

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ Ю.С. ЯМНЕНКО
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності _____ 171 Електроніка
(код і назва)

спеціалізації _____ Електронні компоненти і системи

на тему: «Компенсатор реактивної потужності в перехідних режимах»

Виконав: студент _____ II курсу, групи _____ ДС-71мп
(шифр групи)

Прибудько Роман Михайлович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н., Вербицький Є.В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____ 1-4 _____ доц., к.т.н., Вербицький Є.В. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____ зав. каф. ЕІ, професор, д.т.н., Тимофєєв В.І. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки
(повна назва)

Кафедра промислової електроніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо - професійною програмою

Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

Спеціалізація Електронні компоненти і системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис) Ю.С. Ямненко
(прізвище ініціали)

«07» листопада 2018 року

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

Прибудька Романа Михайловича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Компенсатор реактивної потужності в перехідних режимах»

науковий керівник дисертації Вербицький Євген Володимирович, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 07 » листопада 2018 року № 4114-с

2. Строк подання студентом дисертації 6 грудня 2018 року

3. Об'єкт дослідження Генерування реактивної потужності під час перехідних режимів

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Методика компенсації реактивної потужності в перехідних режимах. Вихідна потужність перетворювача $P=5\text{кВт}$, напруга мережі $U_m=220\text{В}$, напруга живлення компенсаторів 400В .

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Проаналізувати методи компенсації для різного роду перехідних процесів. 2. Оцінити доцільність використання додаткового компенсатора. 3. Розробити структурну і принципову схему компенсатора реактивної потужності. 4. Розробити алгоритм керування додатковим компенсатором.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Схема електрична принципова, слайди презентації.

7. Перелік публікацій

1) Прибудько Р.М., Ходаков К.А. Компенсатор реактивної потужності, XI міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2018», збірник статей, Київ 2018, ст. 274-277.

2) Вербицький, Є. В. Компенсатор реактивної потужності у перехідних режимах / Є. В. Вербицький, Р. М. Прибудько, Д. О. Зінченко, М. О. Мацюк // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2018, ст. 121-125.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	к.т.н., доц., Вербицький Є.В.		

9. Дата видачі завдання 23.04.2018 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строки виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Аналіз особливостей компенсації реактивної потужності для лінійних кіл	23.04.2018 – 01.05.2018	
2.	Аналіз особливостей компенсації реактивної потужності для нелінійних кіл	01.05.2018 – 01.09.2018	
3.	Огляд пристроїв компенсації	01.09.2018 – 20.09.2018	
4.	Оцінка ефективності використання звичайних компенсаторів під час перехідних процесів	20.09.2018 – 01.10.2018	
5.	Розробка структурної і принципової схеми перетворювача	01.10.2018 – 12.10.2018	
6.	Розробка алгоритму компенсації реактивної потужності в перехідних режимах	12.10.2018 – 12.11.2018	
7.	Проведення експериментальних досліджень	12.11.2018 – 26.11.2018	
8.	Розробка стартап-проекту	26.11.2018 – 03.12.2018	

Студент

Науковий керівник дисертації

_____ (підпис)

_____ (підпис)

Р.М. Прибудько

(ініціали, прізвище)

Є.В. Вербицький

(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

В представленому дипломному проекті було розроблено компенсатор для компенсації реактивної потужності в перехідних режимах. На основі аналізу, узагальнення й систематизації наукових джерел висвітлено огляд основних способів компенсації реактивної потужності. Оцінюються переваги та недоліки окремих видів компенсації. Розглянуто методи компенсації для різних типів перехідних процесів.

Числові розрахунки та моделювання проводились з використанням програмних засобів MATLAB (пакет Simulink), MathCAD. Результатом роботи є розроблена модель пристрою компенсації реактивної потужності в перехідних режимах. Оцінено підвищення коефіцієнту потужності при використанні запропонованого алгоритму компенсації.

Запропонований алгоритм компенсації в перехідних режимах дозволяє покращити параметри якості електроенергії мінімум на 5%.

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

Ключові слова: реактивна потужність, перехідний процес, пристрої компенсації реактивної потужності, вільна складова струму, вимушена складова струму.

АНОТАЦИЯ

В представленном дипломном проекте был разработан компенсатор для компенсации реактивной мощности в переходных режимах. На основе анализа, обобщения и систематизации научных источников освещены обзор основных способов компенсации реактивной мощности. Оцениваются преимущества и недостатки отдельных видов компенсации. Рассмотрены методы компенсации для различных типов переходных процессов.

Числовые расчеты и моделирование проводились с использованием программных средств MATLAB (пакет Simulink), MathCAD. Результатом работы является разработанная модель устройства компенсации реактивной мощности в переходных режимах. Оценен повышения коэффициента мощности при использовании предложенного алгоритма компенсации.

Предложенный алгоритм компенсации в переходных режимах позволяет улучшить параметры качества электроэнергии минимум на 5%.

Результат работы может быть использован при разработке устройств компенсации в устоявшихся и переходных режимах.

Ключевые слова: реактивная мощность, переходной процесс, устройства компенсации реактивной мощности, свободная составляющая тока, вынужденная составляющая тока.

ANOTATION

In the present thesis project was developed compensator for the compensation of reactive power in transient conditions. Based on the analysis, synthesis and systematization of scientific sources, an overview of the main methods of reactive power compensation is highlighted. The advantages and disadvantages of certain types of compensation are assessed. Compensation methods for various types of transient processes are considered.

Numerical calculations and modeling were carried out using software tools MATLAB (Simulink package), MathCAD. The result of the work is a developed model of a device for reactive power compensation in transient conditions. Estimated increase in power factor when using the proposed compensation algorithm.

The proposed compensation algorithm in transient conditions allows to improve the quality parameters of electricity by at least 5%.

The result of the work can be used in the development of compensation devices in established and transient modes.

Keywords: reactive power, transient process, reactive power compensation devices, free component of current, forced component of current.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
1. АКТУАЛЬНІСТЬ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	9
1.1. Проблема компенсації реактивної потужності і шляхи її подолання.....	9
1.2. Особливості компенсації реактивної потужності для лінійних і нелінійних кіл.....	11
1.3. Пристрої компенсації реактивної потужності.....	21
1.3.1. Синхронні компенсатори.....	21
1.3.2. Конденсаторні батареї.....	22
1.3.3. Статичні тиристорні компенсатори.....	24
1.3.4. Комбіновані джерела реактивної потужності.....	26
1.3.5. Пасивні фільтри.....	29
1.3.6. Активні фільтри вищих гармонік.....	30
1.3.7. Гібридні фільтри.....	31
Висновки до розділу 1.....	32
2. АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКОВОГО КОМПЕНСАТОРА ПІД ЧАС ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ.....	33
2.1. Оцінка ефективності використання звичайних компенсаторів під час перехідних режимів.....	33
2.2. Принцип компенсації реактивної потужності в перехідних режимах.....	42
Висновки до розділу 2.....	52
3. РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ.....	53
3.1. Розробка та обґрунтування структурної схеми перетворювальної системи.....	53

3.2. Розробка та обґрунтування принципової схеми перетворювальної системи.....	55
3.3. Розрахунок елементів перетворювальної системи.....	58
Висновки до розділу 3.....	63
4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ.....	64
4.1. Розробка алгоритму компенсації для короткочасних перехідних процесів.....	64
4.2. Розробка алгоритму компенсації для тривалих перехідних процесів.....	66
Висновки до розділу 4.....	70
5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	71
5.1. Опис ідеї проекту.....	73
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	74
5.3. Розробка маркетингової програми стартап-проекту.....	78
Висновки до розділу 5.....	81
ВИСНОВКИ.....	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	83
ДОДАТОК1.....	87
ABSTRACT.....	88

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

ШИМ – широтно-імпульсна модуляція

ГФ – гібридні фільтри

ДС – давач струму

Н – навантаження

ЗП – зарядний пристрій

МК – мікроконтролер

В – випрямляч

М - мережа

ВСТУП

Актуальність. Компенсація реактивної потужності є однією зі складових підвищення ефективності роботи електричних мереж, теоретичні засади якої були розроблені ще на початку минулого століття Фрізе і Буденау. Однак 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 ряд інших теорій.

Алгоритми роботи більшості компенсаторів реактивної потужності, якими у мережах малої і 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 генерування реактивної потужності під час перехідних режимів.

Предметом дослідження є метод компенсації реактивної потужності в перехідних режимах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» на кафедрі промислової електроніки в рамках ініціативної науково-дослідницької роботи «Підвищення показників енергоефективності та ресурсозбереження засобами силової електроніки для технології отримання високонадійних зварюваних з'єднань різнорідних матеріалів», № державної реєстрації 0116U006924.

Методи досліджень. При розв'язанні поставлених у роботі завдань для побудови моделі компенсатора реактивної потужності в перехідних режимах використано теорію електричних кіл. Математичні розрахунки виконані на персональному комп'ютері з використанням математичного пакету Mathcad, моделювання процесів в системі, що розроблюється проводилося з використанням програмного пакету Matlab Simulink.

Наукова 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 отриманих результатів:

- 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, форма струму мережі покращиться;

- встановлення додаткового компенсатора дозволяє підвищити коефіцієнт потужності на 1-5 %;

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є узагальненням результатів теоретичних і експериментальних досліджень, проведених автором самостійно. У роботах, опублікованих зі співавторами, дисертанту належать: [28] – аналіз методів компенсації реактивної потужності; [29] – оцінка доцільності використання додаткового компенсатора в перехідних режимах.

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційних досліджень доповідалися та обговорювалися на XI Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка-2018», Київ.

Публікації. Основні положення і результати, отримані в дисертаційній роботі, були описані в наступних статтях:

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

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

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 35 найменувань. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 97 сторінок, у тому числі 82 сторінки основного тексту, 37 рисунків та 17 таблиць.

1. АКТУАЛЬНІСТЬ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1. Проблема компенсації реактивної потужності і 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 компенсування 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 володіють активним опором, 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 зовнішню і внутрішню 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 φ . Для індуктивного навантаження кут φ 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.

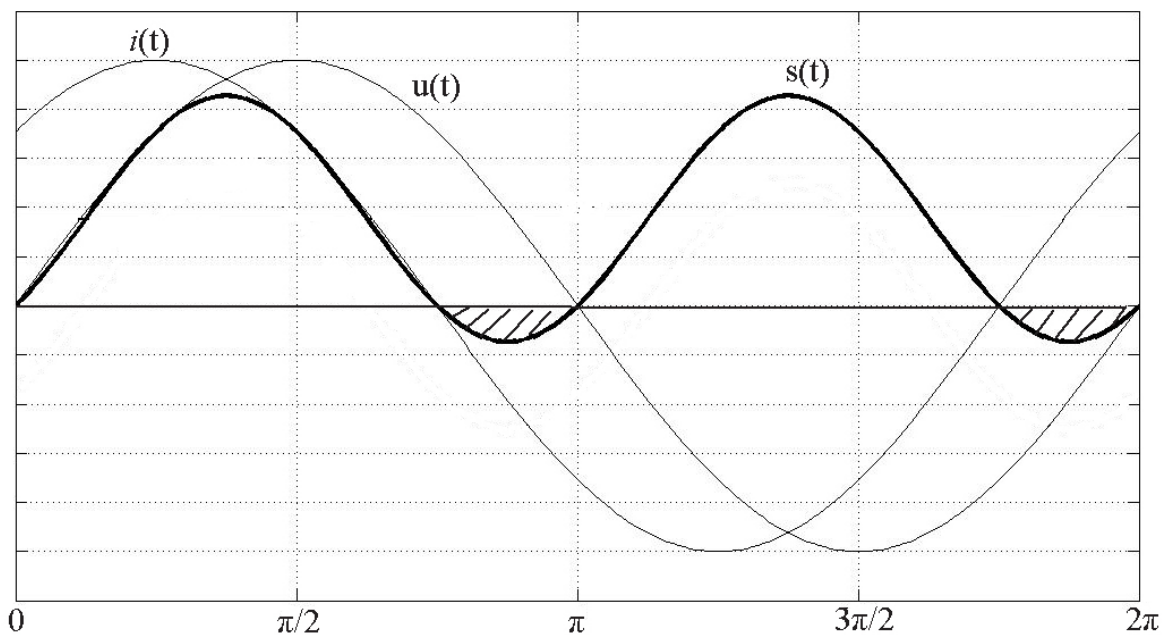


Рис. 1.1. Діаграми електромагнітних процесів у лінійному ланцюгу

Як видно з рис. 1.1. 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:

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

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

Аналізуючи формули вище можна зробити висновок, що активна складова струму є синфазною напрузі мережі, реактивна – зсунута на 90° відносно напруги мережі.

На відміну від лінійних кіл, струм в нелінійних має не синусоїдальну форму. Тому для компенсації реактивної потужності для таких кіл потрібно компенсувати реактивну потужність першої гармоніки і також компенсувати всі вищі гармоніки.

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 $i_{\text{спотв}}(t)$.

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

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.

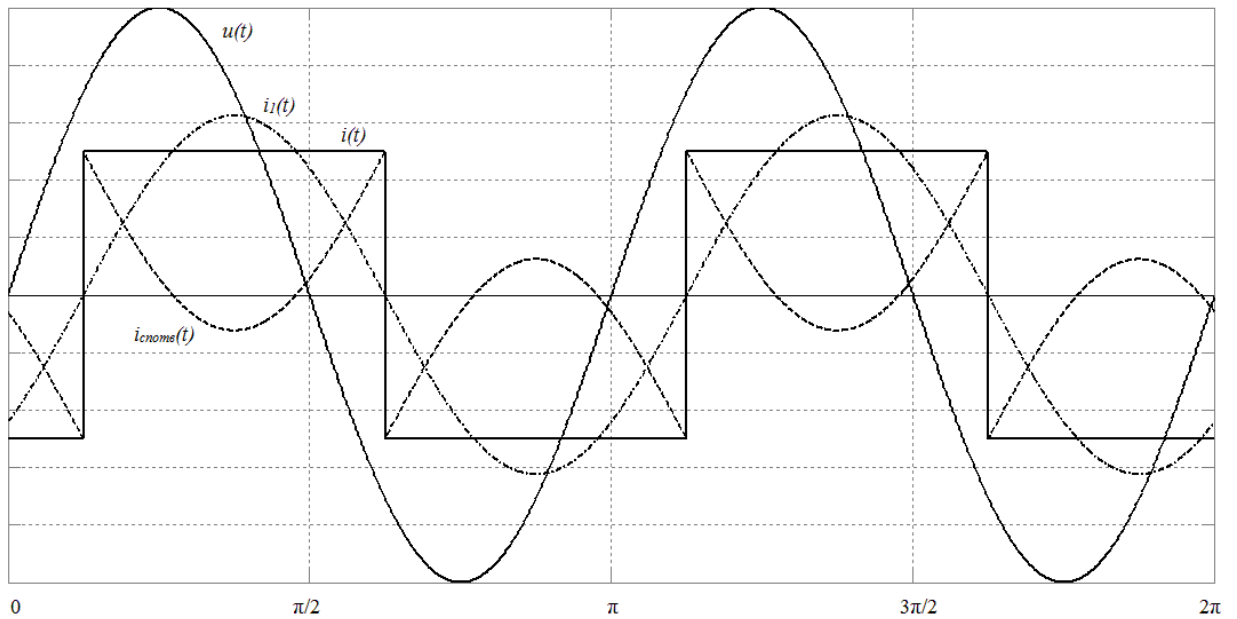


Рис. 1.2. Діаграми електромагнітних процесів у не лінійному ланцюгу

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 виробляють шляхом вирішення диференціальних рівнянь, складених для досліджуваного електричного кола на основі законів Кірхгофа або методу контурних струмів.

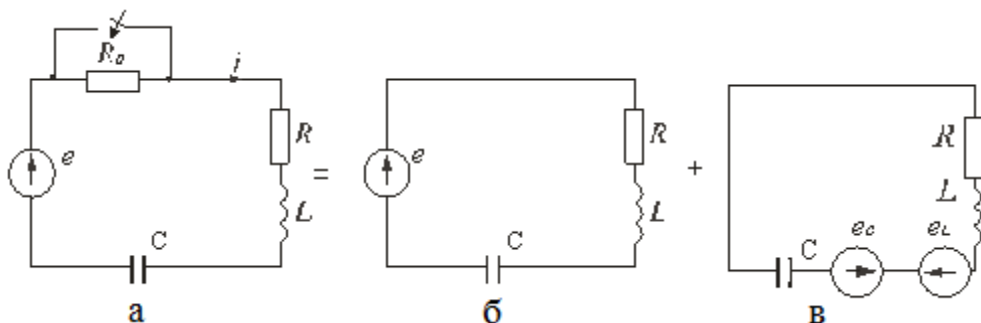


Рис.1.3. Електричне коло з перехідними процесами

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 $i_{вум}$ і вільної $i_{віль}$:

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

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 $A_1 \cdot e^{pt} + A_2 \cdot pt$.

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, ω, ψ – кутова частота і початкова фаза напруги мережі, φ – 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].

Характер перехідного процесу суттєво залежить від порядку ланцюга n . Типові форми перехідних процесів для $n = 0, 1, 2$ 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 ($\psi - \varphi = \pi / 2$), 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].

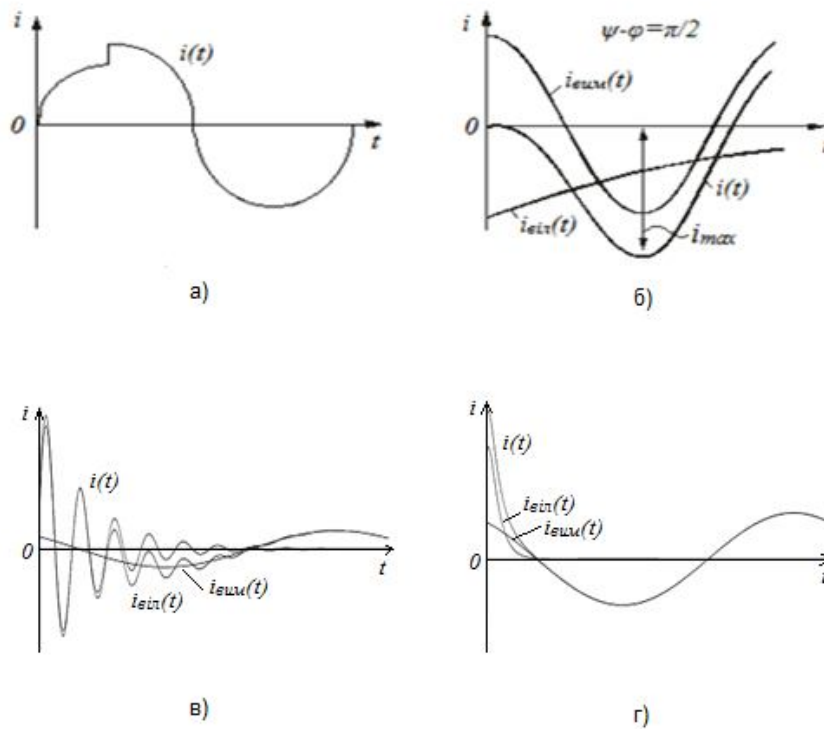


Рис.1.4 Типові форми перехідних процесів при нульовому (а), першому (б) і другому порядку (випадок простих полюсів (в), випадок комплексно-спряжених полюсів (г)) ланцюга

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 $i_{віль} = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi)$. Відомо, що такому процесу відповідають комплексно-спряжені корені $p_1 = -\alpha + j\omega_0, p_2 = -\alpha - j\omega_0$. Сталі ψ та A , визначаються параметрами схеми, початковими умовами та е.р.с. джерела живлення; величини ω_0, α залежать

тільки від параметрів післякомутаційного кола. Чим менше α порівняно з ω_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.

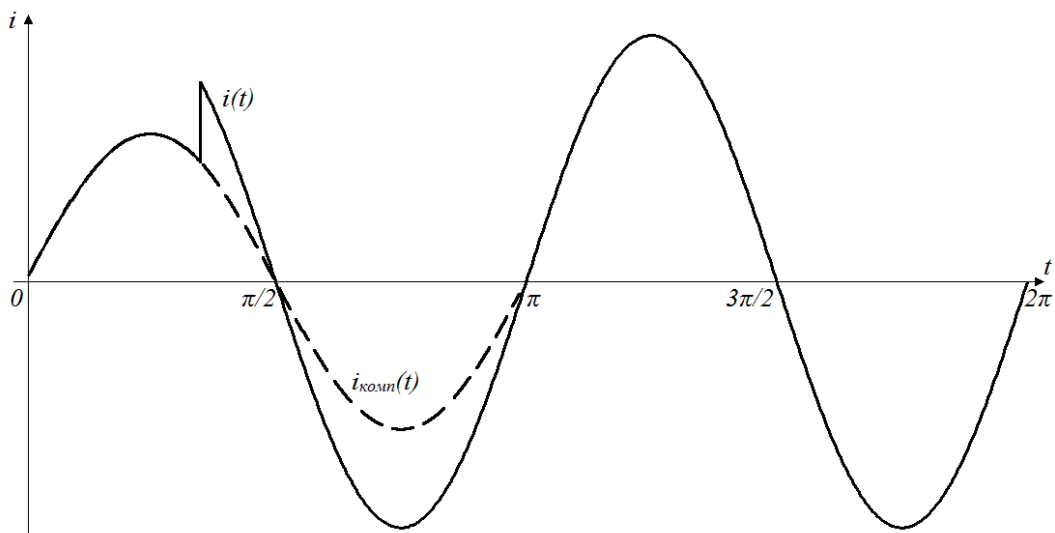


Рис. 1.5. Діаграма компенсації короткотривалого перехідного процесу

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.

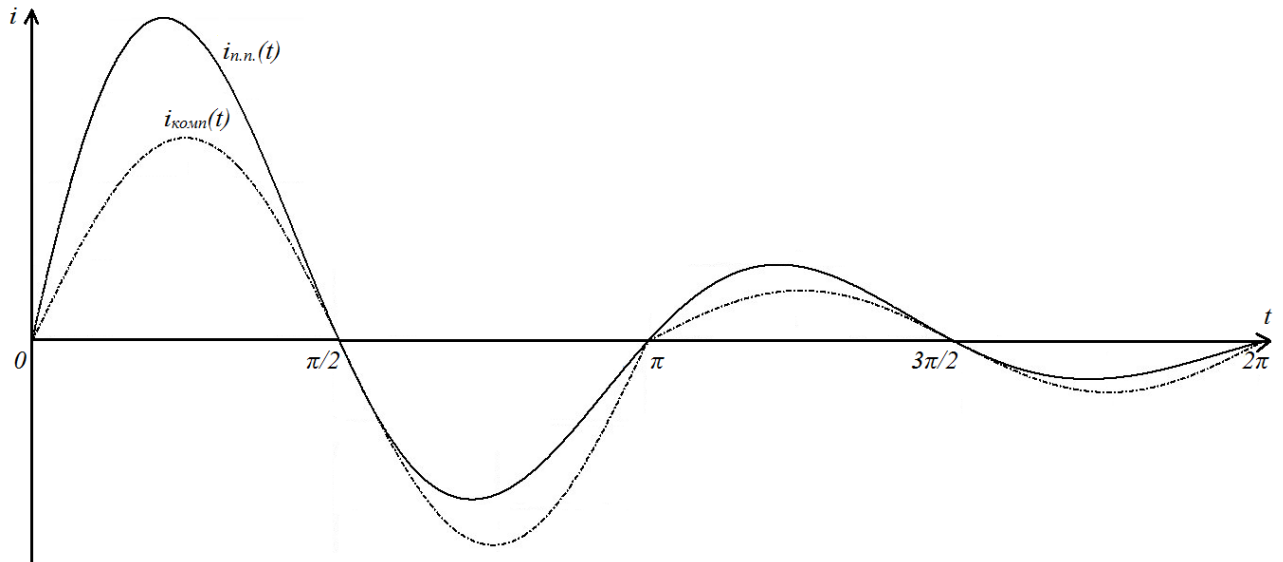


Рис. 1.6. Діаграма компенсації довготривалого перехідного процесу

Енергоємність компенсатора визначається наступним співвідношенням: $W_k = CU^2 / 2$, 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:

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

де $i_{n.n.}(t)$ – площа області компенсації, $i_{комн} = I_{комн} \sin(\omega t)$ – 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. В іншому 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

Синхронний компенсатор являє 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 зникається 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 і перенавантаження застосовують запобіжники [16].

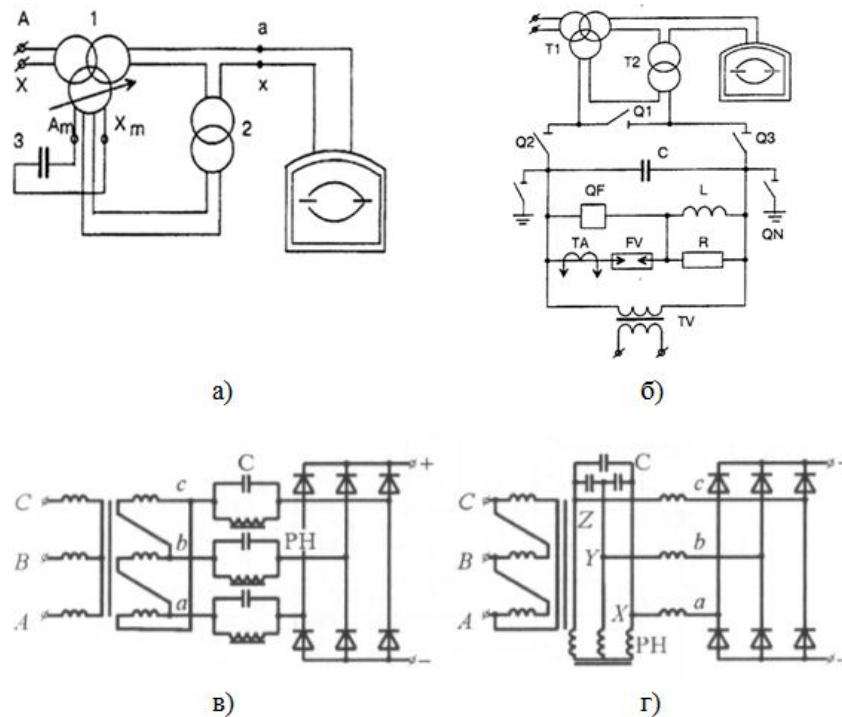


Рис.1.7. Способи виконання БК: а) поперечна компенсація, б) поздовжня компенсація, в) сполучення БК «зіркою», г) сполучення БК «трикутником»

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.

1.3.3. 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 вестись 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.

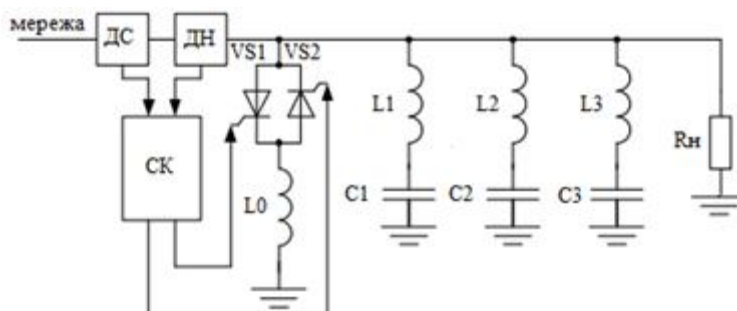


Рис.1.8. Схема підключення реактора з тиристорним керуванням

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, швидка дія або час, протягом якого TSC здатний змінювати величину потужності від одного значення до іншого [18].

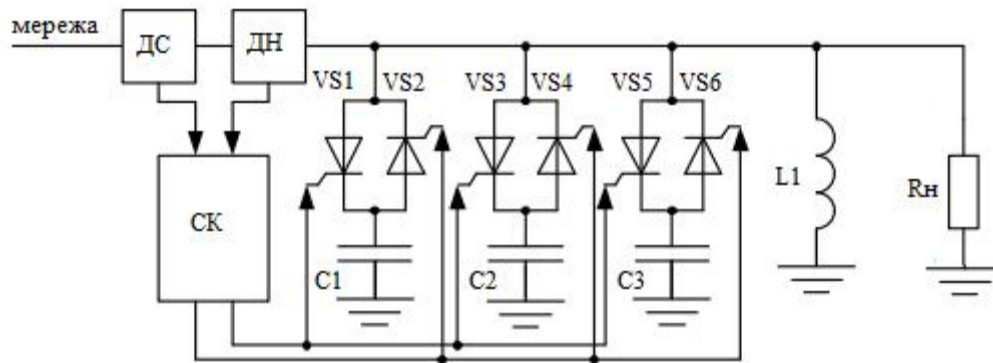


Рис.1.9. Схема підключення конденсаторів, які комутують з допомогою тиристорів

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.

1.3.4. 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).

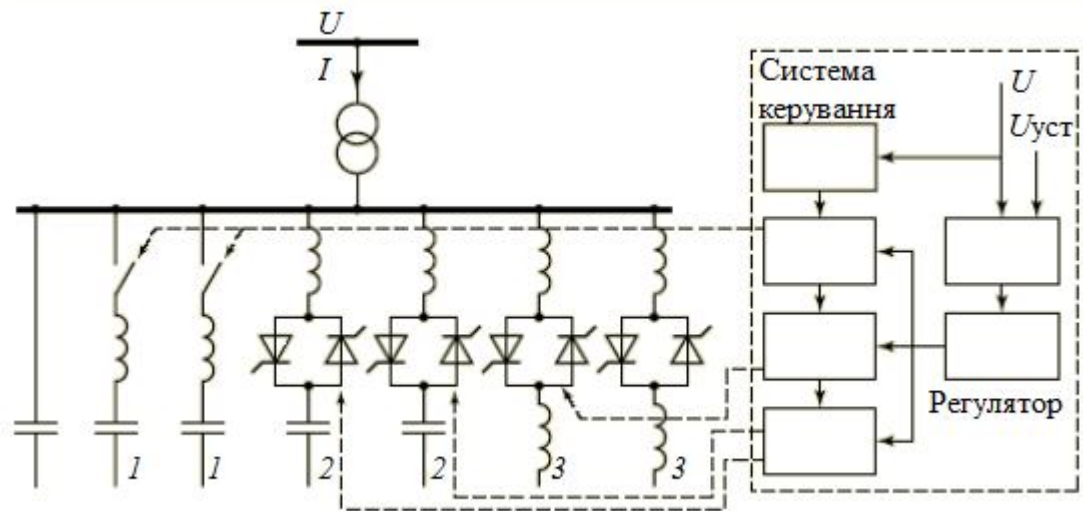


Рис.1.10. Принципова схема комбінованого СТК: 1 – що комутується вимикачами КБ; 2 – що комутується тиристорами КБ; 3 – реактори, що керуються тиристорами

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 $Q_p = Q_{КБ}$;
- установлена потужність реактора більша потужності КБ, наприклад, $Q_p = 2Q_{КБ}$.

В першому випадку завдяки тому, що потужність реактора регулюється в діапазоні $0 < Q_p < 1$, а $Q_{КБ} = -1$, 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.

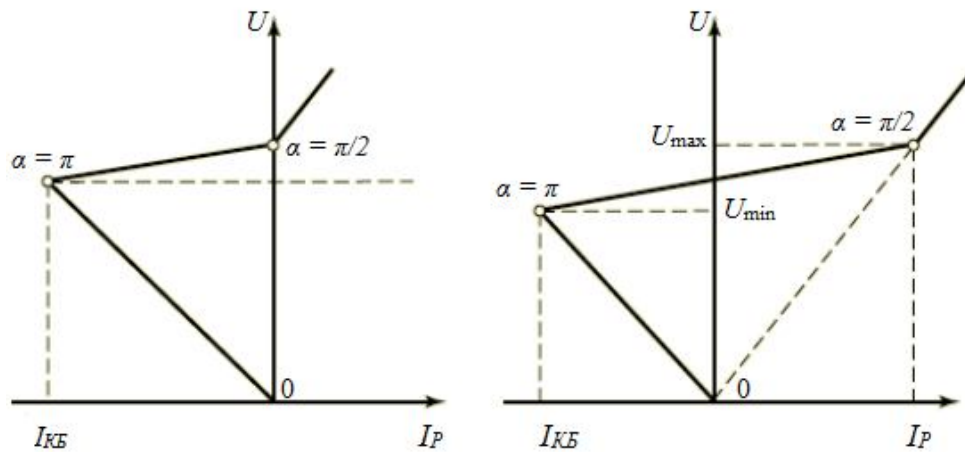


Рис.1.11. Статичні характеристики комбінованого СТК: а – при $Q_p = Q_{KB}$; б – при $Q_p = 2Q_{KB}$

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 $-1 \leq Q_{СТК} \leq 1$ (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.

1.3.5. 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.

1.3.6. 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.

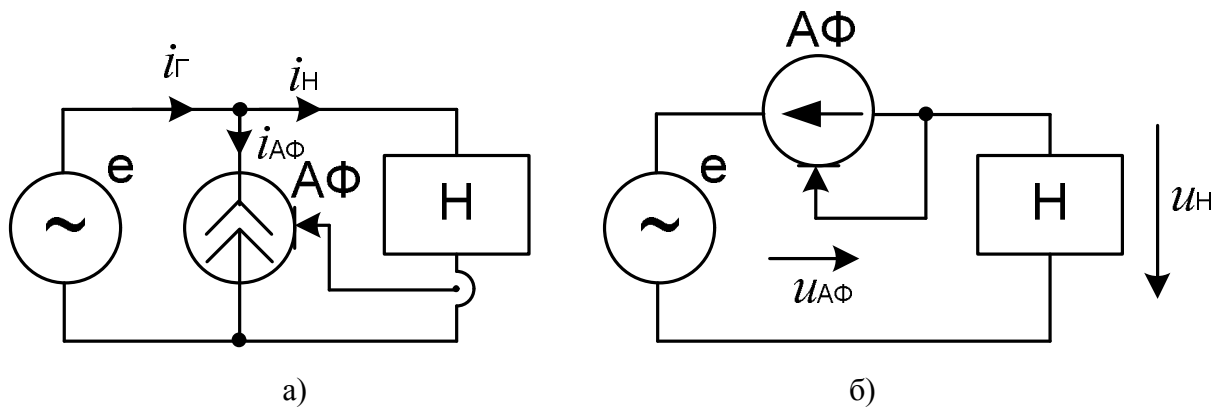


Рис. 1.12. Функціональні схеми підключення паралельного а) і послідовного б) активних фільтрів

У схемах АФ зазвичай використовують інвертори напруги з ШІМ. Частота ШІМ $f_{\text{ШІМ}}$ обирають на основі теореми Котельникова з врахуванням

номеру найвищої гармоніки n_{\max} , значення якої враховують під час корекції напруги (струму) генератора:

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

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.

1.3.7. 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].

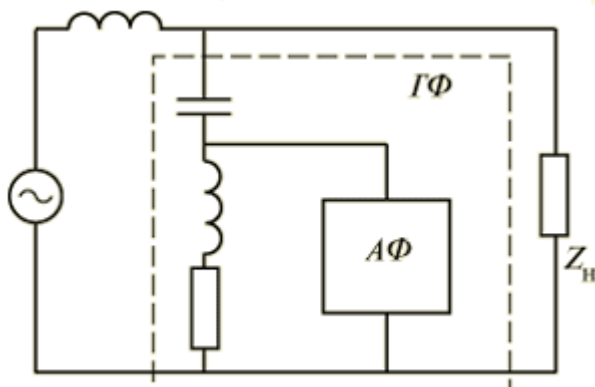


Рис.1.13 Принципова схема гібридного фільтра

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.

Висновки до розділу 1

В розділі 1 було досліджено і 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.

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 χ 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.

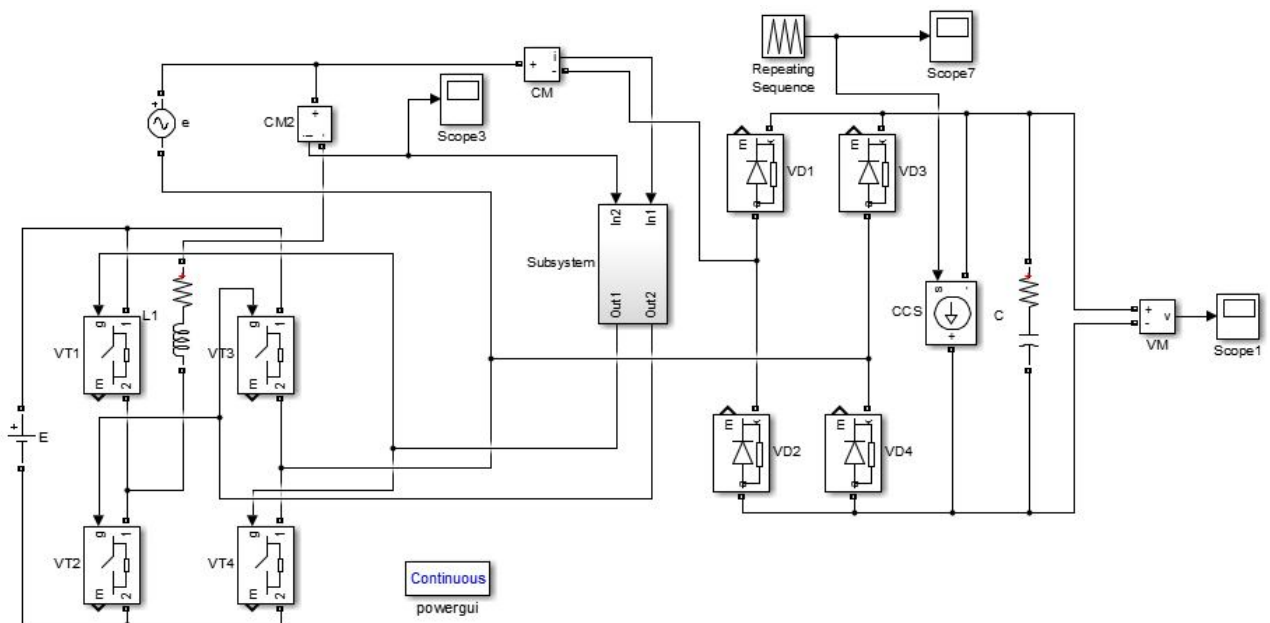


Рис.2.1. Модель досліджування компенсатора

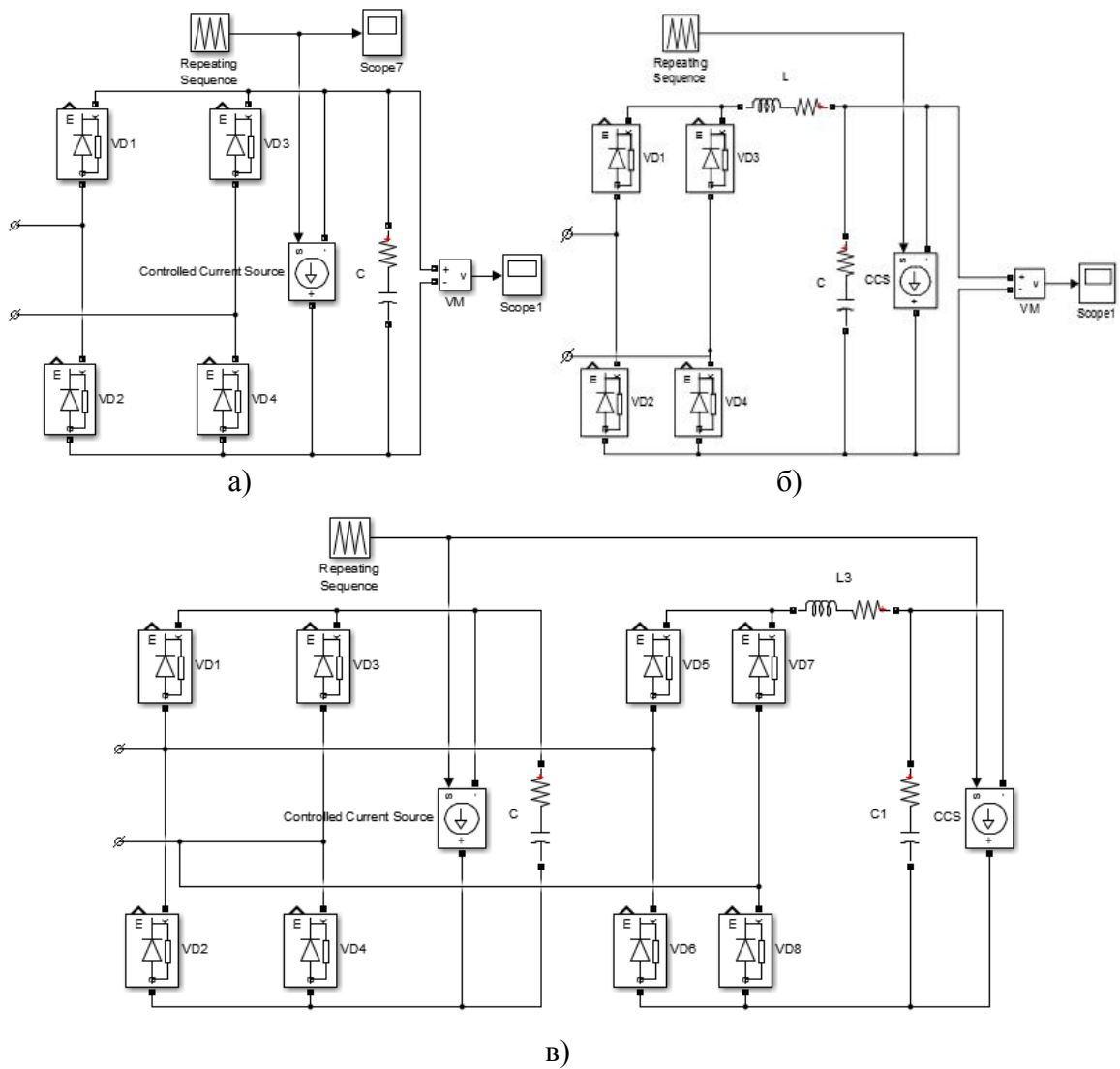


Рис.2.2. Варіанти підключення до компенсатора різних типів навантаження: а) ємнісного навантаження, б) індуктивного навантаження, в) індуктивно-ємнісного навантаження

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.

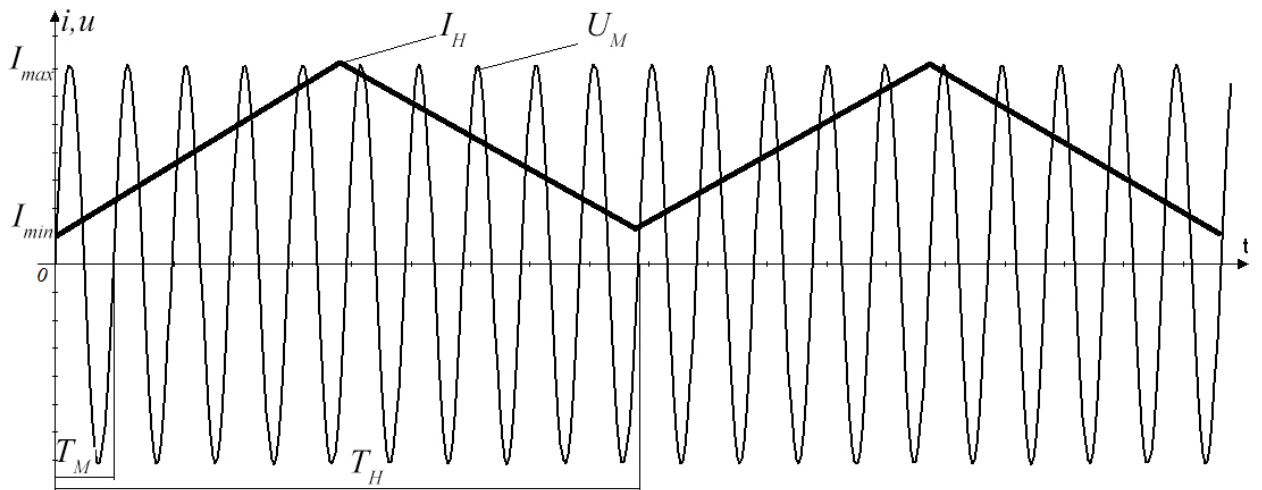


Рис.2.3. Часова діаграма перехідного процесу

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

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

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

Індуктивність L_1 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:

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

де $U_{жс} = 400B$, U_M – напруга мережі.

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

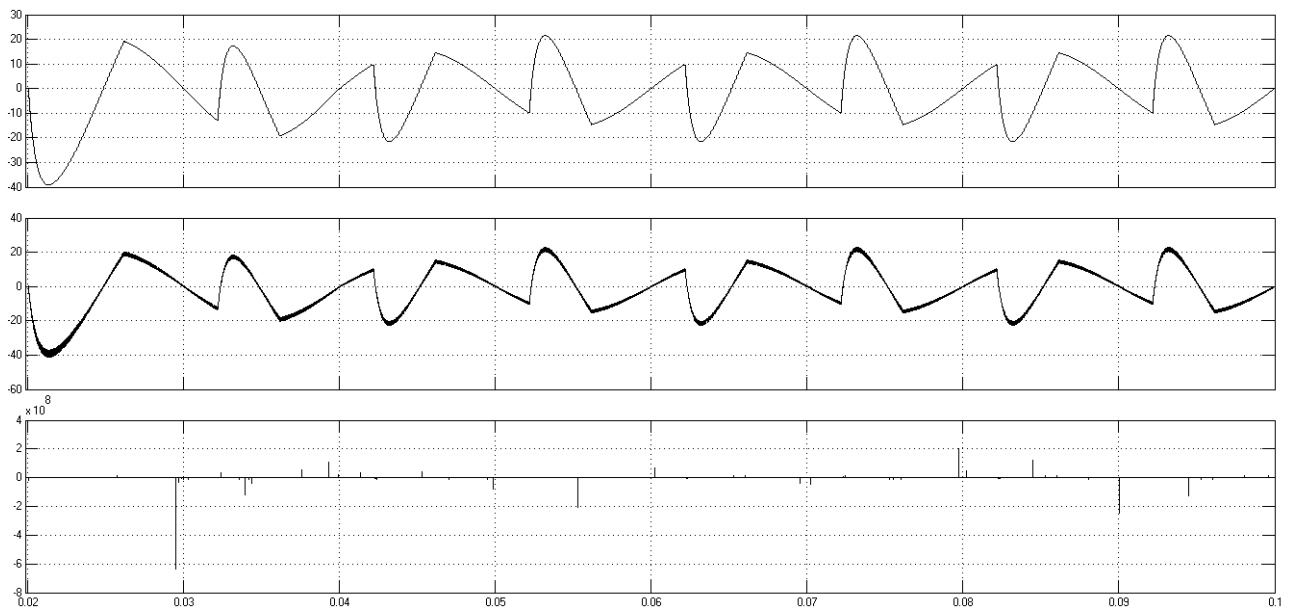


Рис.2.4 Осцилограми струму компенсатора: (1) еталонне значення струму, (2) отримане значення струму, (3) похідна струму компенсатора.

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

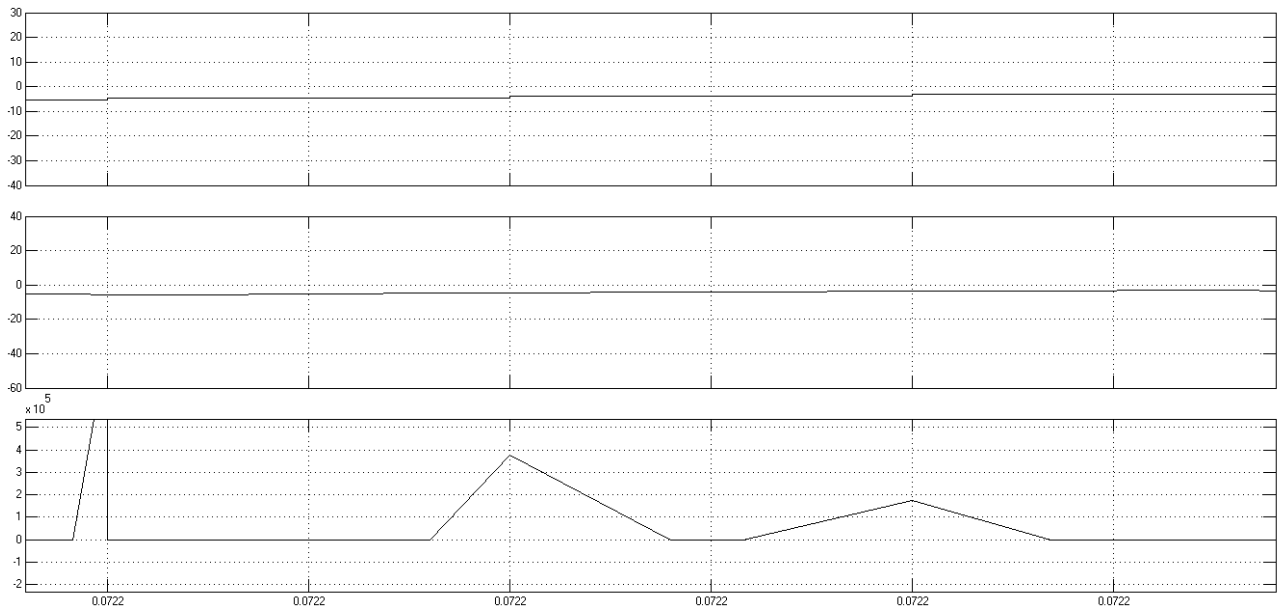


Рис.2.5 Осцилограми струму компенсатора для окремої ділянки форми струму: (1) еталонне значення струму, (2) отримане значення струму, (3) похідна струму компенсатора

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 величину напруги мережі (рис.2.6).

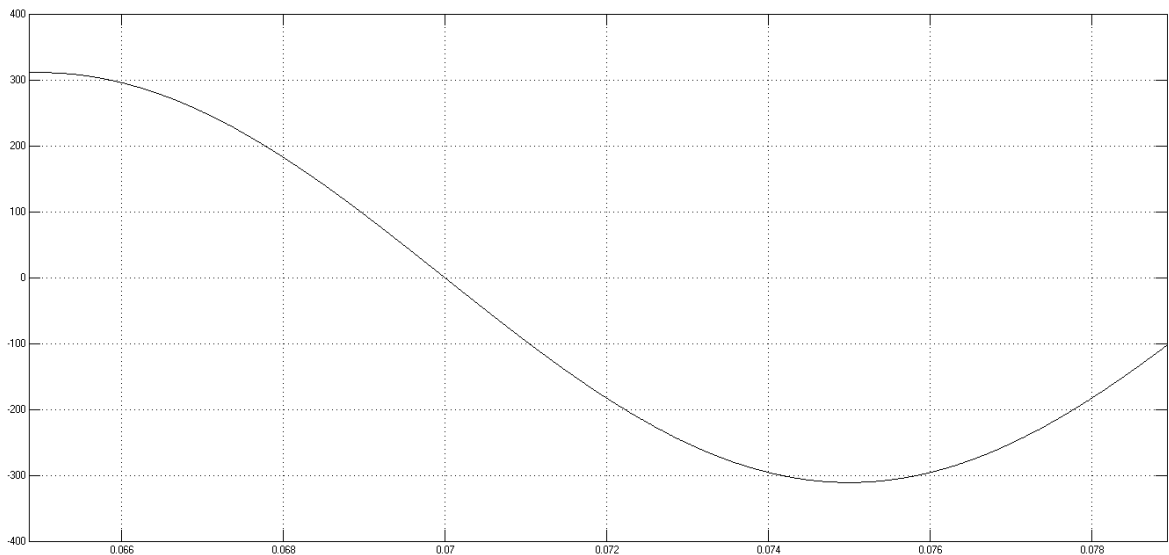


Рис.2.6 Осцилограма напруги мережі

Значення напруги мережі в момент часу $t=0.0722c$ дорівнює $U_M=200V$.

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.

Таблиця 2.1

$I_{min}, \text{ A}$	$I_{max}, \text{ A}$	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.

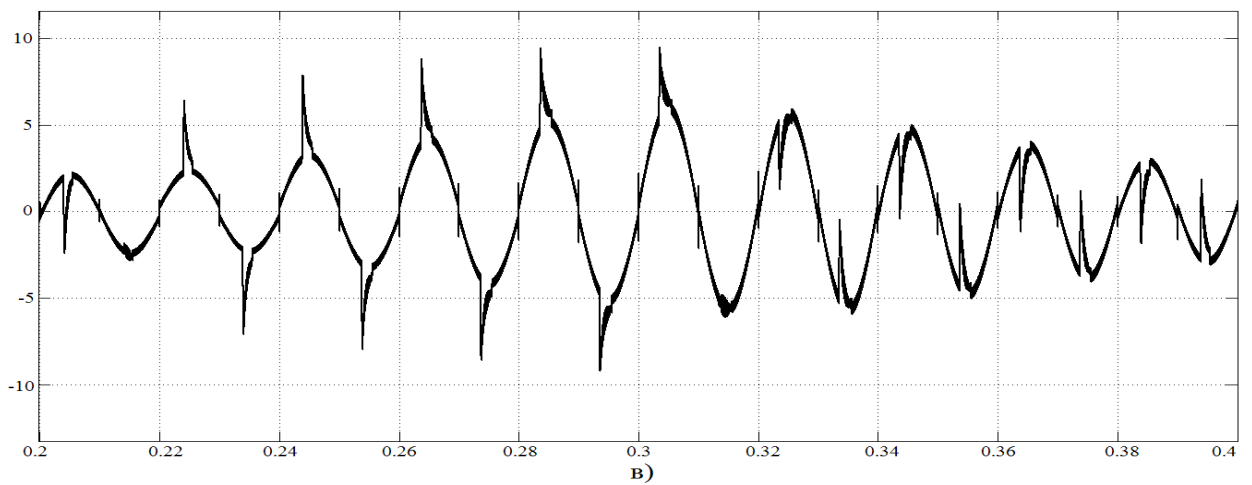
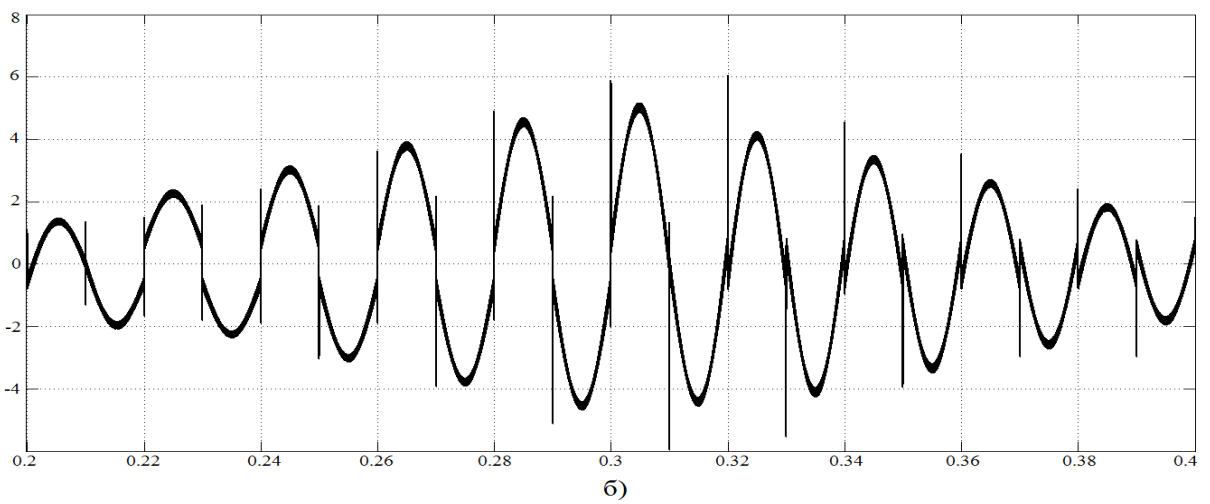
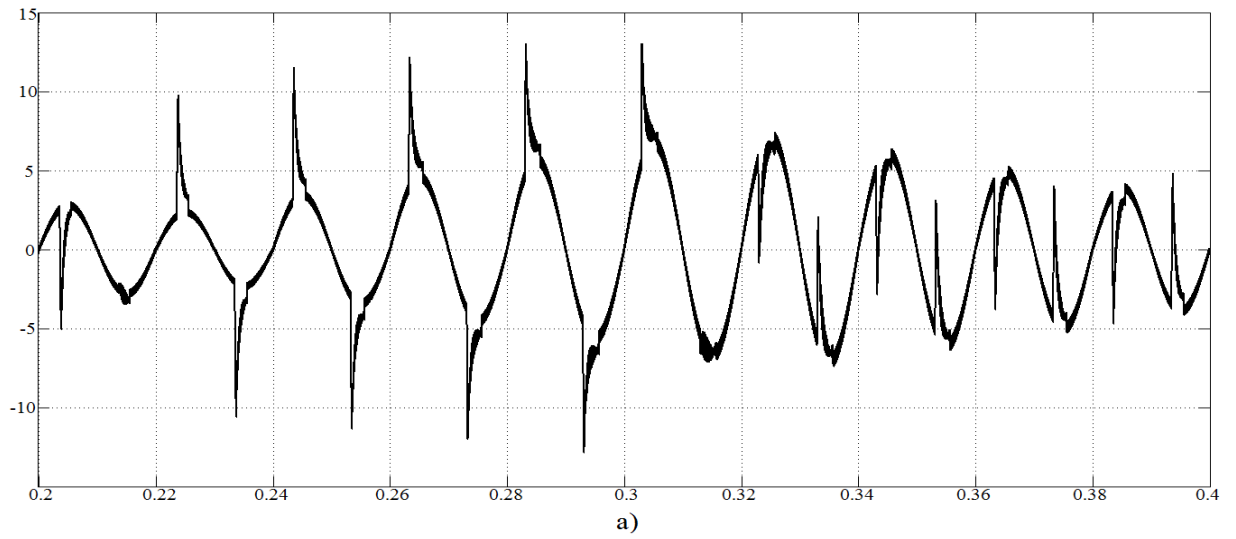


Рис.2.7 Часові діаграми струму мережі під час перехідного процесу після основного компенсатора для а) ємнісного, б) індуктивного, в) індуктивно-ємнісного навантаження

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.

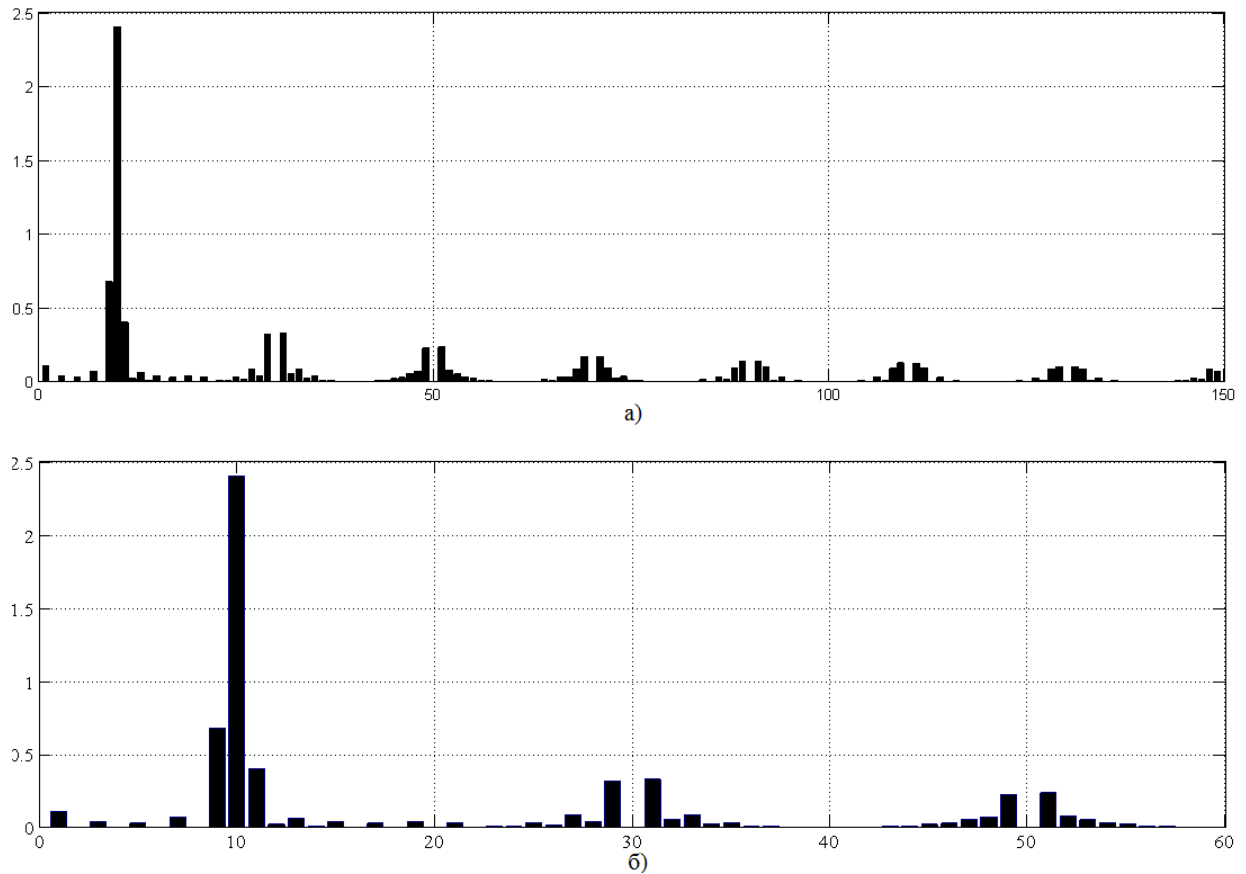


Рис.2.8 Спектр струму мережі під час перехідного процесу в нормальному а) і збільшеному б) масштабі

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 усувати 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:

$$i_{gc_av}(\varphi) = \frac{I_{max}(\varphi) + I_{min}(\varphi)}{2}, \quad (2.4)$$

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 компенсатора, 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.

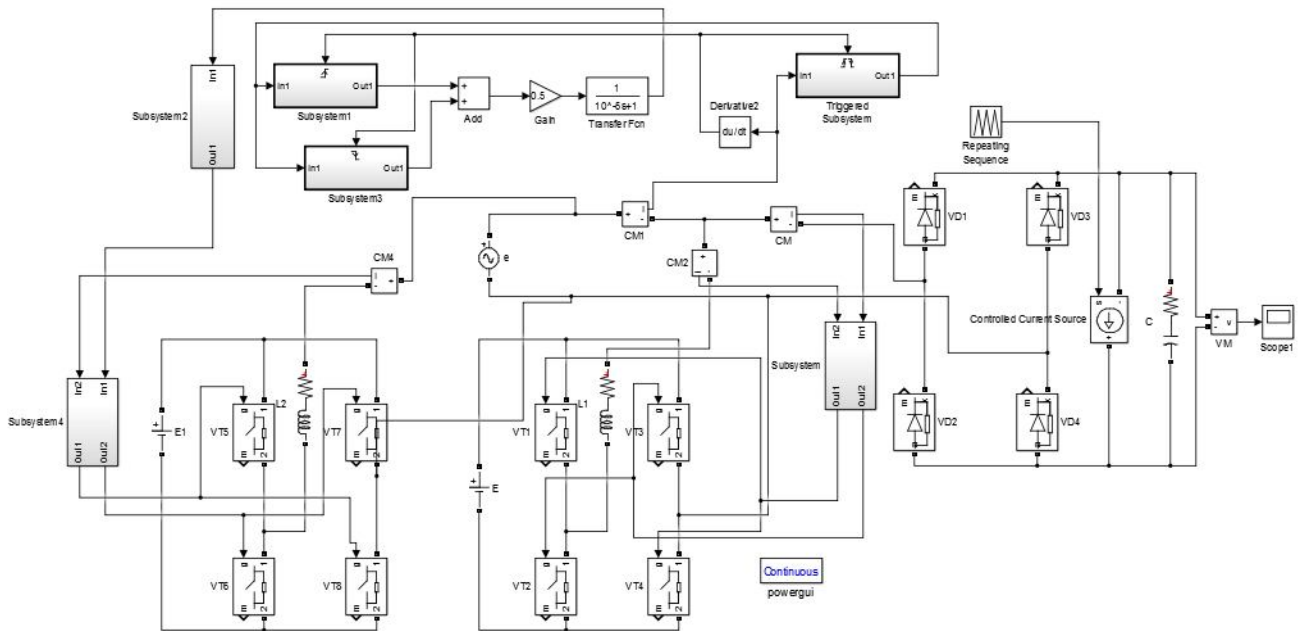


Рис. 2.9. Досліджувана модель з додатковим компенсатором і каналом синхронізації

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.

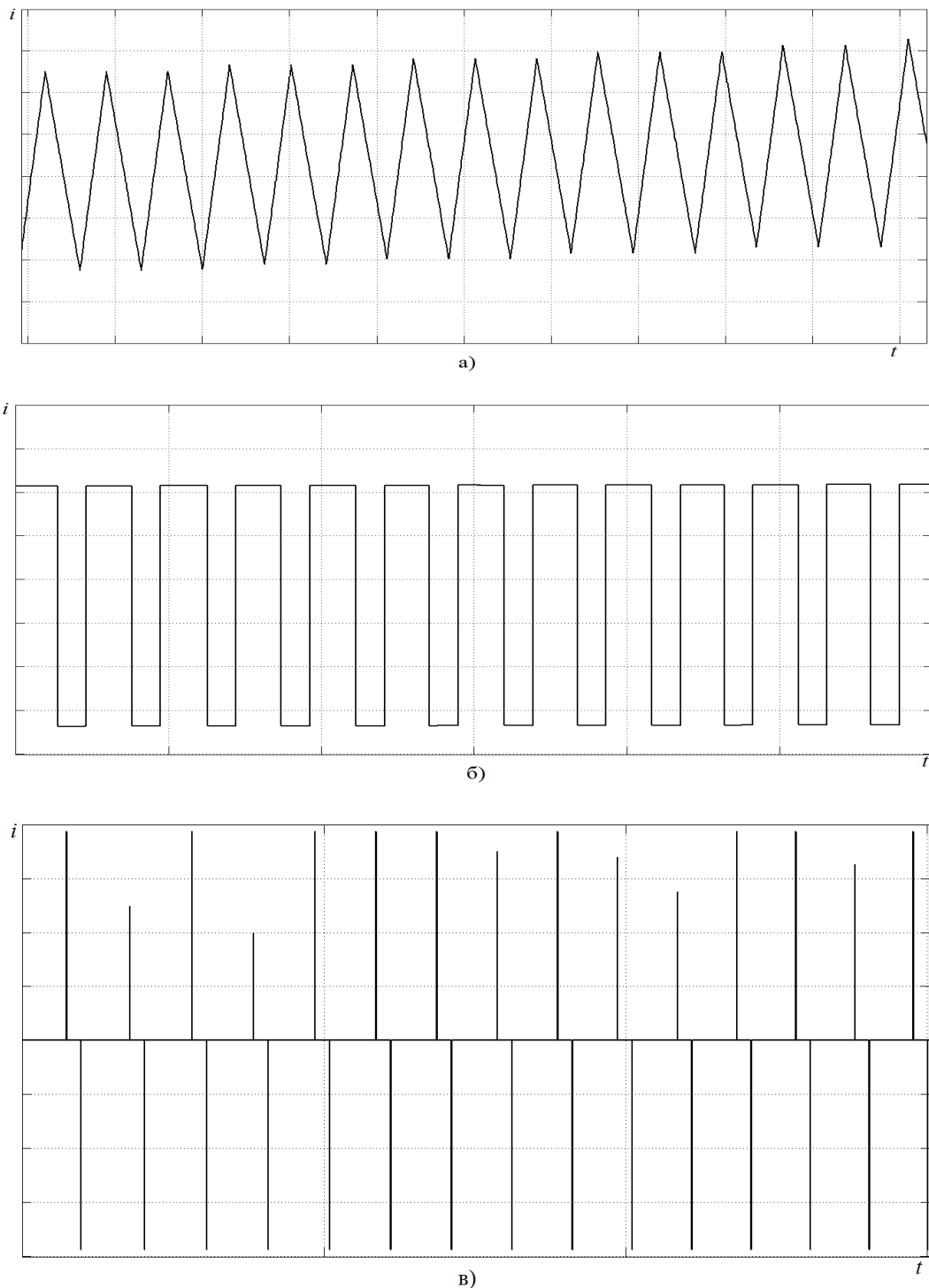


Рис.2.10 Діаграми роботи каналу синхронізації: а) форма струму мережі, б) форма сигналу після першого диференціювання, в) серія дельта імпульсів після другого диференціювання

Струм мережі формується релейним типом керування, тому він має трикутну 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.

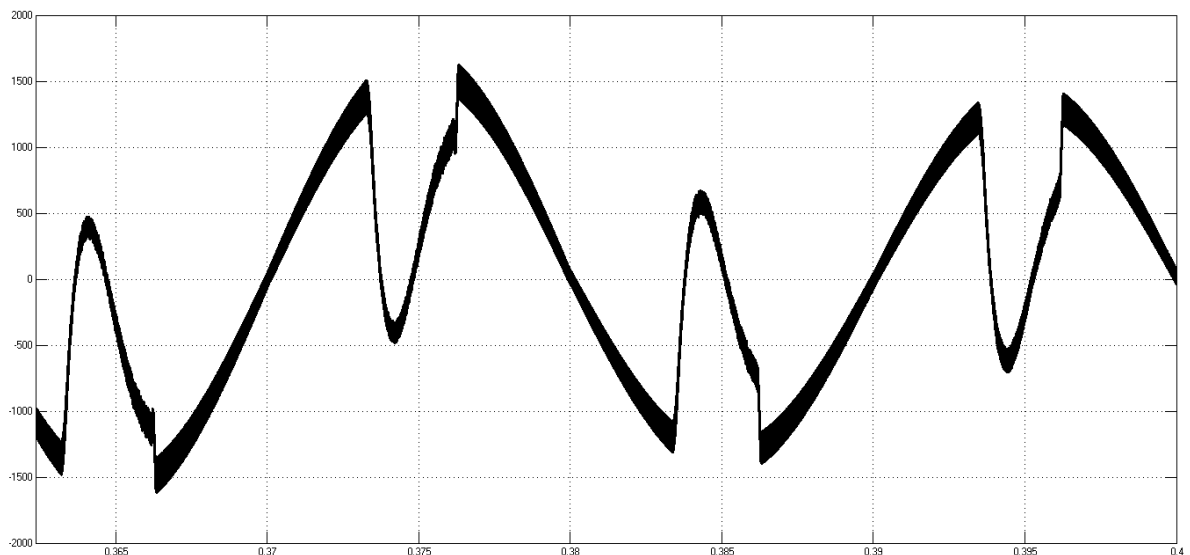


Рис. 2.11 Діаграма потужності додаткового компенсатора

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 $I_{VD}=0.6 \cdot 7.27=4.362A$.

Максимальна зворотна напруга транзисторів буде дорівнювати напрузі джерела живлення: $U_{36}=400B$.

Величину вихідної індуктивності компенсатора знаходимо аналогічно до індуктивності основного компенсатора.

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

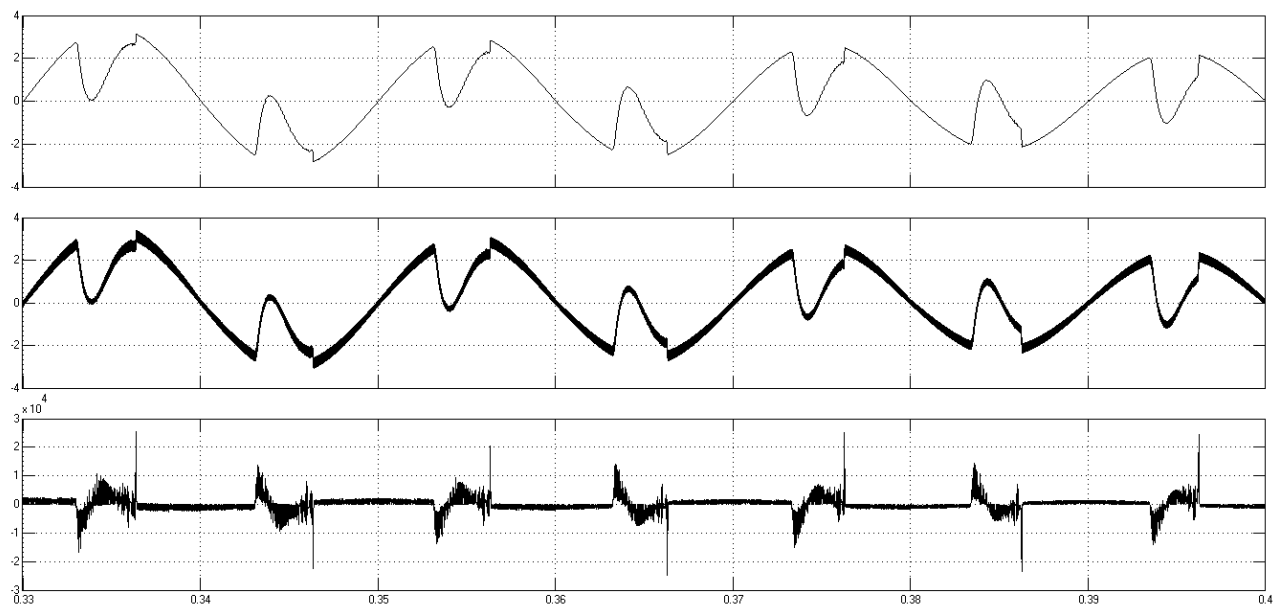


Рис.2.12 Осцилограми струму додаткового компенсатора: (1) еталонне значення струму, (2) отримане значення струму, (3) похідна струму компенсатора.

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.

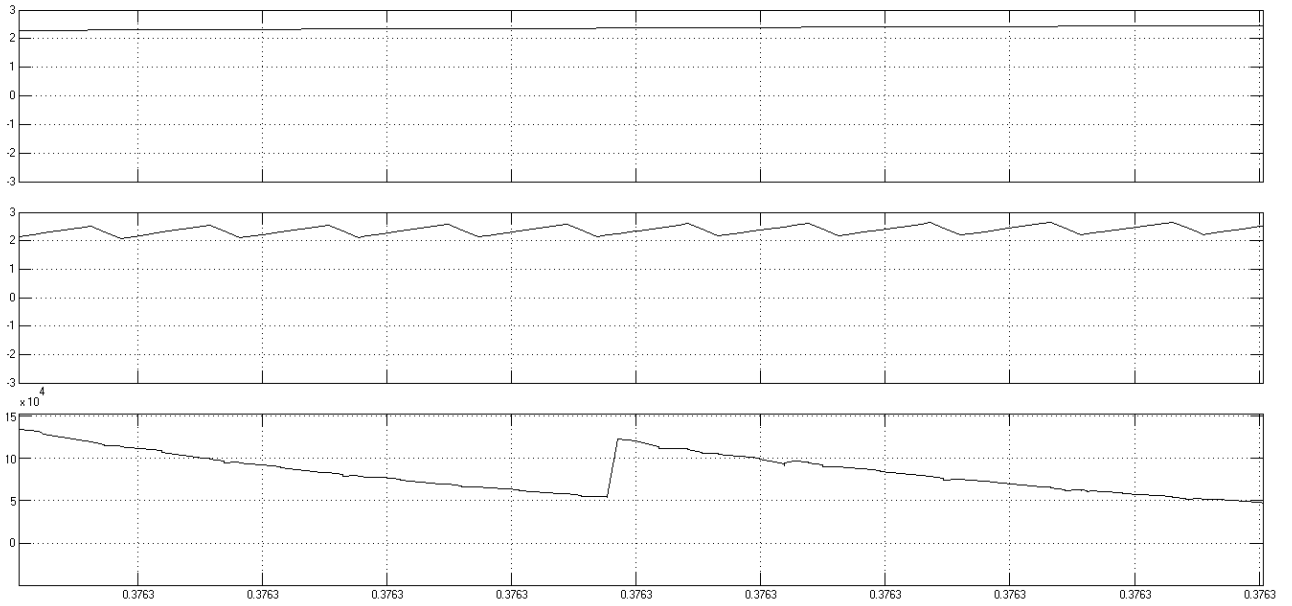


Рис.2.13 Осцилограми струму додаткового компенсатора для окремої ділянки форми струму:

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

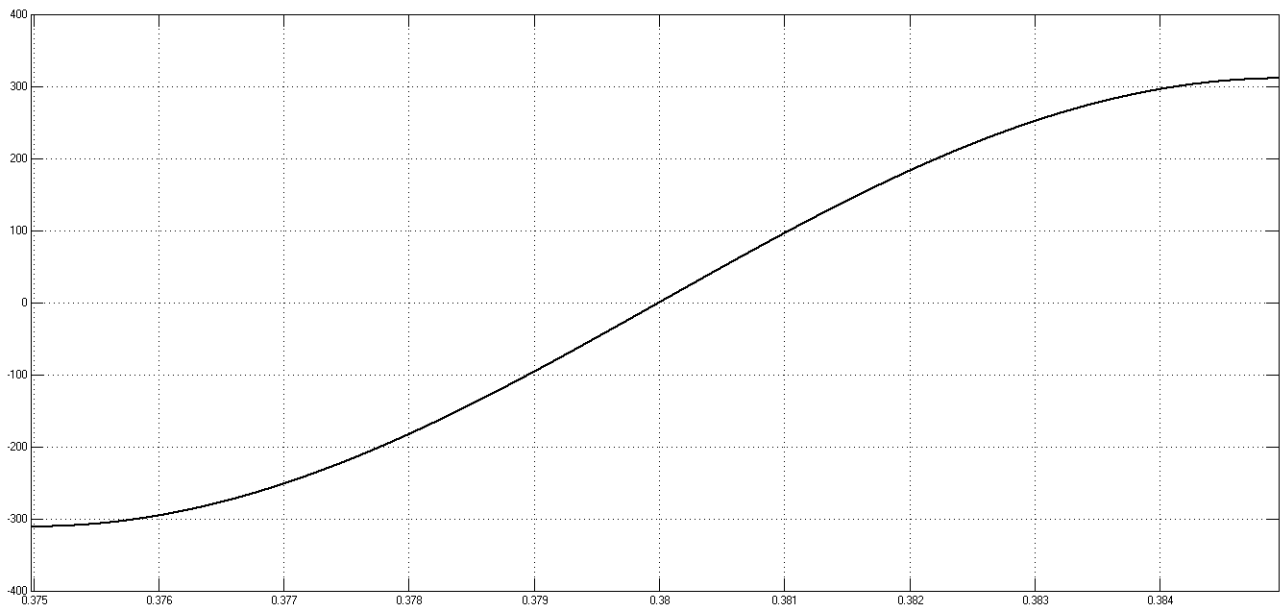


Рис.2.14 Осцилограма напруги мережі

Значення напруги мережі в момент часу $t=0.3763c$ дорівнює $U_M=290B$.

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

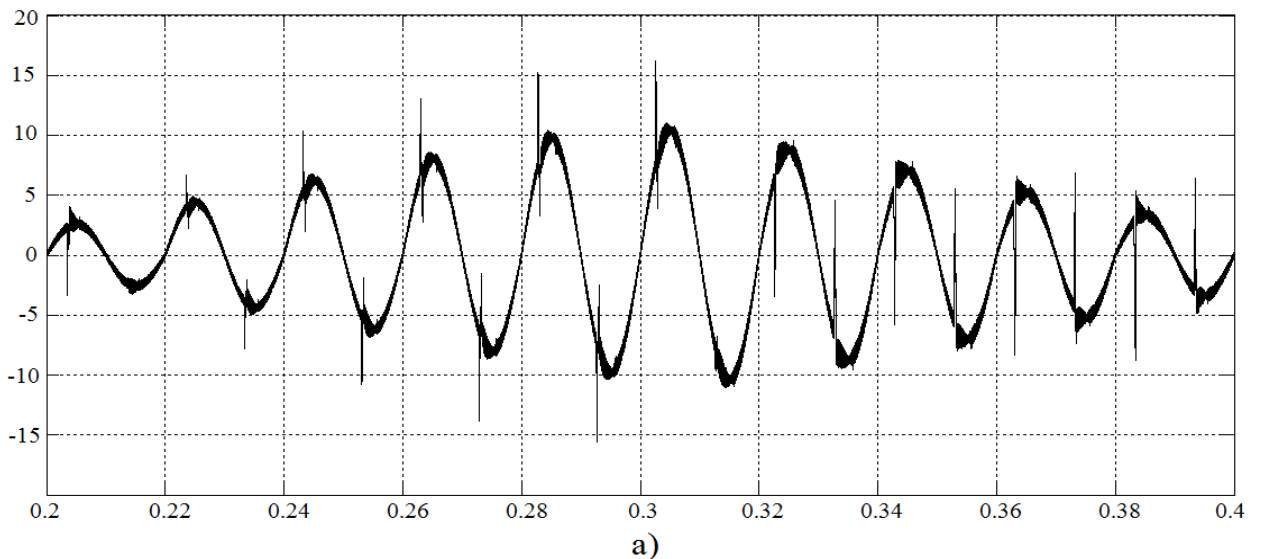
$$L = \Delta U \cdot \frac{di}{dt} = \frac{400 - 290}{12 \cdot 10^4} = 0.84 \text{ мГн}$$

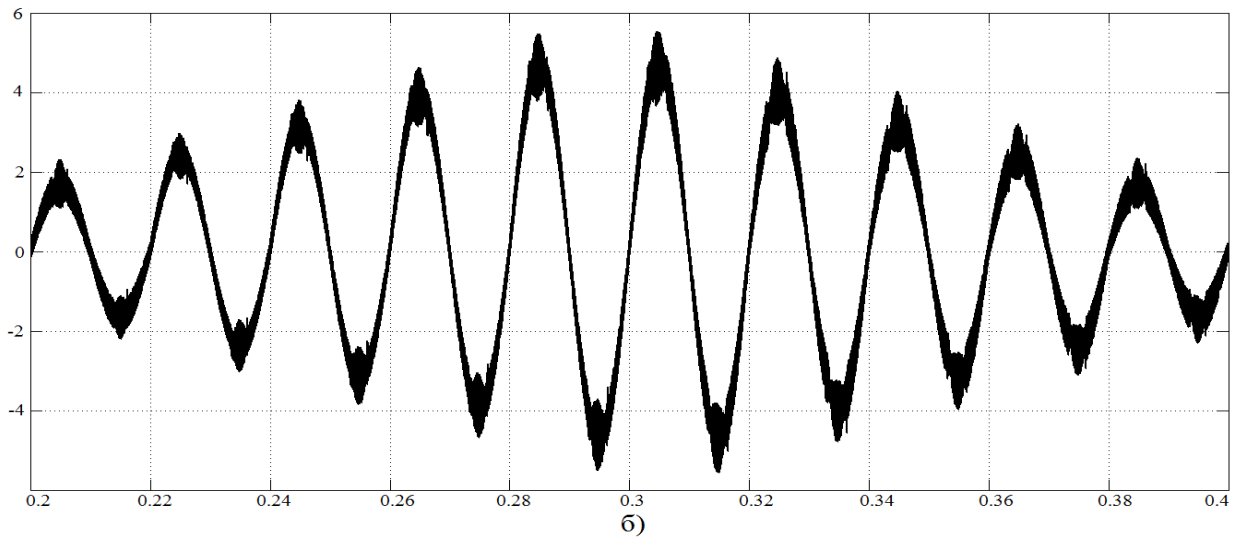
Отже, таким чином для забезпечення плавної зміни струму компенсатора необхідно використовувати індуктивність величиною $L = 0.84 \text{ мГн}$.

Процес дослідження додаткового компенсатора можна розділити на два етапи:

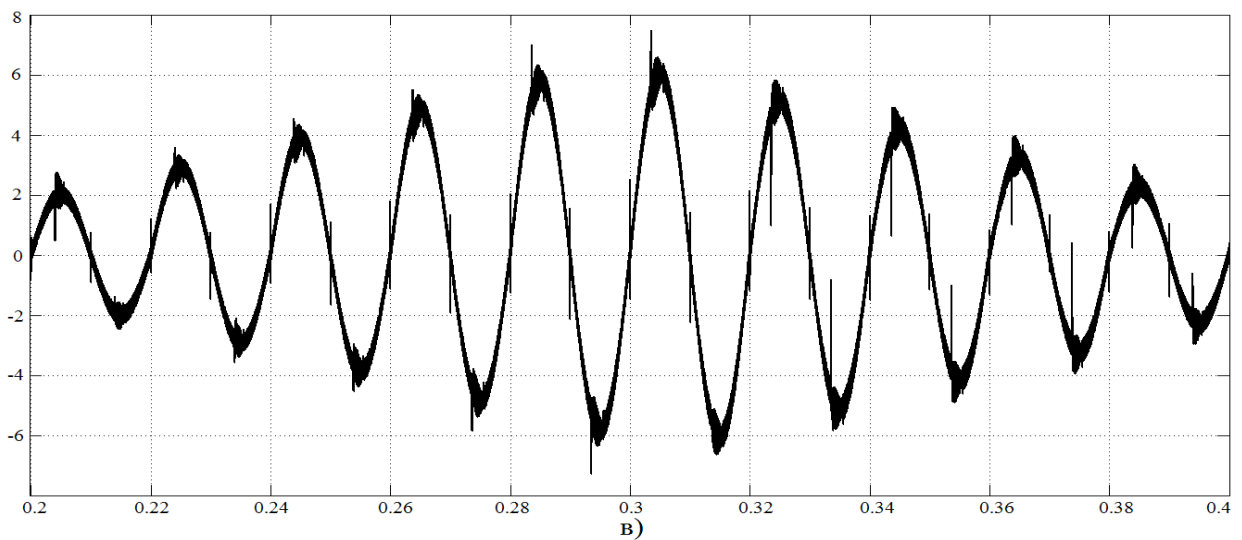
1. Без урахування пульсації струму навантаження.
2. З урахуванням пульсації струму навантаження.

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.





б)



в)

Рис.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.

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.

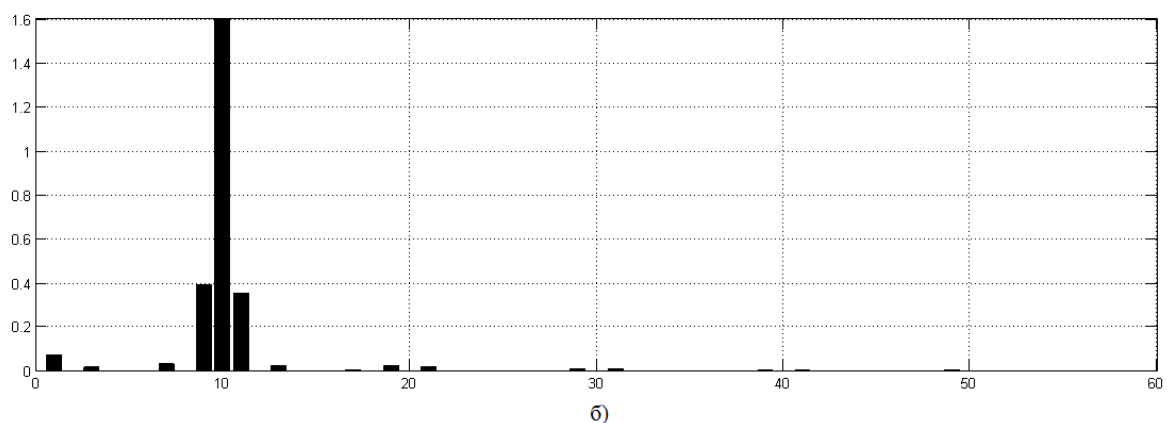
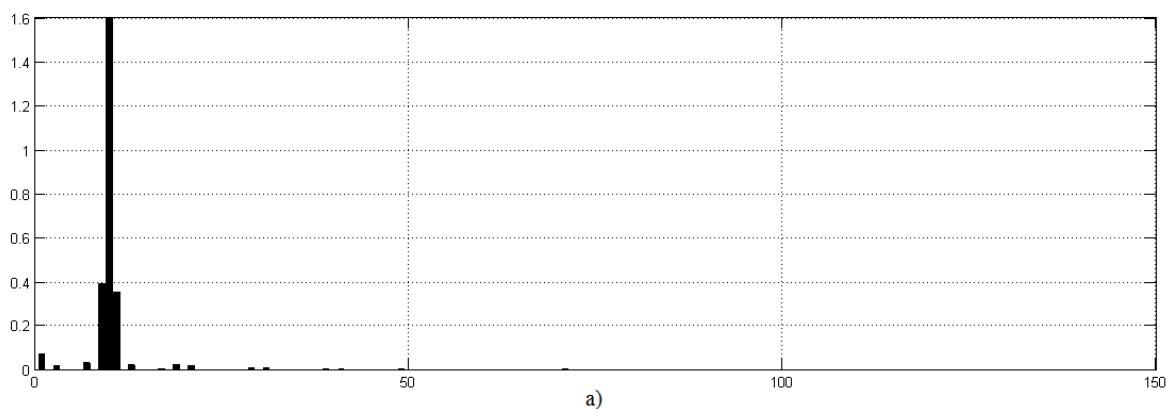


Рис. 2.16 Спектр струму мережі під час перехідного процесу для додаткового компенсатора в нормальному а) і збільшеному б) масштабі

Оскільки форма 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

$I_{min},$ А	$I_{max},$ А	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

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.

Таблиця 2.3

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

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

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

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

де P_δ – поточна потужність компенсатора при заданій похибці прогнозування δ .

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

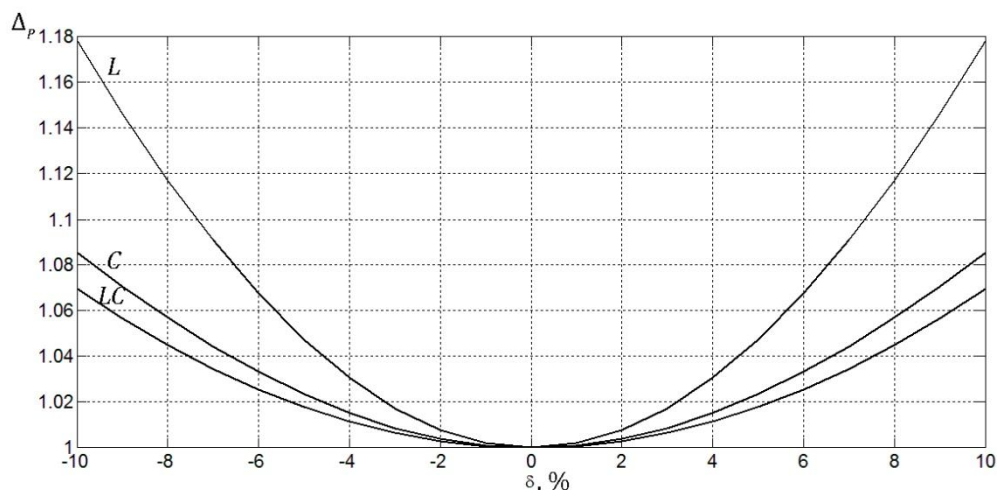


Рис.2.17. Відносна потужність компенсатора Δp , відносно мінімальної P_{\min}

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

Висновки до розділу 2

Таким чином 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.

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.

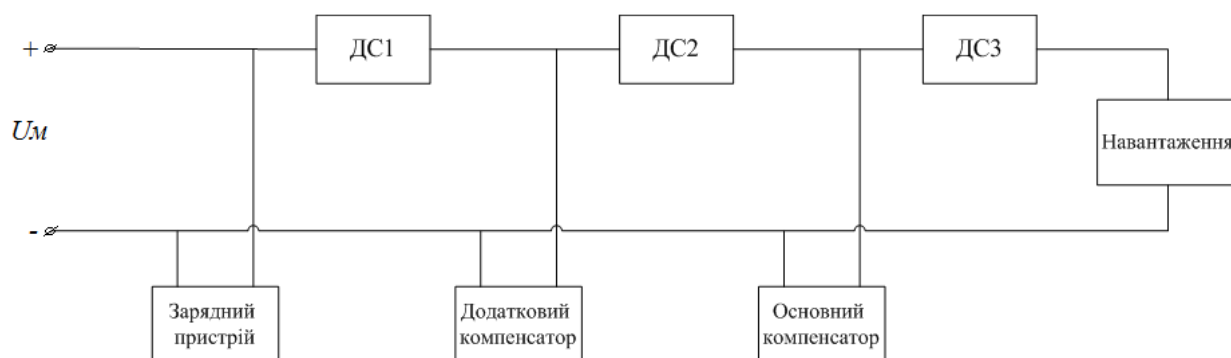


Рис. 3.1. Схема під'єднання компенсаторів до мережі

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.

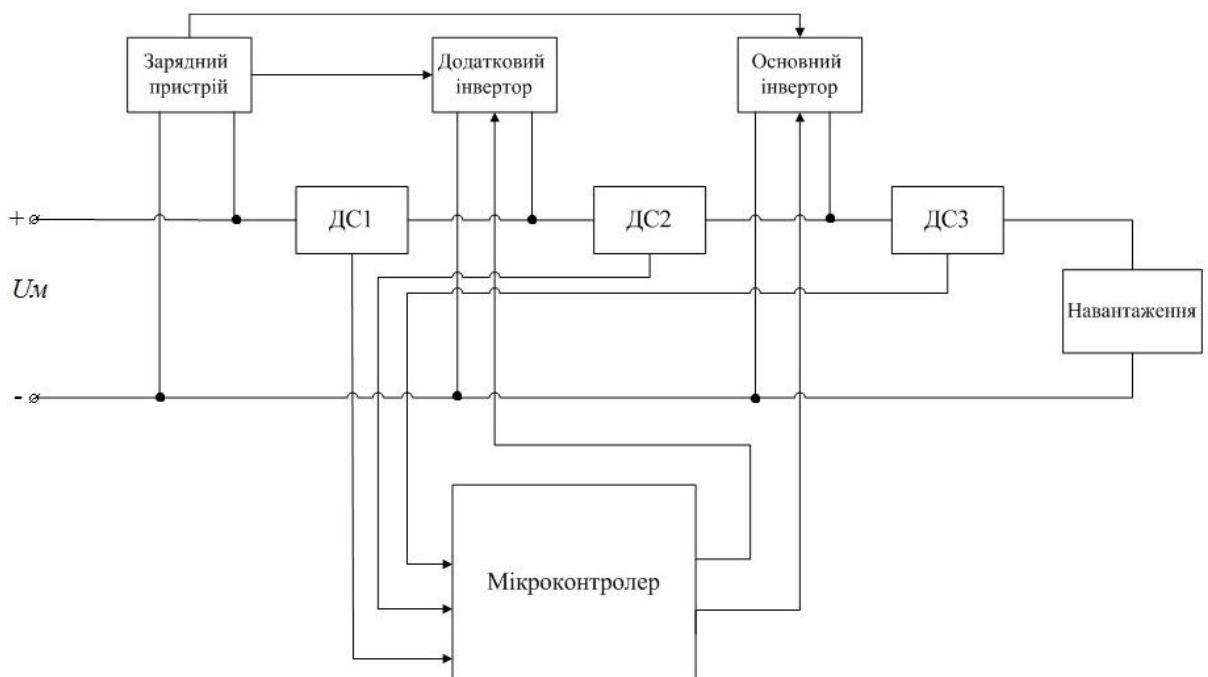


Рис.3.2 Структурна схема перетворювача енергії

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.

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

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 Х2, 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 Х3.

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 2014a показана на рис. 3.4.

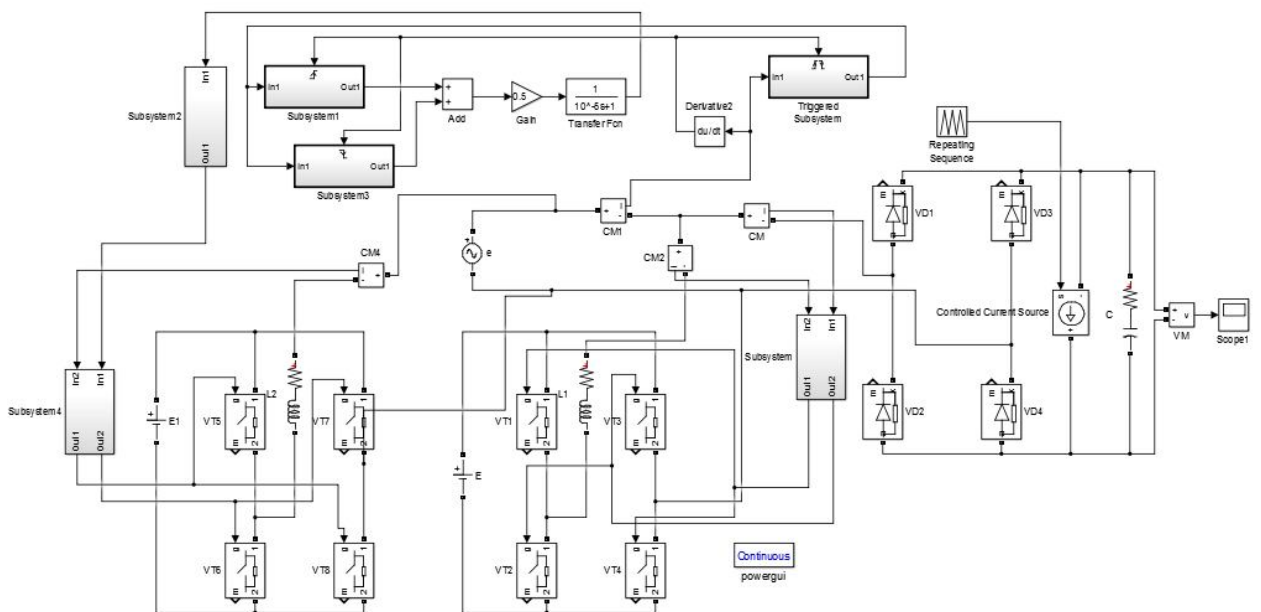


Рис.3.4 Модель віртуальної установки компенсатора реактивної потужності

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: $U_{3B}=400В$.

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:
 $U_{36} = 400В$.

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.

2. 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 $L = 2 \text{ мГн}$. 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 $j = 1 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$. Дросель мотаємо на ш-подібний сердечник [35].

Визначаємо необхідну величину добутку $S_0 S_c$ 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_0S_c обираємо магнітопровід ШЛ 50x80 з параметрами: середня довжина магнітної силової лінії $l_c = 34,2 \text{ см}$; активний переріз $S_cK_c = 26,5 \text{ см}^2$; площа вікна $S_0 = 40 \text{ см}^2$; маса магнітопроводу $G_c = 7430 \text{ г}$.

Знаючи максимальний струм I_1 та щільність струму j , а також площу вікна сердечника S_0 і коефіцієнт заповнення K_0 , можемо визначити кількість витків:

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

Знаходимо необхідну площу перерізу обмотувального дроту:

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

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

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 $j = 1 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$. Дросель мотаємо на ш-подібний сердечник. 4439.6436

Визначаємо необхідну величину добутку S_0S_c для сердечника дроселя:

$$S_cS_0 = \frac{100 \cdot L_2 \cdot I_{L2}^2}{B_m \cdot j \cdot K_c \cdot K_0} = \frac{100 \cdot 0,84 \cdot 10^{-3} \cdot 7,27^2}{0,312 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,3} = 47,43 \text{ см}^4.$$

За добутком S_0S_c обираємо магнітопровід ШЛ 20x25 з параметрами: середня довжина магнітної силової лінії $l_c = 17,1 \text{ см}$; активний переріз $S_cK_c = 4,1 \text{ см}^2$; площа вікна $S_0 = 10 \text{ см}^2$; маса магнітопроводу $G_c = 575 \text{ г}$.

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:

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

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

3. 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:

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

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 VJ1206Y102KXETW1BC 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.

Висновки до розділу 3

На основі структурної схеми перетворювальної системи була розроблена 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.

4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ

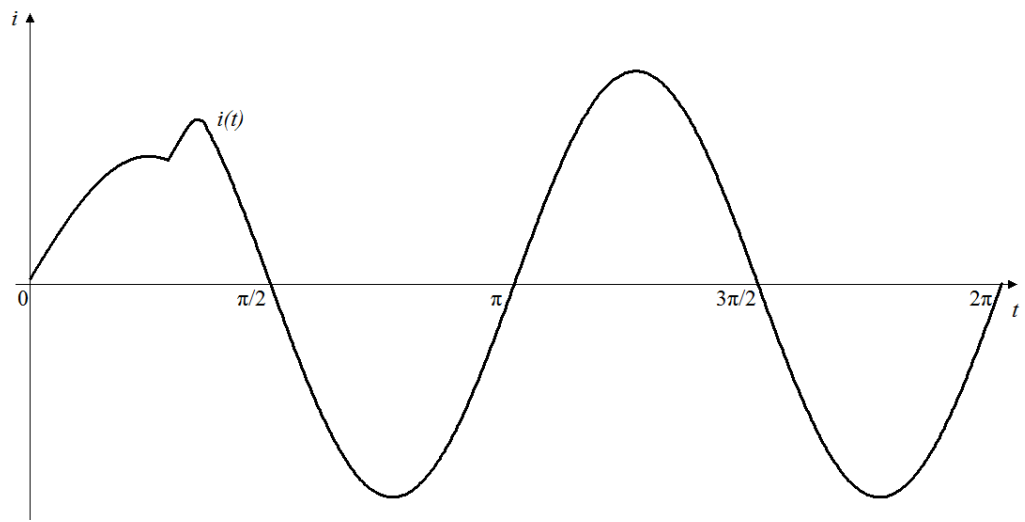
4.1. Розробка алгоритму компенсації для короткочасних перехідних процесів

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.

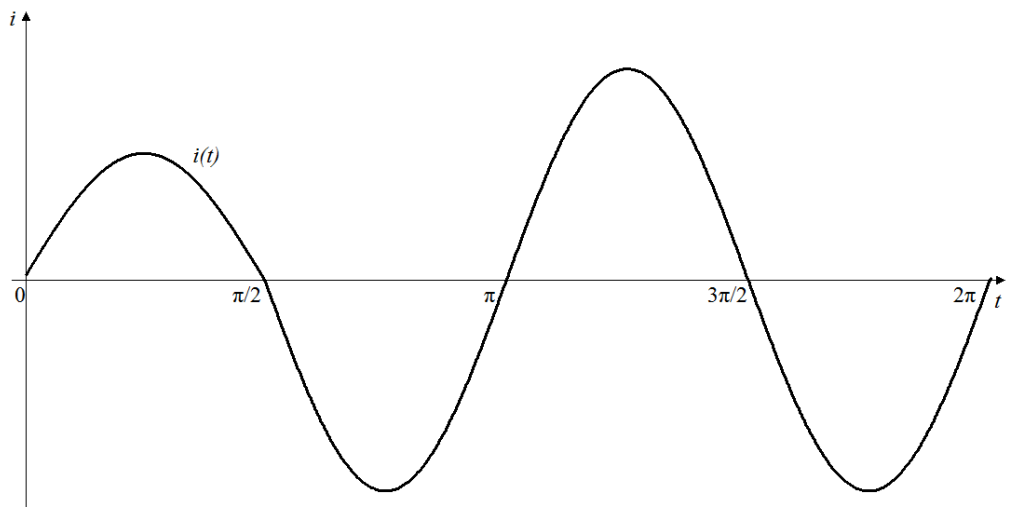
Діаграма компенсації короткотривалого перехідного процесу зображена на рис.4.1.

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].

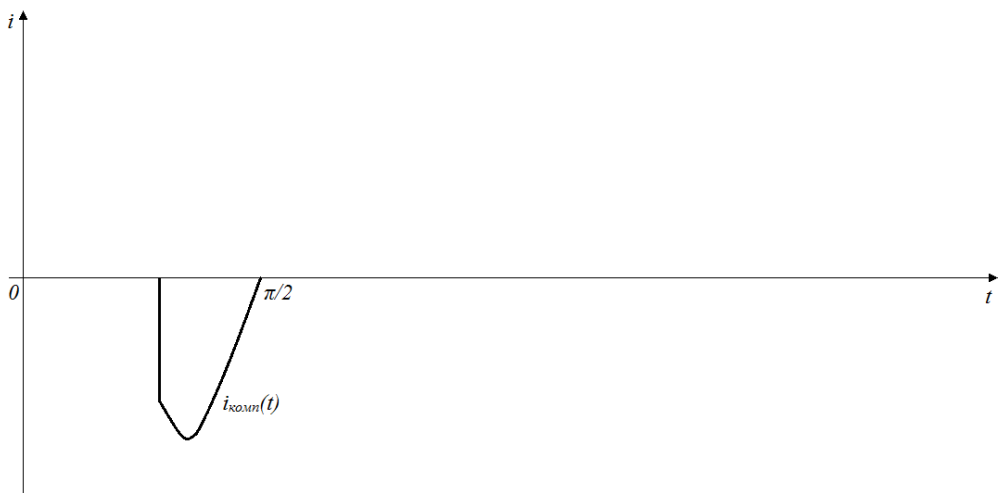
Інформація про форму струму в навантаженні знімається з двох давачів струму, що стоять безпосередньо на навантаженні і після основного компенсатора. Після того як відбулося збурення, давач струму фіксує зміну амплітуди струму і передає цю інформацію в систему керування, яка і формує струм, що буде протилежним за знаком, до струму збурення. В результаті накладання струму компенсатора і струму збурення в навантаженні буде формуватися синусоїдальна форма струму.



а)



б)



в)

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

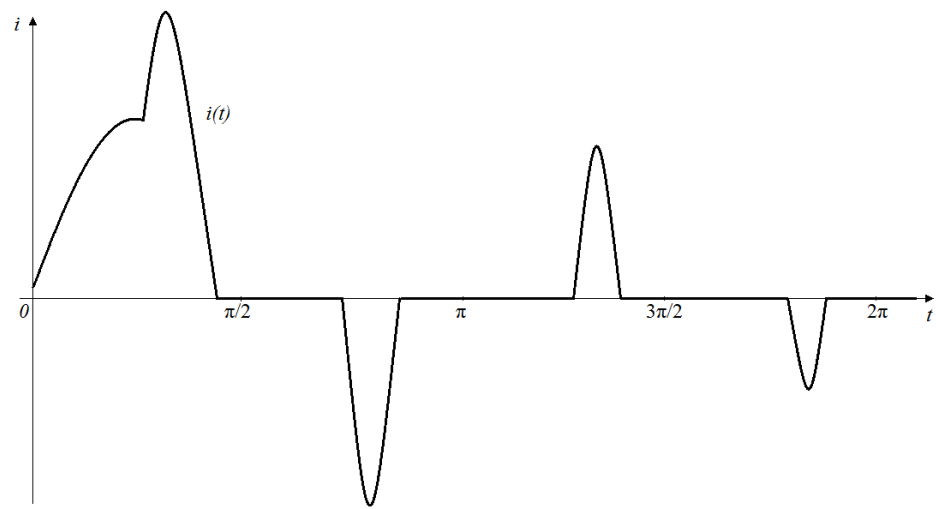
4.2. Розробка алгоритму компенсації для тривалих перехідних процесів

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.

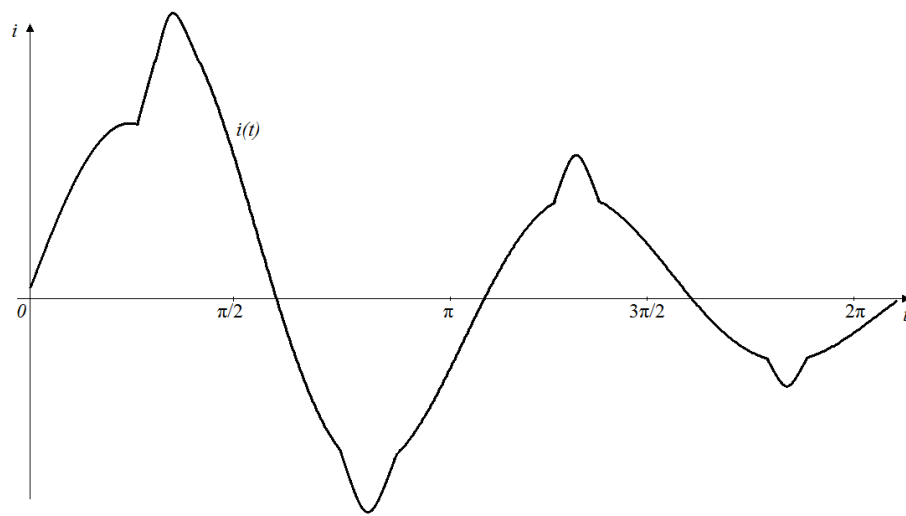
Як видно з рис.4.2(б) на інтервалі $0 - \pi/2$ з'явилося збурення, яке з часом затухало по експоненті таким чином, що час перехідного процесу виявився більшим періоду напруги мережі. Щоб компенсувати перехідний процес аналогічно до попереднього випадку, потрібно щоб була стаціонарність в зміні струму, 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 φ . Для цього потрібно зсувати форму струму, щоб різниця між струмом і напругою була якомога меншою[29].

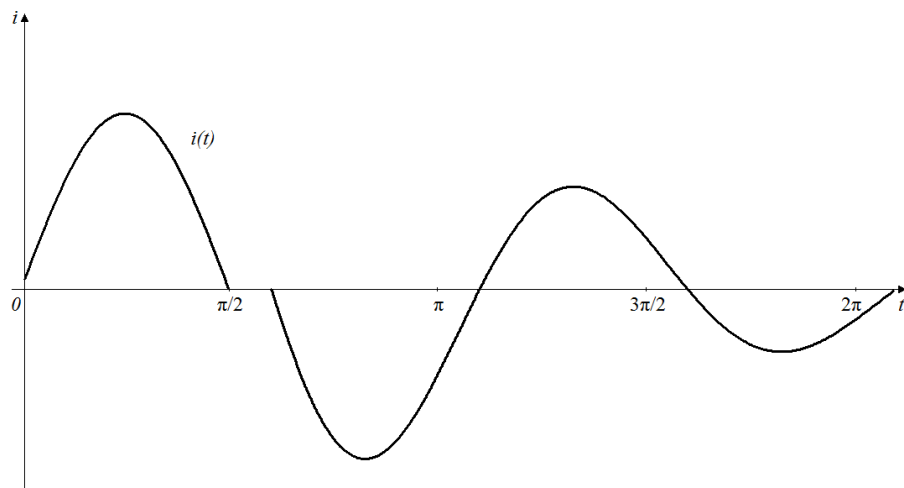
Для початку потрібно з'ясувати чи дійсно форма віддаляється від синусоїдальної, тобто ідентифікувати момент початку перехідного процесу. За допомогою давачів струму і мікроконтролера порівнюється поточне значення струму з тим, що було на попередньому періоді, якщо це значення відрізняється від еталонного,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



а)



б)



в)

Рис.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 φ , 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:

$$\int_0^{T/2} (I(t) - A_m \sin(\omega t + \varphi))^2 dt, \quad (4.1)$$

де $I(t)$ – струм перехідного процесу, A_m – амплітуда необхідної синусоїди, φ – 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 φ . Таким чином зменшуючи кут між напругою і струмом, можна компенсувати реактивну потужність.

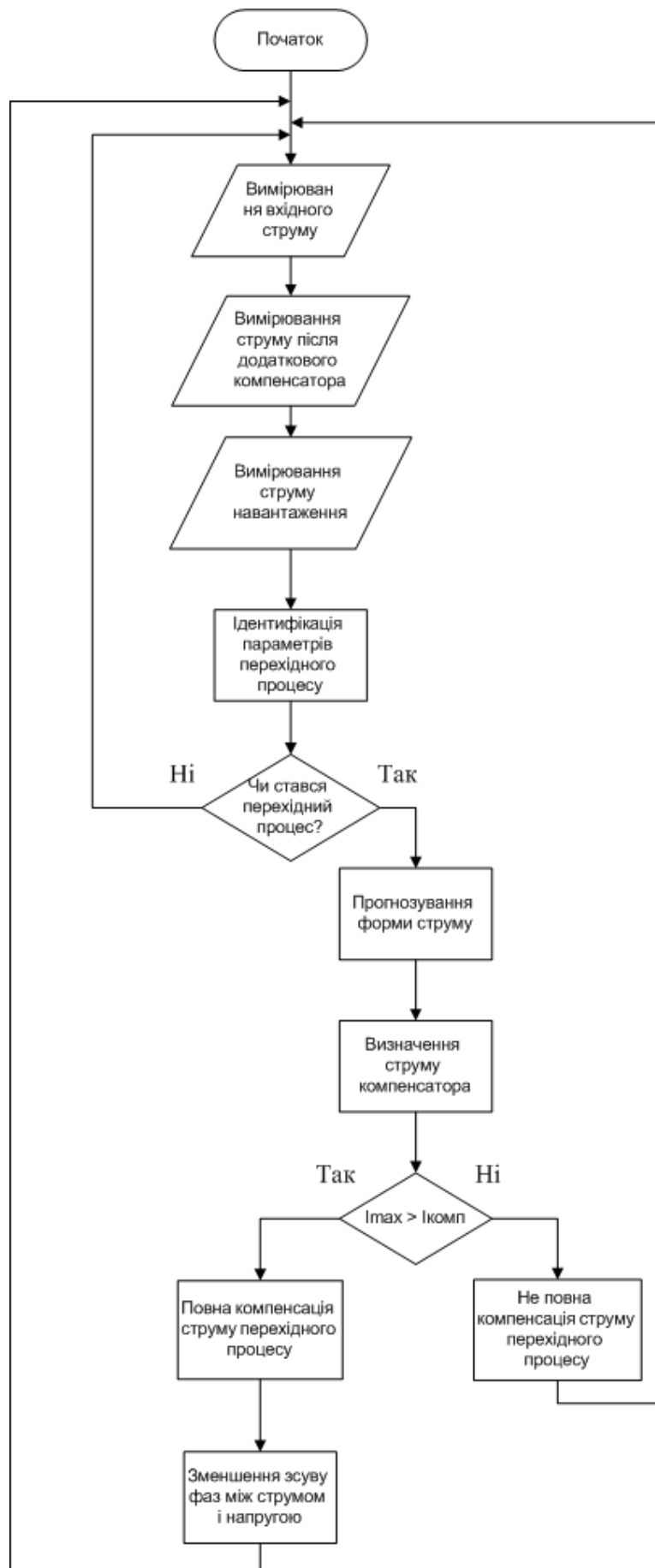


Рис. 4.3. Алгоритм компенсації довгого перехідного процесу

Висновки до розділу 4

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 φ .

5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

Стартап - це тільки що створена компанія (можливо навіть не є юридичною особою), яка знаходиться на стадії розвитку і будує свій бізнес на основі нових інноваційних ідей, або на основі технологій, які нещодавно з'явилися. Найчастіше, характерними особливостями стартапу є брак фінансів і нестійке майже «партизанське» положення фірми на ринку.

Основним ресурсом для створення нового стартапу служить хороша новаторська ідея. Власне за свіжими і незвичайними ідеями женеться більшість і часто, купуючи їх, не шкодують великі суми грошей. Сама ідея, що не має ніякого матеріального втілення, а існує тільки на папері, або "на словах" (план стартапу), може коштувати дуже багато. Іншим фактором успішності цієї ідеї є її затребуваність (ступінь необхідності для споживача), адже ідея може бути незвичайною і новою, але користі від неї буде мінімум.

Розробка та введення стартап-проекту на ринок передбачає собою багато здійснених кроків, де визначають ринкові графік, перспективи проекту, принципи організації виробництва аналіз ризиків та фінансовий аналіз і заходи з просування пропозиції для інвесторів.

Етапи розробки стартап-проекту

1. Маркетинговий аналіз стартап-проекту:

- опис ідеї проекту та визначення загального напрямку використання потенційного товару чи послуги, їх відмінність від конкурентів;
- аналіз ринкових можливостей реалізації проекту;
- стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту.

2. Організація стартап-проекту:

- план-графік реалізації стартап-проекту;
- основні засобах та нематеріальні активи;

- визначення планового обсягу виробництва потенційного товару, на основі чого відбувається формулювання потреби у матеріальних ресурсах та персоналі;

- розрахунок загальних початкові витрат на запуск проекту та планових загальногосподарських витрат, що необхідні для реалізації проекту.

3. Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту:

- обсяг інвестиційних витрат;

- розрахунок основних фінансово-економічних показників проекту та визначення показників інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту);

- визначення рівню ризику проекту, основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

4. Заходи з комерціалізації проекту:

- визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів;

- складання інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом;

- планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів;

- планування ресурсів для реалізації заходів з просування оферти.

Означені етапи, реалізовані послідовно та вчасно – створюють передумови для успішного ринкового старту. Проте фахівці зі створення та розвитку стартап-проектів окремо відзначають, що відсутність маркетингових знань та умінь, що уможливають розробку ринково затребуваного проекту із вихідної ідеї, є основною причиною високого рівня банкрутств стартап-компаній, і ця проблема може бути вирішена за рахунок навчання винахідників.

5.1. Опис ідеї проекту

В межах підпункту слід послідовно проаналізувати та подати у вигляді таблиці:

- зміст ідеї (що пропонується);
- можливі напрямки застосування;
- основні вигоди, що може отримати користувач товару (за кожним напрямком застосування);
- чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників;

Описані пункти наводяться в табл. 5.1.

Таблиця 5.1.

Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка алгоритму керування пристроями компенсації реактивної потужності	Промислова електроніка	Покращення якості електричної енергії

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціям иконкурентів передбачає:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї
- визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

•проводиться порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.2).

Таблиця 5.2.

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент1	Конкурент2	Конкурент3			
1.	Ідентифікація початку перехідного процесу	+	+	-	-		+	
2.	Прогнозування форми струму під час перехідного процесу	+	-	-	-			+
3.	Компенсація реактивної потужності в перехідних режимах	+	-	-	-			+

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 5.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/додати?

- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 5.3.

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Алгоритм компенсації реактивної потужності в перехідних режимах	Розробка алгоритму, дослідження	Наявна	Доступна

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів. Аналіз попиту наводиться в табл. 5.4.

Таблиця 5.4.

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	20
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Поступово зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Масове розповсюдження у вигляді програмного забезпечення
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Згідно з ДСТУ
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	80

Орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи клієнтів наводиться в табл. 5.5.

Таблиця 5.5.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Покращення якості електроенергії	Великі підприємства що займаються виготовленням електронної техніки	Експлуатація згідно сертифікаційних правил	- до продукції Надійність Якість Новизна - до компанії Економічність

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 5.6 – 5.7)

Таблиця 5.6.

Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Збій програмного забезпечення	Наявність нових вірусів, що можуть занести зміни у прошивку ПЗ	Заміна пакету ПЗ

Таблиця 5.7.

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Якість діагностики системи	Якісно написане програмне забезпечення	Залучення

Надалі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.8).

Таблиця 5.8.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Вказати тип конкуренції - чиста	В кого краще – в того і купують.	Покращення товару та обслуговування.
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний	Належить до вузького ринку збуту.	Розширення функціоналу та орієнтації користувачів.
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Притаманна лише в середині однієї галузі застосування.	Розширення функціоналу та галузей застосування.
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Відрізняється видом схеми електричної, підбором компонентів між конкурентами.	Розширення функціоналу пристрою.
5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	Чим дешевше – тим привабливіше, чим краще тим рентабельніше.	Зниження собівартості та покращення якості товару.
6. За інтенсивністю - не марочна	Не жорстка конкуренція.	Не агресивні форми піару.

Далі необхідно навести обґрунтування факторів конкурентоспроможності (табл. 5.9)

Таблиця 5.9.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Збільшення коефіцієнта потужності електромережі	Збільшення коефіцієнта потужності призведе до зменшення витрат на електроенергію, тому і привабить більше покупців

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 5.10)

Таблиця 5.10.

SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Алгоритм Менша потужність додаткового компенсатора	Слабкі сторони: Велика ціна
Можливості: Компенсація перехідних процесів на початку їх формування.	Загрози: Перегрів елементів системи. Встановлення додаткового компенсатора.

5.3. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.11).

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Ні	Так	Ні	агресивна

Важливим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 5.12 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.12

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Компенсувати реактивну потужність електромережі	Покращення якості електромережі; зниження плати за електроенергію	Підвищує коефіцієнт потужності на 1-5 %

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл.5.13).

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Немає	немає	Немає	5000/10000

Далі йде визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл.5.14):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Задоволення потреб в якості електричної енергії, підвищення коефіцієнту потужності, зниження витрат на електроенергію	Збут товару та задоволення запитуваних потреб клієнтів	Усі можливі канали збуту (глибока)	Власна
2		Збут та реклама товару та задоволення запитуваних потреб клієнтів	Усі можливі канали збуту (глибока)	Залучена

Висновки до розділу 5

У результаті маркетингового аналізу, можна зробити висновок, що при перспективі реалізації запропонованих науково-технічних рішень та пропозицій, оцінці можливості їх ринкового впровадження, можна стверджувати, що розроблений проект має можливість ринкової комерціалізації та може бути рентабельним проектом на ринку. Зростання попиту на покращення якості електроенергії додає масовості придбання подібних пристроїв, але створює жорсткі конкурентні умови виходу на ринок.

Наразі, проект має високі перспективи впровадження з огляду на сучасний стан електротехніки, що потребує нових економних рішень. Бар'єрами входження на ринок може бути відсутність початкового розуміння призначення цього ПЗ, сильний конкурентний тиск з боку фірм аналогічних продуктів, потреба у великій кількості кваліфікованих кадрів та дорогої точної апаратури. Але, при правильному розставленні пріоритетів, можна себе на ринку і перетворити стартап-проект на компанію, яка приносить прибуток.

Подальша імплементація проекту є доцільною та рентабельною.

ВИСНОВКИ

1. 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 на сьогоднішній день.

2. 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.

3. Розроблена модель компенсатора реактивної потужності в перехідних режимах в пакеті Matlab Simulink для дослідження основних характеристик в перетворювачі.

4. Наводиться структурна схема перетворювальної системи, на основі якої, була зібрана принципова.

5. 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. S. Fryze, "Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current," *Przeglad Elektrotechniczny*, no. 7-8, pp. 193-203, 1931.
2. C. I. Budeanu, 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, p. 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, p. 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, p. 1174–1181, November 1998.
6. Карташов Р.П. Тиристорные преобразователи частоты с искусственной коммутацией. – К.: Техніка, 1979. – 152 с.
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. Константинов Б.А., Зайцев Г.З. Компенсация реактивной мощности. – Л.: Энергия, 1976. – 101 с.
10. V. J. Romashko, I. V. Verbitsky and I. I. Kyrychik, «Anallz vtrat energli v sistemI vldboru 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 postiyogo 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

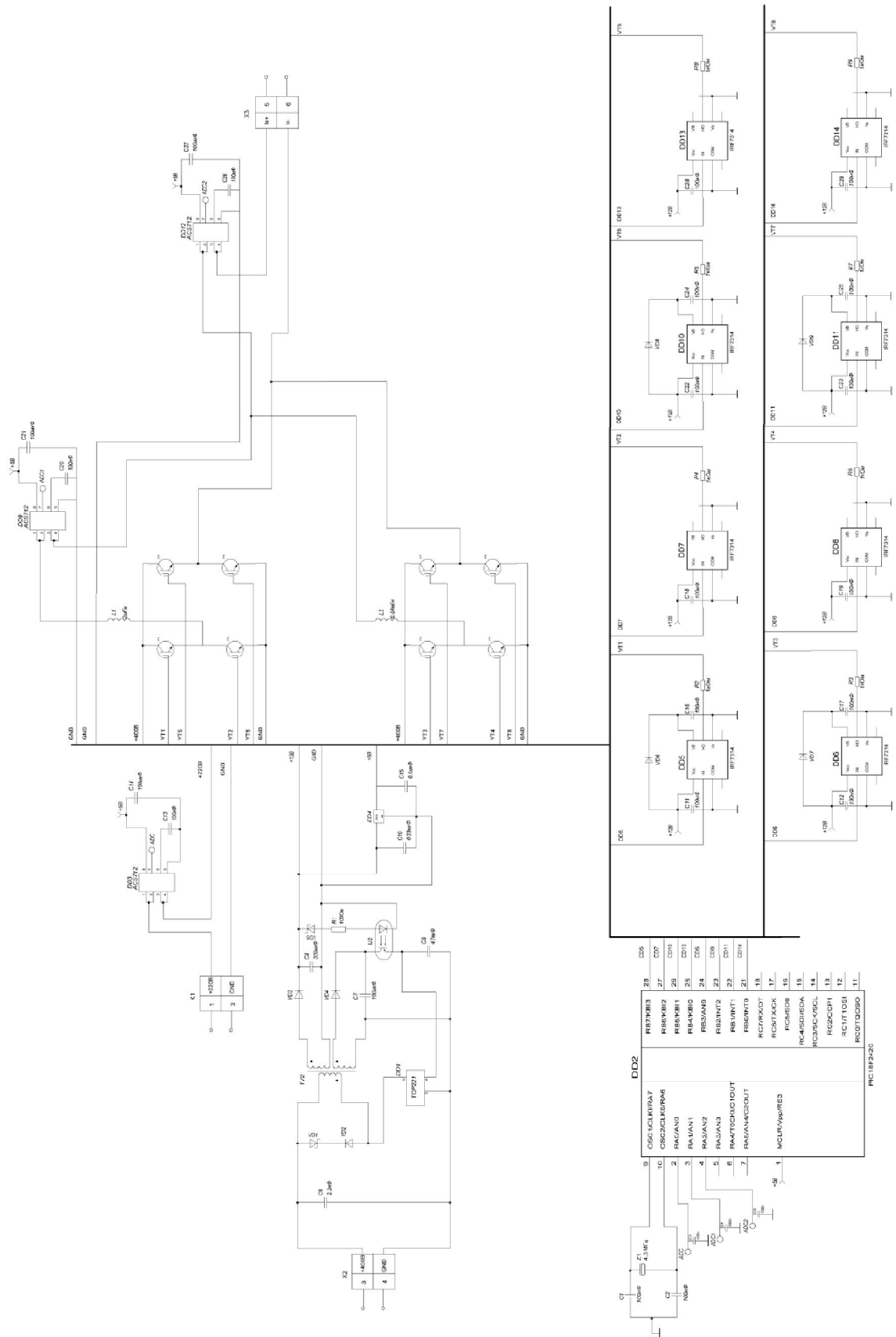
16. Czarnecki, Leszek S. Instantaneous Reactive Power p-q Theory and Power Properties of Three-Phase Systems / Leszek S. Czarnecki // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. - Vol. 21, № 1, P. 362-367. – doi: 10.1109/TPWRD.2005.852348.

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. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
28. Прибудько Р.М., Ходаков К.А. Компенсатор реактивной мощности, 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 «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2018.
30. Ion Boldea and S.A. Nasar. Electric drives. 2nd edition, CRC Press, 2006, 518 p.
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. Gyugyi, Laszlo. Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems. IEE proceedings (generation, transmission and distribution). IET Digital Library, 1992. Pp. 323-331. DOI: 10.1049/ip-c.1992.0048.
34. В.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк и др. Баланс энергий в электрических цепях. Киев: Наук. думка, 1992. – 312 с.
35. Я. З. Цыпкин. Релейные автоматические системы. Главная редакция физико-математической литературы, изд-во «Наука», М., 1974, 576 с.

СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ



ACTUAL REPAYMENT POWER PAYMENT

INTRODUCTION

The problem of reactive power compensation (PFC) has always occupied an important place in the overall set of issues of increasing the efficiency of transmission, distribution and consumption of electric energy. The correct solution to such problems largely determines the savings of monetary and material resources, and the improvement of the quality of electricity supply. The main issues of compensation of reactive power should be considered taking into account modern views and taking into account new technical solutions in this area.

Electrical installations, in general, can consume both active and reactive components of full power and electrical energy. The active component is that part that goes on to create a useful work and is connected with the conversion of electrical energy to other types of energy (mechanical, thermal, light, etc.).

The reactive power Q can be considered as a characteristic of the energy exchange rate between the generator and the magnetic field of the electric receiver. Unlike active power, which is useful in operation, reactive power does not perform useful work; it serves only for the creation of magnetic fields in inductive receivers (for example, in electric motors, transformers, etc.), circulating all the time between the current source and receivers.

From the above, it is obvious that the traditional term "consumers of reactive power", widely used by electricians in everyday practice and in technical literature, is a conditional term that does not reflect the physical nature of reactive power. The term "inductive energy receivers" is more correct, and in some cases the term "reactive loads" may be used.

Particularly relevant problem of compensation of reactive power acquired after introduction in 1991. direct payment for the consumption of reactive energy in hours of maximum load and its generation in the electrical grid in hours of minimum (instead of the existing system of allowances and discounts to active energy tariffs). Continuous growth of electricity tariffs and compensation prices

requires careful analysis of their correlation and new approaches to assessing the feasibility of applying reactive power compensation in each case.

The acuteness of the problem of compensation of reactive power at the present stage is caused by a number of circumstances:

- concentration and centralization of generating sources. The transfer of cheap reactive power from power generators to the consumer over high and high voltage transmission lines has become economically inappropriate;
- implementation of resource and energy saving policies. Optimization of reactive power, including through local compensating devices, allows to significantly reduce power losses and electric energy in networks;
- increase of the requirements for the quality of electric energy in accordance with the norms ГOCT13109-97. The reactive power significantly influences changes in the voltage regime in electric networks;
- insufficient installed capacity of compensating plants in power and distribution electrical networks.

The reactive power, proceeding on the elements of the electric network, having an active resistance, causes them additional losses of power and electric energy. In addition, the flow of reactive power reduces the throughput of power lines and transformers, or forced to increase the intersection of wires, laying of additional cable lines, replacement of transformers at a high nominal power. But the values of jet power flows can be reduced and even completely eliminated by means of capacitors installed directly in the places of reactive power consumption. The exchange of energy, in this case, will occur between the inductance and the capacity of the circuit. Between the inductance of the same source and the energy will be exchanged only uncompensated part of the energy.

In networks with nonlinear load with appreciable non-sinusoidal current and voltage there is reactive power distortion, which does not allow to conduct analysis as for circles with linear loading. To analyze the modes in such networks requires special approaches. Let's consider the features of compensation of reactive power in linear and nonlinear circles.

Features of reactive power compensation for linear and nonlinear circles

As noted above, the jet stream loads additional power lines, which leads to an increase in capital expenditures on external and internal network sites. The reactive and active power is taken into account by the energy supplier and is subject to payment for user-connected tariffs. Thus, reactive power accounts for a significant part of the electricity bill. Therefore, it is necessary to understand what is caused by the appearance of reactive power and how it can be reduced.

Consider the case when a voltage $e(t)$, equal to $e(t) = U_m \sin(\omega t)$, is applied to a linear jet load. Through the load flows a current shifted relative to the voltage at the angle φ . For an inductive load, the angle φ will be within $0 < \varphi < 180$, and for capacitive load - $180 < \varphi < 360$. Thus, the current through the load will be described by the formula and $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$. The instantaneous value of the power on the load $s(t)$ is calculated by the formula:

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

Based on this formula, one can see that the instantaneous power is the difference between the active power P , which is consumed by the load and the reactive Q circulating in the circle and does not perform any useful work. Let's consider the course of electromechanical processes in the linear circuit, as shown in Fig. 1.1.

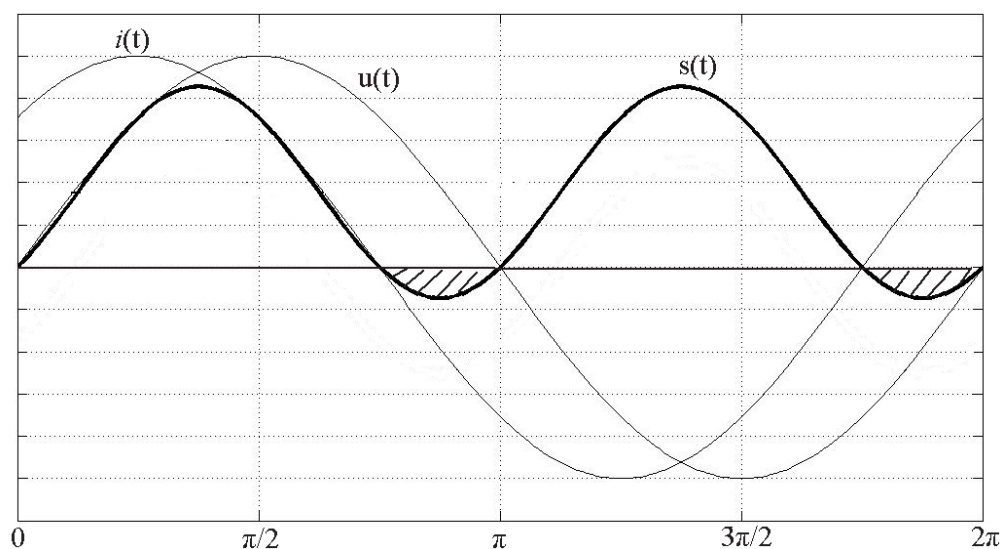


Fig. 1.1. Diagrams of electromagnetic processes in a linear circuit

As can be seen from Fig. 1.1. the total power in certain areas is negative, which corresponds to the transfer of energy from the load back to the source. Since the total power S corresponding to the power of the source is equal to the product of the values of current and voltage at its terminals $S = U \cdot I$, and the active power is equal to $P = U \cdot I \cos(\varphi)$, it can be deduced that the load receives less power than that selected from the source. This is due to the presence of a reactive component causing phase shift between current and voltage and as a consequence of the deviation of $\cos(\varphi)$ from zero. Removal of the reactive power component is achievable subject to the coordination of the reactive components of the source and load resistance: $X_i = -X_H$. In this case, the phase shift between the current and the load voltage is absent.

Let us represent the total power as consisting of active $p(t)$ and reactive $q(t)$ constituents in steady state:

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

where $s(t) = e(t) \cdot i(t)$ is the instantaneous power, $e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi)$ is the function of the instantaneous values of the network voltage, $i_a(t)$, $i_p(t)$ is active and reactive components of the network current:

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

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

Analyzing the formulas above, one can conclude that the active component of the current is the common-mode voltage of the network, the reactive - shifted by 90° relative to the voltage of the network.

In contrast to the linear circuits, the current in the nonlinear has no sinusoidal shape. Therefore, in order to compensate for reactive power for such circles, it is necessary to compensate the reactive power of the first harmonic and also compensate for all higher harmonics.

The diagram explaining the compensation process is shown in Fig. 1.2.

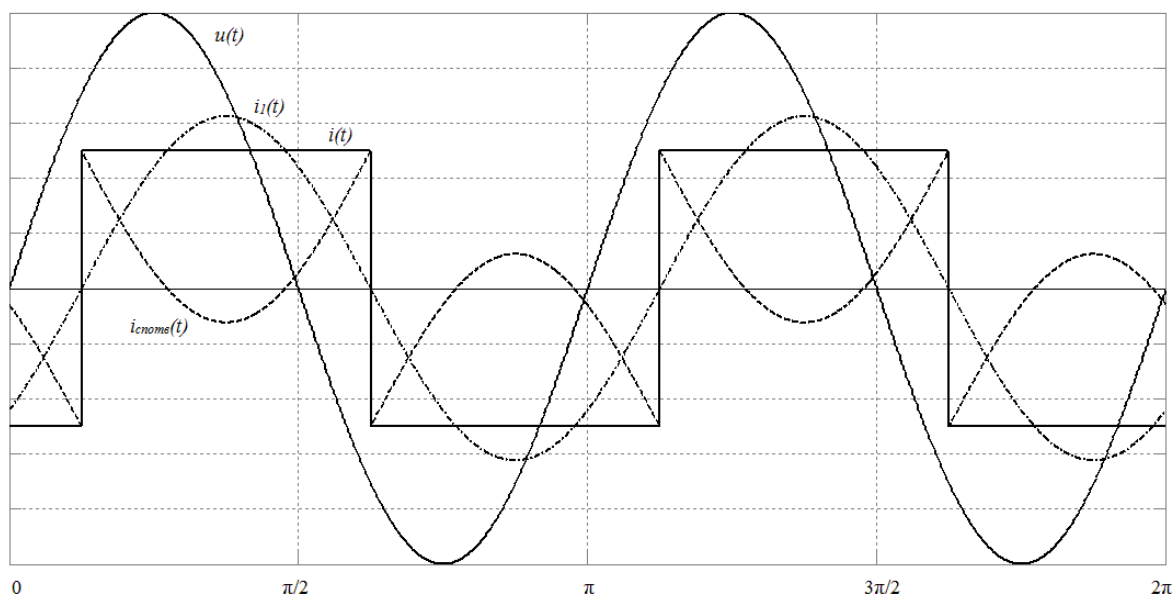


Fig. 1.2. Diagrams of electromagnetic processes in a nonlinear circuit

The diagram shows the voltage of the network $u(t)$, the current of the network $i(t)$ and its constituents the first harmonic of the current $i_1(t)$ and the current distortion of the current $i_{cnome}(t)$.

In accordance with the above explanations, it is necessary to compensate the main component $i_1(t)$ according to the formulas (1.3, 1.4) and completely compensate for the current distortion of the current $i_{cnome}(t)$.

The task of studying transients is to find out by what law and how long will be observed a significant deviation of currents in the branches and stresses on the sections of the chain from their constant values. The stable mode after the switching is calculated with the theoretical condition $t \rightarrow \infty$, that is, when the switching took place indefinitely.

Sustained switching mode is usually based on the assumption that prior to switching in the circuit the previous transition process has ended. Although it is sometimes necessary to analyze the transient processes occurring in the chain, when the previous transition, caused by the former commutes, has not yet ended. But this does not change the theoretical statement of the problem.

The analysis of transient processes is made by solving the differential equations compiled for the investigated electric circuit on the basis of Kirchhoff's laws or the method of contour currents.

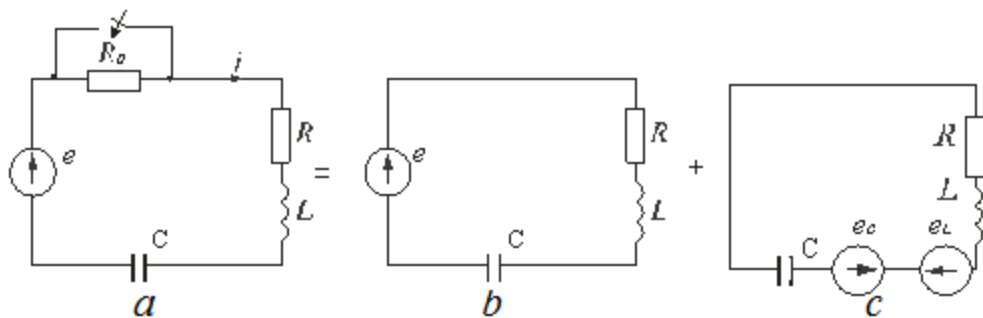


Fig.1.3. Electric circle with transient processes

Let in some circuit (Fig. 3.1a) suddenly changes resistance. Before the commutation in the chain there were supports R_0 and R , after the switching remains only R . It is necessary to determine the transitional current i . The electric state of the circuit after the commutation is described by integrodifferential equations, written on the basis of the Kirchhoff law II for instantaneous values of currents and voltages:

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

If this equation is differentiated in time, we obtain the linear differential equation of the second order, which as the constant coefficients are the parameters of the chain or their combination:

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

It is known that the complete solution of the linear differential equation with constant coefficients is found as the sum of the partial solution of the nonhomogeneous and general solution of the corresponding homogeneous equation.

Since the right side of the differential equations describing the electric state of the circuits is usually the voltage (or current) of the source (external driving force),

a partial solution is obtained from the analysis of a stable mode after switching. Hence, this mode is called forced and accordingly the currents or voltages found in this mode are called forced. Calculation of the forced mode, when external sources produce a constant or sinusoidal eh. (current), does not cause difficulties and can be accomplished by any known method.

Homogeneous differential equations are derived from the expression (1.6) by "liberating" it from the right side. Physically, this means that the investigated chain is "freed" from external driving forces. The voltages or voltages found in solving a homogeneous differential equation are called free. Free currents and voltages are the result of the action of internal sources of the circuit: e.r.s. Self-induction occurring in coils, and voltages on condensers, when both those and others are not balanced by external sources.

Schematically, the analysis of the transient process can be presented as a result of imposing two modes: forced and free. The scheme in Fig.1.3b should be calculated in a steady (forced) mode, and the circuit in Figure 1.3 - in the mode when the circuit is released from external sources. The network current can be represented as a result of the imposition of two components: forced and free and will:

$$i_M(t) = i_{\text{forced}}(t) + i_{\text{free}}(t). \quad (1.7)$$

Note that physically there are only transient currents and voltages, and their decomposition into free and forced components is a mathematical technique that allows simplification of the calculation of transients in linear circuits. Recall that the superposition principle can only be applied to linear circuits.

There are various methods for solving a homogeneous differential equation derived from expression (1.6):

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

The classic method for analyzing transient processes is the direct integration of differential equations. Solutions are found in the amount of exponents:

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

where the number of terms is equal to the order of the differential equation.

After substituting $A_k \cdot e^{p_k t}$ in the original equation (1.7) and differentiating it is possible to obtain the characteristic equation from which the roots p_1, p_2 are determined. If the studied circle is zero order, then there will only be an ingredient present. When the studied circle - the first order, then there will be a component and only one exponent, that is, the equation will have one root. If there are multiple roots (for example, $p_1 = p_2 = p$), the solution looks like $A_1 \cdot e^{p t} + A_2 \cdot p t$.

Continuous integration of A_1, A_2 is derived from the initial conditions, which are determined by the laws of commutation. There are independent and dependent (after switching) initial conditions. The first is the value of the currents due to the inductance and the value of the voltages on the capacitors known from the switching mode of the circuit.

The values of other currents and voltages at $t = 0$ in the after-switching scheme, which are determined by an independent initial value from Kirchhoff's laws for the circuit after switching, are called dependent initial values.

In the case of linear loading and sinusoidal form of network voltage, the expression for them (t) can be rewritten in the form:

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

where I_m is the amplitude of the forced current component, ω, ψ is the angular frequency and the initial phase of the network voltage, φ is the angle of phase shift between the current and voltage of the network in the steady state, n is the order of the equivalent load scheme, C_k is the integration, p_k is the root of the characteristic equation.

The nature of the transition process essentially depends on the order of the chain n . Typical forms of transient processes for $n = 0, 1, 2$ are shown in Fig. 1.4. For values $n > 2$, the nature of the transient processes is analogous to the transient process for $n = 1$ or $n = 2$, or is a combination of them.

If the chain consists only of resistive elements, the change of its mode of operation occurs instantaneously (Fig.1.4a).

For the first-order circuit, the form of the transition process is shown in Fig.1.4b. If at the moment of inclusion, the constant current has the highest value (i_{max}), the free current reaches the maximum value modulo in about half the period, but under no circumstances can it exceed the double amplitude of the steady current. The nature of the change u_c and i_c in the RC circle is similar to the nature of the change of i_L and u_L in the RL circle, which follows from the duality of the inductance and capacitance, as elements of the electric circuit.

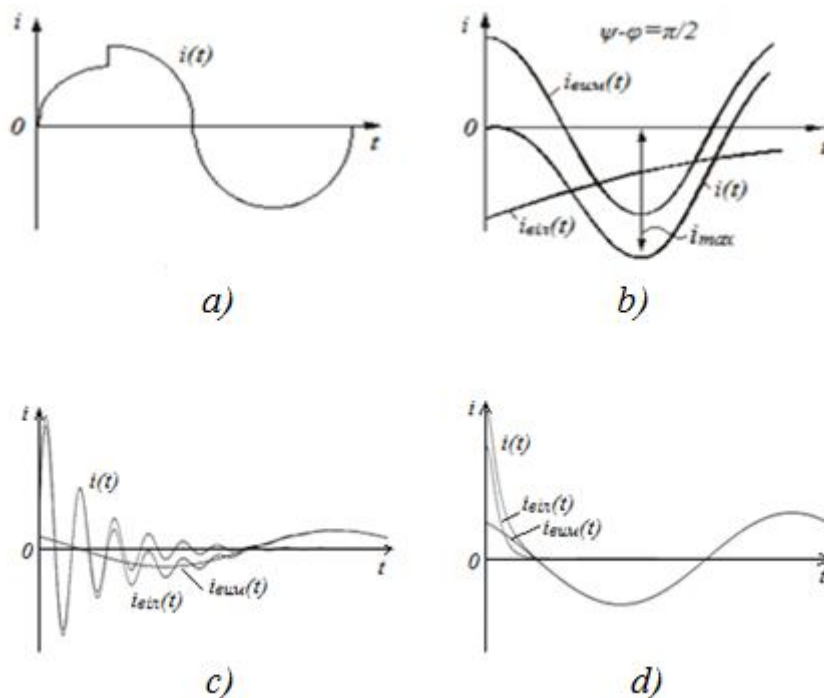


Fig.1.4 Typical forms of transients at zero (a), first (b) and second order (case of simple poles (c), case of complex conjugate poles (d)) chain

In the second-order circuit, the form of the transition process of which is depicted in Fig. 4v, it is obvious that, at each interval of time, the enveloping amplitudes of the oscillation decreases e -times. The number of periods of free oscillation is numerically equal to the quality factor of the oscillatory circuit. The nature of the transient process in the contour substantially depends on its resistance

to the losses of R. The processes have aperiodic character. When there are oscillations in the circuit, the number of which increases with decreasing R.

In fig. 1.4g is a graph of the free component of the current (voltage) in the case of oscillatory process of its extinction.

In the ideal case it is necessary to completely compensate for the free component, but in practice it is not appropriate to do this for several reasons. First, it is impossible to immediately identify the value of the free component, so such compensation will not be accurate. Secondly, the free component may have high power, which will increase the power of the compensator and, consequently, increase the cost. Therefore, it is advisable to use a new approach to reactive power compensation, which will involve the development of a less powerful compensator with a simple implementation and effective control algorithm.

Conclusions

The study showed that all the considered methods are imperfect, since during the transient process the current can vary considerably and therefore, with full compensation of reactive power, the installed power of the compensator will be used inefficiently.

To reduce the power of the compensator, you need to analyze the possible forms of the transition process and determine the criteria for the effective use of the power compensator.

Also, typical graphs of transition processes for zero, first and second order were derived. Researches may be needed in the further analysis of transients and improved utilization of the power of the reactive power compensator.