

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

**Навчально-науковий інститут енергозбереження та  
енергоменеджменту**

**Кафедра електропостачання**

«На правах рукопису»

УДК 621.311.24+621.355

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Дерев'янку Д.Г.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022р.

**Магістерська дисертація**

**зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
спеціалізації Системи електропостачання**

на тему: «Підвищення ефективності функціонування системи електрична  
мережа – гібридний фільтр – змінне навантаження»

Виконав: студент 2 курсу, групи ОЕ-11мп

Галаган Ілля Валерійович

Науковий керівник:

д.т.н., доц. Белоха Г. С.

Консультант з нормоконтролю:

ас. Прокопенко І.Д.

Рецензент:

д.т.н., доц. Белоха Г. С.

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2022 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Навчально-науковий інститут енергозбереження та  
енергоменеджменту**

**Кафедра електропостачання**

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

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Системи забезпечення споживачів електричною енергією»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_Дерев'янку Д.Г.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Галагану Іллі Валерійовичу

1. Тема дисертації: Підвищення ефективності функціонування системи електрична мережа – гібридний фільтр – змінне навантаження

науковий керівник дисертації: д.т.н., доц. Белоха Галина Сергіївна

затверджені наказом по університету від «09» листопада 2022 р. № 4127-с

2. Термін подання студентом дисертації: «18» грудня 2022 р.

3. Об'єкт дослідження: процеси електроспоживання в офісному будинку.

4. Вихідні дані: процеси в системах електропостачання з нелінійним навантаженням.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- Розгляд існуючих засобів та методів компенсації;
- Аналіз активних та пасивних схем компенсації реактивної потужності;
- Вибір схеми компенсатора реактивної потужності на базі гібридних фільтрів та розробка системи керування;
- Розробка цифрової моделі системи електропостачання з нелінійним навантаженням та компенсатором;
- Дослідження системи компенсації реактивної потужності при різних нелінійних навантаженнях;
- Аналіз показників якості електроенергії без компенсації та з нею.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація – наочні матеріали за результатами дослідження, алгоритми розрахунків та таблиці з отриманими результатами.

7. Перелік публікацій:

Галаган І.В. Дослідження активного гібридного фільтру як компенсатора впливу реактивної потужності у розподільній мережі. // Збірник матеріалів і тез конференції «XIV МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА»» – Київ, 2022.

8. Консультанти розділів дисертації:

Нормоконтроль

ас. Прокопенко І.Д.

9. Дата видачі завдання: 30 травня 2022 року

## Календарний план

	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Визначення мети, об'єкту, предмету дослідження.	30.05.2022-2.06.2022	
2.	Визначення попередньої структури дисертації	02.06.2022-06.06.2022	
3.	Огляд літератури та робота над першим розділом	06.06.2022-06.07.2022	
4.	Аналіз водневих технологій та робота над другим розділом	06.07.2022-06.08.2022	
5.	Проведення розрахунків та робота над третім розділом	06.08.2022-02.11.2022	
6.	Розробка стартап-проекту	02.11.2022-15.11.2022	
7.	Оформлення дисертації	15.11.2022-25.11.2022	
8.	Оформлення реферату та презентації, проходження перевірки на плагіат та рецензування	25.11.2022-09.12.2022	
9.	Передзахист МД	10.12.2022-14.12.2022	
10.	Захист дисертації	17.12.2022-20.12.2022	

Студент

Галаган І.В.

Науковий керівник дисертації

Белоха Г. С.

## РЕФЕРАТ

Тема магістерської дисертації «Підвищення ефективності функціонування системи електрична мережа – гібридний фільтр – змінне навантаження». Він містить 91 сторінку, 31 рисунок, 10 таблиць і 33 бібліографічних найменувань за переліком посилань.

**Актуальність теми.** Одними з основних існуючих енергетичних проблем в українських регіонах, являється збільшенням енергоресурсів і великі втратами електроенергії, а також якість електричної енергії. Для того щоб вирішити це питання в нашій країні та в усьому світі, необхідно запровадити систему, яка дозволяє вирішувати основну проблему погіршення якості електричної енергії – гармонійні спотворення. Найкращим варіантом вирішення цієї проблеми є запровадження в системи електропостачання гармонійних силових фільтрів, які дозволяють вирішити проблему коливань та збереження якості електричної енергії. Організації, які займаються виробництвом, передачею та споживанням енергетичних продуктів, а також комерційним і житловим будівництвом між постачальниками та споживачами енергетичних продуктів вже використовують системи активних силових фільтрів та пасивних силових фільтрів. Дана робота розглядає поєднання цих фільтрів в систему гібридного силового фільтра, яка вже розповсюджена в світовій електромережі, але маловідома в Україні.

За допомогою системи гібридного силового фільтра можна поєднати всі переваги активного та пасивного силового фільтра, але залишається тільки проблема в дороговартості самої системи, хоча покращення якості електричної енергії в значній мірі збільшить термін експлуатації електроустаткування та побутових електричних приладів.

На ринку вже існує велика кількість різноманітних систем фільтрації гармонійних коливань. Кожна компанія, яка пропонує свій продукт, описує його характеристики, функції та послуги. Для вибору необхідних систем

фільтрації, які відповідають потребам споживачів електричної енергії, необхідно визначити ступінь гармонійних відхилень.

**Мета дослідження.** Метою є дослідження компенсації реактивної потужності на базі гібридних фільтрів в розподільних системах з нелінійним навантаженням.

**Задачі дослідження.**

- розгляд існуючих засобів та методів компенсації;
- аналіз активних та пасивних схем компенсації реактивної потужності;
- вибір схеми компенсатора реактивної потужності на базі гібридних фільтрів та розробка системи керування;
- розробка цифрової моделі системи електропостачання з нелінійним навантаженням та компенсатором;
- дослідження системи компенсації реактивної потужності при різних нелінійних навантаженнях;
- аналіз показників якості електроенергії без компенсації та з нею.

**Об'єкт дослідження** – Процес передачі електроенергії від розподільчої мережі до побутових споживачів.

**Предметом дослідження** є система гібридний активний фільтр-нелінійне навантаження.

**Методи дослідження.** Дослідження проводилися за допомогою методів теорії електричних кіл, теорії автоматичного керування. Для цифрового моделювання використано програмне забезпечення Matlab.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

Розроблено гібридний активний фільтр та система керування, для забезпечення повної компенсації реактивної потужності нелінійного навантаження;

Розроблено цифрову модель системи мережа-гібридний фільтр - нелінійне навантаження для аналізу режимів роботи та якості електричної енергії.

**Практичне значення одержаних результатів.** Включає розробку цифрова модель, яка дозволяє вивчати та досліджувати компенсацію реактивної потужності нелінійним навантаженням та вплив її на показника якості електроенергії.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дослідження були оголошені на науково-технічній конференції «XIV МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА», V Науково-технічна конференція магістрантів.

### **Публікації**

Галаган І.В. Дослідження активного гібридного фільтру як компенсатора впливу реактивної потужності у розподільній мережі. // Збірник матеріалів і тез конференції «XIV МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА»» – Київ, 2022.

Галаган І.В. Підвищення ефективності функціонування системи електрична мережа – гібридний фільтр – змінне навантаження Яровий І.П. Підвищення ефективності інверторів в сонячних електростанціях . V Науково-технічна конференція магістрантів, м. Київ, 13 груд. 2022 р.

**Ключові слова:** РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ, РОЗПОДІЛЬНА МЕРЕЖА, ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ГІБРИДНІ СИЛОВІ ФІЛЬТРИ, КОМПЕНСАЦІЇ ВПЛИВУ, ЦИФРОВА МОДЕЛЬ СЕП.

## ABSTRACT

The theme of the master's thesis is "Improving the efficiency of the system electric network - hybrid filter - variable load". It contains 91 pages, 31 figures, 10 tables and 33 index contents.

**Relevance of the topic.** One of the main existing energy problems in Ukrainian regions is the increase of energy resources and large losses of electricity, as well as the quality of electricity. In order to solve this issue in our country and all over the world, it is necessary to introduce a system that allows to solve the main problem of deterioration of electric power quality - harmonic distortion. The best way to solve this problem is to introduce harmonic power filters into power supply systems, which allow solving the problem of fluctuations and preserving the quality of electricity. Organizations involved in the production, transmission and consumption of energy products, as well as commercial and residential construction between suppliers and consumers of energy products already use systems of active power filters and passive power filters. This paper considers the combination of these filters into a hybrid power filter system, which is already common in the global power grid, but little known in Ukraine.

With the help of the hybrid power filter system it is possible to combine all the advantages of active and passive power filters, but the only problem is the high cost of the system itself, although the improvement of the quality of electrical energy will significantly increase the service life of electrical equipment and household electrical appliances.

There are already a large number of different harmonic oscillation filtering systems on the market. Each company that offers its product describes its characteristics, functions and services. To select the necessary filtration systems that meet the needs of electricity consumers, it is necessary to determine the degree of harmonic deviations.

**The purpose of the study.** The aim is to study the reactive power compensation based on hybrid filters in distribution systems with nonlinear load.

**Research tasks.**

- consideration of existing means and methods of compensation;
- analysis of active and passive reactive power compensation schemes;
- selection of reactive power compensator circuit based on hybrid filters and development of control system;
- development of digital model of power supply system with nonlinear load and compensator;
- study of reactive power compensation system under different nonlinear loads;
- analysis of power quality indicators without compensation and with it.

**Object of study** - the process of electricity transmission from the distribution network to household consumers.

**The subject of the research** is the hybrid active filter-non-linear load system.

**Research methods.** The research was carried out using the methods of the theory of electric circuits, the theory of automatic control. Matlab software was used for digital modeling.

**Scientific novelty of the obtained results:** A hybrid active filter and control system have been developed to ensure full compensation of the reactive power of the non-linear load; A digital model of the network-hybrid filter - non-linear load system has been developed for the analysis of operating modes and quality of electrical energy. Approbation of the results of the dissertation.

**The results of the research** were announced at the scientific and technical conferences: V Scientific and technical conference of master's

students, XIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE "ENERGY. ECOLOGY. PEOPLE" - Kyiv, 2022.

**Publications.** 1. Halahan I.V. Study of the active hybrid filter as a compensator of the influence of reactive power in the distribution network. // Collection of materials and theses of the conference "XIV INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE "ENERGY. ECOLOGY. PEOPLE" - Kyiv, 2022.

2. Halahan I.V. Increasing the efficiency of the electrical network system - hybrid filter - variable load Yarovy I.P. Increasing the efficiency of inverters in solar power plants. V Scientific and technical conference of master's students, Kyiv, December 13. 2022.

**Keywords:** *REACTIVE POWER, DISTRIBUTION NETWORK, POWER QUALITY INDICATORS, HYBRID POWER FILTERS, IMPACT COMPENSATION, DIGITAL MODEL OF EPS, THD.*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	13
ВСТУП.....	14
1 ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА СПОСОБИ ЇЇ ПОЛІПШЕННЯ.....	21
1.1 Виміри параметрів якості електроенергії .....	22
1.2 Показники якості електричної енергії.....	23
1.3 Наслідки погіршення якості електроенергії.....	25
1.3.2 Вплив і наслідки спотворення струму. ....	27
1.3.3 Падіння напруги в мережі живлення та резонансні явища.....	28
1.4.1 Прийнятний THD .....	29
1.4.2 THD в системах гарантованого електропостачання.....	30
Висновки до розділу.....	30
2 ПРИСТРОЇ, ПРИЗНАЧЕННІ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ .....	31
2.1. Пасивні фільтри гармонічних коливань .....	32
2.2 Активні фільтри для гармоніювання електроенергії.....	33
2.2.1 Трифазні ШІМ-перетворювачі з джерелом напруги та джерелом струму .....	36
2.2.2 Трифазні активні фільтри .....	37
2.2.3 Тенденції в області чистих активних фільтрів.....	40
2.3 Гібридні активні фільтри для фільтрації гармонік .....	41
2.3.1 Конфігурація ланцюгів .....	41
2.3.2 Експериментальні форми хвиль .....	43
2.4 Низьковольтні безтрансформаторні гібридні активні фільтри .....	46
2.4.1 Гібридний активний фільтр 480 В .....	46
2.5 Порівняння та дослідження активних та гібридних силових фільтрів для компенсації мережевих гармонік.....	48
2.5.1 Системи АСФ та ГСФ та нелінійні навантаження .....	48
2.5.2 Аналіз кВА рейтингів на АСФ та ГСФ .....	53
2.5.3 Порівняння номінальних характеристик інверторів ГСФ та АСФ .....	56
2.5.4 Аналіз та порівняння рівнів напруги постійного струму.....	61

Висновки до розділу.....	64
<b>3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ І АНАЛІЗ РОБОТИ ПАСИВНОГО ФІЛЬТРА ГАРМОНІК.....</b>	<b>65</b>
3.1 Дослідження схеми гібридного фільтру .....	65
3.2 Розрахунок пасивної частини гібридного фільтру .....	66
3.3 Цифрове моделювання .....	72
Висновки до розділу.....	77
<b>4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....</b>	<b>77</b>
4.1 Опис ідеї проекту .....	77
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту .....	79
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	80
4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	82
4.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	83
Висновки до розділу.....	86
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>87</b>
<b>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>88</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

**СЕС** – Система електропостачання

**ТНД** – Загальне гармонійне спотворення

**АСФ** – Активний силовий фільтр

**ПСФ** – Пасивний силовий фільтр

**ГСФ** – Гібридний силовий фільтр

**АВН** – Активний випрямляч напруги

**АВС** – Активний випрямляч струму

**IGBT** – Біполярний транзистор з ізольованим затвором

**ШИМ** – Широтно-імпульсна модуляція

**DC** – Постійний струм

**AC** – Змінний струм

**ТНД-F** – Основна гармонічна складова хвилі

**ТНД-R** – Середньоквадратична гармонічна складова

**ЛОМ** – Локальні обчислювальні мережі

**ККД** – Коефіцієнт корисної дії

**PLL** – Контур з фазовим автопідстроюванням

**ПІР** – Пропорційно-інтегральний регулятор

**СД** – синхронні двигуни

**КБ** – Конденсаторні батареї

**ПАКРМ** - Пристрої автоматичної компенсації реактивної  
потужності

## ВСТУП

Досягнення в галузі силової електроніки призвели до розробки нових напівпровідникових компонентів, які доступні у великих кількостях і за низькою вартістю, задовольняючи при цьому компроміс між швидкістю і потужністю. Як наслідок, сьогодні ми можемо бачити їх інтегрованими в енергетичні системи, особливо частотно-регульовані приводи, діодні та тиристорні випрямлячі, джерела безперебійного живлення, комп'ютери та їх периферійні пристрої, а також інші цілісні системи. Ці пристрої забезпечують технічні та економічні рішення для більш ефективного управління енергетичними ресурсами. Однак нелінійні характеристики цих компонентів погіршують цю якість. Як наслідок, виникають спотворення як у формах кривих струму, так і напруги. Частотний аналіз цих хвиль свідчить про наявність гармонійних складових. Це і є причиною цих викривлень. Це явище є пожежонебезпечним. При проходженні гармонійних струмів через резонансний контур вони посилюються на виході. Якщо компоненти електромережі та підключені до неї навантаження не розраховані на таке підсилення, то продуктивність буде відповідно знижена [1].

З широким застосуванням електроприводів постійного струму постала проблема електромагнітної сумісності електромережі приводу та вентильних перетворювачів. Вентильні перетворювачі впливають на параметри напруги мережі, що характеризують якість електричної енергії, впливаючи на роботу інших споживачів і самих вентильних перетворювачів. До таких показників відносяться відхилення напруги, коливання напруги (розмах напруги) і несинусоїдальні коефіцієнти, які безпосередньо пов'язані з технічними характеристиками випрямляча як споживача електроенергії. Якщо перший показник можна підтримувати на високому рівні за рахунок належного проектування та експлуатації енергосистеми, то вплив підстанції на інші показники буде лише

негативним. Крім того, підстанції споживають реактивну потужність у відповідь на коливання навантаження, що часто є технічно обумовленим. Це призводить до низького коефіцієнта потужності на підстанціях.

Згідно з вимогами до якості електроенергії всі показники якості повинні знаходитися в межах, визначених національними та міжнародними стандартами якості електроенергії [2-7].

Для вирішення проблеми гармонійного забруднення в розподільчих мережах було запропоновано декілька рішень. Одним з них є вдосконалення регулювання навантаження, яке забезпечується обладнанням, менш чутливим до збурень в мережі і здатним працювати безперервно навіть при наявності великих спотворень напруги. Інший - запровадження так званих гармонійних заходів регулювання.

На сьогодні існують різні технічні засоби компенсації одного або декількох показників якості електроенергії та пов'язаних з ними параметрів електроспоживання. Це пасивні силові фільтри гармонік, компенсуючі конденсаторні батареї, синхронні компенсатори та активні силові фільтри (АСФ). На сьогоднішній день АФ, а також гібридні силові фільтри(ГСФ) є найсучаснішими пристроями, які здатні ефективно підвищити якість електроенергії в розподільчих мережах.

Гібридні силові фільтри – це система перетворювачів (інвертори) змінного струму, метою яких є регенерація тих же компонентів у зворотній фазі, що і гармоніки, які підлягають видаленню . Нові ГСФ також мають кращу якість фільтрації, менш громіздкі та більш гнучкі в експлуатації, ніж пасивні фільтри. Однак поки що пасивні та активні фільтри дещо дешевші ніж гібридні.

Вони значно знижують значення гармонійних складових в струмі вентильного перетворювача і дозволяють практично повністю

компенсувати реактивну потужність, споживану вентильним перетворювачем.

Було проведено багато досліджень гібридних фільтрів. Дослідження ефективності паралельного гібридного фільтра з предиктивним релейним векторним керуванням для компенсації потужності спотворень та реактивної потужності в системах тиристорний перетворювач - двигун постійного струму [10]. Однак, отримані результати (коефіцієнт потужності 97,5% та коефіцієнт гармонік менше 26,8%) не є задовільними.

Найбільш поширеними схемами перетворювачів корекції коефіцієнта потужності, що використовуються для живлення даного типу обладнання, є схеми трифазного активного випрямляча напруги (АВН) і активного випрямляча струму (АВС), що складаються з трифазного моста, зібраного на IGBT-транзисторах, зворотних діодів і фільтрів на стороні змінного і постійного струму. Ці схеми мають ряд переваг.

- Двонаправлений енергообмін з мережею.
- Близьке до синусоїдального значення вхідного струму.
- Можливість отримання коефіцієнта потужності, близького до коефіцієнта потужності агрегату.
- Регулювання і стабілізація вихідної напруги (струму).

Робота присвячена дослідженню регульованих електроприводів постійного та змінного струму з використанням активних випрямлячів з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ)-керуванням, вентильних випрямлячів, забезпеченню електромагнітної сумісності та підвищенню енергоефективності електроприводів.

Запропоновано новий принцип керування 3-клавійними активними випрямлячами, що дозволяє зменшити частоту перемикання вентилів. Отримано високі показники електромагнітної сумісності.

Однак, слід зазначити, що алгоритм керування змінюється при різних топологіях активних випрямлячів, з нейтральною лінією та без неї. Це призводить до урізноманітнення систем управління, розширення асортименту продукції та ускладнення операцій.

В роботі наведено огляд трифазних систем корекції коефіцієнта потужності. Також представлені вимоги до активних випрямлячів.

- Синусоїдальний струм, THD < 5%;
- $\cos\varphi > 0,99$ .
- Можливість роботи при будь-якому розриві фаз.

Були розглянуті новітні методи вирішення проблеми електромагнітної сумісності та встановлено, що найкращим рішенням є використання активних випрямлячів.

Робота пов'язана з розробкою гібридних випрямлячів для розподільних мереж.

Метою даної роботи дослідити способи компенсації впливу реактивної потужності нелінійних навантажень на розподільну мережу.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні питання:

- Розглянути існуючих засобів та методів компенсації;
- Проаналізувати активні та пасивні схеми компенсації реактивної потужності;
- Вибрати схеми компенсатора реактивної потужності на базі гібридних фільтрів та розробка системи керування;
- Розробити цифрову модель СЕП з нелінійним навантаженням та компенсатором;
- Дослідити системи компенсації реактивної потужності при різних нелінійних навантаженнях;
- Проаналізувати показники якості електроенергії без компенсації та з нею.

Об'єктами досліджень є процеси в системах електропостачання з нелінійним навантаженням.

Напрямок дослідження є розробка системи керування компенсаторів на базі гібридних фільтрів.

Короткий зміст дисертації. Запропоновано схеми електропостачання на розподільчих мережах з нелінійним навантаженням на яких застосовуються гібридні фільтри для компенсації реактивної потужності.

Доведено, що вибір гібридних фільтрів дозволяє підвищити якість споживання струму з мережі, забезпечити електромагнітну сумісність та зменшити вплив реактивну потужність.

Результати дослідження електропостачання ілюструються осцилограмою електроприводу, отриманою за допомогою цифрової моделі.

Магістерська робота складається з автореферату, анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано її практичне значення, визначено напрямки досліджень та сформульовано задачі дослідження. **Мета дослідження.** Метою є дослідження компенсації реактивної потужності на базі гібридних фільтрів в розподільних системах з нелінійним навантаженням.

#### **Задачі дослідження.**

- розгляд існуючих засобів та методів компенсації;
- аналіз активних та пасивних схем компенсації реактивної потужності;
- вибір схеми компенсатора реактивної потужності на базі гібридних фільтрів та розробка системи керування;
- розробка цифрової моделі системи електропостачання з нелінійним навантаженням та компенсатором;

- дослідження системи компенсації реактивної потужності при різних нелінійних навантаженнях;

- аналіз показників якості електроенергії без компенсації та з нею.

**Об'єкт дослідження** – Процес передачі електроенергії від розподільчої мережі до побутових споживачів.

**Предметом дослідження** є компенсатор реактивної потужності нелінійних навантажень.

Наукові результати дисертаційної роботи отримано шляхом створення цифрової моделі СЕП у програмному забезпеченні Matlab, проведення вимірів та розрахунків.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Розробка алгоритму керування компенсатором, при якому забезпечується повна компенсація реактивної потужності.

**Практичне значення одержаних результатів.** Включає розробку цифрова модель, яка дозволяє вивчати та досліджувати компенсацію реактивної потужності нелінійним навантаженням та вплив її на показника якості електроенергії.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дослідження були оголошені на науково-технічних конференціях «XIV МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА», V Науково-технічна конференція магістрантів

### **Публікації**

1. Галаган І.В. Дослідження активного гібридного фільтру як компенсатора впливу реактивної потужності у розподільній мережі. // Збірник матеріалів і тез конференції «XIV МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА»» – Київ, 2022.

2. Галаган І.В. Підвищення ефективності функціонування системи електрична мережа – гібридний фільтр – змінне навантаження

Яровий І.П. Підвищення ефективності інверторів в сонячних електростанціях . V Науково-технічна конференція магістрантів, м. Київ, 13 груд. 2022 р.

*Ключові слова: РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ, РОЗПОДІЛЬНА МЕРЕЖА, ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ГІБРИДНІ СИЛОВІ ФІЛЬТРИ, КОМПЕНСАЦІЇ ВПЛИВУ, ЦИФРОВА МОДЕЛЬ СЕП*

## **1 ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА СПОСОБИ ЇЇ ПОЛІПШЕННЯ**

Згідно з вимогами до якості електричної енергії всі показники якості повинні знаходитися в межах, визначених ДСТУ EN 50160:2014 [8], що відповідає міжнародному стандарту щодо методів вимірювання рівнів електромагнітної сумісності та електромагнітних завад в системах електропостачання.

Питання якості електроенергії тісно пов'язані з надійністю та довговічністю різних навантажень, причому особливо вимогливі навантаження можуть функціонувати лише за умови високої якості напруги.

Питання якості електроенергії перетинається з проблемою енергозбереження, оскільки показники якості пов'язані з коефіцієнтом потужності.

В той же час, для великої кількості сучасних споживачів малої потужності більш важливим є підвищення коефіцієнта потужності за рахунок фільтрації споживаного струму, ніж зменшення кута зсуву фаз перших гармонік, оскільки коефіцієнт спотворення такого типу навантаження знижує коефіцієнт потужності.

Щодо коефіцієнта потужності, то в усьому світі існують дуже жорсткі стандарти щодо рівня неробочої потужності. Зокрема, стандарт ІШЕ 519-1992 [6] встановлює вимоги до значень гармонійних складових до 49-ї гармоніки.

## 1.1 Виміри параметрів якості електроенергії

Вимірювання параметрів якості електричної енергії здійснюється відповідно до ДСТУ:ІЕС 61000-4-30-2010. [9] «Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії».

У договорі на електропостачання є п. 3 згідно якого "Параметри якості електричної енергії повинні відповідати державним стандартам."

Вимоги до параметрів якості електричної енергії визначені у розділі XI цього Кодексу.

Параметри якості електричної енергії в точках приєднання споживачів у нормальних умовах експлуатації мають відповідати параметрам, визначеним у ДСТУ:EN 50160-2014[8] «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення» (далі - ДСТУ:EN 50160-2014).

Згідно ДСТУ ІЕС 61000-4-30:2010 [9], п. 4.2 Організація вимірювань для Класу S передбачає проведення обов'язкових замірів кожні 10 періодів струму з об'єднанням результатів в 10-хвилинні проміжки. І можливим об'єднанням в 1-годинні проміжки.

Тому вимірювання має проводитися протягом не менше 7 календарних днів. І результатом мали бути 10-хвилинні заміри рівнів електроенергії.

Тому виміри параметрів якості електроенергії мали здійснюватися на вихідних клеммах лічильника, якщо інше не було узгоджено зі мною.

## 1.2 Показники якості електричної енергії

Метод випробування[9]: За нормальних робочих умов,— протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень напруги електропостачання, які усереднені на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути в межах  $U_n \pm 10 \%$ ; і— усі середньоквадратичні значення напруги електропостачання, усереднені на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути в межах  $U_n + 10 \%$  /- 15 %.)

Стандартна номінальна напруга  $U_n$  для мереж низької напруги загального призначення має значення 220 В [8] між фазним і нульовим проводом або між фазними проводами:

- Для трифазних чотирипровідних мереж:  $U_n = 220$  В між фазним та нульовим проводом;

- Для трифазних трипровідних мереж:  $U_n = 220$  В між фазними проводами.

- Зміна напруги не повинна перевищувати  $\pm 10 \%$  від величини номінальної напруги.

Основні показники якості електричної енергії визначені у пунктах 11.4.7 – 11.4.12 глави 11.4 розділу XI КСР.

Частота напруги електропостачання для мереж низької напруги має бути в межах [8]:

1) для систем, які синхронно приєднані до ОЕС України - 50 Гц  $\pm 1 \%$  протягом 99,5 % часу за рік та 50 Гц  $+ 4 \%$  ( - 6 %) протягом 100 % часу;

2) для систем без синхронного приєднання до ОЕС України - 50 Гц  $\pm 2 \%$  протягом 99,5 % часу за рік та 50 Гц  $\pm 15 \%$  протягом 100 % часу.

Показник довготривалого флікера (мерехтіння), спричиненого коливанням напруги, для мереж низької напруги має бути меншим або рівним 1 для 95 % часу спостереження.

95 % середньоквадратичних значень складника зворотної послідовності напруги електропостачання, усереднених на 10-хвилинному проміжку, для мереж низької напруги мають бути в межах від 0 % до 2 % від складника напруги прямої послідовності.

95 % середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, усереднених на 10-хвилинному проміжку, для мереж низької напруги мають бути меншими або рівними наступним значенням:

Таблиця 1.1 - Стандартні показники відхилень гармонічних коливань [1,8]

Непарні гармоніки				Парні гармоніки	
Не кратні 3		Кратні 3		Порядок	Відносна амплітуда
Порядок	Відносна амплітуда	Порядок	Відносна амплітуда		
5	6,0%	3	5,0%	2	2,0%
7	5,0%	9	1,5%	4	1,0%
11	3,5%	15	1,5%	6...	0,5%
13	3,0%	21	0,5%		
17	2,0%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги електропостачання, урахуваючи всі гармоніки до 40-ї включно, для мереж низької напруги має бути меншим чи рівним 8 %.

Показники якості електричної енергії для мереж середньої та високої напруги, методи випробування та інші характеристики якості електроенергії наведені у ДСТУ EN 50160:2014 [8].

### **1.3 Наслідки погіршення якості електроенергії**

Сучасне електрообладнання, що використовується в таких сферах людської діяльності, як телекомунікації, медицина, транспорт і виробництво, висуває високі вимоги до якості споживаної електроенергії.

Проблеми з електропостачанням можуть призвести до збоїв у роботі обладнання, скорочення терміну його служби та виходу з ладу.

Нелінійні та несиметричні навантаження, в основному напівпровідникові перетворювачі, відіграють все більшу роль як ключова проблема, що негативно впливає на якість електроенергії. Наявність нелінійних споживачів характерна для промислових (електроприводи, дугові печі) та побутових (блоки живлення електроприладів, електронні баласты) енергосистем. Високоєфективне силове електронне обладнання поступово витісняє попереднє, яке, на жаль, негативно впливає на якість електроенергії [8].

Випрямлячі є типовими прикладами нелінійних споживачів. Застосовуються в блоках живлення побутової техніки, печах змінного струму та частотних перетворювачах для електроприводів.

#### **1.3.1 Спотворення форми напруги живлення**

Оскільки робота нелінійних навантажень викликає спотворений струм, який залежить від шляху, вплив спотворення струму на навантаження всередині об'єкта є мінімальним. Тому гармонійні струми не можуть надходити в обладнання, крім нелінійних

навантажень, які їх викликали. Однак вплив спотворення струму на розподільні системи може бути серйозним, насамперед через збільшення струму, що протікає в системі[6].

Усі системи розподілу обмежені середньоквадратичним значенням струму. У системі, що живить трифазне навантаження, наприклад, трансформатор 1000 кВА, 480 В розрахований на 1200 А середньоквадратичного значення. Але чим більший гармонійний струм повинен забезпечити цей трансформатор, тим менший основний струм він може забезпечити для живлення навантажень. Іншими словами, оскільки гармонійний струм не забезпечує жодної потужності, його присутність просто використовує ємність системи та зменшує кількість навантажень, які можна живити.

Гармонійні струми також збільшують втрати тепла в трансформаторах і електропроводці. Оскільки імпеданс трансформатора залежить від частоти, зростаючи з номером гармоніки, імпеданс на 5-й гармоніці в п'ять разів перевищує частоту основної частоти. Таким чином, кожен ампер струму 5-ї гармоніки викликає в п'ять разів більше нагрівання, ніж ампер основного струму.

У системі, що живить навантаження, з'єднані фазою з нейтраллю, згубні ефекти знову ж таки пов'язані з тим, що гармонійні струми використовують потужність системи та зменшують кількість корисних навантажень, які можна живити. Струми третьої гармоніки завдають додаткової шкоди, оскільки вони є адитивними в нейтральному провіднику. Коли підключено багато комп'ютерів, які є нелінійними навантаженнями, струм нейтралі — переважно 3-ї гармоніки — може бути більшим, ніж будь-який із фазних струмів. Ці струми третьої гармоніки циркулюють у первинній обмотці (дельта) розподільного трансформатора, який обслуговує частину системи, що живить комп'ютери, і розсіюються у вигляді тепла.

### 1.3.2 Вплив і наслідки спотворення струму.

Окрім перегріву, іншим основним ефектом спотворення струму в електричній системі є спотворення напруги. Це спотворення матиме мінімальний вплив на систему розподілу, але, на відміну від спотворення струму, воно не залежить від шляху. Таким чином, гармонічні напруги, що генеруються в одній частині об'єкта, з'являться на загальних шинах у цьому об'єкті. Спотворення високої напруги на клеммах нелінійного навантаження не означає, що високі спотворення будуть присутні в усій системі. Фактично спотворення напруги стає нижчим, чим ближче шина розташована до службового трансформатора. Однак, якщо на трансформаторі існує надмірне спотворення напруги, воно може пройти крізь блок і з'явитися в приміщеннях, віддалених від джерела.

У певних випадках вплив на навантаження всередині об'єкта може бути згубним. Наприклад, екстремальне спотворення напруги може спричинити численні перетини нуля для хвилі напруги. Для обладнання, де належна послідовність операцій залежить від перетину нуля для синхронізації, спотворення напруги може спричинити неправильну роботу. Більшість сучасного електрообладнання використовує внутрішній годинник для синхронізації, тому на нього не впливають численні переходи через нуль.

Спотворення напруги мало впливають на роботу нелінійних навантажень, підключених між фазою або фазою до нейтралі.

З іншого боку, спотворення напруги 5-ї гармоніки може спричинити серйозні проблеми для трифазних двигунів. 5-та гармоніка є гармонікою зворотної послідовності, і при подачі на асинхронний двигун вона створює негативний момент. Іншими словами, він

намагається рухати двигун у зворотному напрямку та сповільнює його обертання. Таким чином, двигун споживає більше струму 60 Гц, щоб компенсувати зворотний крутний момент і відновити свою нормальну робочу швидкість. Результатом є надлишок струму в двигуні, який або спричиняє розмикання захисних пристроїв, або двигун перегрівається та виходить з ладу. З цієї причини усунення струму 5-ї гармоніки з систем живлення 3-фазних навантажень часто є пріоритетним завданням на промислових об'єктах.

### **1.3.3 Падіння напруги в мережі живлення та резонансні явища**

Опір мереж електропостачання, як правило, індуктивний і може досягати великих значень, наприклад, в електровозних мережах електропостачання з великими відстанями від підстанцій і в загальних розподільчих системах з довжиною кабельних трас більше 100 м. Впливає також частотна залежність індуктивного опору. Тому при наявності великої кількості вищих гармонік струму падіння напруги в проводах і кабелях може значно перевищувати гранично допустиме значення.

Наявність гармонік вищих порядків в електричних колах із зосередженими та розосередженими параметрами, представлених блоками, вузлами та розподільчими мережами в системах електропостачання, створює ризики виникнення резонансних явищ.

У трансформаторах, дроселях, електрообладнанні та інших електромагнітних елементах вищі гармоніки струмів, що створюють електродинамічні сили, є джерелом додаткового акустичного шуму.

В даний час для вимірювання потужності широко використовуються індукційні лічильники, але ці лічильники мають від'ємні частотні похибки на гармонічних частотах. Залежно від того,

чи є навантаження лінійним або нелінійним, можна "завищити" або "занизити" споживану ним потужність. Тому вимірювання потужності в несинусоїдальному режимі схильне до великих похибок. Для усунення цих похибок використовуються мікропроцесорні лічильники, які можуть враховувати вплив вищих гармонік.

Гармонійні ефекти в індуктивних датчиках положення можуть призвести до перебоїв у технологічних процесах на підприємствах. Високі гармоніки струму і напруги мережі електроживлення погіршують роботу електромеханічних пристроїв і викликають їх вихід з ладу. Високі гармоніки в повітряних лініях електропередач впливають на роботу каналів зв'язку.

#### **1.4 Загальні гармонійні спотворення (THD)**

Загальні гармонійні спотворення [6], або THD, є одним із способів оцінити якість джерела живлення.

Він вказує на те, скільки гармонійної складової містять осцилограми напруги та струму, і служить індикатором ступеня викривлення форми хвилі, спричиненого в результаті.

Промислові стандарти визначають THD як відношення гармонічної складової до основної складової. Крім сигналів потужності, THD використовується для аналізу сигналів вібрації та звуку. THD-F (основна гармонічна складова хвилі) і THD-R (середньоквадратична гармонічна складова) відрізняються за формулою, яка використовується для їх обчислення. THD-F зазвичай використовується для вимірювання комерційних джерел живлення.

##### **1.4.1 Прийнятний THD**

Хоча в Україні немає твердого обмеження, IEEE 519-2014 [2] рекомендує, щоб загальні системи, такі як комп'ютери та пов'язане обладнання, мали не більше 5% сумарних гармонійних спотворень напруги, причому найбільша окрема гармоніка не повинна перевищувати 3% основної напруги.

#### **1.4.2 THD в системах гарантованого електропостачання**

Вибір перерізу фазних та нульових робочих провідників ліній живлення електронних пристроїв електроприймачів локальної обчислювальної мережі (ЛОМ) слід виконувати з урахуванням емісії гармонічних складових струму:

- в разі коли електронні пристрої ЛОМ (комп'ютери, сервери) мають коефіцієнт гармонік вхідного струму  $THD \leq 17\%$  згідно з вимогами відповідних глав ПУЕ;

- в разі коли електронні пристрої ЛОМ мають коефіцієнт гармонік вхідного струму  $THD > 17\%$ , чи коли рівень генерації гармонічних струмів невідомий, переріз фазних провідників ліній живлення штепсельних розеток слід виконувати згідно з вимогами відповідних глав ПУЕ, а переріз нульових робочих провідників трифазних ліній живлення штепсельних розеток електроспоживачів ЛОМ слід приймати в 1,7 рази більше за переріз відповідних фазних провідників.

#### **Висновки до розділу**

Розглянуто проблеми які пов'язані з якістю електричної енергії, вплив спотворення струму та напруги на обладнання.

Загальні гармонійні спотворення [6], або THD, є одним із способів оцінити якість джерела живлення. Промислові стандарти визначають THD як відношення гармонічної складової до основної складової.

## 2 ПРИСТРОЇ, ПРИЗНАЧЕННІ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Існують три основні групи методів підвищення якості електроенергії [11,12]. В першу чергу, це раціоналізація засобів електропостачання, до цієї групи відносять підвищення потужності мережі, живлення нелінійних споживачів підвищеним напругою і ін. Друга група передбачає обмеження впливу приймача на мережу живлення шляхом впливу на сам приймач.

Третя група передбачає використання пристроїв корекції якості, або, інакше кажучи, регуляторів одного або декількох показників якості електроенергії або пов'язаних з ними параметрів споживаної потужності. До третьої групи можна віднести наступні способи:

- застосування в якості пристроїв компенсації конденсаторних батарей;
- застосування статичних джерел реактивної потужності;
- застосування пристроїв активної фільтрації;
- застосування систем компенсації, що складаються з декількох перерахованих пристроїв, що працюють паралельно.

Серед ознак активного споживача виділяють можливість регулювання електроспоживанням, яку асоціюють, перш за все, із забезпечення балансу активної потужності в системі. Водночас актуальним є також завдання забезпечення балансів реактивної потужності оператором розподільної мережі з метою підтримання оптимальних рівнів напруг у вузлах мережі, підвищення запасу стійкості роботи вузлів навантаження тощо, яке вирішують, як правило, встановленням у вузлах навантаження джерел реактивної потужності. У цьому плані активна поведінка споживача обмежується встановленням засобів компенсації реактивної потужності, а на

можливостях регулювання рівня споживання реактивної потужності активним споживачем не акцентується.

## 2.1 Пасивні фільтри гармонічних коливань

Пасивні фільтри гармонік, що складаються з конденсаторів, котушок індуктивності та/або резисторів, можна класифікувати на настроювані та фільтри високих частот.[13] Вони підключаються паралельно до нелінійних навантажень, таких як діодні/тиристорні випрямлячі, електродугові печі змінного струму тощо. На рис. 2.1 та 2.2 наведено схемотехнічні рішення пасивних фільтрів на однофазній основі. Серед них у потужному трифазному тиристорному випрямлячі використано комбінацію чотирьох однополосних фільтрів, налаштованих на частоти п'ятої, сьомої, 11-ї та 13-ї гармонік, а також фільтр високих частот другого порядку, налаштований на частоту 17-ї гармоніки.

Встановлення такого пасивного фільтра поблизу нелінійного навантаження полягає в забезпеченні низькоомних трактів для певних частот гармонік, що призводить до поглинання струмів домінуючої гармоніки, які витікають з навантаження. На фактичну величину низькоомного тракту для кожного однократно налаштованого фільтра впливає добротність котушки індуктивності фільтра  $Q$ , яка визначає різкість налаштування. Зазвичай значення  $Q$  коливається в межах від 20 до 100 [14]. Хоча фільтр високих частот другого порядку забезпечує хороші показники фільтрації в широкому діапазоні частот, він дає більш високі втрати на основній частоті, ніж відповідний йому односпрямований фільтр.

Пасивні фільтри гармонік мають додаткову функцію досягнення корекції коефіцієнта потужності індуктивних навантажень. Ця функція дає перевагу пасивним фільтрам у багатьох випадках, але не у всіх.

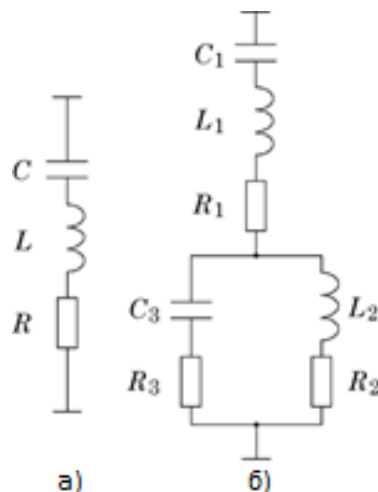


Рисунок 2.1 - Пасивні налаштовані фільтри. (а) Одинарно налаштовані. (б) Подвійне налаштування.

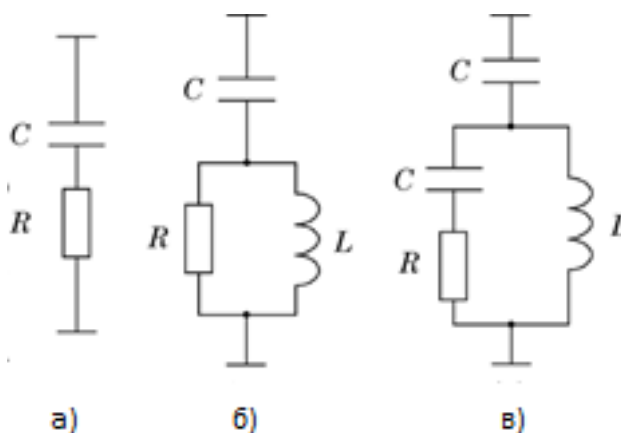
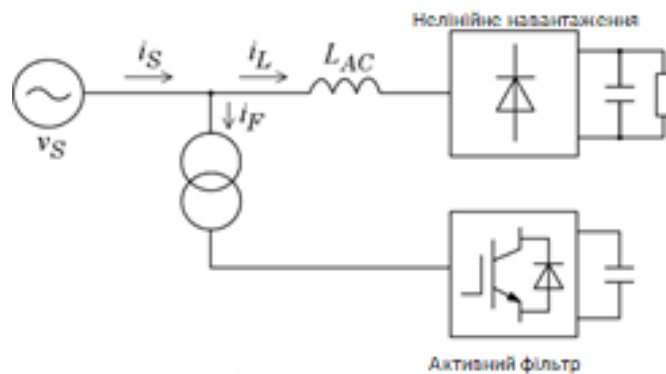


Рисунок 2.2. - Пасивні фільтри високих частот. (а) Перший порядок. (б) Другий порядок. (в) Третій порядок.

## 2.2 Активні фільтри для гармоніювання електроенергії

Чисті активні фільтри можуть бути класифіковані на шунтуючі (паралельні) активні фільтри та послідовні активні фільтри за їх схемами включення. В даний час шунтуючі активні фільтри є більш

кращими, ніж послідовні активні фільтри за формою і функціями, і тому послідовні активні фільтри придатні виключно для жорсткої фільтрації.



Рисунку 2.3 - Однофазний або трифазний шунтуючий активний фільтр

На рисунку 2.3 показана системна конфігурація однофазного або трифазного шунтового активного фільтра для фільтрації гармонік "струму" однофазного або трифазного діодного випрямляча з ємнісним навантаженням постійного струму. Цей активний фільтр є однією з найбільш фундаментальних системних конфігурацій серед різних типів чистих і гібридних активних фільтрів. Навантаження постійного струму в багатьох випадках може розглядатися як двигун змінного струму, що приводиться в дію ШІМ-інвертором від джерела напруги. Цей активний фільтр з трансформатором або без нього підключається паралельно навантаженню, що генерує гармоніки. Активним фільтром можна керувати на основі наступного способу "прямого зв'язку":

- Контролер визначає миттєвий струм навантаження  $i_L$
- За допомогою цифрової обробки сигналу виділяється гармоніка струму  $i_{Lh}$  з виявленого струму навантаження.
- Активний фільтр споживає компенсуючий струм  $i_{AF} (= -i_{Lh})$  від напруги електромережі, щоб звести нанівець гармоніки струму  $i_{Lh}$

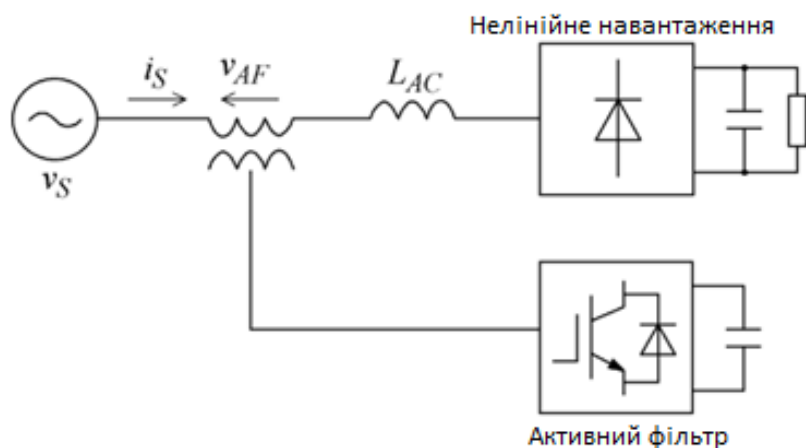


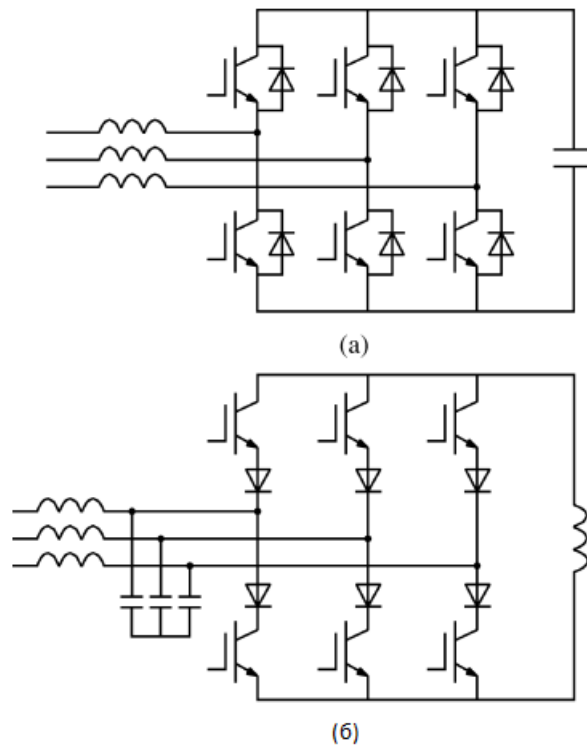
Рисунок 2.4. - Однофазний або трифазний послідовний активний фільтр.

Індуктор змінного струму, який встановлюється на стороні змінного струму діодного випрямляча, відіграє важливу роль в стабільній і правильній роботі активного фільтра. На рисунку 2.4 показана системна конфігурація однофазного або трифазного послідовного активного фільтра для фільтрації гармонік "напруги" однофазного або трифазного діодного випрямляча з ємнісним навантаженням постійного струму. Послідовний активний фільтр включається послідовно з мережею живлення через трифазний трансформатор або три однофазних трансформатора. На відміну від шунтуючого активного фільтра, послідовний активний фільтр управляється за принципом "зворотного зв'язку":

- Контролер визначає миттєвий струм живлення  $i_S$ .
- За допомогою цифрової обробки сигналу виділяється гармонійний струм  $i_{Sh}$  з виявленого струму живлення,
- Активний фільтр подає компенсуючу напругу  $U_{AF}$  через первинну обмотку трансформатора. Це призводить до значного зниження гармонійного струму живлення, якщо коефіцієнт зворотного зв'язку встановлений досить високим.

Наведені вище міркування дозволяють припустити, що "подвійні" відносини існують в деяких елементах між шунтуючим активним фільтром і послідовним активним фільтром.

### 2.2.1 Трифазні ШІМ-перетворювачі з джерелом напруги та джерелом струму



Рисунку 2.5. - Схеми живлення трифазних активних фільтрів. (а) ШІМ-перетворювач "напруга - джерело", (б) ШІМ-перетворювач "струм - джерело"

Існує два типи схем живлення трифазних активних фільтрів: ШІМ-перетворювач з джерелом напруги, оснащений конденсатором постійного струму, який показаний на рисунку 2.5 (а), і ШІМ-перетворювач з джерелом струму, оснащений котушкою індуктивності постійного струму, який показаний на рисунку 2.5 (б). Ці схеми подібні до схем живлення, що використовуються для приводів змінного струму. Однак вони відрізняються за своєю поведінкою, оскільки активні фільтри діють як джерела несинусоїдального струму або напруги.

Автор віддає перевагу джерелу напруги перед ШІМ-перетворювачем, оскільки ШІМ-перетворювач з джерелом напруги має вищий ККД, нижчу вартість і менші фізичні розміри, ніж ШІМ-перетворювач з джерелом струму, особливо з точки зору порівняння між конденсатором постійного струму і котушкою індуктивності постійного струму.

Крім того, модуль біполярних транзисторів з ізолюваним затвором (IGBT), який зараз доступний на ринку, більше підходить для ШІМ-перетворювача напруги-джерела, оскільки до кожного IGBT антипаралельно підключений діод з вільним ходом. Це означає, що IGBT не потрібно забезпечувати можливість зворотного блокування, що забезпечує більшу гнучкість конструкції пристрою в компромісі між втратами на провідність і комутацію та здатністю до короткого замикання, ніж IGBT зі зворотним блокуванням. З іншого боку, ШІМ-перетворювач з джерелом струму вимагає або послідовного з'єднання традиційного IGBT і реверсивно-блокуючий діод, як показано на рисунку 2.5(б), або реверсивно-блокуючий IGBT, що призводить до ускладнення конструкції та виготовлення приладу, а також дещо гірших характеристик, ніж у традиційного IGBT без можливості реверсивного блокування. Фактично, майже всі активні фільтри, які були впроваджені в практичне застосування в світі, використовують в якості силового ланцюга ШІМ-перетворювач з джерелом напруги, оснащений конденсатором постійного струму.

### **2.2.2 Трифазні активні фільтри**

На рисунку 2.6 наведено детальну схему трифазного шунтового активного фільтра. Даний активний фільтр складається з наступних трьох частин: трифазного ШІМ-перетворювача напруги-джерела, оснащеного конденсатором постійного струму, схеми керування та

комутаційно-режекторного фільтра. Схема управління базується на сучасному цифровому контролері для цифрової обробки сигналів, операційних та розділових підсилювачів для аналогової обробки сигналів, а також холлівських датчиків напруги/струму. Бажані характеристики пристрою для активного фільтра можна підсумувати наступним чином.

- ШІМ-перетворювач напруги-джерела з контуром мінору струму повинен забезпечувати можливість керування компенсуючим струмом з шириною смуги частот до 1 кГц. Це призводить до фільтрації гармонік в діапазоні від найбільш домінуючої п'ятої гармоніки струму до 25-ї гармоніки струму. Несучу частоту ШІМ-перетворювача бажано мати не менше 10 кГц.

- Схема керування повинна виділяти гармонічний струм з виявленого струму навантаження з якомога меншими похибками за амплітудою та фазою не тільки в усталених, але і в перехідних режимах.

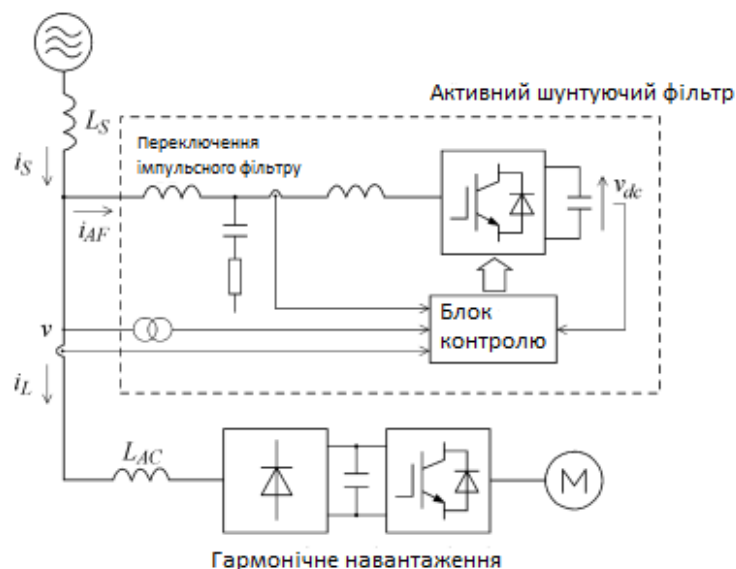


Рисунок 2.6 - Однолінійна системна конфігурація трифазного активного фільтра.

Що стосується трифазних активних фільтрів, то в їх схемах керування для виділення гармонік зазвичай застосовують теорію миттєвої активної та реактивної потужностей або так звану "p-q теорію" [15], [16], а також d-q перетворення [17], [18]. Теорія p-q необхідна для того, щоб взяти трифазну напругу в колі керування, як показано на рис. 6. Для d-q перетворення потрібен контур з фазове автопідстроювання (PLL) для синхронізації перетворення з частотою і фазою. Теорія p-q необхідна для того, щоб взяти трифазну напругу в колі керування, як показано на рисунку 2.6. Для d-q перетворення потрібен контур з фазовим автопідстроюванням (PLL) для синхронізації перетворення з частотою і фазою до ШІМ-перетворювача напруги-джерела живлення. Завданням фільтра низьких частот є усунення комутаційних пульсацій, викликаних роботою ШІМ, з компенсуючого струму  $i_F$ .

Активний фільтр, зображений на рисунку 2.6, ще називають чистим активним фільтром, оскільки малопотужний імпульсно-пульсаційний фільтр не забезпечує можливості послаблення домінуючих струмів п'ятої та сьомої гармонік, що створюються діодним випрямлячем. Формування відповідного кола зворотного зв'язку за постійною напругою дозволяє формувати та регулювати постійну напругу без будь-якого джерела живлення.

Загалом, конденсатор постійного струму можна розглядати як елемент накопичення енергії з теоретичної точки зору. Однак активний фільтр зазвичай не називають системою накопичення енергії з практичної точки зору, оскільки кількість енергії, що зберігається в конденсаторі постійного струму, набагато менша, ніж в акумуляторі або надпровідній магнітній котушці. Іншими словами, різниця в термінології між активним фільтром і системою накопичення енергії не пов'язана з їх конфігурацією, а залежить, головним чином, від того, чи є їх ємність накопичення енергії малою або великою.

### 2.2.3 Тенденції в області чистих активних фільтрів

В результаті гострої конкуренції за вартістю та продуктивністю серед японських виробників сформувався хороший ринок чистих активних фільтрів для кондиціонування електроенергії. В даний час чисті активні фільтри стають доступними завдяки зниженню вартості силових напівпровідникових приладів (IGBT), їх допоміжних частин та інтегрованих цифрових схем управління. Однак, реальна ціна активних фільтрів на ринку сильно залежить від умов придбання.

Наприклад, японська компанія Fuji Electric вже випустила на ринок чисті активні фільтри в діапазоні потужностей 10-400 кВА. Активний фільтр може бути безпосередньо встановлений на низьковольтну промислову електромережу в діапазоні напруг від 200 до 440 В. З іншого боку, інший активний фільтр потребує понижувального трансформатора при встановленні на середньовольтну електромережу. Практичне застосування активних фільтрів розширюється в електроенергетиці, промисловості, офісних будівлях, лікарнях, водоканалах, на транспорті.

В роботах [19]-[24] розглядається шунтовий активний фільтр, призначений для встановлення в системі розподілу електроенергії, що страждає від підсилення гармонік внаслідок послідовних та/або паралельних резонансів між лінійними індуктивностями та конденсаторами для корекції коефіцієнта потужності. Активний фільтр, заснований на детектуванні напруги в точці установки, управляється таким чином, щоб створити нескінченний опір зовнішньому контуру для основної частоти, а також проявляти низький опір для гармонійних частот. Коли активний фільтр встановлюється на кінці радіального фідера розподілу електроенергії, він успішно виконує гасіння гармонік

по всьому розподільчому фідеру. Це означає, що активний фільтр діє як "термінатор гармонік", подібно до термінатора 50, встановленого на кінцевому терміналі лінії передачі сигналу.

В [25] описано трифазний послідовний активний фільтр, що складається з трьох однофазних Н-мостових перетворювачів, які працюють на несучій частоті ШІМ 10 кГц, та високочастотного конденсатора постійного струму малої номінальної ємності. Клеми постійного струму активного фільтра з'єднані з клемми постійного струму трифазного діодного випрямляча, оснащеного конденсатором постійного струму, таким чином утворюючи загальний конденсатор постійного струму між активним фільтром і діодним випрямлячем. Задовільна ефективність фільтрації була перевірена трифазною експериментальною системою з номінальною напругою 200 В, 20 кВт і частотою 50 Гц.

## 2.3 Гібридні активні фільтри для фільтрації гармонік

### 2.3.1 Конфігурація ланцюгів

У 1988 році було запропоновано два типи гібридних активних фільтрів для фільтрації гармонік нелінійних навантажень [26], [29] та у 1990 році [26], [30], відповідно. Рисунок 2.7 [26], [27], [29] та 8 [28],

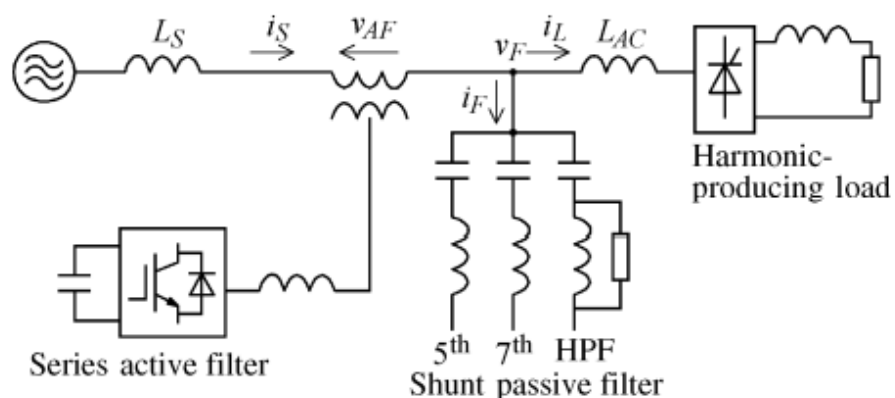


Рисунок 2.7. - Комбінація послідовного активного фільтра та шунтуючого пасивного фільтра.

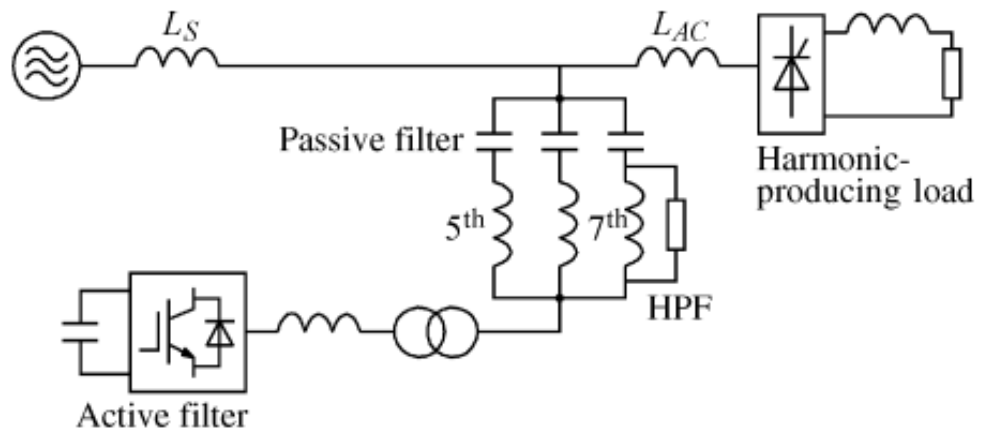


Рисунок 2.8 - Послідовне з'єднання активного фільтра і пасивного фільтра.

В роботі [30] показані спрощені схемотехнічні конфігурації гібридних активних фільтрів. Пропозиція двох гібридних фільтрів заохотила дослідників/інженерів силової електроніки до подальших досліджень різних гібридних активних фільтрів, зосереджуючись на їх практичному використанні [27]-[33].

Два гібридних фільтра засновані на комбінації активного фільтра, трифазного трансформатора (або трьох однофазних трансформаторів) і пасивного фільтра, що складається з двох фільтри, налаштовані на частоти п'ятої та сьомої гармонік, та фільтр високих частот другого порядку, налаштований на частоту 11-ї гармоніки. Хоча ці гібридні фільтри дещо відрізняються за схемотехнічною побудовою, за принципом дії та характеристиками фільтрації вони майже однакові. Таке поєднання з пасивним фільтром дає можливість значно знизити номінал активного фільтра. Завданням активного фільтра є не компенсація гармонійних струмів, що виробляються тиристорним випрямлячем, а досягнення "гармонійної розв'язки" між джерелом живлення та навантаженням [26], [29]. В результаті не виникає гармонійний резонанс, і в живленні не протікає гармонійний струм.

### 2.3.2 Експериментальні форми хвиль

На рисунках 2.9-2.11 наведено експериментальні осцилограми, отримані на гібридному фільтрі, зображеному на рисунку 2.7. В якості гармонікоутворюючого навантаження використовувався трифазний шестипульсний тиристорний випрямляч з індуктивним навантаженням постійного струму. Тиристорний випрямляч розрахований на напругу 200 В, 20 кВА, частоту 50 Гц. З п'яти осцилограм зверху - напруга на затискачах шунтуючого пасивного фільтра  $u_F$ ,  $i_S$  - струм живлення,  $i_F$  - струм, що протікає в пасивному фільтрі,  $i_L$  - струм навантаження, і  $u_{AF}$  - напруга на послідовному активному фільтрі, яка спостерігалася в первинній обмотці трансформатора, як показано на рисунку 2.7.

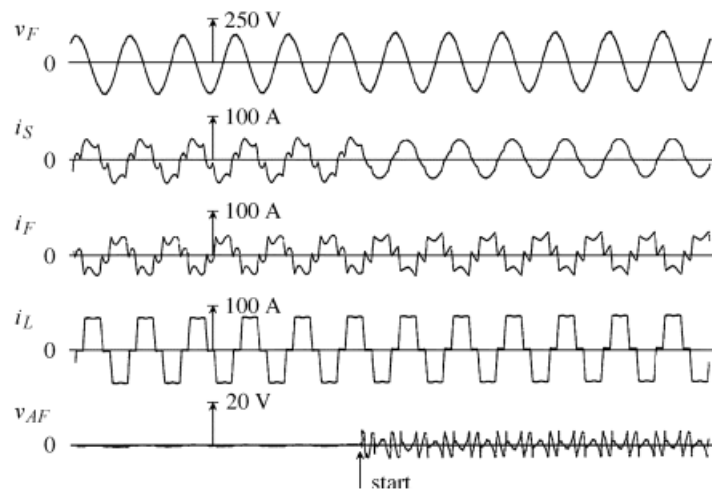


Рисунок 2.9 – Експериментальні осцилограми перехідного процесу при запуску послідовного активного фільтра у випадку  $L_S = 2\%$

На рисунку 2.9 наведено експериментальні осцилограми перехідного процесу при запуску послідовного активного фільтра у випадку  $L_S = 2\%$  на трифазній базі 200 В, 20 кВА, 50 Гц. Перед початком роботи активний фільтр був запущений, велика кількість гармонік струму все ще залишалася в  $i_S$ . Це означає, що "чистий" пасивний фільтр

забезпечує незадовільні показники з точки зору фільтрації гармонік. Після запуску активного фільтра  $i_S$  став найбільш синусоїдальним, що свідчить про те, що активний фільтр покращує фільтруючі характеристики пасивного фільтра.

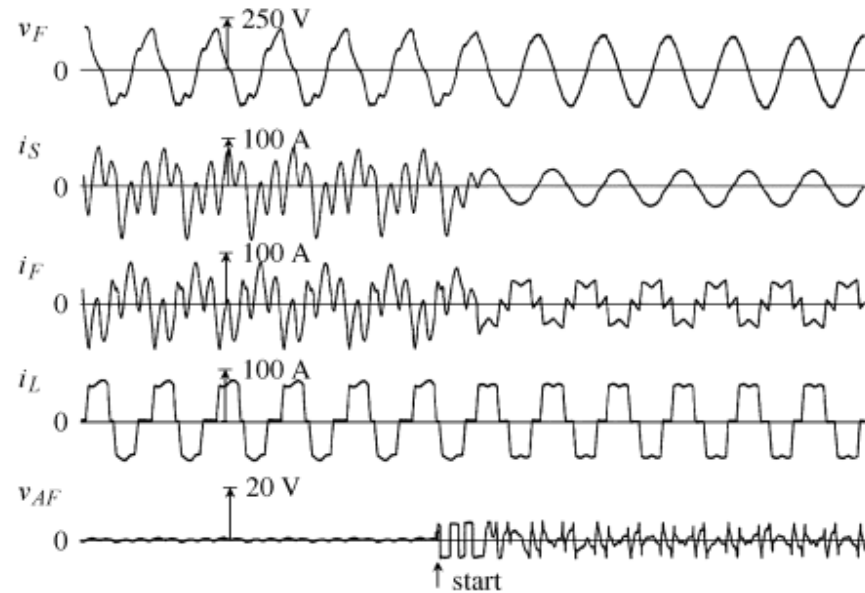


Рисунок 2.10 Експериментальні осцилограми у випадку  $L_S = 5,6\%$ .

На рисунку 2.10 наведено експериментальні осцилограми у випадку  $L_S = 5,6\%$ . Перед запуском активного фільтра у всій системі виник сильний паралельний резонанс на частоті четвертої гармоніки. Цей резонанс значно посилював невелику частину струму четвертої гармоніки в  $i_L$ . Однак після запуску активного фільтра резонанс гармонік не з'являвся.

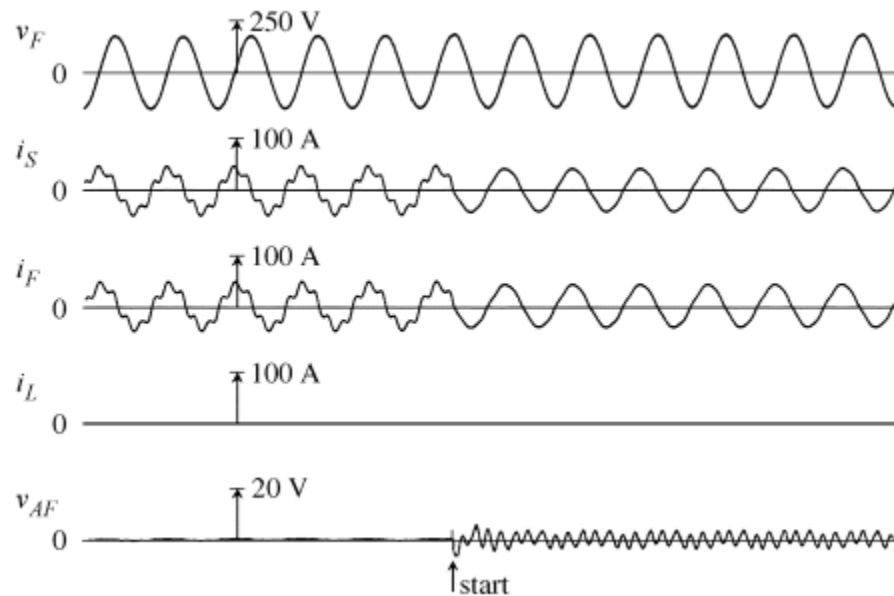


Рисунок 2.11 - Експериментальні осцилограми без навантаження  
( $i_L = 0$ , у випадку  $L_S = 2\%$ )

На рисунку 2.11 наведено експериментальні осцилограми без навантаження ( $i_L = 0$ , у випадку  $L_S = 2\%$ ). Хоча рівень фонові гармонічної напруги, що існувала перед пасивним фільтром, становив лише 1%, гармонічний струм, що містився в  $i_S$ , досягав близько 10% до запуску активного фільтра. Це означає, що пасивний фільтр може поглинати неочікувану кількість гармонічного струму від енергосистеми перед пасивним фільтром та інших нелінійних навантажень на тому ж фідері. Після запуску активного фільтра в пасивному фільтрі не протікало жодного гармонійного струму. Більше того, на затискачах пасивного фільтра не з'являлася напруга жодної гармоніки, оскільки фонові гармонічна напруга була заблокована активним фільтром [26], [29].

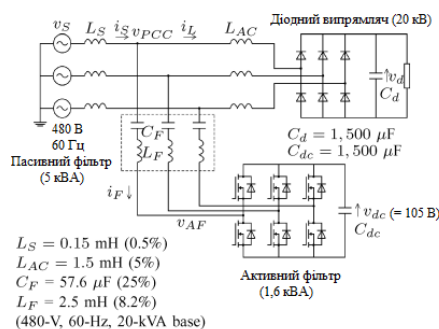
Ці гібридні фільтри забезпечують життєздатні та ефективні рішення для фільтрації гармонік у потужних випрямлячах. Однак їм важко знайти хороший ринок збуту через відсутність трансформатора і складність пасивного фільтра.

## 2.4 Низьковольтні безтрансформаторні гібридні активні фільтри

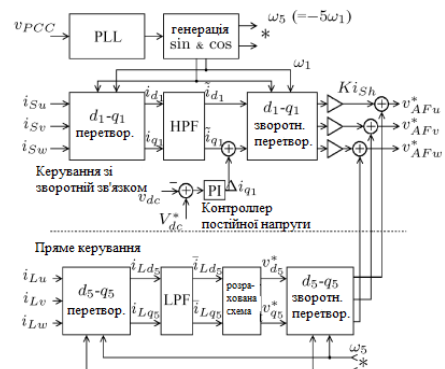
Приводи з регульованою швидкістю на основі сучасних ШІМ-перетворювачів з джерелом напруги на IGBT-транзисторах знайшли широке застосування в промислових приводах, побутовій техніці та на транспорті. Однак у багатьох випадках двигун з інверторним керуванням не вимагає ні швидкої швидкісної реакції, ні рекупераційного гальмування. В результаті трифазний діодний випрямляч може бути використаний в якості переднього перетворювача інвертора, замість трифазного ШІМ-випрямляча. Діодний випрямляч набагато ефективніший і надійніший, а також набагато дешевший, ніж ШІМ-випрямляч в низько і середньовольтних системах електроприводу. Однак діодний випрямляч виробляє велику кількість гармонійних струмів, і тому він не відповідає нормам по гармоніках.

В даному розділі розглядається недорогий безтрансформаторний гібридний активний фільтр [25], [26], порівнюючи його з чистим активним фільтром.

### 2.4.1 Гібридний активний фільтр 480 В



а)



б)

Рисунку 2.12 – Гібридний активний фільтр на 480 В. (а)

Конфігурація схеми. (б) Система керування.

На рисунку 2.12(а) показана конфігурація схеми гібридного активного фільтра, підключеного паралельно з трифазним діодним випрямлячем на 480 В і 20 кВт [26]. Гібридний фільтр безпосередньо підключений до промислового розподільчого фідера

480 В без будь-якого трансформатора. Він призначений для зниження загального коефіцієнта гармонійних спотворень (THD)  $i_s$  нижче 5%. Гібридний фільтр складається з активного фільтра на базі ШІМ-перетворювача напруги джерела живлення потужністю 1,6 кВА з несучою частотою 10 кГц та пасивного фільтра потужністю 5 кВА. Пасивний фільтр являє собою трифазний однонастроєний фільтр на частоту сьомої гармоніки з добротністю  $Q = 22$ . Пасивний фільтр демонструє низьку ефективність фільтрації в діапазоні частот гармонік низького порядку, за винятком частоти сьомої гармоніки.

Пасивний фільтр і активний фільтр безпосередньо з'єднані послідовно один з одним. Така «гібридна» конфігурація призводить до того, що напруга постійного струму на шині постійного струму активного фільтра становить лише 105 В. Крім того, для гібридного фільтра не потрібен імпульсний фільтр, оскільки пасивний фільтр має високий імпеданс близько 10 кГц. Діодний випрямляч має індуктор змінного струму  $L_{AC} - 5\%$  на стороні змінного струму. Цей індуктор змінного струму необхідний для забезпечення належної роботи гібридного фільтра, оскільки на стороні постійного струму діодного випрямляча індуктор не встановлений.

На рисунку 2.12(б) показана система керування гібридним фільтром. Система управління має наступні три функції управління:

- управління зі зворотним зв'язком;
- управління за прямим зв'язком;

- управління за постійною напругою.

Управління зі зворотним зв'язком змушує всі гармонійні струми, що містяться в  $i_F$ , надходити в гібридний фільтр, в той час як з енергосистеми в гібридний фільтр не надходить жоден гармонійний струм. Це покращує ефективність фільтрації пасивного фільтра та запобігає перевантаженню та неефективності пасивного фільтра. Більш того, управління зі зворотним зв'язком змушує активний фільтр діяти як демпфуючий резистор для гармонік низьких частот, так що між пасивним фільтром і індуктивністю енергосистеми не виникає гармонійного резонансу  $L_S$ .

Як наслідок, цей гібридний фільтр звільняється від ретельних досліджень можливості виникнення гармонічного резонансу та перевантажень перед його встановленням. Керування зворотним зв'язком змушує струм  $i_L$  гармоніки, що міститься в  $i_L$ , активно протікати в гібридний фільтр. Керування напругою постійного струму змушує активний фільтр накопичувати і регулювати напругу на конденсаторі постійного струму самостійно, без будь-якого зовнішнього джерела живлення. Для цього використовується пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор.

## **2.5 Порівняння та дослідження активних та гібридних силових фільтрів для компенсації мережевих гармонік**

### **2.5.1 Системи АСФ та ГСФ та нелінійні навантаження**

На рисунку 2.13 показані системи АСФ та ГСФ з нелінійним навантаженням, представленим трифазним шестипульсним діодним випрямлячем з індуктивністю на стороні змінного струму ( $L_{ac}$ ) та струмом на стороні постійного струму ( $I_{dc}$ ), відповідно. В системі АСФ

інвертор АСФ забезпечує як реактивну, так і гармонійну потужність, що призводить до одиничного коефіцієнта потужності на затискачах мережі. З іншого боку, інвертор ГСФ компенсує гармонічну потужність, забезпечуючи лише струми гармонік, а ПСФ відповідає за компенсацію некерованої реактивної потужності. Таким чином, при роботі в мережі з системою ГСФ не гарантується єдиний коефіцієнт потужності при різних режимах навантаження після налаштування ПСФ.

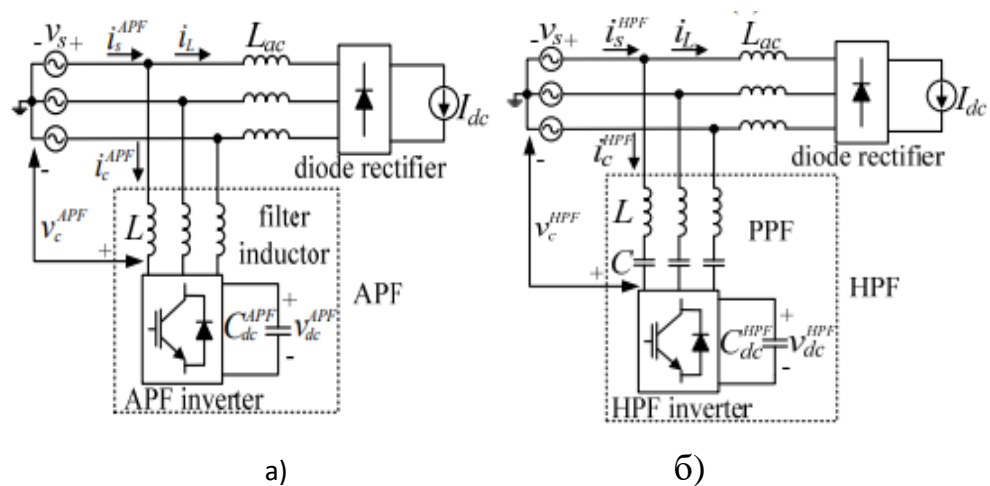


Рисунок 2.13 – Системи фільтрації нелінійних навантажень з АСФ (а) та ГСФ (б)

Для аналітичного та справедливого порівняння обидві системи аналізуються при однакових умовах мережі та навантаження, без урахування напівпровідникових втрат в інверторах та резистивних втрат в реактивних компонентах. Фазна напруга джерела задається середньоквадратичним значенням напруги «лінія-лінія» ( $V_{LL}$ ), а кутова частота  $\omega$  ( $\omega = 2\pi 50$ ):

$$v_s(\omega t) = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{LL} \cos(\omega t) \quad (2.1)$$

Крім того, описано нелінійний струм навантаження, оскільки поведінка інверторів АСФ та ГСФ суттєво залежить від умов навантаження. На рис. 2 показано напругу джерела ( $V_s$ ), струм навантаження ( $I_L$ ) та струм джерела ( $I_s$ ), що протікає в системах АСФ та

ГСФ. На рисунку 2.2 (а) показано  $V_s$  з  $I_L$  та її основною складовою  $i_{Lf}$ , а також кут зміщення коефіцієнта потужності навантаження (КПН) ( $\varphi$ ) та інтервал комутації ( $\Delta$ ).

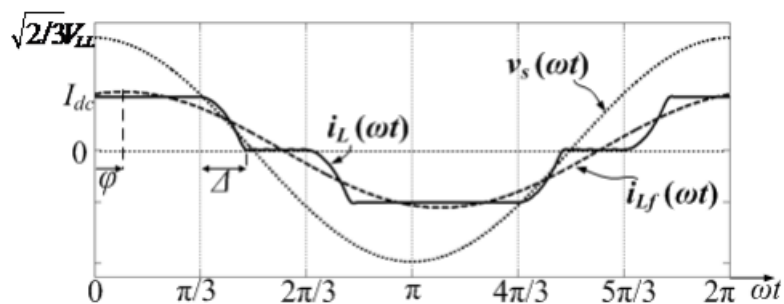


Рисунок 2.14 – а) Напруга джерела та струм навантаження від діодного випрямляча

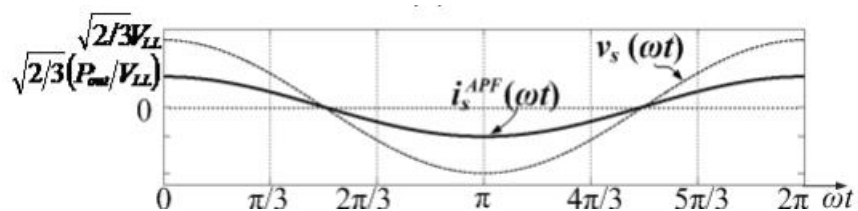


Рисунок 2.14 - б) Напруга джерела та струм джерела в системі АСФ

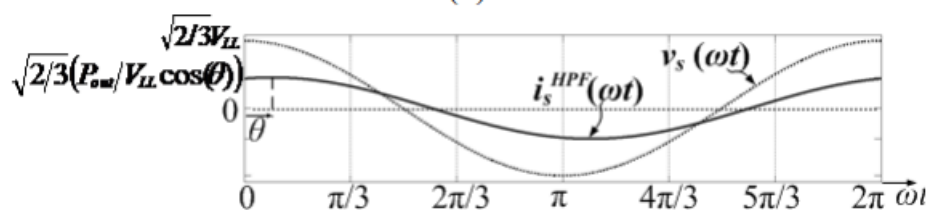


Рисунок 2.14 - в) Напруга джерела та струм джерела в системі ГСФ

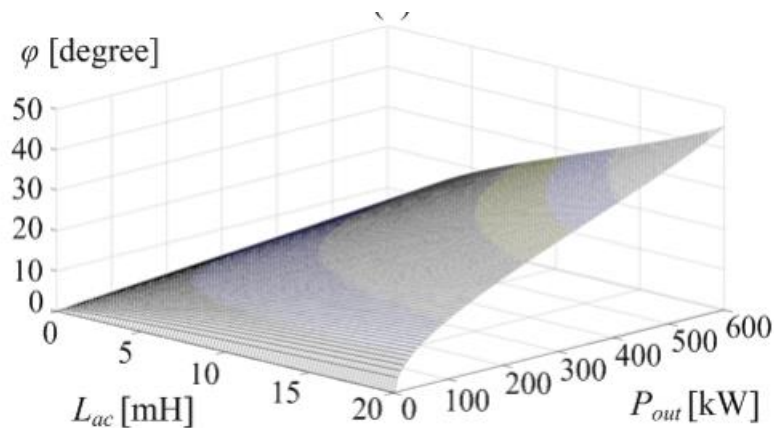


Рисунок 2.14 - г) Кут нахилу ДПФ навантаження в залежності від  $L_{ac}$  та  $P_{out}$  ( $U_{LL} = 3000$  В)

На рисунку 2.14(б) показано  $I_S$  після компенсації, що працює з одиничним коефіцієнтом потужності, оскільки АСФ компенсує гармоніки та реактивну потужність. На рисунку 2.2(в) показано  $I_S$  після компенсації ГСФ з кутом коефіцієнта потужності  $\theta$ , оскільки ГСФ компенсує тільки реактивну потужність. Комутації струму навантаження, як показано на рисунку 2.14(а), не є миттєвими, як в ідеальному випадку, через наявність  $L_{ac}$ . В інтервалі комутації струм навантаження становить :

$$i_L(\omega t) = I_{dc} + \frac{V_{LL}}{\sqrt{2}\omega L_{ac}} \left[ \cos\left(\frac{\pi}{3} - \omega t\right) - 1 \right], \frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3} + \Delta. \quad (2.2)$$

З (2.2) та рисунку 2.14 (а) розраховується інтервал комутації за формулою:

$$\Delta = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{\sqrt{2}\omega L_{ac} I_{dc}}{V_{LL}} \right) \quad (2.3)$$

Потім, споживаний струм навантаження може бути знайдений за допомогою аналізу ряду Фур'є:

$$i_L(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}I_{dc}}{\pi} \{M_L \cos(\omega t - \varphi) + (a_5 \cos(5\omega t) + b_5 \sin(5\omega t)) - (a_7 \cos(7\omega t) + b_7 \sin(7\omega t)) + (a_{11} \cos(11\omega t) + b_{11} \sin(11\omega t)) - \dots\} \quad (2.4)$$

Де:

$$M_L = \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 + \left(\sin \frac{\Delta}{2}\right)^2 - \frac{\Delta \sin(\Delta) \cos(\Delta)}{2}}}{1 - \cos(\Delta)}$$

$$a_k = \frac{1}{2k(k+1)} \left[ \frac{\sin\left((k+1)\frac{\Delta}{2}\right)^2}{\sin \frac{\Delta}{2}} \right] - \frac{1}{2k(k+1)} \left[ \frac{\sin\left((k-1)\frac{\Delta}{2}\right)^2}{\sin \frac{\Delta}{2}} \right]$$

$$b_k = \frac{\sin(\Delta(k-1))}{2k(k-1)(1-\cos(\Delta))} - \frac{\sin(\Delta(k+1))}{2k(k+1)(1-\cos(\Delta))}, k = 5, 7, 11, 13, \dots$$

Припускаючи, що комутаційні апарати та реактивні складові як в системі АСФ, так і в системі ГСФ не мають втрат,  $I_{dc}$  можна віднести до  $P_{out}$  як:

$$I_{dc} = \frac{\pi P_{out}}{3\sqrt{2}V_{LL}M_L \cos(\varphi)} \quad (2.5)$$

Крім того, кут навантаження  $\varphi$ , показаний на рисунку 2.14 (а), визначається з (4) як:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{\sin^2(\Delta)}{\Delta - \sin(\Delta) \cos(\Delta)}\right) \quad (2.6)$$

З (2.3), (2.5) і (2.6) видно, що кут  $\varphi$  залежить від  $L$  та  $P$  які безпосередньо пов'язані з навантаженням реактивної потужності. На рисунку 2.14 (г) наведено графік залежності кута ДПФ навантаження від  $L_{ac}$  та  $P_{out}$ . Видно, що зі збільшенням  $L_{ac}$  та  $P_{out}$  збільшується реактивна потужність навантаження, що в свою чергу призводить до більш високого кута  $\varphi$  під навантаженням.

### 2.5.2 Аналіз кВА рейтингів на АСФ та ГСФ

У цьому розділі наведено аналітичні розрахунки для номінальних значень кВА інверторів з урахуванням характеристик нелінійного навантаження та мережі, наведених у попередньому розділі.

Оскільки АСФ подає на діодний випрямляч як реактивну, так і гармонійну потужність, струм джерела знаходиться у фазі з напругою джерела. Тому струм джерела, що працює з системою АСФ, показаний на рисунку 2.14 (б), має вигляд:

$$i_s^{APF}(\omega t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{P_{out}}{V_{LL}} \right) \cos(\omega t) \quad (2.7)$$

Номинальна потужність кВА інвертора АСФ може бути виражена через середньоквадратичне значення струму через інвертор і середньоквадратичне значення напруги на стороні інвертора змінного струму як:

$$S_{APF} = 3V_c^{APF} I_c^{APF} \quad (2.8)$$

Де  $I_c^{APF}$  та  $V_c^{APF}$  представляють собою середньоквадратичне значення компенсаційного струму через інвертор АСФ і значення напруги на стороні змінного струму інвертора відповідно. З (2.4) і (2.7) середньоквадратичне значення компенсуючого струму, що генерується інвертором, визначається як:

$$I_c^{APF} = \frac{P_{out}}{\sqrt{3}V_{LL}} \sqrt{\tan^2(\varphi) + \frac{K_1}{(M_L \cos(\varphi))^2}} \quad (2.9)$$

Де:

$$K_1 = \sum_{m=1}^{n/2} (a_k^2 + b_k^2), k = 6m \mp 1.$$

Середньоквадратичне значення напруги на стороні змінного струму інвертора APF може становити розраховуються з рисунку 2.14 (а), (2.1), (2.4) та (2.7) як:

$$V_c^{APF} = \sqrt{\frac{V_{LL}^2}{3} + \frac{2P_{out}X_{L1}\tan(\varphi)}{3} + \left(\frac{P_{out}X_{L1}}{\sqrt{3}V_{LL}\cos(\varphi)}\right)^2 \left(\sin^2(\varphi) + \frac{K_2}{M_L^2}\right)} \quad (2.10)$$

Де:

$$K_2 = \sum_{m=1}^{n/2} k^2(a_k^2 + b_k^2), k = 6m \mp 1$$

де  $X_{L1}$  – реактивний опір котушки індуктивності фільтра ( $X_{L1} = L$ ). Номінальна потужність АСФ  $S_{APF}$ , отримана з (2.8), (2.9) і (2.10), залежить від напруги джерела  $U_{LL}$ , вихідної потужності  $P_{out}$ , індуктивності фільтрації  $L$ , вхідної індуктивності навантаження  $L_{ac}$  і кількості гармонік  $n$  у спотвореному струмі навантаження, що підлягає компенсації АПФ.

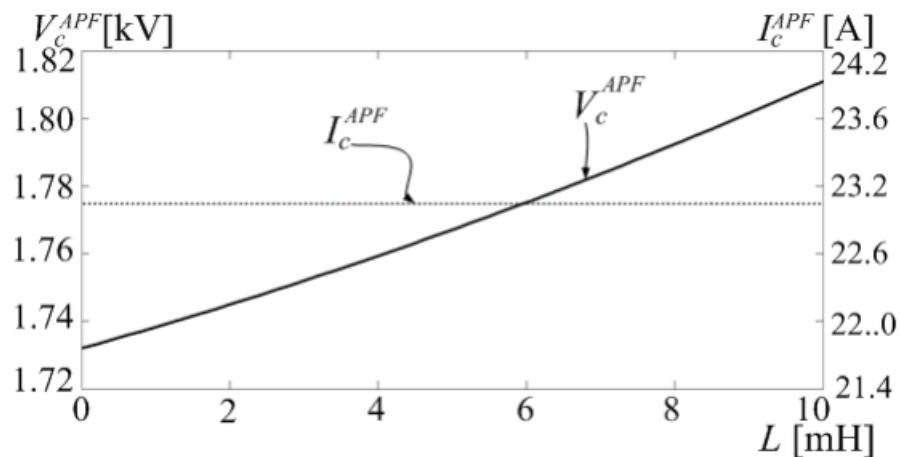


Рисунок 2.15 – Значення середньоквадратичного значення напруги і струму АСФ відносно значення  $L$  ( $V_{LL} = 3000$  В,  $P_{out} = 300$  кВ,  $L_{ac} = 10$  мГн та  $n = 16$ ).

На рисунку 2.15 наведено графіки середньоквадратичного струму через інвертор АСФ ( $I_c^{APF}$ ) та середньоквадратичної напруги на його

змінній стороні ( $V^{APF}$ ) в залежності від  $L$ . Видно, що  $I^{APF}$  залишається постійним, оскільки цей струм містить компенсуючі реактивні та гармонійні струми, присутні в нелінійному навантаженні, яке залишається постійним незалежно від значення  $L$ . Проте,  $V^{APF}$  зростає зі збільшенням  $L$  за рахунок зростання реактивного опору  $X_L$ . Це призводить до підвищення напруги на стороні змінного струму інвертора АСФ, щоб підтримувати постійну компенсацію протікання реактивних і гармонійних струмів через  $L$ . Отже номінальне значення потужності АСФ  $S_{APF}$ , прямопропорційне значенню  $V_{APF}$ .

### **2.5.3 Порівняння номінальних характеристик інверторів ГСФ та АСФ**

В даному розділі порівняння номінальних характеристик інверторів АПЧ та ВПЧ проводиться за показниками усунення гармонік  $n$ , вхідної індуктивності навантаження  $L_{ac}$ , вихідної потужності  $P_{out}$  та індуктивності фільтрації  $L$ . Оскільки практична система ВПЧ повинна працювати з фіксованою ємністю ПСФ, то в усьому діапазоні порівнянь не може бути досягнутий режим роботи з одиничним коефіцієнтом потужності. Для цього порівняння слід зазначити, що АСФ завжди працює з одиничним коефіцієнтом потужності.

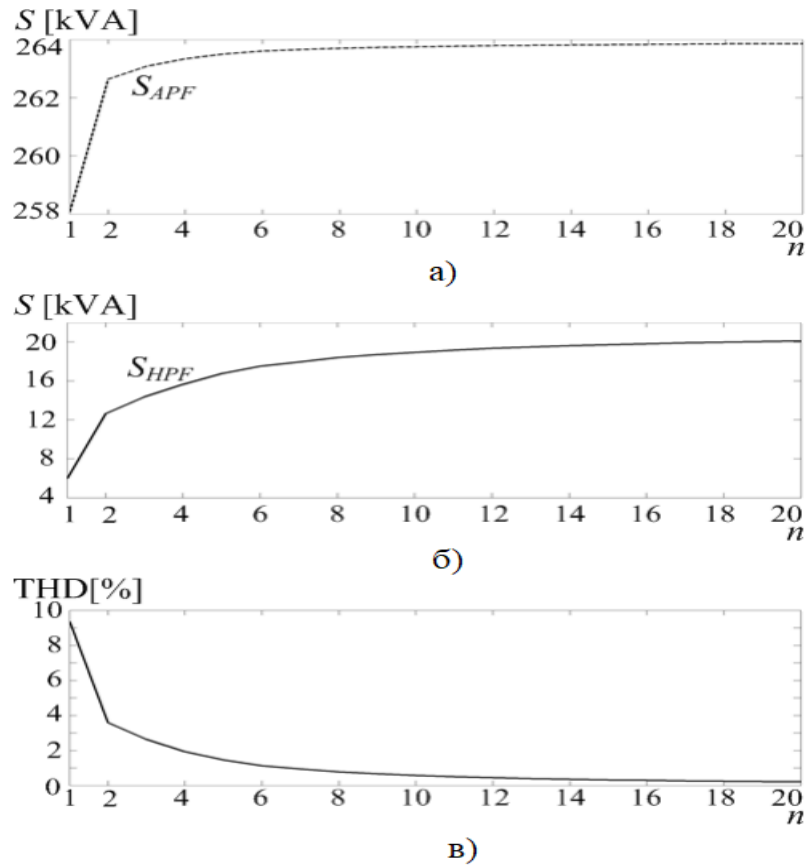


Рисунок 2.16 – (а), (б) Номінальні значення інвертора та (в) відповідні залежності THD від  $n$  ( $V_{LL} = 3000$  В,  $P_{out} = 500$  кВт,  $L = 7$  мГн,  $C = 76,8$  мкФ та  $L_{ac} = 10$  мГн)

На рисунку 2.16(а) і (б) показані номінали інверторів систем АСФ і ГСФ, побудовані в залежності від кількості гармонік, що усуваються,  $n$ . Відповідно до кількості гармонік, що усуваються фільтрами, змінюється коефіцієнт нелінійних спотворень (THD) в струмі на вході в мережу наведено на рисунку 2.16(в). Видно, що покращення якості струму в мережі призводить до зростання як  $S_{APF}$ , так і  $S_{HPF}$  зі збільшенням  $n$ , оскільки струми та напруги інверторів містять гармонійні складові  $n$ . Як наслідок, інвертори видають більше гармонійної потужності. Тим не менш,  $S_{APF}$  має набагато більший номінал, ніж  $S_{HPF}$  за рахунок безперервної компенсації реактивної потужності, яку повинен забезпечувати інвертор АСФ. Наприклад, при

$n = 1$ ,  $S_{APF}$  вже наближається до значення номіналу при  $n=20$ , тому що на компенсацію реактивної потужності в інверторі АСФ витрачається велика частина потужності. Обмеження IEEE 519 за гармоніками струму виконуються до 49-ї гармоніки в струмі джерела, що призводить до  $n = 16$ , яке використовується в подальших порівняннях.

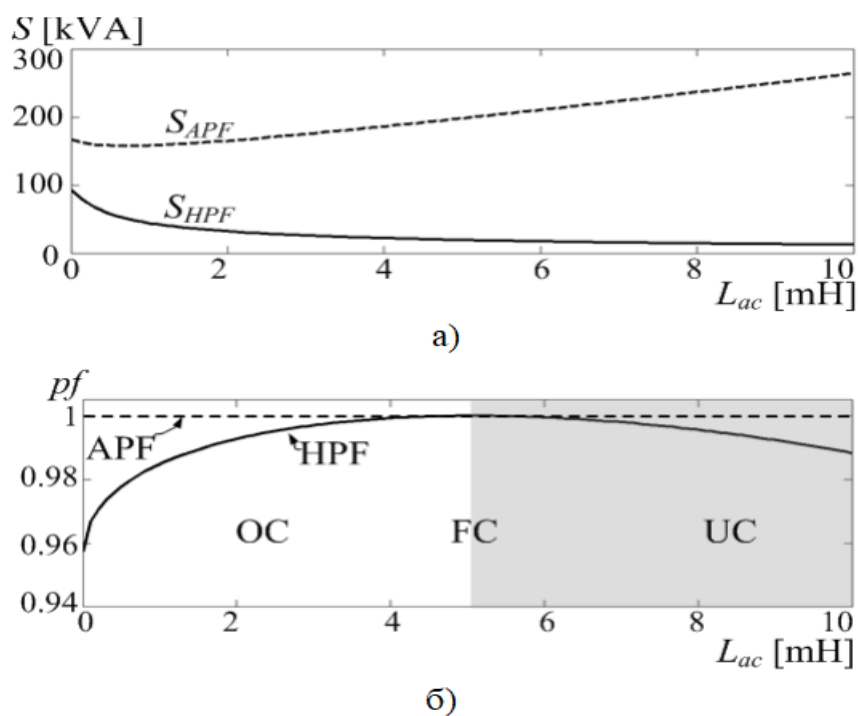


Рисунок 2.17 – (а) Номінальні характеристики інвертора та (б) коефіцієнт потужності в залежності від  $L_{ac}$  ( $V_{LL} = 3000$  В,  $L = 7$  мГн,  $P_{out} = 500$  кВт,  $C = 52$  мкФ,  $n = 16$ ).

На рисунку 2.17 (а) і (б) показані номінальні значення інверторів і коефіцієнти потужності систем АСФ і ГСФ в залежності від індуктивності змінного струму діодного випрямляча  $L_{ac}$ . Збільшення  $L_{ac}$  зменшує  $diL/dt$  за рахунок комутацій струму навантаження, що призводить до згладжування гармонійних струмів, які зменшують стрибки напруги на стороні змінного струму інвертора. Тому номінали інверторів АСФ і ГСФ зменшуються зі збільшенням  $L_{ac}$  в області низької індуктивності. Однак реактивна потужність навантаження також зростає зі збільшенням  $L_{ac}$ , як показано на рисунку 2.17 (б).

Оскільки інвертор АСФ повинен компенсувати реактивну потужність навантаження,  $S_{APF}$  спочатку зменшується через зменшення  $diL/dt$ , а потім збільшується зі збільшенням  $L_{ac}$  через збільшення реактивної потужності навантаження, яку потрібно компенсувати. В той же час,  $S_{HPF}$  продовжує зменшуватися зі збільшенням  $L_{ac}$ , що обумовлено відсутністю компенсації реактивної потужності інвертором. Система ВРП працює в області ОС з  $L_{ac} = 0$ , як показано на рисунку 2.17 (б). При збільшенні  $L_{ac}$  реактивна потужність в навантаженні зростає. Таким чином, ГСФ переходить через FC в область ОС.

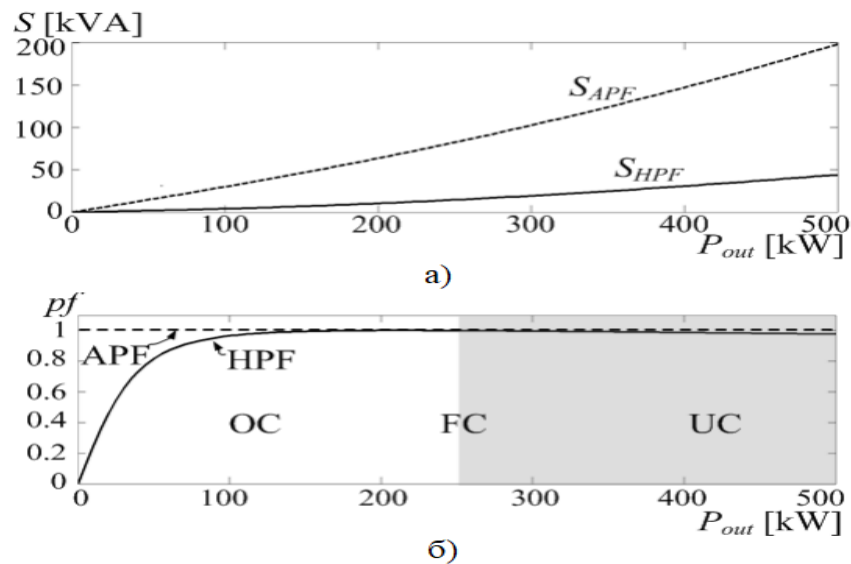


Рисунок 2.18 – (а) Номінали інверторів та (б) коефіцієнт потужності в залежності від  $L$  ( $V_{LL} = 3000$  В,  $P_{out} = 500$  кВт,  $L_{ac} = 5$  мГн,  $L = 7$  мГн  $C = 15$  мкФ,  $n = 16$ ).

На рисунку 2.18 показані номінали інверторів та коефіцієнт потужності систем АСФ та ГСФ в залежності від  $P_{out}$ . Номінали обох інверторів зростають зі збільшенням  $P_{out}$  через збільшення потужності гармонік, які необхідно компенсувати. Однак, інвертор АСФ повинен також компенсувати реактивну потужність, що призводить до більшого приросту  $S_{APF}$  у порівнянні з приростом  $S_{HPF}$ . Збільшення  $P_{out}$  переміщує робочу область системи ГСФ з області ОС в область UC, як показано на

рисунку 2.18 (б). Показано, що на коефіцієнт потужності терміналів мережі з системою ГСФ суттєво впливає зміна  $P_{out}$ .

Це пов'язано з тим, що збільшення  $P_{out}$  на рисунку 2.14(г) призводить до зростання реактивної потужності навантаження при незмінному коефіцієнті реактивної компенсації ПСФ, що зумовлює широку варіацію коефіцієнта потужності в мережі.

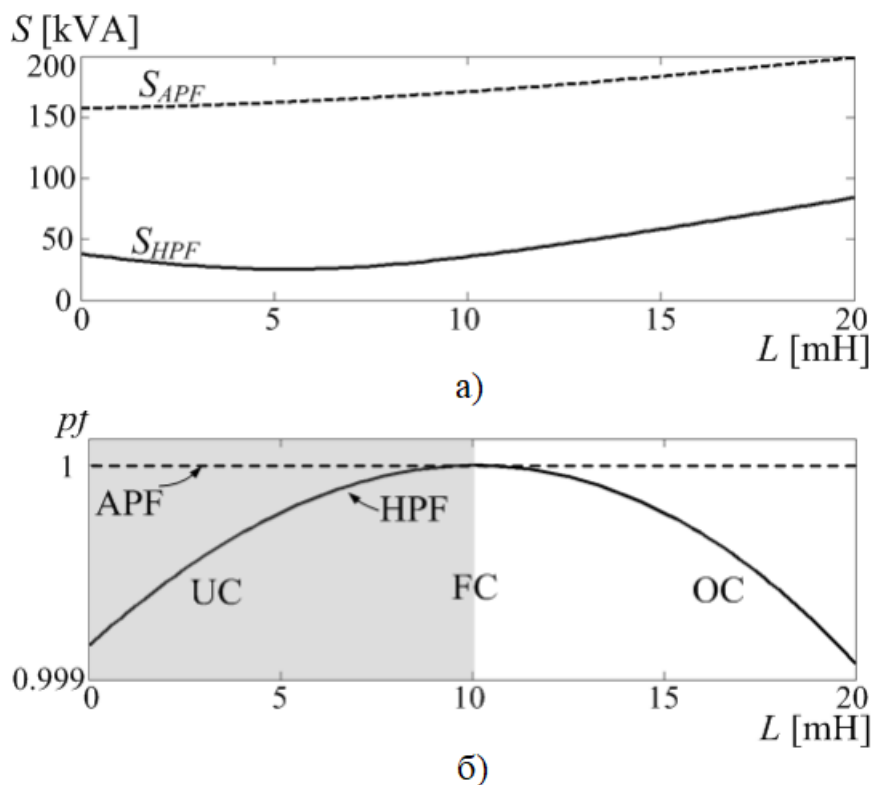


Рисунок 2.19 – (а) Номінали інверторів та (б) коефіцієнт потужності в залежності від  $L$  ( $V_{LL} = 3000$  В,  $P_{out} = 500$  кВт,  $L_{ac} = 2$  мГн,  $C = 32$  мкФ,  $n = 16$ ).

На рисунку 2.19 показано номінальні значення інверторів та коефіцієнт потужності систем АСФ та ГСФ в залежності від  $L$ . Зауважимо, що  $S_{APF}$  зростає зі збільшенням  $L$  за рахунок збільшення номінальної напруги  $V^{APF}$ , як показано на рисунку 2.3. З іншого боку,  $S_{HPF}$  спочатку зменшується, а потім збільшується зі збільшенням  $L$  внаслідок зміни реактивного опору ПСФ на гармонічних частотах, як показано на рисунку 2.14. Збільшення  $L$  переміщує режим роботи системи ГСФ з області UC в область OC, як показано на рисунку 2.19(б).

Зауважимо, що на коефіцієнт потужності терміналів мережі з системою ГСФ  $L$  впливає несуттєво. Однак на практиці  $L$  не повинно бути дуже великим, щоб регулятор системи міг працювати правильно. Велика  $L$  може призвести до зниження частоти перемикання і вимоги підвищеної напруги ланки постійного струму, а також до погіршення ТНД.

#### 2.5.4 Аналіз та порівняння рівнів напруги постійного струму

У цьому розділі представлені та обговорюються вимоги до напруги ланки постійного струму інверторів АСФ та ГСФ. Необхідна напруга ланки постійного струму інвертора зазвичай встановлюється на величину, яка на 5 % перевищує його пікову напругу на стороні змінного струму від лінії до лінії. Таким чином, пікові значення напруги на стороні змінного струму можуть бути використані для вибору відповідного рівня напруги в ланці постійного струму. На рисунку 2.19 показані осцилограми напруги на стороні змінного струму  $v_{APF}$  та  $v_{HPF}$  для одиничного коефіцієнта потужності при двох різних значеннях  $L_{ac}$  з метою спостереження за впливом зміни  $C$  на напругу на стороні змінного струму інверторів. Це зроблено тому, що на рисунку 2.19(а) і (б) використані різні ємності ПСФ для того, щоб система ГСФ працювала з одиничним коефіцієнтом потужності. З рисунку 2.19 видно, що  $v_{HPF}$  не містить основної складової, тоді як  $v_{APF}$  має як основну, так і гармонічну складові. Видно, що стрибки напруги у  $v_{APF}$  з великим  $L$ , показані на рисунку 2.19(б), нижчі, ніж у  $v_{APF}$  з малим  $L_{ac}$ , показані на рисунку 2.19(а), що пояснюється зменшенням  $diL/dt$  в моменти комутації діодного випрямляча. Це призводить до більш плавного протікання компенсуючих струмів  $i$ , як наслідок, до більш плавної форми напруги на стороні змінного струму інвертора АСФ. Напруга  $v_{HPF}$  при великому  $L_{ac}$  та великому  $C$  на рисунку 2.19(б) майже

в 10 разів менша, ніж на рисунку 2.19(a) при малому  $L_{ac}$  та малому  $C$ , що пояснюється зменшенням повного опору ПСФ за рахунок збільшення значення  $C$ . Це узгоджується з рисунку 2.6(a) де середньоквадратичне значення напруги інвертора ГСФ зменшується зі збільшенням  $C$ .

Крім того, стрибки напруги  $v_{APF}$  та  $v_{HPF}$  зміщуються вправо при більшому  $L_{ac}$ . Це пов'язано з тим, що поточний інтервал комутації  $\Delta$  збільшується зі збільшенням  $L_{ac}$  і зміщує піки вправо на час  $\Delta$ . Слід зазначити, що пікове значення  $v_{HPF}$ , як правило, нижче, ніж  $v_{APF}$ , що призводить до низької напруги в ланці постійного струму інвертора ГСФ у порівнянні з напругою в ланці постійного струму інвертора АСФ. Однак, при дуже малому  $C$ , що використовується в системі ГСФ, пікове значення напруги на стороні змінного струму ГСФ може бути вище, ніж напруга на стороні змінного струму АСФ як показано на рисунку 2.10 (a). Це говорить нам про те, що не бажано використовувати дуже малий  $C$  при проектуванні систем ГСФ. Адже на практиці реалізація такого малого  $K$  зрівняється або перевищить вартість реалізації системи ГСФ з системою АСФ без регульованої реактивної потужності, що є небажаним. Моделювання змінних напруг АПЧ та ВПЧ відображено на рисунку 2.21, за допомогою фільтра нижніх частот, який відфільтровує комутаційні частотні складові. Видно, що рисунку 2.21 добре узгоджується з рисунку 2.20(б). Це пов'язано з тим, що в моделюванні використовуються регулятори, які на практиці не можуть повністю придушити гармоніки через характеристики регулятора та інших факторів пов'язаних з використовуваним пасивним фільтром, створюванні осцилограми не є повністю ідентичними відносно обчисленими осцилограмами з рисунку 2.20. Однак, характер кривої відповідає цим рисункам.

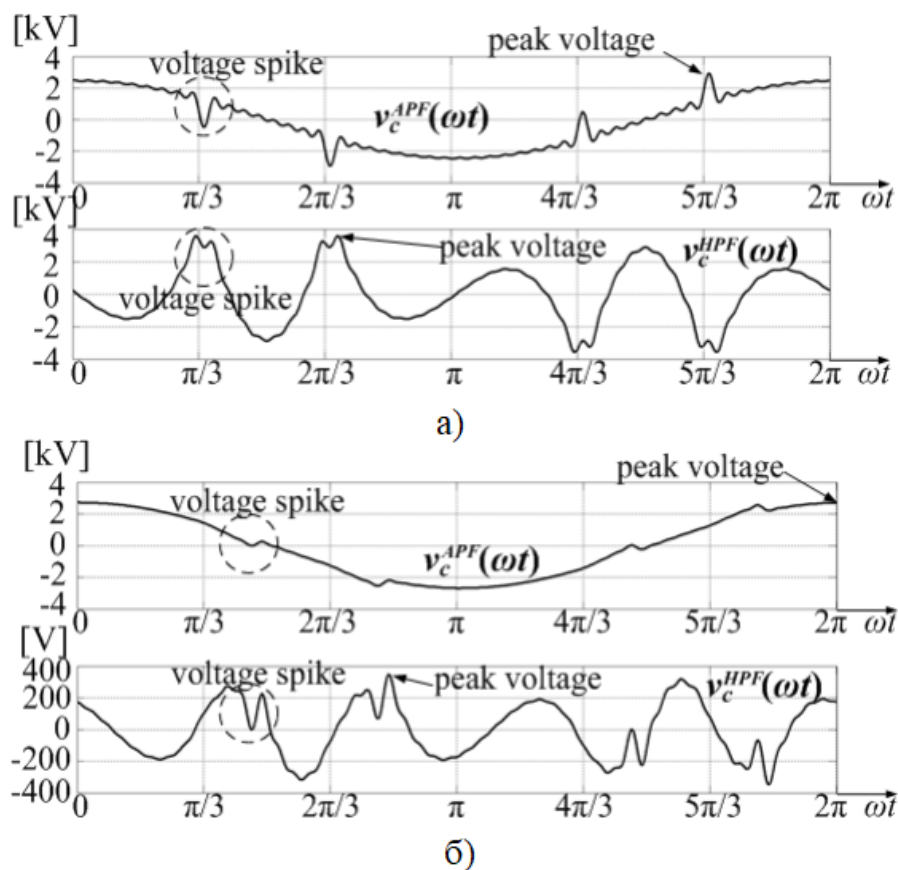


Рисунок 2.20 – Напруги на стороні змінного струму інверторів АСФ та ГСФ при роботі з одиничним коефіцієнтом потужності ( $U_{LL} = 3000$  В,  $P_{out} = 300$  кВт,  $L = 5$  мГн, та  $n=16$ ,) з (а)  $L_{ac} = 0,2$  мГн ( $C_{FC} = 4,5$  мкФ) та (б)  $L_{ac} = 10$  мГн ( $C_{FC} = 35$  мкФ).

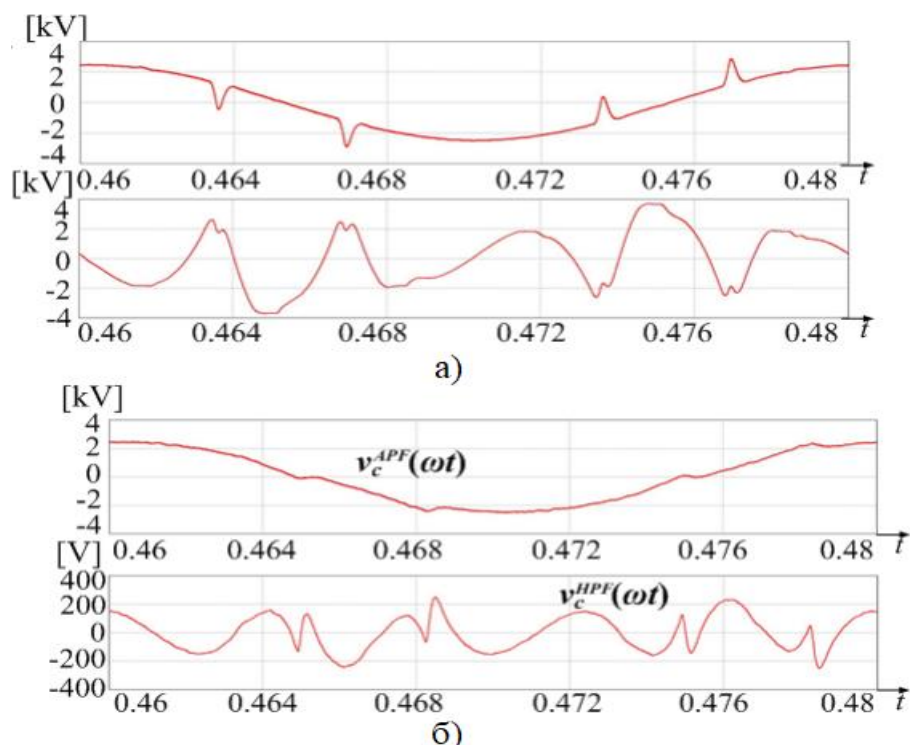


Рисунок 2.21 – Схемотехнічне моделювання напруг на стороні змінного струму інверторів АСФ та ГСФ при роботі з одиничним коефіцієнтом потужності ( $U_{LL} = 3000$  В,  $P_{out} = 300$  кВт,  $L = 5$  мГн і  $n = 16$ .) з (а)  $L_{ac} = 0,2$  мГн ( $C_{FC} = 4,5$  мкФ) та (б)  $L_{ac} = 10$  мГн ( $C_{FC} = 35$  мкФ).

### Висновки до розділу

Розглянуто види пристроїв, які призначені для поліпшення якості електроенергії. Було визначено, що поєднання пасивних та активних фільтрів в систему гібридного є найоптимальнішим пристроєм для покращення якості електроенергії.

Було показано як пристрої покращення якості електроенергії впливають на зменшення THD.

Розглянуто будову гібридного фільтру та зібрано покази осцилографів гармонійних коливань до їх приєднання в систему і після цього.

### 3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ І АНАЛІЗ РОБОТИ ПАСИВНОГО ФІЛЬТРА ГАРМОНІК

#### 3.1 Дослідження схеми гібридного фільтру

В даний час у гармонійному складі струму систем електропостачання промислових підприємств спостерігається збільшення частки вищих гармонік. Це пояснюється збільшенням потужності електроустановок із нелінійними вольт-амперними характеристиками.

На рис. 3.1 наведено принципову схему однієї секції підстанції 110/10 кВ з джерелами реактивної потужності та фільтрами гармонік. Як правило, коефіцієнт реактивної потужності підприємства без застосування компенсуючих пристроїв (природний коефіцієнт реактивної потужності) відповідає вимогам нормативних документів. Компенсація реактивної потужності може бути виконана синхронними двигунами(СД) при їх наявності на шинах РП – 10 кВ. У разі незначної реактивної потужності можливе встановлення конденсаторних батарей (КБ). Якщо навантаження має нестабільний характер споживання реактивної потужності, доцільно застосування ПАКРМ – пристроїв автоматичної компенсації реактивної потужності [31]. За необхідності компенсації значної реактивної потужності (кілька десятків МВАр) досить часто застосовуються синхронні компенсатори (СК).

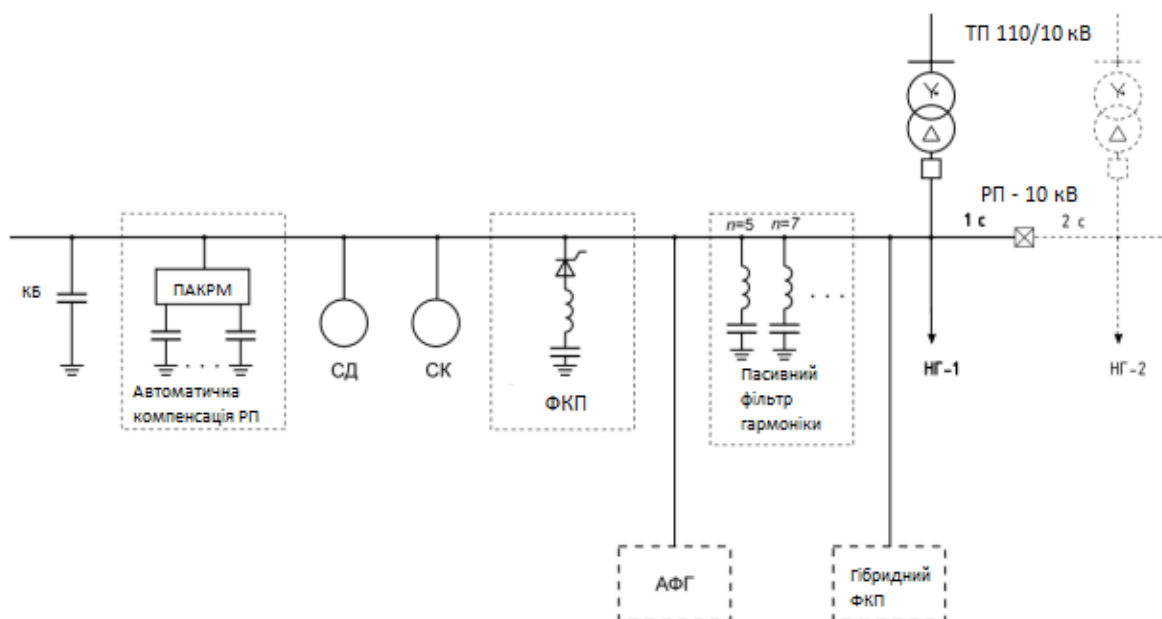


Рисунок 3.1 Принципова схема підстанції з джерелами реактивної потужності та фільтрами гармонік

До складу навантаження НГ-1 входить як лінійне, так і значне навантаження із нелінійною характеристикою. Останнє зумовлює наявність вищих гармонік струму і напруги в схемі, що розглядається. З метою зниження до вищих гармонік досить часто застосовуються фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКП) такі як пасивні фільтри гармонік [32]. Основними перевагами таких пристроїв є їх простота та економічність. Пасивні фільтри одночасно з придушенням гармонік виконують функцію компенсуючого пристрою та регулятора напруги [33]. Їх основний недолік – можливість появи в мережі резонансних явищ, неможливість фільтрації гармонік у разі різко змінного нелінійного навантаження.

Наразі відсутня загальноприйнята методика розрахунку та визначення параметрів силової частини активного фільтра.

### 3.2 Розрахунок пасивної частини гібридного фільтра

Слід зазначити, що існують різні підходи до розрахунку параметрів силової частини пасивного фільтра. Найпростішим є розрахунок методом послідовних наближень з метою отримання необхідних частотних характеристик ланок і генерованої фільтром реактивної потужності. Пасивний фільтр розглядається як чотиріполюсник, на зовнішніх затискачах якого діють джерела гармонік. Для його опису використовується рівняння в гібридних параметрах. На наступному кроці виконують синтез цього чотиріполюсника і здійснюють денормування параметрів фільтра щодо частоти основної гармоніки.

Розглянемо вузькосмуговий пасивний фільтр гармонік (рис. 3.2), що складається з паралельно з'єднаних  $L$ - $C$  ланок – реактор-конденсатор (друга канонічна схема Фостера).

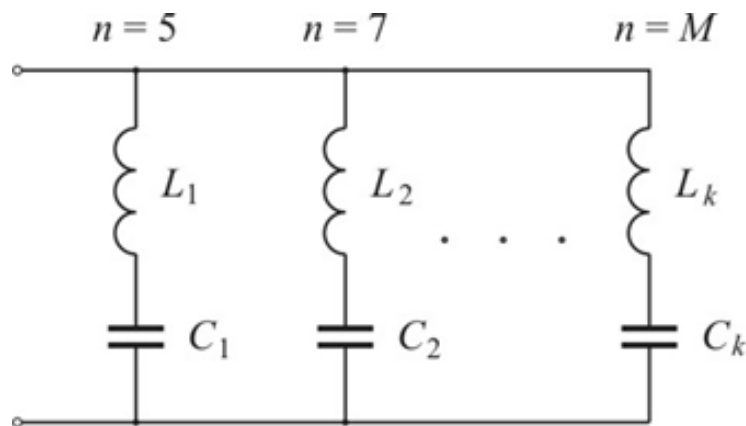


Рисунок 3.2 Схема пасивного фільтра

Кожна з ланок  $L_i - C_i$  розрахована на придушення певної гармоніки канонічного ряду (як правило, гармонік порядку  $n < 20$ ). Результуючий опір кожної  $i$ -ланки для резонансної гармоніки порядку  $n_p = \frac{f_p}{f_0}$  ( $f_p$  – резонансна частота ланки;  $f_0$  – основна частота мережі 50 Гц) близький до нуля, тобто:

$$x_{L(n)} - x_{C(n)} \approx 0,$$

де  $x_{L(n)}$ ,  $x_{C(n)}$  – опори елементів ланки (реактора і конденсатора) струму резонансної гармоніки.

Таким чином, на резонансній частоті справедлива рівність

$$x_{л} = x_L - x_C \quad (3.1)$$

де  $x_L$ ,  $x_C$  – опори реактора і конденсатора струму основної гармоніки.

Значення  $x_L$  та  $x_C$  визначаються через відповідні опори струму резонансної гармоніки

$$x_L = \frac{x_{L(n)}}{n_p}, \quad (3.2)$$

$$x_C = n_p x_{L(n)} \quad (3.3)$$

На основі рівностей (3.2) і (3.3) опір  $x_{л}$  визначається за формулою

$$x_{л} = \frac{x_{L(n)}}{n_p - n_p x_{L(n)}}$$

Прийнявши сувору рівність у виразі (3.1), можна записати

$$x_{л} = \frac{x_{C(n)}}{n_p - n_p x_{L(n)}}$$

Відповідно до рівності (3.3) опір  $x_{л}$  визначається виразом

$$x_{л} = \frac{1 - n_p^2}{n_p^2} \quad (3.4)$$

З урахуванням  $n_p > 1$  можна зробити висновок, що опір ланки має емнісний характер ( $x_L < 0$ ). При цьому співвідношення між опорамі задовольняє умову  $x_L < x_C$ .

Відповідно до цього струм ланки випереджає прикладену напругу на  $90^\circ$  (у припущенні, що активні опори реактора і конденсатора дорівнюють нулю). Якщо прийняти вектор напруги спрямованим за дійсною віссю комплексної площини, то вектор струму буде спрямований за уявною. У цьому випадку справедлива рівність

$$jI_L = \frac{U_L}{jx_L}$$

З урахуванням опорів елементів ланки цей вираз записується у вигляді

$$jI_L = \frac{U_L}{jx_L - jx_C}$$

Напруга, прикладена до ланки (фільтру), через падіння напруги на реакторі та конденсаторі визначається за формулою

$$U_L = jI_L jx_L - jI_L jx_C, U_L = U_C - U_L$$

Таким чином, напруга на конденсаторі залежить від падіння напруги на реакторі

$$U_C = U_L + U_L$$

Отриманий вираз свідчить про те, що напруга на конденсаторі пасивного фільтра вищих гармонік більша, ніж прикладене до ланки значення, на величину падіння напруги на реакторі. В результаті цього конденсатор у складі фільтру генерує більшу реактивну потужність, чим окремо(без реактору):

$$Q_C = \frac{U_C^2}{x_C} = \frac{(U_L + U_L)^2}{x_C}$$

Реактивну потужність ланки можна виразити через її опір

$$Q_C = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{x_C}$$

де  $U_{ном}$  - номінальна напруга мережі.

З урахуванням виразу (3.4) реактивна потужність ланки через опір конденсатора, що входить до неї, розраховується за формулою

$$Q_{зв} = \frac{U_{ном\ мережі}^2}{x_c} - \frac{n_p^2}{(n_p^2 - 1)}$$

що також свідчить про збільшення генерованої реактивної потужності ланки, що генерується, порівняно з потужністю окремого конденсатора.

Як відомо, резонансна частота послідовного  $L$ - $C$  контуру визначається виразом

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

(3.5)

На основі цього виразу можна зробити висновок, що резонансна частота ланки фільтра не зміниться, якщо збільшити (зменшити) ємність конденсатора і зменшити (збільшити) індуктивність реактора в  $K$  разів. Дана залежність резонансної частоти від параметрів ланки дає змогу визначити такі значення  $L_i$  і  $C_i$ , які забезпечують або необхідну генераторну реактивну потужність, що генерується, або мінімальну вартість пасивного фільтра.

Реактивна потужність, що генерується фільтром, через індуктивності та ємності ланок розраховується за виразом

$$Q_{\phi} = \sum_{i=1}^m \frac{U_{ном}^2}{\frac{1}{2\pi f_o C_i} - 2\pi f_o L_i}$$

(3.6)

де  $U_{ном}$  – номінальна напруга мережі,

$m$  – кількість ланок фільтру.

Розрахунок параметрів пасивного фільтра доцільно виконати у два етапи.

На першому етапі визначаються значення індуктивностей  $L_{i\text{поч}}$  і ємностей  $C_{i\text{поч}}$  кожної ланки з урахуванням резонансних гармонік  $n_i$ . Для цього в якості вихідних параметрів довільно приймаються значення індуктивностей  $L_{i\text{поч}}$  (або ємностей  $C_{i\text{поч}}$ ) ланок. При цьому є можливість задати співвідношення між індуктивностями (ємностями) окремих ланок фільтра. З урахуванням виразу (5) ємності конденсаторів кожної ланки за відомих значень індуктивності розраховуються за формулою:

$$C_{i\text{поч}} = \frac{1}{L_{i\text{поч}}(2\pi f_{pi})^2}$$

Якщо як вихідний параметр задано ємності конденсаторів, індуктивності ланок визначають аналогічно:

$$L_{i\text{поч}} = \frac{1}{C_{i\text{поч}}(2\pi f_{pi})^2}$$

Другий етап полягає в уточненні отриманих значень індуктивностей і ємностей ланок з урахуванням необхідної (планованої) реактивної потужності фільтра:

- згідно з виразом (6) розраховується генерована реактивна потужність фільтра з параметрами  $L_{i\text{поч}}$  і  $C_{i\text{поч}}$ , визначеними на першому етапі –  $Q_{\text{фпоч}}$ ;

- визначається відношення  $K_Q$  необхідного (планованого) значення реактивної потужності фільтра  $Q_{\text{ф}}$  до отриманого на першому етапі значення  $Q_{\text{фпоч}}$  :

$$K_Q = \frac{Q_{\text{ф}}}{Q_{\text{фпоч}}}$$

- остаточні значення параметрів фільтра визначають з урахуванням виразу (3.5)

- незмінності резонансної частоти ланки в разі пропорційної зміни індуктивності та ємності (зменшення в  $K_Q$  разів одного і збільшення в стільки ж разів іншого значення):

$$\begin{cases} L_i = \frac{L_{i\text{поч}}}{K_Q} \\ C_i = K_Q C_{i\text{поч}} \end{cases}$$

- за виразом (3.6) визначається реактивна потужність, що генерується цим фільтром.

### 3.3 Цифрове моделювання

Як середовище для моделювання в даній роботі був обраний програмний комплекс MatLab. Програмний комплекс MatLab є потужним середовищем для проведення математичних обчислень, заснованої на матричному поданні даних.

При відсутності засобів поліпшення електромагнітної сумісності коефіційних гармонійних складових трифазного мостового перетворювача близько 30%.

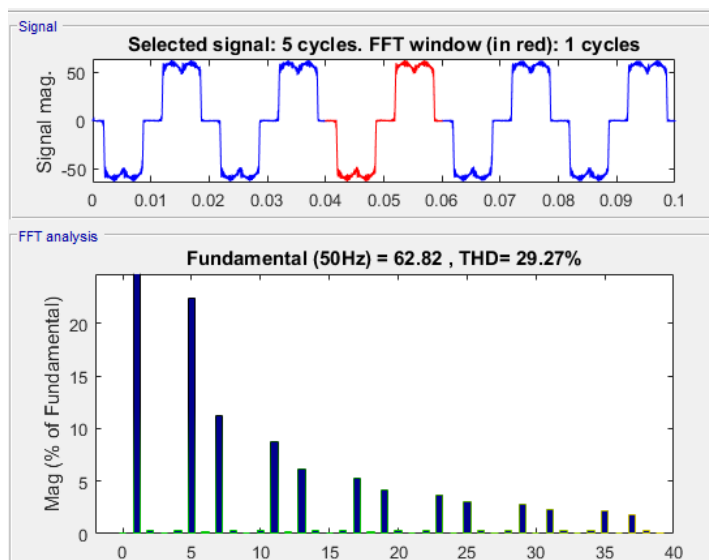


Рисунок 3.3 Осцилограми до процесу фільтрації

Розглянемо спочатку використання активного фільтра для поліпшення електромагнітної сумісності.

Модель системи з активним фільтром та нелінійним навантаженням представлена на рисунку 3.4.

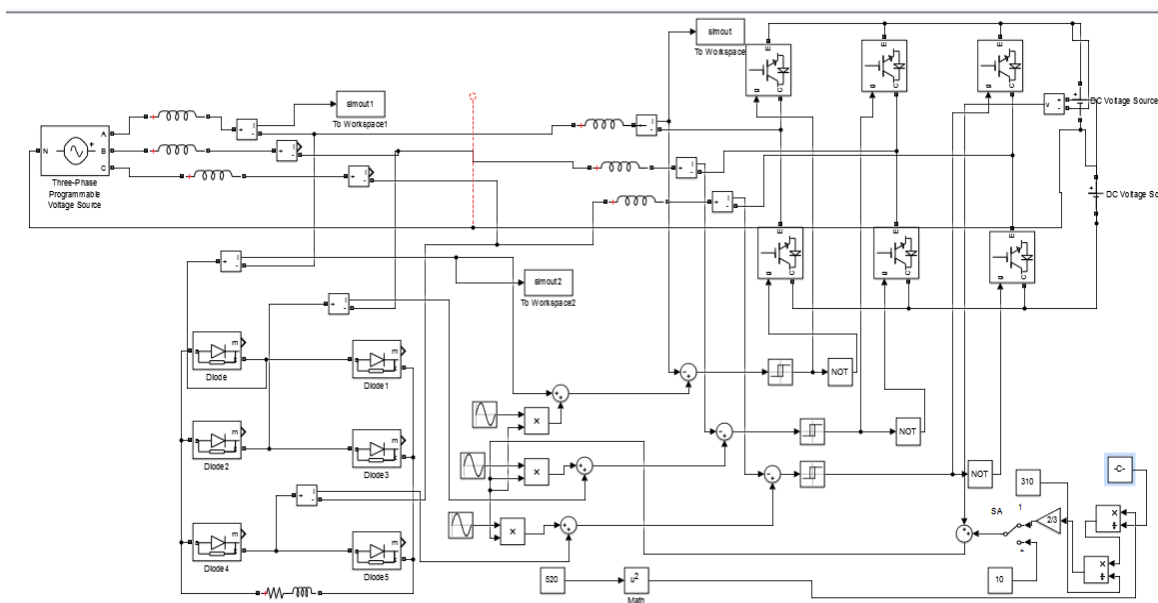


Рисунок 3.4 – Модель системи з активним фільтром та нелінійним навантаженням

Роботу силового активного фільтру оціним осцилограмами його роботи: струму мережі, струму навантаження, струму активного фільтру, активні та реактивні потужності навантаження, активного фільтру та мережі, а також спектр фазного струму. Аналіз проведено для усіх потужностей, відповідних електроприймачів.

На рисунку 3.5-3.7 представлено результати моделювання для  $P_n=30$  кВт, яка відповідає потужності обдирального верстату.

Рисунок 3.5 демонструє струм споживаний з мережі, навантаження та активного фільтру. Струм навантаження спотворений, активний фільтр виробляє антигармоніки. Сума струмів фільтру та навантаження дає синусоїдальний струм мережі, синфазний напруги мережі

На рисунку 3.6 представлено склад потужностей активного випрямляча, мережі, навантаження. Активна потужність мережі дорівнює потужності навантаження, а реактивна дорівнює нулю. Фільтр має реактивну потужність в протифазі реактивній потужності навантаження, та частку активної потужності навантаження.

На рисунку 3.7 в представлено спектр струму мережі та струму навантаження. Коефіцієнт гармонійних спотворень THD струму навантаження дорівнює 30%, а струму мережі менше 1%, що задовольняє стандартам на якість струму.

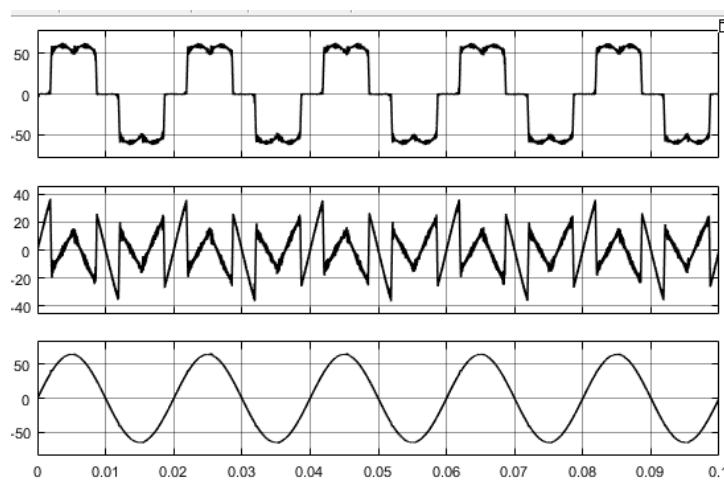


Рисунок 3.5 – Результати моделювання для  $P_H=25$  кВт

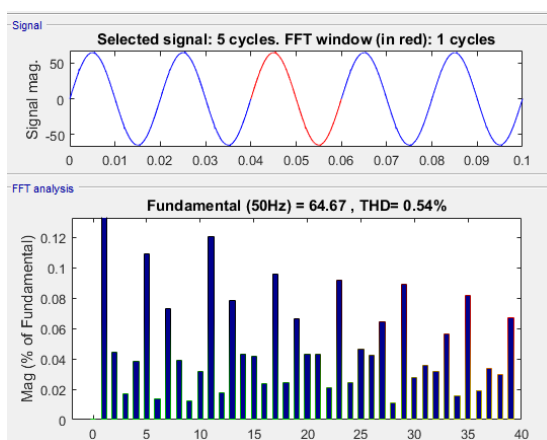


Рис. 3.6– Спектри струму навантаження (а) та струму мережі (б)

Розрахуємо параметри фільтра. Аналізуючи гармонійний склад струму, виявлено що 5 та 7 мають найбільшу амплітуду струму. Саме для них розрахуємо ланки пасивного фільтра, для зменшення потужності Активного фільтра, який з аналізу осцилограм роботи складає 10 кВар

У таблиці наведено значення параметрів пасивного фільтра з двома L- C ланками, розрахованими за наведеною вище методикою. Дефіцит реактивної потужності на фазу в точці підключення фільтра становить 5 кВАр.

Як вихідний параметр задано ємності конденсаторів, індуктивності ланок визначаються:

Задаємося ємністю  $C=50$  мкФ для 5-ї гармоніки, та  $C=20$  мкФ для 7-ї гармоніки. Та визначаємо індуктивність L.

$$L_{5\text{поч}} = \frac{1}{C_{5\text{поч}}(2\pi f_{p5})^2} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 250)^2} = 8,11 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Визначаємо значення реактивної потужності, що генерується фільтром, через індуктивності та ємності ланок розраховується за виразом

$$Q_{\phi 5\text{поч}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\frac{1}{2\pi f_o C_{5\text{поч}}} - 2\pi f_o L_{5\text{поч}}} =$$

$$= \frac{220^2}{\frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} - 8,11 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,792 \text{ кВАр}$$

Визначаємо відношення  $K_Q$  необхідного (планованого) значення реактивної потужності фільтра  $Q_{\phi 5}$  до отриманого на першому етапі значення  $Q_{\phi 5\text{поч}}$

$$K_{Q5} = \frac{Q_{\phi 5}}{Q_{\phi 5\text{поч}}} = \frac{3,5}{0,792} = 4,42$$

Незмінності резонансної частоти ланки в разі пропорційної зміни індуктивності та ємності (зменшення в  $K_Q$  разів одного і збільшення в стільки ж разів іншого значення)

$$\begin{cases} L_5 = \frac{L_{5\text{поч}}}{K_Q} = \frac{8,11 \cdot 10^{-3}}{4,42} = 1,835 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \\ C_5 = K_{Q5} C_{5\text{поч}} = 4,42 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 221 \text{ мкФ} \end{cases}$$

Аналогічно проводимо розрахунки для 7-ї гармоніки:

$$L_{7\text{поч}} = \frac{1}{C_{7\text{поч}}(2\pi f_{p5})^2} = \frac{1}{20 \cdot 10^{-6} \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 350)^2} = 10,387 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$Q_{\phi 7\text{поч}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{\frac{1}{2\pi f_o C_{7\text{поч}}} - 2\pi f_o L_{7\text{поч}}} = \frac{220^2}{\frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} - 10,387 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,801 \text{ кВар}$$

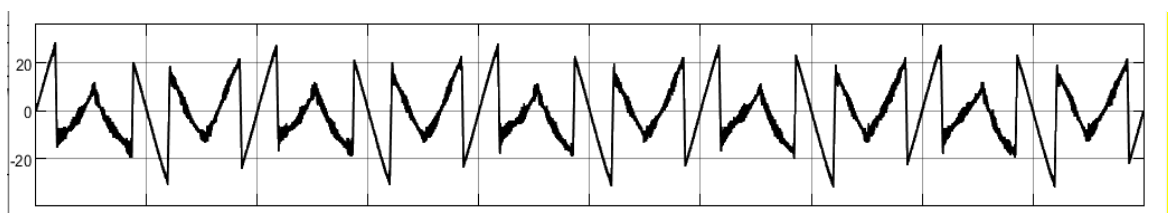
$$K_{Q7} = \frac{Q_{\phi 7}}{Q_{\phi 7\text{поч}}} = \frac{1,5}{0,801} = 1,873$$

$$\begin{cases} L_7 = \frac{L_{7\text{поч}}}{K_Q} = \frac{10,387 \cdot 10^{-3}}{1,873} = 5,546 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \\ C_7 = K_{Q7} C_{7\text{поч}} = 1,873 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 37,46 \text{ мкФ} \end{cases}$$

Таблиця 3.1 Результати розрахунку параметрів пасивного фільтра для 5-ої та 7-ої гармоніки

	5 гармоніка (250 Гц)	7 гармоніка (350 Гц)
L, мГн	1,835	5,546
C, мкФ	50	20
Qф, квар	3,5	1,5

Результати моделювання гібридного активно фільтра, як бачимо струм активного фільтра менший на 21% ніж при роботі лише активного фільтра без пасивної частини.



Використання пасивної частини дозволяє зменшити потужність активного фільтру, що впливає на його масо-габаритні показники та вартість.

### **Висновки до розділу**

1. У якості пристрою для поліпшення якості споживаного струму мережі та компенсації реактивної потужності був обраний гібридний паралельний активний фільтр.

2. Цифровим моделюванням досліджено систему мережа-гібридний фільтр-нелінійне навантаження. Застосування гібридного паралельного активного фільтра в системі електропостачання дозволяє повністю компенсувати реактивну потужність

3. THD складає менше 1% після компенсації гібридним фільтром, до компенсації він складав 30%

## **4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ**

### **4.1 Опис ідеї проекту**

Пристрій гібридного фільтру наразі використовується в розподільчих пристроях дуже рідко. Ідея проекту полягає в тому, щоб підключати гібридні фільтри до розподільчих пристроїв, що підвищить надійність електропостачання при аварійних відключеннях мережі, коли відповідно з'являється високі значення напруги та кількість гармонічних коливань зростаю.

В результаті цього побутові споживачі будуть більш забезпечені електроенергією, побутові пристрої будуть захищені, так як їх робота

буде продовжуватися в їх допустимих номінальних значення, а також подовжиться їх термін експлуатації, що в майбутньому буде заощаджувати більше коштів.

Ідея стартап-проекту описана в таблиці 4.1 , яка розкриє цілісне уявлення про зміст ідеї та можливий базовий потенційний ринок, де слід шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для користувача
Продаж та підключення гібридних фільтрів на РП побутових споживачів	1. Захист побутових споживачів від аварійних відключень	Зменшення часу щорічних вимкнень РП від постачання електроенергії

Продовження таблиці 4.1

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для користувача
Продаж та підключення гібридних фільтрів на РП побутових споживачів	2. Засіб використання генерацій АЕС побутовими споживачами, без підвищення номінальних параметрів напруги, при аваріях ОЕС	Безпечна експлуатація приладів, які споживають електроенергію, побутовими споживачами

	3. Зменшення генерації реактивної потужності	Збільшення часу експлуатації комутаційних приладів встановлених в РП, збільшення ККД ОЕС
--	--	--

Визначений перелік слабких, сильних і нейтральних характеристик і властивостей ідеї для потенційного підходу формує основу її конкурентоспроможності.

Поки що конкурентів в Україні немає, оскільки гібридні силові фільтри малоросповсюдженні та сама енергосистема більш насичена використанням активних та пасивних силових фільтрів окремо для проблеми, яка більше генерує реактивну потужність, нехтуючи проблемами інших менш значних гармонічних відхилень.

#### 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

У рамках цього відділу проводяться технічні аудити, за допомогою яких можуть бути реалізовані ідеї проекту (послідовність дій щодо реалізації комплексного підходу).

Визначення технічної здійсненності концепції проекту передбачає аналіз компонентів, наведених у таблиці 4.2 .

Таблиця 4.2 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Визначення за допомогою програмного забезпечення	Диспетчерські системи	Наявна	Доступна

	показників якості електроенергії			
2.	Встановлення пристроїв компенсації гармонійних коливань в РП	Балансоутримувачі ОЕС	Наявна	Доступна

### 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз ринкового середовища: Склали в таблицю з переліком факторів, які сприяють реалізації проекту на ринку, і тих, що перешкоджають цьому, і ці фактори перераховані в таблицях 4.3 і 4.4 відповідно.

Таблиця 4.3 - Фактори загроз

/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Важкий економічний стан країни	Відсутність коштів для реалізації самого проекту	Зниження ціни
2.	Конкуренція	Створення подібного обладнання	Зниження ціни, патентування технології

Продовження таблиці 4.3

/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
3.	Монополія ринку	Наявність монопольного власника обслуговуючого енергосистеми	Створення контрактів для співпраці та розвитку конкурентного ринку електроенергії

Таблиця 4.4 - Фактори можливостей

/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Підвищення надійності роботи комутаційних пристроїв РП	Створення програмної синхронізації для зручного коригування параметрів гібридного фільтру при наявності відхилень в значеннях електроенергії	Створення оновлень програм диспетчерського керування
2.	Можливість побутовими споживачами створювати заявки встановлення пристроїв при низькій якості електроенергії в компаніях обслуговування ОЕС	Створення можливості залишати запити для встановлення гібридних фільтрів споживачами електричної енергії при використанні веб-ресурсів компанії, які обслуговують ОЕС	Створення можливості подачі заявок на веб-ресурсах компаній, які обслуговують ОЕС

Завершальним етапом аналізу ринку можливостей реалізації проекту є складання SWOT-аналізу – сильні та слабкі сторони, матриця аналізу загроз та можливостей, SWOT-аналіз наведено в таблиці 4.5.

Перелік ринкових загроз і ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз і можливостей ринкового середовища. На відміну від ринкових загроз і ринкових можливостей, які є наслідками (передбаченими результатами) факторних впливів, вони ще не реалізовані на ринку з певною ймовірністю реалізації.

Наприклад: зменшення доходу потенційного споживача є фактором загрози, згідно з яким можна передбачити, що важливість цінового фактора у виборі продукту зростає, що призведе до цінової конкуренції (яка вже є загрозою ринку). Виходячи з переваг і недоліків даного проекту, слід вибрати план реалізації на ринку.

Таблиця 4.5 - SWOT-аналіз стартап-проекту

<p><b>Сильні сторони:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Наразі у проекту немає подібних конкурентів;</li> <li>- Покращення якості електроенергії;</li> <li>- Автономне керування диспетчерським центром;</li> </ul>	<p><b>Слабкі сторони:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- економічне становище держави;</li> <li>- необізнаність покупців;</li> <li>- високі затрати на створення контрактів;</li> <li>- загроза нестабільності роботи через новизну;</li> <li>- тимчасове збільшення ціни на електроенергію</li> </ul>
<p><b>Можливості:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Надійність електропостачання;</li> <li>- Зменшення вартості електроенергії в найближчому майбутньому;</li> <li>- Розширення асортименту продукції;</li> <li>- Розширення асортименту послуг;</li> </ul>	<p><b>Загрози:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- складне економічне становище в країні;</li> <li>- наявність ринкового монополісту;</li> </ul>

### 4.3 Розроблення ринкової стратегії проекту

Тому, оскільки необхідно зосередитися на одному секторі, стратегія проекту буде зосереджена. У ролі стратегії розвитку обирається стратегія диференціації, яка передбачає надання продукту унікальних, важливих з точки зору споживача характеристик, які відрізняють товар від конкурентів. Ця відмінність може ґрунтуватися на об'єктивних чи суб'єктивних, матеріальних і нематеріальних атрибутах товарів, реальних чи уявних. Інструментом реалізації стратегії диференціації є позиціонування на ринку.

Перший крок у розробці ринкової стратегії передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільової групи потенційних споживачів.

Вибір потенційних цільових груп споживачів наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність сприйняття споживачем товару	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Електропередавальні компанії	Часткова готовність	Високий	Слабка	Складно
2.	Інвестори	Повна готовність	Достатній	Слабка	Складно
3.	Державні органи влади	Часткова готовність	Високий	Помірна	Складно
Які цільові групи обрано: електропередавальні компанії					

Оскільки пристрій зосереджено на одній ланці читання та передачі даних, він вибрав централізовану маркетингову стратегію. У цьому випадку вживаються заходи для створення попиту (навчити споживачів користуватися товаром, створити регулярний попит, збільшити споживання). Така стратегія можлива лише на початкових етапах життєвого циклу продукту, коли попит розширюється, а взаємний тиск з боку конкурентів ще низький. В іншому випадку компанії-конкуренти повинні бути оборонними або стратегічними.

#### 4.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Модель маркетингу продукту можна представити так. Дизайн продукту: пристрій, який підключається до РП, перетворює електроенергію низької якості на високу, передає дані стану пристроїв РП через синхронізацію з диспетчерською системою і синхронізує дані про якість електроенергії між диспетчерськими серверами та веб-сторінок компаній, які обслуговують ОЕС.

Реальний продукт має такі характеристики:

- номінальна напруга живлення ;
- номінальний струм споживання до;
- ступень захисту ;
- наявність автономного живлення у вигляді
- інтерфейс передачі даних.;
- зовнішня тактова кнопка для сполучення пристрою;
- відповідні сертифікати та стандарти.

Товар із підкріпленням передбачає послуги по встановленню, монтажу, сервісні послуги та послуги обслуговування.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару показано у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі, або такі, що потрібно створити)
1.	Захищеність	Захист від низької якості електроенергії	Висока якість електроенергії
2.	Економічність	Окупність пристрою в найближчому майбутньому	Зменшення ціни за електропостачання
3.	Надійність	Надійність електропостачання	Безперервність електропостачання

Продовження таблиці 4.7

/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі, або такі, що потрібно створити)
4.	Адаптація	Регуляція параметрів синусоїд у віддаленому режимі	Можливість адаптації до змін якості електроенергії

Концепція, згідно з якою компанія ретельно розглядає та координує свої зусилля по багатьох каналах комунікації, називається концепцією маркетингових комунікацій і наведена в таблиці 4.8. Це робиться для створення чіткого, послідовного та переконливого сприйняття продукту серед споживачів. Він має на меті інформувати, переконувати, нагадувати споживачам і ринку в цілому про товари та події.

Таблиця 4.8 - Концепція маркетингової комунікації

/п	Цільові групи	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Електропередавальні компанії	Інтернет	Надійність, повнота інформації	Зацікавити клієнтів	Зручність, надійність, достовірність
2.	Інвестори	Інтернет	Надійність, повнота інформації	Зацікавити клієнтів	Зручність, надійність, достовірність
3.	Державні органи влади	Інтернет	Надійність, повнота інформації	Зацікавити клієнтів	Зручність, надійність, достовірність

## Висновки до розділу

1. Було розроблено стартовий проект з ідеєю покращення впровадження та економічних міркувань надійності розподільної мережі, тобто комплексного методу, який буде надіслано енергокомпаніям або використано окремими особами, які використовують ці технології для забезпечення енергією для своїх потреб. Аналіз ринкових можливостей для запуску стартап-проекту показує, що продукт вразливий до таких загроз, як зниження купівельної спроможності громадян і зростання конкуренції, але цим загрозам можна протистояти, знизивши ціну на продукт.

2. Дослідження могло б покращити якість електроенергії для більшості побутових споживачів.

3. Перевірка показала, що перешкодою для початку впровадження проекту стала монополізація ринку та низька купівельна спроможність громадян.

4. Аналіз підтвердив, що подальша реалізація проекту є вигідною завдяки покращенню якості електроенергії, майбутньому зменшенню ціни на електроенергію, збільшенню терміну експлуатації приладів комутації та електроприладів використовуваних побутовими споживачами, підвищена зносостійкість РП, впровадженню в диспетчерські системи керування ОЕС дистанційного регулювання значень компенсуючих гармонік.

## ВИСНОВКИ

1. Розглянуто проблеми які пов'язані з якістю електричної енергії, вплив спотворення струму та напруги на обладнання. THD, є одним із способів оцінити якість джерела живлення. Промислові стандарти обмежують значення THD до 5%.

2. Розглянуто види пристроїв, які призначені для поліпшення якості електроенергії. Було визначено, що поєднання пасивних та активних фільтрів в систему гібридного є найоптимальнішим пристроєм для покращення якості електроенергії. У якості пристрою для поліпшення якості споживаного струму мережі та компенсації реактивної потужності був обраний гібридний паралельний активний фільтр.

3. Цифровим моделюванням досліджено систему мережа-гібридний фільтр-нелінійне навантаження. Застосування гібридного паралельного активного фільтра в системі електропостачання дозволяє повністю компенсувати реактивну потужність

4. THD складає менше 1% після компенсації гібридним фільтром, до компенсації він складав 30%

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Постанова № 375 Про затвердження Порядку забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсацій споживачам за їх недотримання 12.06.2018
2. IEEE 519-2014 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems
3. IEEE 1159-2019 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
4. IEEE 1159.3-2019 Recommended Practice for Power Quality Data Interchange Format
5. IEEE 1250-2018 Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems
6. IEEE 519-1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System
7. P2844 Recommended Practice for Limiting Voltage Imbalance in Electric Power Systems
8. ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності
9. ДСТУ IEC 61000-4-30:2010 Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії
10. IEEE PEDS 200 Hybrid Active Power Filter for power quality compensation. Huann-Keng Chiang, Bor-Ren Lin, Senior Member, IEEE, Kai-Tsang Yang and Kuan-Wei Wu Department of Electrical Engineerin
11. Куско А. Якість електроенергії в електричних мережах/ А. Куско, М. Томпсон: пер. з англ. Рободзія А.Н. М.: Додека-XX1, 2008. - 336 с
12. Juha Turunen Series active power filter in power conditioning: PhD thesis / Juha Turunen, Tampere. – 2009

13. Синтез фільтрокомпенсуючих пристроїв для систем електропостачання / *Н.П. Боярська, В.П. Довгун, Д.Е. Єгоров та ін.*; за ред. В.П. Довгуна. Красноярськ: Сиб. федер. ун-т, 2014. 192 с
14. E. V. Makram, E. V. Subramaniam, A. A. Girgis, and R. Catoe, "Harmonic filter design using actual recorded data," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 6, pp. 1176-1183, Nov./Dec. 1993.
15. H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Узагальнена теорія миттєвої реактивної потужності в трифазних колах", *Conf. Rec. IEEE-IPEC, 1983* 1983, с. 1375-1386.
16. "Миттєві компенсатори реактивної потужності, що включають комутаційні пристрої без компонентів накопичувачів енергії", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-20, no. 3, pp. 625-630, May/Jun. 1984.
17. I. Takahashi and A. Nabae, "Universal power distortion compensator of line communicated thyristor convertor," in *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting 1980*, pp. 858-864.
18. S. Bhattacharya, P. T. Cheng, and D. M. Divan, "Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, no. 3, с. 732-747, may/june 1997
19. H. Akagi, "Стратегія керування та вибір місця розташування шунтуючого активного фільтра для демпфування поширення гармонік в системах розподілу електроенергії", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 12, no. 1, pp. 354-363, Jan. 1997.
20. H. Akagi, H. Fujita, and K. Wada, "Шунтуючий активний фільтр на основі детектування напруги для гармонічного закінчення радіальної лінії розподілу електроенергії", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 3, с. 638-645, May/June 1999.

21. P. Jintakosonwit, H. Fujita, and H. Akagi, "Control and performance of a fully digital-controlled shunt active filter for installation on power distribution system," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 17, no. 1, pp. 132-140, Jan. 2002.
22. P. Jintakosonwit, H. Akagi, H. Fujita, and S. Ogasawara, "Implementation and performance of automatic gain adjustment in a shunt active filter for harmonic damping throughout the power distribution system," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 17, no. 3, pp. 438-447, May 2002.
23. K. Wada, H. Fujita, and H. Akagi, "Розгляд шунтуючого активного фільтра на основі виявлення напруги для встановлення на довгому розподільчому фідері", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 4, с. 1123-1130, July/August 2002.
24. P. Jintakosonwit, H. Fujita, H. Akagi, and S. Ogasawara, "Implementation and performance of cooperative control of shunt active filters for harmonic damping throughout the power distribution system," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 2, pp. 556-564, Mar./ Apr. 2003.
25. S. Srianthumrong, H. Fujita, and H. Akagi, "Аналіз стабільності послідовного активного фільтра, інтегрованого з двосерійним діодним випрямлячем", *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 17, no. 1, pp. 117-124, Jan. 2002.
26. F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, "Новий підхід до компенсації жорсткості в енергосистемах - комбінована система шунтуючих пасивних і послідовних активних фільтрів", в конф. Res. IEEE-IAS Annu. Meeting 1988, с. 874- 880.
27. "Компенсаційні характеристики комбінованої системи шунтуючих пасивних і послідовних активних фільтрів", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 1, pp. 144-152, Jan./Feb. 1993.

28. Н. Фудзіта та Х. Акагі, "Практичний підхід до компенсації гармонік в енергосистемах: Послідовне з'єднання пасивних і активних фільтрів", в конф. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting 1990, с. 1107-1112.

29. F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, "Новий підхід до компенсації жорсткості в енергосистемах - комбінована система шунтуючих пасивних і послідовних активних фільтрів", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 26, no. 6, pp. 983-990, Nov./Dec. 1990

30. H. Fujita and H. Akagi, "Практичний підхід до компенсації гармонік в енергосистемах: Послідовне з'єднання пасивних і активних фільтрів", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 27, no. 6, pp. 1020-1025, Nov./Dec. 1991

31. *Міхеев Г.М., Атаманов М.М., Афанасьєва О.В., Дрей Н.М.* Про компенсацію реактивної потужності в системах електропостачання з косинусними конденсаторами // Електротехніка. 2019. № 4. ст. 32-41.

32. Chaladying S., Charlangsut A., Rugthaichareoncheep N. Вплив паралельного резонансу на поліпшення коефіцієнта потужності в енергосистемі з гармонійними спотвореннями. TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, Macao, 2015, ст. 1-5.

33. Понтт Дж., Родрігес Дж., Мартін Дж. С., Агуілера Р., Бернал Р., Ньюман П. Пом'якшення резонансу та динамічна поведінка систем із фільтрами гармоній для підвищення надійності гірничодобувних установок. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, 2006, ст. 1298-1302.