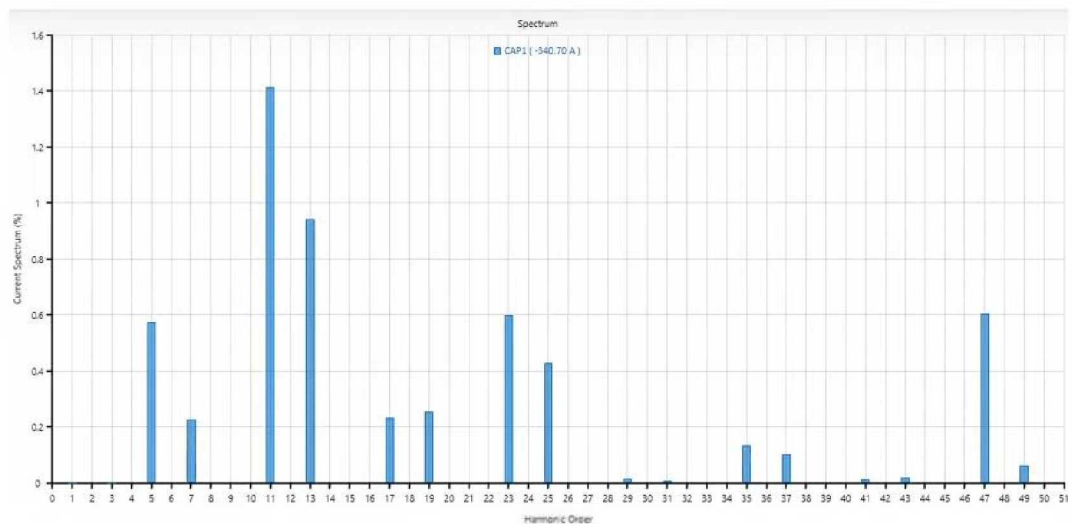


Рисунок 1.5 – Спотворення форми сигналу напруги (а) та розподіл гармонік (б), що викликали ці спотворення

Спотворення форми хвилі напруги або струму призводить до [8]:

- збільшення встановленої потужності обладнання,
- втрат потужності в лініях передачі,
- перегрівів електричних машин,
- відмов пристроїв компенсації,
- збоїв у системах захисту,
- збоїв у чутливому обладнанні,
- збільшення струму в нейтральному провіднику,
- скорочення терміну служби обладнання,
- погіршення ізоляційних властивостей матеріалів.

З практичної точки зору, при здійсненні електропостачання необхідно сформувати і застосувати гнучку концепцію, що забезпечить стабільність у електроенергетичних системах, підвищить пропускну здатність електроенергетичних мереж, дозволить досягти стабілізації величини напруги в електричних мережах, реалізує можливість регулювання перетоків потужності між різними частинами системи, оптимізує розподіл навантаження в суміжних ланцюгах, мінімізує загальні втрати енергії при її передачі, покращить якість електричної енергії в розподільних мережах.

Зазначене вимагає здійснення глибокого системного аналізу, взяти до уваги всі технічні і економічні аспекти операцій, розробки і використання різноманітних комбінаторних рішень.

1.4 Аналіз літературних джерел з питань компенсації реактивної потужності

У [9] зосереджується на порівнянні методів компенсації реактивної потужності в електричних мережах. Автори розглядають два основних методи: перший базується на рівності між реактивною та активною потужностями, а другий – між реактивною та повною потужністю. В статті аналізуються впливи цих методів на стабільність напруги та спрощений коефіцієнт спотворення. Була також розглянута проблема визначення та вимірювання реактивної потужності в умовах спотворених сигналів напруги та струму, при цьому вводиться поняття спрощеного коефіцієнта спотворення потужності, який може бути використаний для оцінки якості електричної енергії. В роботі представлені результати моделювання для лінійного та нелінійного навантаження. Аналіз показує, що метод, заснований на рівності між реактивною та активною потужностями, може призвести до збільшення коефіцієнта спотворення, особливо при наявності

вищих гармонік. З іншого боку, метод, який враховує загальну потужність, може забезпечити кращу стабільність напруги.

У [10] розглядаються різні методи компенсації реактивної потужності в електричних системах. Були виокремлені три основні типи компенсації. Визначено, що основна мета компенсації полягає в мінімізації реактивної потужності на вводах, кабелях або шинах, шляхом розташування компенсуючих пристроїв якнайближче до індуктивних споживачів. Однофазна компенсація включає в себе паралельне підключення блоків конденсатора до асинхронного двигуна. Визначаються переваги цього методу – економія енергії на окремому споживачі та зменшення втрат потужності на вводах. Автори також розглядають питання самозбудження асинхронних моторів при однофазній компенсації – у разі, коли компенсатор забезпечує більше 90% потреби двигуна в реактивній потужності при холостому ході, може виникнути самозбудження та буде викликано явище перенапруги. Матеріал може бути використаний як практичний посібник для інженерів та фахівців у галузі електроенергетики, шляхом надання детальних рекомендацій та прикладів для реалізації ефективних методів компенсації реактивної потужності.

У [11] здійснено огляд систем динамічної компенсації реактивної потужності, звертаючи увагу на їхні переваги над традиційними методами, особливо при керуванні швидкозмінними навантаженнями та поліпшенні якості електроенергії. Автори зосередились на способах компенсації реактивної потужності в електричних мережах, які розглядаються як динамічні системи. Визначаються чинники, що характеризують роботу динамічних промислових об'єктів, серед яких відзначають: часті зміни навантаження та продукування гармонік. Дані явища призводять до нестабільності величини напруги, мерехтіння світла та надмірні струмові навантаження. Було відзначено, що традиційні системи корекції коефіцієнта потужності є не достатньо ефективними для динамічної поведінки мережі, оскільки здебільшого їх розробляють для

статичних станів. У роботі були розроблені системи динамічної компенсації реактивної потужності за допомогою конденсаторів, що комутуються тиристорами. Зазначене дозволяє запобігти та/або зменшити появу мережевих перешкод і зниження якості електричної енергії. Спроектована системи іменується як «швидкодіюча динамічна корекція коефіцієнта потужності» або «динамічна система компенсації». Автори пропонують використовувати «м'яку» комутацію з метою уникнення транзитних розрядних струмів, які можуть пошкодити компоненти розробленої системи. У роботі також розглядається концепція компенсації мерехтіння світла, яка полягає у підтримці постійності рівня напруги, особливо в мережах, що містять потужні об'єкти. Доводяться переваги застосування динамічної компенсації реактивної потужності, що пояснюється поліпшенням якості електричної енергії, збільшенням відсотку активної потужності та зменшення втрат.

У [12] здійснено огляд сучасних конструкцій активних фільтрів для компенсації реактивної потужності. Дослідження базується на таких критеріях: необхідні параметри компенсації реактивної потужності, наявні гармоніки, необхідність здійснення балансування, наявна конфігурація електричної системи, застосовані принципи управління та інші. Актуальність досліджень базується на важливості забезпечення якості електроенергії через наявність і широке застосування малопотужних нелінійних навантажень. Пропонується розробка нормативів, які викликають обмеження значень реактивної потужності та по гармонічному «забрудненню» в розподільчих мережах. У якості засобів компенсації були досліджені традиційні методи, такі як тиристорно-керовані реактори та конденсатори. Було визначено, що зазначені методи не є ідеальними для компенсації лише реактивної потужності, особливо в розподільних мережах. Автори класифікували доступні способи компенсації реактивної потужності у системах на основі їх придатності з точки зору конфігурації схеми та способів їх управління. Обговорюється важливість компенсації

гармонік в розподільних мережах. Метою роботи було надання інженерам та дослідникам в області якості електричної енергії необхідних прийомів та засобів при виборі до застосування правильної системи. У статті також було досліджено питання виникнення гармонік, що генеруються пристроями компенсації реактивної потужності.

У [13] автори фокусуються на порівнянні та вивченні методів для компенсації реактивної потужності та придушення гармонік, що генеруються нелінійними навантаженнями. Оцінюється ефективність різних компенсуючих та фільтруючих схем на припущенні, що зазначені способи та пристрої однозначно пригнічують гармоніки, що генеруються 6- та 12-імпульсними, 3-фазними, керованими перетворювачами. Увага акцентується на тому, що компенсатори реактивної потужності, які зазвичай використовуються для покращення коефіцієнта потужності, також повинні захищати електроенергетичну систему від генерації гармонік та обговорюються різноманітні структури пристроїв, робота яких направлена на пригнічення конкретних гармонік. Підкреслюється, що вибір структури та параметрів схеми компенсації базується на їх технічних особливостях та принципах оптимізації. У статті також обговорюється складність аналізу ефективності запропонованих схем компенсації, що вимагає застосування комп'ютерного моделювання та створення моделей.

У [14] наведено удосконалену конструкцію трифазного гібридного пасивного фільтра, робота якого полягає у компенсації реактивної потужності та придушення вищих гармонік. Конструкція гібридного фільтра складається з пасивного фільтра з можливістю зміни імпедансу за допомогою тиристорно-керованого реактора. Були визначені позитивні особливості конструкції: нечутливість до зміни імпедансу мережі, відсутність резонансу в паралельних гілках, висока швидкодія та відгук, можливість зменшення розміру конденсаторів у пасивному фільтрі. Для доведення положень, що досліджуються, було застосовано математичне моделювання системи. Модель була побудована на використанні концепції

взаємної індуктивності для зниження рівня індуктивності пасивного фільтра. Ефективність запропонованої конструкції підтверджується моделюванням та експериментальними даними при роботі мережі за різних умов навантаження. Створена конструкція фільтра здатна ефективно компенсувати гармоніки напруг і струмів та знизити об'єм реактивної потужності при наявності потужних нелінійних споживачів.

У [15] увага фокусується на технічних рішеннях, що пов'язані з фазово-незбалансованою компенсацією реактивної потужності в розподільчих системах. Особлива увага приділяється ролі статичних компенсаторів реактивної потужності для вирішення зазначених проблем. У статті описуються проблеми електричних мереж, що виникають через наявність потужних нелінійних навантажень (прокатні стани, дугові печі, зварювальні системи та інші), що генерують реактивну потужність, викликає небаланс у системі та гармонійні коливання. Визначається, що у якості найбільш придатних є статичні компенсатори, завдяки їх швидкому відгуку, високій надійності, гнучкості та низьким витратам на обслуговування. Належна робота статичних компенсаторів дозволяє мінімізувати вплив вищих гармонік, покращити показники ефективності, зменшити вплив шляхом покращення параметрів електромагнітної сумісності та підвищити загальний коефіцієнт гармонік. У статті також розроблено математичний апарат та алгоритми для підбору оптимальної комбінації статичного компенсатора. Для доведення положень роботи використовуються принципи моделювання.

2 ОГЛЯД ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Методи та пристрої для компенсації реактивної складової мають досить широке коло застосувань. Наведені нижче механізми не тільки забезпечують ефективну компенсацію реактивної потужності у електричних мережах, але й оптимізують режими живлення у розподільчих мережах.

Статичні пристрої компенсації реактивної потужності можна класифікувати на [16]:

- конденсатори,
- пасивні фільтри,
- активні фільтри,
- гібридні фільтри,
- синхронні машини,
- модульні комутаційні пристрої,
- конденсатори з шунтуючими індуктивностями,
- пристрої зі штучною комутацією.

2.1 Блоки конденсаторів

Для компенсації реактивної потужності індуктивного характеру використовують потужні конденсатори, що дозволяє досить просто скорегувати (підвищити) значення коефіцієнта потужності. Їх використання може спричинити небажані спотворення на місці їх встановлення. У залежності від номінальної напруги, конденсатори ділять на дві групи: низьковольтні (до 1000 В) і високовольтні (більше 1000 В) (рис. 2.1) [17].

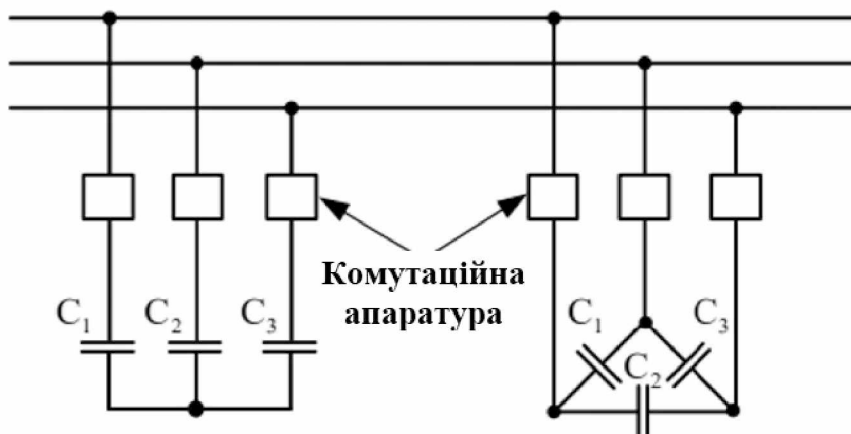


Рисунок 2.1 – Конденсаторні батареї для компенсації, що регулюються комутаційною апаратурою

Для зміни величини згенерованої реактивної потужності необхідно запровадити ступінчасту зміну числа конденсаторів, що приєднуються до мережі. Дане перемикання відбувається за допомогою автоматизованої комутаційної апаратури.

Зазначені пристрої здатні компенсувати реактивну потужність у мережі як джерела реактивної енергії незмінної величини. Тобто, компенсація можлива лише при дотриманні встановлених параметрів споживання реактивної потужності, що збігаються з номінальними показниками або знаходяться поряд. Зазначене обмежує використання цих пристроїв через ризик виникнення високих комутаційних перенапруг.

Недоліками таких систем є [17]:

- низький ступінь реакції на зміну характеру та величини навантаження у мережі,
- неможливість забезпечення «тонкого» регулювання значення реактивної потужності через ступінчастий спосіб керування,
- низька надійність через можливу ненадійність комутаційної апаратури.

Одним зі способів розширення використання цього способу компенсації є застосування схемних рішень на основі конденсаторів, що комутуються тиристорами (рис. 2.2) [17].

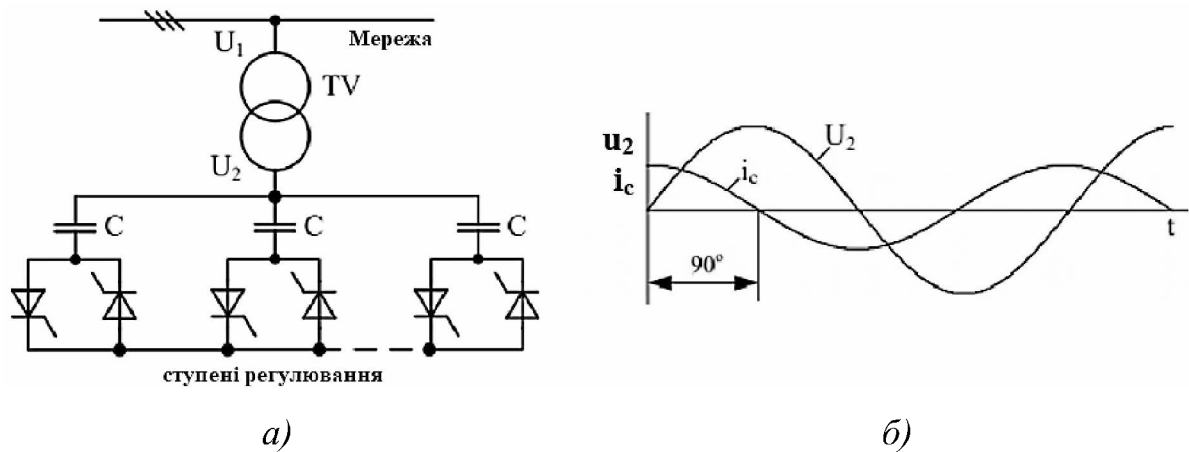


Рисунок 2.2 – Принцип комутації конденсаторів тиристорами: а) схема, б) векторна діаграма напруги та струму на конденсаторі

Комутація конденсаторів здійснюється за допомогою тиристорів, що з'єднано зустрічно-паралельно. Регулювання ємнісного струму здійснюється в моменти переходу ємнісного струму через 0 – максимальні значення позитивних і негативних півхвиль ємнісного струму випереджають напругу мережі на чверть періоду.

Не дивлячись на переваги цих схем, вони все одно не дозволяють вирішити питання «плавного» регулювання реактивної потужності.

Існує можливість компенсації відстаючого або випереджаючого реактивного струму мережі, яка полягає у одночасному використанні конденсаторів та реакторних компенсаторів. Структурно така система складається з котушки індуктивності котушку та тиристорної групи (з'єднані за зустрічно-паралельною схемою), що включені паралельно, та включеним паралельно до них конденсатором (рис. 2.3).

У цій схемі, конденсаторна частина виконана нерегульованою, а реакторна частина (катушка індуктивності) має змогу змінювати свої

параметри (пропускання струму в певні періоди часу). Шляхом спільних зусиль двох взаємно-протилежних частин відбувається регулювання значення та характеру реактивної потужності.

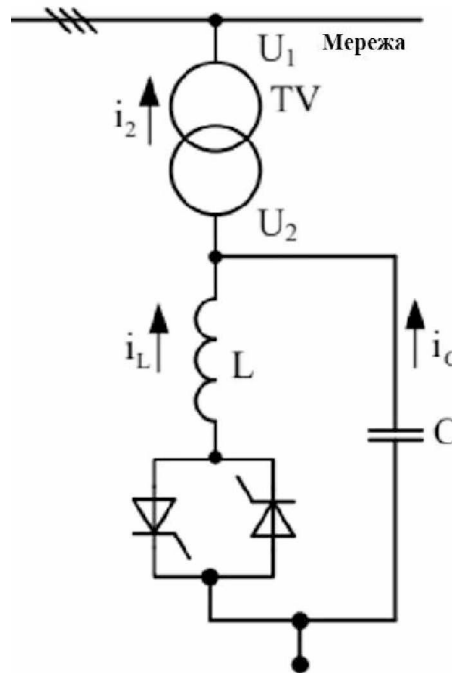


Рисунок 2.3 – Схема паралельного включення конденсаторної батареї з котушкою індуктивності, що керується тиристорами

2.2 Синхронні компенсатори

Синхронні електричні машини вважають досить ефективними пристроями по компенсації реактивної потужності через можливість забезпечення постійності компенсації та невелика вартість обладнання (рис. 2.4, 2.5). Ефективність здійснення компенсації залежить від динамічних та статичних характеристик двигуна, точності вибору двигуна, роботи схеми збудження, структури та алгоритму регулювання реактивної потужності, кількості двигунів [17].

Такий тип компенсації реактивної потужності є найбільш коштовним. Крім того, синхронні електричні двигуни не можуть покращити якість енергії локально на місці компенсації.

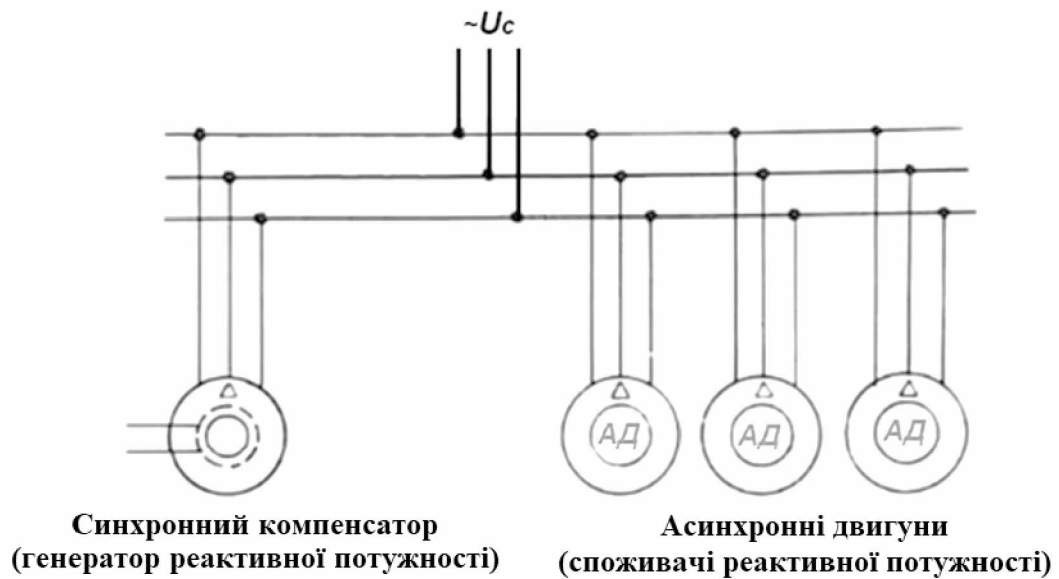


Рисунок 2.4 – Принципова схема компенсації реактивної потужності у вузлі навантаження

Технічно, синхронні двигуни здатні створювати випереджуючий або відстаючий реактивний момент, залежно від конкретних умов роботи, коригуючи таким чином значення коефіцієнта потужності в електромережах та підтримувати оптимальний рівень напруги для різних споживачів.

Синхронні компенсатори часто використовують не лише на електростанціях, але й у безпосередній близькості до потужних споживачів. Підвищення коефіцієнта потужності понад визначені значення може бути економічно неефективним через збільшення витрат на установку та обслуговування компенсаторів. Проте при правильному застосуванні їх можна ефективно використовувати для регулювання реактивної потужності в умовах змінного навантаження [17].

Синхронні компенсатори повинні бути оснащені різними системами охолодження та можуть бути адаптованими для роботи в різних режимах, включаючи режим перезбудження.

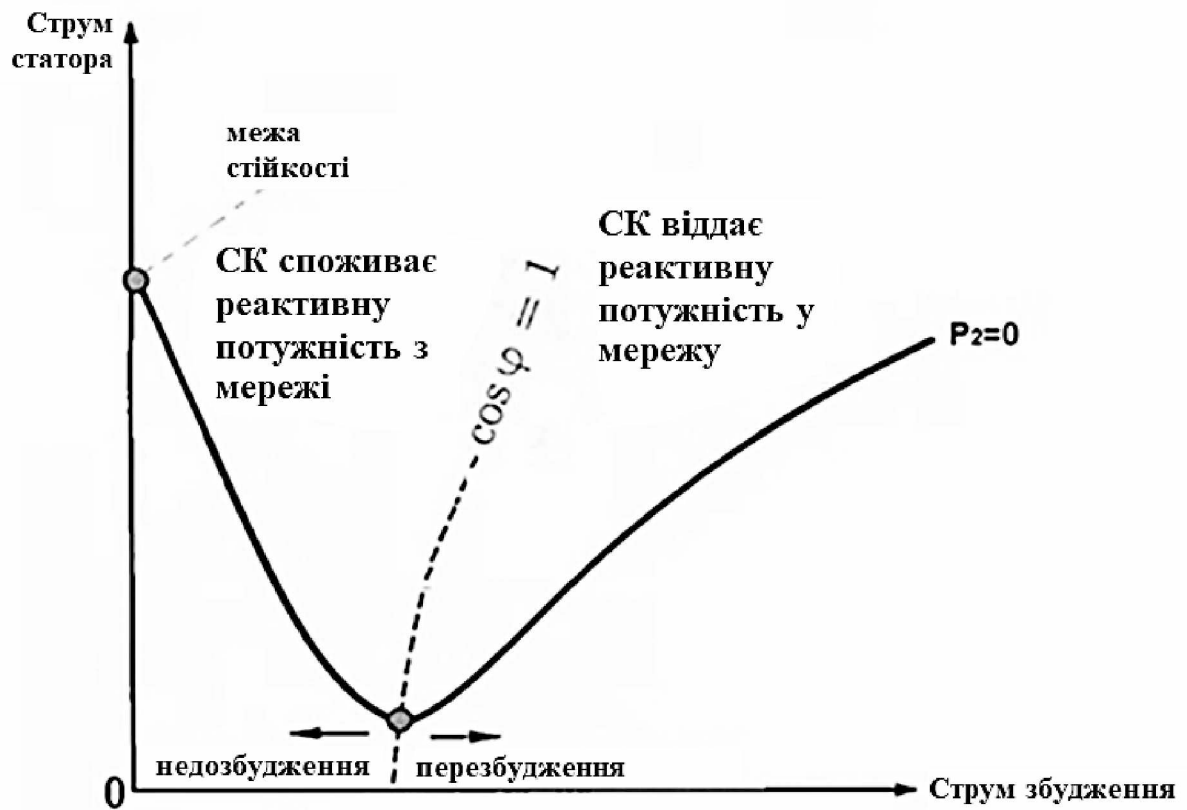


Рисунок 2.5 – Характеристика синхронного компенсатора (СК)

2.3 Пасивні фільтри

Усі пасивні фільтри конструктивно складаються з котушки індуктивності й ємнісного елемента – конденсатора. Ці елементи підбирають таким чином, щоб забезпечити відповідний рівень синхронізації, та можуть бути ввімкнені послідовно або паралельно до навантажень і встановлені у різних точках системи електропостачання.

Підвищення якості електричної енергії у розподільчих електроенергетичних системах досить сильно загострилась. Нелінійні

навантаження викликають ряд проблем, пов'язаних з генерацією гармонік вищих порядків у вихідних напругах і струмах, і це негативно позначається на ефективності, безпеці та надійності енергетичних систем. Пасивні фільтри можуть бути обмежені по ефективності через їх габаритні розміри, труднощі налаштування, резонансні явища, а також фіксованість налаштування лише на певну гармонійну складову. Не дивлячись на зазначені недоліки, використання пасивних фільтрів залишається актуальним з економічної точки зору. Схематичне зображення комбінація пасивних фільтрів для придушення відповідних гармонік наведено на рис. 2.6 [18].

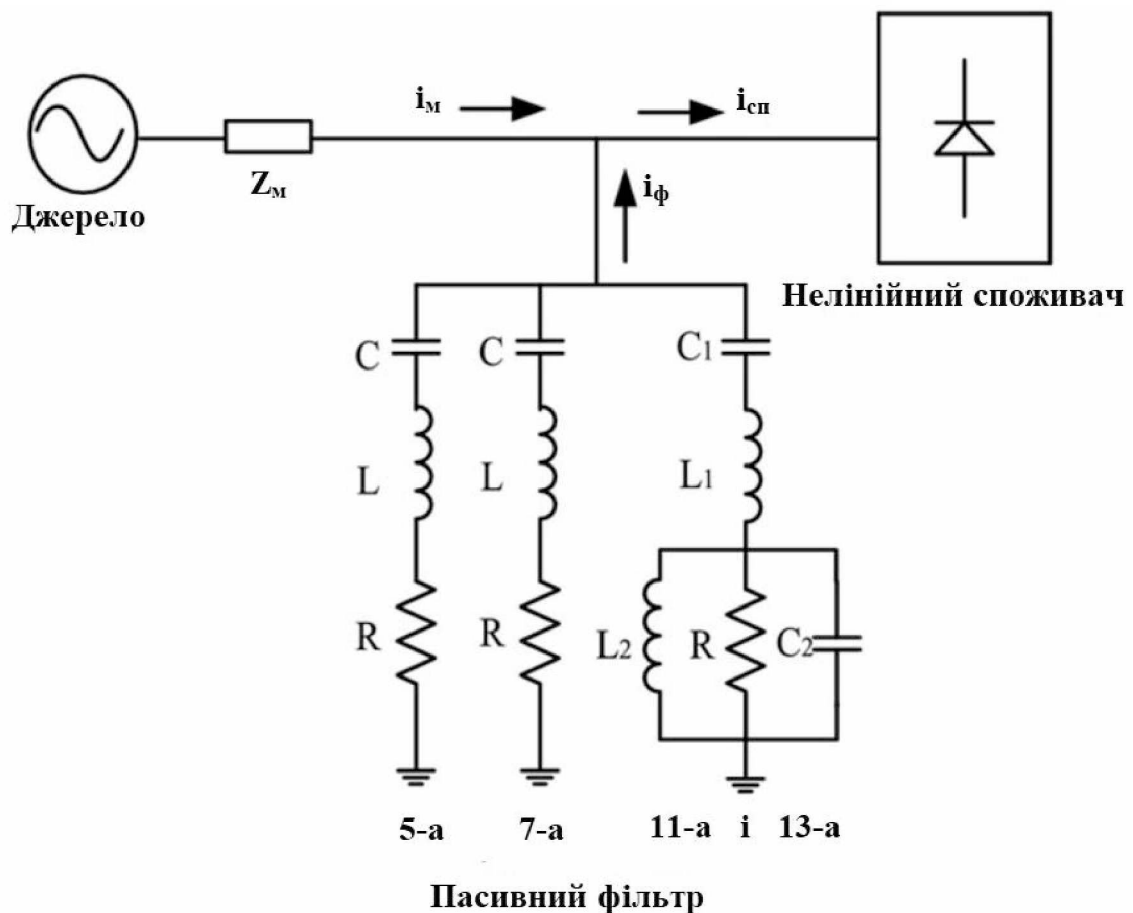


Рисунок 2.6 – Комбінація пасивних фільтрів для придушення відповідних гармонік

Гармонічні складові струму виплескуються у мережу, а встановлений пасивний фільтр перетворює його завдяки властивостям його конструкції

через те, що він має знижений опір порівняно з іншими елементами. Перетворення полягає у відведенні струму у різних напрямках – частина перенаправляються назад до його джерела, а частина направляється на фільтр.

«Динаміка» поведінки гармонічних струмів є досить складною – він безконтрольно та довільно, що може бути викликано додатковими умовами, мігрують між фазами і майже ніколи не «переходять» у заземлення. Останнє твердження є досить важливим для захисту від перенапруг. Здійснюючи модулювання гармонійних струмів, можна значно підвищити якість напруги на шинах за рахунок зменшення сумарних гармонійних спотворень [18].

Для розширення можливостей пасивних фільтрів його формують шляхом каскадного набору цих фільтрів, що налаштованні на резонанс за певною гармонікою, і відповідно може суттєво протидіяти переважаючим вищим гармонікам у електричній мережі. Послідовне включення ступенів фільтрів значно посилює його потенціал для придушення гармонійних коливань. Фактично, фільтри діють як певні енергетичні канали, що направляють струми відповідних гармонік для оптимізації динаміки потоків електричної енергії.

Для створення конструкції пасивного фільтра недостатньо поєднати в одній конструкції індуктивність і ємність – необхідно здійснити розширене обчислювальне моделювання, що враховує усі чинники (місце розміщення, бажана ефективність та необхідне значення коефіцієнта потужності та інші) та забезпечує надійність роботи фільтра.

2.4 Активні фільтри

Гармоніки, що виникають у мережі при наявності нелінійних споживачів, вимагають підвищеної уваги, що може бути забезпечено шляхом застосування активного фільтра.

Активні фільтри працюють за принципом шумопоглинання, шляхом введення частот, що є протилежними до гармонік, і нейтралізує їх. Протидіючі частоти покращують форму хвилі напруги (струму). Недоліком такого способу компенсації є неможливість забезпечення статичної рівноваги – необхідно постійне застосування активного фільтра, при від'єднанні якого відновлюється форма оригінального (викривленого) гармонійного спектру [17].

Використання активного фільтра вимагає ретельної розробки – вони повинні містити дросель (для постійних струмів) або мережевий реактор (для змінних струмів). Особливістю роботи активних фільтрів є їх схильність до саморегуляції та витримка при перенавантаженнях.

З фізичної точки зору активні фільтри збільшують еквівалентний опір джерела для певних гармонійних коливань. Опір активного фільтра регулюється за допомогою спеціального пристрою силової електроніки і повинен бути за значенням близьким до нуля для основної гармонічної складової та досить великим для гармонійної складової, що фільтрується пасивним фільтром, забезпечуючи «відсікання» її від мережі.

Активні фільтри є відмінною альтернативою для покращення якості електроенергії та корекції коефіцієнта потужності. Вони не знайшли широкого застосування через їх високу вартість. Такі фільтри слугують для виконання ряду завдань [19]:

- придушення вищих гармонік,
- зниження високочастотного сигналу,
- збільшення пропускної здатності розподільчих ліній,

- компенсація реактивної потужності у мережах з гармонійними коливаннями та уникати резонанс,
- узгодження індуктивних споживачів,
- зниження втрат на перегрів у лініях.

Залежно від типу пристрою, що використовується, струми у незбалансованому та нейтральному провідниках можуть досягати неприпустимих значень.

При встановленні активних фільтрів дійсне значення струму знижується, що підвищує можливості трансформації енергії та знижує коефіцієнт потужності від наявності гармонік, знижується встановлена потужність електричних установок. Зниження прихованих витрат можна також розглядати як підвищення продуктивності за рахунок зниження простоїв при виході обладнання з ладу (рис. 2.7) [20].

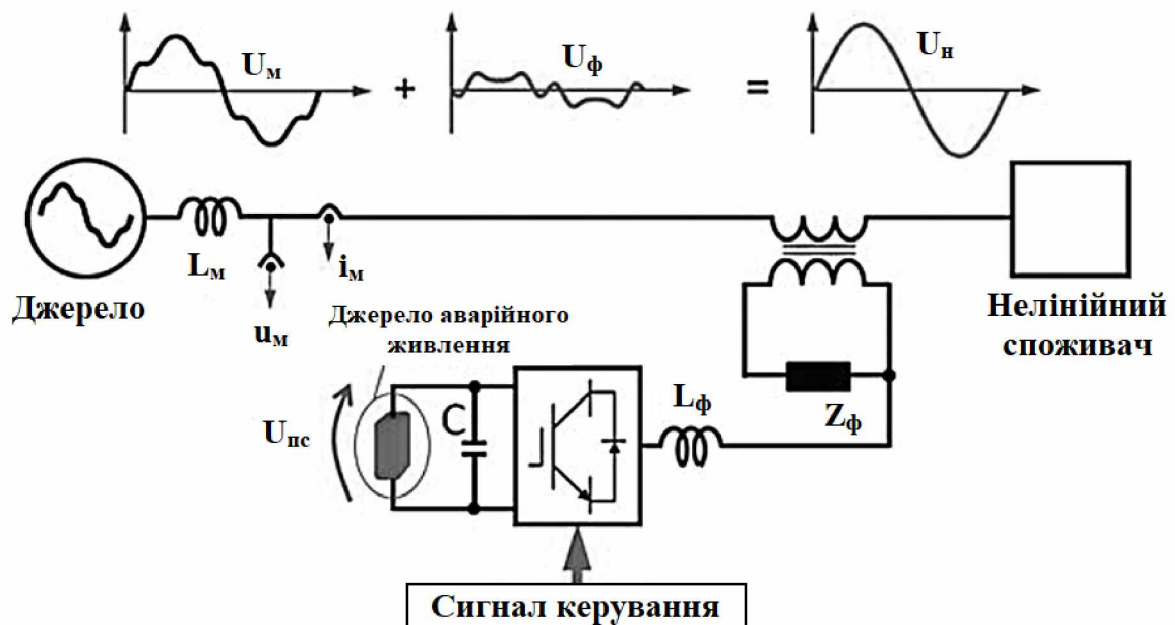


Рисунок 2.7 – Схема встановлення активних фільтрів з метою покращення форми напруги

Активний фільтр працює на основі опорної напруги, значення якої визначається використанням певних алгоритмів керування. Зазначені

алгоритми у якості вхідних даних використовують струм мережі, напругу мережі та напругу в частині постійного струму. Для створення модульованої напруги в системі використовують широтно-імпульсний контролер. За необхідності компенсації падіння напруги можна залучити додатковий накопичувач енергії, підключений паралельно до конденсатора в секції постійного струму.

2.5 Гібридні фільтри

Гармоніки у електричній мережі крім того, можуть мати різне джерело, характеризуються різними частотами та по різному проявлятися при зміні кількісного та якісного складу споживачів. При циркуляції реактивної потужності у електричній системі струми, що її переносять, рухаються шляхом найменшого опору. Для задоволення потреб з придушення будь-яких гармонійних коливань, що виникають при зміні навантаження можуть бути використані гібридні фільтри [21].

Гібридний фільтр являє собою розраховану заздалегідь поєднання активних та пасивних фільтрів [21].

Пасивний фільтр призначений для компенсації високочастотних перешкод та оптимізації при зміні потужності споживання. Активний фільтр призначено для боротьби з низькочастотними гармоніками та покращує ефективність роботи пасивного фільтра.

Перевагою гібридного фільтра є можливість придушення гармонік, що викликають їх інтерференцію та резонансні явища та споживає менше потужності у порівнянні з активними фільтрами.

Щоб отримати більш оптимальні показники роботи гібридних фільтрів необхідно розрахувати відповідні параметри і розробити оптимальну конфігурацію керування. Це дозволить вибрати найкращі

фільтраційні елементи і їх технічні характеристики. Особливо важливо визначити конфігурацію цих фільтрів, що може бути здійснено трьома різними способами: паралельне, послідовне і мішане з'єднання активних і пасивних складових.

Пасивний фільтр складається з ємнісного та індуктивного елемента, а активний фільтр побудовано на основі напівпровідникових елементів. Захисна функція перетворювача полягає у поглинанні небажаних високочастотних гармонік, а накопичувачі енергії забезпечують стабільність роботи системи (рис. 2.8) [21].

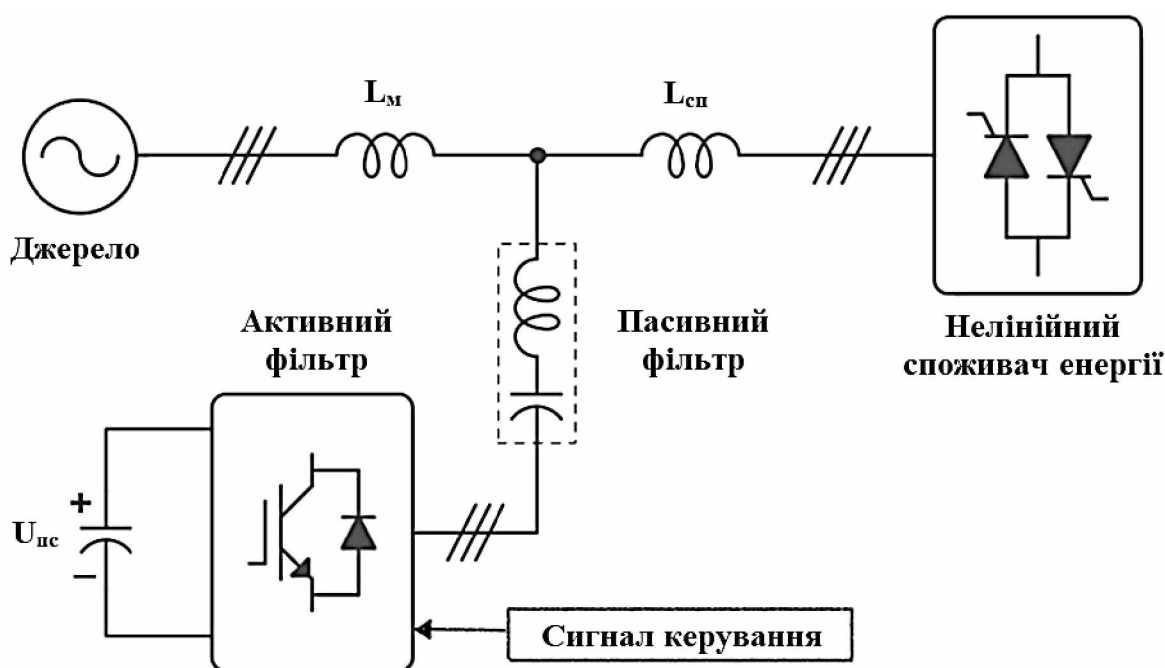


Рисунок 2.8 – Схема гібридного фільтра

Аналіз роботи гібридного фільтра полягає у створенні бар'єру для вищих гармонік, що реалізується шляхом використання активних, індуктивних та ємнісних елементів. Особливістю цих фільтрів також є можливість шунтування окремих елементів у разі необхідності для корекції коефіцієнта потужності.

2.6 Реактори

У якості шунтованих реакторів використовують котушки з мінімальним активним опором, витки якої електрично-ізолювані один від одного, й оснащені засобами комутації (рис. 2.9) [19].

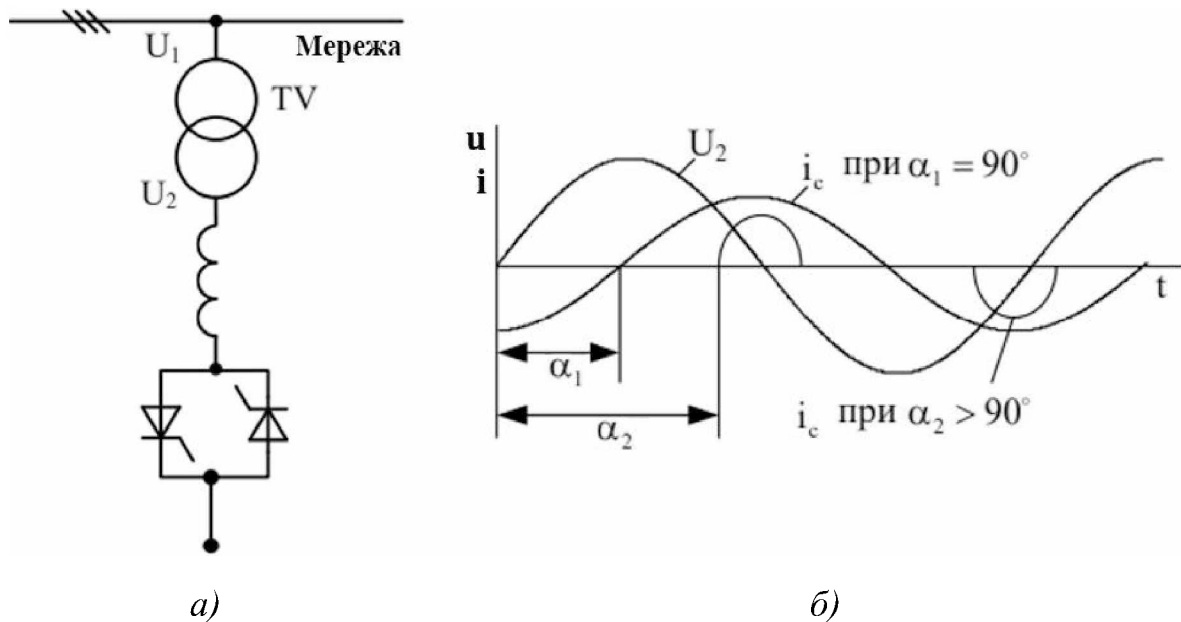


Рисунок 2.9 – Принцип застосування шунтованого реактора: а) схема, б) векторні діаграми напруги та струму (при різних кутах відкриття тиристорів)

У якості засобів керування використовують послідовно включені зустрічно-паралельні тиристири. Шляхом регулювання кутів відмикання тиристорів відбувається зміна першої гармоніки компенсатора – ця залежність має нелінійний характер, що дозволяє регулювати струм реактора.

Дана конструкція відрізняється високим ступенем надійності та є відносно простою за конструкцією. Серед недоліків можна виокремити спотворення форми синусоїдного струму мережі в результаті регулювання, що проявляється у продукуванні вищих гармонік струму та виникненні

додаткових електричних втрат. Така система також вирізняється низькою швидкодією та необхідністю використання та обслуговування додаткового обладнання.

Для зниження гармонійних складових струму можна застосувати схеми, що містять керовані випрямлячі. Часові діаграми роботи компенсатора ілюструють напруги на низькій стороні понижуючого трансформатора та криві мережевих випрямлених напруг струму (рис. 2.10) [19].

При куті відмикання тиристора близьким до 90° відбувається регулювання реактивного споживання при значній величині індуктивності та практично відсутньому активному опорі ланцюга випрямленого струму. Пульсації мають менш виражений характер, що знижує генерацію вищих гармонік.

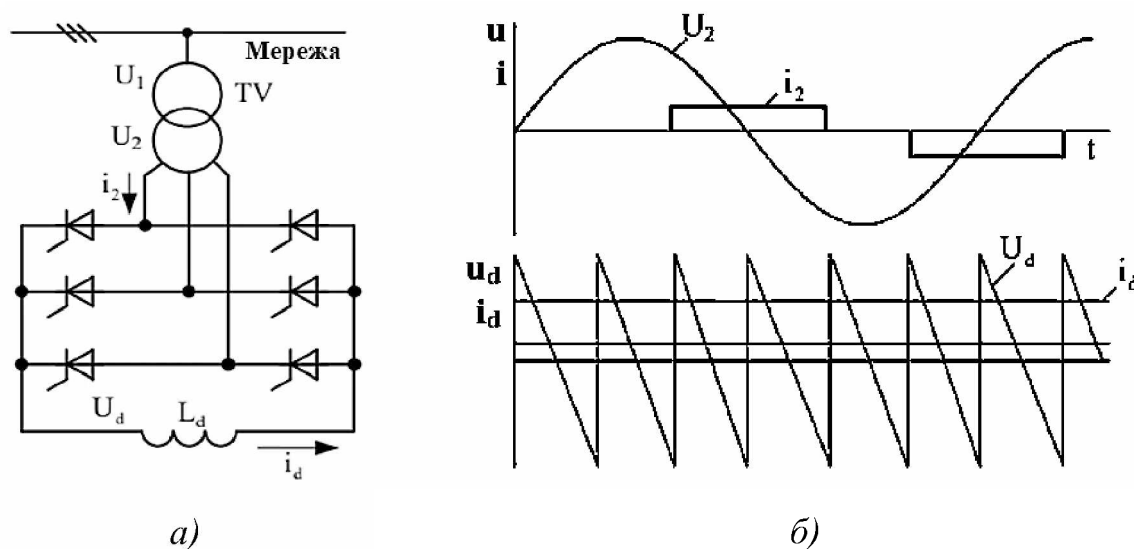


Рисунок 2.10 – Принцип застосування комутованого реактора в ланцюзі постійного струму: а) схема, б) векторні діаграми напруги та струму на реакторі (верхня) і на тиристорах (нижня)

2.7 Компенсатори зі штучною комутацією

Компенсатори даної конфігурації дозволяють суттєво покращити енергетичні характеристики електричних мереж та компенсувати реактивну потужність у різних за конфігурацією системах. Такі системи можуть будуватися шляхом поєднання перетворювача, що побудований на силових напівпровідникових елементах, та реактивного елемента. Дані пристрої відрізняються типом силового елемента, використанням відповідного інвертора (струму чи напруги) [19].

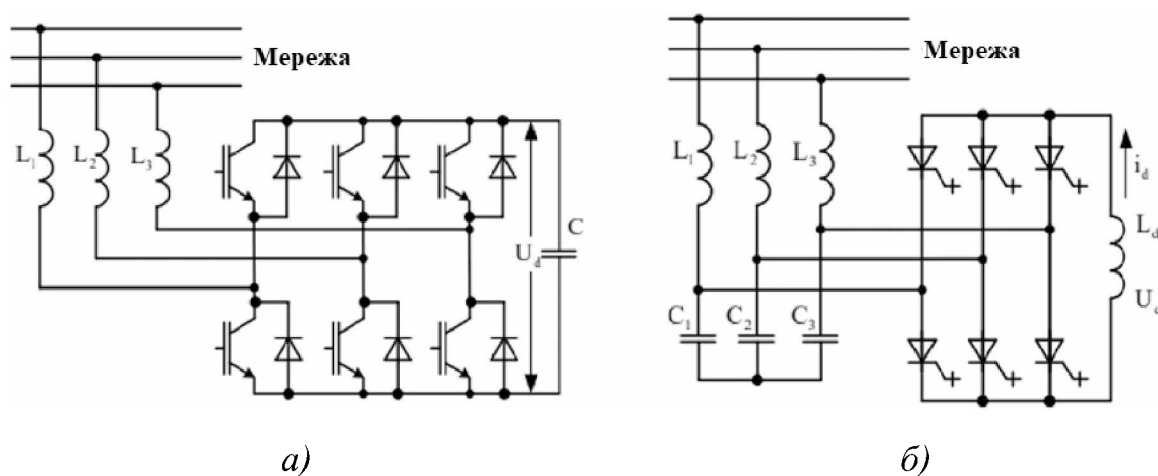


Рисунок 2.11 – Схеми статичних інверторів струму: а) з IGBT-транзисторами, б) з GTO-тиристорами

Процес комутації силових елементів (IGBT-транзистори, GTO-тиристори та інші) у цих компенсаторах забезпечує зсув основної гармоніки струму на 90° відносно вектора напруги. Реактивна потужність компенсатора у моменті визначається індуктивним або ємнісним характером у ланцюзі. Реактори у схемах використовуються для обмеження вихідних струмів та зниження виплеску у мережу рівня вищих гармонік, що виникають від роботи інверторів.

Наведені схеми інверторів є досить габаритними пристроями мають ряд функціональних обмежень до застосування по суміщенню функцій компенсації реактивної потужності та здійснення стабілізації напруги.

Аналогічні властивості мають і перетворювачі частоти з природною комутацією (рис. 2.12) [19].

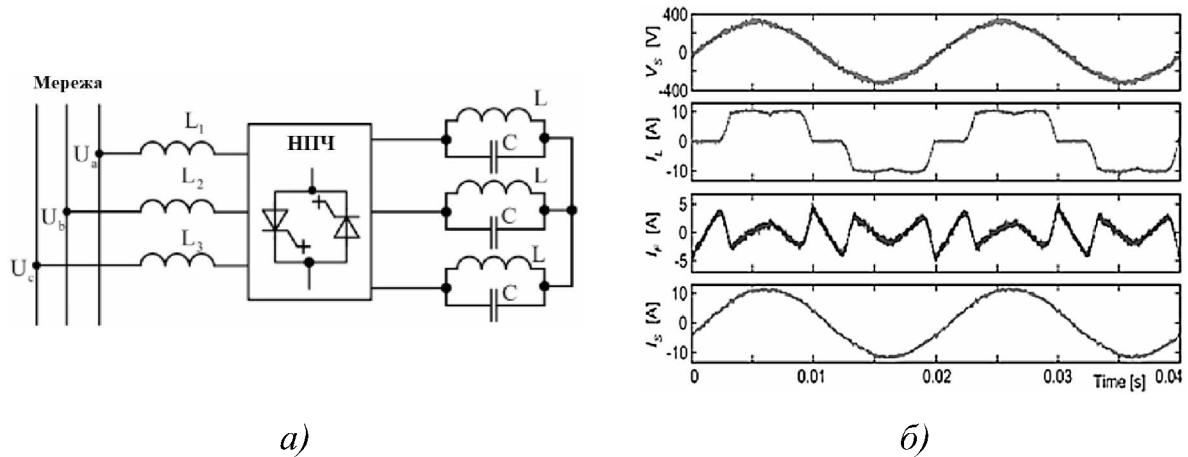


Рисунок 2.12 – Перетворювач частоти з природною комутацією: а) схема, б) векторні діаграми напруги і струмів

Природня комутація досягається шляхом зміни електричної потужності однієї частоти у електричну потужність іншої частоти. Внутрішня характеристика перетворювача – це запізнювання кута зміщення струму, що споживається на вході, і є функцією кута зміщення вихідного струму. Це дозволяє здійснювати контроль реактивного струму на вході незалежно від амплітуди та фази струму на виході. Для роботи означеного пристрою найкраще підходять керовані тиристорами шунтовані конденсатори та котушки індуктивності, перетворювачі та інвертори змінного/постійного струму, перемикачі частоти. Перетворювач частоти поділяється на кілька категорій відповідно до режиму керування, діапазону керування та властивостей навантаження. Тиристири комутуються природно напругою вхідного джерела при цьому досліджується частотне співвідношення між вхідним змінним струмом і

вихідним змінним струмом. За допомогою примусової комутації можна контролювати вхідний коефіцієнт потужності зміщення і автоматично доводити його до прийнятних значень. Особливістю роботи перетворювачів є те, що змінна синусоїдна хвиля потрібної частоти генерується керованою провідністю тиристорів, яка змінюється у відповідності до еталонної форми сигналу. Ці перетворювачі забезпечують необхідний режим генерації реактивної потужності [22].

Компенсація реактивної потужності у промисловому виробництві має суттєве значення. В теперішній час застосовується значна кількість приладів на основі силової електроніки і перетворювачі потужності. Недоліком їх використання є внесення спотворень хвиль напруги та струму живлення. Для уникнення зниження якості електричної енергії необхідно застосовувати пристрої для компенсації реактивної потужності та придушення вищих гармонік. Найпоширенішим у теперішній час є спосіб компенсації реактивної потужності шляхом використання конденсаторів. Завдяки широкій номенклатурі конденсаторів можна підібрати конденсатори практично для будь-яких умов живлення.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НЕЛІНІЙНИХ СПОЖИВАЧІВ

3.1 Визначення електричних навантажень

При електропостачанні споживачів вирішуються комплексні питання по генерації, по передачі та по розподілу електричної енергії. Передача електричної енергії до споживачів реалізується через високовольтні лінії електропередач. Прогрес у будові систем енергопостачання призводить до їх ускладнення, збільшення розгалужень розподільчих мережі, застосуванні розподіленої генерації. Зазначене вимагає широкого впровадження інструментів по автоматизації та диспетчеризації [23].

Основне устаткування підприємства охоплює різноманітні засоби для виготовлення та обробки окремих деталей і збиральних одиниць устаткування. Живлення електроспоживачів відбувається від низьковольтової підстанції, при цьому передбачена можливість по її розширенню при збільшенні кількості споживачів [23].

Для вірного визначення потужності трансформаторів підстанції необхідно здійснити розрахунок електричних навантажень.

Схему електропостачання представлено на рис. 3.1.

Розрахункові навантаження повинні бути визначені на різних рівнях системи електропостачання: розподільчому (низьковольтному) та високовольтному.

Для кожного з приєднаних до РП електроприймача визначаємо коефіцієнт використання k_{ϵ} і коефіцієнт потужності $\cos \varphi$.

Змінні навантаження визначаємо за залежностями:

– активна потужність [24]:

$$P_{зм} = k_{\epsilon i} \cdot P_{ні} \quad (3.1)$$

– реактивна потужність [24]:

$$Q_{зм} = k_{\text{вi}} \cdot P_{\text{нi}} \cdot \text{tg } \varphi = P_{зм} \cdot \text{tg } \varphi \quad (3.2)$$

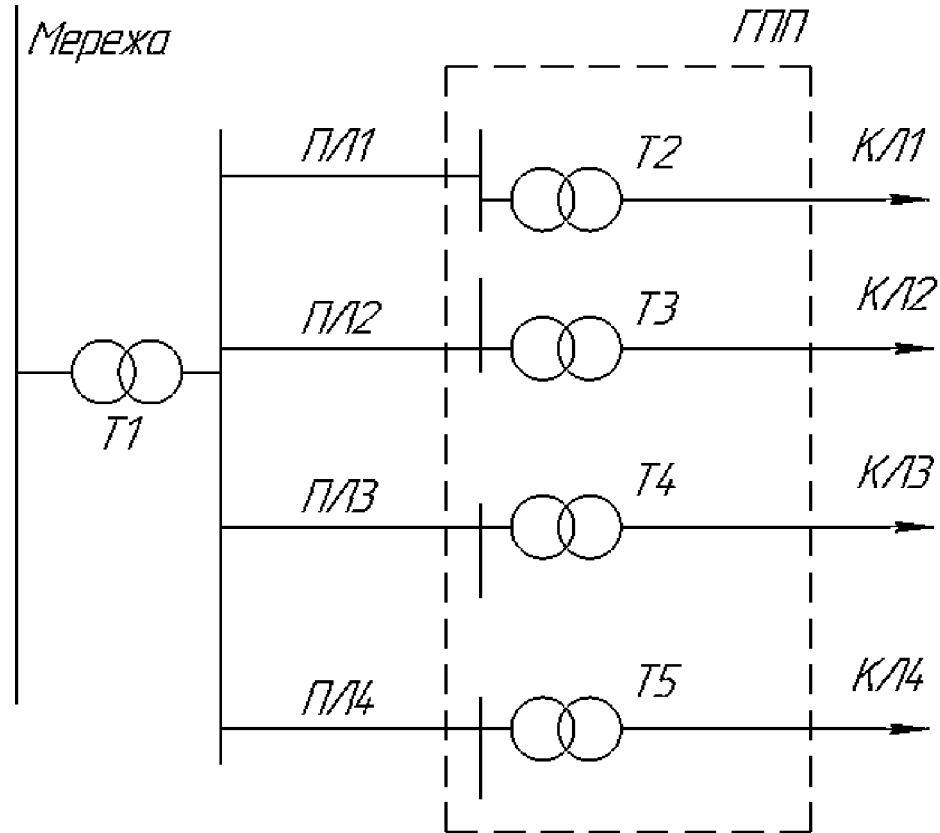


Рисунок 3.1 – Схема електропостачання підприємства: Т1-Т5 – трансформатори, ПЛ1-ПЛ4 – повітряні лінії, КЛ1-КЛ4 – кабельні лінії

Груповий коефіцієнт використання всіх приєднаних до РП електроприймачів [24]:

$$k_{зр.} = \frac{\sum k_{\text{вi}} \cdot P_{\text{нi}}}{\sum P_{\text{нi}}} = \frac{\sum P_{зм}}{\sum P_{\text{нi}}} \quad (3.3)$$

де $\sum P_{зм}$ – сума середніх розрахункових потужностей всіх електроприймачів, приєднаних до РП.

За знайденим значенням k_{cp} за [24] визначаємо розрахунковий коефіцієнт використання $k_p = 0,58$.

Для безпосереднього підключення електричних споживачів використовується розподільча мережа, яку облаштовують за допомогою шин і вузлів приєднання. Схема електропостачання електроспоживачів наведено на рис. 3.2 [23].

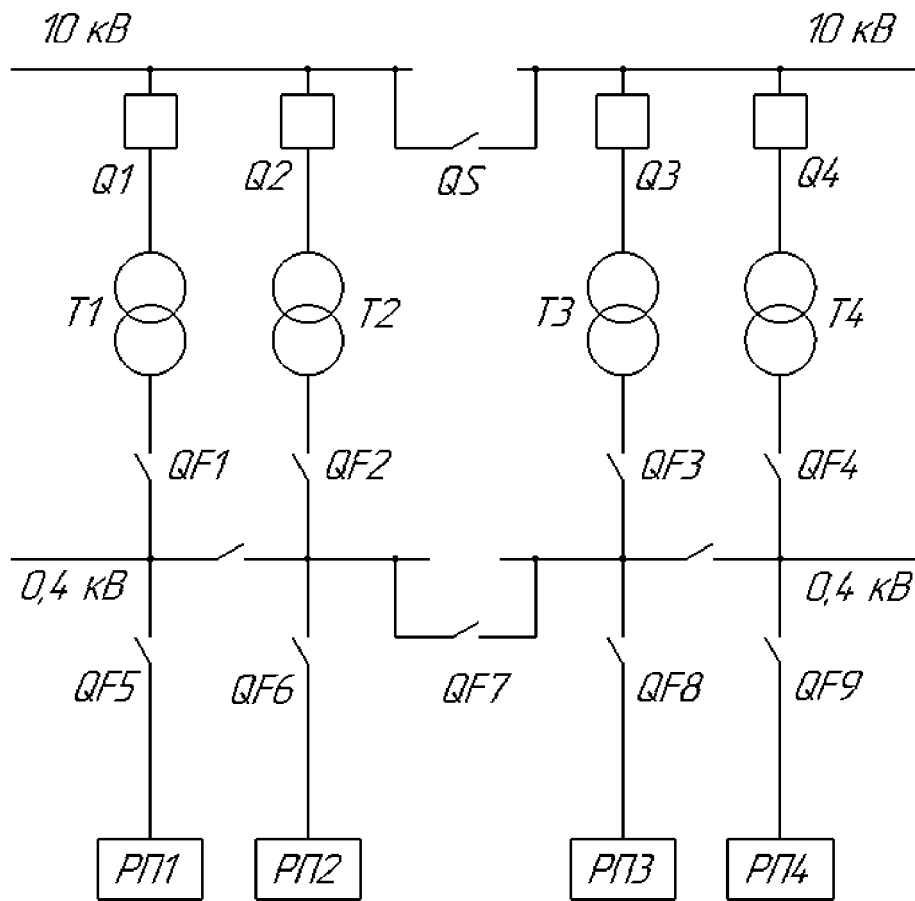


Рисунок 3.2 – Розподільча схема електропостачання

Результати розрахунків зводимо до табл. 3.1 – 3.4.

Розрахункові потужності визначимо за формулами:

– активна потужність [24]:

$$P_p = k_p \cdot \Sigma P_{зм} \quad (3.4)$$

– реактивна потужність [24]:

$$Q_p = \Sigma Q_{zm} \quad (3.5)$$

– повна потужність [24]:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (3.6)$$

Таблиця 3.1 – Розрахунок навантажень по розподільчим пунктам підприємства

№ з/п	Найменування дільниці підприємства	Кіл-ть споживачів, шт.	Одинична потужність споживача, кВт	Коеф-т використання споживача, k_v	Коеф-т потужності одиничного споживача, $\cos \varphi$
1	Металевий цех	9	12,0	0,40	0,75
2	Ремонтно-ливарний цех	19	90,0	0,50	0,70
3	Ковальсько-зварювальний цех	22	55,0	0,60	0,65
4	Ковальсько-штампувальний цех	25	40,0	0,70	0,60
5	Механічний цех	22	39,0	0,45	0,70
6	Механозбірний цех	18	40,0	0,7	0,75
7	Компресорна з насосною	8	30,0	0,65	0,80
8	Освітлення	50	4,0	0,8	0,95

Таблиця 3.2 – Розрахункові дані по встановленому навантаженню

Найменування дільниці підприємства	Актив. пот- сть, P_n , кВт	К-ть сп-ів, n	Коеф-т вик-ня, k_e	Коеф-т пот-ті, $\cos\varphi$	Коеф-т реак-ої пот-ті, $\tan\varphi$	Сумарна акт-на пот-сть, $P_{\text{н сум}}$, кВт	Сумарна реак-на пот-сть, $Q_{\text{н сум}}$, квар
РП1							
Металевий цех	12,0	9	0,4	0,75	0,88	108	95,2
Ремонтно- ливарний цех	90,0	19	0,5	0,7	1,02	1710	1744,5
Разом:	—	28	0,45	0,725	0,95	1818	1839,8
РП2							
Ковальсько- зварювальний цех	55,0	22	0,6	0,65	1,17	1210	1414,6
Ковальсько- штампувальний цех	40,0	25	0,7	0,6	1,33	1000	1333,3
Разом:	—	47	0,65	0,625	1,25	2210	2748,0
РП3							
Механічний цех	39,0	22	0,45	0,7	1,02	858	875,3
Механозбірний цех	40,0	18	0,7	0,75	0,88	720	635,0
Разом:	—	40	0,575	0,725	0,95	1578	1510,3
РП4							
Компресорна з насосною	30,0	8	0,65	0,8	0,75	240	180,0
Освітлення	4,0	50	0,8	0,95	0,33	200	65,7
Разом:	—	58	0,725	0,875	0,54	440	245,7

Таблиця 3.3 – Розрахункові дані по середньому навантаженню

Споживачі	Середня активна пот-сть, P_c , кВт	Середня реактивна пот-сть, Q_c , квар	Середня повна пот-сть, S_c , кВА
РП1			
Металевий цех	43,2	38,1	57,6
Ремонтно-ливарний цех	855	872,3	1221,4
Разом:	898,2	910,4	1279,0
РП2			
Ковальсько-зварювальний цех	726,0	848,8	1116,9
Ковальсько-штампувальний цех	700	933,3	1166,7
Разом:	1426,0	1782,1	2283,6
РП3			
Механічний цех	386,1	393,9	551,6
Механозбірний цех	504	444,5	672,0
Разом:	890,1	838,4	1223,6
РП4			
Компресорна з насосною	156,0	117,0	195,0
Освітлення	160	52,6	168,4
Разом:	316,0	169,6	363,4

Таблиця 3.4 – Розрахункові дані по максимальному навантаженню

Дільниця	Еф-ні пров-ки, n_{ef}	Коеф-т актив-ї пот-сті, k_m	Коеф-т реакт-ї пот-ті, k'_m	Активна пот-сть, P_p , кВт	Реак-на пот-сть, Q_p , квар	Повна пот-сть, S_p , кВА
Металевий цех	21,30	2,1	1,11	90,7	80,0	121,0
Ремонтно-ливарний цех	21,30	2,10	1,11	1795,5	1831,8	2565,0
Ковальсько-зварювальний цех	45,84	2,12	1,15	1539,1	1799,4	2367,9
Ковальсько-штампувальний цех	45,84	2,12	1,15	1484,0	1978,7	2473,3
Механічний цех	39,99	1,98	0,95	764,5	779,9	1092,1
Механозбірний цех	39,99	1,98	0,95	997,9	880,1	1330,6
Компресорна з насосною	24,20	1,75	0,87	273,0	204,8	341,3
Освітлення	24,20	1,75	0,87	280,0	92,0	294,7
Сер.знач.	34,1	2,0	1,08	—	—	—
Разом	—	—	—	7224,7	7646,7	10585,8

3.2 Вибір кількості та потужності трансформаторів підстанцій

Для вибору кількості та потужності трансформаторів підстанцій окремих ділень підприємства, необхідно виокремити розрахункові навантаження цих ділень та визначити категорію по надійності електропостачання споживачів цих ділень. З цією метою на основі табл. 3.4, складаємо табл. 3.5, де визначаємо розрахункові навантаження P_p , Q_p та S_p та категорії надійності електропостачання і характер навколишнього середовища на ділянці [25].

У переважній більшості випадків навантаження трансформаторів на ділянках є неоднорідним за надійністю – тобто одночасно можуть бути присутніми споживачі I-ї, II-ї та III-ї категорії, але наявність I-ї категорії споживачів вимагає застосування дублюючого трансформатора для забезпечення надійності та безперебійності електропостачання. З урахуванням цього зауваження двотрансформаторні підстанції будемо застосовувати при наявності на ділянках електроприймачів I-ї та II-ї категорій, а також II-ї та III-ї категорій – на енергоємних ділянках [25].

Коефіцієнт завантаження силових трансформаторів визначається за залежністю [25]:

$$k_{з.тр.} = \frac{S_p}{n_{тр.} \cdot S_{н.тр.}} \quad (3.7)$$

де S_p – повна розрахункова потужність споживачів ділянки, кВА,

$n_{тр.}$ – кількість трансформаторів, шт.,

$S_{н.тр.}$ – номінальна потужність трансформатора, кВА.

Коефіцієнт завантаження будемо приймати з наступних міркувань [23]:

- для двотрансформаторних підстанцій при наявності та переважній більшості навантажень I-ї категорії: $k_{н.тр.} = 0,65–0,7$,
- для двотрансформаторних підстанцій при наявності та переважній більшості навантажень II-ї категорії: $k_{н.тр.} = 0,7–0,8$,
- для однострансформаторних підстанцій з урахуванням взаємного резервування навантажень II-ї категорії: $k_{н.тр.} = 0,7–0,85$,
- для однострансформаторних підстанцій при наявності та переважній більшості навантажень III-ї категорії: $k_{н.тр.} = 0,85–0,95$.

Таблиця 3.5 – Дані по вибору трансформаторів дільниць

Дільниця	Активна пот-сть, P_p , кВт	Реак-на пот-сть, Q_p , квар	Повна пот-сть, S_p , кВА	Категорія живл.	Кількк. і пот-ть тр.	Коеф-т зав. k_z
Металевий цех	90,7	80,0	121,0	III	1x160	0,85
Ремонтно-ливарний цех	1795,5	1831,8	2565,0	I-II	2x1600	0,7
Ковальсько-зварювальний цех	1539,1	1799,4	2367,9	II	2x1600	0,7
Ковальсько-штампувальний цех	1484,0	1978,7	2473,3	II		
Механічний цех	764,5	779,9	1092,1	II	2x1000	0,7
Механозбірний цех	997,9	880,1	1330,6	II-III		
Компресорна з насосною	273,0	204,8	341,3	II	2x1000	0,75
Освітлення	280,0	92,0	294,7	III		
Разом:	7224,7	7646,7	10585,8	–	–	–

3.3 Розробка заходів по компенсації реактивної потужності

Визначимо потужність пристроїв по компенсації реактивної потужності в низьковольтній мережі.

Для компенсації реактивної потужності приймаємо блоки конденсаторів, стандартні значення яких обираємо з номінального ряду: 20; 40; 50; 75; 100; 135; 150; 200; 300; 450; 600 квар.

Оптимальна кількість трансформаторів для заданих умов складає $n_{opt.} = 8$.

Згрупуємо окремі навантаження по приєднанню до РП.

Найбільше значення реактивної потужності, що можна максимально можливо передавати по мережі РП1, визначимо за залежністю [24]:

$$\begin{aligned} Q_{max1} &= \sqrt{(n_{РП1} \cdot k_z \cdot S_{н.тр.})^2 - P_{РП1}^2} = \\ &= \sqrt{(2 \cdot 0,775 \cdot 1600)^2 - 1886,2^2} = 1610,2 \text{ квар.} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} Q_{max2} &= \sqrt{(n_{РП2} \cdot k_z \cdot S_{н.тр.})^2 - P_{РП2}^2} = \\ &= \sqrt{(4 \cdot 0,7 \cdot 1600)^2 - 3023,1^2} = 3306,2 \text{ квар.} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} Q_{max3} &= \sqrt{(n_{РП3} \cdot k_z \cdot S_{н.тр.})^2 - P_{РП3}^2} = \\ &= \sqrt{(4 \cdot 0,7 \cdot 630)^2 - 1762,4^2} = 75,1 \text{ квар.} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} Q_{max4} &= \sqrt{(n_{РП4} \cdot k_z \cdot S_{н.тр.})^2 - P_{РП4}^2} = \\ &= \sqrt{(2 \cdot 0,75 \cdot 400)^2 - 553^2} = 232,8 \text{ квар.} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Сумарна потужність конденсаторних батарей складе [24]:

$$Q_{pРП1} = Q_{РП1} - Q_{max1} = 1911,8 - 1610,2 = 301,6 \text{ квар.} \quad (3.12)$$

$$Q_{pРП2} = Q_{РП2} - Q_{max2} = 3778,1 - 3306,2 = 471,9 \text{ квар.} \quad (3.13)$$

$$Q_{pPI3} = Q_{PI3} - Q_{max3} = 1660,0 - 75,1 = 1584,9 \text{ квар.} \quad (3.14)$$

$$Q_{pPI4} = Q_{PI4} - Q_{max4} = 296,8 - 232,8 = 64 \text{ квар.} \quad (3.15)$$

Визначаємо додаткове значення реактивної потужності для оптимального зниження втрат за залежностями [24]:

$$\begin{aligned} Q_{дод.PI1} &= Q_{pPI1} - Q_{PI1} - 0,5 \cdot n_{PI1} \cdot S_{н.тр.} = \\ &= 301,6 - 1610,2 - 0,5 \cdot 2 \cdot 1600 = -2908,6 \text{ квар.} \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} Q_{дод.PI2} &= Q_{pPI2} - Q_{PI2} - 0,5 \cdot n_{PI2} \cdot S_{н.тр.} = \\ &= 471,9 - 3778,1 - 0,5 \cdot 4 \cdot 1600 = -6506,2 \text{ квар.} \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} Q_{дод.PI3} &= Q_{pPI3} - Q_{PI3} - 0,5 \cdot n_{PI3} \cdot S_{н.тр.} = \\ &= 1584,9 - 1660,0 - 0,5 \cdot 4 \cdot 630 = -1335,1 \text{ квар.} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} Q_{дод.PI4} &= Q_{pPI4} - Q_{PI4} - 0,5 \cdot n_{PI4} \cdot S_{н.тр.} = \\ &= 64,0 - 296,8 - 0,5 \cdot 4 \cdot 400 = -1032,8 \text{ квар.} \end{aligned} \quad (3.19)$$

З огляду на те, що усі додаткові ємності негативні, то для всіх груп споживачів додаткове значення реактивної потужності для оптимального зниження втрат приймаємо дорівнюючим нулю.

Потужність низьковольтних конденсаторних батарей: $Q_{кPI1} = 301,6$ квар, $Q_{кPI2} = 471,9$ квар, $Q_{кPI3} = 1584,9$ квар, $Q_{кPI4} = 64$ квар.

Розподіляємо конденсаторні батареї між окремими цехами з відповідним значенням реактивної потужності за пропорційністю її споживання [24]:

$$Q_{\bar{\kappa}i} = \frac{Q_{\kappa \text{ PII}} \cdot Q_{pi}}{Q_p} \quad (3.20)$$

– металевий цех:

$$Q_{\bar{\kappa}1} = \frac{301,6 \cdot 80}{1911,8} = 12,6 \text{ квар},$$

приймаємо зі стандартного ряду блоки конденсаторів $Q_{\bar{\kappa}1} = 2 \times 20 = 40$ квар. Тип батарей конденсаторів: УКБН-0,38-20-50УЗ.

– ремонтно-ливарний цех:

$$Q_{\bar{\kappa}2} = \frac{301,6 \cdot 1831,8}{1911,8} = 289 \text{ квар},$$

приймаємо зі стандартного ряду блоки конденсаторів $Q_{\bar{\kappa}2} = 2 \times 300 = 600$ квар. Тип батарей конденсаторів: УКБН-0,38-300-50УЗ.

– ковальсько-зварювальний цех:

$$Q_{\bar{\kappa}3} = \frac{471,9 \cdot 1799,4}{3778,1} = 224,8 \text{ квар},$$

приймаємо зі стандартного ряду блок конденсаторів $Q_{\bar{\kappa}3} = 2 \times 200 + 2 \times 20 = 440$ квар. Тип батарей конденсаторів: УКБН-0,38-20-50УЗ, УКБН-0,38-200-50УЗ (200 квар).

– ковальсько-штампувальний цех:

$$Q_{\bar{\kappa}4} = \frac{471,9 \cdot 1978,7}{3778,1} = 247,1 \text{ квар},$$

приймаємо зі стандартного ряду блок конденсаторів $Q_{\delta\kappa 4} = 2 \times 300 = 600$ квар. Тип батарей конденсаторів: УКБН-0,38-300-50УЗ.

– механічний цех:

$$Q_{\delta\kappa 5} = \frac{1584,9 \cdot 779,9}{1660,0} = 744,6 \text{ квар},$$

приймаємо зі стандартного ряду блок конденсаторів $Q_{\delta\kappa 4} = 2 \times 600 + 2 \times 150 = 1500$ квар. Тип батарей конденсаторів: УКБН-0,38-150-50УЗ, УКБН-0,38-600-50УЗ (600 квар).

– механозбірний цех:

$$Q_{\delta\kappa 6} = \frac{1584,9 \cdot 880,1}{1660,0} = 840,3 \text{ квар},$$

приймаємо зі стандартного ряду блок конденсаторів $Q_{\delta\kappa 4} = 2 \times 600 + 2 \times 300 = 1800$ квар. Тип батарей конденсаторів: УКБН-0,38-300-50УЗ (300 квар), УКБН-0,38-600-50УЗ (600 квар).

– компресорна з насосною:

$$Q_{\delta\kappa 7} = \frac{64,0 \cdot 204,8}{296,8} = 44,2 \text{ квар},$$

приймаємо зі стандартного ряду блок конденсаторів $Q_{\delta\kappa 4} = 2 \times 50 = 100$ квар. Тип батарей конденсаторів: УКБН-0,38-50-50УЗ.

– освітлення:

$$Q_{\delta\kappa 8} = \frac{64,0 \cdot 92,0}{296,8} = 19,8 \text{ квар},$$

приймаємо зі стандартного ряду блок конденсаторів $Q_{\text{БК4}} = 2 \times 20 = 40$ квар. Тип батарей конденсаторів: УКБН-0,38-40-50УЗ.

3.4 Схеми зовнішнього та внутрішнього електропостачання

Для підприємств середньої чи великої потужності виникає необхідність спорудження однієї чи кількох головних понижувальних підстанцій (ГПП) – рис. 3.3 [23].

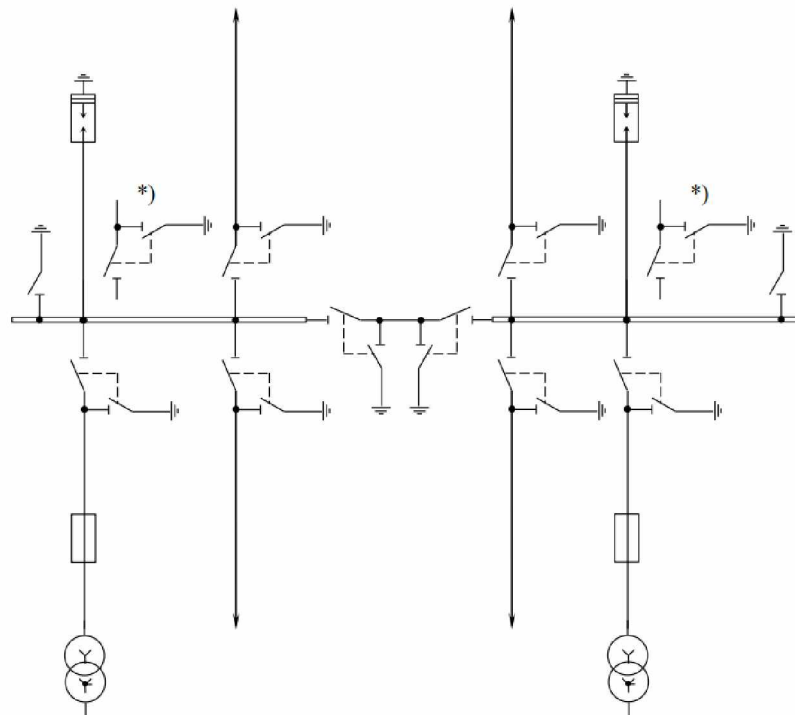


Рисунок 3.3 – Схема приєднання ГПП

При радіальному живленні «глухе» приєднання повітряних ліній до трансформатора здійснюється через роз'єднувач, а при значному віддаленні ГПП від джерела живлення – через роз'єднувач і короткозамикач. На підприємствах із наявністю забрудненого середовища

слід уникати застосування перемичок через підвищення ймовірності виникнення аварій. «Перемичка» між лініями живлення може застосовуватися як при радіальному так і при магістральному приєднанні ГПП. Зазначена «перемичка» може бути як з її автоматичним включенням так і неавтоматизована та повинна застосовуватися у випадках коли у післяаварійному режимі (при відключенні другого трансформатора) не можна повністю покрити навантаження споживачів I-ї і II-ї категорій [23].

Схему внутрішнього електропостачання приймаємо одноступінчастою, при якій вся електрична енергія розподіляється з шин ГПП за радіальною схемою. В цілому, вибір схеми розподілу електричної енергії залежить від багатьох факторів – взаємного розташування ГПП і споживачів, високовольтних і низьковольтних електроприймачів, кількості та потужності трансформаторів на цехових підстанціях, напрямків прокладання трас живлення та іншого. При розробці схеми розподілу електричної енергії слід пам'ятати про відповідну категорію надійності електропостачання трансформаторних підстанцій та відповідні схеми резервування.

У разі наявності на підприємстві значної кількості потужних споживачів з різко змінним навантаженням, необхідно врахувати дані особливості при розробці низьковольтної схеми живлення. Ті приймачі, що володіють різко змінним навантаженням підключаються до одного з плечей зведеного реактора при застосування двохобмоткових трансформаторів на ГПП.

4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ПРИСТРОЇВ ПО КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

4.1 Загальні принципи створення моделей

Для ініціалізації діагностики стану електричних мереж можна використати різноманітні методики аналізу. Дані про роботу електричних мереж можна піддавати статистичному аналізу, включаючи порівняння середніх вимірних значень з поточними даними [26].

Аналіз стану мережі часто складається з двох основних етапів: визначення конфігурації мережі та оцінка її стану. Основна функція конфігурування моделі полягає в можливості будови моделі з урахуванням усіх вузлів та забезпеченні їх з'єднань на основі заданих функціональних зв'язків [26].

Для забезпечення точності та надійності процесу моделювання досить важливо коректно вибрати відповідну модель електричної мережі. У процесі оцінки стану системи необхідно здійснити попередній аналіз усіх частин енергосистеми, для чого в реальному часі визначаються показники телеметричних даних [27].

У моделюванні електричних мереж, платформа Matlab є досить ефективним інструментарієм, що забезпечує гнучкість у врахуванні різноманітних аспектів системи. Ця гнучкість є особливо цінною у контексті сучасних електричних систем, які стають все більш інтегрованими та складними [28].

Matlab дозволяє проводити деталізовані симуляції, що можуть варіюватися від високочастотних явищ до довготривалих сценаріїв, таких як поведінка споживачів протягом дня або навіть року. Це робить платформу незамінною для глибокого аналізу та оптимізації роботи електричних систем. Зокрема, можливість вибору між різними режимами

симуляції, такими як безперервний режим для довготривалих симуляцій або дискретний режим для високочастотних досліджень, надає додаткову гнучкість у моделюванні [28].

На рис. 4.1 наведено алгоритм складання моделі в Matlab-Simulink для здійснення компенсації реактивної потужності в електричній мережі.

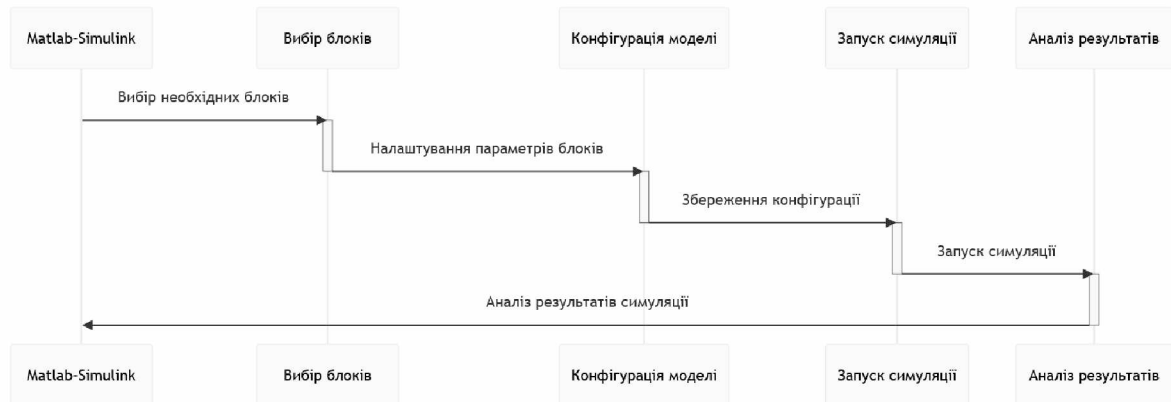


Рисунок 4.1 – Алгоритм складання моделі в Matlab-Simulink для здійснення компенсації реактивної потужності в електричній мережі

4.2 Складання моделі електричної мережі без застосування засобів компенсації реактивної потужності

На рис. 4.2 наведено складену в Matlab-Simulink модель електричної мережі без застосування засобів компенсації реактивної потужності.

Основні складові даної моделі наступні [28]:

– «Programmable Voltage Source» являє собою програмоване джерело живлення, що генерує трифазний синусоїдний сигнал, вихід якого підключено до системи живлення,

– «Three-Phase Series RLC Branch» (5800 MVA та 350 MVA, 180 MV, 11 MV) – блоки, що реалізують послідовні гілки, що складаються з резистора, котушки індуктивності та конденсатора,

- «powergui» – блок, що надає додаткові можливості для дослідження електричних систем у Simulink,
- «Вимірювання» – блок, що являє собою підсистему, яка виконує функції вимірювання параметрів роботи системи (напруга, струм, потужність та інші),
- «Мережа» – блок, що являє собою підсистему, яка представляє зовнішню електричну мережу,
- «Scope» – блоки дозволяють візуально відобразити сигнали у часі.

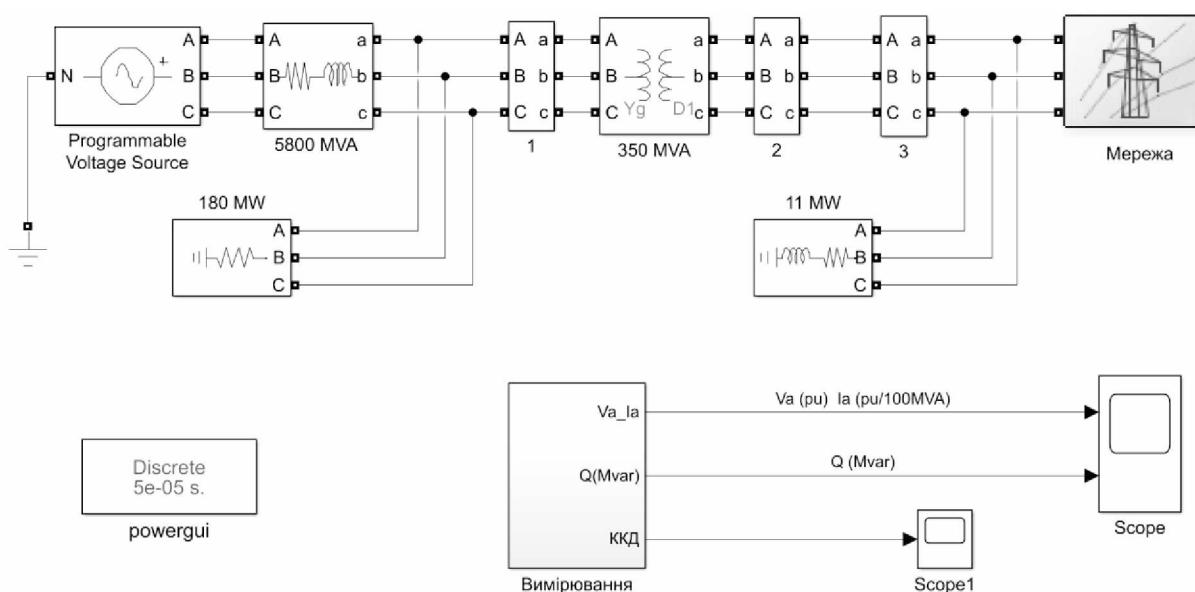


Рисунок 4.2 – Модель електричної мережі без застосування засобів компенсації реактивної потужності

На рис. 4.3 наведено склад блоку «Мережа», який імітує лінію споживання електричної енергії з нелінійними споживачами, що продукують реактивну потужність у мережу.

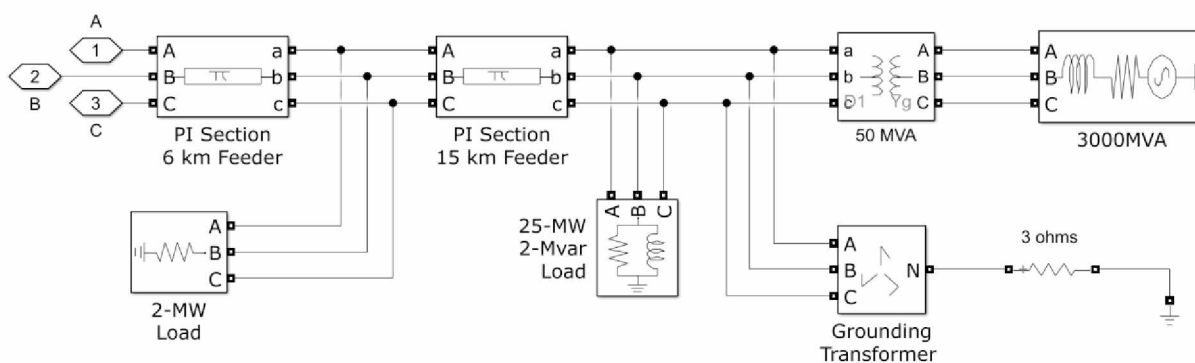


Рисунок 4.3 – Склад блоку «Мережа»

На рис. 4.4 наведено склад блоку «Вимірювання», призначено для розрахунку ККД мережі у залежності від продукування реактивної потужності у мережу.

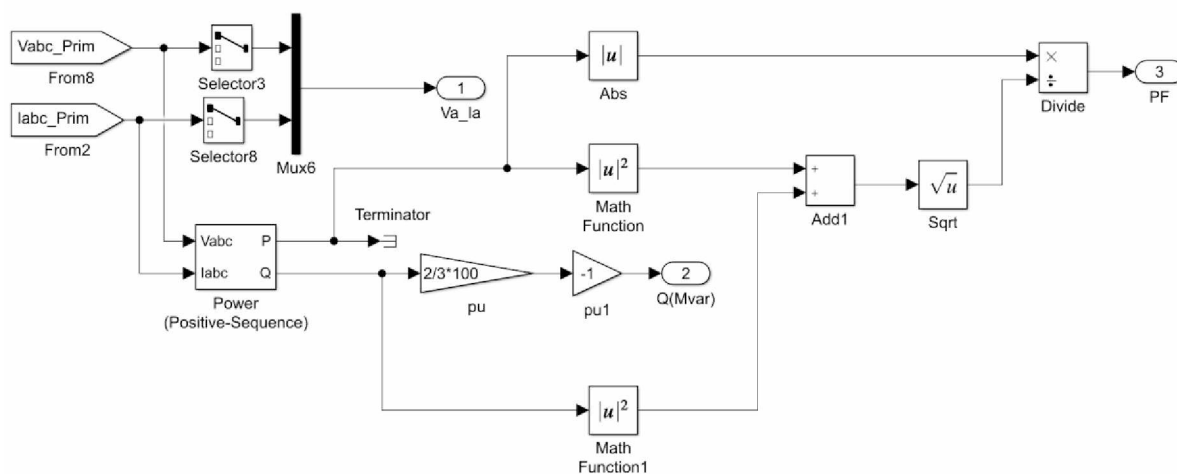


Рисунок 4.4 – Склад блоку «Вимірювання»

Результати моделювання за схемою (рис. 4.2) наведено на рис. 4.5. Аналіз графічних залежностей (верхній графік рис. 4.5) показує, що між значеннями напруги і струму є фазовий зсув, що свідчить про наявність у електричній мережі реактивної потужності, що ілюструє нижній графік (рис. 4.5).

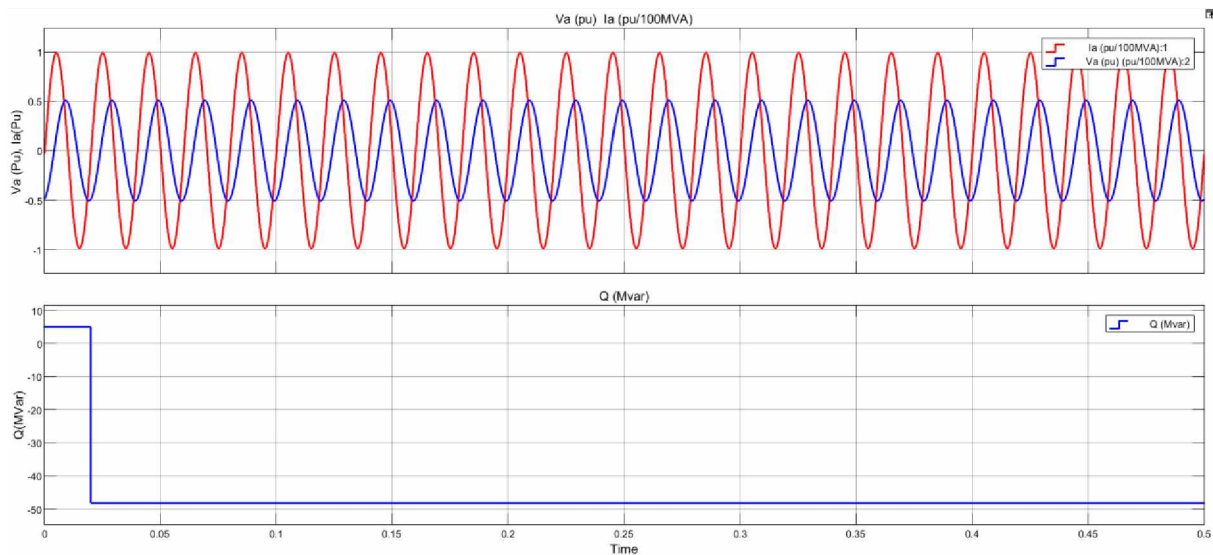


Рисунок 4.5 – Результати моделювання

На рис. 4.6 наведено графічне визначення значення електричного ККД мережі, що знаходиться на рівні 30%.

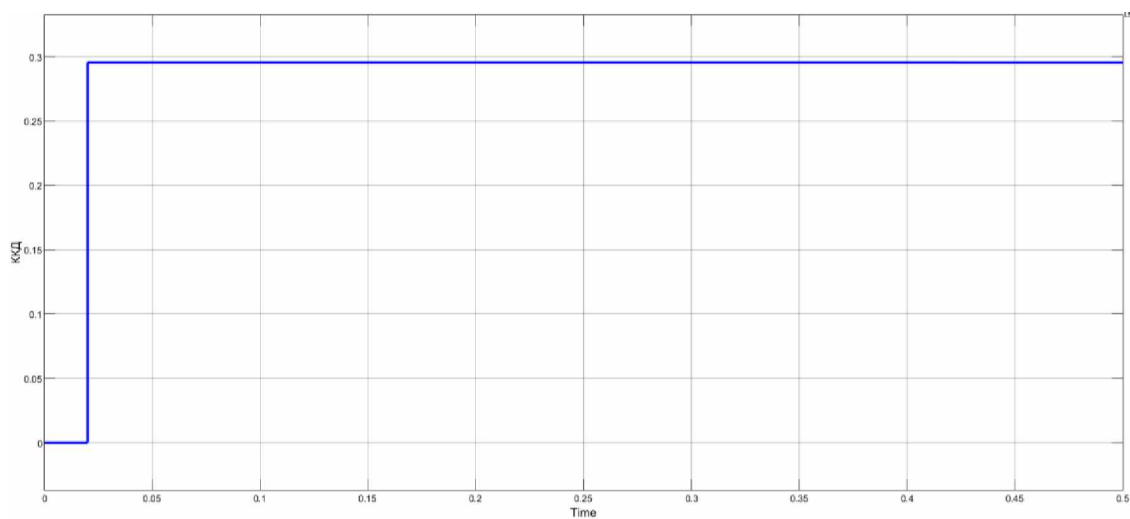


Рисунок 4.6 – Визначення значення електричного ККД мережі

Проведене моделювання говорить про необхідність впровадження заходів по компенсації реактивної потужності.

4.3 Складання моделі електричної мережі при застосуванні засобів компенсації реактивної потужності

На рис. 4.7 наведено складену в Matlab-Simulink модель електричної мережі при застосування засобів компенсації реактивної потужності, у якості яких використано індуктивні та ємнісні елементи, що керуються силовими напівпровідниковими пристроями – тиристорами. Керування тиристорами (кути їх відкриття) формуються у залежності від значення кількісних показників реактивної потужності у електричній мережі, що продукується нелінійними елементами [28].

На рис. 4.8 наведено склад блоку «Вимірювання» в модернізованій моделі (рис. 4.7), який крім розрахунку ККД мережі у залежності від продукування реактивної потужності у мережу, доповнено блоками, що дозволяють проілюструвати параметри елементів, що керують кутами відкриття тиристорів. Керування часу відкриття тиристорів (шляхом регулювання кута) дозволяє керувати рівнем компенсації реактивної потужності.

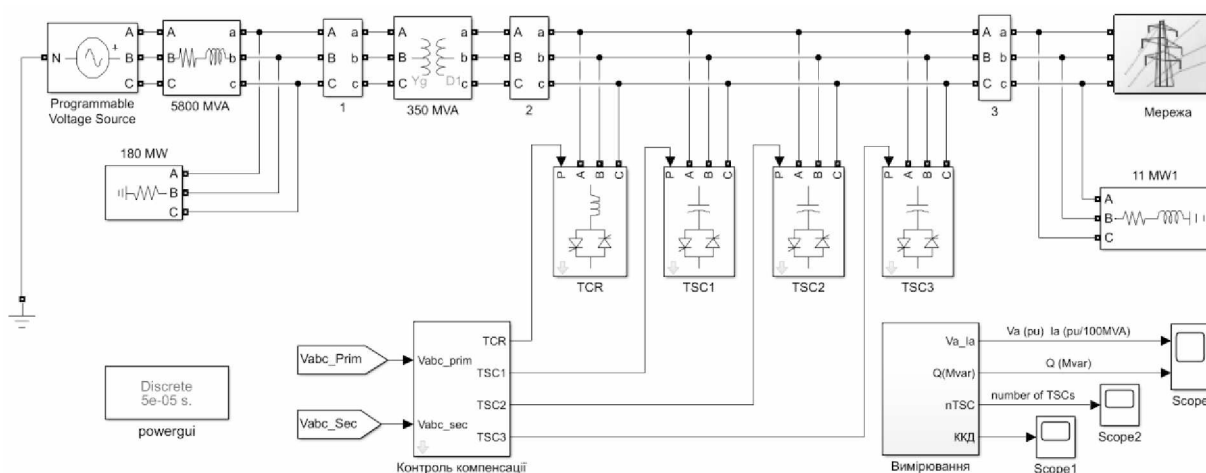


Рисунок 4.7 – Модель у Matlab-Simulink електричної мережі при застосування засобів компенсації реактивної потужності

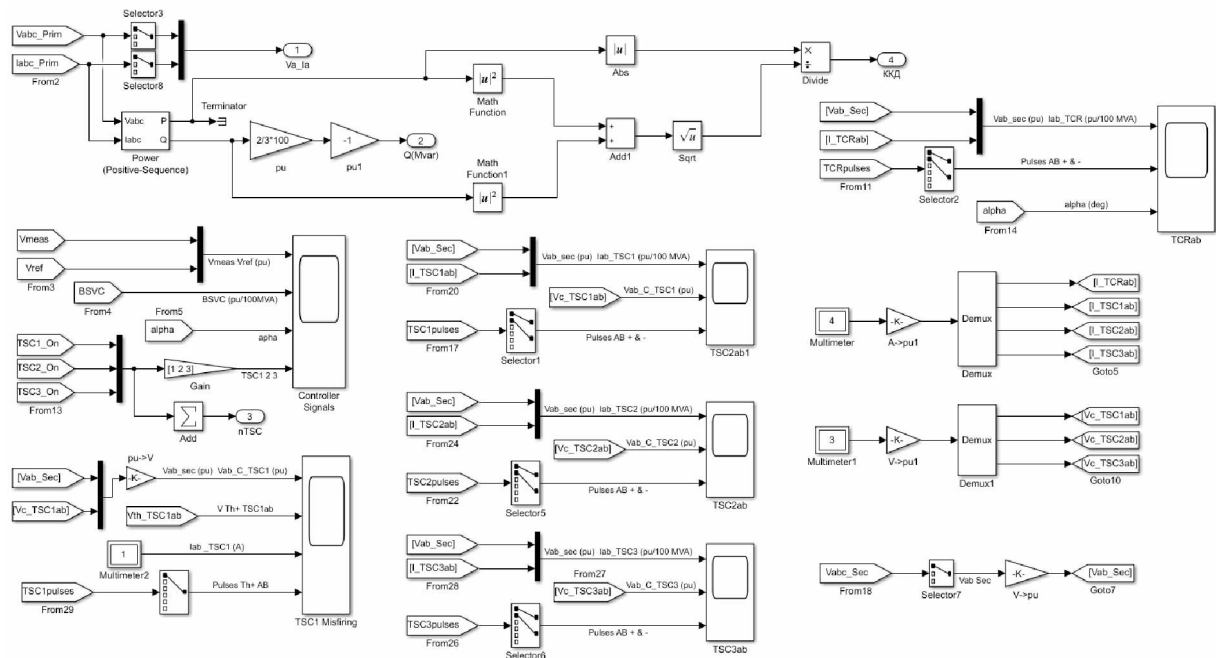


Рисунок 4.8 – Склад модернізованого блоку «Вимірювання»

На рис. 4.9 наведено вікна завдання параметрів засобів компенсації реактивної потужності.

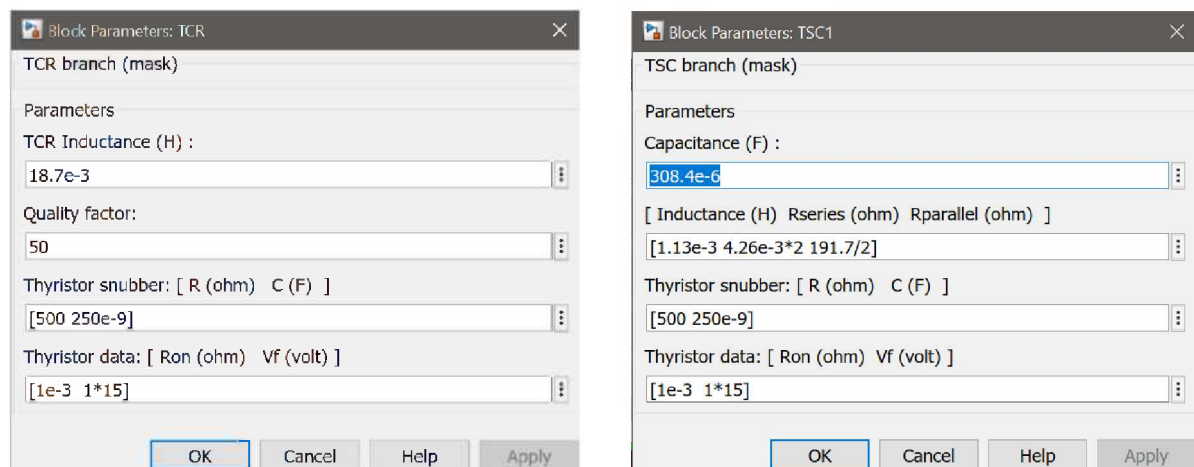


Рисунок 4.9 – Завдання параметрів засобів компенсації реактивної потужності

Результати роботи моделі (рис. 4.7) наведено на рис. 4.10.

Аналіз графічних залежностей показує на ступне:

– у період з 0 до 0,25 с відбувається перехідний процес, під час якого модель аналізує стан роботи електричної мережі та підлаштовує кути

відкриття тиристорів для компенсації реактивної потужності, що спродукувалась у мережі статичними нелінійними споживачами. Можна спостерігати зниження значення сили струму та рівня реактивної потужності.

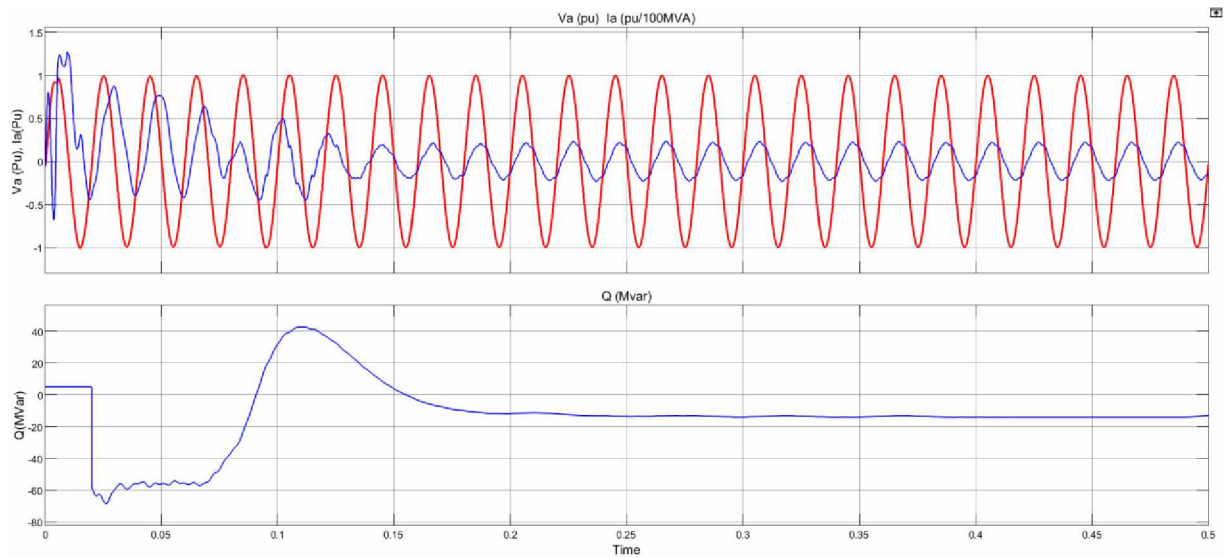


Рисунок 4.10 – Результати моделювання роботи мережі при застосуванні засобів компенсації реактивної потужності

На рис. 4.11 наведено результати роботи частини вимірювальної системи «Controller Signals», що ілюструє те, як формується сигнал на зміну кута відкриття тиристорів у залежності від значення показників якості електричної енергії (параметрів реактивної потужності).

На рис. 4.12 – 4.14 наведено результати роботи частини вимірювальної системи «TSC1 Misfiring» і «TSC2», які ілюструють окремі показники роботи елементів по підвищенню якості електричної енергії – напруги, струми і кути роботи тиристорів.

На рис. 4.15 наведено графічне визначення значення електричного ККД мережі після застосування заходів по компенсації реактивної потужності, яке підвищилось до 81,5%.

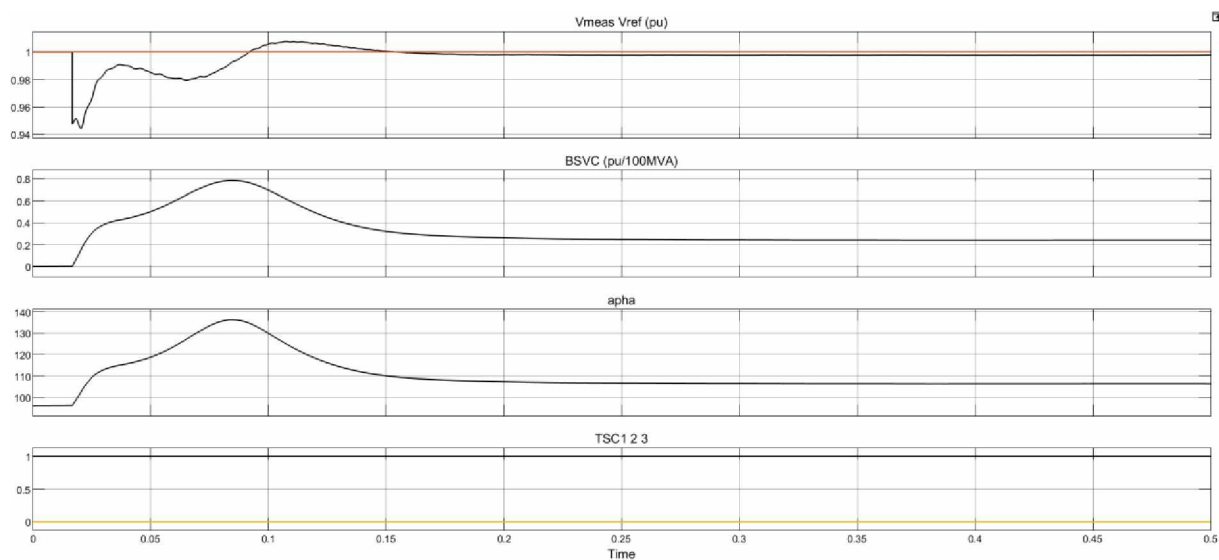


Рисунок 4.11 – Результати роботи частини вимірювальної системи «Controller Signals»

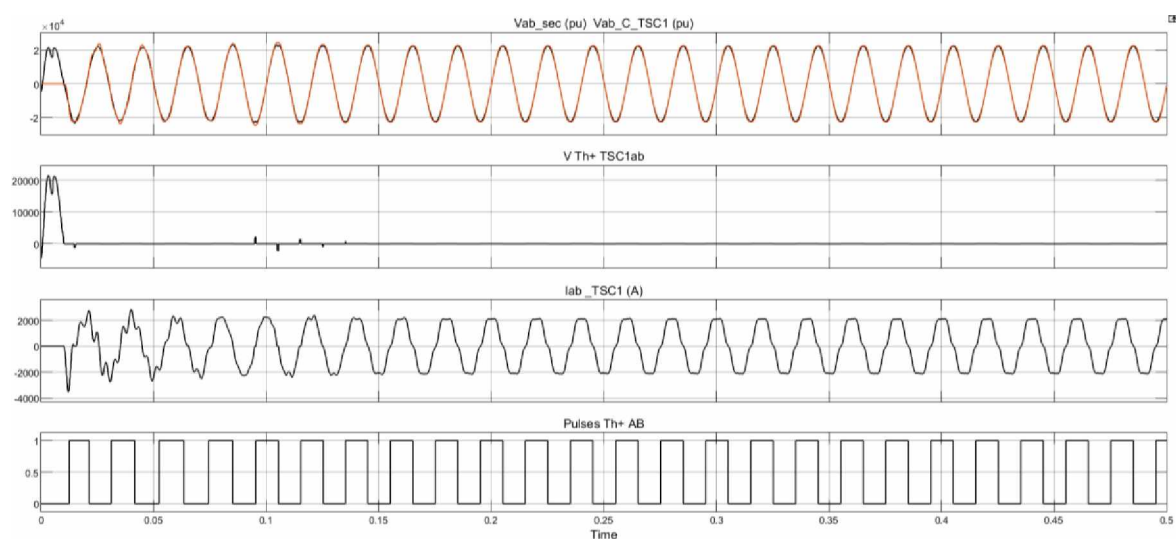


Рисунок 4.12 – Результати роботи частини вимірювальної системи «TSC1 Misfiring»

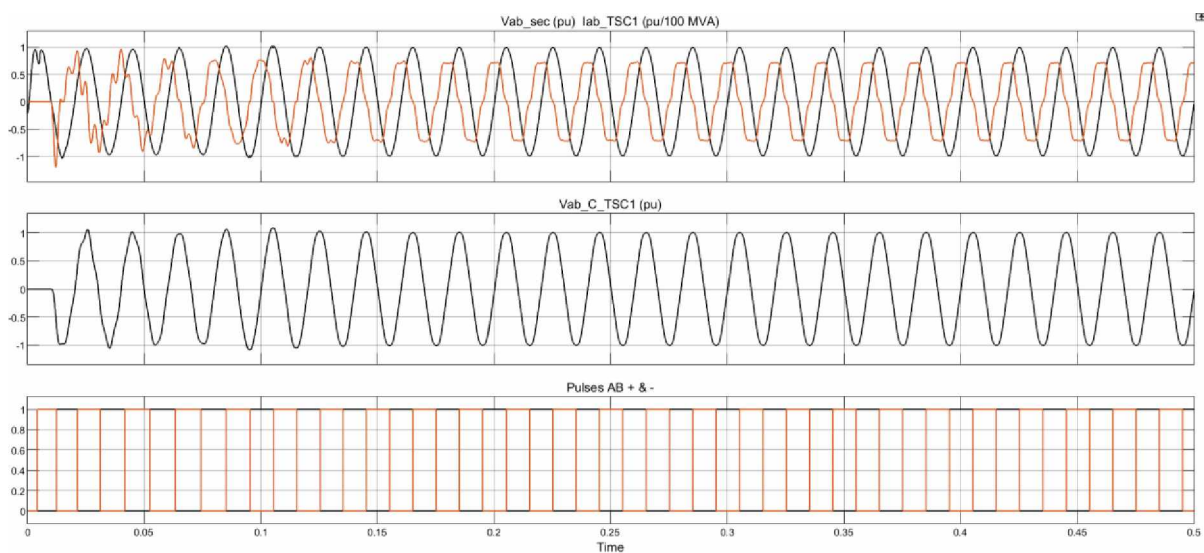


Рисунок 4.13 – Результати роботи частини вимірювальної системи «TSC2»

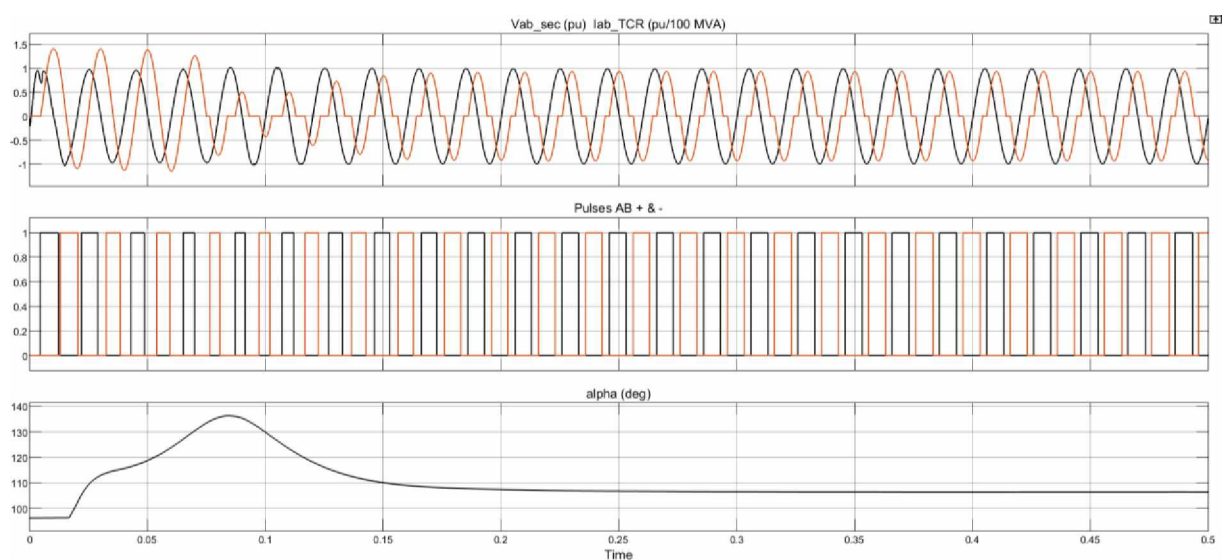


Рисунок 4.14 – Результати роботи частини вимірювальної системи «TCRab»

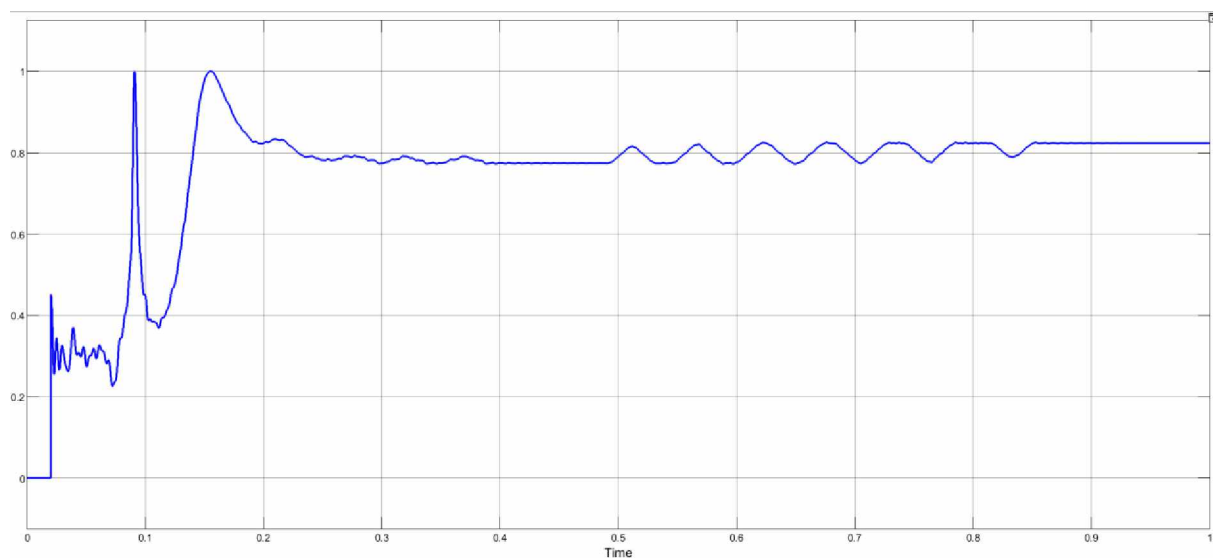


Рисунок 4.15 – Графічне визначення значення електричного ККД мережі

Моделювання системи показало, що впровадження засобів компенсації, у якості яких використовуються блоки конденсаторів, підключення яких здійснюється через зустрічно ввімкнені тиристори, що мають зовнішнє керування, може підвищити значення коефіцієнта потужності та загальний ККД мережі. Параметри регулювання обирають виходячи з динамічних показників реактивної потужності.

ВИСНОВКИ

Огляд літературних джерел та здійснення аналізу методів підвищення енергоефективності та якості електричної енергії в мережах електропостачання дає зрозуміти, що існують резерви для подальшого підвищення енергоефективності та якості електричної енергії в мережах.

У роботі для забезпечення плавного регулювання значення реактивної потужності запропоновано застосування компенсатора реактивної потужності, що має індуктивні та ємнісні складові та керується зустрічно-ввімкненими тиристорами. Система керування компенсатора реактивної потужності забезпечує формування синусоїдальної напруги на конденсаторах, що дає можливість усунути перенапруги на них та підвищити надійність роботи компенсатора.

Розроблена імітаційну модель системи живлення з компенсаторами реактивної потужності та система його керування дає можливість проаналізувати поведінку системи живлення при підключенні до мережі компенсаційних пристроїв – отримано графічні залежності, що ілюструють зміну характерних параметрів енергетичної системи.

Особливістю системи керування поведінкою компенсатора є те, що для керування тиристорами використовується виміряна різниця фаз між струмом і напругою. При цьому кут керування тиристором безперервно змінюється таким чином, щоб зменшити цю різницю до нуля, забезпечуючи таким чином найповнішу компенсацію реактивної потужності. Сигнал різниці фаз між струмом і напругою отримується за допомогою відповідних вимірювань у моделі – отриманий сигнал впливає на зміну кута керування тиристором у бік збільшення або зменшення, залежно від характеру навантаження. Зміна знаку напрямку приросту кута керування тиристором відбувається синхронно зі зміною знаку різниці фаз між струмом і напругою. При такому принципі керування виникають

стійкі коливання керованого параметра, амплітуда і період яких залежать від обраного кроку зміни кута керування тиристором, які затихають згодом при досягненні стану рівноваги.

Результати моделювання показали, що використання динамічних компенсаторів реактивної потужності є ефективним способом підвищення енергетичної ефективності системи електропостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кігель Г.А. Електричні мережі систем електропостачання: навч. посібник/ Г.А. Кігель, Г.Г. Півняк. – 2-ге вид., перероб. і доп. Д.: Національний гірничий університет, 2011. – 318 с.
2. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи: Підручник / М.С. Сегеда. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.
3. Романюк Ю.Ф. Електричні системи та мережі: навч. посібник / Ю.Ф. Романюк. – К.: Знання, 2007. – 292 с.
4. Півняк Г.Г., Шидловський А.К., Кігель Г.А., Рибалко А.Я., Хованська О.І. Особливі режими електричних мереж. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.
5. Рогальський Б.С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. Навчальний посібник Б.С. Рогальський. – Вінниця: Універсум, 2006. – 236 с.
6. Жежеленко І.В., Рабінович М.Л., Божко В.М. Якість електричної енергії на промислових підприємствах. – К.: Техніка, 1981. – 157 с.
7. Журахівський А.В. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник / А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матєєнко, О. Р. Пастух. – Київ.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 456 с.
8. Концепція компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів та енергопостачальних компаній / [Б. С. Рогальський, О. М. Нанака, А. В. Праховник і ін.] // Енергетика и электрификация. - 2005. – № 6. – С. 23-30.
9. B. Brusilowicz, J. Szafran. Comparison of reactive power compensation methods. Electric Power Networks (EPNet). 2016, DOI: 10.1109/EPNET.2016.7999369

10. W. Hofmann, J. Schlabbach, W. Just. Types of reactive power compensation. Reactive Power Compensation: A Practical Guide. John Wiley and Sons, 2012. <https://doi.org/10.1002/9781119967286.ch9>
11. W. Hofmann, J. Schlabbach, W. Just. Dynamic Reactive power compensation systems. Reactive Power Compensation: A Practical Guide. John Wiley and Sons, 2012. <https://doi.org/10.1002/9781119967286.ch20>
12. M. El-Habrouk. A survey of active filters and reactive power compensation techniques. 8th International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, 2000. <https://doi.org/10.1049/cp:20000211>
13. L.S. Czarnecki, O.T. Tan. Methods of reactive power compensation and suppression of load-generated harmonics. IEEE Proceedings on Southeastcon, 2002. DOI: 10.1109/SECON.1990.117899
14. A. Hamadi, S. Rahmani, K. Al-Haddad. A hybrid passive filter configuration for var control and harmonic compensation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 57, Issue: 7, 2010. DOI: 10.1109/TIE.2009.2035460
15. D. Thukaram; H.P. Khincha; B. RaviKumar. Harmonic minimization in the operation of static VAR compensators for unbalanced reactive power compensation. International Conference on Power System Technology, 2004. DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460015
16. Лазуренко А. П., Прохоренко Ю. В. Современные методы и устройства компенсации реактивной мощности в бытовых системах электропотребления. Вестник Национального технического университета «ХПИ». Харьков, 2011. Вып. 41. С. 83-87.
17. 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. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015, – 316 с.
18. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/341599618_Adaptive_fuzzy_controlle

[d_hybrid_shunt_active_power_filter_for_power_quality_enhancement/figures?lo=1](https://www.intechopen.com/chapters/58557)

19. Електричні мережі та системи. Режим роботи розімкнених мереж: Навчальний посібник з дисципліни для всіх форм навчання та студентів іноземців напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»/Уклад. В.В.Кирик. – К.: НТУУ «КПІ». 2014. – 130 с.

20. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.intechopen.com/chapters/58557>

21. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2073-8994/11/9/1161>

22. ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015 Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. Київ: Мінрегіон, 2016. – 79 с.

23. Шестеренко В.Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Вінниця: Нова Книга, 2011. – 656 с.

24. Півняк Г.Г. Розрахунки електричних мереж систем електропостачання: навч. посібник / Г.Г. Півняк, Г.А. Кігель, Н.С. Волотковська; за ред. Г.Г.Півняка. – 4-те вид., доопрац. і доп. – Д.: Національний гірничий університет, 2011. – 223 с.

25. Лук'яненко Ю.В., Остапчук Ж.І., Кулик В.В. Розрахунки електричних мереж при їх проектуванні. – Вінниця: ВДТУ, – 2002.

26. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень: навч. посіб. / Р. Н. Кветний та ін.; Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця: ВНТУ, 2013.

27. Махней О.В. Математичне моделювання: навчальний посібник. Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2015. – 372 с.

28. S.J. Chapman. MATLAB Programming for Engineers. Thomson, 2004. – 592 p.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

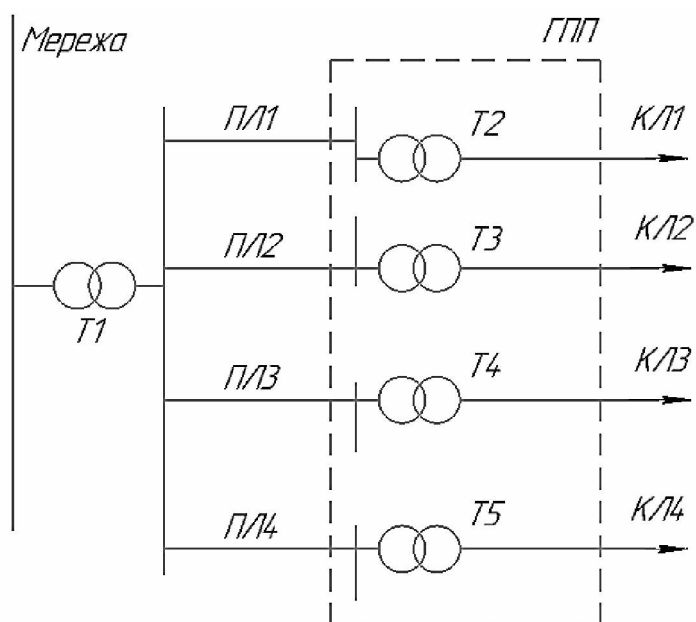
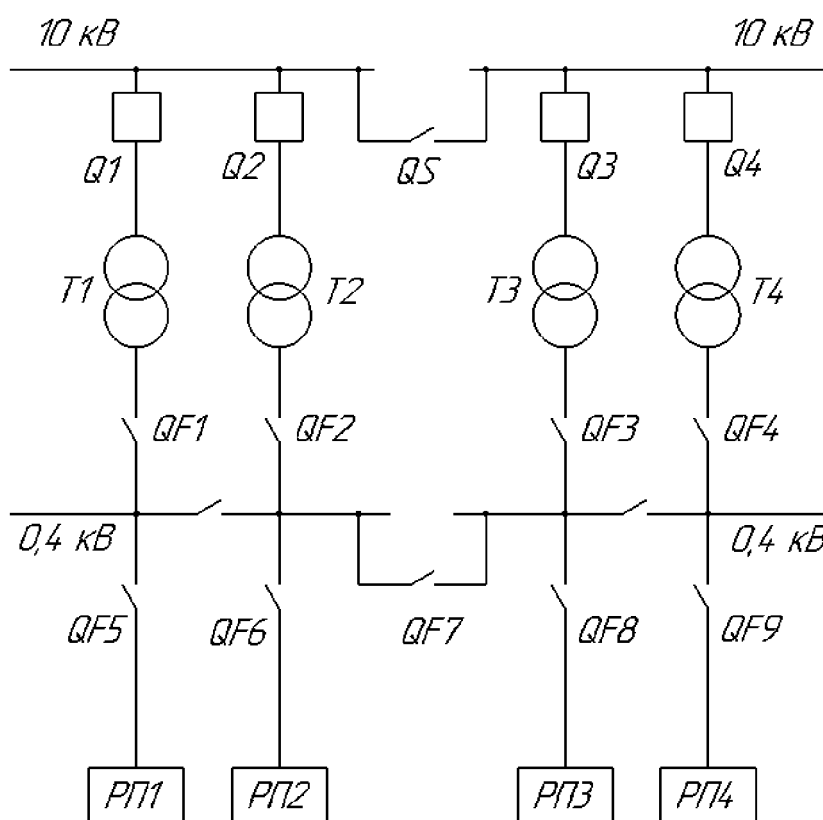
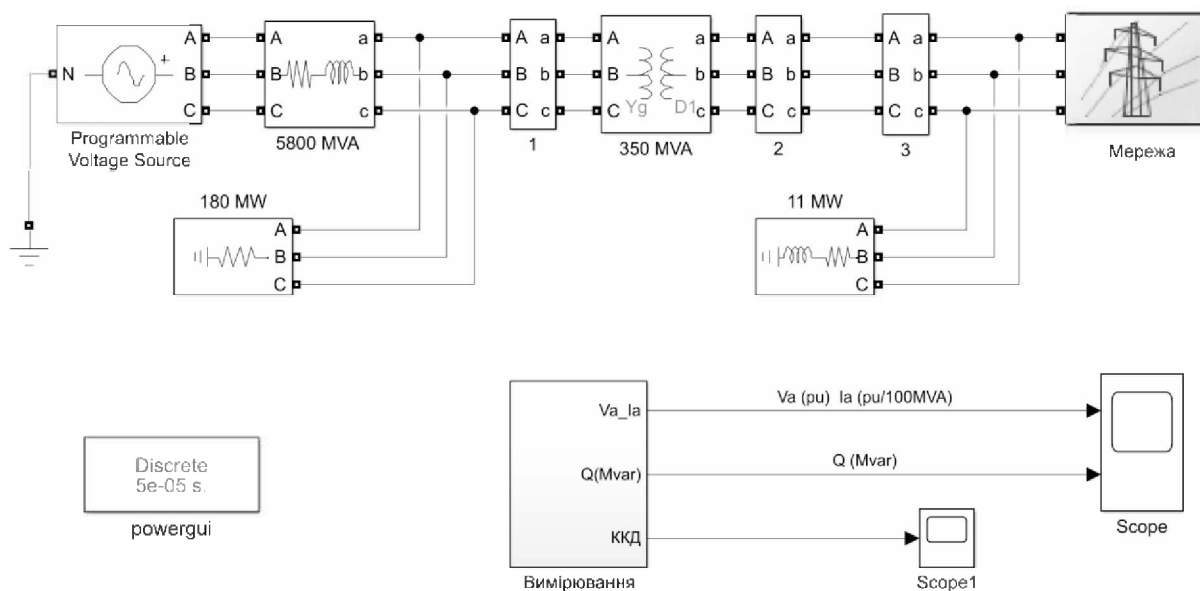


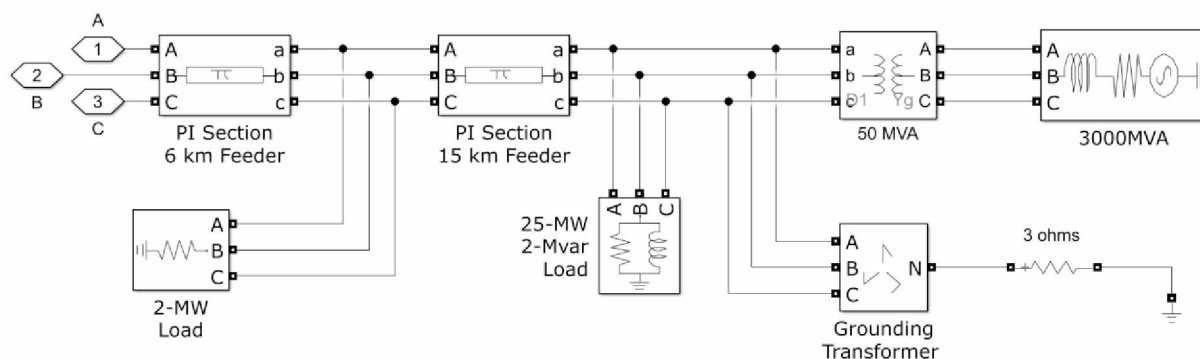
Схема електропостачання підприємства: Т1-Т5 – трансформатори, ПЛ1-ПЛ4 – повітряні лінії, КЛ1-КЛ4 – кабельні лінії



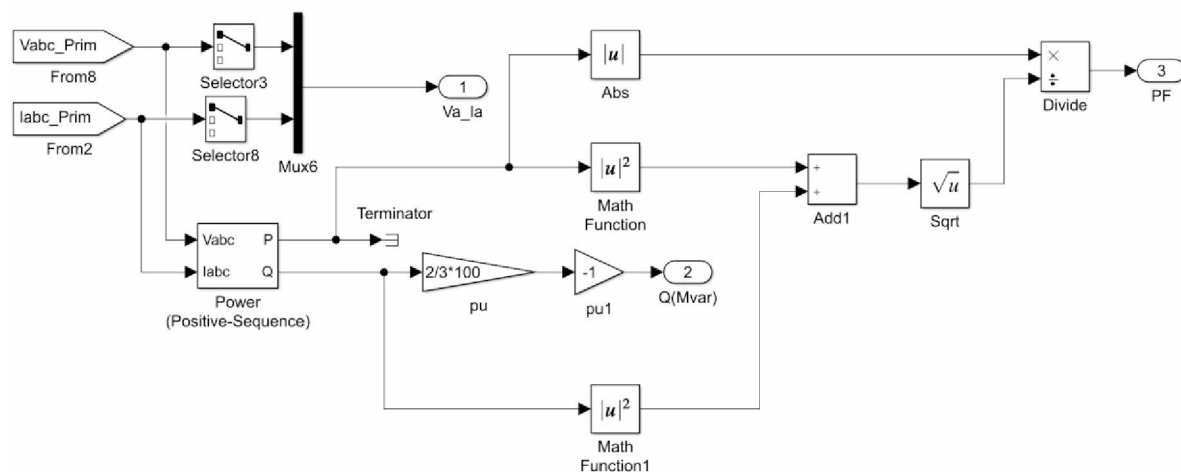
Розподільча схема електропостачання



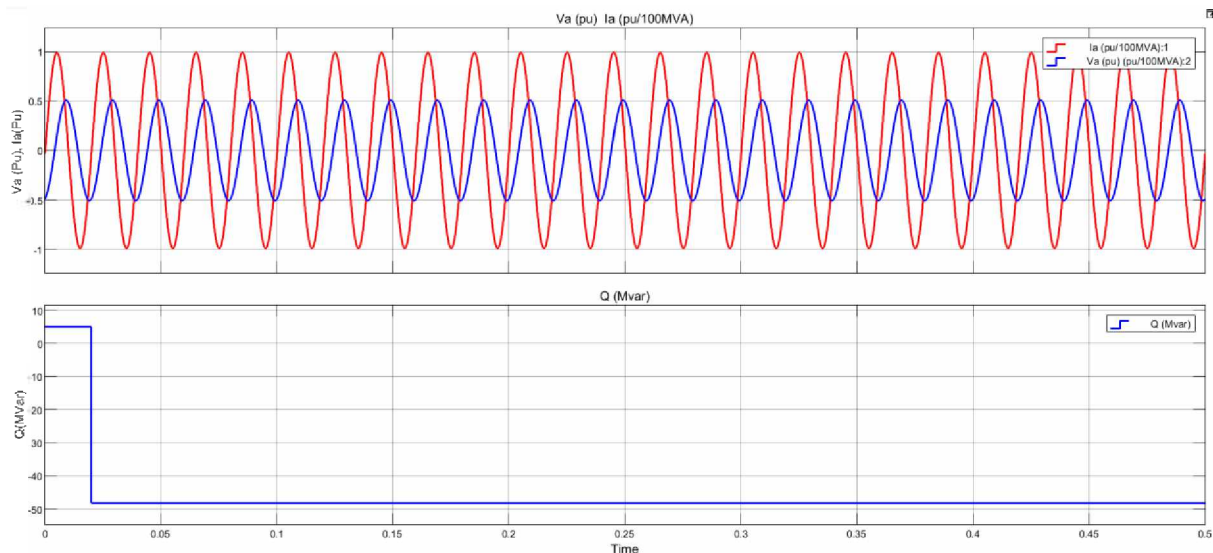
Модель електричної мережі без застосування засобів компенсації реактивної потужності



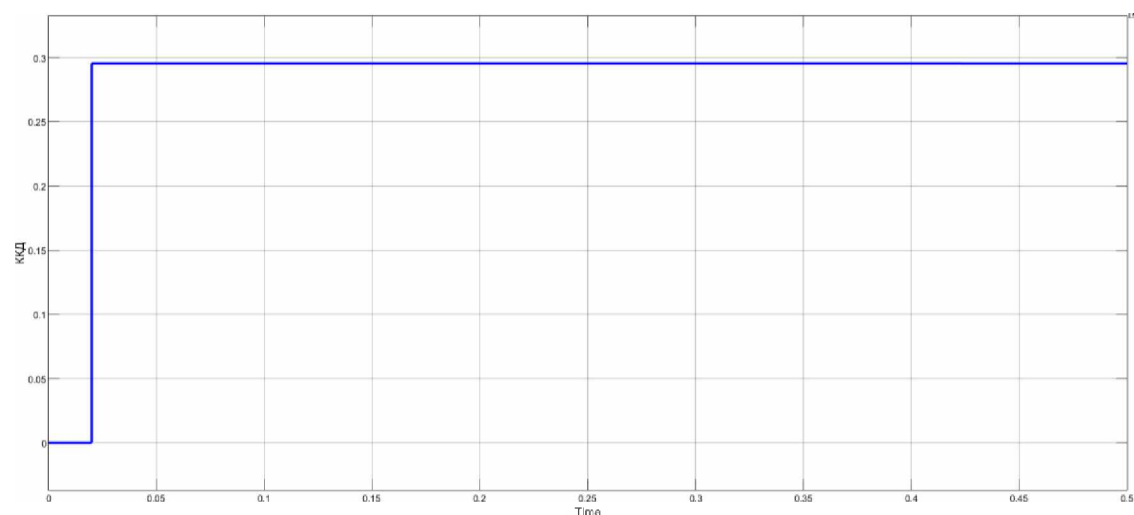
Склад блоку «Мережа»



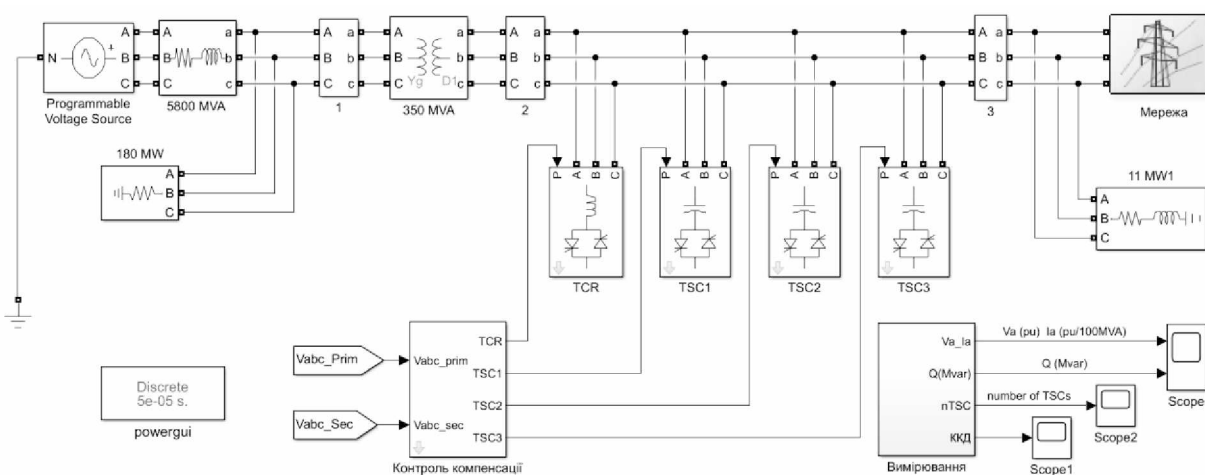
Склад блоку «Вимірювання»



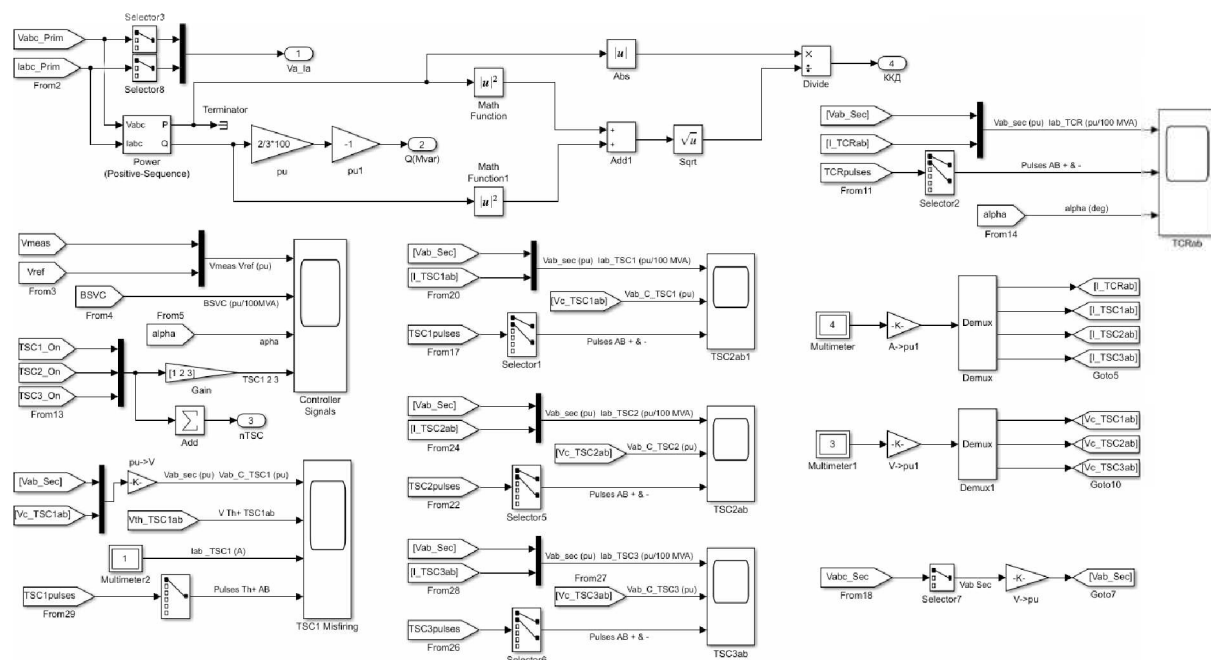
Результати моделювання



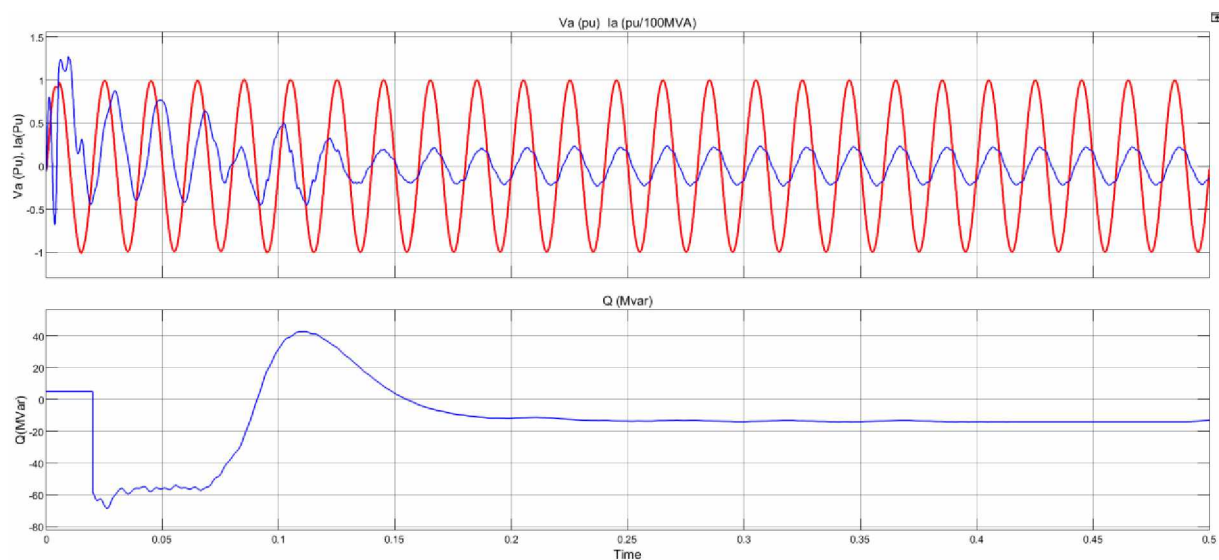
Визначення значення електричного ККД мережі



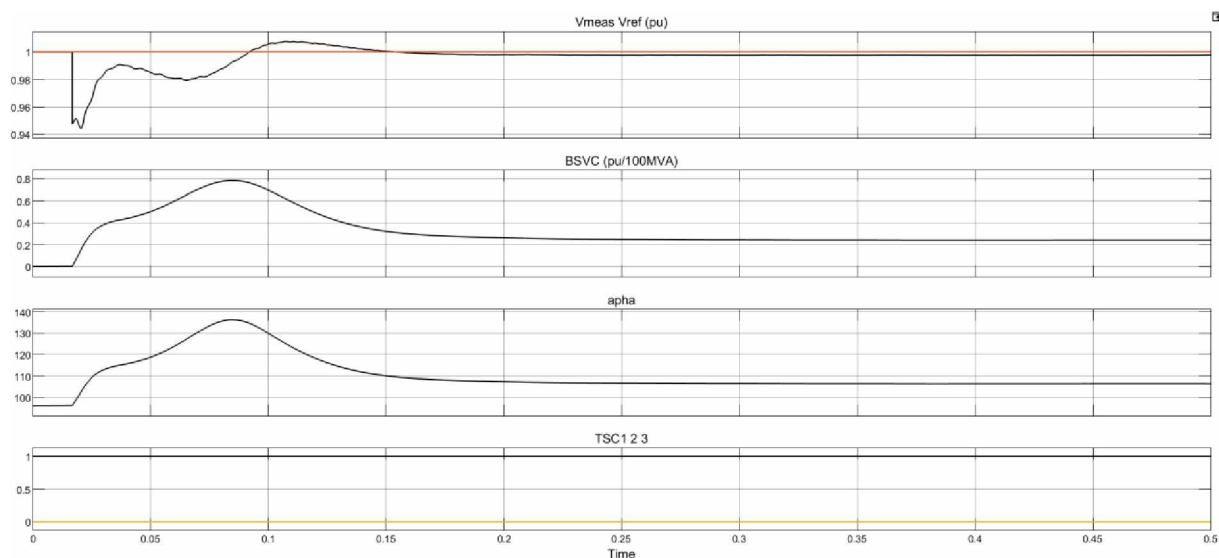
Модель у Matlab-Simulink електричної мережі при застосування засобів компенсації реактивної потужності



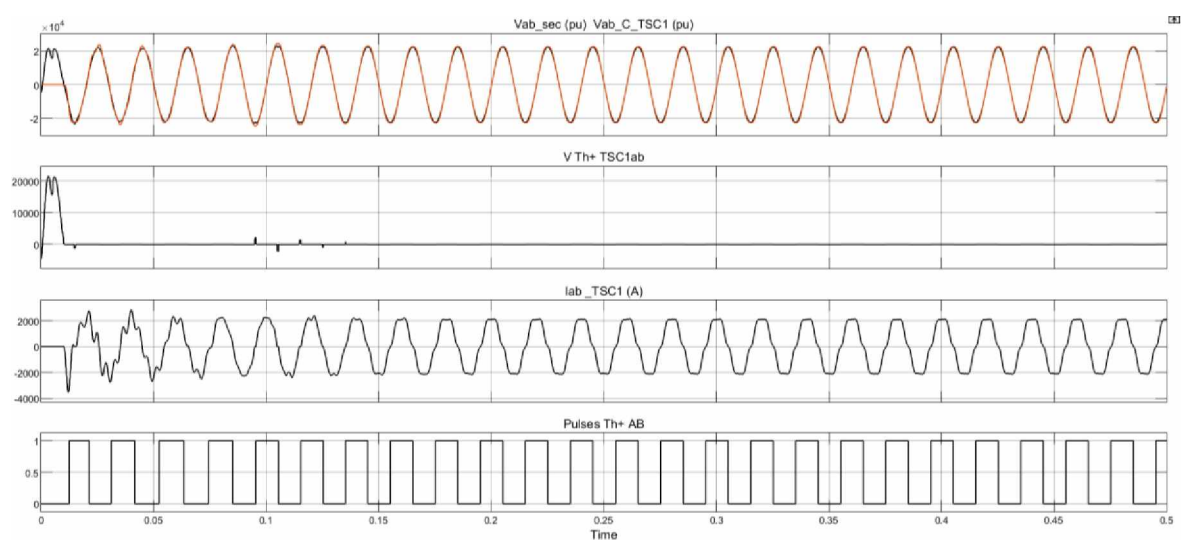
Склад модернізованого блоку «Вимірювання»



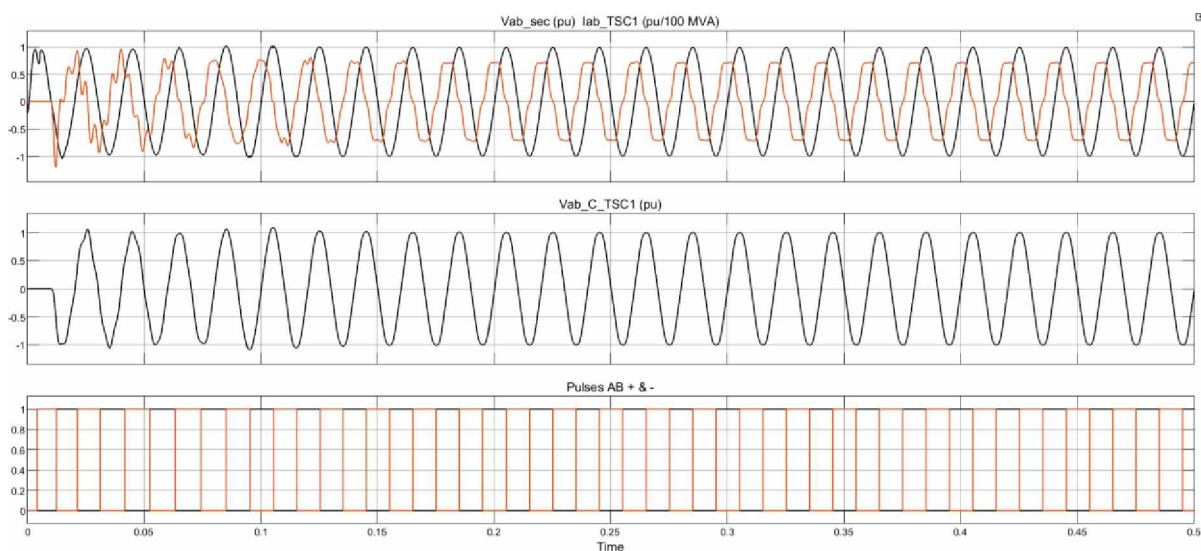
Результати моделювання роботи мережі при застосуванні засобів компенсації реактивної потужності



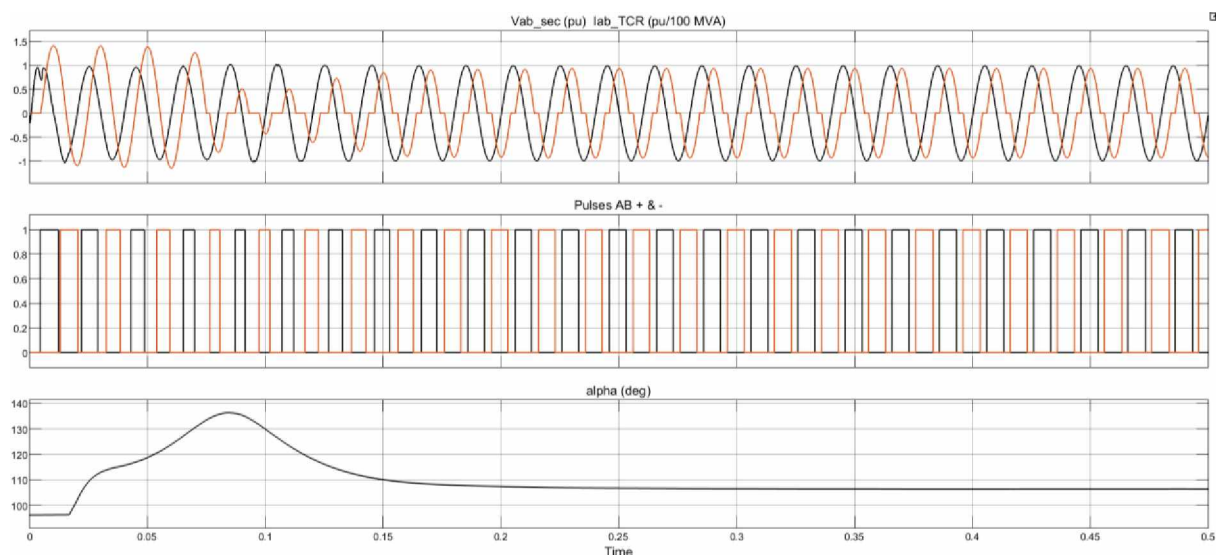
Результати роботи частини вимірювальної системи «Controller Signals»



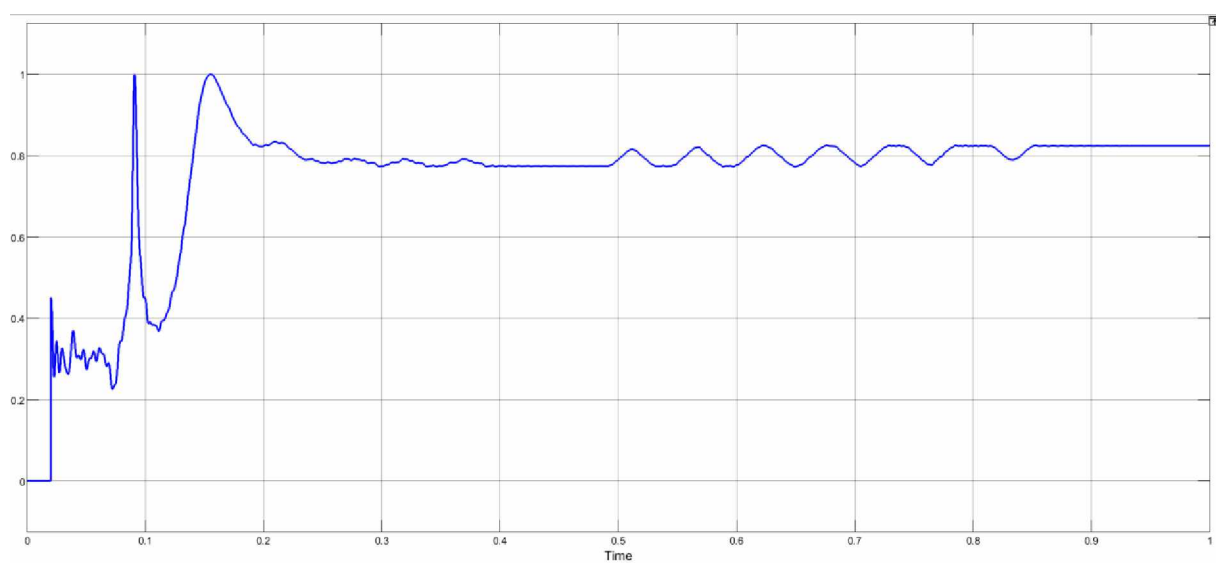
Результати роботи частини вимірювальної системи «TSC1 Misfiring»



Результати роботи частини вимірювальної системи «TSC2»



Результати роботи частини вимірювальної системи «TCRab»



Графічне визначення значення електричного ККД мережі

ДОДАТОК Б

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____