

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до кваліфікаційної магістерської роботи  
освітньо-кваліфікаційного рівня магістр

галузі знань 14 електрична інженерія  
зі спеціальності 141 електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

на тему: **РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ  
В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ**

Виконав: студент групи ЕЕ-21дм

Руденко Б. К.

(прізвище, та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник

доц. Філімоненко К. В.

(прізвище, та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Завідувач кафедри

доц. Руднев Є. С.

(прізвище, та ініціали)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Київ  
2022 р.

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет інженерії  
Кафедра електричної інженерії  
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр  
Напрямок підготовки 14 "Електрична інженерія"  
Спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка та  
Електромеханіка"

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

завідувач кафедри  
доц. Руднєв Є. С.

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2022 р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Руденку Богдану Костянтиновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Розробка пристрою компенсації реактивної потужності в перехідних режимах

Керівник проекту Філімоненко К. В., канд. техн. наук, доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від "12" жовтня 2022 року  
№ 27/15.23-С

2. Строк подання студентом проекту 26 листопада 2022 р.

3. Вихідні дані до проекту Вихідні данні визначені в переліку питань, що підлягають розробці в магістерській роботі: аналіз компенсації реактивної потужності; аналіз доцільності використання додаткового компенсатора під час перехідних режимів; розробка та обґрунтування принципової схеми перетворювальної системи; розробка алгоритму компенсації для тривалих перехідних процесів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (основні питання) –  
згідно календарного плану.

5. Перелік графічного матеріалу: презентація з основними схемами, кресленнями, таблицями, що представляють зміст роботи.

## 6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-5	доц. Філімоненко К.В.		

7. Дата видачі завдання 12 жовтня 2022**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	НАЗВА ЕТАПІВ ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ	СТРОК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ	примітка
1	АНАЛІЗ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ	01.10-30.10.2022	
2	АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКОВОГО КОМПЕНСАТОРА ПІД ЧАС ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ	30.10-10.11.2022	
3	РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ	05.11-10.11.2022	
4	РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	10.11-20.11.2022	
5	РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КОМПЕНСАЦІЇ ДЛЯ ТРИВАЛИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ	10.11-20.11.2022	
6	ВИСНОВКИ	20.11.2022	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Руденко Б. К.**

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту

\_\_\_\_\_ (підпис)

**доц. Філімоненко К. В.**

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему: " РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ". Пояснювальна записка містить 87 сторінок, 4 розділи, 43 рисунків, 4 таблиць, 35 джерел.

Магістерська робота присячена розробці методики компенсації реактивної потужності в перехідних режимах.

Виконано огляд і систематизації наукових джерел щодо основних способів компенсації реактивної потужності. Оцінені переваги та недоліки окремих видів компенсації. Розглянуто методи компенсації для різних типів перехідних процесів.

Проведено обґрунтування структурної схеми перетворювальної системи. Оцінено підвищення коефіцієнту потужності при використанні запропонованого алгоритму компенсації.

Результат роботи може бути використаний при розробці пристроїв компенсації в усталених та перехідних режимах.

РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ, ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС, ПРИСТРОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ, ВІЛЬНА СКЛАДОВА СТРУМУ, ВИМУШЕНА СКЛАДОВА СТРУМУ, ФІЛЬТРИ ВИЩІХ ГАРМОНІК.

## SUMMERY

The Master's Work "DEVELOPMENT OF REACTIVE POWER COMPENSATION DEVICE IN TRANSITION MODES". Explanatory note contains 87 pages, 4 chapters, 43 figures, 4 tables, 35 sources.

The Master's Work is devoted to the development of methods of reactive power compensation in transient modes.

A review and systematization of scientific sources on the main methods of reactive power compensation was carried out. The advantages and disadvantages of certain types of compensation are evaluated. The compensation methods for different types of transients are considered.

The structural scheme of the converter system is substantiated. The increase of power factor when using the proposed compensation algorithm is estimated. The result of the work can be used in the development of compensation devices in steady-state and transient modes.

REACTIVE POWER, TRANSITION PROCESS, REACTIVE POWER COMPENSATION DEVICES, FREE COMPONENT OF CURRENT, FORCED COMPONENT OF CURRENT, FILTERS OF HIGHER HARMONICS.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ</b>	7
<b>ВСТУП</b>	8
<b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ</b>	19
1.1 Проблема компенсації реактивної потужності і шляхи її подолання	19
1.2 Особливості компенсації реактивної потужності для лінійних і нелінійних кіл	21
1.3 Пристрої компенсації реактивної потужності	31
<b>РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКОВОГО КОМПЕНСАТОРА ПІД ЧАС ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ</b>	43
2.1 Оцінка ефективності використання звичайних компенсаторів під час перехідних режимів	43
2.2 Принцип компенсації реактивної потужності в перехідних режимах	53
<b>РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ</b>	64
3.1 Розробка та обґрунтування структурної схеми перетворювальної системи	64
3.2 Розробка та обґрунтування принципової схеми перетворювальної системи	66
3.3 Розрахунок елементів перетворювальної системи	69
<b>РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ</b>	75
4.1 Розробка алгоритму компенсації для короткочасних перехідних процесів	75
4.2 Розробка алгоритму компенсації для тривалих перехідних процесів	77
<b>ВИСНОВКИ</b>	82
<b>ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ПОСИЛАНЬ</b>	84

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

КРП – компенсація реактивної потужності  
ПП – перехідний процес

СТАТКОМ – статичний компенсатор реактивної потужності

БК – батареї конденсаторів

СТК – статичні тиристорні компенсатори

ДРП – джерела реактивної потужності

ПФ – пасивні фільтри

АФ – активні фільтри

ШМ – широтно-імпульсна модуляція

ГФ – гібридні фільтри

ДС – давач струму

Н – навантаження

ЗП – зарядний пристрій

МК – мікроконтролер

В – випрямляч

М – мережа

GTO – повністю керований тиристор

IGCT – інтегрований затворно-комматований тиристор

IGBT – трьохелектродний силовий напівпровідниковий прилад

## ВСТУП

Реактивна потужність – це технічні втрати електроенергії, спричинені електромагнітними процесами у мережах. Нестача її викликає підвищений нагрів провідників і створює надмірну навантаження на мережу, у результаті джерело електроенергії працює у посиленому режимі. Якщо засоби компенсації потужності не передбачені, то за споживання реактивної енергії з мережі доводиться переплачувати значні суми.

Істотні реактивні навантаження спричиняють зниження напруги в електромережі та погіршення якості електроживлення. Крім того, надмірно навантажуються лінії електропередач та трансформаторне обладнання, внаслідок чого збільшуються капітальні витрати на облаштування та експлуатацію електророзподільних станцій.

Передача електричної енергії з використанням змінного струму почалася ще наприкінці XIX століття, замінюючи існуючі невеликі локальні системи постійного струму. При розширенні локальних систем енергопостачання та забезпеченні передачі на далекі відстані виникали різні проблеми з управлінням напругою та стабільністю, пов'язані насамперед із небалансом реактивної потужності у системах. Для управління напругами стаціонарної системи в основному використовувалася комутована компенсація реактивної потужності (шунтуючі конденсатори і шунтуючі реактори). Динамічний спосіб ґрунтувався на машинах, що обертаються, наприклад синхронних компенсаторах.

У середині 60-х років XX століття з'явилися перші статичні компенсуючі пристрої реактивної потужності, тобто реактори, керовані постійним струмом (ртутні вентилі) і пристрої, керовані тиристорами (конденсатори з тиристорним управлінням, реактори з тиристорним управлінням). Малий час реагування, низькі втрати та менші вимоги до технічного обслуговування зняли багато



обмежень, що притаманні обертовим машинам і пристроям, керованим постійним струмом. Оцінка робочих втрат має своїм результатом дедалі більше використання статичних конденсаторних установок реактивної потужності, що складаються з комбінацій галузок конденсаторів та реакторів з тиристорним керуванням. Ці пристрої, що шунтують, спільно з послідовними конденсаторами з тиристорним управлінням склали основу гнучких систем передачі змінного струму ( FACTS ). FACTS дозволяє більш ефективно використовувати системи передачі завдяки покращеному динамічному управлінню напругою системи з одного боку та більш високою пропускною здатністю з іншого боку. У системах передачі змінного струму наразі встановлені статичні конденсаторні установки реактивної потужності загальною потужністю понад 100 000 МВА.

У пристроях FACTS стали використовуватися нові силові електронні прилади ( GTO , IGCT , IGBT ), які дозволяють використовувати перетворювачі струму та напруги для забезпечення швидкодіючої компенсації реактивної потужності. На основі подальшого розвитку систем керування, удосконалення напівпровідникових приладів та нових технологій перетворювачів напруги в даний час компенсація реактивної потужності є ключовим фактором для надійної передачі енергії змінного струму. Передача енергії змінного струму розпочалася наприкінці 19 століття. Розвиток йшов від низьких рівнів напруги та обмежених районів до великих відстаней, високих потужностей і дедалі більшої напруги передачі. На рис. В.1 наводиться приблизна картина зростання напруги систем передачі від року в рік.

Генерація електричної енергії та її споживачі зазвичай знаходяться близько один від одного. Великі міста та великі промислові регіони часто отримують електроенергію від джерел, що знаходяться на великій відстані. Складові системи та навантаження включають джерела реактивної потужності (конденсатори і котушки індуктивності), які впливають на профіль напруги мережі і стабільність системи. Лінії передачі високовольтних систем (735 кВ) можуть мати до 200 Мвар ємнісної потужності на довжину 100 км. Кабельні з'єднання можуть давати навіть більшу реактивну потужність. Великі навантаження, що містять електричні дуги

печі або потужні приводи можуть мати до 100 Мвар індуктивної реактивної потужності. Без відповідної компенсації реактивної потужності в довгих лініях передачі можуть настати критичні умови роботи системи через сильні коливання напруги та проблеми зі стабільністю. Ці проблеми можуть бути вирішені за допомогою схем паралельної та послідовної компенсації.

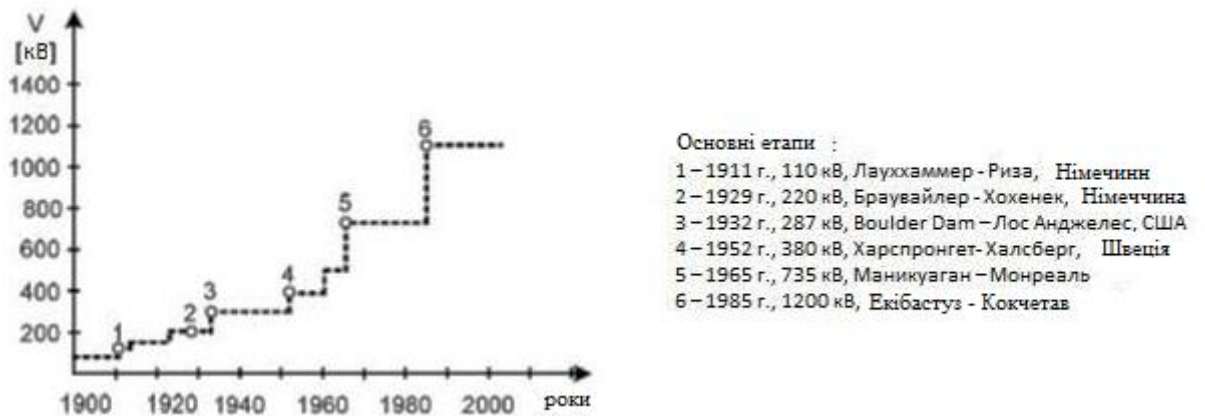


Рисунок В.1 – Збільшення напруги з плином часу

Активна потужність. Якщо навантаження чисто резистивне, без індуктивних або ємнісних компонентів (реактивної потужності), наприклад, електричний нагрівач, криві напруги та струму перетинають координатну вісь (проходять через нуль) в одній точці (рис. В.2).

У цьому випадку кажуть, що напруга і струм перебувають у фазі. Точки кривої потужності ( $P$ ) розраховується як добуток миттєвих значень напруги ( $V$ ) та струму ( $I$ ). Ця крива має частоту в 2 рази вище частоти напруги живлення і повністю знаходиться в позитивній ділянці, оскільки добуток двох негативних чисел є позитивним числом, так само, як, природно, добуток двох позитивних чисел.

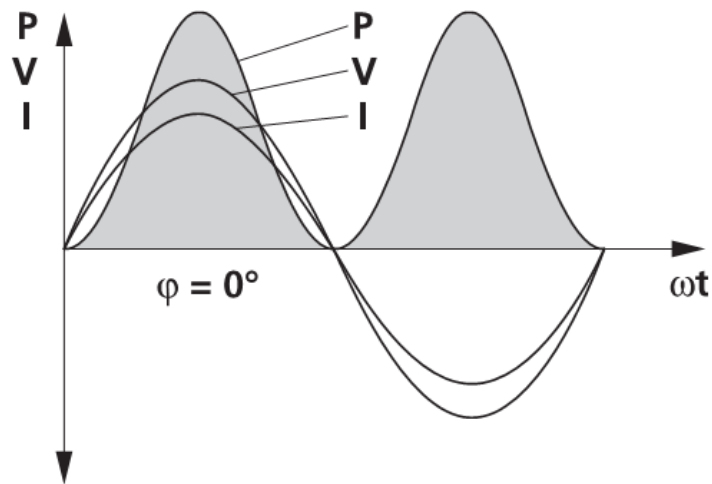


Рис. В.2. – Криві напруги, струму та потужності для чисто резистивного навантаження ( $\varphi = 0^\circ$ )

В цьому випадку:

$$(-V) \cdot (-I) = (+P)$$

Активна чи корисна потужність визначається як складова потужності, яка перетворюється на іншу форму (наприклад, тепло, світло, механічну енергію) та реєструється лічильником електроенергії. При чисто резистивному або омичному навантаженні вона обчислюється шляхом перемноження ефективних значень напруги [ V ] і струму [ I ]:

$$P \text{ (Вт)} = V \text{ (В)} \cdot I \text{ (А)}$$

Активна та реактивна потужність. Насправді, проте, суто резистивні навантаження є типовими, зазвичай також є й індуктивна складова. Це відноситься до всіх споживаючих електроенергію пристроїв, принцип роботи яких заснований на використанні магнітного поля, наприклад, електродвигунів, дроселів, трансформаторів. Також реактивний струм необхідний процесів комутації в силових перетворювачах. Струм, що використовується для створення та зміни магнітного поля, не розсіюється, а циркулює туди і назад як реактивний струм між генератором та споживачем.

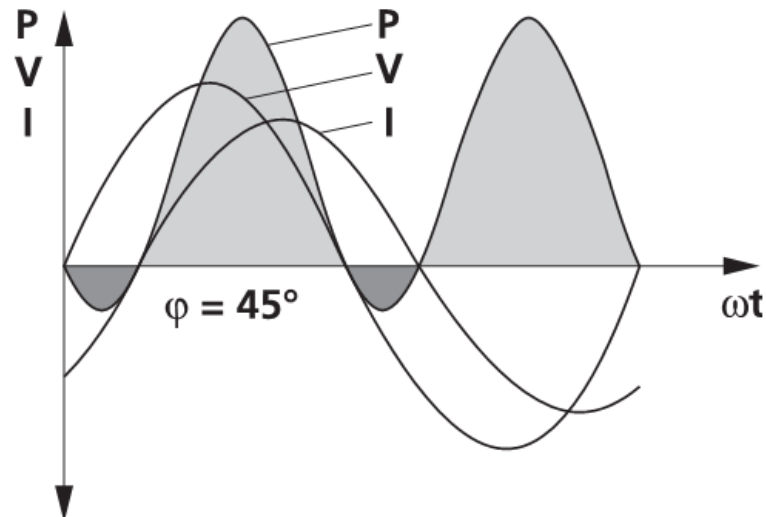


Рис. В.3. – Напряга, струм і потужність при резистивно-індуктивному навантаженні ( $\varphi = 45^\circ$ )

Як показано на рис. В.3, криві напруги і струму не проходять через нуль у одній точці, а є зміщення фази. При індуктивному навантаженні струм відстає від напруги, а при ємнісному – струм випереджає напругу. При розрахунку миттєвих значень потужності за формулою  $(P) = (V) \cdot (I)$  тепер виходять негативні значення, якщо один із множників негативний.

У цьому прикладі фазовий зсув  $= 45^\circ$ . Це відповідає індуктивному  $\cos\varphi = 0,707$ . Як бачимо, частина кривої потужності знаходиться у негативній області.

Активна потужність у разі визначається за формулою:

$$P \text{ (Вт)} = V \text{ (В)} \cdot I \text{ (А)} \cdot \cos\varphi$$

Реактивна потужність. Суто індуктивна реактивна потужність споживається двигунами і трансформаторами, що працюють без навантаження (якщо знехтувати втратами в міді, залозі і, за їх наявності, втратами на тертя). Можна вважати, що силові конденсатори RTR ENERGIA мають суто ємнісну реактивну потужність, оскільки вони мають дуже низькі втрати (менше 0,05%).

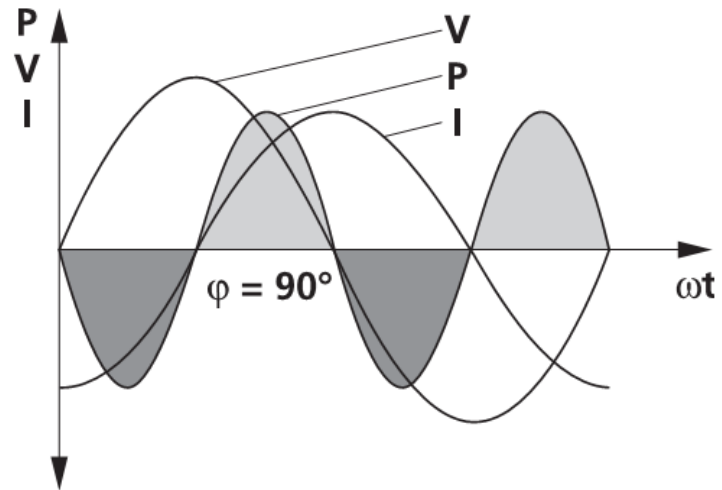


Рис. В.4. – Напруга, струм і потужність при чисто реактивному навантаженні ( $\varphi = 90^\circ$ )

Якщо напруга та струм мають зрушення по фазі на  $90^\circ$ , одна половина кривої потужності знаходиться у позитивній ділянці, а інша – у негативній (рис. В.4). Активна потужність дорівнює нулю, тому що позитивна та негативна області врівноважують один одного.

Реактивна потужність визначається як потужність, яка циркулює між генератором і навантаженням на частоті напруги для забезпечення наростання і спаду магнітного поля.

$$Q \text{ (вар)} = V \text{ (В)} \cdot I \text{ (А)} \cdot \sin\varphi$$

Повна потужність. Значення повної потужності є основним параметром для вибору номінальних параметрів мереж енергопостачання. На повну потужність системи повинні розраховуватись генератори, трансформатори, розподільні пристрої, запобіжники, автоматичні вимикачі та провідники.

Значення повної потужності – це результат добутку значень напруги та струму без урахування фазового зсуву.

$$S \text{ (Вт)} = V \text{ (В)} \cdot I \text{ (А)}$$

Повна потужність визначається як векторна сума активної та реактивної потужностей (рис. В.5).

$$S \text{ (ВА)} = \sqrt{P^2 \text{ (Вт)} + Q^2 \text{ (вар)}}$$

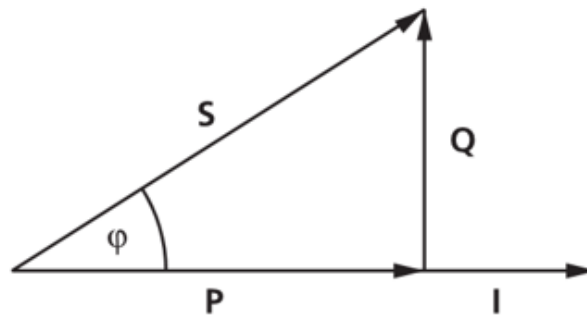


Рис. В.5. – Трикутник потужностей

Коефіцієнт потужності (  $\cos\varphi$  та  $\operatorname{tg}\varphi$  ). Зручним параметром визначення активного і реактивного компонентів потужності, напруги і струму є косинус кута зсуву фаз (фазовий кут) між струмом і напругою. У електротехнічній практиці цей параметр отримав назву «коефіцієнт потужності».

Коефіцієнт потужності (  $\cos$  ) фазового кута при повному навантаженні маркується на електричних машинах.

$$\cos \varphi = P/S \text{ (Вт)} / \text{ (ВА)}$$

Тангенс (  $\operatorname{tg}$  ) фазового кута  $\varphi$  зручний для вираження відношення реактивної потужності до активної.

$$\operatorname{tg}\varphi = Q / P \text{ (Вт)} / \text{ (ВА)}$$

Два наступні вирази показують співвідношення між косінус і тангенсом фазового кута  $\varphi$  .

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}\varphi^2}}$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1}$$

Оскільки система розподілу електроенергії має бути розрахована на повну

потужність, робляться зусилля зниження її значення. Якщо паралельно споживачеві електроенергії встановлені конденсатори відповідної величини, реактивний струм циркулює між конденсатором та споживачами. Це означає, що цей додатковий струм не протікає по решті розподільчої мережі. Якщо таким чином досягнутий коефіцієнт потужності, що дорівнює одиниці, через систему розподілу протікає тільки активний струм.

Реактивна потужність  $Q_C$ , компенсована конденсатором, - це різниця між індуктивною реактивною потужністю до компенсації  $Q_1$  і реактивною потужністю після компенсації  $Q_2$  (рис.В.6), тобто

$$Q_C = Q_1 - Q_2$$

$$Q_C (\text{вар}) = P (\text{Вт}) \cdot (\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2)$$

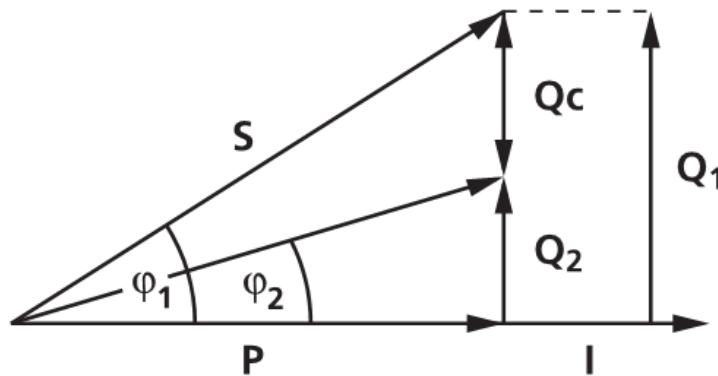


Рис. В.6. – Трикутник потужностей, що ілюструє дію компенсації реактивної потужності

Необхідність компенсації реактивної потужності. Реактивний струм, що циркулює між генератором енергопостачальної компанії та споживачем, перетворюється на теплову енергію в системі розподілу електроенергії, тобто створюється додаткове навантаження на генератори, трансформатори, кабелі та розподільний пристрій.

Це призводить до втрат електроенергії та падіння напруги. Якщо частка реактивного струму висока, наявні перерізи провідників що неспроможні повністю використовуватися передачі корисної енергії, можливо, їх потрібно

відповідно збільшити.

З точки зору енергопостачальної компанії низький коефіцієнт потужності призводить до збільшення витрат на інвестиції та обслуговування, і ці додаткові витрати перекладаються на тих, хто за них є відповідальним, тобто на споживачів з низьким коефіцієнтом потужності. Тому на додаток до лічильника активної енергії встановлюється лічильник реактивної енергії.

Переваги компенсації реактивної потужності: ефективне використання:

- генераторів (енергопостачальної компанії);
- трансформаторів;
- кабельної мережі;
- розподільчого пристрою;
- знижені втрат;

Отже – нижча вартість електроенергії, вигода застосування установки компенсації реактивної потужності.

Величезна кількість споживачів електроенергії постійно навантажує мережу реактивної складової споживаної потужності, причому це навантаження постійно зростає. Впровадження компенсуючих пристроїв реактивної потужності дозволяє підвищити надійність мереж живлення і збільшити пропускну здатність енергосистеми.

Серед низки переваг від застосування пристроїв компенсації реактивної потужності можна виділити п'ять головних:

– Економія енергоспоживання. Використання компенсуючих пристроїв реактивної потужності дає суттєвий економічний ефект. Зниження рівня енергоспоживання може становити до 40-50% від загального обсягу. За таких обсягів термін окупності систем компенсації потужності становитиме не більше одного року.

– Збільшення терміну служби обладнання. Використання компенсації збільшують термін служби силових трансформаторів, оскільки їх використання знижує навантаження обладнання. Використання установок компенсації також



знижує навантаження на лінії передач та нагрівання проводів, що дозволяє використовувати струмопровідні жили меншого перерізу.

– Економія витрат на пристрій електромереж, що підводять електрику. На етапі проектування та будівництва нових будівель монтаж системи компенсації реактивної потужності дозволяє суттєво заощадити на облаштуванні розподільчої електромережі.

– Поліпшення якості енергопостачання. Застосування засобів компенсації реактивної потужності дає можливість придушити мережеві перешкоди, уникнути глибокого просідання напруги та мінімізувати несиметрію фаз. Крім того, системи компенсації у складі пасивних фільтрів дозволяють знизити рівень найвищих гармонік.

– Відсутність штрафів. Пристрій компенсації реактивної потужності дозволяє уникнути штрафних санкцій від постачальника електроенергії за погіршення показників коефіцієнта потужності.

Розробка ефективних алгоритмів керування пристроями компенсації реактивної потужності триває і зараз. Вона ведеться у двох напрямках – збільшенні ефективності процесу компенсації, що в основному визначається інерційністю алгоритму керування, та у пошуку ефективних та компактних методів опису складових потужності електричної мережі. На даний момент широко використовується р-q теорія миттєвої потужності, запропонована Akagi та деякі інші теорії.

Алгоритми роботи більшості компенсаторів реактивної потужності, якими у мережах малої та середньої потужності найчастіше є напівпровідникові перетворювачі електричної енергії, мають інерційність не менше ніж один період напруги мережі. Тому вони ефективно працюють в усталеному режимі, для якого використовують інтегральні показники, що характеризують обмінні процеси між джерелом та навантаженням: повну  $S$ , активну  $P$ , реактивну  $Q$  потужності та потужність спотворення  $D$ . Ефективність передавання енергії в системі характеризується коефіцієнтом потужності  $PF$ . У мережах з часто змінюваним навантаженням ефективність роботи таких пристроїв є низькою. Це стосується

автономних систем електроживлення малої потужності та тягових установок, в яких під час перехідного процесу суттєво погіршуються параметри якості напруги мережі, тому задача компенсації реактивної потужності у перехідних режимах є **актуальною**.

**Мета і завдання досліджень:** Розробка додаткового компенсатора з прогнозованим алгоритмом керування при різних типах навантаження.

Для досягнення мети розглядалися наступні задачі:

- аналіз можливих форми перехідного процесу;
- оцінка ефективності компенсації реактивної потужності в перехідних режимах звичайними компенсаторами;
- методику прогнозування амплітуди першої гармоніки.

*Об'єктом дослідження* є процес генерування реактивної потужності під час перехідних режимів.

*Предметом дослідження* є метод компенсації реактивної потужності в перехідних режимах.

**Методи досліджень.** Методи розрахунку електричних кіл; методи моделювання в перехідних режимах з використанням теорії електричних кіл; багатовимірні методи для аналізу ситуації та формування рішення.

*Новизна* даних досліджень полягає в наступному: розробка принципу керування додатковим компенсатором реактивної потужності, що дозволяє ефективно працювати при динамічному струмі навантаження і наблизити форму струму до синусоїдальної та при можливості зменшити кут зсуву фаз між струмом і напругою; визначенні параметрів додаткового компенсатора, який задовольняє коефіцієнт потужності і масогабаритні показники.

Практичне значення результатів полягає в тому, що запропонований принцип компенсації реактивної потужності на початку перехідного процесу дозволяє значно зменшити максимальне значення вільної складової струму, що зменшує пікове навантаження на електричну мережу; за умови використання розробленого принципу роботи додаткового компенсатора.

## РОЗДІЛ 1

### АКТУАЛЬНІСТЬ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

#### 1.1 Проблема компенсації реактивної потужності та шляхи її подолання

Проблема компенсації реактивної потужності (КРП) завжди займала важливе місце в загальному комплексі питань підвищення ефективності передачі, розподілу та споживання електричної енергії. Правильне рішення таких задач в значній мірі визначає економію грошових і матеріальних ресурсів, підвищення якості електропостачання. Основні питання компенсації реактивної потужності повинні розглядатися з урахуванням сучасних поглядів і з урахуванням нових технічних рішень в цій області.

Електроустановки, в загальному випадку, можуть споживати як активну, так і реактивну складові повної потужності і електричної енергії. Активна складова це та її частина, яка йде на створення корисної роботи і пов'язана з перетворенням електричної енергії в інші види енергії (механічну, теплову, світлову і ін.).

Реактивна потужність  $Q$  може розглядатися як характеристика швидкості обміну енергією між генератором і магнітним полем приймача електроенергії. На відміну від активної потужності, що корисно використовується в роботі, реактивна потужність не виконує корисної роботи, вона служить лише для створення магнітних полів в індуктивних приймачах (наприклад, в електродвигунах, трансформаторах і т.п.), циркулюючи увесь час між джерелом струму і приймачами [1-3].

З сказаного, очевидно, що традиційний термін "споживачі реактивної потужності", широко використовуваний електриками як в повсякденній практиці,

так і в технічній літературі, є терміном умовним, що не відображає фізичної сутності реактивної потужності. Більш правильним є термін "індукційні приймачі електроенергії", а в ряді випадків може бути застосований термін "реактивні навантаження".

Особливу актуальність проблема компенсації реактивної потужності набула після введення в 1991р. безпосередньої плати за споживання реактивної енергії в години максимальних навантажень і її генерацію в електричну мережу в години мінімальних (замість раніше існуючої системи надбавок і знижок до тарифів на активну електроенергію). Безперервне зростання тарифів на електроенергію і цін на пристрої компенсації вимагає ретельного аналізу їх співвідношення і нових підходів до оцінки доцільності застосування компенсації реактивної потужності в кожному конкретному випадку.

Гострота проблеми компенсації реактивної потужності на сучасному етапі викликана низкою обставин:

- концентрацією і централізацією генеруючих джерел. Передача дешевої реактивної потужності від генераторів електростанції до споживача по лініях електропередачі високої і надвисокої напруги стала економічно недоцільною;
- здійснення політики ресурсо- та енергозбереження. Оптимізація реактивної потужності, в тому числі за допомогою місцевих компенсуючих пристроїв, дозволяє істотно знизити втрати потужності і електричної енергії в мережах;
- підвищення вимоги до якості електричної енергії відповідно до норм ГОСТ13109-97. Реактивна потужність істотно впливає на зміни режиму напруги в електричних мережах;
- недостатня встановлена потужність компенсуючих установок в живильних і розподільних електричних мережах.

Реактивна потужність, протікаючи по елементах електричної мережі, що мають активний опір, викликає в них додаткові втрати потужності і електричної енергії. Крім того, перетоки реактивної потужності знижують пропускну спроможність ліній електропередач і трансформаторів, або змушують

збільшувати перетин проводів, прокладку додаткових кабельних ліній, заміну трансформаторів на велику номінальну потужність. Але величини перетоків реактивної потужності можуть бути зменшені і навіть повністю усунені за допомогою конденсаторів, установлюваних безпосередньо в місцях споживання реактивної потужності. Обмін енергією, в цьому випадку, буде відбуватися між індуктивністю і ємністю ланцюга. Між індуктивністю ж і джерелом енергії буде відбуватися обмін тільки некомпенсованою частини енергії [2].

У мережах з нелінійним навантаженням при помітній несинусоїдальності струму і напруги з'являється реактивна потужність спотворень, що не дозволяє проводити аналіз так як для кіл з лінійним навантаженням. Для аналізу режимів в таких мережах потрібні спеціальні підходи. Розглянемо детальніше особливості компенсації реактивної потужності в лінійних і нелінійних колах.

## **1.2 Особливості компенсації реактивної потужності для лінійних і нелінійних кіл**

Як зазначалося вище, реактивний струм додатково навантажує лінії електропередач, а це призводить до збільшення капітальних витрат на зовнішньо і внутрішньо майданчикові мережі. Реактивна й активна потужності враховуються постачальником енергії і підлягають оплаті за тарифами, що підключені для користувача. Таким чином реактивна потужність складає значну частину рахунку за електроенергію. Тому потрібно розібратися чим викликана поява реактивної потужності і яким чином її можна зменшити.

Розглянемо випадок, коли до лінійного реактивного навантаження прикладена напруга  $e(t)$ , що дорівнює  $e(t) = U_m \sin(\omega t)$ . Через навантаження протікає струм, що зсунутий відносно напруги на кут  $\varphi$ . Для індуктивного навантаження кут  $\varphi$  буде знаходитися в межах  $0 < \varphi < 180$ , а для ємнісного навантаження –  $180 < \varphi < 360$ . Таким чином струм через навантаження буде

описуватись формулою  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ . Миттєве значення потужності на навантаженні  $s(t)$  розраховують за формулою:

$$s(t) = u(t)i(t) = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) = UI \cos(\varphi) - UI \cos(2\omega t + \varphi) \quad (1.1)$$

Виходячи з цієї формули, можна побачити, що миттєва потужність є різницею між активною потужністю  $P$ , яка споживається навантаженням і реактивною  $Q$ , що циркулює в колі і не виконує ніякої корисної роботи. Розглянемо протікання електромеханічних процесів у лінійному ланцюзі, що зображені на рис.1.1.

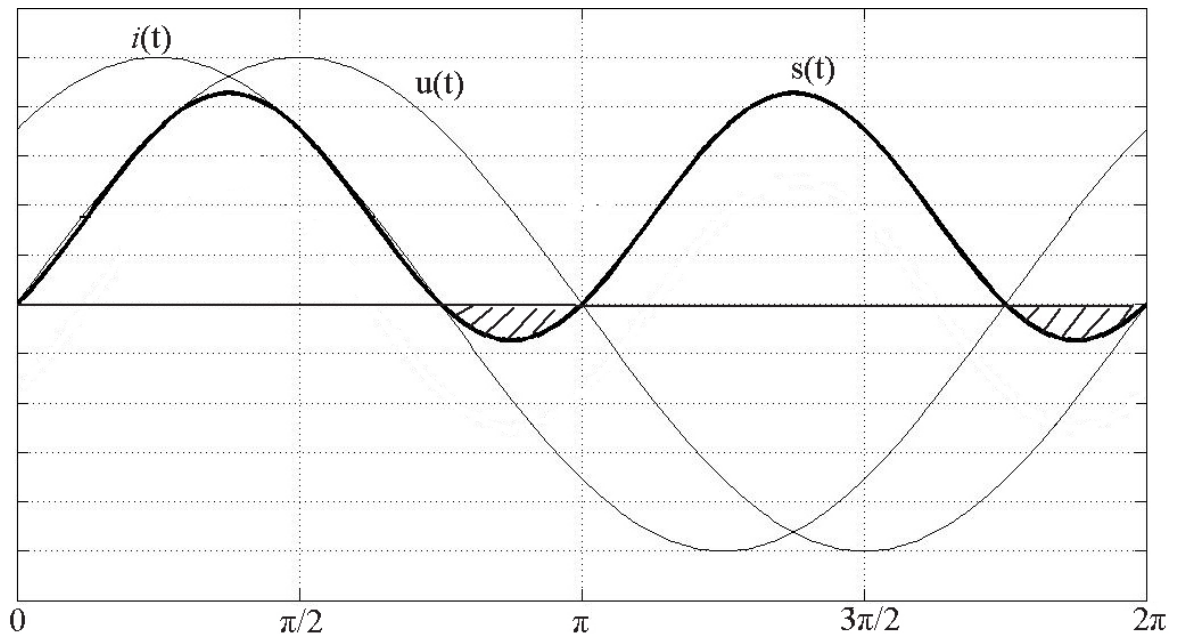


Рисунок 1.1 – Діаграми електромагнітних процесів у лінійному ланцюгу

З рис. 1.1 зрозуміло, що повна потужність на певних ділянках є від'ємною, що відповідає передачі енергії від навантаження назад у джерело. Оскільки повна потужність  $S$ , що відповідає потужності джерела, дорівнює добутку значень струму і напруги на його виводах  $S = U \cdot I$ , а активна потужність дорівнює  $P = U \cdot I \cos(\varphi)$ , то можна зробити висновок, що на навантаження поступає менша потужність, ніж та, що відбирається від джерела. Це обумовлено наявністю

реактивної складової, що викликає зсув фаз між струмом і напругою і як наслідок відхиленням  $\cos(\varphi)$  від нуля. Усунення реактивної складової потужності досягне за умови узгодження реактивних складових опору джерела і навантаження:  $X_i = -X_H$ . У цьому випадку зсув фаз між струмом і напругою навантаження відсутній [6, 8].

Представимо повну потужність як таку, що складається з активної  $p(t)$  і реактивної  $q(t)$  складових в усталеному режимі:

$$s(t) = i_p(t)e(t) + i_a(t)e(t), \quad (1.2)$$

де  $s(t) = e(t) \cdot i(t)$  – миттєва потужність,  $e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi)$  – функція миттєвих значень напруги мережі,  $i_a(t)$ ,  $i_p(t)$  – активна і реактивна складові струму мережі:

$$i_a(t) = I_m \cos(\varphi) \sin(\omega t + \psi) = I_a \sin(\omega t + \psi); \quad (1.3)$$

$$i_p(t) = -I_m \sin(\varphi) \cos(\omega t + \psi) = I_p \cos(\omega t + \psi). \quad (1.4)$$

Діаграма, що пояснює процес компенсації показана на рис.1.2.

На діаграмі показана напруга мережі  $u(t)$ , струм мережі  $i(t)$  та його складові першу гармоніку струму мережі  $i_1(t)$  і струм спотворень  $i_{\text{сповн}}(t)$ .

Відповідно до вище вказаних пояснень потрібно компенсувати основну складову  $i_1(t)$  відповідно до формул (1.3, 1.4) і повністю компенсувати струм спотворень  $i_{\text{сповн}}(t)$ .

Завдання дослідження перехідних процесів полягає в тому, щоб з'ясувати, за яким законом і як довго буде спостерігатися помітне відхилення струмів в гілках і напруг на ділянках ланцюга від їх сталих значень. Сталий режим після комутації розраховують при теоретичній умові  $t \rightarrow \infty$ , тобто коли після комутації пройшов нескінченно великий час.

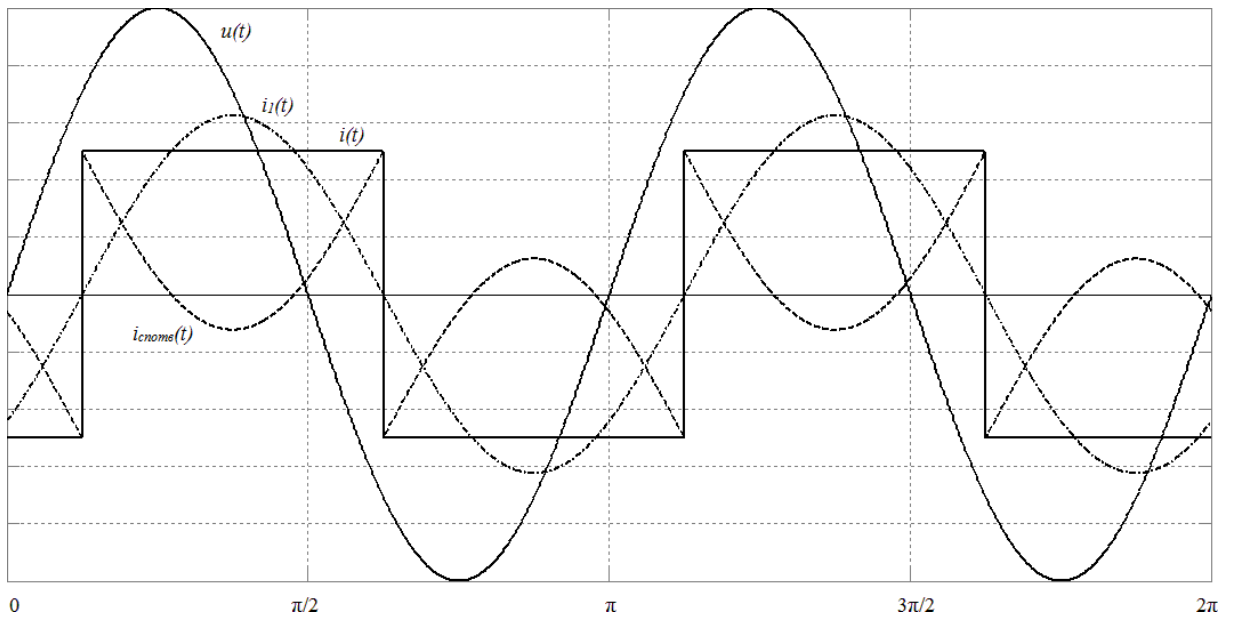


Рисунок 1.2 – Діаграми електромагнітних процесів у не лінійному ланцюгу

Сталий режим до комутації розраховують зазвичай в припущенні, що до моменту комутації в ланцюзі закінчився попередній перехідний процес. Хоча іноді доводиться аналізувати перехідні процеси, що виникають в ланцюзі, коли попередній перехідний процес, викликаний колишніми комутаціями, ще не закінчився. Але це не змінює теоретичну постановку задачі [7, 11].

Аналіз перехідних процесів виконують шляхом вирішення диференціальних рівнянь, складених для досліджуваного електричного кола на основі законів Кірхгофа або методу контурних струмів.

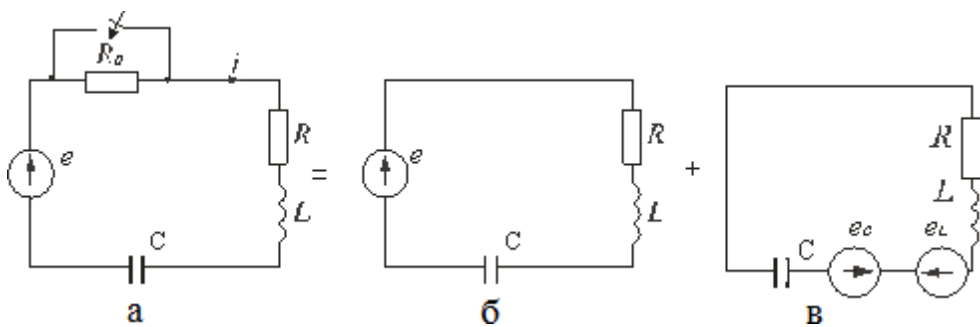


Рисунок 1.3 – Електричне коло з перехідними процесами



Нехай в деякому ланцюзі (рис.1.3а) раптово змінюється опір. До комутації в ланцюзі існували опори  $R_0$  і  $R$ , після комутації залишається тільки  $R$ . Потрібно визначити перехідний струм  $i$ . Електричний стан схеми після комутації описується інтегродиференціальними рівняннями, записаним на підставі II закону Кірхгофа для миттєвих значень струмів і напруг:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = e \quad (1.5)$$

Якщо це рівняння продиференціювати за часом отримаємо лінійне диференціальне рівняння другого порядку, у якого в якості постійних коефіцієнтів виступають параметри ланцюга або їх комбінації:

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot i = \frac{de}{dt} \quad (1.6)$$

Відомо, що повне рішення лінійного диференційного рівняння з постійними коефіцієнтами знаходять у вигляді суми часткового рішення неоднорідного і загального рішення відповідного однорідного рівняння.

Оскільки в правій частині диференційних рівнянь, що описують електричний стан ланцюгів, зазвичай знаходиться напруга (або струм) джерела (зовнішня рушійна сила), то часткове рішення знаходять з аналізу сталого режиму після комутації. Звідси цей режим називають вимушеним і відповідно струми або напруги, знайдені в даному режимі, називають вимушеними. Розрахунок вимушеного режиму, коли зовнішні джерела виробляють постійну або синусоїдальну е.р.с. (струм), не викликає труднощів і може бути здійснений будь-яким відомим методом [9].

Однорідне диференційне рівняння отримують з виразу (1.6) шляхом "звільнення" його від правої частини. Фізично це означає, що досліджуваний ланцюг "звільняється" від зовнішньої рушійної сили. Струми або напруги, знайдені при вирішенні однорідного диференційного рівняння, називаються вільними. Вільні струми і напруги є результатом дії внутрішніх джерел схеми:

е.р.с. самоіндукції, що виникають в котушках, і напруг на конденсаторах, коли і ті, й інші не врівноважені зовнішніми джерелами [8].

Схематично аналіз перехідного процесу може бути представлений як результат накладення двох режимів: вимушеного і вільного. Схема на рис.1.3б повинна бути розрахована в сталому (примусовому) режимі, а схема на рис.1.3в – в режимі, коли ланцюг звільнений від зовнішніх джерел. Струм мережі  $i_M$  може бути представлений як результат накладення двох складових: вимушеної  $i_{вим}$  і вільної  $i_{віль}$ :

$$i_M(t) = i_{вим}(t) + i_{віль}(t). \quad (1.7)$$

Зауважимо, що фізично існують тільки перехідні струми і напруги, а розкладання їх на вільні і вимушені складові є математичним прийомом, що дозволяє спростити розрахунок перехідних процесів в лінійних ланцюгах. Нагадаємо, що принцип суперпозиції можна застосовувати лише до лінійних кіл.

Існують різні методи вирішення однорідного диференційного рівняння, отриманого з виразу (1.6):

$$\frac{d^2 i_{віль}}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di_{віль}}{dt} + \frac{1}{LC} \cdot i_{віль} = 0 \quad (1.8)$$

Класичний метод аналізу перехідних процесів полягає в безпосередньому інтегруванні диференційних рівнянь. Рішення знаходять у вигляді суми експонент:

$$i_{віль} = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t}, \quad (1.9)$$

де число доданків рівне порядку диференційного рівняння.

Після підстановки експонент  $A_k \cdot e^{p_k t}$  в вихідне рівняння (1.7) і диференціювання можна отримати характеристичне рівняння, з якого визначають корені  $p_1, p_2$ . Якщо досліджуване коло – нульового порядку, то буде присутня тільки стала складова. Коли досліджуване коло – першого порядку, то буде стала складова і тільки одна експонента, тобто рівняння матиме один корінь. Якщо

зустрічаються кратні корені (наприклад,  $p_1 = p_2 = p$ ), рішення має вигляд  $A_1 \cdot e^{pt} + A_2 \cdot t \cdot e^{pt}$ .

Постійні інтегрування  $A_1, A_2$  знаходять з початкових умов, які визначають за допомогою законів комутації. Розрізняють незалежні і залежні (після комутаційні) початкові умови. До перших відносять значення струмів через індуктивності і значення напруг на ємностях, відомі з до комутаційного режиму роботи ланцюга.

Значення інших струмів і напруг при  $t = 0$  в після комутаційній схемі, що визначаються по незалежним початковим значенням із законів Кірхгофа для схеми після комутації, називають залежними початковими значеннями.

У випадку лінійного навантаження і синусоїдальної форми напруги мережі вираз для  $i_m(t)$  можна переписати у виді:

$$i_m(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi + \psi) + \sum_{k=1}^n C_k e^{p_k t}, \quad (1.10)$$

де  $I_m$  – амплітуда вимушеної складової струму,  $\omega, \psi$  – кутова частота і початкова фаза напруги мережі,  $\varphi$  – кут зсуву фаз між струмом і напругою мережі в усталеному режимі,  $n$  – порядок еквівалентної схеми навантаження,  $C_k$  – стала інтегрування,  $p_k$  – корінь характеристичного рівняння [3].

наведено на рис. 1.4. При значеннях  $n > 2$ , характер перехідних процесів є аналогічним з перехідним процесом при  $n = 1$  чи  $n = 2$ , або є їх комбінацією.

Якщо ланцюг складається лише з резистивних елементів, зміна режиму його роботи відбувається миттєво (рис.1.4а).

Для ланцюга першого порядку форма перехідного процесу показана на рис.1.4б. Якщо в момент включення сталий струм має найбільше значення ( $\psi - \phi = \pi/2$ ), вільний струм досягає максимального по модулю значення приблизно через половину періоду, проте ні за яких умов він не може перевищувати подвоєної амплітуди усталеного струму. Характер зміни  $u_c$  та  $i_c$  в  $RC$  колі аналогічний характеру зміни  $i_L$  та  $u_L$  в  $RL$  колі, що впливає з дуальності

індуктивності та ємності, як елементів електричного кола [5].

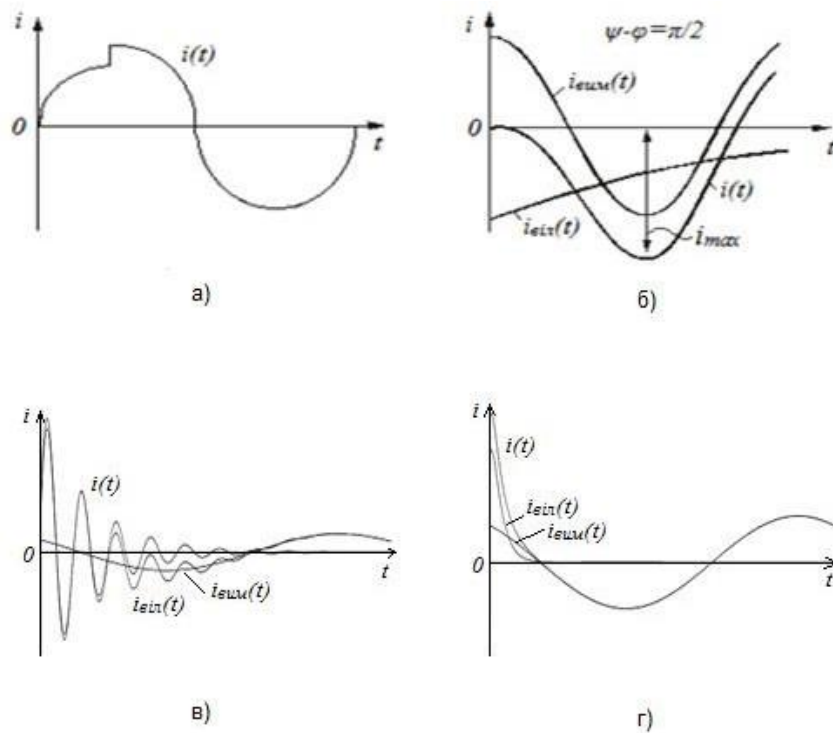


Рисунок 1.4 – Типові форми перехідних процесів при нульовому (а), першому (б) і другому порядку (випадок простих полюсів (в), випадок комплексно-спряжених полюсів (г)) ланцюга

В ланцюзі другого порядку, форма перехідного процесу якого зображена на рис. 4в, очевидно, що через кожен інтервал часу  $\Delta t = \frac{1}{\alpha}$  огинаюча амплітуд коливання зменшується у  $e$  разів. Кількість періодів вільних коливань чисельно дорівнює добротності коливального контуру. Характер перехідного процесу у контурі суттєво залежить від його опору втрат  $R$ . При  $R = R_{кр}$  процеси мають аперіодичний характер. При  $R < R_{кр}$  в контурі виникають коливання, кількість яких зростає при зменшенні  $R$ .

На рис. 1.4г приведено графік вільної складової струму (напруги) у випадку коливального процесу її згасання  $i_{віль} = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega t + \psi)$ . Відомо, що такому процесу відповідають комплексно-спряжені корені  $p_1 = -\alpha + j\omega_0$ ,  $p_2 = -\alpha - j\omega_0$ . Сталі  $\psi$  та  $A$ , визначаються параметрами схеми, початковими

умовами та е.р.с. джерела живлення; величини  $\omega_0$ ,  $\alpha$  залежать тільки від параметрів післякомутаційного кола. Чим менше  $\alpha$  порівняно з  $\omega_0$ , тим повільніше згасає коливальний процес [10].

В ідеальному випадку потрібно повністю компенсувати вільну складову але на практиці це робити не доцільно з декількох причин. По-перше, неможливо відразу ідентифікувати значення вільної складової, тому така компенсація буде не точною. По-друге, вільна складова може мати велику потужність, що призведе до збільшення потужності компенсатора і, як наслідок, збільшення вартості. Тому доцільно використовувати новий підхід до компенсації реактивної потужності, який буде передбачати розробку менш потужного компенсатора з простим в реалізації і ефективним алгоритмом керування.

Для розробки алгоритму потрібно розглянути два види перехідних процесів – короткий і довгий і для кожного з типів розробити свій алгоритм.

Коротким називають перехідний процес, коли його тривалість менша за період напруги мережі. Зазвичай для такого випадку перехідний процес викликаний короткотривалими завадами або комутацією навантажень зі сталою часу значно меншою періоду напруги. На рис.1.5. показано ілюстрація такого перехідного процесу.

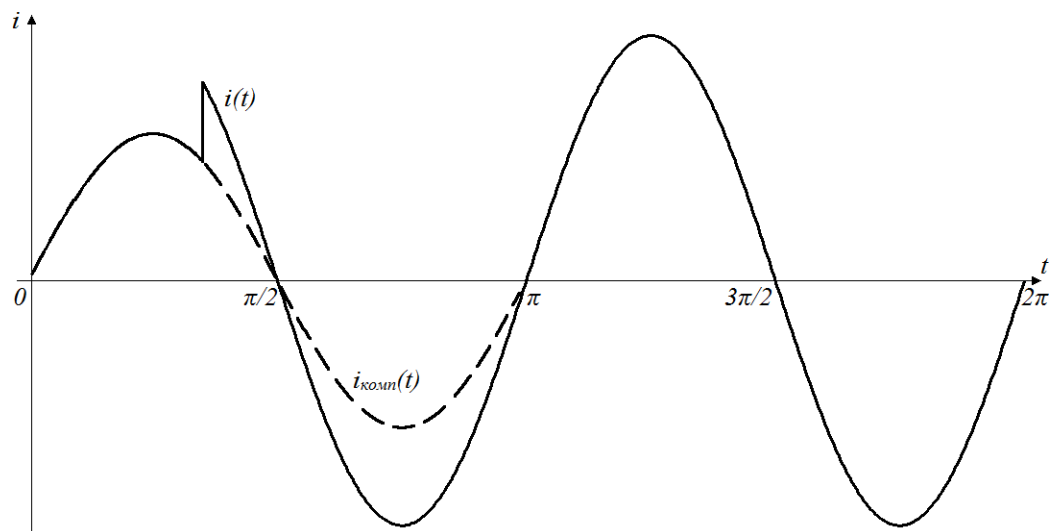


Рисунок 1.5 – Діаграма компенсації короткотривалого перехідного процесу

В даному випадку можна відразу ідентифікувати амплітуду струму компенсації.

Довготривалим називають такий перехідний процес, тривалість якого більша за період напруги мережі. На рис.1.6. показано діаграму компенсації такого перехідного процесу.

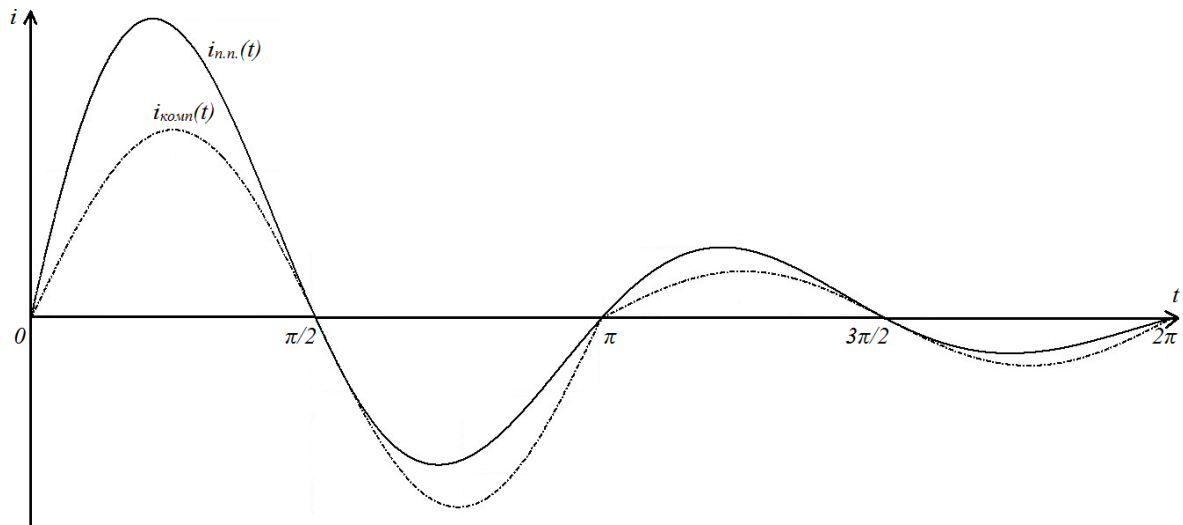


Рисунок 1.6 – Діаграма компенсації довготривалого перехідного процесу

Енергоємність компенсатора визначається наступним співвідношенням:  $W_k = C_k U^2 / 2$ , де  $C$  – ємність конденсатора компенсатора,  $U$  – напруга постійного струму компенсатора. Але в реальному випадку енергоємність вважається в двічі меншою, оскільки, компенсатор повинен бути розрахованим як на компенсування енергії (коли максимальне значення вільної складової більше за струм компенсації), так і на підзаряд (коли струм компенсації більший за вільну складову).

На першому періоді величина струму компенсації буде розрахована зі співвідношення:

$$\int_0^{T/2} (i_{n.n.}(t) - i_{комп}) \cdot U_M(t) dt = W_k, \quad (1.11)$$

де  $i_{n.n.}(t)$  – площа області компенсації,  $i_{комп} = I_{комп} \sin(\omega t)$  – струм вільної складової після компенсації на першому півперіоді,  $U_M(t)$  – напруга мережі.

На другому періоді можливо скомпенсувати енергію вільної складової, що

дорівнює  $W_k$ . Якщо цієї енергії достатньо для повної компенсації струму вільної складової, то він компенсується повністю, а залишок енергії використовується для компенсації реактивної складової потужності. Віншому амплітуда струму на другому півперіоді розраховується аналогічно до формули (1.11).

Розрахунок амплітуди струму після компенсації на третьому і наступних інтервалах використовується аналогічно.

### 1.3 Пристрої компенсації реактивної потужності

Основними технічними засобами, за допомогою яких здійснюється компенсація реактивної потужності на промислових підприємствах, є: синхронні двигуни, синхронні компенсатори, конденсаторні батареї, статичні тиристорні конденсатори, СТАТКОМ, активні фільтри, а також допоміжні засоби компенсації, які крім компенсації реактивної потужності покращують показники якості електричної енергії. Наявність в мережі вказаних пристроїв сприяє підтримці балансу реактивної потужності і заданих рівнів напруги в точках їх включення [12]. Сучасні джерела реактивної потужності забезпечуються системами регулювання для зміни їх потужності відповідно до змін характеристик режиму електричної мережі. Крім того, інтенсивний розвиток напівпровідникової техніки обумовлює можливість створення технічно досконалих пристроїв управління. Застосування таких пристроїв дозволяє радикально змінити можливості регулювання потужності і розширити області їх застосування в електротехнічних системах електроспоживання [13].

1.3.1. Синхронні компенсатори являють собою синхронний двигун, що працює в режимі холостого ходу. Таким чином робота компенсатора не включає в себе активне навантаження. Синхронний компенсатор працює в двох режимах. Перший режим індуктивний, коли компенсатор ввімкнений в систему без

збудження і споживає реактивну потужність. Другий режим ємнісний, коли вмикається збудження і збільшується поступово струм ротора синхронний компенсатор переходить в режим генерування потужності.

Синхронні компенсатори застосовуються для стабілізації напруги в точці підключення компенсатора в межах  $\pm 5\%$  від номінального значення, а також для генерування і споживання реактивної потужності. Мінімально допустима реактивна потужність, зазвичай, має бути не нижче 50% номінальної потужності. Синхронні компенсатори застосовуються в тих точках. Де графік навантаження змінюється в широких межах, у в'язку з чим суттєво змінюється баланс реактивної потужності [14].

Недоліки СК: відносно висока вартість, а отже, і високі капітальні затрати на компенсацію; втрати активної потужності на компенсацію, що значно більше у порівнянні із іншими джерелами реактивної потужності; велика займана виробнича площа і шум, вироблюваний при роботі. Тому в якості засобу компенсації реактивної потужності СК не знайшли широкого застосування.

1.3.2. Конденсаторні батареї. Батареї конденсаторів (БК) набули на промислових підприємствах найбільшого поширення як засіб компенсації реактивній потужності. Застосовують два способи включення БК: шунтові БК, які підключаються до шин підстанцій паралельно, і застосовуються для генерації реактивної потужності у вузлах мережі (поперечна компенсація рис. 1.7а); БК, які включають в лінії послідовно для зменшення реактивного опору ліній (подовжня компенсація рис.1.7б). БК комплектуються з окремих конденсаторів, сполучених послідовно і паралельно, в однофазному і трифазному виконання на номінальну напругу 0,22 - 10,5 кВ. В трифазному виконанні БК можна включати сполученням «зірка» або «трикутник» рис.1.7в,г. При використанні системи управління для переключення БК з «зірки» на «трикутник» та навпаки можливо включення БК на напругу, яка перевищує номінальне значення в  $\sqrt{3}$ . Для захисту конденсаторних установок від короткого замкнення та перенавантаження застосовують запобіжники [16].



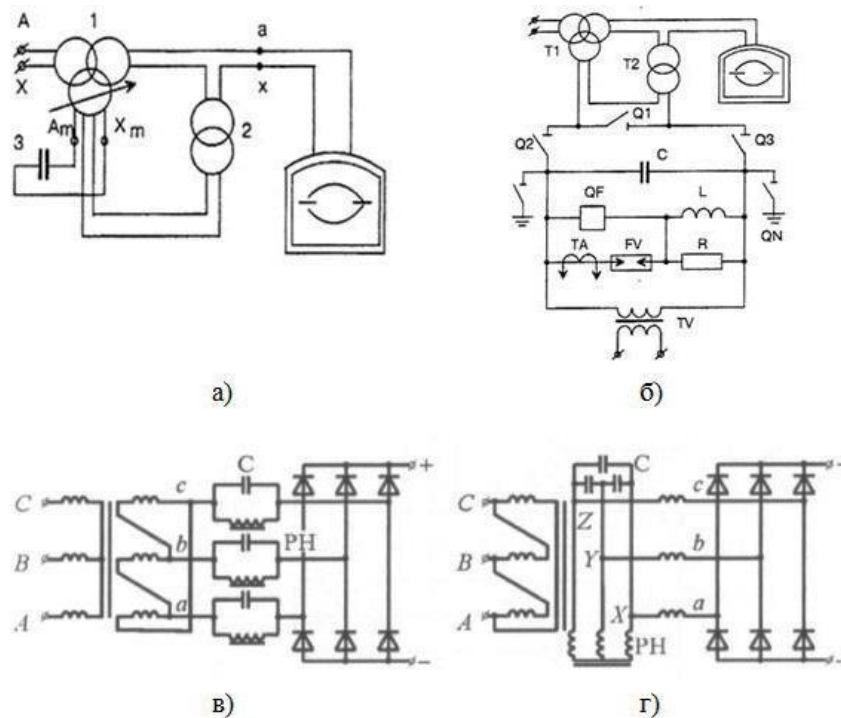


Рисунок 1.7 – Способи підключення БК: а) поперечна компенсація, б) поздовжня компенсація, в) сполучення БК «зіркою», г) сполучення БК «трикутником»

Вмикання конденсаторних установок супроводжується викидом струму, а вимкнення – перенапругою, що негативно впливає на термін служби конденсаторів і комутаційної апаратури. Тому конденсаторні батареї, що мають вимикачі не рекомендується вмикати-вимикати більше 2-4 разів на день. Для обмеження викидів струму конденсатори вмиканням обов'язково мають бути розряджені за допомогою розрядних резисторів або трансформаторів напруги. Зазвичай ці пристрої постійно підключені до конденсаторів, а резистори можуть бути вбудовані всередині конденсаторів.

У зв'язку з цим конденсаторні установки застосовуються тільки для регулювання реактивної потужності з метою полегшення її балансу в той чи іншій точці мережі або у вузлі навантаження [15].

Конденсатори в силу своїх параметричних властивостей дуже чутливі до спотворень синусоїдальної форми кривої напруги, тобто до вищих гармонік струму. Чутливість конденсаторних батарей до вищих гармонік завжди має

враховуватись при застосуванні конденсаторів в електричних мережах.

1.3.4. Статичні тиристорні компенсатори. Статичні тиристорні компенсатори реактивної потужності (СТК) широко використовуються для вирішення різних проблем передачі і розподілу електричної енергії, пов'язаних з великими і швидкими коливаннями реактивної потужності та зменшення вищих гармонік в електричній мережі. Розробка статичних джерел реактивної потужності може вестися лише на базі пристроїв, здатних здійснювати обмін енергією з мережею. Тому реактор (L) і конденсаторна батарея (C) повинні бути основним устаткуванням статичного джерела реактивної потужності. Статичні тиристорні компенсатори мають можливість в безперервному режимі і практично миттєво, відповідно до запитів мережі, вводити ємнісну або індуктивну складову, регулюючи напругу в лінії та підтримуючи необхідний рівень генерації реактивної потужності. Існує два основні типи статичних тиристорних компенсаторів: реактор з тиристорним керуванням, схема підключення показана на рис. 1.8. (Thyristor Controlled Reactor (TCR)), та конденсатори, які комутуються за допомогою тиристорів, рис. 1.9. (Thyristor Switched Capacitor (TSC)).

Схема TCR найчастіше використовується. Основним елементом управління є реактор (L0), який комутується за рахунок тиристорів, що вводяться в роботу повністю або частково для зниження ємнісної частини реактивної потужності, а також фільтрами, налаштованими на 3, 5, 7 ... гармоніки. Необхідність повного зниження рівнів гармонік практично відсутня, тому досить знизити їх до межі, встановленої ГОСТ 13109-97.

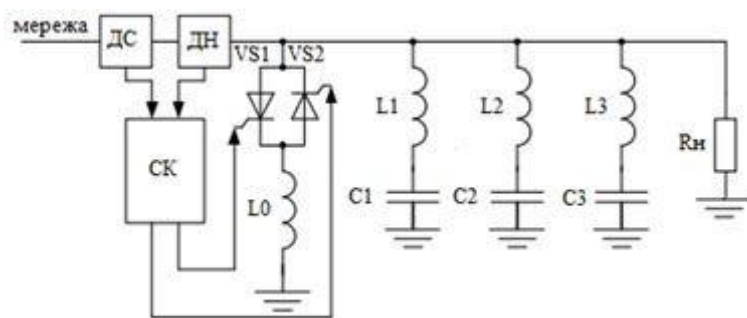


Рисунок 1.8 – Схема підключення реактора з тиристорним керуванням

TCR може працювати як в режимі генерації, так і в режимі споживання реактивної потужності. При цьому можливий плавний перехід від одного режиму до іншого. Особливість даної схеми в тому, що напруга на реакторі рівна напрузі мережі і не залежить від режиму роботи джерел реактивної потужності і від способу регулювання потужності реактора. Завдяки цьому виявляється можливим знижувати встановлену потужність устаткування в порівнянні з іншими типами джерел реактивної потужності та вмикати в мережу без проміжного трансформатора. Статичному тиристорному компенсатору реактивної потужності, виконаному по схемі TCR, притаманні деякі недоліки: при зниженні напруги мережі потужність установки буде падати, а від джерела потужності потрібно збільшення реактивної потужності для того, щоб стабілізувати напругу [17].

Схема TSC використовується рідше. У цій схемі реактор (індуктивність) включений постійно, а регулювання реактивної потужності відбувається за рахунок комутації ступенів конденсаторів. Змінюючи струм, який протікає через конденсатор, можна змінювати і потужність, яка генерується ним. Зміна струму відбувається за рахунок зміни кута провідності тиристорів. Основними перевагами TSC є діапазон регулювання реактивної потужності або здатність TSC плавно змінювати величину потужності від мінімального до максимального, швидко дія або час, протягом якого TSC здатний змінювати величину потужності від одного значення до іншого [18].

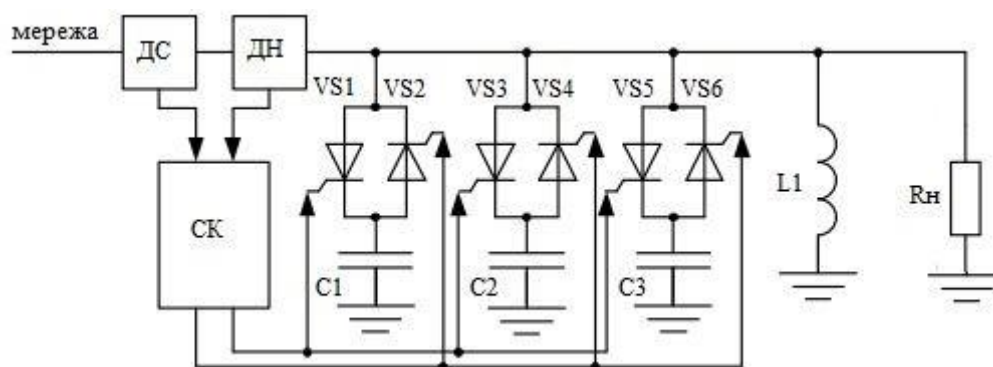


Рисунок 1.9 – Схема підключення конденсаторів, які комутують з допомогою тиристорів

До недоліків TSC можна віднести розширення діапазону регулювання, що призводить до збільшення гармонійного складу струму; збільшення одиничної потужності джерела реактивної потужності, що може призвести до виникнення резонансних явищ; збільшення гармонійного складу струму призводить до встановлення додаткових фільтрів, які супроводжуються додатковими матеріальними затратами і зростанням втрат активної потужності в джерелах реактивної потужності.

1.3.5. Комбіновані джерела реактивної потужності. Комбіновані джерела реактивної потужності (ДРП) застосовуються тоді. Коли необхідно забезпечити плавне регулювання реактивної потужності в режимі як її споживання, так і генерування. Такі ДРП складаються з реакторів, що керуються тиристорами або реакторів, що насичуються і комутуються вимикачами або тиристорами конденсаторних батарей. На рис.1.10показана принципова схема такого ДРП, що має назву статичний тиристорний компенсатор (СТК).

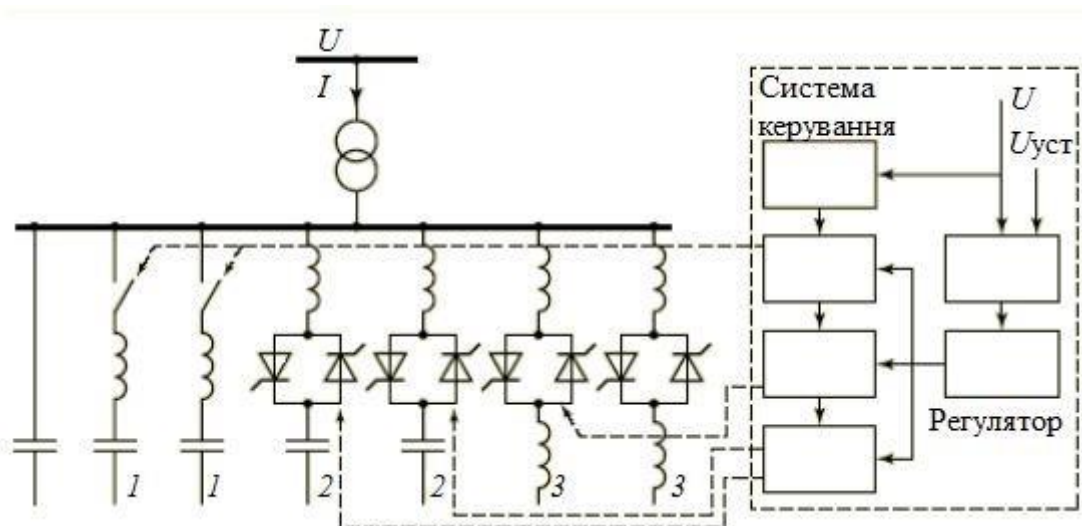


Рисунок 1.10 – Принципова схема комбінованого СТК: 1 – що комутується вимикачами КБ; 2 – що комутується тиристорами КБ; 3 – реактори, що керуються тиристорами

Робочий діапазон регулювання реактивної потужності, установлена потужність нерегульованої або ступінчасто регульованої конденсаторної батареї, потужність реакторів, що регулюються тиристорами обираються в залежності від призначення статичного тиристорного компенсатора.

Можливі, наприклад, наступні співвідношення цих потужностей для статичного тиристорного компенсатора, що складається з нерегульованої секції КБ і реактора, що регулюється тиристорами:

- установлені потужності реактора і КБ рівні, тобто  $Q_p = Q_{KB}$ ;
- установлена потужність реактора більша потужності КБ, наприклад,  $Q_p = 2Q_{KB}$ .

В першому випадку завдяки тому, що потужність реактора регулюється в діапазоні  $0 < Q_p < 1$ , а  $Q_{KB} = -1$ , сумарна потужність СТК може змінюватись в діапазоні  $-1 \leq Q_{СТК} \leq 0$ . Робочий діапазон регулювання реактивної потужності, що генерується знаходиться в області режимів від генерування потужності, що дорівнює установленій потужності КБ, до нуля, коли тиристри реактора відкриті повністю. Статична характеристика такого СТК показана на рис. 1.11а.

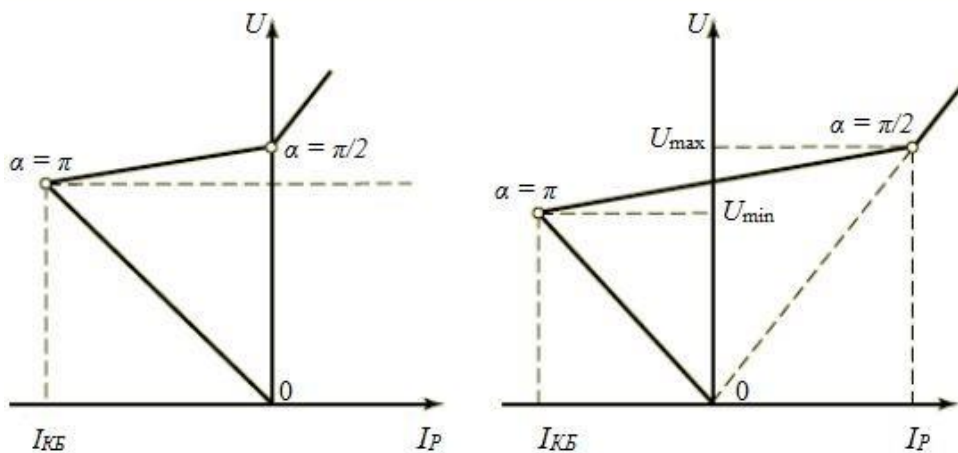


Рисунок 1.11 – Статичні характеристики комбінованого СТК: а – при  $Q_p = Q_{KB}$ ; б – при  $Q_p = 2Q_{KB}$

В іншому випадку потужність реактора може змінюватись в діапазоні  $0 < Q_p < 2$ , а потужність нерегульованої КБ залишається рівною  $Q_{KB} = -1$ . Такий

СТК може працювати в режимі генерування і споживання реактивної потужності, так, що  $-I \leq Q_{СТК} \leq I$  (рис. 1.11б).

Для забезпечення роботи більшості перетворювачів електричної енергії, необхідна ланка постійного струму, на вході якої потрібно встановлювати випрямляч з фільтром, що являє собою нелінійне навантаження. Наявність нелінійного навантаження призводить до появи у спектрі вхідного струму непарних гармонік, амплітуда яких співпадає з амплітудою першої гармоніки. В залежності від потужності перетворювача обирається той чи інший тип фільтру. Для малопотужних однофазних перетворювачів частіше за все використовують ємнісні фільтри, тоді як для перетворювачів з потужністю  $P > 100$  Вт використовують індуктивні фільтри або індуктивно-ємнісні фільтри [19-21].

Як відомо, вхідний струм випрямляча з ємнісним навантаженням має імпульсну форму. Спектр струму містить непарні гармоніки, амплітуда яких залежно від номеру гармоніки зменшується повільно. За умови використання ємнісного фільтру коефіцієнт потужності перетворювача є на рівні  $\chi = 0,3..0,4$ , що свідчить про негативний вплив на мережу і нераціональне використання енергії мережі більшістю малопотужних перетворювачів електричної енергії. На відміну від ємнісних, індуктивні і індуктивно-ємнісні фільтри мають коефіцієнт потужності, що дорівнює  $\chi = 0,7$ . Таким чином очевидним є той факт, що для зменшення негативного впливу на мережу потрібно використовувати саме індуктивні і індуктивно-ємнісні фільтри.

Додатковими джерелами вищих гармонік струму можуть бути трансформатори, якщо вони працюють із завищеним значенням магнітної індукції, що призводить до його насичення у кінці кожного півперіода напруги мережі і відповідного зростання вхідного струму. Якщо споживачі електричної енергії мають низький коефіцієнт потужності для його підвищення встановлюють фільтри вищих гармонік.

1.3.6. Пасивні фільтри. Використання пасивних фільтрів є найпростішим способом придушення вищих гармонік, так як складаються лише з пасивних елементів. Принцип роботи пасивних фільтрів полягає в налаштуванні

резонансної частоти фільтру на певну гармоніку. Для покращення коефіцієнту корисної дії, необхідно використовувати багатосекційні фільтри, таким чином різні ланки будуть налаштовані на різні гармоніки. Достатньо придушити декілька вищих гармонік, це обумовлене тим, що основна інформація передається саме в перших гармоніках і подальше збільшення ланок фільтру недоцільне, так як збільшуються розміри фільтру, а коефіцієнт корисної дії особливо не змінюється [22].

Для забезпечення коректної роботи фільтру потрібно, забезпечити ряд умов. Зокрема фільтри доцільно встановлювати безпосередньо біля нелінійного навантаження, необхідно також передбачити захист фільтрів від великих пускових струмів, що можуть протікати через конденсатор фільтру. Допуски на реактивні елементи фільтру повинні забезпечувати неможливість виникнення резонансних явищ на вищих гармоніках. Також параметри елементів фільтру можуть значно змінити свої значення, це обумовлено дією несприятливих умов і часом експлуатації. Зважаючи на ці і ряд інших особливостей пасивних фільтрів більшого поширення набули активні фільтри вищих гармонік.

1.3.7. Активні фільтри вищих гармонік. Активні фільтри вищих гармонік набули більшого поширення на відміну від пасивних фільтрів, так як можуть придушити всі гармоніки одночасно. Це обумовлене їх принципом роботи. На виході активного фільтру формується напруга протифазна до вищих гармонік, таким чином різниця в фазах дає згладжену форму сигналу.

АФ можливо підключати паралельно або послідовно з навантаженням. В першому випадку їх розглядають, як кероване джерело струму, в другому – як кероване джерело напруги, рис. 1.12. Паралельний АФ використовують для зниження рівня вищих гармонік струму, викликаних нелінійними споживачами. Послідовний АФ – крім основної функції, можливо використовувати для регулювання амплітуди основної гармоніки, а також для усунення не симетрії напруг.

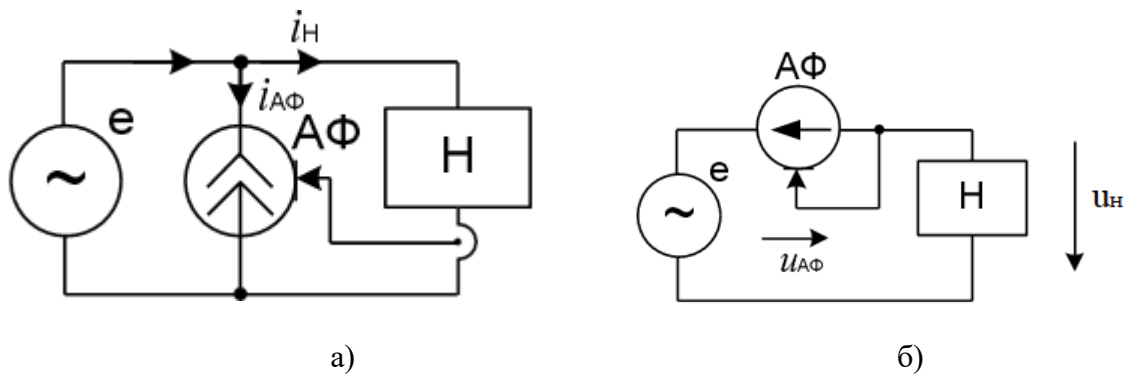


Рисунок 1.12 – Функціональні схеми підключення паралельного а) і послідовного б) активних фільтрів

У схемах АФ зазвичай використовують інвертори напруги з ШІМ. Частота ШІМ  $f_{ШІМ}$  обирають на основі теореми Котельникова з врахуванням номеру найвищої гармоніки  $n_{\max}$ , значення якої враховують під час корекції напруги (струму) генератора:

$$f_{ШІМ} = 2n_{\max} \cdot f_M, \quad (1.12)$$

де  $f_M$  – частота напруги мережі.

Таким чином застосування активного фільтру зводиться до розробки методу керування ШІМ, який буде забезпечувати необхідний рівень придушення гармонік [23].

Через ускладнений спосіб керування і велику кількість елементів, активні фільтри мають високу вартість і зазвичай використовуються для систем електропостачання невеликої потужності. Для зменшення вартості фільтрів застосовують комбіновані системи до яких входить малопотужний АФ і багатосекційний ПФ.

1.3.8. Гібридні фільтри. Недолік пасивних фільтрів – неможливість регулювання їх параметрів за умови зміни режиму роботи споживачів усувають у гібридних фільтрах встановленням активного фільтру. У цьому випадку потужність активної частини схеми знижується на порядок у порівнянні з АФ,



збільшується стійкість пасивної частини схеми у динамічних режимах, що дозволяє збільшити добротність ПФ і відповідно зменшити втрати.

Принцип дії гібридних фільтрів заснований на підключенні до пасивних ланок активних елементів (активних фільтрів АФ невеликої потужності), налаштованих на власну частоту пасивної ланки LC-фільтра (рис. 1.13).

У цьому випадку активний елемент є регульованим повним опором, здатним коригувати параметри пасивного фільтра: знижувати його добротність в перехідних процесах, підвищувати її для поліпшення фільтрації, виробляти підстроювання резонансної частоти [24].

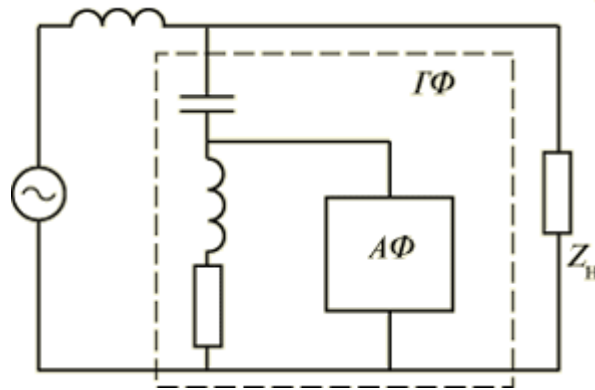


Рисунок 1.13 – Принципова схема гібридного фільтру

Автоматична корекція параметрів ГФ має наступні переваги:

- корекція частотних характеристик фільтра у статичних режимах роботи мережі;
- зниження негативного впливу на фільтрувальні властивості девіації частоти мережі і параметрів фільтра;
- усунення резонансних явищ на вищих гармоніках струму.

В цьому розділі було досліджено та систематизовано основні способи компенсації реактивної потужності. Дослідження показало, що всі розглянуті способи недосконалі, оскільки, під час перехідного процесу струм може значно змінюватись і тому при повній компенсації реактивної потужності встановлена

потужність компенсатора буде використовуватись неефективно.

Для зменшення потужності компенсатора потрібно проаналізувати можливі форми перехідного процесу і визначити критерії ефективного використання потужності компенсатора.

Також було виведено типові графіки перехідних процесів для нульового, першого і другого порядків. Проведенні дослідження можуть знадобитися в подальшому аналізі перехідних процесів і вдосконаленні використання потужності компенсатора реактивної потужності.

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКОВОГО КОМПЕНСАТОРА ПІД ЧАС ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ

#### 2.1 Оцінка ефективності використання звичайних компенсаторів під час перехідних режимів

Спочатку розглянемо можливі топології компенсатора для перехідних режимів. Існує два варіанти:

1. Використовувати один компенсатор як для усталеного так і для перехідного режимів.
2. Для усталених режимів використовувати звичайний компенсатор, а для перехідних режимів – додатковий, що працюватиме з запропонованим алгоритмом.

Використовувати один компенсатор недоцільно, бо він з одного боку повинен бути розрахований на всю потужність, а з іншого боку повинен працювати на вищих частотах для компенсації перехідного процесу. Цю обставину роблять компенсатор громіздким і дуже дорогим.

Більш вигідним рішенням виступає використання одного основного компенсатора, що буде компенсувати реактивну потужність, і додаткового, що призначений для компенсації реактивної потужності в перехідних режимах.

Щоб визначити доцільність використання додаткового компенсатора, для початку потрібно оцінити ефективність використання основного компенсатора

під час перехідних режимів, розглянемо як змінюється коефіцієнт потужності енергії спожитої від мережі  $\chi$  для перехідних режимів різного типу. Коефіцієнт потужності розраховується за формулою:

$$\chi = \frac{U_{(1)}I_{(1)}}{UI} \cos(\varphi_{(1)}), \quad (2.1)$$

де  $I_{(1)}$ ,  $U_{(1)}$  – діюче значення першої гармоніки струму і напруги мережі відповідно;  $I$ ,  $U$  – діюче значення струму і напруги мережі відповідно;  $\varphi_{(1)}$  – зсув фаз між першими гармоніками напруги і струму мережі.

Компенсатори працюють з інерційністю в один період це ж основною причиною того, що коефіцієнт потужності зменшується. Тому для дослідження особливості роботи основного компенсатора була розроблена модель з динамічним навантаженням [25].

На рис. 2.1 показана досліджувана модель, що зібрана в середовищі Simulink Matlab. На рис.2.2 показані варіанти підключення різних типів навантаження. Модель складається з мережі, компенсатора і навантаження. В якості компенсатора було обрано мостовий інвертор напруги, що живиться від джерела постійної напруги 400В, також в даній моделі мережею виступає джерело змінної напруги з амплітудою 311В і частотою 50Гц, навантаження в свою чергу являю собою діодний міст з вихідним ємнісним фільтром і регульованим джерелом струму (блок Repeating Sequence), за допомогою якого і задається характер перехідного процесу.

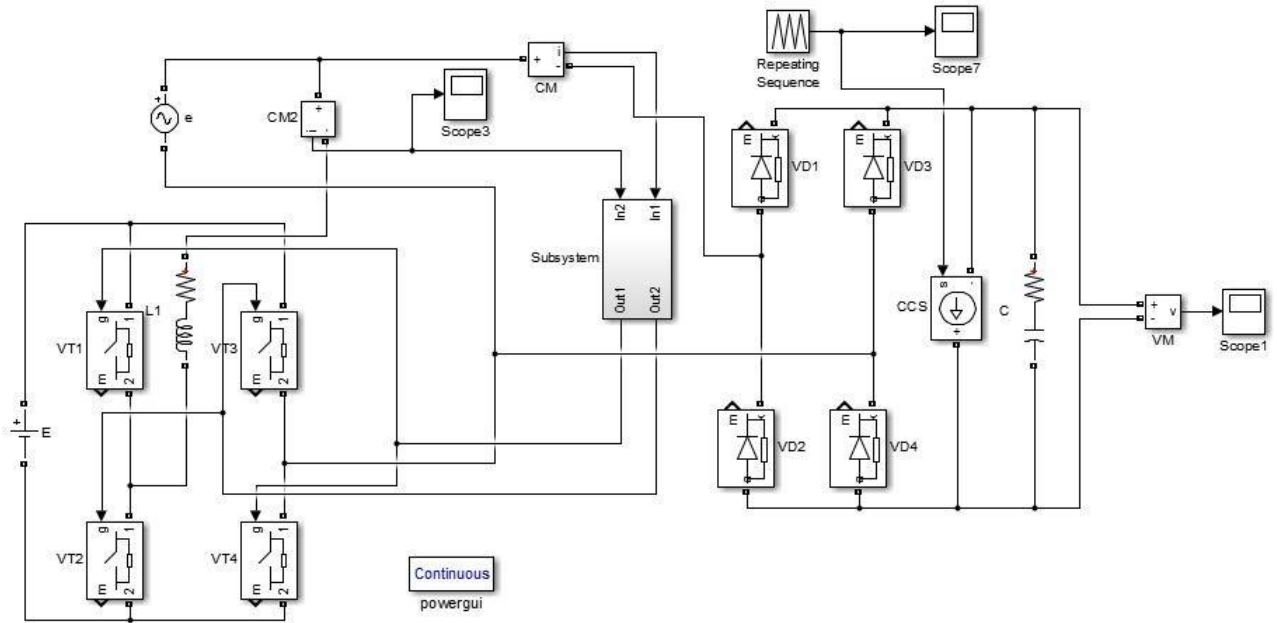


Рисунок 2.1 – Модель досліджування компенсатора

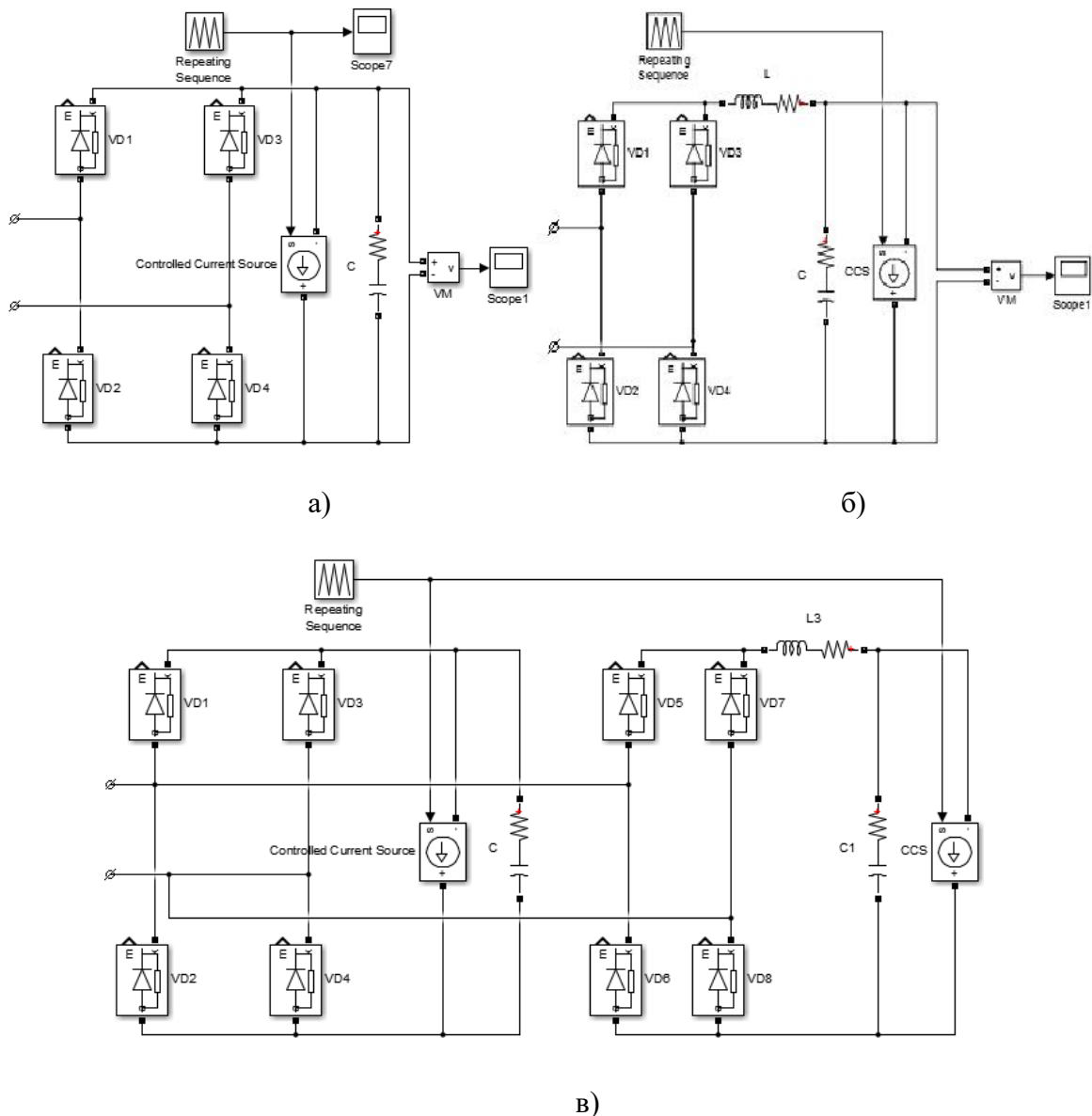


Рисунок 2.2 – Варіанти підключення до компенсатора різних типів навантаження:  
 а) ємнісного навантаження, б) індуктивного навантаження, в) індуктивно-  
 ємнісного навантаження

З допомогою регульованого джерела струму задавався трикутний характер перехідного процесу з максимальним  $I_{max}$  і мінімальним  $I_{min}$  значенням струму. Амплітуда струму перехідного процесу змінювалася в межах від 0 до 5 А. Період перехідного процесу в загальному випадку визначається як найменше спільне кратне між періодом навантаження і періодом напруги мережі. В нашому випадку період перехідного процесу був обраний в 10 раз більшим періоду напруги мережі, тобто  $T_H = 10 T_M$ . Часова діаграма, що показує описаний вище перехідний процес зображена на рис.2.3.

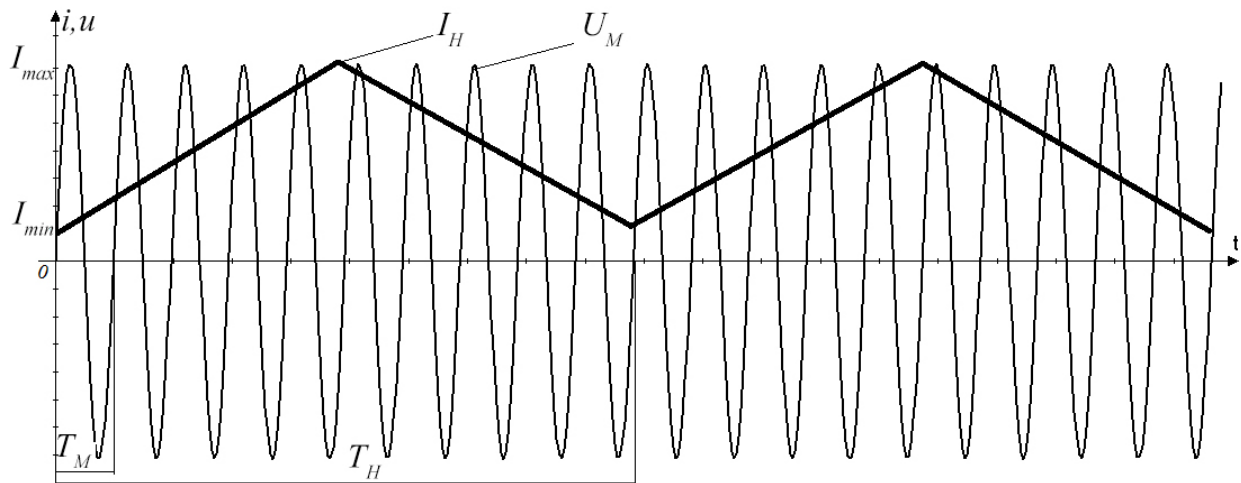


Рисунок 2.3 – Часова діаграма перехідного процесу

Оскільки період перехідного процесу  $T_H$  більше ніж період напруги мережі, то у вхідному струмі можуть з'являтися інтергармоніки. Тому при розрахунку коефіцієнту потужності спектр струму необхідно розраховувати відносно періоду перехідного процесу  $T_H$ , тому коефіцієнт потужності у даному випадку розраховується за такою формулою:

$$\chi = \frac{U_{(m)} I_{(m)}}{UI} \cos(\varphi_{(m)}), \quad (2.2)$$

де  $m$  – номер гармоніки струму, що відповідає частоті напруги мережі.

Компенсатор реактивної потужності повинен бути розрахований на потужність 5кВт і напругу 220В, таким чином знаючи ці параметри можна визначити амплітудне значення струму навантаження:

$$I_a = \frac{5 \cdot 10^3}{220} = 22.7 \text{ A}$$

Отже, таким чином амплітудне значення струму через транзистори у відкритому стані буде також дорівнювати 22.7А.

Середнє значення струмів зворотних діодів інвертора може бути прийнято близько 60% від величини відповідних керованих вентилів інвертора, тобто

$$I_{VD} = 0.6 \cdot 22.7 = 13.65A.$$

Максимальна зворотна напруга транзисторів буде дорівнювати напрузі джерела живлення:  $U_{3g} = 400V$ .

Індуктивність L1 необхідна для формування вихідного струму. Індуктивність обирається по максимальному значенню похідної від форми струму, але так як форма струму компенсатора не є повністю гладкою, то будуть присутні ділянки, на яких значення похідної буде дорівнювати нескінченності. Тому вони не приймаються до уваги, а значення похідної шукаємо на більш гладких ділянках [26].

Лише математичними формулами важко описати методику вибору індуктивності, тому розрахунок буде проводитися з допомогою моделювання. А значення індуктивності розрахуємо виходячи з формули:

$$\frac{di}{dt} = \frac{\Delta U}{L} = \frac{U_{ж} - U_{м}}{L} \quad (2.3)$$

де  $U_{ж} = 400V$ ,  $U_{м}$  – напруга мережі.

Струм компенсатора і значення його похідної наводяться на рис. 2.4.

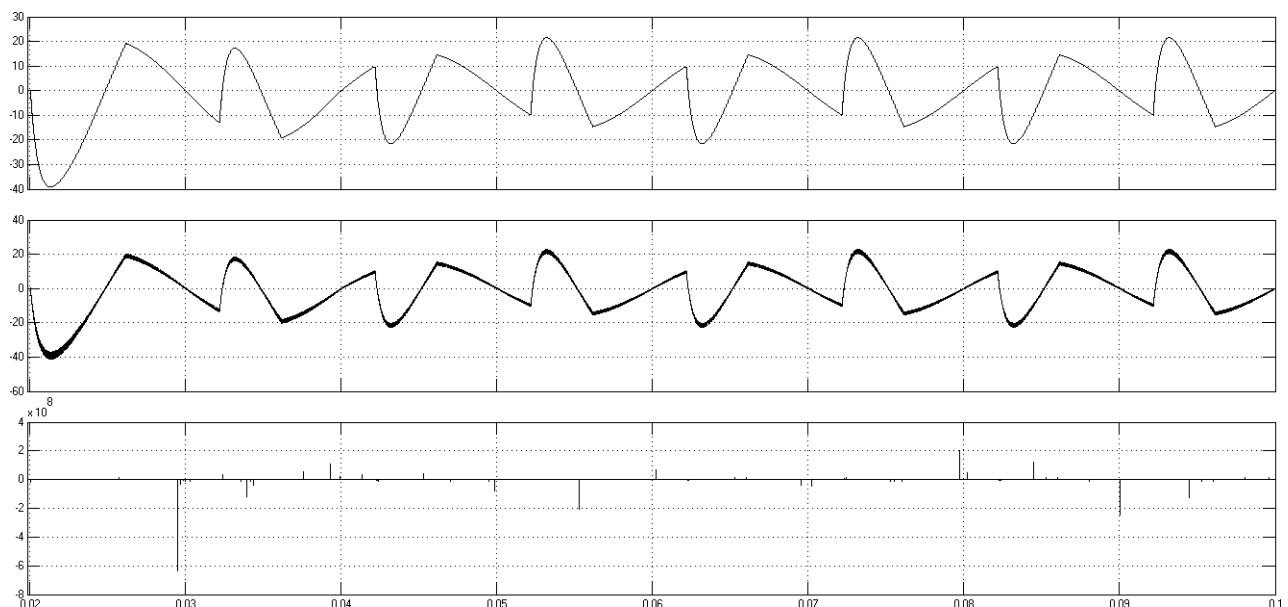


Рисунок 2.4 - Осцилограми струму компенсатора: (1) еталонне значення струму, (2) отримане значення струму, (3) похідна струму компенсатора.



Обираємо область, в якій значення похідної буде максимальним і визначаємо це значення (рис.2.5).

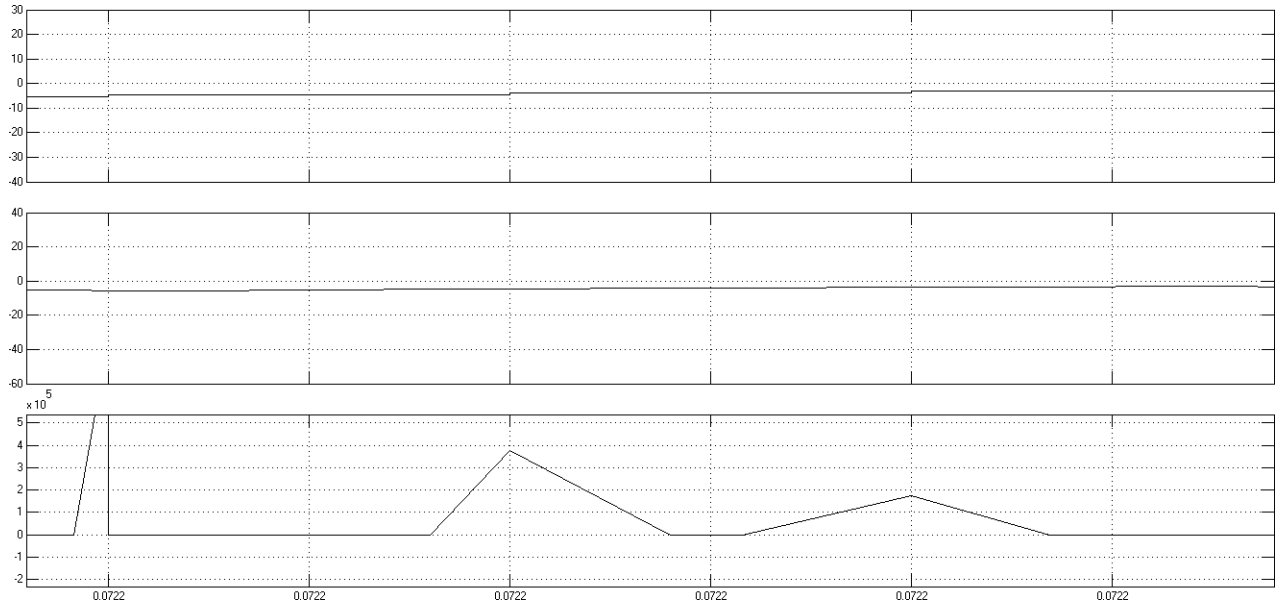


Рисунок 2.5 - Осцилограми струму компенсатора для окремої ділянки форми струму: (1) еталонне значення струму, (2) отримане значення струму, (3) похідна струму компенсатора

З рис.2.5 видно, що значення похідної можна прийняти рівним  $\frac{di}{dt} = 1 \cdot 10^5$  в момент часу  $t=0.0722c$ . Саме в цей момент часу визначаємо  $dt$  величину напруги мережі (рис.2.6).

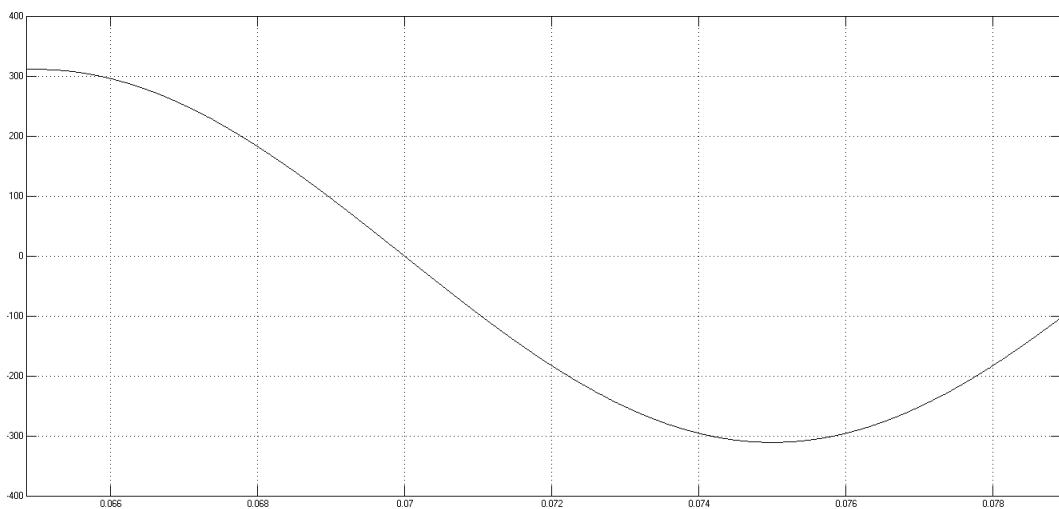


Рисунок 2.6 – Осцилограма напруги мережі

Значення напруги мережі в момент часу  $t=0.0722c$  дорівнює  $U_m=200B$ .

Підставляємо отримані значення в формулу (2.3) і знаходимо необхідну величину індуктивності:

$$L = \Delta U \cdot \frac{di}{dt} = \frac{400 - 200}{10^5} = 2 \text{ мГн.}$$

Отже, таким чином для забезпечення плавної зміни струму компенсатора необхідно використовувати індуктивність величиною  $L = 2 \text{ мГн}$ .

В ході дослідження була промодельована схема з рис.2.1 для різних типів навантаження і амплітуди перехідного процесу. Зокрема в якості навантаження використовувались ємнісний, індуктивний і ємнісно- індуктивний фільтри, а пульсація перехідного процесу змінювалась від нуля до 5. Отримані значення коефіцієнта потужності занесені в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Значення коефіцієнта потужності

$I_{min}, A$	$I_{max}, A$	X		
		C	L	LC
1	1	0.9953	0.9946	0.9964
1	2	0.9574	0.9928	0.9783
1	3	0.9178	0.9859	0.9555
1	4	0.8928	0.9689	0.9381
1	5	0.8759	0.9553	0.9251
1	6	0.8640	0.9210	0.9153

Аналіз результатів показує, що коли відсутній перехідний процес, тобто пульсація перехідного процесу дорівнює нулю, то коефіцієнт потужності близький до одиниці для всіх типів навантаження, що задовольняє діючим стандартам якості електричної енергії. При рості пульсації, коефіцієнт потужності починає зменшуватися, що обумовлено наявністю спотворень в формі струму. На рис.2.7 показано діаграми струму мережі після основного компенсатора для трьох видів навантаження.

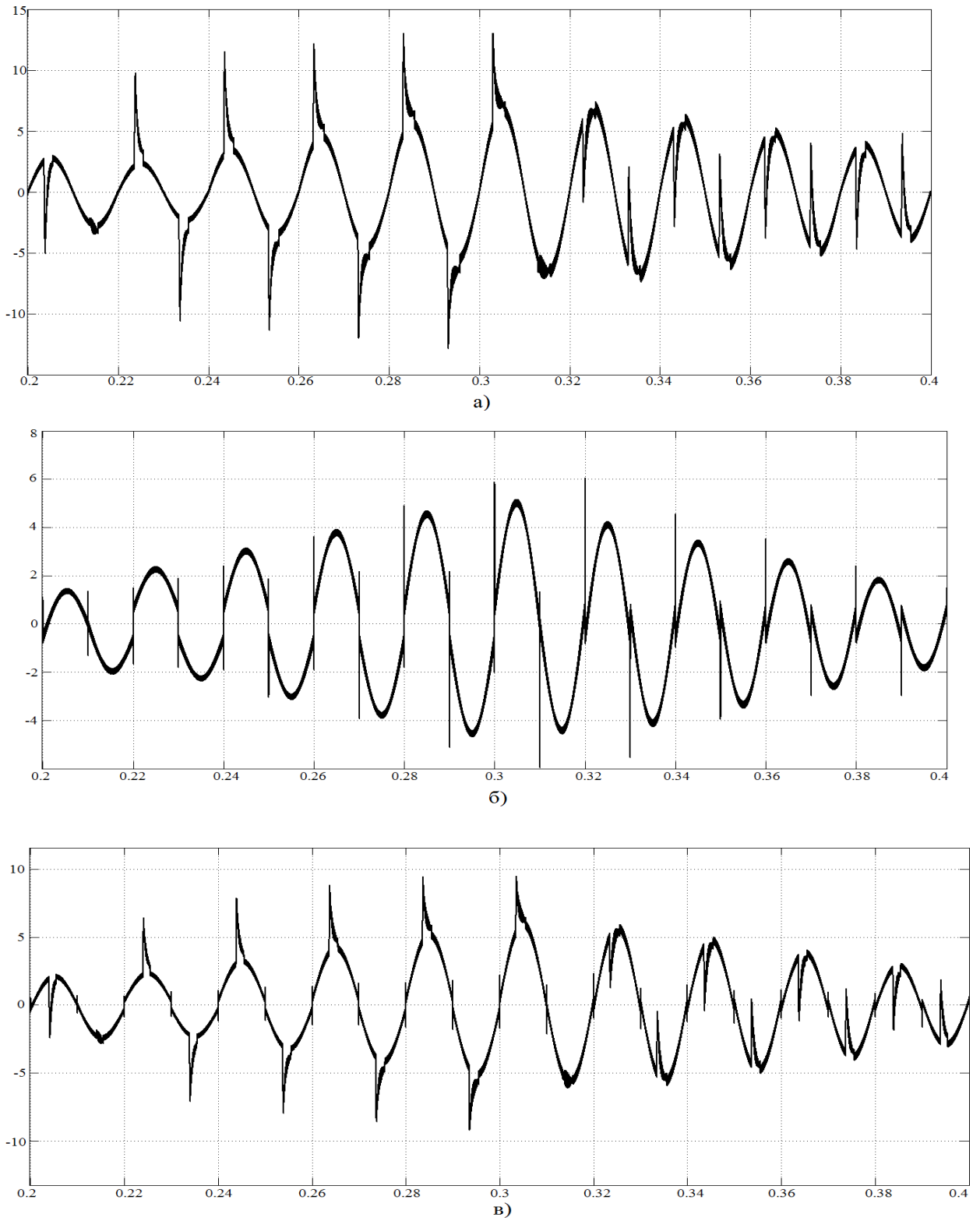


Рисунок 2.7 – Часові діаграми струму мережі під час перехідного процесу після основного компенсатора для а) ємнісного, б) індуктивного, в) індуктивно-ємнісного навантаження

На рис.2.8 показано спектр струму мережі під час перехідного процесу. Для наочності було показано спектр в нормальному (рис.2.8, а) і збільшеному (рис.2.8, б) масштабі, щоб можна було побачити інтергармоніки струму.

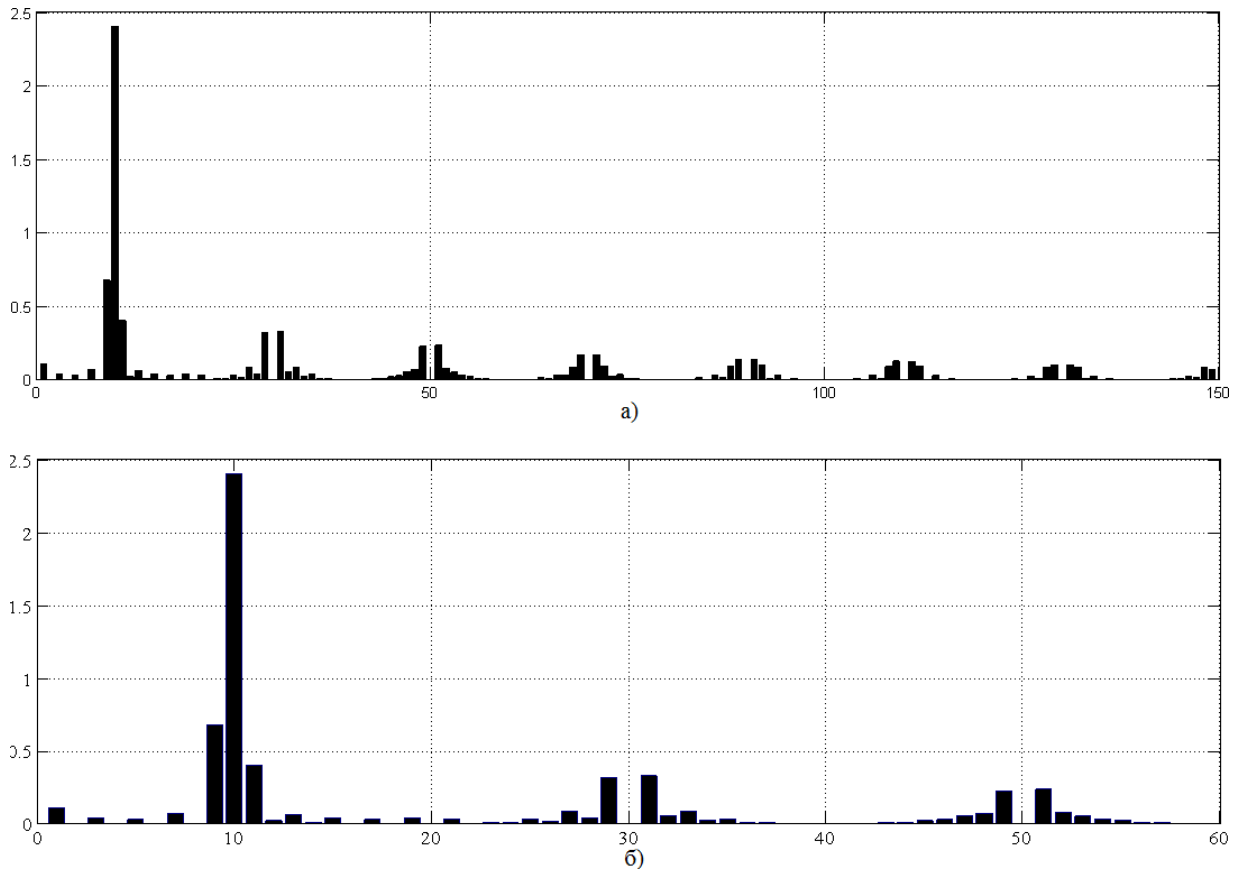


Рисунок 2.8 – Спектр струму мережі під час перехідного процесу в нормальному а) і збільшеному б) масштабі

Як видно з рис. 2.7, струм мережі має форму струму, близьку до синусоїдальної, однак на деяких часових інтервалах спостерігаються спотворення (рис.2.8, б), що засвідчує необхідність використання ефективніших алгоритмів компенсації для перехідних режимів.

## 2.2 Принцип компенсації реактивної потужності в перехідних режимах

Для компенсації спотворень струму мережі, зображених на рис. 2.7 необхідно застосувати принципово нові засади компенсації реактивної потужності, розроблені з використанням прогнозного керування. При цьому слід враховувати, що струм мережі після основного компенсатора містить спотворення двох типів:

- високочастотні, які утворені основним компенсатором;
- низькочастотні, що зумовлюються характером навантаження.

При використанні додаткового компенсатора доцільно усунути лише високочастотні складові струму, які створюють великі пікові навантаження і мають імпульсний характер. При цьому потужність додаткового компенсатора є значно меншою, ніж основного. Для усунення низькочастотних спотворень потрібна значна більша потужність, разом з тим низькочастотні гармоніки струму мають значно менший вплив на параметри якості напруги мережі [27, 28].

З існуючих типів керування був обраний релейний тип, адже його використання дозволяє мінімізувати інерційність компенсаторів, таким чином пульсація струму основного компенсатора має змінну частоту. Тому за умови використання фільтру низьких частот, частота його зрізу залежатиме від форми струму мережі і тому повинна розраховуватись для граничного випадку, що значно збільшує інерційність контуру керування. Зважаючи на це, доцільно використовувати програмно-апаратну реалізацію вузла придушення пульсації струму основного компенсатора на вході контуру керування додаткового.

При цьому слід врахувати близьку до трикутної форму пульсацію струму компенсатора. Після диференціювання сигналу такої форми, утворюється серія дельта-імпульсів, положення яких відповідає мінімальному і максимальному струму пульсації. Якщо вимірювати значення струму мережі в моменти часу, що відповідає цим імпульсам, вони відповідатимуть максимальному  $I_{max}$  і мінімальному  $I_{min}$  значенню струму. Якщо усереднити ці значення за формулою:

(2.4)

$$i_{gc\_av}(\varphi) = \frac{I_{max}(\varphi) + I_{min}(\varphi)}{2},$$

усереднений струм  $i_{gc\_av}(\varphi)$  не міститиме пульсацію струму мережі, створену компенсатором. Для реалізації вказаного принципу до досліджуваної моделі рис.2.1 необхідно додати канал синхронізації додаткового компенсатора. Таким чином досліджувана модель з додатковим компенсатором буде мати вигляд, що показаний на рис. 2.9. Вона є надбудовою до рис. 2.1. Додано додатковий компенсатор, який по структурі відповідає основному компенсатору але вихідна індуктивність має менше значення для покращення динамічних властивостей додаткового компенсатора. Підключення різних типів навантаження відбувається аналогічно до рис.2.2.

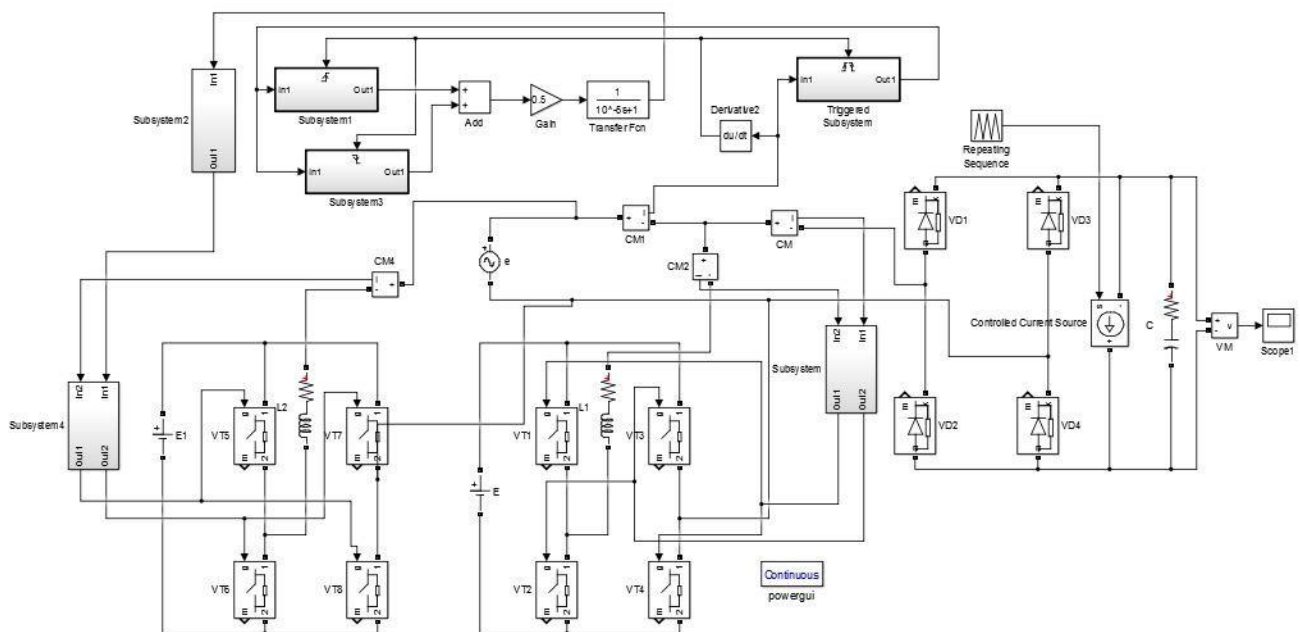


Рисунок 2.9 – Досліджувана модель з додатковим компенсатором і каналом синхронізації

Модель складається з додаткового компенсатора, що представлений мостовим інвертором з джерелом постійної напруги. Канал синхронізації

представляє собою послідовність логічних елементів і тригерів. На рис.2.10 показані діаграми роботи каналу синхронізації.

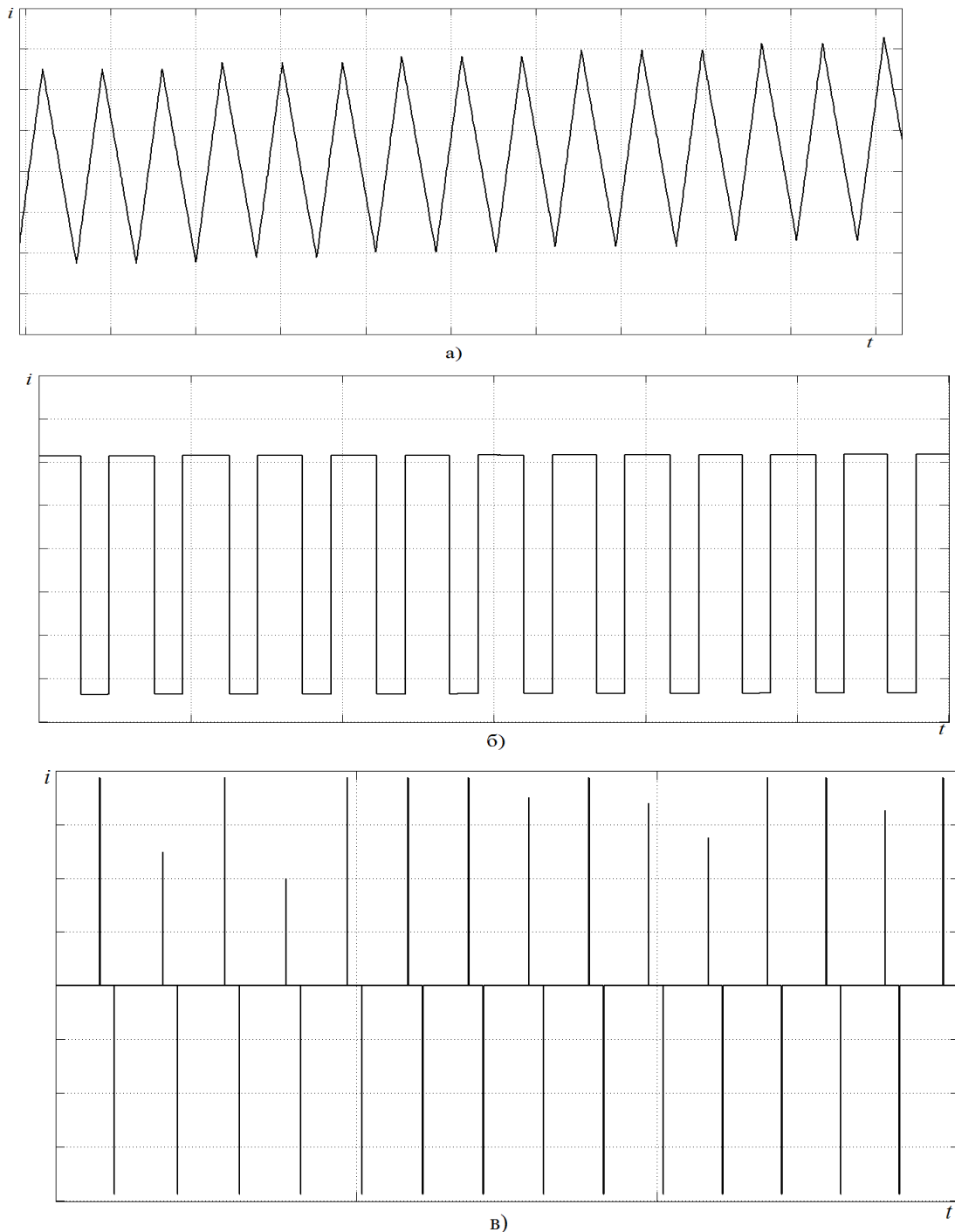


Рисунок 2.10 – Діаграми роботи каналу синхронізації: а) форма струму мережі, б) форма сигналу після першого диференціювання, в) серія дельта імпульсів після другого диференціювання

Струм мережі формується релейним типом керування, тому він має ризиковану форму (рис.2.10,а). Тригерна підсистема перемикається по передньому і задньому фронту від серії дельта імпульсів, що надходять з диференціатора (рис.2.10, в), що в свою чергу диференціює пульсацію струму компенсатора (рис.2.10, б). Далі сигнали потрапляє на два тригера, що перемикаються по передньому і задньому фронтах відповідно і після сумування формують таким чином еталонний сигнал для додаткового компенсатора. Встановлення фільтра допомагає отримати більш гладку форму еталонного сигналу. Таким чином даний алгоритм роботи буде відслідковувати викиди струму під час перехідних процесів і компенсувати їх додатковим компенсатором [34].

Потужність додаткового компенсатора визначається експериментально.

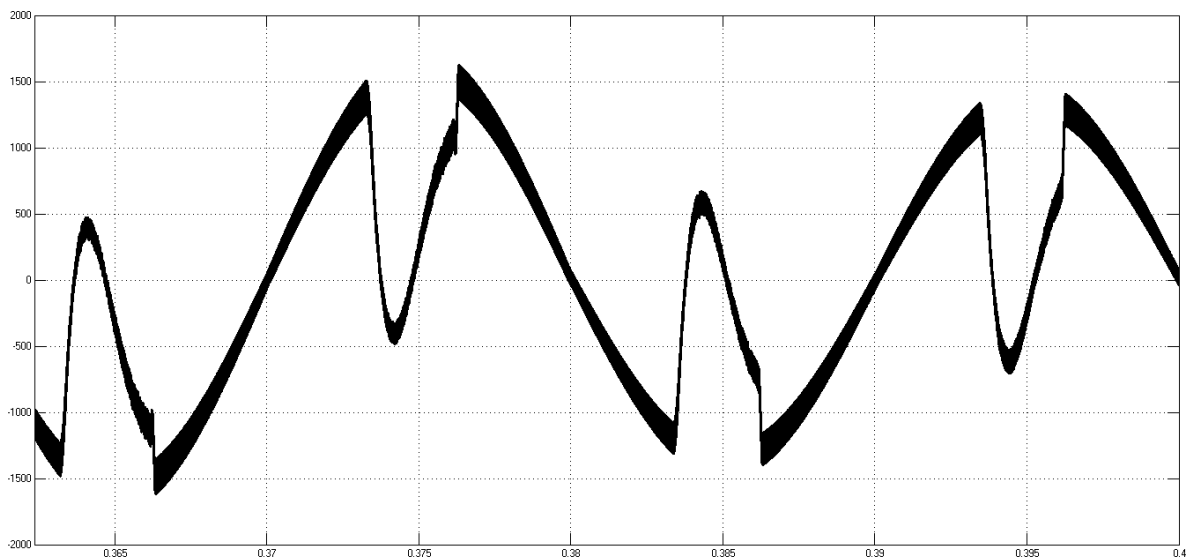


Рисунок 2.11– Діаграма потужності додаткового компенсатора

Як видно з рис.2.11 потужність додаткового компенсатора буде меншою, ніж потужність основного і дорівнює 1.6кВт. Таким чином амплітудне значення струму компенсатора буде дорівнювати:

$$I_a = \frac{1.6 \cdot 10^3}{220} = 7.27 \text{ A.}$$



Отже, амплітудне значення струму через транзистори у відкритому стані буде також дорівнювати 7.27А.

Середнє значення струмів зворотних діодів інвертора може бути прийнято близько 60% від величини відповідних керованих вентилів інвертора, тобто  $I_{VD} = 0.6 \cdot 7.27 = 4.362\text{A}$ .

Максимальна зворотна напруга транзисторів буде дорівнювати напрузі джерела живлення:  $U_{зв} = 400\text{В}$ .

Величину вихідної індуктивності компенсатора знаходимо аналогічно до індуктивності основного компенсатора.

Струм додаткового компенсатора і значення його похідної наводяться на рис.2.12.

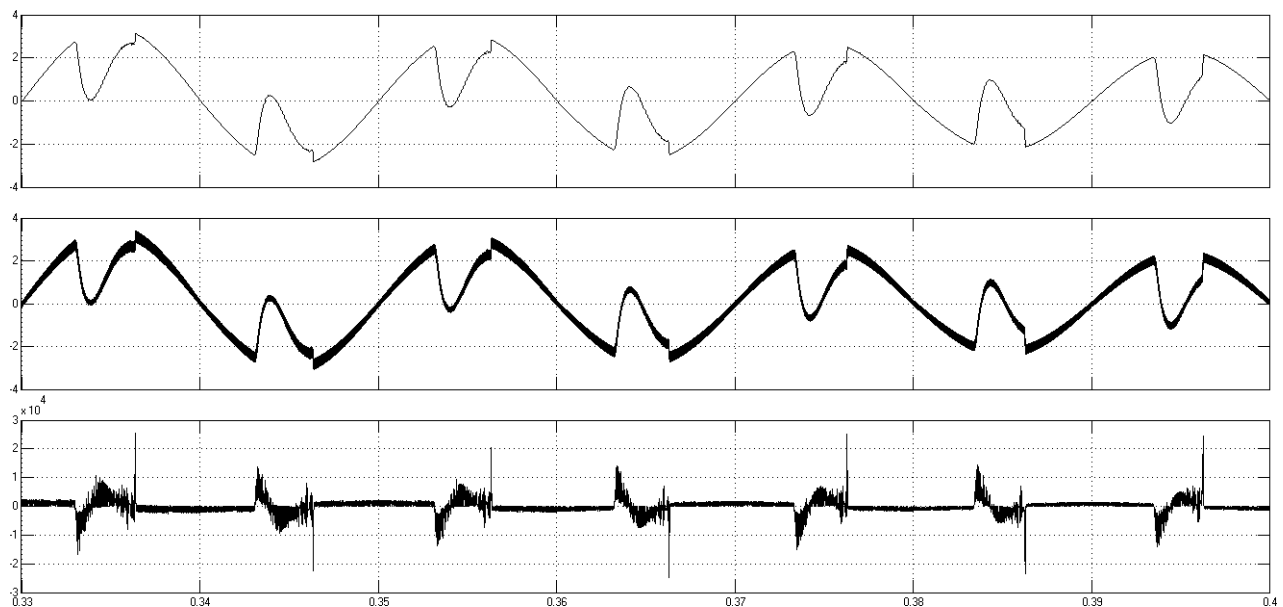


Рисунок 2.12 – Осцилограми струму додаткового компенсатора: (1) еталонне значення струму, (2) отримане значення струму, (3) похідна струму компенсатора.

Обираємо область, в якій значення похідної буде максимальним і визначаємо це значення (рис.2.13), де (1) еталонне значення струму, (2) отримане значення струму, (3) похідна струму компенсатора.

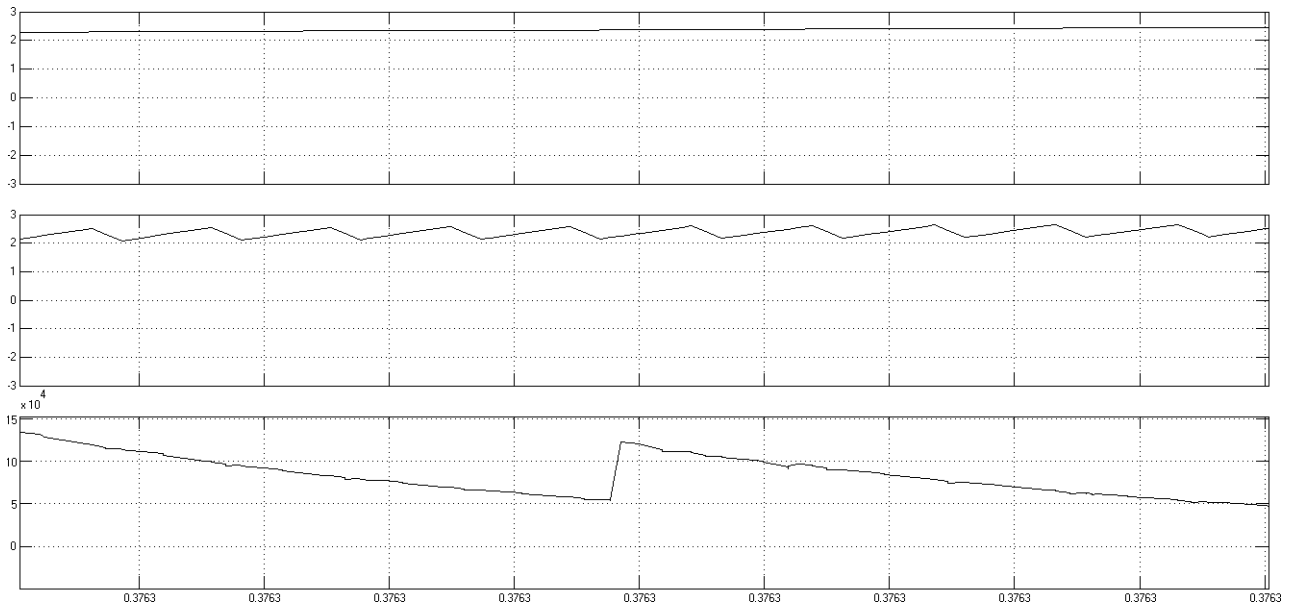


Рисунок 2.13 – Осцилограми струму додаткового компенсатора для окремої ділянки форми струму:

З рис.2.13 видно, що значення похідної можна прийняти рівним  $\frac{di}{dt}=12 \cdot 10^4$  в момент часу  $t=0.3763$ с. Саме в цей момент часу визначаємо  $dt$  величину напруги мережі (рис.2.14).

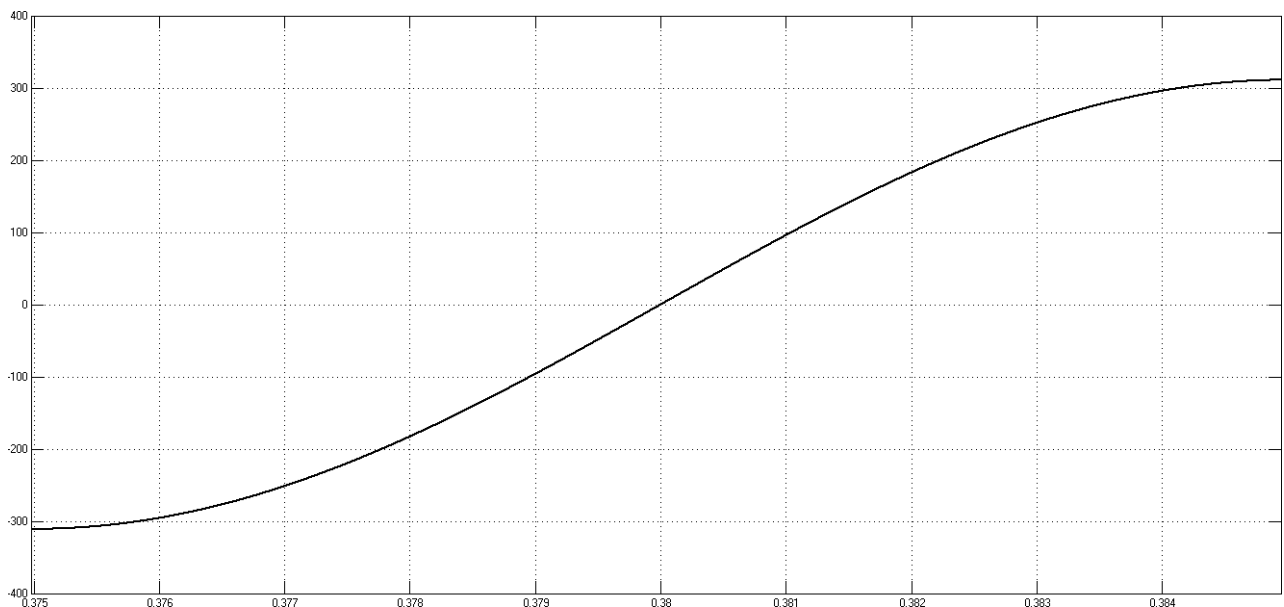


Рисунок 2.14 – Осцилограма напруги мережі

Значення напруги мережі в момент часу  $t=0.3763$ с дорівнює  $U_M=290$ В.

Підставляємо отримані значення в формулу (2.3) і знаходимо необхідну величину індуктивності:

$$L = \Delta U \cdot \frac{di}{dt} = \frac{400 - 290}{12 \cdot 10^4} = 0.84 \text{ мГн}$$

Отже, таким чином для забезпечення плавної зміни струму компенсатора необхідно використовувати індуктивність величиною  $L = 0.84 \text{ мГн}$ .

Процес дослідження додаткового компенсатора можна розділити на два етапи:

- 1) без урахування пульсації струму навантаження;
- 2) з урахуванням пульсації струму навантаження.

Провівши дослідження аналогічні до тих, що були описані в пункті 2.1 можна зробити наступні висновки. За умови використання такого принципу роботи додаткового компенсатора, форма струму мережі покращиться, що показано на рис. 2.15, у порівнянні зі струмом, зображеним на рис. 2.7.

Як видно з рис.2.15 і рис.2.16 струм мережі має значно менші високочастотні спотворення, однак містить низькочастотну модуляцію, яка спричинена формою споживаного струму, що зображений на рис. 2.3. додаткового компенсатора для а) ємнісного, б) індуктивного, в) індуктивно-ємнісного навантаження

Оскільки форма струму мережі покращилась, то і коефіцієнт потужності також збільшився. В табл. 2.2 наведено коефіцієнти потужності та його максимальне досяжне значення для різних пульсацій і типів навантаження.

Таблиця 2.2 – Коефіцієнти потужності

$i_{min}, A$	$i_{max}, A$	X					
		C		L		LC	
		макс.	комп.	макс.	комп.	макс.	комп.
1	1	1.0	0.9946	1.0	0.9880	1.0	0.9944
1	2	0.9977	0.9928	0.9827	0.9758	0.9831	0.9797
1	3	0.9903	0.9859	0.9622	0.9576	0.9633	0.9604
1	4	0.9765	0.9689	0.9470	0.9343	0.9483	0.9457
1	5	0.9649	0.9553	0.9357	0.9328	0.9374	0.9339
1	6	0.9326	0.9210	0.9272	0.9248	0.9292	0.9253

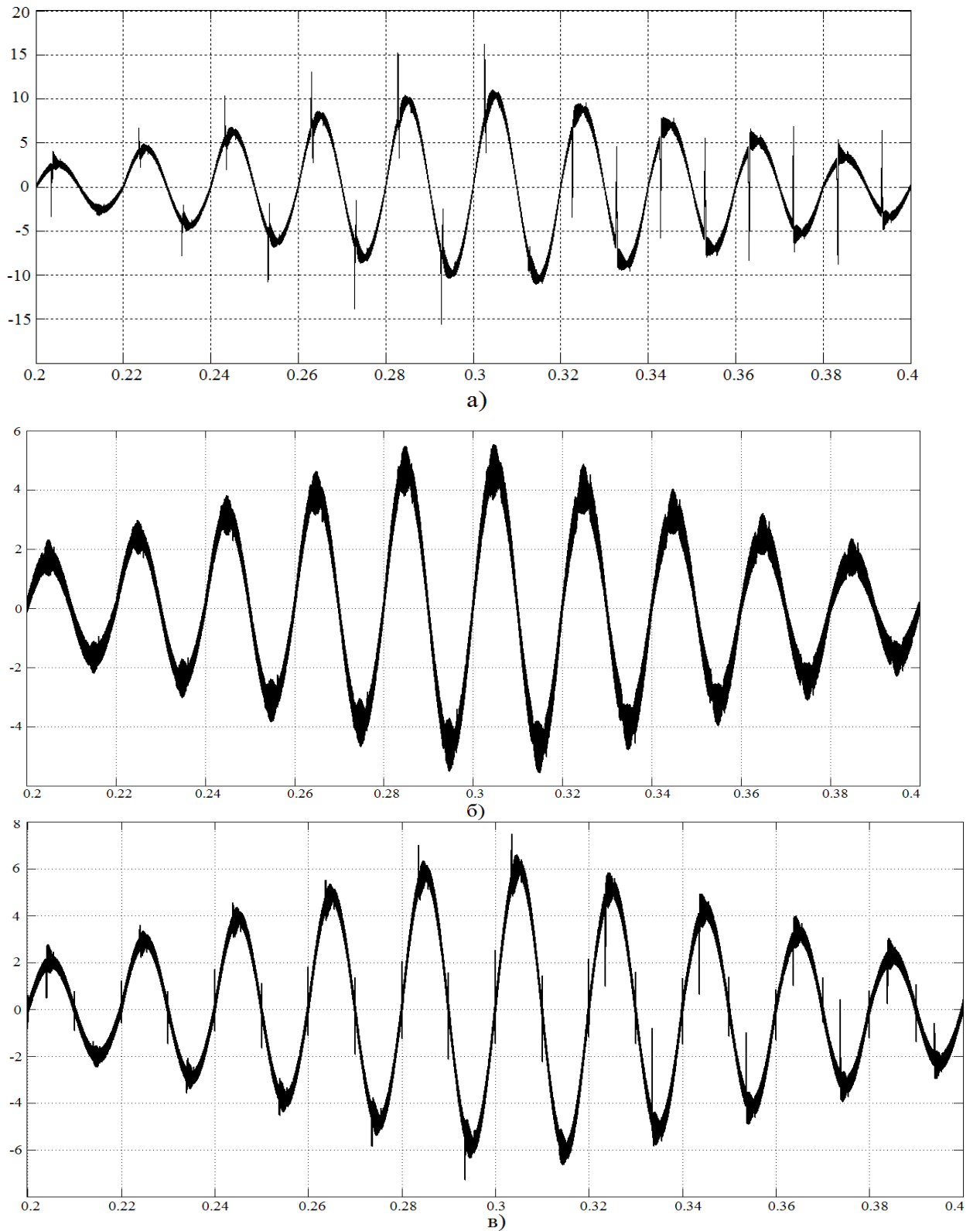


Рисунок 2.15 – Часові діаграми струму мережі під час перехідного процесу після додаткового компенсатора для а) ємнісного, б) індуктивного, в) індуктивно-ємнісного навантаження

На рис.2.16 показано спектр струму мережі під час перехідного процесу. Для наочності було показано спектр в нормальному (рис.2.16, а) і збільшеному (рис.2.16, б) масштабі.

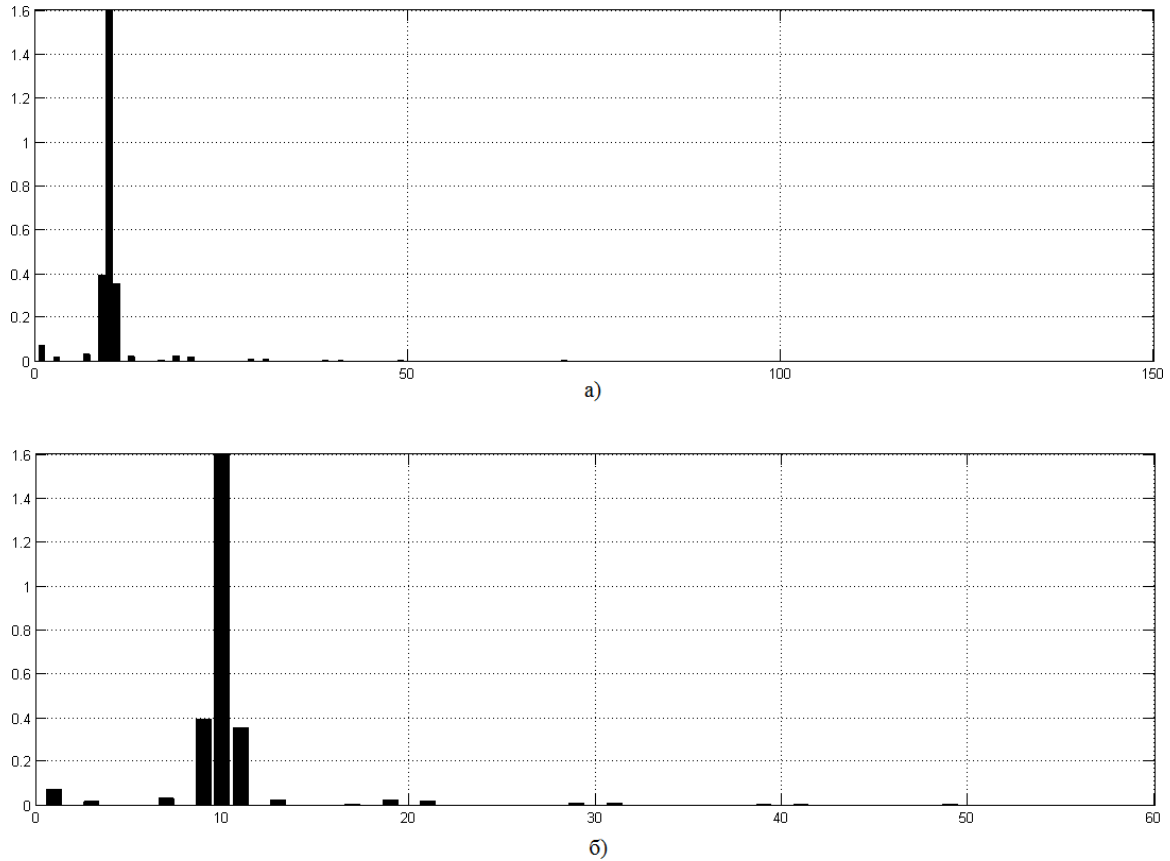


Рисунок 2.16 – Спектр струму мережі під час перехідного процесу для додаткового компенсатора в нормальному а) і збільшеному б) масштабі

Як видно з цих даних, отримані значення коефіцієнту потужності менші від максимально можливих не більше ніж на 0.5 %, що пояснюється наявністю високочастотної пульсації, створюваної компенсатором [28].

Під час моделювання також була досліджена потужність основного і додаткового компенсаторів при різних типах навантаження. Отримані дані наводяться в табл. 2.3.

Отримані значення потужності основного і додаткового компенсатора підтверджують те, що додатковий компенсатор має меншу потужність, ніж основний.

Таблиця 2.3 – Значення потужності основного і додаткового компенсатора

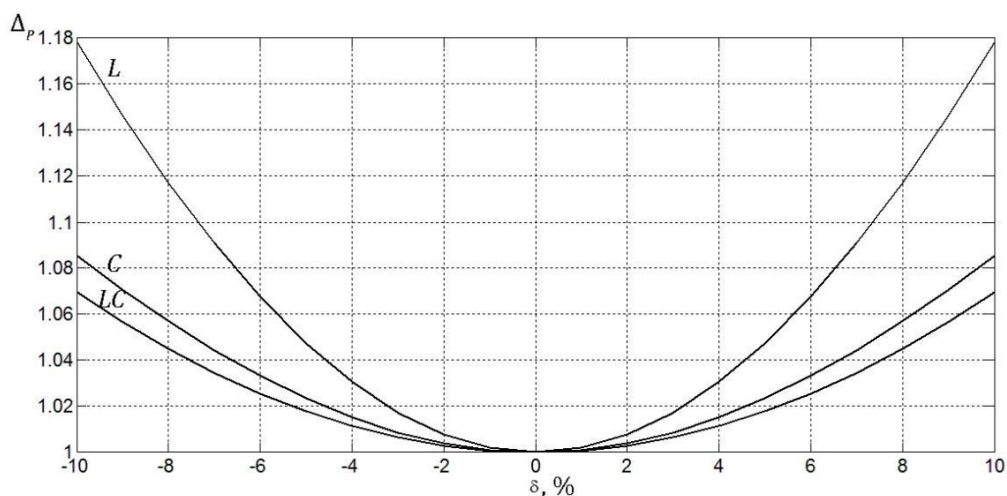
Компенсатор	Потужність, кВт	
	Основний	Додатковий
Навантаження		
Ємнісне	6,281	3,974
Індуктивне	3,702	1,627
Індуктивно-ємнісне	3,697	2,628

При проектуванні додаткового компенсатора також слід враховувати точність прогнозування амплітуди першої гармоніки, оскільки похибка прогнозування  $\delta$  збільшує значення встановленої потужності компенсатора. На рис. 2.11 показана відносна потужність компенсатора  $\Delta_P$ , відносно мінімальної  $P_{min}$ , яка досягається при точному прогнозі

$$\Delta_P = \frac{P_\delta}{P_{min}}, \quad (2.3)$$

де  $P_\delta$  – поточна потужність компенсатора при заданій похибці прогнозування  $\delta$ .

Як видно з рис.2.17 встановлена потужність перетворювача зростає приблизно по квадратичній залежності відносно похибки  $\delta$ . При цьому найбільша чутливість до похибки спостерігається при індуктивному навантаженні [29].

Рисунок 2.17 – Відносна потужність компенсатора  $\Delta_P$ , відносно мінімальної  $P_{min}$

Отже, для зменшення встановленої потужності додаткового компенсатора необхідно забезпечити ефективні алгоритми прогнозу струму мережі.

Аналіз отриманих результатів підтверджує доцільність використання додаткового компенсатора в перехідних режимах. Також варто зазначити, що габарити компенсатора визначаються не тільки струмом компенсатора, а і потужністю, що розсіюється на елементах. Так як додатковий компенсатор має меншу потужність і працює не весь час, тільки під час перехідних процесів, то потужність, що розсіюється буде меншою і, отже, його габарити будуть меншими.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ

#### 3.1 Розробка та обґрунтування структурної схеми перетворювальної системи

Компенсатор для динамічних режимів повинен ефективно працювати при неперіодичному струмі навантаження, де компенсатори з класичним алгоритмом керування є неефективними. Для цього в системі керування компенсатора передбачено прогнозування значень вільної складової струму та формування відповідного струму компенсації. Цей компенсатор є додатковим і встановлюється паралельно до основного, як показано на рис. 3.1.

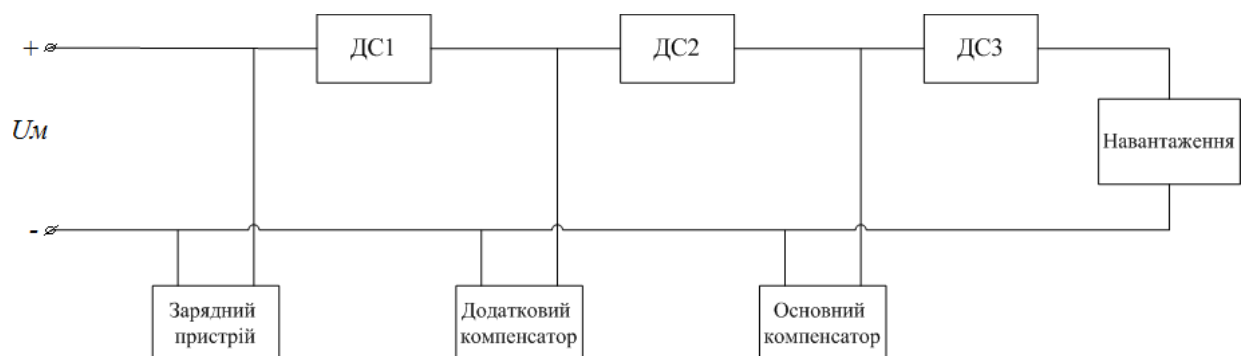


Рисунок 3.1 – Схема під'єднання компенсаторів до мережі

Хоча всі пристрої з'єднані паралельно, просторово найближче до точки входу має бути додатковий компенсатор, а вже далі йти основний компенсатор і навантаження. Також схема передбачає наявність здавачів струму, що стоять на



вході системи (ДС1), після додаткового компенсатора і перед основним (ДС2), а також безпосередньо на навантаженні (ДС3). З точки зору теорії електричних кіл нічого не зміниться якщо ввімкнути пристрої в іншій послідовності але ті струми, що фіксуються здавачами, дуже важливі для компенсації реактивної потужності. Також на вході паралельно підключається зарядний пристрій для інверторів компенсаторів, оскільки вхідний струм внаслідок компенсації має майже синусоїдальну форму.

Для повної компенсації реактивної потужності необхідно компенсувати вільну складову перехідного процесу і реактивну потужність. Оскільки в мережі можуть виникати короточасні перехідні процеси з великою миттєвою потужністю у порівнянні з усталеним режимом, розраховувати потужність додаткового компенсатора для їх компенсації недоцільно, оскільки вона буде використовуватись неефективно. Для цих випадків доцільно розробити алгоритм часткової компенсації реактивної потужності. Оскільки негативний вплив на мережу здійснюється вищими гармоніками струму, їх потрібно усунути в першу чергу [31].

Структурна схема дослідження процесів в компенсаторах наведена на рис.3.2.

Структурна схема пристрою складається з зарядного пристрою для накопичувачів енергії, в якості яких будуть використовуватись суперконденсатори. Накопичувач енергії є живленням для інверторів, на базі яких і побудовані основний і додатковий компенсатори. Струми мережі, після додаткового компенсатора і на навантаженні знімаються з давачів струму ДС1, ДС2 і ДС3 відповідно та потрапляють на мікроконтролер, який являє собою систему керування інверторами компенсаторів. Значення струму з давачів надходить до системи керування інвертором і в блоці опорного струму формується еталонна форма струму. Подальші блоки реалізують принцип релейного керування, тобто в блоці задавача порогового сигналу формуються верхній і нижній рівень похибки формування імпульсу, який далі надходить на перший вхід компаратора. На другий вхід компаратора надходить значення

струму навантаження. Після порівняння значень струмів на виході блоку формування імпульсів струму виникає рівень логічної одиниці або логічного нуля, який передається на вхід RS-тригера, що власне і визначає перемикання стійок транзисторів.

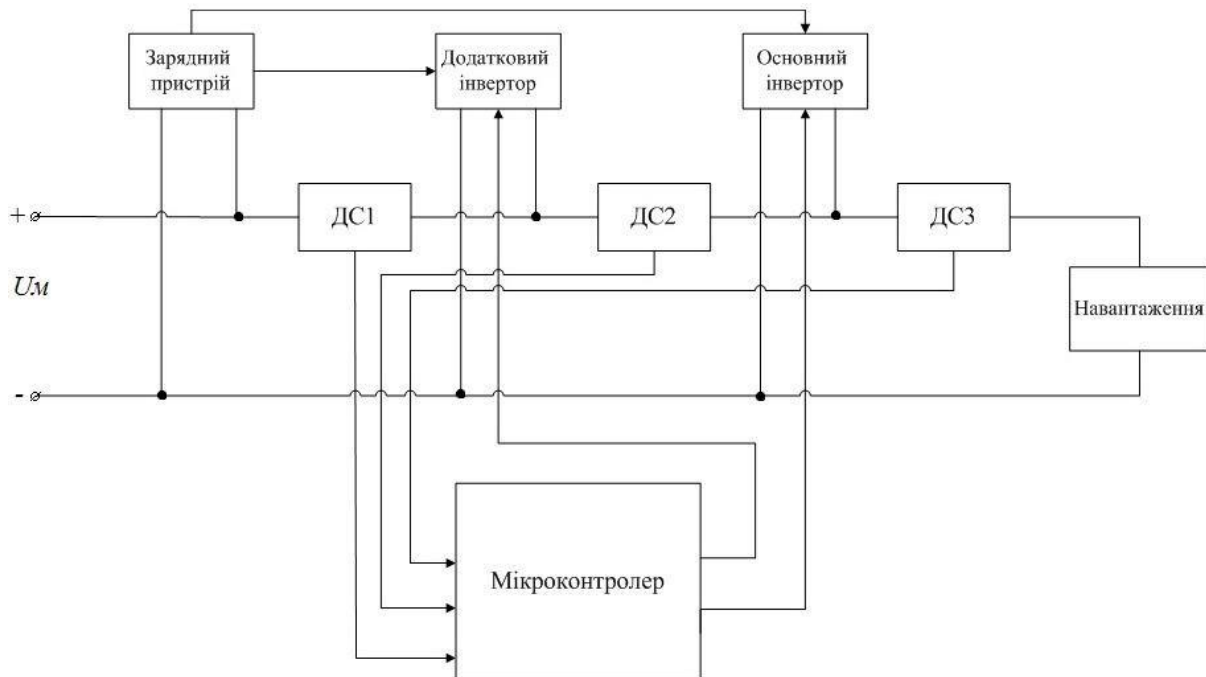


Рисунок 3.2 – Структурна схема перетворювача енергії

### 3.2 Розробка та обґрунтування принципової схеми перетворювальної системи

По описаній вище структурній схемі, складемо принципову схему дослідження процесів в компенсаторі (рис.3.3). Розробка зарядного пристрою суперкондесатора виходить за рамки даної роботи, тому в якості живлення інвертора для спрощення будемо використовувати джерело постійної напруги 400В.

Система керування силовою частиною складається з мікроконтролера PIC18F2420; восьми драйверів керування IGBT транзисторами IR2117; трьох датчиків Холла, які виконані на мікросхемі ACS712; імпульсного перетворювача

енергії з 400В на 12В, який виконаний на мікросхемі TOP221; стабілізатора напруги LM7805.

На входи АЦП мікроконтролера PIC18F2420 з виходу датчика Холла подаються значення вхідного струму і струмів після основного і додаткового компенсаторів. На виході мікроконтролера формується напруга величиною 5В. Для повноцінного відкриття транзистора напругу потрібно підвищити до 12В, що і реалізовується з допомогою драйвера IR2117.

Необхідно також зазначити, що для транзисторів VT1, VT3, VT5, VT7 використовується виконання драйвера верхнього плеча, а для VT2, VT4, VT6, VT8 – драйвера нижнього плеча. Живлення для мікроконтролера, датчиків Холла (всі +5В) і драйверів (+12В) забезпечують перетворювачі енергії. Для живлення імпульсного перетворювача енергії доцільно використовувати постійну напругу 400В, що надходить з роз'єму X2, а не напругу мережі. Це пояснюється тим, що форма струму мережі може мати не симетричний характер і таким чином не підходить для живлення перетворювача [30].

Імпульсний перетворювач на мікросхемі TOP221 забезпечує постійну вихідну напругу величиною 12В. На принциповій схемі перетворювач представлений зі стандартною обв'язкою, що зазначена в документації. Це готове рішення взяте з метою зменшення об'ємів розрахунків перетворювальної системи і економії часу. Для забезпечення живлення мікроконтролера і датчиків Холла, використовується стабілізатора напруги LM7805, що на принциповій схемі також представлений зі стандартною обв'язкою, яка наводиться в прикладах включення мікросхеми в технічній документації.

Датчик Холла розрахований на струм 30А і має два інтерфейси:

- 3-контактний штировий інтерфейс для підключення до мікроконтролера. Контакти OUT (вихідний сигнал) – контакт для обміну даними між датчиком і мікроконтролером, VCC – напруга живлення, GND – загальний контакт.
- для підключення вхідного струму на платі присутні 2 контакти - зажими.

Так як компенсатор реактивної потужності буде вмикатися безпосередньо в мережу, його навантаження на принциповій схемі замінене роз'ємом X3.

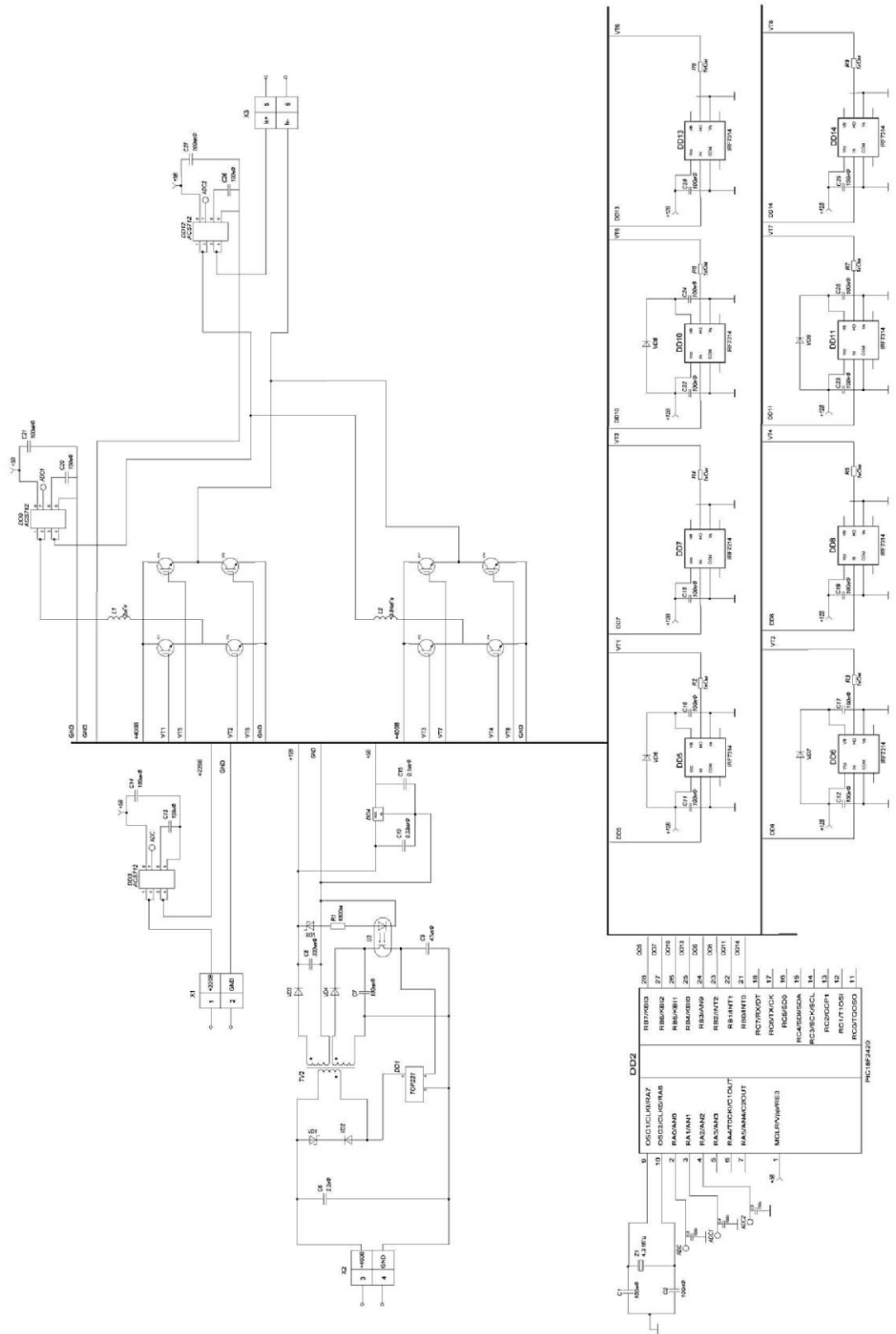


Рисунок 3.3 – Схема електрична принципова компенсатора реактивної потужності

### 3.3 Розрахунок елементів перетворювальної системи

Параметри елементів компенсатора визначаються струмом і напругою через них. Оскільки струм компенсатора має великий вміст вищих гармонік і залежить від опору навантаження, тому доречно обрати певний тип навантаження і визначити форму струму навантаження на основі моделювального експерименту. В якості навантаження обрано мостовий випрямляч з RC-фільтром. При цьому вихідна потужність повинна дорівнювати 5кВт.

Модель віртуальної установки, що зібрана в середовищі Simulink Matlab 2014а показана на рис. 3.4.

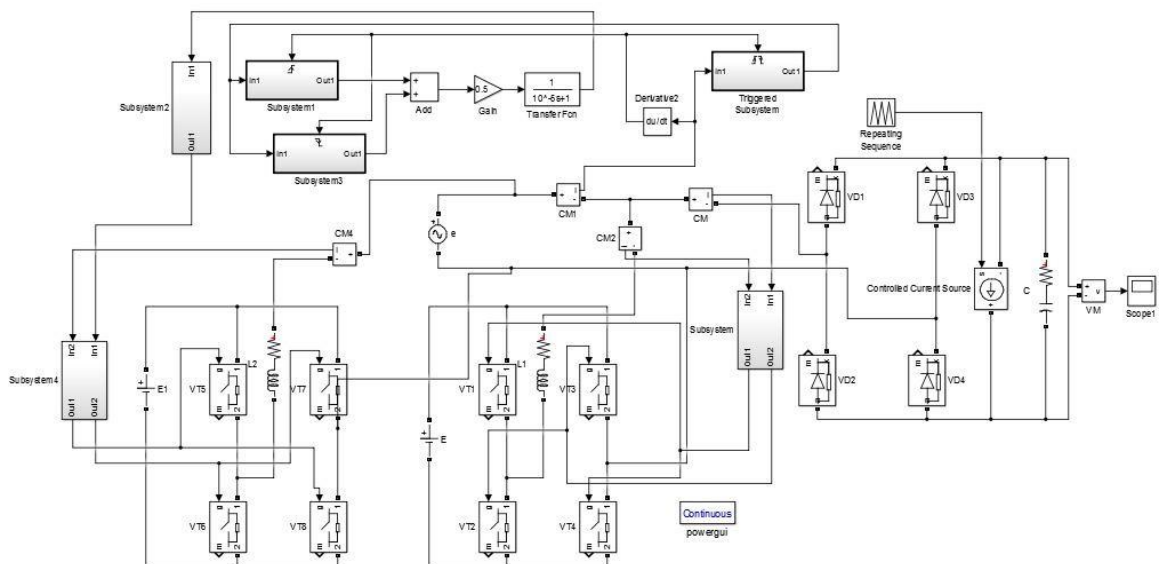


Рисунок 3.4 – Модель віртуальної установки компенсатора реактивної потужності

В розділі 2 було розраховано величину прямого струму і зворотної напруги транзисторів як для основного так і для додаткового компенсаторів. Таким чином для основного компенсатора амплітудне значення струму через транзистори у відкритому стані буде дорівнювати 22.7А, а максимальна зворотна напруга транзисторів буде дорівнювати напрузі джерела живлення:  $U_{36}=400В$ .

Виходячи з цих даних, в якості ключів мостового інвертора обираємо IGBT транзистор типу IRG7SC12FPBF з наступними основними параметрами:

1. Напруга колектор-емітер – 600В.
2. Струм колектора – 24А.
3. Потужність – 69 Вт.
4. Зворотній струм діода – 13А.

Для додаткового компенсатора амплітудне значення струму через транзистори у відкритому стані буде дорівнювати 7.27А. Максимальна зворотна напруга транзисторів буде дорівнювати напрузі джерела живлення:

$$U_{зв} = 400В.$$

Виходячи з цих даних, в якості ключів мостового інвертора обираємо IGBT транзистор типу AUIRGR4045D з наступними основними параметрами:

1. Напруга колектор-емітер – 600В.
2. Струм колектора – 6А.
3. Потужність – 39 Вт.
4. Зворотній струм діода – 10А.

Зазвичай конденсатор в двопівперіодних перетворювачах вибирають таким, щоб пульсації випрямленої напруги не перевищували 5 ... 10 %. Слід також враховувати, що на конденсаторі напруга буде більше в 1,41 рази, ніж на виході діодного моста. Таким чином, якщо після діодного моста ми отримаємо 220 В пульсуючої напруги, то на конденсаторі буде вже 310 В постійної напруги. Зазвичай же робоча напруга в мережі обмежується відміткою в 250 В, отже, на виході конденсатора напруга буде 350 В. В окремих випадках мережеве напруга може підніматися ще вище, тому конденсатори слід вибирати на робочу напругу не менше 400 В. Для забезпечення надійної роботи необхідно ще вибирати конденсатор з деяким запасом напруги, таким чином в нашому випадку необхідно обирати конденсатор розрахований на напругу 500В. Конденсатори можуть мати додатковий нагрів завдяки великим робочим

струмам. Рекомендований верхній діапазон температур - не менше 85...105°C. Вхідний конденсатор вибирають ємністю 470...6000 мкФ в залежності від потужності апарату [32].

Напруга на конденсаторі залежить від струму через нього наступним співвідношенням:

$$U_c = \frac{1}{C} \int i(t) dt.$$

Для визначення інтегралу по струму, так як математично складно описати форму струму, скористаємось блоком Integrator Simulink Matlab.

З його допомогою визначаємо, що інтеграл по струму буде дорівнювати 0,08. Таким чином ємність конденсатора буде визначатися наступним чином:

$$C = \frac{0.08}{400} = 2 \text{ мФ}.$$

Таким чином необхідно обрати конденсатор з ємністю 2мФ, який розрахований на напругу 500В і струм 22.7А, цим вимогам відповідає конденсатор Asco 500 В 2500 мкФ.

Індуктивність L необхідна для формування вихідного струму. В розділі №2 було визначено, що для основного компенсатора індуктивність має бути L = 2мГн. Обмотка дроселя має бути розрахована на максимальний струм I, що протікає через неї. В якості матеріалу сердечника, будемо використовувати ферит марки 200НМ1, для якого величина максимальної індукції

$B_m = 0,312 \text{ Тл}$ ; залишкова індукція  $B_r = 0,12 \text{ Тл}$ ; коефіцієнт заповнення сталлю  $K_c = 1$ ; коефіцієнт заповнення  $K_o = 0,3$ ; щільність струму в обмотці  $j = 1 \text{ Амм}^2$

Дросель мотаємо на ш-подібний сердечник [35].

Визначаємо необхідну величину добутку  $S_o S_c$  для сердечника дроселя:

$$S_c S_0 = \frac{100 \cdot L_1 \cdot I_{L1}^2}{B_m \cdot j \cdot K_c \cdot K_0} = \frac{100 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 22,7^2}{0,312 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,3} = 1101 \text{ см}^4.$$

За добутком  $S_0 S_c$  обираємо магнітопровід ШЛ 50x80 з параметрами: середня довжина магнітної силової лінії  $l_c = 34,2 \text{ см}$ ; активний переріз  $S_c K_c = 26,5 \text{ см}^2$ ; площа вікна  $S = 40 \text{ см}^2$ ; маса магнітопроводу  $G = 7430 \text{ г}$ .

Знаючи максимальний струм  $L_1$  та щільність струму  $j$ , а також площу вікна сердечника витків:  $S_0$  і коефіцієнт заповнення  $K_0$ , можемо визначити кількість витків:

$$W = \frac{100 \cdot S_0 \cdot K_0 \cdot j}{I_{L1}} = \frac{100 \cdot 40 \cdot 0,3 \cdot 1}{22,7} = 53 \text{ витка.}$$

Знаходимо необхідну площу перерізу обмотувального дроту:

$$S_{\text{др}} = \frac{I_{L1}}{j} = \frac{22,7}{1} = 22,7 \text{ мм}^2.$$

В якості обмотувального дроту будемо використовувати дріт марки ПСО-6 з площею перерізу дроту  $S = 28,3 \text{ мм}^2$ .

Для додаткового компенсатора вихідна індуктивність дорівнює  $L = 0,84 \text{ мГн}$ . Обмотка дроселя має бути розрахована на максимальний струм  $I$ , що протікає через неї. В якості матеріалу сердечника, будемо використовувати ферит марки 200НМ1, для якого величина максимальної індукції  $B_m = 0,312 \text{ Тл}$ ; залишкова індукція  $B_r = 0,12 \text{ Тл}$ ; коефіцієнт заповнення сталлю  $K_c = 1$ ; коефіцієнт заповнення  $K_0 = 0,3$ ; щільність струму в обмотці  $j = 1 \text{ А/мм}^2$ . Дросель мотаємо на ш-подібний сердечник. 4439.6436.

Визначаємо необхідну величину добутку  $S_0 S_c$  для сердечника дроселя:



$$S_c S_0 = \frac{100 \cdot L_2 \cdot I_{L2}^2}{B_m \cdot j \cdot K_c \cdot K_0} = \frac{100 \cdot 0,84 \cdot 10^{-3} \cdot 7,27^2}{0,312 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,3} = 47,43 \text{ см}^4.$$

За добутком  $S_0 S_c$  обираємо магнітопровід ШЛ 20x25 з параметрами:  
Середня довжина магнітної силової лінії  $l_c = 17,1 \text{ см}$ ; активний переріз  $S_c K_c = 4,1 \text{ см}^2$ ; площа вікна  $S = 10 \text{ см}^2$ ; маса магнітопроводу  $G = 575 \text{ г}$ .

Знаючи максимальний струм  $I_{L2}$  та щільність струму  $j$ , а також площу вікна сердечника  $S_0$  і коефіцієнт заповнення  $K_0$ , можемо визначити кількість витків:

$$W = \frac{100 \cdot S_0 \cdot K_0 \cdot j}{I_{L2}} = \frac{100 \cdot 10 \cdot 0,3 \cdot 1}{7,27} = 42 \text{ витка.}$$

Знаходимо необхідну площу перерізу обмотувального дроту:

$$S_{\text{др}} = \frac{I_{L2}}{j} = \frac{7,27}{1} = 7,27 \text{ мм}^2.$$

В якості обмотувального дроту будемо використовувати дріт марки ПСО-3 з площею перерізу дроту  $S_{\text{др}} = 12,4 \text{ мм}^2$ .

Однофазний мостовий випрямляч розраховується наступним чином. Амплітудне значення струму вентиля буде дорівнювати струму навантаження, тобто  $I_a = I_n = 22,7 \text{ А}$ . Таким чином середнє струму через діод буде дорівнювати:

$$I_{\text{ф}} = \frac{22,7}{2} = 11,35 \text{ А}$$

Амплітуда зворотної напруги на вентилях буде дорівнювати напрузі навантаження, тобто 311В. За отриманими значеннями обираємо діод типу

IDD15E60BUMA2 з величиною зворотної напруги 600В і прямого струму 15А.

Спроектована система має RC навантаження. Так як заздалегідь було відомо потужність компенсатора і напругу, за якими визначився струм, то стояло завдання шляхом дослідницьких експериментів визначити величину навантаження для забезпечення необхідного струму компенсатора. Моделювання показало, що струм компенсатора 22.7А забезпечується, коли ємність конденсатора дорівнює 500мкФ, а опір – 29Ом. Ці величини задовольняються для конденсатора типу VJ1206Y102KHETW1BC з робочою напругою 500В і ємністю 1нФ та резистора МЛТ-0,125 30Ом.

Оскільки для компенсаторів найчастіше використовують релейний принцип керування, який дозволяє мінімізувати їх інерційність, пульсація струму основного компенсатора має змінну частоту. Тому за умови використання фільтру низьких частот, частота його зрізу залежатиме від форми струму мережі і тому повинна розраховуватись для граничного випадку, що значно збільшує інерційність контуру керування. Зважаючи на це, доцільно використовувати програмно-апаратну реалізацію вузла придушення пульсації струму основного компенсатора на вході контуру керування додаткового.

На основі структурної схеми перетворювальної системи було розроблене принципова схема перетворювача. В якості основного і додаткового компенсаторів були взяті два мостових інвертори напруги, що живляться від суперконденсаторів. Запропоноване розміщення компенсаторів дозволяє приєднувати додатковий компенсатор до вже працюючого основного, без заміни його на новий.

Розраховані значення елементів перетворювальної системи ще раз підтверджують економічну вигідність використання додаткового компенсатора і його невеликі розміри порівняно з основним.

Запропоноване розміщення модулів компенсатора реактивної потужності пояснюється важливістю фіксації струмів сам в тих місцях, які показані на структурній схемі задля забезпечення кращої і більш точної роботи компенсатора.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ

#### 4.1 Розробка алгоритму компенсації для короткочасних перехідних процесів

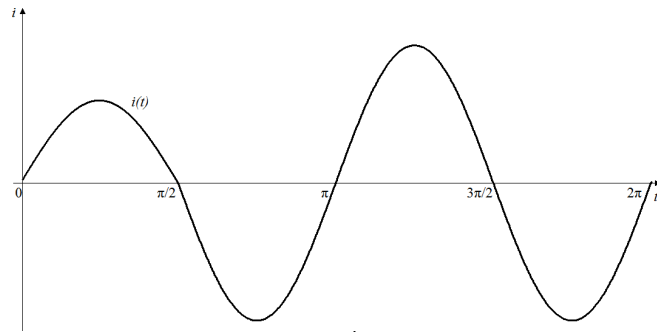
Як було описано вище, за тривалістю перехідні процеси поділяють на короткотривалі і довготривалі. Відповідно для кожного з типів перехідного процесу потрібно розробити свій алгоритм компенсації.

Діаграма компенсації короткотривалого перехідного процесу зображена на рис. 4.1.

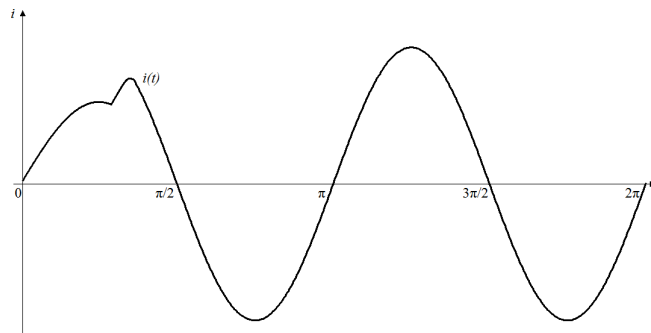
Як видно з рис.4.1 на інтервалі  $0 - \pi/2$  струм мережі стрибкоподібно змінився. З точки зору покращення параметрів якості електричної енергії доцільно продовжити струм, що був на початку періоду так, ніби цього збурення і не було, щоб форма струму залишалася синусоїдальною. Для того, щоб спростити задачу, будемо розглядати випадок, коли форму струму потрібно зберегти до кінця періоду. На наступному періоді потрібно по амплітуді збурення розрахувати наскільки змінився струм і формувати його вже по розрахованому значенню[29].

Інформація про форму струму в навантаженні знімається з двох датчиків струму, що стоять безпосередньо на навантаженні і після основного

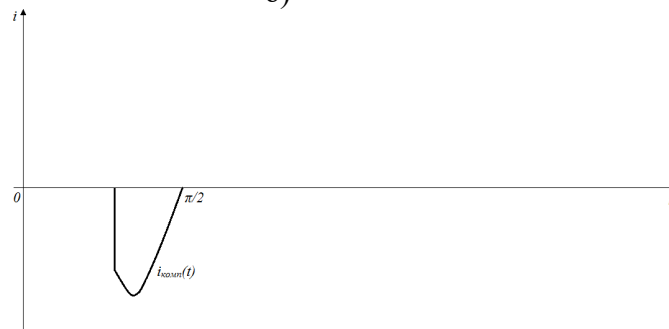
компенсатора. Після того як відбулося збурення, давач струму фіксує зміну амплітуди струму і передає цю інформацію в систему керування, яка і формує струм, що буде протилежним за знаком, до струму збурення. В результаті накладання струму компенсатора і струму збурення в навантаженні буде формуватися синусоїдальна форма струму.



а)



б)



в)

Рисунок 4.1 – Діаграма компенсації короткотривалого перехідного процесу:  
 а) – без додаткового компенсатора, б) – з додатковим компенсатором, в) струм компенсатора

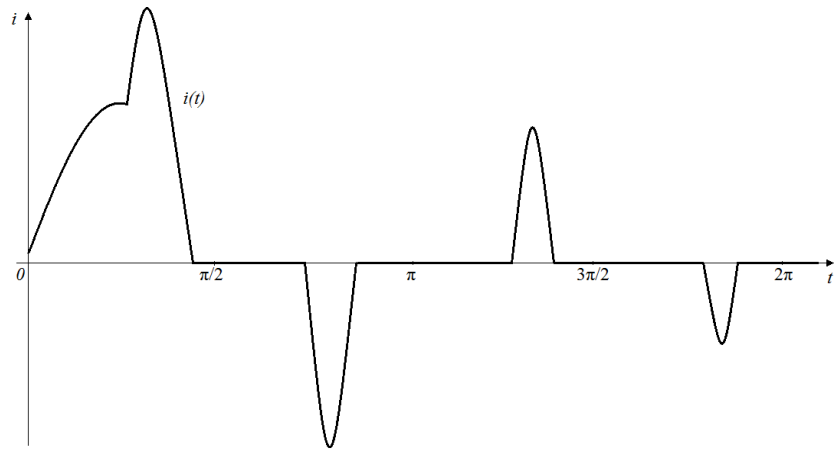
## 4.2 Розробка алгоритму компенсації для тривалих перехідних процесів

Для перехідного процесу зі сталою часу, більшою за період напруги мережі суть алгоритму компенсації полягає в визначенні сталої часу експоненти, по якій змінюється перехідний процес і вже відштовхуючись від цього значення прогнозувати значення струму і наперед визначати його. Розглянемо діаграму довготривалого перехідного процесу, що зображена на рис.4.2.

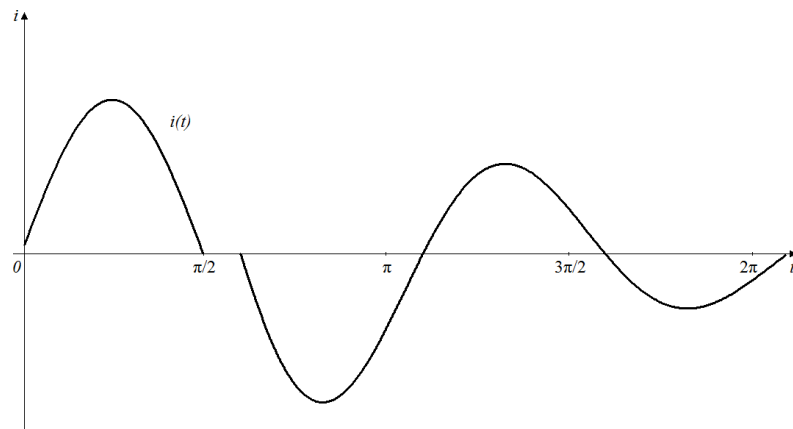
Як видно з рис.4.2(б) на інтервалі  $0 - \pi/2$  з'явилось збурення, яке з часом затухало по експоненті таким чином, що час перехідного процесу виявився більшим періоду напруги мережі. Щоб компенсувати перехідний процес аналогічно до попереднього випадку, потрібно щоб була стаціонарність в зміні струму, тобто щоб струм змінювався по синусоїді але струм змінюється по експоненті, тому потрібно вдосконалити попередній алгоритм компенсації.

Компенсацію такого типу перехідного процесу можна розділити на два етапи. По-перше, необхідно з отриманої форми струму зробити синусоїдальну, тобто без компенсації реактивної потужності просто покращити форму, зробити на кожному з півперіодів синус. По-друге, коли вдалося покращити форму струму, намагатися зменшити зсув фаз  $\varphi$ . Для цього потрібно зсувати форму струму, щоб різниця між струмом і напругою була якомога меншою[29].

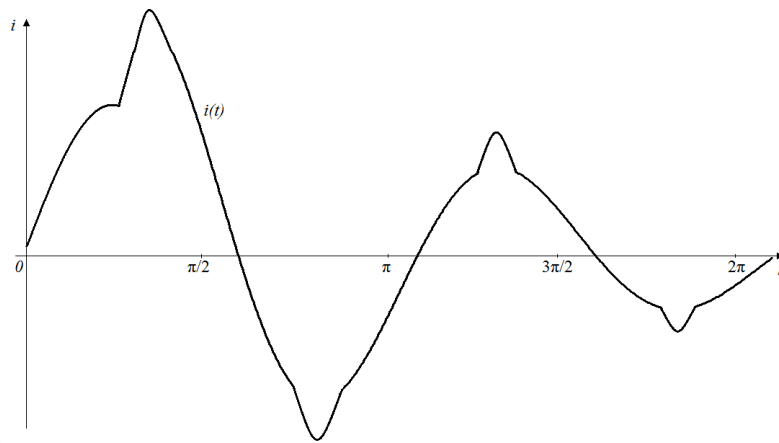
Для початку потрібно з'ясувати чи дійсно форма віддаляється від синусоїдальної, тобто ідентифікувати момент початку перехідного процесу. За допомогою давачів струму і мікроконтролера порівнюється поточне значення струму з тим, що було на попередньому періоді, якщо це значення відрізняється від еталонного, то починається процес прогнозування форми струму.



а)



б)



в)

Рисунок 4.2 – Діаграма компенсації довготривалого перехідного процесу: а) – без компенсаторів б) – без додаткового компенсатора, в) – з додатковим компенсатором

В момент, коли почався перехідний процес, компенсатор повинен одночасно забезпечити до кінця півперіоду форму струму таку, що була раніше і зафіксувати форму і значення перехідного процесу. На основі отриманих даних і буде полягати процес прогнозування форми і вже відповідно прогнозу потрібно робити корекцію струму до прогнозованої форми, а також зменшувати кут зсуву фаз  $\varphi$ , якщо на це вистачає струму компенсатора.

Струм компенсатора є різницею між струмом перехідного процесу і амплітудою синусоїди, що потрібно отримати і визначається з наступного виразу:

$$\int (I(t) - A_m \sin(\omega t + \varphi))^2 dt, \quad (4.1)$$

де  $I(t)$  – струм перехідного процесу,  $A_m$  – амплітуда необхідної синусоїди,  $\varphi$  – кут між струмом і напругою.

Алгоритм компенсації наведено на рис. 4.3. Для отримання форми струму максимально схожої до синусоїди, необхідно щоб ця різниця була мінімальною.

Саме з цих міркування і потрібно підбирати значення амплітуди синусоїди  $A_m$ . Якщо отриманий струм компенсатора більший за максимально можливий струм компенсатора, то отримати необхідну форму струму неможливо і потрібно максимально наблизити цю форму до синусоїдальної. Навпаки, якщо струм компенсатора менший за максимально можливий, то це означає, що є запас по потужності і це дозволяє компенсувати зсув фаз. Тобто тепер потрібно в формулі (4.1) намагатися одночасно мінімізувати і амплітуду синусоїди  $A_m$  і зсув фаз  $\varphi$ . Таким чином зменшуючи кут між напругою і струмом, можна компенсувати реактивну потужність.

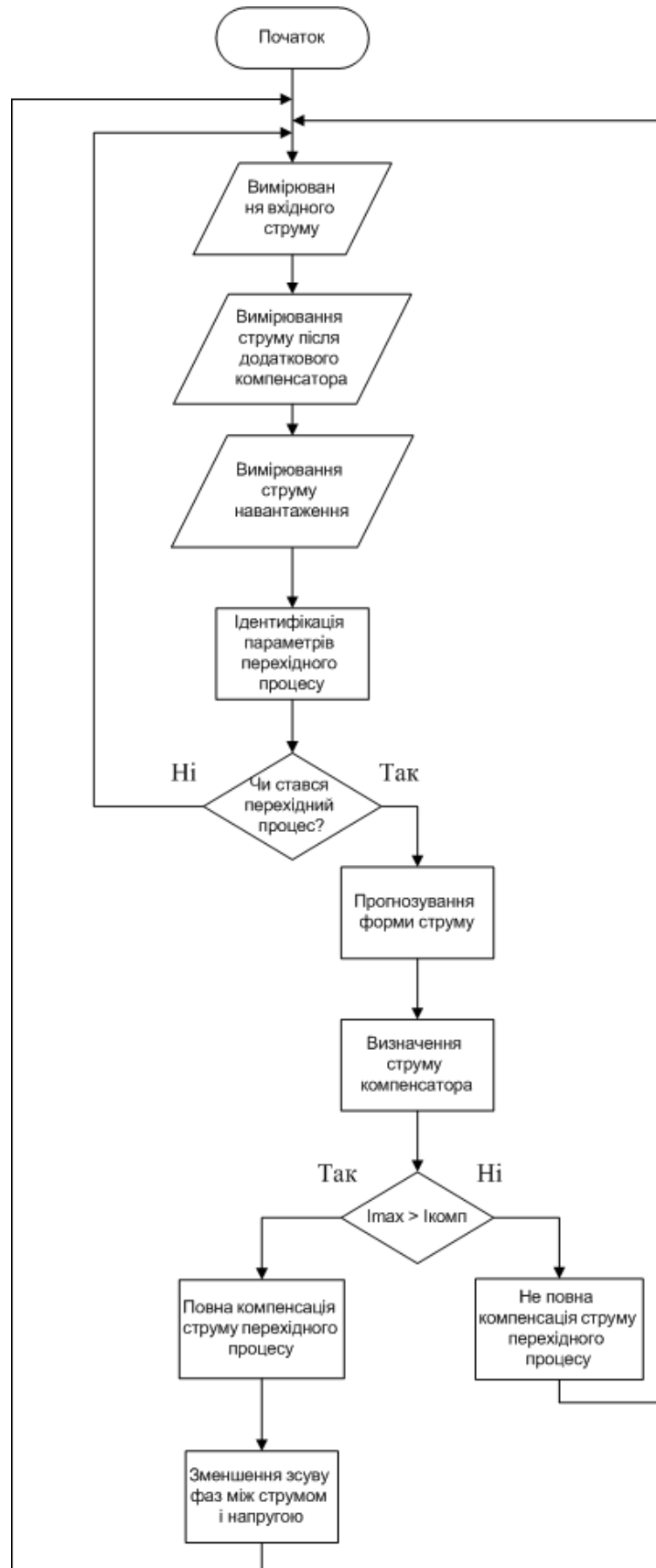


Рисунок 4.3 – Алгоритм компенсації довгого перехідного процесу



Запропоновані алгоритми компенсації дозволяють наблизити форму струму під час перехідних процесів майже до синусоїдальної. У випадку, коли необхідний струм компенсатора менший за максимально можливий струм компенсатора, можливо також компенсувати кут зсуву фаз між струмом і напругою. Таким чином, використовуючи даний алгоритм, можна не тільки покращити форму струму мережі, а й компенсувати реактивну потужність, завдяки зменшенню кута  $\varphi$ .

## ВИСНОВКИ

Проведено огляд і порівняння основних методів компенсації реактивної потужності. Досліджено основні форми перехідних процесів. На основі аналізу й систематизації даних доведено, що більшість компенсаторів реактивної потужності не спроможні повністю компенсувати струм в перехідних режимах, що робить задачу компенсації актуальною і насьогоднішній день. Для зменшення потужності компенсатора потрібно проаналізувати можливі форми перехідного процесу та визначити критерії ефективного використання потужності компенсатора.

Також було виведено типові графіки перехідних процесів для нульового, першого і другого порядків. Проведенні дослідження можуть знадобитися в подальшому аналізі перехідних процесів і вдосконаленні використання потужності компенсатора реактивної потужності.

Доведено доцільність використання додаткового компенсатора, який буде працювати в парі з основним і компенсувати струм під час перехідних процесів. Наведена схема підключення компенсаторів дозволяє вмикати додатковий компенсатор без заміни основного, що дозволить економити кошти на оновленні обладнання. Розраховані значення елементів перетворювальної системи ще раз підтверджують економічну вигідність використання додаткового компенсатора і його невеликі розміри порівняно з основним.

Запропоноване розміщення модулів компенсатора реактивної потужності пояснюється важливістю фіксації струмів сам в тих місцях, які показані на структурній схемі задля забезпечення кращої і більш точної роботи компенсатора.

Наведено структурну схему перетворювальної системи, на основі якої була зібрана принципова.

Запропонований новий алгоритм керування компенсатором реактивної потужності, що дозволяє одночасно покращити форму струму мережі і зменшити кут між струмом і напругою задля компенсації реактивної потужності в перехідних режимах. Запропоновані алгоритми компенсації дозволяють наблизити форму струму під час перехідних процесів майже до синусоїдальної. У випадку, коли необхідний струм компенсатора менший за максимально можливий струм компенсатора, можливо також компенсувати кут зсуву фаз між струмом і напругою. Таким чином, використовуючи даний алгоритм, можна не тільки покращити форму струму мережі, а й компенсувати реактивну потужність, завдяки зменшенню кута  $\varphi$ .

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Fryze S. Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current. *Przeglad Elektrotechniczny*, no. 7-8. pp. 193- 203, 1931.
2. Budeanu C. I. Reactive and fictitious powers, Publication No. 2 of the Rumanian National Inst. Bucuresti, 1927.
3. H. Akagi, "Modern Active Filters and Traditional Passive Filters," *Bulletin of the Polish Academy of Science, Technical Sciences*, no. 54, pp. 255–269, 2006.
4. J. H. Kim and S. K. Sul, "A carrier-based PWM method for three phase fourleg voltage source con-verters," *IEEE Transactions on Power Electronics* , vol. 19, no. 1, pp. 66–75, January 2004.
5. F. Z. Peng, G. Ott and D. Adams, "Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, no. 6, pp. 1174–1181, November 1998.
6. Перетворювачі частоти. Конспект лекції до самостійного вивчення теми з дисципліни «Промислова електроніка та перетворювальна техніка» для студентів всіх форм навчання базового напрямку 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» / Укл. А.А. Маліновський, В.Г. Федішин. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 22с.
7. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
8. Жежеленко І. В., Рабінович М. Л., Божко В. М. Якість електричної енергії на промислових підприємствах. – К.: Техніка, 1981. – 157 с.
9. Островерхов, В.І. Сенько, В.І. Чибеліс. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги. – Київ, 2020. – 242 с.

10. V. J. Romashko, I. V. Verbitsky and I. I. Kyrychik, «Analliz vtrat energii v sistemI vIdboru maksimalnoi potuzhnosti sonyachnoi batarei [Energy loses analyze in solar battery maximum power picking system],» *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 4, pp. 55-57, 2014.

11. N. A. Kostin and O. G. Sheykina, «Oznaka nayavnosti obminnoyi potuzhnosti v sylovyh electrychnyh tyagovyh lantsyugah systemy postiyynogo strumu [The signs of availability of exchange power in electric traction circuits of the direct current],» *Nauka i progress transportu. Vistnyk Dnipropetrovskogo natsionalnogo universytetu zaliznodorozhnogo transportu*, no. 42, pp. 98-101, 2012.

12. Bezhenar V. Multilevel inverter as var-compensator / V. Bezhenar, D. Mykolaets, V. Mykytyuk, T. Tereshchenko // *Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference, Kyiv, 2013, P. 370-372. doi: 10.1109/ELNANO.2013.6552076.*

13. Artemenko, M. Y. Combined control system with direct current formation for three-phase four-wire network shunt active power filter / Artemenko, M. Y., L.

M. Batrak, A. A. Taher // *IEEE 34th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2014. – doi: 10.1109/ELNANO.2014.6873442.*

14. Davari, P. A Multipulse Pattern Modulation Scheme for Harmonic Mitigation in Three-Phase Multimotor Drives / P. Davari, Y. Yang, F. Zare and F. Blaabjerg // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 174-185, March 2016. – doi: 10.1109/JESTPE.2015.2461018.

15. Watanabe, E. H. Instantaneous p-q power Theory for compensating nonsinusoidal systems / E. H. Watanabe, H. Akagi, M. Aredes // *In Nonsinusoidal Currents and Compensation. – 2008 – P. 1-10. – doi: 10.1109/ISNCC.2008.4627480*

16. Czarnecki, Leszek S. Instantaneous Reactive Power p-q Theory and Power Properties of Three-Phase Systems / Leszek S. Czarnecki // *IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – Vol. 21, № 1, P. 362-367. – doi: 10.1109/TPWRD.2005.852348.*

17. Zhuikov, V. Features of compensation of a reactive power at the transient

mode / V. Zhuikov, I. Verbytskyi, O. Bondarenko // Electric Power Networks (EPNet), 2016. P. 1-4. doi: 10.1109/EPNET.2016.7999362.

18. Zhuikov, V. Y. Особливості компенсації миттєвої реактивної потужності в лінійних ланцюгах у перехідному режимі при вмиканні навантаження / V. Y. Zhuikov, I. V. Verbytskyi, O. F. Bondarenko / Електроніка та зв'язок. – 2017. – № 22 (4). – С. 30-37. – doi: 10.20535/2312-1807.2017.22.4.105271.

19. Zhuikov, V. J. Reactive power compensation approach with dynamic mode of load current / V. J. Zhuikov, I. V. Verbytskyi, A. G. Kyselova // Технічна електродинаміка. – 2018. – № 4, С. 47-52. – doi: 10.15407/techned2018.04.047.

20. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко // М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.

21. Жежеленко, И. В. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко, В. В. Нестерович // М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.

22. Camacho, Eduardo F. Model Predictive control. / Eduardo F. Camacho, Carlos Bordons Alba // Elsevier. – 2013. – 405 p.

23. Maciejowski, Jan Marian. Predictive control: with constraints / Jan Marian Maciejowski // Pearson Education. – 2002. - 331 p.

24. Qin, S.Joe. A survey of industrial model predictive control technology / S.Joe Qin, Thomas A.Badgwell // Control Engineering Practice. – 2003. – Vol. 11, Iss. 7. - P. 733-764. – doi: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.

25. Keebler, Philip F. Meshing power quality and electromagnetic compatibility for tomorrow's smart grid / Philip F. Keebler // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2012. - Vol. 1, Iss. 2. – P. 100-103. – doi: 10.1109/MEMC.2012.6244982.

26. Dhia, Sonia Ben. Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits: Techniques for low emission and susceptibility / Sonia Ben Dhia, Mohamed Ramdani, Etienne Sicard // Springer Science & Business Media. - 2006. - 473 p.

27. Архелюк О. Д. Перетворювачі та пристрої вимірювальної техніки: метод. реком. до лабор. практикуму. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2021.

– 37 с.

28. Прибудько Р.М., Ходаков К.А. Компенсатор реактивної потужності, Київ: XI міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2018», збірник статей, 2018.

29. Вербицький, Є. В. Компенсатор реактивної потужності у перехідних режимах / Є. В. Вербицький, Р. М. Прибудько, Д. О. Зінченко, М. О. Мацюк // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018.

30. Лавріненко Ю. М. та інші. Електропривод: [Підручник] – Київ: вид. Ліра-К, 2009. – 504с.

31. Wong, S. W., Valcarengi, L., Yen, S. H., Campelo, D. R., Yamashita, S., Kazovsky, L. Sleep mode for energy saving PONs: Advantages and drawbacks. Globecom Workshops, 2009 IEEE. IEEE, 2009. p. 1-6. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2009.5360736.

32. Bezhenar, V., Mykolaets, D., Mykytyuk, V., Tereshchenko, T. Multilevel inverter as var-compensator. Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference, Kyiv, 2013, Pp. 370-372. DOI: 10.1109/ELNANO.2013.6552076.

33. Аналіз та синтез систем передачі електричної енергії постійного струму [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Електричні системи і мережі» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.В. Кирик. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 59 с.

34. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П. Баланс энергий в электрических цепях. – Киев: Наук. думка, 1992. – 312 с.

35. Кучанський В.В. Заходи та технічні засоби підвищення ефективності режимів роботи магістральних електричних мереж : монографія / В. В. Кучанський, Д. О. Малахатка. — Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2021. — 120 с.