

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

“ ” _____ 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи автоматизації,

електропривод та електромобільність»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

на тему: **Лабораторний стенд для дослідження процесів компенсації вищих
гармонік в трифазних мережах**

Виконав (-ла): студент (-ка) IV курсу, групи ЕП-71

(шифр групи)

ГРИНЕВИЧ Роман Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник асистент к.т.н. ЗАЙЧЕНКО Юрій Михайлович

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

Консультант _____

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

Рецензент ст.викл. КОТЛЯРОВА Вікторія Володимирівна

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

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

(підпис)

Київ – 2021 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141.7102.018.БР	Пояснювальна записка	65	
3	A1	141.7102.018.БР	Схеми та зовнішній вигляд лабораторного стенду	1	
4	A1	141.7102.018.БР	Моделювання	1	
5	A1	141.7102.018.БР	Результати дослідження	1	

				141.7102.018.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Гриневич Р.І.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Зайченко Ю.М.				2	69
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП–71	
Н/контр.	Теряєв В. І.					
Зав.каф.	Пересада С. М.					

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Лабораторний стенд для дослідження процесів компенсації вищих
гармонік в трифазних мережах _____

Київ – 2021 р.

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Сергій ПЕРЕСАДА
(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Гриневича Романа Ігоровича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: Лабораторний стенд для дослідження процесів компенсації вищих гармонік в трифазних мережах,

керівник проекту к.т.н. ЗАЙЧЕНКО Юрій Михайлович _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту 05.06.2021

3. Вихідні дані до проекту АФГ ABB PQFS, трипровідна мережа, спостерігач гармонік, компенсація гармонік, канонічні гармоніки. _____

4. Зміст пояснювальної записки 1 Аналітичний огляд силового активного фільтру 2 Оцінювання гармонік в трифазних системах 3 Завдання для

практичного досліджу 4 Дослідження процесів компенсації гармонік струму з використанням лабораторного комплексу _____

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Схеми ,моделювання, результати досліджень _____

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту


7. Дата видачі завдання 5 квітня 2021р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд систем підвищення якості електроенергії	22.04.21	
2	Розрахунок параметрів	02.05.21	
3	Дослідження динамічних властивостей спостерігача гармонік в матлабі	13.05.21	
4	Написання методичних вказівок до лабораторної роботи по стенду та по моделі	23.05.21	
5	Проведення експериментальних досліджень на стенді	31.05.21	
6	Оформлення пояснювальної записки і підготовка доповіді	05.06.21	

Студент

Керівник проекту


(підпис)

Роман ГРИНЕВИЧ

Юрій ЗАЙЧЕНКО

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновка, списку використаної літератури і додатка (65 сторінки пояснювальної записки, 28 рисунків, 4 таблиць, 30 використаних джерел).

Мета роботи – розробка системи фільтрації вищих гармонік в трифазних мережах на основі силового активного фільтру.

Об'єкт дослідження – силовий активний фільтр.

Предмет дослідження – компенсація вищих гармонік.

В першому розділі проведено аналітичний огляд систем компенсації вищих гармонік

В другому розділі виконано розрахунок мережі та спостерігача гармонік. Також було розроблено моделюючу програму, та було проведено моделювання.

В третьому розділі був проведений опис лабораторної установки, та складено завдання для практичного досліджу.

В четвертому розділі описано результат проведених досліджень

САФ, КОМПЕНСАЦІЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК, ФІЛЬТР, ТРИФАЗНІ МЕРЕЖІ, СПОСТЕРІГАЧ, ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД

					141.7102.018.БР							
					Лабораторний стенд для дослідження процесів компенсації вищих гармонік в трифазних мережах	Літ.			Маса		Масштаб	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		Арк. 7			Аркушів 81			
Розроб.		Гриневич Р.І.				КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра АЕМС-ЕП, ФЕА, група ЕП-71						
Перевір.		Зайченко Ю.М.										
Т. Контр.												
Реценз.		Котлярова В.В.										
Н. Контр.		Теряєв В.І.										
Затверд.		Пересада С.М.										

SUMMARY

The bachelor's thesis consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and an appendix (65 pages of explanatory notes, 28 figures, 4 tables, 30 sources used).

The purpose of the work is to develop a system for filtering higher harmonics in three-phase networks based on a power active filter.

The object of research is a power active filter.

The subject of research is the compensation of higher harmonics.

In the first section, an analytical review of higher harmonic compensation systems is performed

In the second section, the calculation of the network and the harmonic observer is performed. A modeling program was also developed, and modeling was performed.

In the third section, a description of the laboratory installation was made, and tasks for a practical experiment were made.

The fourth section describes the results of the research
SAF, HIGHER HARMONICS COMPENSATION, FILTER, THREE-PHASE
NETWORKS, OBSERVER, LABORATORY STAND

					141.7102.018.5P							
					Laboratory stand for research of processes of compensation of higher harmonics in three-phase networks	Let.			Mass		Scale	
Ch.	Sheet	№ document	Sign.	Date								
Develop.		Гриневич Р.І.										
Check.		Зайченко Ю.М.										
T. contr.						Sh. 7			Sheets 81			
Review.		Котлярова В.В.				Igor Sikorsky KPI, FEA, AEMS-ED, EP-p71						
N. contr.		Теряєв В.І.										
Approv.		Пересада С.М.										

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИЛОВИХ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ	10
1.1 Виникнення та негативний вплив вищих гармонік	10
1.2 Економічні втрати, спричинені спотвореннями якості електричної енергії..	11
1.3 Структури систем підвищення якості електроенергії	12
1.4 Вплив гармонік на асинхронні двигуни.....	16
Висновок до 1 розділу.....	17
2 ОЦІНЮВАННЯ ГАРМОНІК В ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ	19
2.1 Розрахунок математичної моделі трифазної мережі	19
2.2 Синтез спостерігача гармонік	21
2.2.1 Оцінювання однієї гармоніки	21
2.2.2. Розширення діапазону оцінювання гармонік.	24
2.3. Дослідження динамічних властивостей спостерігача гармонік.	26
2.3.1. Оцінювання всього спектру гармонік.....	27
2.3.2. Застосування спостерігача в трифазних трипровідних мережах.....	30
2.3.3 Підвищення швидкодії оцінювання.....	32
Висновок до 2 розділу.....	34
3 ЛАБОРАТОРНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОМПЕНСАЦІЇ ГАРМОНІК ЗА ДОПОМОГОЮ СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРУ	36
3.1. Силовий активний фільтр АВВ PQF, загальний огляд та налаштування.....	37
3.2 Опис лабораторної установки	45
3.3 Застосування стенду в лабораторних дослідженнях	52
Висновок до 3 розділу.....	53
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОМПЕНСАЦІЇ ГАРМОНІК СТРУМУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСУ.....	55
4.1 Дослідження процесів компенсації гармонік	55
Висновок до 4 розділу.....	60
ВИСНОВКИ.....	61
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	62

ВСТУП

Проблема якості електроенергії і більш загального розуміння електромагнітної сумісності споживачів в системах електропостачання відноситься до числа важливих проблем сучасної електроенергетики. Від її вирішення багато в чому залежить вирішення проблеми підвищення ефективності використання електроенергії і надійності енергозабезпечення споживачів.

Гармонічні струми присутні в сучасних електричних системах розподілу спричинені нелінійними навантаженнями, такими як приводи з регульованою швидкістю, джерела живлення кожного комп'ютера, індукційні печі, а також у системах генерації електроенергії з використанням відновлювальних джерел.

В трифазних системах вони можуть спричинити розбаланс, несиметрію і зумовити перевищення струму в нейтралі. Інжекція гармонік, перевантаження реактивною потужністю, розбаланс та перевищення струмів нейтралі призводять до низького коефіцієнту корисної дії електричної мережі. Якість електроенергії є істотним чинником, впливаючим на ефективність режимів енергосистеми і споживачів. Проблема забезпечення якості електроенергії в електричних мережах загального і спеціального призначення набула останнім десятиріччям особливої актуальності. Це викликано широким впровадженням нових прогресивних технологічних процесів і систем. І як наслідок, безперервним зростанням числа і потужності нелінійних, несиметричних і швидкоплинних споживачів електроенергії, а також відповідними режимними змінами потокорозподілення в електричних мережах. Це привернуло увагу інженерів в області силової електроніки та енергетики і призвело до необхідності пошуку ефективніших рішень проблеми підвищення якості електроенергії, які будуть задовольняти вимоги до якості електроенергії, що відображені в нормативних документах.

Метою даної роботи є дослідження компенсації вищих гармонік та підвищення швидкодії силового активного фільтру

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИЛОВИХ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ

1.1 Виникнення та негативний вплив вищих гармонік

Гармонійні перешкоди (вищі гармоніки) виникають з частотою мережі або кратної їй і викликаються в основному потужними нелінійними електроспоживачами при обмеженій потужності мережі живлення. Гармонійні і періодичні перешкоди, як правило, призводять до виникнення несинусоїдальної напруги[3-7].

Причини виникнення вищих гармонік на різних ділянках мережі також різні. Якщо в високовольтних мережах поява вищих гармонік обумовлено впливом потужних нелінійних електроприймачів коронними розрядами, грозовими явищами і аварійними режимами ЛЕП, то в низьковольтних мережах вони обумовлені переважно нестационарними процесами і нелінійними характеристиками окремих електроприймачів. При цьому вищі гармоніки, викликані низьковольтними нелінійними споживачами.

Зазвичай КЕ погіршує кожен зі споживачів і, при деякій їх кількості, таке погіршення досягає граничного значення, що викликає збої і відмову апаратури[1]. В цьому випадку конкретного винуватця просто не існує. При цьому складно привести приклад електроприймача, що є по відношенню до мережі чисто активним навантаженням. Навіть звичайна лампа розжарювання за рахунок різниці опору холодної і нагрітої нитки розжарювання створює при включенні помітні перевантаження. Значно простіше привести приклади явно спотворюючих мережеву напругу електроприймача, таких як зварювальні апарати, керований електропривод, комп'ютерна та інша електронна техніка. Значна частина цих споживачів генерує в мережу вищі гармоніки, серйозним чином загострюючи ситуацію з КЕ в низьковольтних мережах [8]. Тому в умовах насиченості зазначених мереж нелінійними електроспоживачами домінуючим фактором погіршення КЕ становиться несинусоїдальність струмів і напруг.

Проведений аналіз показує, що викликані такими електроприймачами спотворення синусоїдальності кривих струму в мережах НН [9,10]можуть

бути досить істотними. Наприклад, для вхідних швидкими темпами в побут СВЧ-печі, які зручні і енергоефективні (в зв'язку з короткочасною роботою, внаслідок швидкого досягнення необхідного теплового ефекту) характерні коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривої вхідного струму від 15 до 29%. Ці показники самі по собі начебто і не викликають хвилювань, до того ж відносні значення гармонік струму швидко згасають в залежності від порядкового номеру: в першому випадку $I_{(3)} = 13.5\%$, $I_{(5)} = 3.6\%$, $I_{(7)} = 2.7\%$, в даному випадку $I_{(3)} = 25.2\%$, $I_{(5)} = 11.2\%$, $I_{(7)} = 5.2\%$. Однак увімкнення даних печей в типових умовах призводить не тільки до зниження напруги живлення на 2-4%, до збільшення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої на 6-18%.

1.2 Економічні втрати, спричинені спотвореннями якості електричної енергії

Як і більшість інших спотворень, гармоніки впливають на всі види електричного обладнання, що знаходяться на доволі великій відстані від місця генерації гармонік.

Найбільш зрозуміло відчувається вплив гармонік, виникаючих в силових ланцюгах, на якості звука телефонного зв'язку, зниженої за рахунок наведеного силовими гармоніками гармонічного шуму. Однак існують і інші, менш помітні, але більш небезпечні впливи, які виражаються в хибних спрацюваннях важливого керуючого та захисного обладнання, перенавантаження силових апаратів і систем. Дуже часто тривале існування викривленої кривої напруги призводить до руйнування силових конденсаторів. Також негативний вплив гармоніки спричиняє перевантаження і старіння генераторів, трансформаторів та електричних двигунів. Ще серед негативних ефектів можна виділити:

- перегрів кабелів;
- гармонійні спотворення напруги, викликані насиченням трансформаторів;

- резонанс з іншими реактивними компонентами в тій же лінії електропередачі (наприклад, блоки корекції коефіцієнта потужності);
- перевантаження електричних мереж;
- перевантаження нульових провідників гармоніками, з порядком кратним трьом;
- збільшення витрат на поставку електроенергії через гармонійні втрати;
- пульсації моменту електричних двигунів.

Тому в зв'язку з вище перерахованими проблемами, обладнання схильне до передчасного старіння, що призводить до необхідності його ранішої, і, як наслідок, частішої заміни, або завищення параметрів обладнання на етапі проектування.

1.3 Структури систем підвищення якості електроенергії

Про виникнення гармонік в електричних мережах та їх негативний вплив на електрообладнання, відомо вже давно. Тому для вирішення даної проблеми вживається ряд заходів, які передбачають корекцію параметрів електричної мережі за допомогою:

- пасивної фільтрації;
- активної фільтрації.

Пасивна фільтрація здійснюється за рахунок використання на апаратному рівні таких елементів як пасивні фільтри, конденсаторні батареї, різноманітні спеціальні трансформатори, 12-пульсні та 24-пульсні діодні випрямлячі, дроселі з великою індуктивністю. [13]-[15]

Недоліками пасивної фільтрації можна виділити те, що вони мають високу вартість, компенсація спотворень відбувається лише на фіксованих частотах які були розраховані на стадії розробки, часто мають великі габарити також вони створюють загрозу виникнення резонансу в мережі, що може призвести до значних негативних наслідків.

Через наявні недоліки виникла необхідність розробити електроний керований пристрій, що здатний здійснювати активну фільтрацію, який отримав назву «силовий активний фільтр» (САФ).

Розробка САФ почалася в 1971 році [16], було запропоновано і розглянуто велику кількість методів та конфігурацій. Перші конфігурації САФ мали достатньо великі габарити і високу вартість виробництва. Що в свою чергу стало причиною того, що дана система тривалий час не реалізовувалась та не впроваджувалась.

В 1980-х роках, шляхом введення додаткового пасивного фільтра в систему, без погіршення загальних фільтруючих характеристик [17], [18]. Дав можливість для прискорення практичної реалізації проектів САФ.

САФ розробляють в залежності від способу підключення та від поставлених задач, а також від мережі.

Для побудови силового активного фільтра використовуються два типи перетворювачів – на базі автономного інвертора напруги або автономного інвертора струму. На рис 1.1 показано САФ [19]–[21] на базі інвертора напруги з ШІМ та з ланкою постійного струму. Такий тип перетворювача дешевший, легший та має можливість до розширення багатоступеневої модифікації для покращення характеристик з меншою частотою комутації. Чим і здобув більшого розповсюдження ніж САФ на базі інвертора струму.

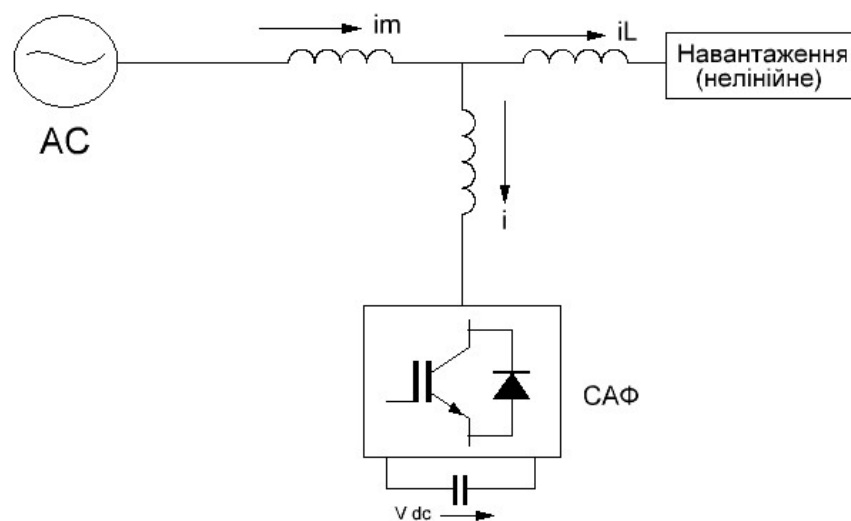


Рисунок 1.1 – САФ на базі АІН

Силовий активний фільтр побудований на базі автономного інвертора струму [22], [23] працює як джерело несинусоїдного струму для компенсації спотворень спричинених роботою нелінійного навантаження. Він представлений на рис. 1.2.

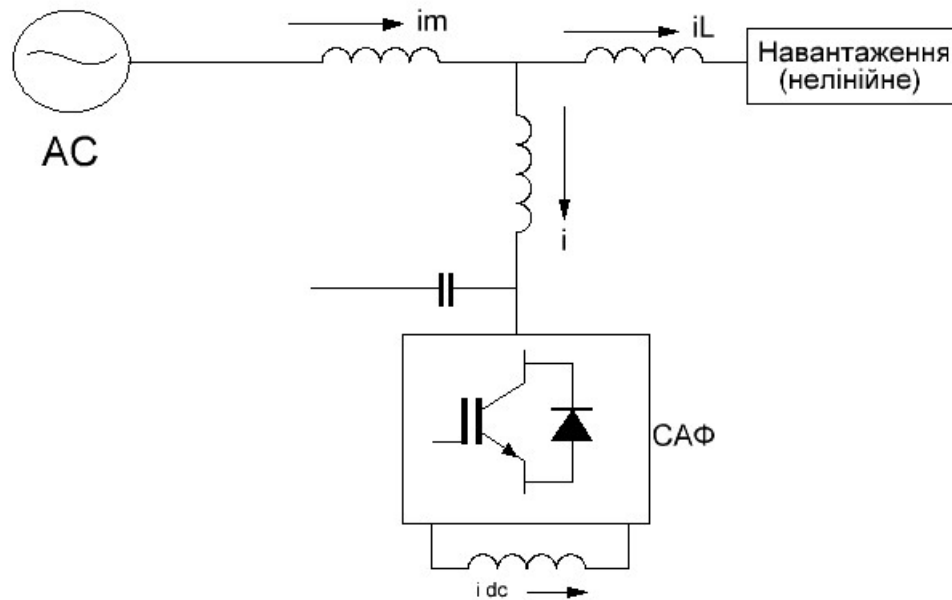


Рисунок 1.2 – САФ на базі АІС

За способом підключення САФ діляться на послідовні та паралельні фільтри. Також є гібридні САФ, які у своїй структурі суміщають пасивний та паралельний фільтр. Паралельний САФ було представлено на рис.1.1, що найчастіше використовується для видалення гармонік струму та компенсації реактивної потужності. САФ інжектує еквівалентний струм компенсації у протифазі для подавлення гармонік.

Схему послідовного підключення САФ представлено на рис. 1.3. [24]-[26] Даний спосіб підключення реалізується послідовно з навантаженням за допомогою узгоджуючого трансформатора. Він застосовується для видалення гармонік напруги та збалансування і регулювання лінійної напруги навантаження.

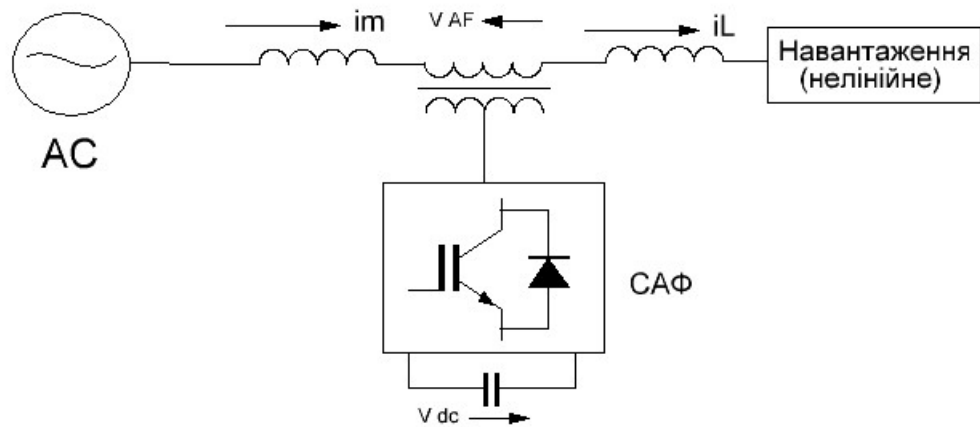


Рисунок 1.3 – Послідовне з'єднання САФ

Комбінацію з паралельного та послідовного САФ називають формувачем якості електроенергії або універсальним САФ. В ланці постійного струму накопичувальний елемент з'єднаний з двома АІН або АІС. Вони працюють як послідовний і паралельний компенсатор. Даний фільтр використовують як в трифазній так і в однофазній конфігурації. Головним недоліком є висока вартість і складність керування. Даний тип САФ зображено на рис.1.4.

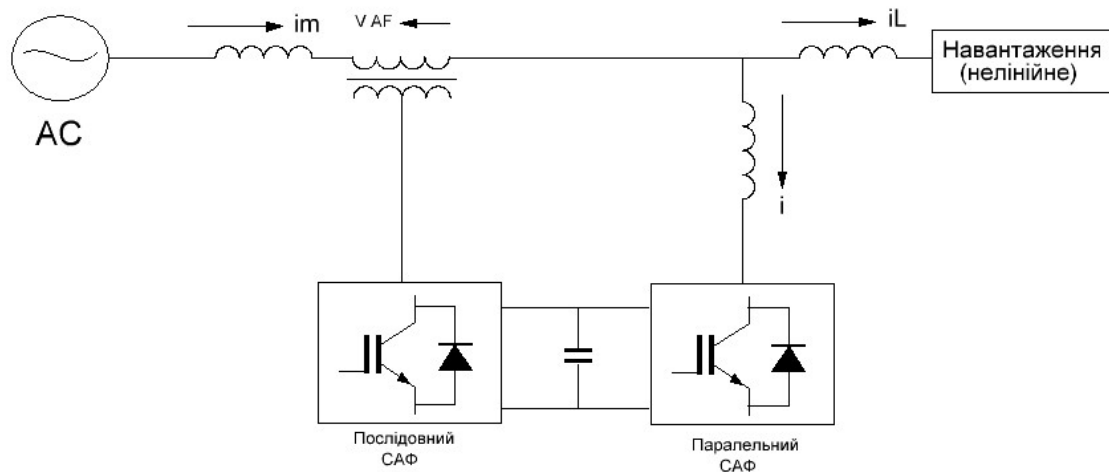


Рисунок 1.4 – Формувач якості електроенергії

Гібридний фільтр є комбінацією послідовного САФ та пасивного паралельного фільтру. В даному фільтрі силові ключі, що використовуються в активній частині, можуть бути зменшені за потужністю, розміром та вартістю,

за ,що й отримав широке розповсюдження. Основна частина складається з пасивного паралельного LC фільтру, який видаляє гармоніки низького порядку. Він представлений на рис 1.5 [19],[27]–[29].

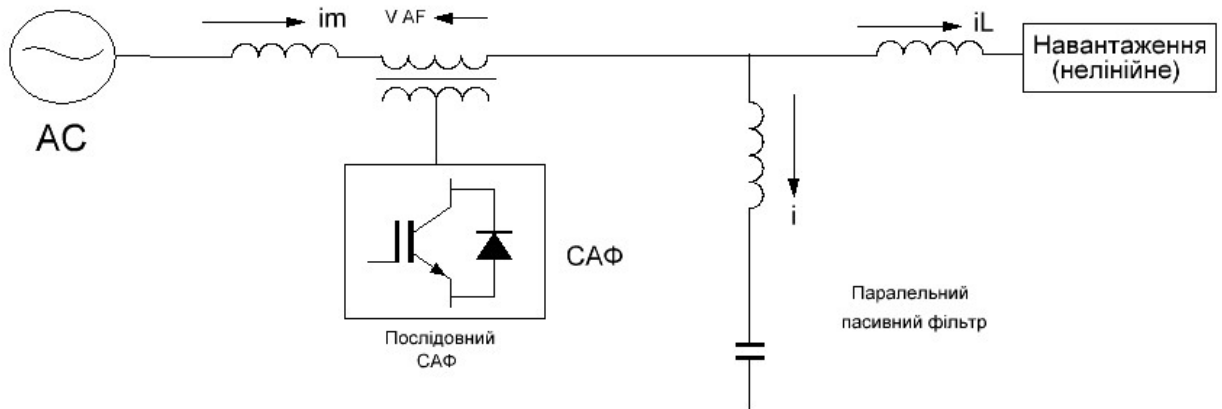


Рисунок 1.5 – Гібридний АФ

1.4 Вплив гармонік на асинхронні двигуни

Втрати електроенергії. Гармоніки напруги і струму призводять до додаткових втрат в обмотках статора, в ланцюгах ротора, а також в сталі статора і ротора[2]. Втрати в провідниках статора і ротора при цьому більше, ніж визначені омичним опором, через вихрові струми і поверхневого ефекту. Струми витoku, викликані гармоніками в торцевих зонах статора і ротора. призводять до додаткових втрат.

У випадку з асинхронним двигуном, який має ротор з скошеними пазами і пульсуючими магнітними потоками в статорі і роторі вищі гармоніки викликають додаткові втрати в стали. Значення цих втрат залежить від кута скосу пазів і характеристик магнітопровода.

Вплив форми кривої напруги на втрати в асинхронному двигуні[11] розглянемо на прикладі двигуна потужністю 16 кВт, працюючого при повному навантаженні на частоті 60 Гц і номінальній напрузі. При синусоїдальній формі кривої напруги повні втрати становлять 1.303 кВт, а при квазі прямокутній формі 1.6 кВт.

Середній розподіл втрат від вищих гармонік в двигуні постійного струму, що живиться від випрямляча, становить[12]: обмотка статора 14,2%, ланки ротора 41,2%; торцеві зони 18,8%; потоки в пазах 25,8%.

За винятком останньої складової втрат, їх розподіл в синхронних двигунах приблизно однаковий. Варто відмітити, що сусідні непарні гармоніки в статорі синхронного двигуна викликають в роторі гармоніку однакової частоти. Наприклад, 5 і 7 гармоніка в статорі викликають в роторі гармоніку струму 6-го порядку, обертаючись в різні сторони. Для лінійних систем середня густина втрат на поверхні ротора пропорційна $(I_5^2 + I_7^2)$, однак через різного напрямку обертання густина втрат в деяких точках пропорційна $(I_5 + I_7)^2$

Додаткові втрати – найбільш серйозний ефект, викликаний гармоніками в двигунах. Вони призводять до підвищення загальної температури двигуна і до місцевого перегріву, найбільш вірогідним в роторі. Двигуни з ротором типу “біляча клітка” допускають більш високі втрати і температуру, якщо це не приводить до недопустимої температури статора; тому двигуни з фазним ротором виявляються більш чутливими. Деяка технічна документація обмежує допустимий рівень струму зворотної послідовності в генераторі 10%, а рівень напруги зворотної послідовності на входах асинхронних двигунів 2%. Допустимість гармонік визначають по тому які рівні напруги і струмів зворотної послідовності вони створюють.

Висновок до 1 розділу

В першому розділі було описано про те, що при підключенні не лінійного навантаження до мережі виникають гармоніки. Вони несуть небезпеку для електроприладів: Перегрів кабелів, резонанс з іншими реактивними компонентами в тій же лінії електропередачі, перевантаження електричних мереж, перевантаження нульових провідників, збільшення витрат на поставку електроенергії через гармонійні втрати, пульсації моменту електричних двигунів, хибне спрацювання систем захисту.

В даному розділі також розглядалися способи вирішення даної проблеми шляхом використання пасивних та активних фільтрів. Було розглянуто недоліки та переваги тих чи інших фільтрів, на їх основі стало зрозуміло, що активні фільтри краще справляються з поставленим завданням.

Силові активні фільтри розробляють в залежності від способу підключення та від поставлених задач, а також від мережі. Для побудови силового активного фільтру використовуються два типи перетворювачів – на базі автономного інвертора напруги або автономного інвертора струму. За способом підключення їх поділяють на паралельні послідовні та гібридні фільтри.

Отже для проведення досліджень лабораторний стенд повинен:

- мати нелінійне навантаження,
- силовий активний фільтр,
- можливість виведення результатів на комп'ютер,
- вибір режимів дослідження,
- можливість регулювання навантаження,
- можливість вибору гармонік для їх компенсації.

2 ОЦІНЮВАННЯ ГАРМОНІК В ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ

Одним із основних задач будь якого силового активного фільтру є виявлення наявних в мережі гармонік. Перспективним напрямком розвитку технології активної фільтрації є використання селективної компенсації гармонік, яка основана на селективному виявленні наявних спотворень. Такий підхід дозволяє значно спростити вимоги до системи керування САФ та силової частини. В даному розділі представлено дослідження динамічних властивостей селективного спостерігача гармонік, який забезпечує оцінювання струму трифазної трипровідної мережі.

2.1 Розробка математичної моделі трифазної мережі

Несиметрична N-фазна система, за теоремою Фортеск'є, розкладається на N незалежних векторів. Для трифазної системи є три послідовності:

- пряма послідовність $\vec{I}_A^P, \vec{I}_B^P, \vec{I}_C^P$, які мають рівну амплітуду і мають зсув рівний $\frac{2\pi}{3}$, з чергуванням фаз А-В-С;
- зворотня послідовність $\vec{I}_A^N, \vec{I}_B^N, \vec{I}_C^N$, які мають рівну амплітуду і мають зсув рівний $\frac{2\pi}{3}$, з чергуванням фаз А-С-В;
- нульова послідовність $\vec{I}_A^0, \vec{I}_B^0, \vec{I}_C^0$, які мають рівну амплітуду та фазу.

В симетричній трифазній трипровідній системі координат відсутня нульова послідовність, тобто сума трьох струмів в будь-який момент часу дорівнює нулю. Пряма та зворотня послідовності формують два вектори, що обертаються в протилежних напрямках на комплексній площині. Для простішого розрахунку і подальшого моделювання перейдемо від трифазної системи координат до двофазної.

$$T_{3 \rightarrow 2} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

Симетрична трифазна система, з однією гармонікою яка має порядок n , розкладена на пряму та зворотну послідовність:

$$\begin{aligned} i_A^p(t) &= I_p \cos(n\omega_m t) & i_A^n(t) &= I_n \cos(n\omega_m t) \\ i_B^p(t) &= I_p \cos\left(n\omega_m t - \frac{2\pi}{3}\right) & i_B^n(t) &= I_n \cos\left(n\omega_m t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C^p(t) &= I_p \cos\left(n\omega_m t + \frac{2\pi}{3}\right) & i_C^n(t) &= I_n \cos\left(n\omega_m t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

В даному випадку величини I_p, I_n виконують роль амплітуд прямої та зворотної послідовностей, $\omega_m = \text{const}$ основна частота напруги мережі.

Запишемо сигнали (2.1) в нерухомій системі координат (a-b) :

$$\begin{aligned} i_a^p &= I_p \cos(n\omega_m t) & i_a^n &= I_n \cos(-n\omega_m t) \\ i_b^p &= I_p \sin(n\omega_m t) & i_b^n &= I_p \sin(-n\omega_m t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Переведемо систему координат (a-b) в систему координат (d-q)

$$e^{-j\varepsilon_1} = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon_1) & \sin(\varepsilon_1) \\ -\sin(\varepsilon_1) & \cos(\varepsilon_1) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

де ε_1 – кутове положення вектора напруги мережі відносно стаціонарної системи координат (a-b).

Пряма та зворотна послідовності (2.2) в системі координат (d-q)

$$\begin{aligned} i_d^p &= I_p \cos((n-1)\omega_m t) & i_d^n &= I_n \cos((n+1)\omega_m t) \\ i_q^p &= I_p \sin((n-1)\omega_m t) & i_q^n &= I_n \sin((n-1)\omega_m t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

При переході від нерухомої системи координат (a-b) в обертову (d-q) присутнє зміщення частот. Тому гармоніка з частотою $n\omega_m$ зсувається до частоти $(n-1)\omega_m$, гармоніка з частотою $-n\omega_m$ зсувається до частоти $(n+1)\omega_m$, основна гармоніка $n=1$ являє собою постійну складову.

Наступне розгляд базується на підході внутрішньої моделі, згідно з яким сигнали генеруються динамічною моделлю. Прямую та зворотню послідовності потрібно представити як сигнали, які генеруються осциляторами

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_h \mathbf{x}(t) \quad (2.5)$$

де $\mathbf{x} = (x_{dp}, x_{qp}, x_{dn}, x_{qn})^T$ – вектор проєкцій векторів прямої та зворотної послідовностей

$$\mathbf{A}_h = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_p & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_N \end{bmatrix}, \mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} 0 & -h\omega_m \\ h\omega_m & 0 \end{bmatrix} - \text{пряма послідовність, порядок гармонік } h=n-1$$

$$\mathbf{A}_N = \begin{bmatrix} 0 & h\omega_m \\ -h\omega_m & 0 \end{bmatrix} - \text{зворотня послідовність, порядок гармонік } h=n+1$$

2.2 Синтез спостерігача гармонік

Процедура синтезу спостерігача проводиться в два етапи. На першому етапі синтезується спостерігач однієї гармоніки, а на другому етапі розширюється діапазон оцінювання

2.2.1 Оцінювання однієї гармоніки

Припустимо, що в трифазному сигналі струму навантаження, записаному в системі координат (d-q) як

$$\mathbf{i}_L = \begin{pmatrix} I_{d0} + \sum_{m=1}^N I_{dm} \cos(m\omega_m t + \varphi_{dm}) \\ I_{q0} + \sum_{m=1}^N I_{qm} \sin(m\omega_m t + \varphi_{qm}) \end{pmatrix}, \quad (2.7)$$

потрібно оцінити лише одну гармоніку з частотою $h\omega_m$, визначити її пряму та зворотню послідовності. Для лінійної системи (2.5), загальна форма спостерігача Люєнбергера, має вигляд

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}_h \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{K}_h (\mathbf{i}_L - \mathbf{C}_h \hat{\mathbf{x}}), \quad (2.8)$$

де $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}_{dp}, \hat{x}_{qp}, \hat{x}_{dn}, \hat{x}_{qn})^T$ – вектор стану спостерігача, \hat{x}_{dp} – оцінка компоненти прямої послідовності по осі d, \hat{x}_{qp} – оцінка компоненти прямої послідовності по осі q, \hat{x}_{dn} – оцінка компоненти зворотної послідовності по осі d, \hat{x}_{qn} – оцінка компоненти зворотної послідовності по осі q,

$$\mathbf{C}_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_h – \text{матриця зворотніх зв'язків спостерігача.}$$

Представимо \mathbf{i}_L в (2.7) у вигляді суми \mathbf{i}_{L1} – частини спектру, яку потрібно оцінити, та \mathbf{i}_{L2} – частини спектру, яку до уваги не приймаємо, після чого спостерігач (2.8) перепишеться так:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}_h \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{K}_h (\mathbf{i}_{L1} + \mathbf{i}_{L2} - \mathbf{C}_h \hat{\mathbf{x}}),$$

$$\text{де } \mathbf{i}_{L1} = \mathbf{C}_h \mathbf{x}$$

Визначимо похибку оцінювання у вигляді

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}, \quad (2.9)$$

динаміка похибок оцінювання набуде вигляд

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{M}_h \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_h \mathbf{i}_{L2}, \quad (2.10)$$

$$\text{де } \mathbf{M}_h = \mathbf{A}_h + \mathbf{K}_h \mathbf{C}_h$$

$$\tilde{\mathbf{x}}(p) = \frac{-\mathbf{K}_h}{[p\mathbf{I} - \mathbf{M}_h]} \mathbf{i}_{L2}(p). \quad (2.11)$$

Таким чином, матриця \mathbf{M}_h має бути такої форми, щоб виконувалися наступні умови:

а) \mathbf{M}_h має бути Гурвіцевою матрицею, що гарантує асимптотичність оцінювання h-ої гармоніки;

б) всі гармоніки, які відрізняються від h -ої, мають бути максимально зменшені, що забезпечить селективність оцінювання гармоніки з порядком h .

Це можна забезпечити при виконанні умови

$$\begin{aligned} \| \mathbf{K}_h [(j\omega)\mathbf{I} - \mathbf{M}_h]^{-1} \| &\ll 1 \\ \forall \omega = g\omega_m, g \neq h \end{aligned} \quad (2.12)$$

частотна характеристика має мале значення, яким можна знехтувати, для усіх гармонік які відрізняються від тієї, яка оцінюється.

Для того щоб досягти цих умов, це можна реалізувати шляхом встановлення комплексно спряжених власних значень \mathbf{M}_h з піком частоти $h\omega_m$. За умови визначення матриці \mathbf{K}_h у вигляді

$$\mathbf{K}_h = \begin{bmatrix} -k_1 & -k_2 \\ k_2 & -k_1 \\ -k_1 & k_2 \\ -k_2 & -k_1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

для системи (2.10) з матрицею \mathbf{M}_h потрібно знайти характеристичний поліном:

$$\left[p^2 + 2k_1p + (h\omega_m)^2 + 2(h\omega_m)k_2 \right]^2 \quad (2.14)$$

Коефіцієнти k_1 та k_2 обираються так, щоб забезпечити коефіцієнт демпфування δ та власну частоту коливань $\omega_n = (1 - 2\delta^2)^{-1/2} h\omega_m$:

$$\begin{aligned} k_1 &= \delta\omega_n, \\ k_2 &= \frac{\omega_n^2 - (h\omega_m)^2}{2h\omega_m} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Суть даного налаштування полягає в тому, що частотна характеристика системи (2.10) з матрицею \mathbf{M}_h , має резонансні властивості. Для сигналів з

частотою $h\omega_m$ коефіцієнт підсилення дорівнює одиниці, а для інших частот коефіцієнт наближається до нуля. Ширина резонансної частини буде визначатися значенням коефіцієнту δ , а вираз $\omega_n = (1 - 2\delta^2)^{-1/2} h\omega_m$ забезпечує резонанс на частоті $h\omega_m$. Також значення δ визначає не лише селективність спостерігача, а і його динамічні властивості.

2.2.2. Розширення діапазону оцінювання гармонік.

Спираючись на отриманий результат, розглянемо випадок оцінювання групи гармонік h, j, \dots, z . Згідно з (2.8) спостерігач запишеться у вигляді

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{K}(\mathbf{i}_L - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}) \quad (2.16)$$

де $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}_{dph}, \hat{x}_{qph}, \hat{x}_{dnh}, \hat{x}_{qnh}, \dots, \hat{x}_{dpz}, \hat{x}_{qpz}, \hat{x}_{dnz}, \hat{x}_{qnz})^T$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_h & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_j & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{A}_z \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_h = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{ph} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{Nh} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{ph} = \begin{bmatrix} 0 & -h\omega_m \\ h\omega_m & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{Nh} = \begin{bmatrix} 0 & h\omega_m \\ -h\omega_m & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{pj} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{Nj} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{pj} = \begin{bmatrix} 0 & -j\omega_m \\ j\omega_m & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{Nj} = \begin{bmatrix} 0 & j\omega_m \\ -j\omega_m & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{pz} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{Nz} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{pz} = \begin{bmatrix} 0 & -z\omega_m \\ z\omega_m & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{Nz} = \begin{bmatrix} 0 & z\omega_m \\ -z\omega_m & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [\mathbf{C}_h \quad \mathbf{C}_j \quad \dots \quad \mathbf{C}_z], \mathbf{C}_h = \mathbf{C}_j = \mathbf{C}_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_h \\ \mathbf{K}_j \\ \vdots \\ \mathbf{K}_z \end{pmatrix}, \mathbf{K}_h = \begin{bmatrix} -k_{1h} & -k_{2h} \\ k_{2h} & -k_{1h} \\ -k_{1h} & k_{2h} \\ -k_{2h} & -k_{1h} \end{bmatrix}, \mathbf{K}_j = \begin{bmatrix} -k_{1j} & -k_{2j} \\ k_{2j} & -k_{1j} \\ -k_{1j} & k_{2j} \\ -k_{2j} & -k_{1j} \end{bmatrix}, \dots, \mathbf{K}_z = \begin{bmatrix} -k_{1z} & -k_{2z} \\ k_{2z} & -k_{1z} \\ -k_{1z} & k_{2z} \\ -k_{2z} & -k_{1z} \end{bmatrix},$$

де h, j, \dots, z - порядок гармонік, які потрібно оцінити.

Так само з випадком, коли потрібно оцінити одну гармоніку, матриця $\mathbf{M}=\mathbf{A}+\mathbf{K}\mathbf{C}$, повинна бути Гурвіцевою, що гарантує асимптотичність оцінювання гармонік з порядком h, j, \dots, z . Гармоніки, які відрізняються від h, j, \dots, z , повинні бути суттєво зменшені, це можна досягти за рахунок виконання умови (2.12) для всіх частот $i\omega_m, i \neq h, j, \dots, z$.

Отже, для того щоб оцінити гармонічні складові струму за допомогою спостерігача (2.16) необхідно розрахувати коефіцієнти $1k$ та $2k$, які формуватимуть динамічну поведінку даного спостерігача. Це забезпечується селекцією коефіцієнта демпфування δ відповідно до (2.15).

Структурну схему спостерігача (2.16) у складі САФ представлено на рис. 2.1.

В роботі розглядається випадок трипровідної трифазної мережі, в якій присутні лише 5, 7, 11, 13, 17, 19 гармоніки які ми будемо компенсувати.

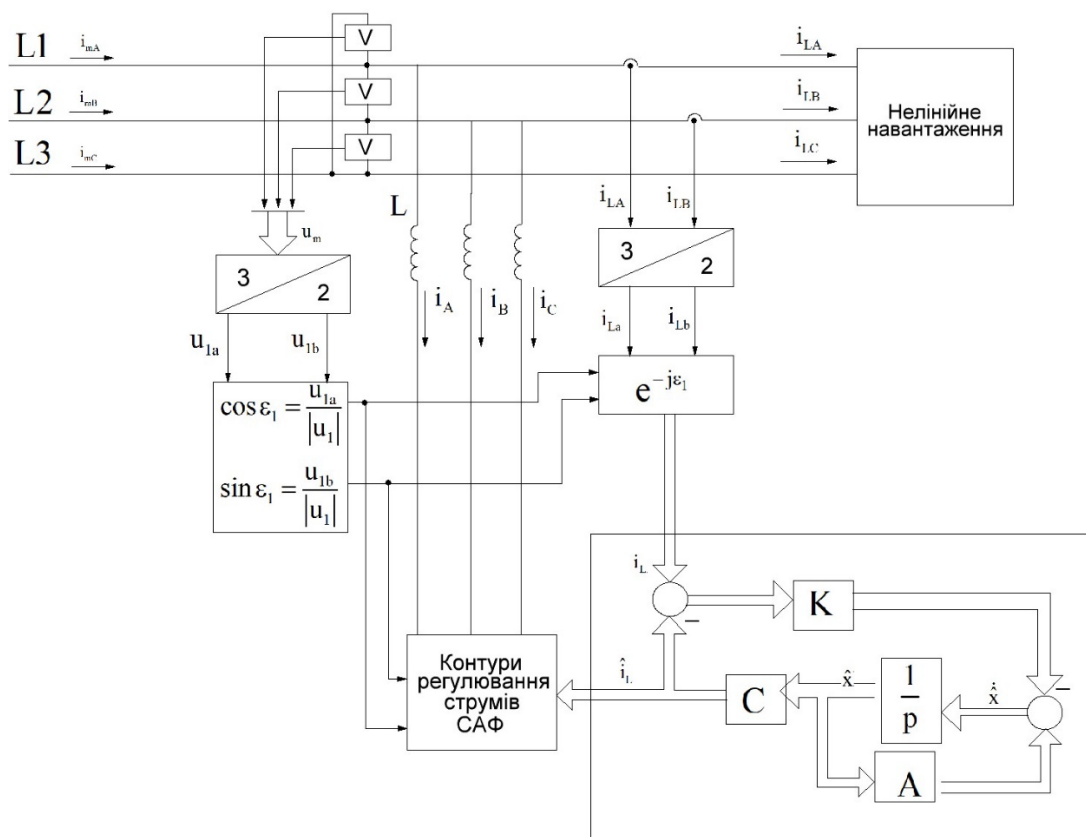


Рисунок 2.1 – Структурна схема спостерігача гармоніки h -го порядку у складі САФ

Для того щоб оцінити повний спектр з N гармонік, матриці A, K, C , спостерігача (2.16), записаного в безперервній формі, перепишуться у вигляді

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{pmatrix} A_{1h} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & A_{Nh} \end{pmatrix}, \\
 A_{1h} &= \begin{bmatrix} 0 & -\omega_m & 0 & 0 \\ \omega_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_m \\ 0 & 0 & -\omega_m & 0 \end{bmatrix}, A_{Nh} = \begin{bmatrix} 0 & -N\omega_m & 0 & 0 \\ N\omega_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N\omega_m \\ 0 & 0 & -N\omega_m & 0 \end{bmatrix}, \\
 C_h[2, 4N] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 K &= \begin{pmatrix} K_{1h} \\ \vdots \\ K_{Nh} \end{pmatrix}, K_{1h} = \begin{bmatrix} -k_{11h} & -k_{21h} \\ k_{21h} & -k_{11h} \\ -k_{11h} & k_{21h} \\ -k_{21h} & -k_{11h} \end{bmatrix}, K_{Nh} = \begin{bmatrix} -k_{1Nh} & -k_{2Nh} \\ k_{2Nh} & -k_{1Nh} \\ -k_{1Nh} & k_{2Nh} \\ -k_{2Nh} & -k_{1Nh} \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Повна оцінка N гармонік задається рівняннями

$$\begin{aligned}
 \hat{\mathbf{i}}_L &= (\hat{\mathbf{i}}_{Ld}, \hat{\mathbf{i}}_{Lq})^T, \\
 \hat{\mathbf{i}}_{Ld} &= \sum_{j=1}^N (\hat{\mathbf{x}}_{dpj} + \hat{\mathbf{x}}_{dnj}), \\
 \hat{\mathbf{i}}_{Lq} &= \sum_{j=1}^N (\hat{\mathbf{x}}_{qpj} + \hat{\mathbf{x}}_{qnj}).
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

2.3. Дослідження динамічних властивостей спостерігача гармонік.

Ефективність застосування спостерігачів у загальній формі (2.16) визначається за такими показниками як: асимптотичність оцінювання (це коли відсутні похибки оцінювання), швидкість оцінювання гармонічного складу, селективність – властивість пристрою з безлічі сигналів виділяти потрібні сигнали. В САФ такими сигналами являються миттєві значення вищих гармонік струму навантаження, і на основі цих значень формуються струми

компенсації. Методом математичного моделювання дослідження властивостей спостерігача було проведено в програмному середовищі MATLAB, в якому було розроблено ряд моделюючих програм.

Відповідно до [30] стандартним налаштуванням спостерігача 2.16 є розрахунок коефіцієнтів матриці зворотних зв'язків на основі формули 2.15 для кожного ізольованого спостерігача гармонік з використанням коефіцієнта демпфування однакового для усіх спостерігачів. Однак аналіз числових значень коефіцієнтів k_1 і k_2 , представлений в додатку 1 дає підстави вважати, що коефіцієнт k_2 суттєво не впливає на динамічну поведінку спостерігача і ним можна знехтувати. Аналітичне доведення даного твердження є ускладненим із за специфіки оцінювання в резонансному режимі. Тому для підтвердження даного припущення проводиться порівняльне дослідження стандартного налаштування спостерігача із запропонованим, тобто при обнуленому k_2 .

2.3.1. Оцінювання всього спектру гармонік

Гармонічний склад струму, що оцінюється, потрібно представити сумою вищих гармонік одиничної амплітуди, і мають фазовий зсув $\pi / (h + 1)$ які в системі координат (d-q) мають порядок від 1-го до 21-го, що відповідає гармонікам від 2-го до 22-го порядку в системі координат (a-b). Якщо спостерігач налаштовано на оцінювання вищих гармонік які мають порядок від 1-го до 20-го в системі координат (d-q), то відповідно до (2.16), спостерігач має 80-тий порядок. Похибки оцінювання струмів та модуль вектора похибок оцінювання розраховуються за формулами.

$$|\tilde{i}_L| = \sqrt{\tilde{i}_{Ld}^2 + \tilde{i}_{Lq}^2} \quad (2.19)$$

Якщо подивитись на це зі сторони динаміки досліджуваних систем методом математичного моделювання, одним із важливих аспектів є визначення методів чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, які в

свою чергу описують коливальні процеси, що мають критично низьке демпфування і значними частотами коливань. Диференційні рівняння спостерігача гармонік це набір динамічних ланок із різними сталими часу. Щоб змодельовати таку систему можна використати метод інтегрування Рунге-Кутта 4го порядку з малим тактом квантування, який в моделюванні має значення рівне $T_s = 50\text{мкс}$.

Аналізуючи динамічні властивості спостерігача ми визначаємо його швидкодію, що являється часом затухання похибки оцінювання. Для дослідження селективності оцінювання, використання аналітичних методів обмежене. Тому для цього використовують амплітудно-частотні характеристики абсолютного значення похибки оцінювання. Про асимптотичність оцінювання свідчить нульова похибка оцінювання гармонік, а про властивості селективності свідчить ширина полоси резонансу амплітудно-частотної характеристики. Простіше кажучи це дозволяє нам дослідити чутливість спостерігача (2.16) до сусідніх гармонік, які є відмінними від h, j, \dots, z , таким чином перевіряється досягнення умови (2.12). На рисунку (2.2) зображено структурну схему побудови частотних характеристик.

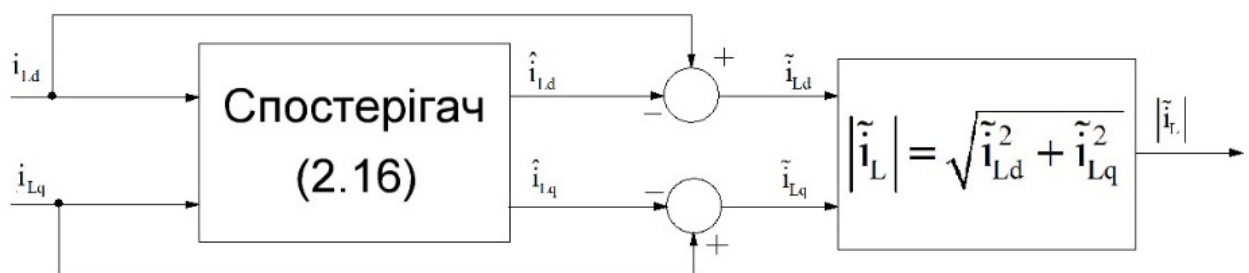


Рисунок 2.2 – Структурна схема побудови амплітудно частотної характеристики спостерігача струму навантаження

Так як частотна характеристика похибок оцінювання з матрицею Mh , має резонансні властивості такі, що для гармонік які ми збираємось оцінювати

коефіцієнт підсилення дорівнює одиниці, а для інших частот наближається до нуля. Значення коефіцієнту δ визначає ширину резонансної частоти.

На графіках 2.3 та 2.4 порівнюються показники оцінювання при стандартному налаштуванні і запропонованому. Що буде при оцінюванні всіх гармонік. І як ми можемо замітити похибки оцінювання для запропонованого та стандартного налаштування майже однакові.

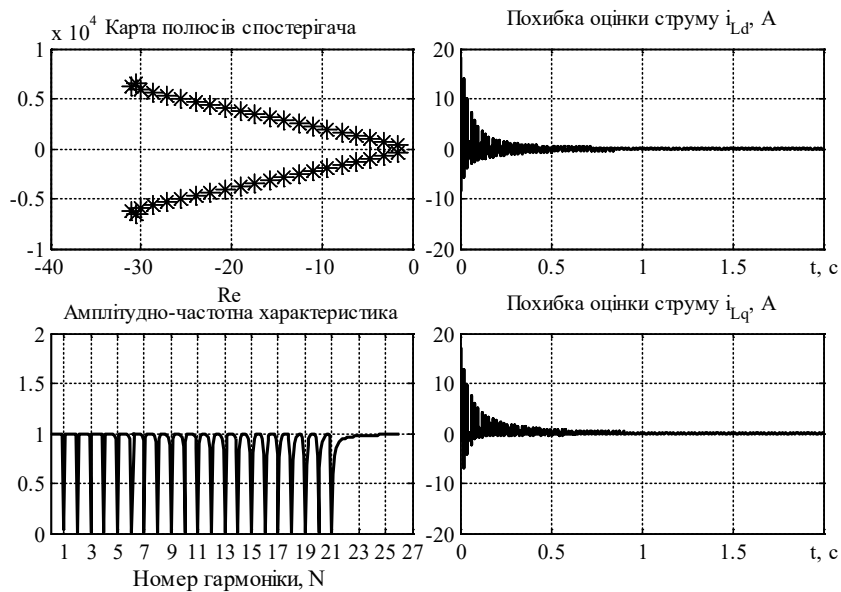


Рисунок 2.3 – Перехідні процеси та частотні характеристики оцінювання для $\delta = 0.005$ $k_1 = k_1, k_2 = k_2$

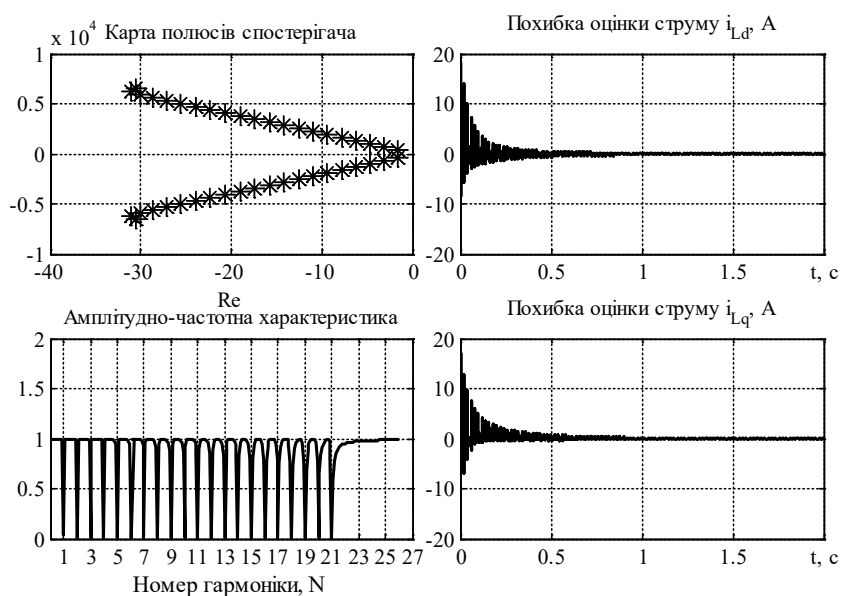


Рисунок 2.4 – Перехідні процеси та частотні характеристики оцінювання для $\delta = 0.005$ $k_2 = 0$

2.3.2. Застосування спостерігача в трифазних трипровідних мережах

Так як в даній роботі використовується припущення про те, що трифазна електрична мережа є симетричною і трипровідною, доцільно звернути увагу на те, що в таких мережах присутні лише так звані канонічні гармоніки, тобто гармоніки з порядком 5, 7, 11, 13, 17, 19 і т.д. Наступне дослідження проведено в умовах, коли в спектрі струму навантаження присутні саме канонічні гармоніки і систему оцінювання налаштовано на їх оцінювання.

На графіках 2.5 та 2.6 проводиться порівняння показників оцінювання при стандартному налаштуванні і запропонованому – як оцінюється кожна гармоніка

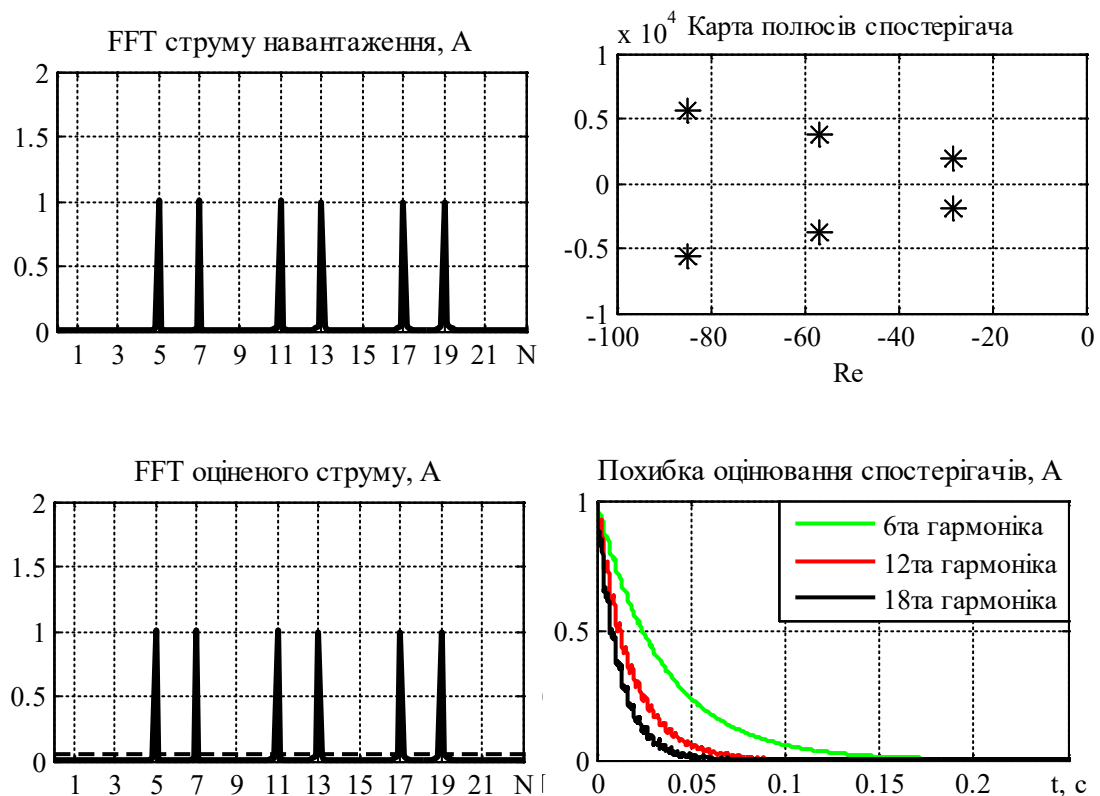


Рисунок 2.5 – Показники оцінювання струмів трифазної мережі при $\delta_6 = \delta_{12} = \delta_{18} = 0.005$; стандартне налаштування

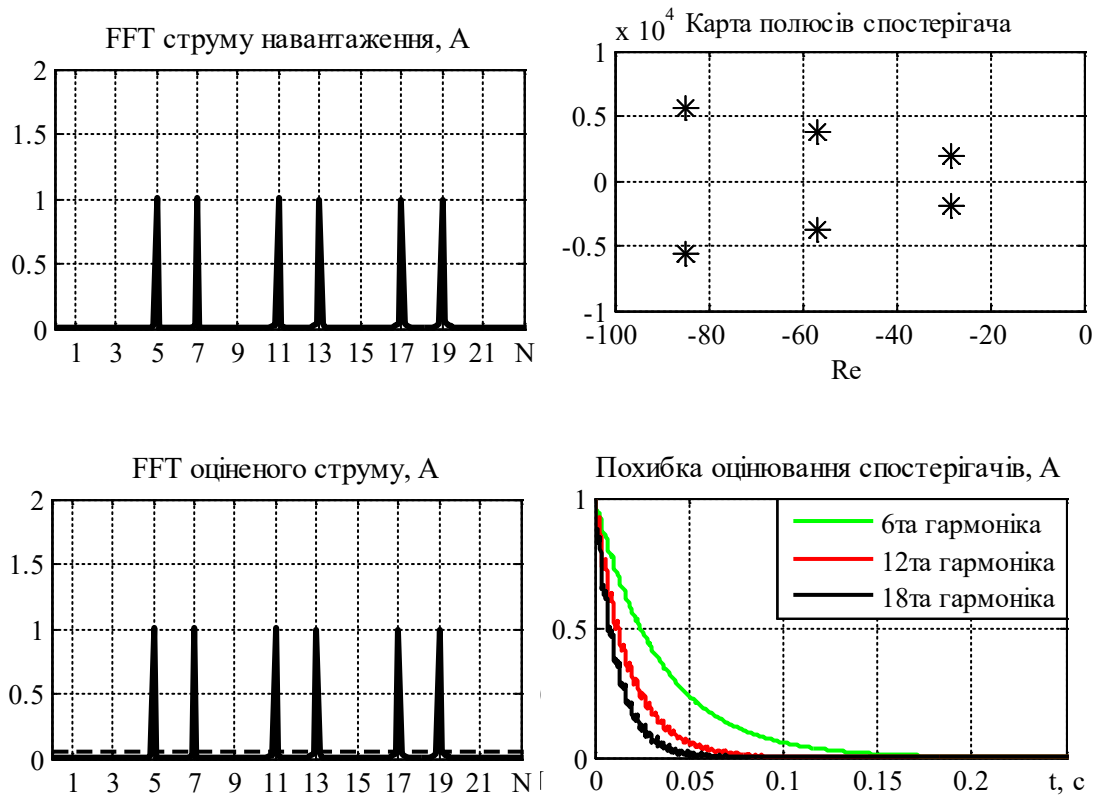


Рисунок 2.6 – Показники оцінювання струмів трифазної мережі при

$$\delta_6 = \delta_{12} = \delta_{18} = 0.005; k_2 = 0$$

Розташування полюсів на рис.2.5 та рис. 2.6, а також характер затухання похибок оцінювання дозволяє зробити припущення, що при однакових значеннях полюсів можна досягти однакової швидкодії оцінювання гармонік, визначивши коефіцієнт демпфування для кожного окремого спостерігача так, щоб полюси розташовувалися на однаковій відстані від уявної осі на комплексній площині.

При цьому, як слідує з рис. 2.7 та рис. 2.8, що при стандартному налаштуванні та запропонованому, полоса резонансу майже однакова. В даному налаштуванні використовуються різні значення δ , це зроблено для того щоб гармоніки які розглядаються оцінювались з однаковою швидкістю. При цьому ми можемо замітити, що карта полюсів як в стандартному так і в запропонованому практично не змінилась.

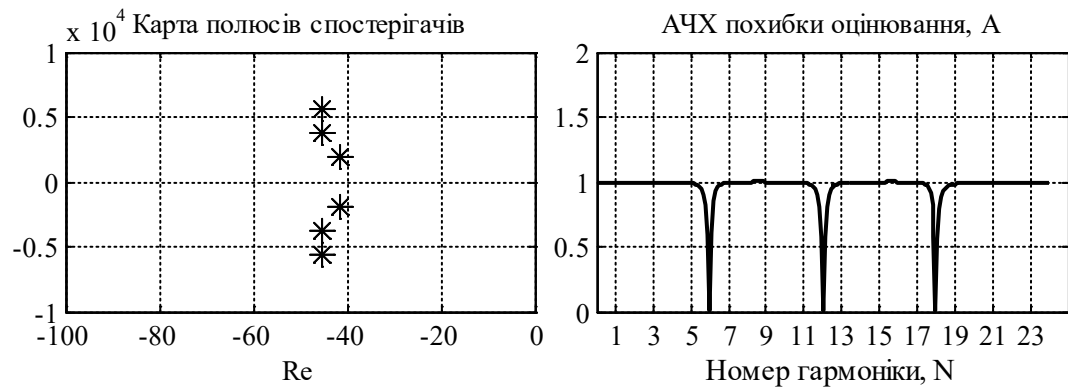


Рисунок 2.7 – Карта полюсів та АЧХ при $\delta_6 = 0.022, \delta_{12} = 0.012, \delta_{18} = 0.008$, стандартне налаштування

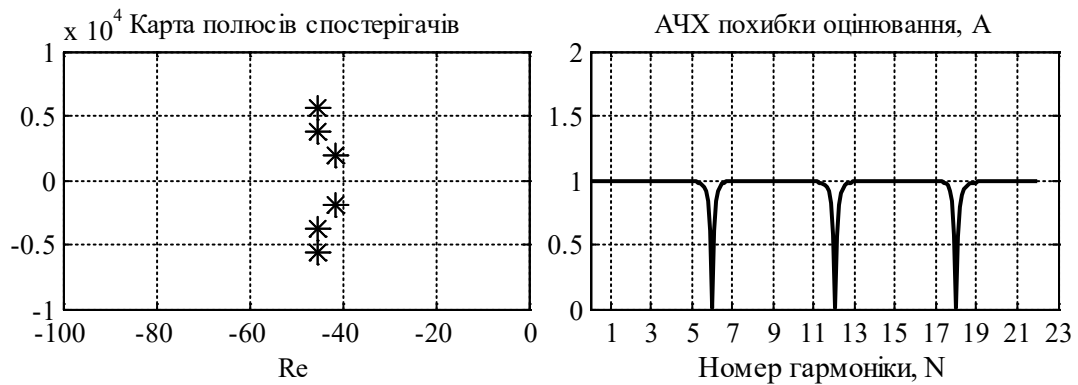


Рисунок 2.8 – Карта полюсів та АЧХ при $\delta_6 = 0.022, \delta_{12} = 0.012, \delta_{18} = 0.008$
 $k_2 = 0$

2.3.3 Підвищення швидкодії оцінювання

Застосування даного спостерігача в трипровідних мережах, тобто коли ми оцінюємо лише обрані гармоніки в спектрі струму (5,7,11,13,15,17,19) припустивши, що всі інші гармоніки відсутні, дає можливість зробити коефіцієнт δ ще більшим. Це призведе до розширення полоси резонансу, як зображено на рисунках 2.9 та 2.10, але через те, що сторонніх гармонік не має вони не будуть впливати на показники оцінювання. Співпадіння отриманих графіків перехідних процесів, амплітудно-частотних характеристик та карт полюсів спостерігача підтверджує, що обнулення коефіцієнту k_2 суттєво не впливає на характеристики оцінювання гармонік.

Також при збільшенні коефіцієнта демпфування підвищується швидкість оцінювання гармонік. Тому існує можливість істотно підвищити швидкодію оцінювання до рівня 0.02 с

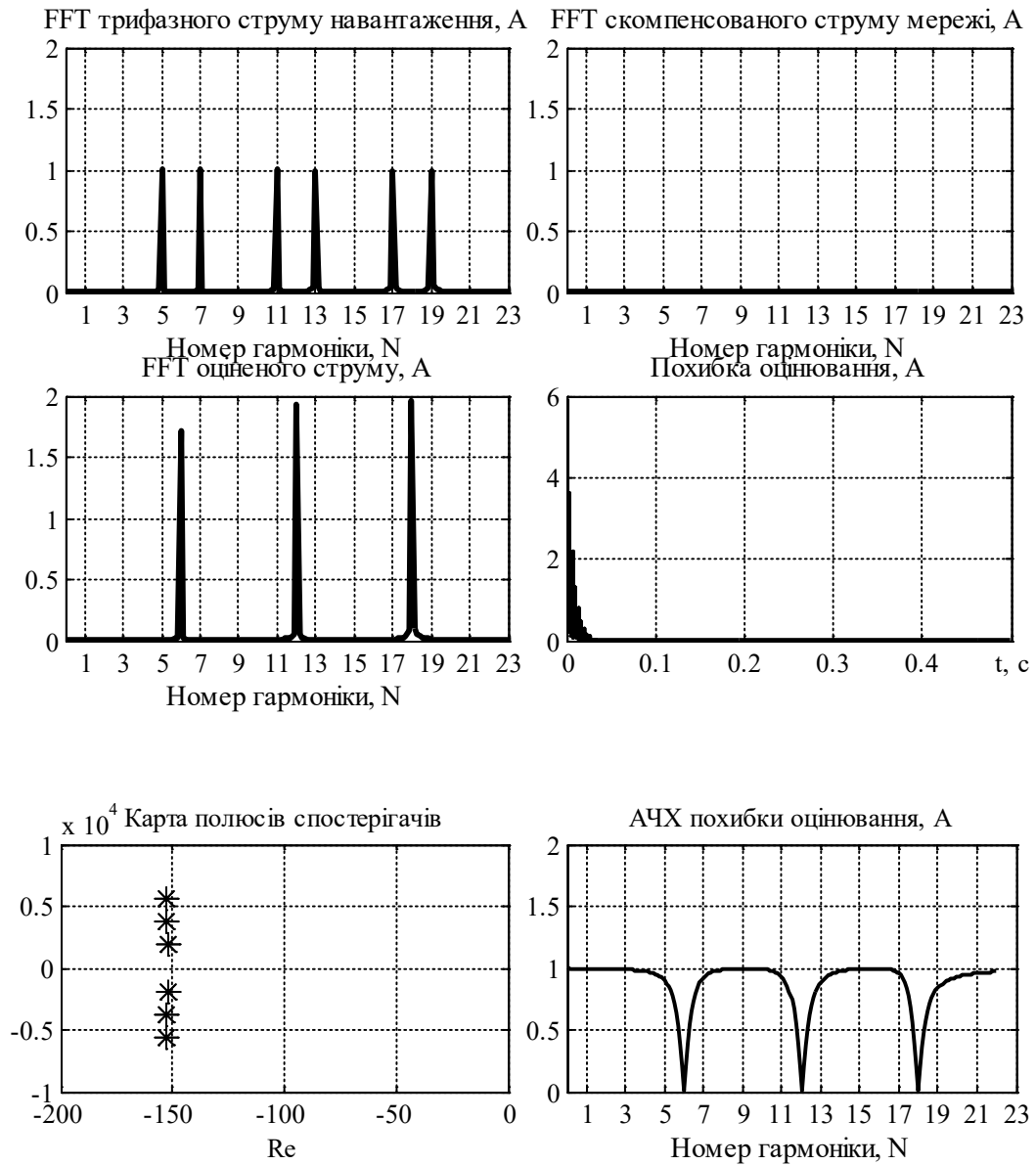


Рисунок 2.9 – Показники оцінювання струмів трифазної мережі при

$$\delta_6 = 0.08; \delta_{12} = 0.04; \delta_{18} = 0.0275; \text{ стандартне налаштування}$$

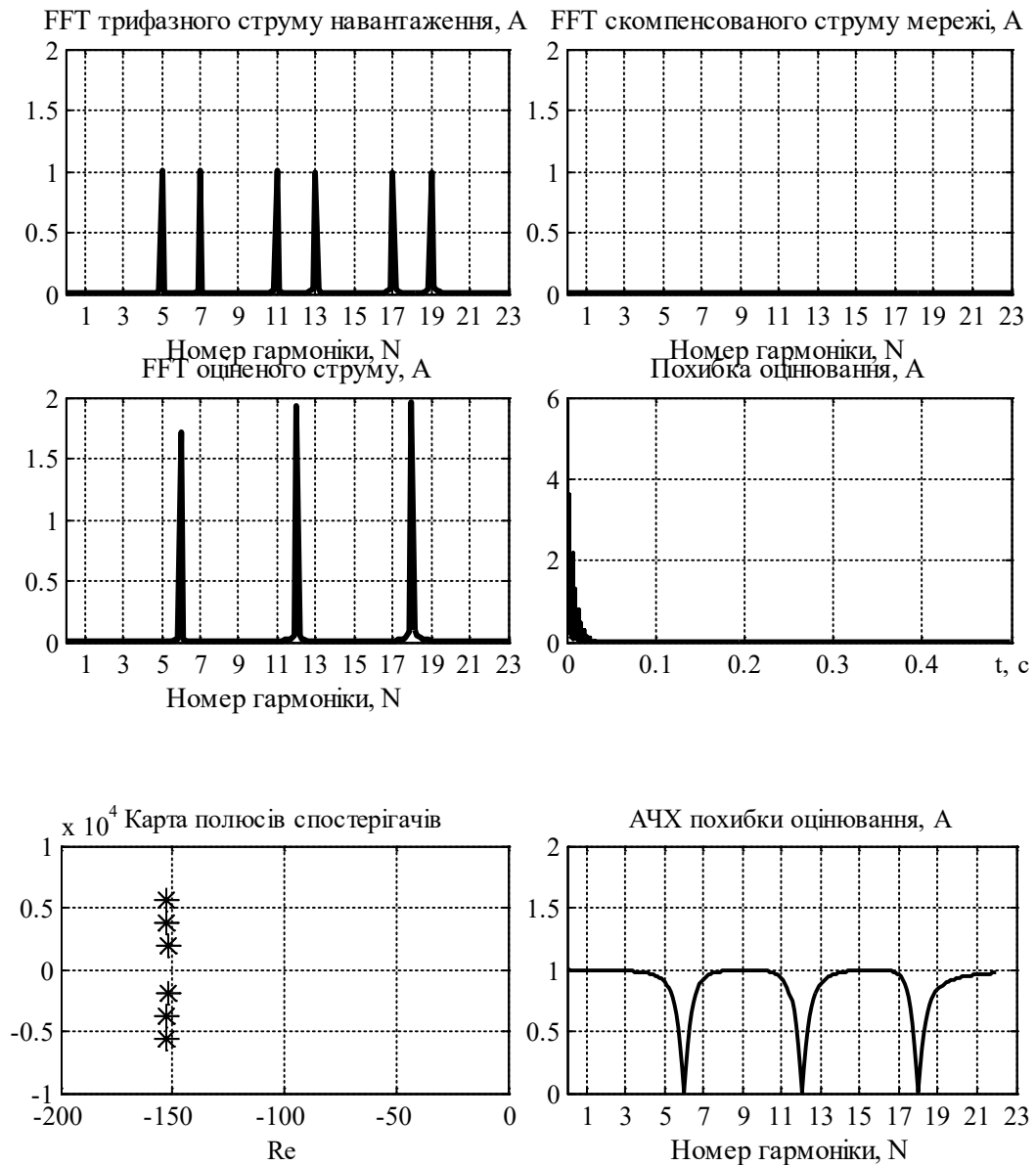


Рисунок 2.10 – Показники оцінювання струмів трифазної мережі при $\delta_6 = 0.08$; $\delta_{12} = 0.04$; $\delta_{18} = 0.0275$; $k_2 = 0$

Висновок до 2 розділу

В другому пункті були представлено математичну модель мережі. Вона потрібна для створення і розгляду спостерігача гармонік. На основі цих математичних моделей було створено в середовищі Matlab модель яка описувала роботу мережі та активного фільтра. Використовуючи дану модель було проведено порівняльне дослідження стандартного налаштування спостерігача із запропонованим, тобто при обнуленому k_2 . На протязі всього

дослідження було зроблено припущення, що електрична мережа, яку ми використовували, є симетричною і трипровідною, що дозволило розглядати лише так звані канонічні гармоніки.

В ході проведення дослідження було виявлено, що при однакових значеннях полюсів можна досягти однакової швидкодії оцінювання гармонік, визначивши коефіцієнт демпфування для кожного окремого спостерігача. При цьому в стандартному налаштуванні та запропонованому, полоса резонансу майже однакова.

Прийнявши до уваги вище зазначені результати дослідження, можна зробити висновок, що при збільшенні коефіцієнта δ збільшується полоса резонансу та швидкість оцінювання гармонік. Так як наша мережа канонічна то при розширенні полоси резонансу стороні гармоніки не будуть впливати на якість оцінювання спостерігачем розглянутих гармонік.

Це дає можливість пришвидшити роботу фільтра без значної втрати якості фільтрації, що в свою чергу підвищує його ефективність.

3 ЛАБОРАТОРНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОМПЕНСАЦІЇ ГАРМОНІК ЗА ДОПОМОГОЮ СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРУ

Якість електроенергії визначається амплітудою, частотою і спотворенням форми сигналу споживаних струму та напруги. Амплітуда і частота живлення значною мірою визначаються системою електропостачання, а форма кривої напруги або струму спотворюється приймачами електричної енергії. Лінійні навантаження, такі як асинхронні двигуни, лампи розжарювання, резистивні нагрівальні прилади або конденсаторні батареї, споживають синусоїдальний струм, що відповідає формі кривої напруги живлення. Проте значна кількість типових приймачів електричної енергії є нелінійними, наприклад, регульовані електроприводи з напівпровідниковими перетворювачами, випрямлячі, джерела безперебійного живлення, енергоощадні (флуоресцентні) лампи, пристрої з імпульсними блоками живлення і так далі. Ці приймачі споживають несинусоїдний струм, який не відповідає формі кривої напруги, і спотворюють форму останньою. Спотворення викликаються гармоніками, формованими нелінійними пристроями.

Вищі гармонічні струму (напруги) призводять до:

- збільшення втрат електроенергії;
- перегрівання кабелів, електродвигунів і трансформаторів;
- передчасного зносу устаткування;
- перегрівання і виходу з ладу конденсаторів;
- появи сильних струмів в нейтральних дротах;
- виникнення резонансу в мережі;
- відмові в підключенні до мереж електропостачання у разі занадто високого їх рівня.

3.1. Силовий активний фільтр ABB PQF, загальний огляд та налаштування

Фільтри PQF компанії ABB мають забезпечують активну фільтрацію гармонік мережі, плавної компенсації реактивної потужності і розподілу навантажень (усунення небаланса фаз). Остання особливість дозволяє значно зменшити різницю напруги між нейтральним проводом і проводом заземлення в чотири провідних системах.

Фільтри PQF нечутливі до великих змін імпедансу мережі, що виникає, наприклад, при паралельному підключенні джерел або перемикачів з мережевого живлення на живлення від генераторів і навпаки. Вони відстежують струм мережі в реальному масштабі часу і за допомогою потужної мультипроцесорної системи цифрової обробки сигналів (DSP) перетворюють вимірювані параметри в цифрові сигнали. Цифровий контролер генерує сигнали широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), відмикаючи IGBT-транзистори, які через лінійні реактори підживлюють мережу гармонійними струмами в протифазі до фільтрованих компонентів.

Окрім цього, фільтри PQF можуть бути інтегровані в інформаційні промислові мережі зв'язку. Залежно від наявних у замовника мереж передачі даних можуть бути запропоновані різні рішення – від декількох модулів цифрового введення–виведення до додаткового інтерфейсу зв'язку Modbus RTU.

В лабораторному стенді використовується паралельний активний фільтр фірми ABB серії PQFS(Power Quality Filter Shunt). Паспортні данні пристрою в табл.3.1

Таблиця 3.1 – Паспортні данні АФГ АBB PQFS

Загальний струм мережі (середньокв.) на один блок	$208V \leq U \leq 244V$ 30 А	$380V \leq U \leq 415V$ 30 А
Струм нейтралі	Середньокв. струм мережі x 3, але не більше 270 А (середньокв.).	
Необхідність в трансформаторах струму (ТС)	Необхідно 3 ТС (класу 1,0 або вище). Номінальний струм вторинної обмотки: 5А. Навантаження фільтру: 5 ВА.	
Модульний принцип	До 4 блоків с однаковими параметрами.	
Допущення	$\pm 10\%$ по напрузі; $\pm 5\%$ по частоті	
Гармоніки, що пригнічуються	<u>3-провідне підключення</u> : 20 окремих гармонік, від 2-го до 50-го порядку. <u>4-провідне підключення</u> : 15 окремих гармонік, від 2-го до 50-го порядку.	
Коефіцієнт послаблення гармонік	> 97% при номінальному навантаженні	
Реактивна потужність	Від 0,6 (індукт. характер) до 0,6 (ємн. характер).	
Активна потужність	Зазвичай < 3% потужності пристрою.	

На рисунку 3.1 зображено зовнішній вигляд паралельного активного фільтра.

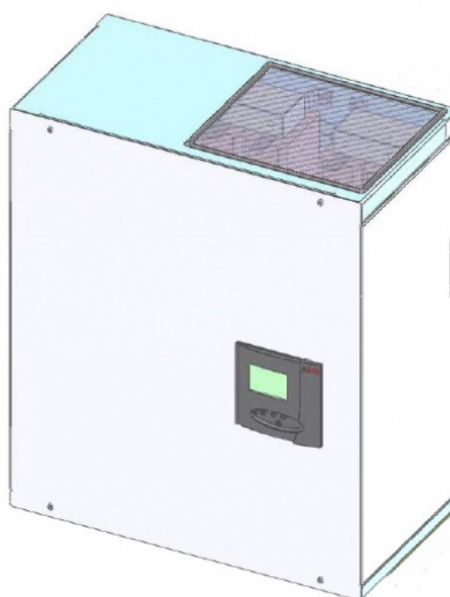


Рисунок 3.1 – Паралельний активний фільтр АBB PQFS

Для індикації та налаштування параметрів роботи фільтра, блок оснащений панеллю керування, зображеною на рис.3.2.

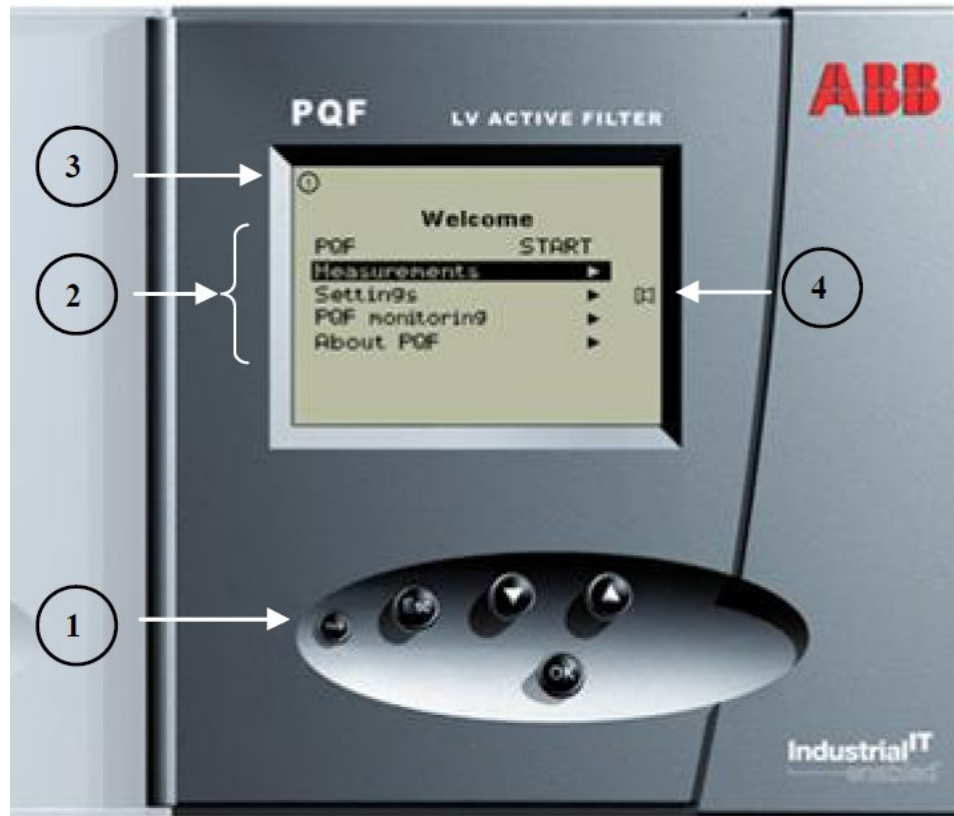


Рисунок 3.2 – Панель керування паралельного активного фільтра ABB PQFS

Панель керування складається з наступних елементів: 1 – клавіатура для навігації та вводу даних; рідкокристалічний дисплей, що містить: 2 – меню керування; 3 – індикатор стану дискретних виходів; 4 – індикатор тривожних станів фільтра. Для опису процедури налаштувань варто зосередитись на елементах 1 і 2. На рисунку 3.3 представлено клавіатуру для навігації та вводу даних.

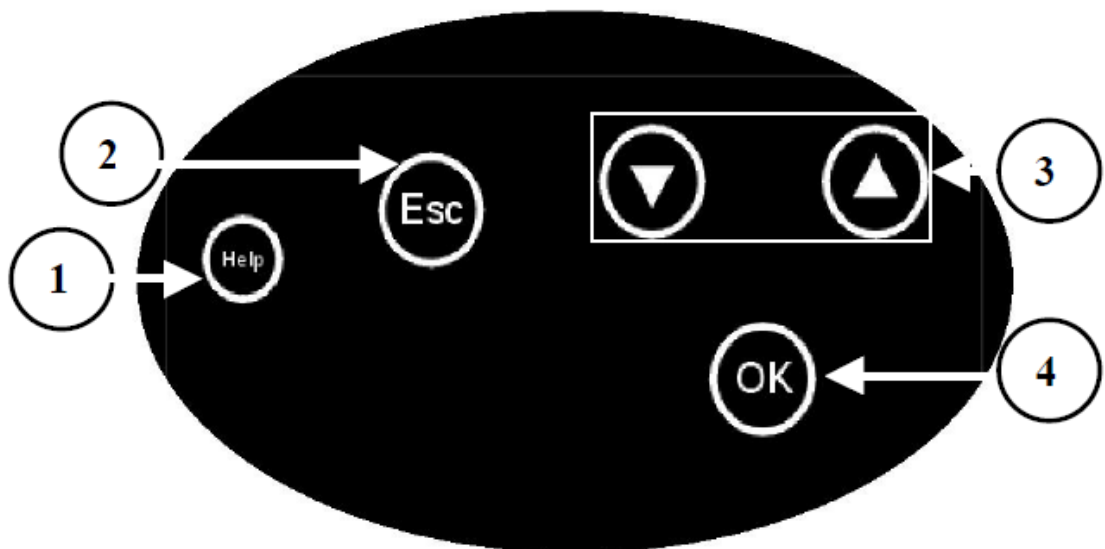


Рисунок 3.3 – Клавіатура для навігації та вводу даних фільтра ABB PQFS

Призначення клавіш:

1. клавіша «Help» – виклик допомоги, підказка призначення параметра або меню;
2. клавіша «Esc» – виконує функцію повернення до попереднього меню;
3. клавіші навігації/вибору в меню;
4. клавіша «OK» – клавіша підтвердження вибору.

Деревовидна структура меню керування зображено на рис 3.4. Меню вміщує в собі безліч гілок підменю і налаштувань, багато із них дублюються для того, щоб зручніше сортувати їх по відповідним категоріям для спрощення налаштування. Розглянемо головні гілки меню та підменю, що безпосередньо необхідні для роботи з фільтром.

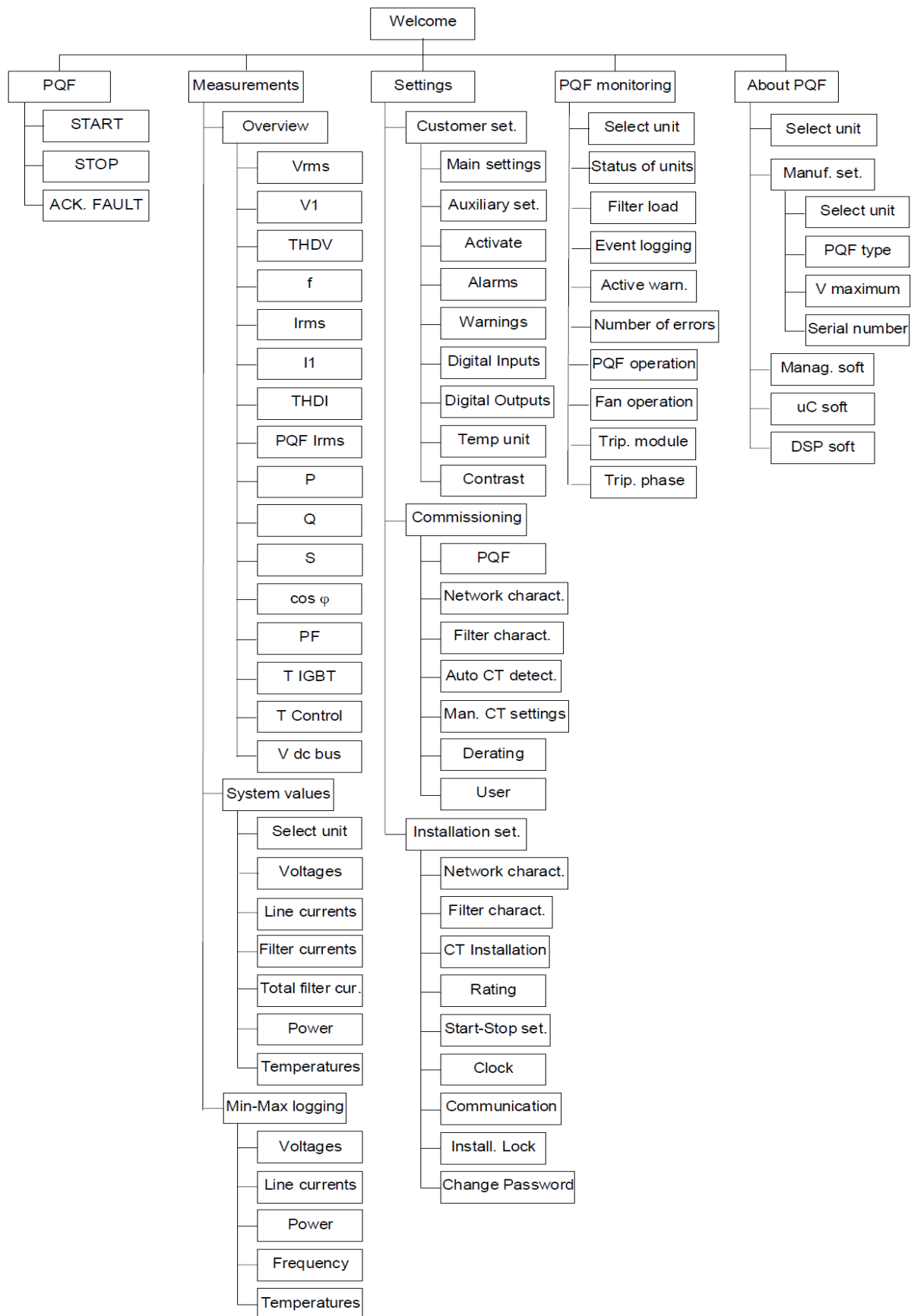


Рисунок 3.4 – Деревовидна структура меню керування фільтра ABB
PQFS

1. «PQF» – меню призначене для вибору та індикації активного режиму роботи фільтра: «START» – фільтр активовано (режим «Старт»); «STOP» – фільтр дезактивовано (режим «Стоп»); «ACK.FAULT» – режим помилки (режим «Аварія»). При налаштуванні фільтра на перемикання режиму роботи по сигналу дискретних входів, меню «PQF» виконує роль індикації.
2. «Measurements» – меню, в якому зібрані всі показники що надходять в реальному часі з датчиків фільтра, а також інші параметри, які отримані розрахунковим шляхом з цих показів. Ця гілка є дуже важливою, оскільки завдяки їй можливо відстежувати параметри мережі, робочі параметри фільтра, його навантаження та температурні режими.
 - 2.1. «Overview» – підменю в якому зібрані усі параметри, що відстежуються без будь-якого групування за призначенням (U, I – миттєві значення фазних напруг та струмів; P, Q, S – активна, реактивна та повна споживані потужності, $\cos \phi$, PF(Power Factor) – коефіцієнт потужності; THDI (Total Harmonic Distortion I) – коефіцієнт гармонічних спотворень струму, та ін.).
 - 2.2. «System Values» – підменю в якому параметри згруповані на підкатегорії для більш зручного використання.
 - 2.2.1. «Select Unit» – таблиця вибраних гармонік для компенсації;
 - 2.2.2. «Voltages» – інформація про фазні напруги;
 - 2.2.3. «Line currents» – інформація про вхідний струми мережі;
 - 2.2.4. «Filter currents» – інформація про струми фільтра;
 - 2.2.5. «Total filter cur.» – інформація про вміст гармонік струмів мережі;
 - 2.2.6. «Power» – показники споживаної потужності та показники якості: S, P, Q, $\cos \phi$, PF;
 - 2.2.7. «Temperatures» – температурні показники роботи силової частини фільтра.
 - 2.3. «Min-Max login» – підменю в якому параметри розбиті на підкатегорії, що відповідають меню «System Values» записують свої мінімальні та максимальні значення за встановлений проміжок часу;

3. «Settings» – меню налаштувань паралельного активного фільтра. Призначено для налаштування роботи фільтра на роботу мережі, на схему включення а також для створення профілів налаштувань та параметрів перемикачів. Як видно з рис.3.4, це меню має велику кількість налаштувань, більшість з яких налаштовується при встановленні фільтра і його налаштуванні на роботу. Тому для проведення лабораторних досліджень доцільно користуватися лише такими гілками налаштувань:

3.1.«Customer set.» – підменю налаштувань режимів роботи.

3.1.1. «Main settings» – налаштування основного режиму роботи.

Використовується, коли фільтр працює без опитування стану дискретних входів та активується з власного пульта.

3.1.2. «Auxiliary set.» – підменю, аналогічне попередньому за виключенням того, що налаштування режимів перемикаються за рахунок зовнішніх дискретних сигналів.

3.1.2.1. «Definition of the filter mode» – номер профілю налаштувань (1 – режим 1, 2 – режим 2 і т.д.);

3.1.2.2. «Selection of the harmonics with setting of curve levels» – таблиця вибору фільтрації гармонік;

3.1.2.3. «Selection of reactive power compensation with balancing functionality» – меню компенсації реактивної потужності;

3.1.2.4. «Deselection of all harmonics» – вимкнути фільтрацію всіх гармонік.

Для проведення лабораторних досліджень необхідно налаштовувати меню «Settings\ Customer set \Auxiliary set.» для вибору необхідних гармонік у режимі часткової компенсації (режим 2). Також часто використовується меню «Measurements» для фіксування параметрів роботи мережі і фільтра.

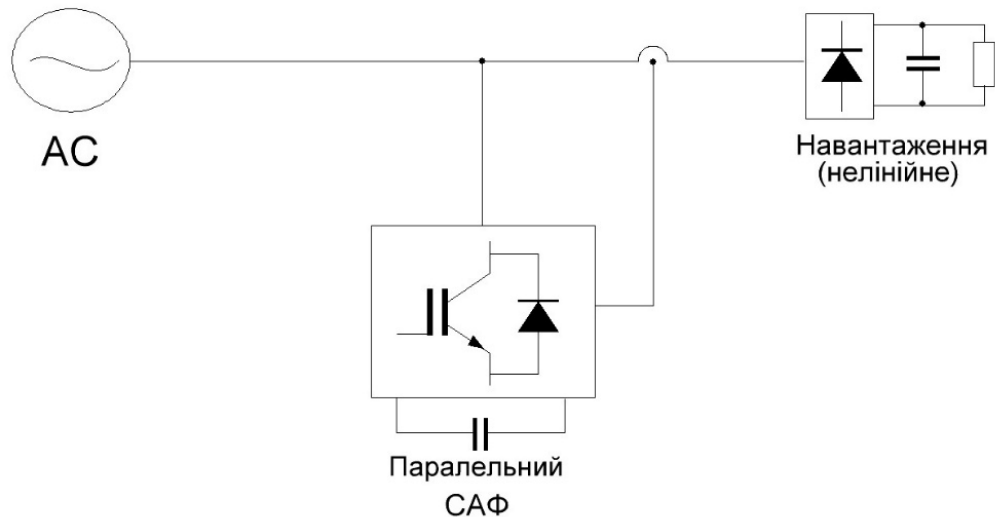


Рисунок 3.5 – Фільтр PQF

Фільтри PQF є ідеальним рішенням проблеми фільтрації вищих гармонік. Результатом використання фільтрів PQF є отримання чистої синусоїди. Іншими словами, трансформатор живлення передає струм без паразитних гармонік і, отже, фільтроване навантаження не «забруднює» мережу.

Крім того, фільтри PQF мають функцію розподілу навантаження, забезпечуючи рівномірний розподіл струму навантаження між фазами і знижуючи дію від струму в нейтралі (чотирипровідні моделі). Ця функція особливо корисна там, де використовуються чотирипровідні системи, наприклад, в центрах обробки даних, готелях, банках і тому подібне. Режим компенсації реактивної потужності дає можливість точної компенсації індуктивних і ємнісних навантажень до заданого значення $\cos\phi$.

Системи із зворотним зв'язком отримують додаткову перевагу точності роботи без необхідності встановлення спеціальних вимірювальних пристроїв. Застосування цифрових контролерів забезпечує універсальність, надійність і точність системи. Керуюча програма PQF-менеджер надає можливість широкого вибору вимірювання різних параметрів мережі, програмування і налаштування фільтрів PQF

3.2 Опис лабораторної установки

Функціональна схема лабораторної установки зображена на рис.(3.6). Стенд складається з панелі керування фільтром та фільтра PQF. Для візуалізації результатів вихід АЦП, що входить до складу стенду, з'єднаний із комп'ютером.

Лабораторний стенд складається з наступних функціональних блоків: емулятор нелінійного навантаження (Non-Linear Load), реверсивний електропривод змінного струму (Induction Motor Drive), асинхронний двигун (M1), паралельний активний фільтр (Shunt Active Filter, скорочено – SAF), модуль аналого-цифрового перетворення сигналів (ADC Module), персональний комп'ютер (PC). На схемі застосовуються наступні позначення: QF1 – вимикач живлення стенду, QF2–4 – перемикачі, які визначають режим роботи стенду; ДН1–3 – датчики напруги; ТА1–3 – датчики струмів; К1 – вимикач, що шунтує вхідні опори R1–R3, К2 – аналогічно для R4; VT1, RH – ключ та опір клампера відповідно.

Для зняття осцилограм з датчиків лінійних і фазних напруг та струмів в усіх режимах працює модуль аналого-цифрового перетворення сигналів з'єднаний з персональним комп'ютером для візуалізації та запису результатів досліджень

Зовнішній вигляд панелі керування лабораторним стендом представлено на рис. (3.7) та умовно можна розділити на органи силового керування та органи керування режимами роботи.



Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд панелі керування лабораторним стендом

Функціональним призначенням органів силового керування є вибір конфігурації лабораторного стенду, який передбачає декілька варіантів досліджуваних систем. Органи силового керування в складі лабораторної установки представлені автоматичними вимикачами, які на функціональній схемі, рис. (3.7), позначені: QF1(мережа), QF2(активний фільтр), QF3(навантаження) та QF4(перетворювач). В ході виконання лабораторної роботи будуть досліджені наступні системи:

1. «Мережа-Нелінійне навантаження»,
2. «Мережа-Активний фільтр»,
3. «Мережа-Нелінійне навантаження-Активний фільтр».

В залежності від режиму роботи вмикаються відповідні вимикачі QF1–QF4. Зовнішній вигляд органів силового керування лабораторним стендом представлено на рис. 3.8.



Рис. 3.9 – Органи силового керування роботи стенда

Вибір досліджуваної системи здійснюється шляхом ввімкнення відповідних автоматичних вимикачів. Так у випадку дослідження системи «Мережа-Активний фільтр», необхідно ввімкнути спочатку QF1, який на

рис.(3.9) має назву «Мережа», а потім QF2 - «Фільтр». В незалежності від досліджуваної системи, автоматичний вимикач QF1 вмикається першочергово.

На панелі керування знаходяться органи керування та індикації режимів роботи стенду. Структурно панель розділена на 4 блоки:

- «Мережа» – керування режимом роботи мережі;
- «Фільтр» – керування паралельним активним фільтром (SAF);
- «Перетворювач» – керування електроприводом (Induction Motor Drive);
- «Навантаження» – керування нелінійним навантаженням.

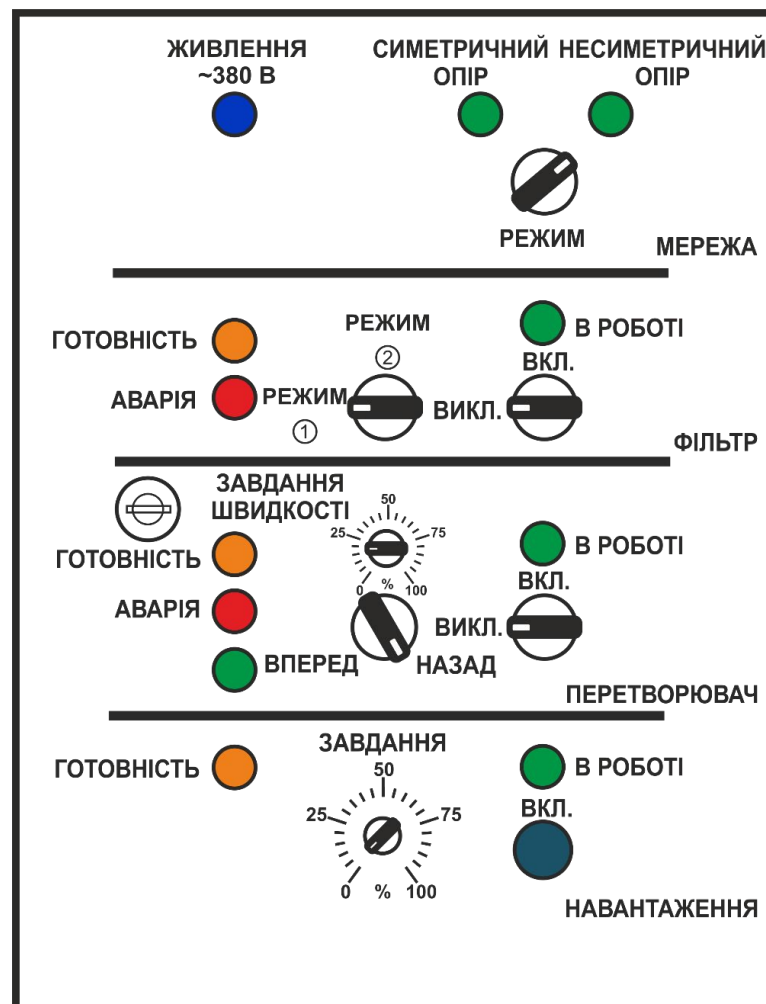


Рисунок 3.10 – Панель керування лабораторного стенду

Блок «Мережа» складається з наступних елементів: сигнальна лампа «Живлення ~ 380» – сигналізує подачу живлення на стенд (замкнено вимикач

QF1); двопозиційний перемикач «Режим», в залежності від якого перемикаються режими роботи «Симетричний опір» (K1 – розімкнено, K2 – замкнено) та «Несиметричний опір» (K1, K2 – розімкнено), що сигналізуються відповідними сигнальними лампами.

Блок «Фільтр» має такі сигнальні лампи: «Готовність» – фільтр ввімкнений (QF2) і готовий до роботи; «Аварія» – збій роботи фільтра, запуск неможливий; «В роботі» – фільтр запущено в активному стані (в режимі «Start»). Також в цьому блоці знаходяться: двопозиційний перемикач «Режим 1–2» для вибору режимів повної або часткової компенсації; перемикач «ВКЛ/ВИКЛ» – переводить фільтр в активний стан.

Блок «Перетворювач» сигналізує: «Готовність» – перетворювач ввімкнений (QF4) і готовий до роботи; «Аварія» – збій роботи перетворювача, запуск неможливий; «В роботі» – перетворювач в активному стані. Для керування в цьому блоці знаходяться: двопозиційний перемикач «Вперед/Назад» для вибору напрямку обертання двигуна та здійснення реверсу; перемикач «ВКЛ/ВИКЛ» – переводить перетворювач в активний стан; потенціометр «Завдання швидкості» – дозволяє регулювати завдання швидкості двигуна.

Блок «Навантаження» складається з: сигнальної лампи «Готовність» – ввімкнений вимикач QF3 живлення навантаження; лампи «В роботі» – навантаження в активному стані; потенціометр «Завдання» – дозволяє регулювати потужність нелінійного навантаження; кнопка «ВКЛ» – переводить навантаження в активний стан (сигнал «В роботі»).

Робота стенду проводиться в 3-х основних режимах:

- «Мережа–Навантаження» – емуляція роботи нелінійного навантаження без фільтрації гармонік;
- «Мережа–Фільтр–Навантаження» – емуляція роботи нелінійного навантаження з ввімкненим паралельним активним фільтром;
- «Мережа–Перетворювач» – робота реверсивного електропривода змінного струму.

В залежності від режиму роботи вмикаються відповідні вимикачі QF1–QF4.

Для переведу досліджуваної системи в режим «Мережа-Нелінійне навантаження» необхідно ввімкнути автоматичні вимикачі QF1 – «Мережа» та QF3 – «Навантаження». Після ввімкнення автоматичного вимикача QF1 на панелі, що відноситься до мережі починає світитися синій індикатор «Живлення ~380 В», а після ввімкнення автоматичного вимикача QF3 через декілька секунд на панелі, яка відноситься до навантаження, починає світитися індикатор «Готовність». Необхідна величина нелінійного навантаження встановлюється потенціометром «Завдання» в нижній частині панелі керування та визначається шкалою навколо його ручки. Накидання навантаження здійснюється натисненням кнопки «Вкл» (із самоповерненням) на панелі «Навантаження». Осцилограми струмів та напруг знімаються за допомогою програмного забезпечення LGraph2 для повного циклу досліджень. Тривалість роботи нелінійного навантаження не має перевищувати 20 с.

Для переведу досліджуваної системи в режим «Мережа-Активний фільтр» необхідно вимкнути автоматичний вимикач QF3 – «Навантаження» та ввімкнути автоматичний вимикач QF2 – «Фільтр». Через деякий час на панелі, що відноситься до фільтра, починає світитись помаранчевий індикатор «Готовність», який свідчить про те, що фільтр готовий до роботи, індикатор «Аварія» світиться в аварійних випадках. Для переведу фільтра в робочий режим необхідно перевести відповідний тумблер в положення «Вкл», після чого фільтр починає працювати згідно налаштувань. Під час роботи фільтра світиться зелений індикатор «В роботі». Осцилограми струмів та напруг знімаються за допомогою програмного забезпечення LGraph2.

Параметри споживаної електричної енергії, які відображаються в меню «Overview» активного фільтра (група «Measurements»), фіксуються для усталених режимів роботи.

Усталеному режиму роботи відповідає режим, що настає після завершення процесу компенсації обраних вищих гармонік.

Для переводу досліджуваної системи в режим «Мережа-Нелінійне навантаження-Активний фільтр» необхідно додатково до ввімкнених QF1 та QF2 ввімкнути автоматичний вимикач QF3 – «Навантаження». Для компенсації всіх гармонік необхідно пересвідчитись, що відповідним тумблером обрано 1-ий режим роботи активного фільтра, а в меню «Main settings» (група «Settings», підгрупа «Customer set.») обрані всі гармоніки. Після цього ввести фільтр в роботу. Накидання нелінійного навантаження здійснювати в усталеному режимі роботи фільтра. Осцилограми струмів та напруг знімаються за допомогою програмного забезпечення LGraph2.

Вивести фільтр з роботи шляхом перемикання тумблеру «В роботі» в положення «Викл». Для компенсації лише декількох гармонік необхідно перевести фільтр в 2-ий режим роботи та обрати необхідні гармоніки в меню «Auxiliary set.» (група «Settings», підгрупа «Customer set.»). Після налаштування другого режиму роботи фільтра ввести його в роботу. Осцилограми струмів та напруг знімаються для встановленої величини нелінійного навантаження за допомогою програмного забезпечення LGraph2.

3.3 Застосування стенду в лабораторних дослідженнях

Лабораторний практикум повинен наглядно демонструвати, до яких негативних наслідків, для мережі, призводять нелінійні споживачі, і які є сучасні методи боротьби з цими явищами, а також доводити їхню ефективність та доцільність їх використання.

У відповідності до поставленої мети, було сформовано концепцію лабораторного практикуму, що передбачає проведення наступних досліджень:

1. дослідження характеристик мережі при роботі нелінійного навантаження (режим «Мережа–Навантаження»);
2. дослідження роботи характеристик мережі при роботі нелінійного навантаження і паралельного активного фільтра (режим «Мережа–Навантаження–Фільтр»);

- 2.1. дослідження роботи фільтра з вимкненою компенсацією струмів вищих гармонік;
- 2.2. роботу фільтра з частковою компенсацією (до 11-ї гармоніки);
- 2.3. роботу фільтра з повною компенсацією (до 50-ї гармоніки);
3. дослідження роботи характеристик мережі при роботі електропривода.

У першому режимі досліджується вплив нелінійного навантаження на мережу. Змінюючи потужність нелінійного, визначити як вона впливає на характеристики ефективності електроспоживання мережі (на активну, реактивну та повну споживані потужності, $\cos \phi$, коефіцієнт потужності; коефіцієнт гармонічних спотворень струму). Отримати форму споживаного струму та його гармонічний склад.

У другому режимі досліджується компенсація струмів вищих гармонік з використанням паралельного активного фільтра. Цей режим дозволяє дослідити ефективність роботи АФГ для різної потужності нелінійного споживача, спостерігати лінійні та фазні напруги та струми споживача, фільтра і мережі окремо, оцінити компенсацію вищих гармонік за характеристиками аналогічними для першого режиму. Також, у другому режимі досліджується як впливає робота лише активного фільтра на мережу. Крім того, оцінюється різниця між режимами повної та часткової компенсації для демонстрації її впливу на некомпенсовану ділянку гармонічного спектру.

Висновок до 3 розділу

В третьому розділі представлено опис лабораторної установки для дослідження компенсації вищих гармонік. Лабораторний стенд можна розділити на три основні частини: органи силового керування, панель керування лабораторного стенду, паралельний активний фільтр ABB PQFS.

Функціональним призначенням органів силового керування є вибір конфігурації лабораторного стенду, який передбачає декілька варіантів досліджуваних систем. Органи силового керування в складі лабораторної установки представлені автоматичними вимикачами.

На панелі керування знаходяться органи керування та індикації

режимів роботи стенду.

Паралельний активний фільтр ABB PQFS виступає в якості робочого органу. Він забезпечують активну фільтрацію гармонік мережі, плавної компенсації реактивної потужності і розподілу навантажень (усунення небаланса фаз). Остання особливість дозволяє значно зменшити різницю напруги між нейтральним проводом і проводом заземлення в чотири провідних системах.

Також в даному розділі було розроблено концепції проведення лабораторних досліджень, які допоможуть наглядно продемонструвати, до яких негативних наслідків, для мережі, призводять нелінійні споживачі, і які є сучасні методи боротьби з цими явищами, а також доводити їхню ефективність та доцільність їх використання

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОМПЕНСАЦІЇ ГАРМОНІК СТРУМУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСУ

4.1 Дослідження процесів компенсації гармонік

У відповідності до сформованих концепцій, було проведено наступні дослідження:

1. дослідження характеристик мережі при роботі нелінійного навантаження (режим «Мережа–Навантаження»);
2. дослідження роботи характеристик мережі при роботі нелінійного навантаження і паралельного активного фільтра (режим «Мережа–Навантаження–Фільтр»);
 - 2.1. дослідження роботи фільтра з вимкненою компенсацією струмів вищих гармонік;
 - 2.2. роботу фільтра з частковою компенсацією (до 11-ї гармоніки);
 - 2.3. роботу фільтра з повною компенсацією (до 50-ї гармоніки);
3. дослідження роботи характеристик мережі при роботі електропривода.

Лабораторний стенд передбачає дослідження на різній величині потужності навантаження, вибір набору гармонік для їх оцінення та компенсації.

Дослідження режимів впливу нелінійного навантаження проводились на величині потужності навантаження: 50%, встановлюючи на панелі потенціометр «Завдання» (рис. 3.10). Перехідні процеси струмів отримано за допомогою датчиків струму до яких під'єднано модуль аналого–цифрового перетворення. Останній в свою чергу передає інформацію на ПК для візуалізації та запису. Графіки записаних даних, а також спектральний аналіз струму мережі отримано за допомогою програми, розробленої в середовищі MATLAB . Перехідні процеси дослідів 1 і 2 зображено на рис.4.1–4.4.

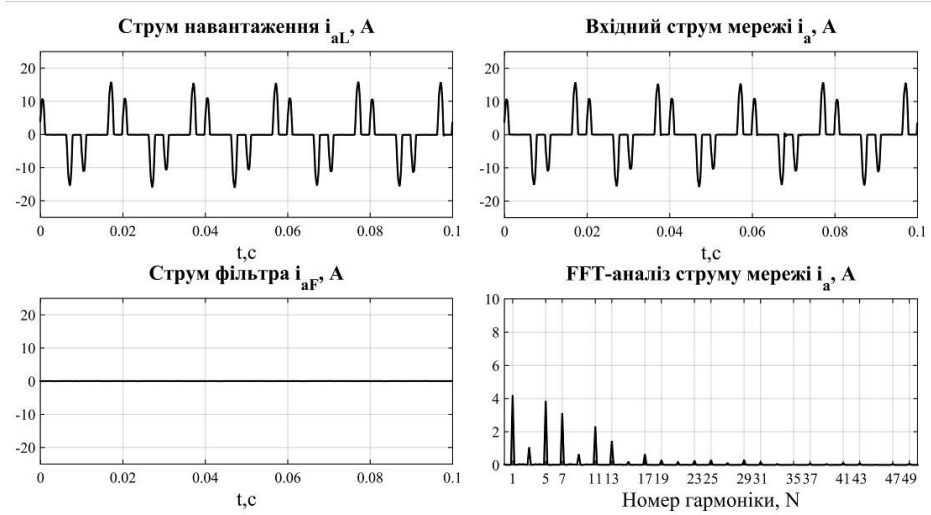


Рисунок 4.1 – Дослідження режиму «Мережа–Навантаження»:

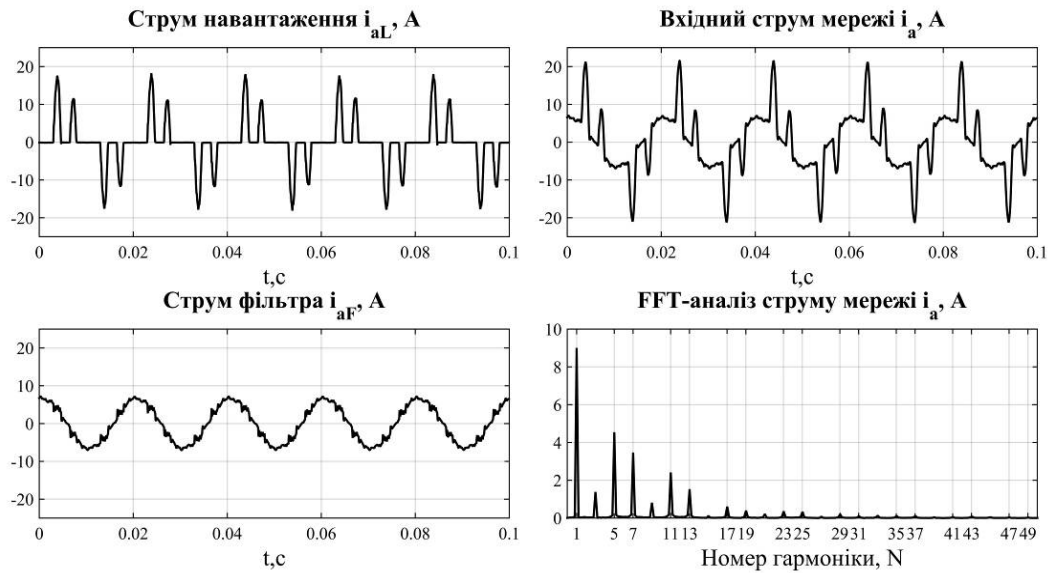


Рисунок 4.2 – Дослідження режиму «Мережа–Навантаження–Фільтр» з
вимкненою компенсацією

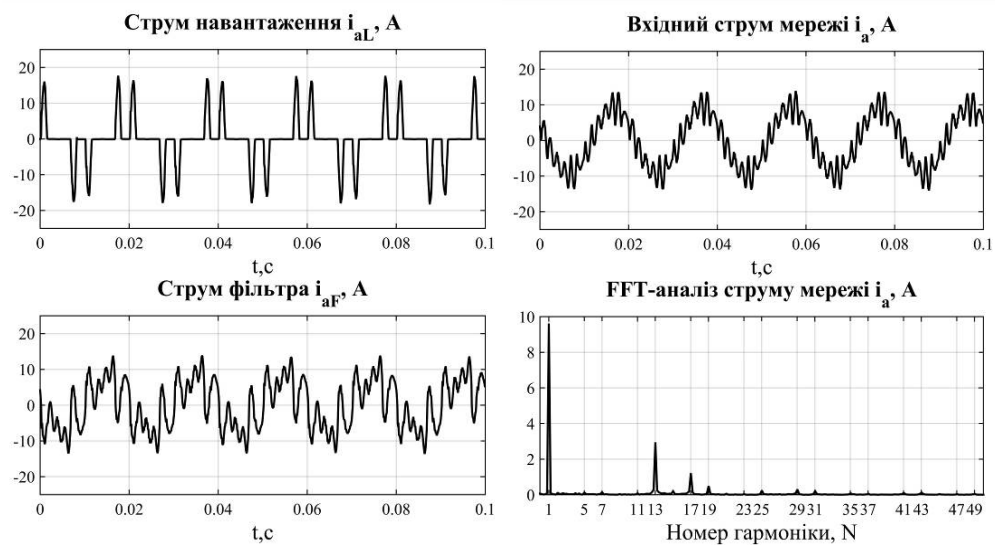


Рисунок 4.3 – Дослідження режиму «Мережа–Навантаження–Фільтр» з частковою компенсацією: завдання– 50%.

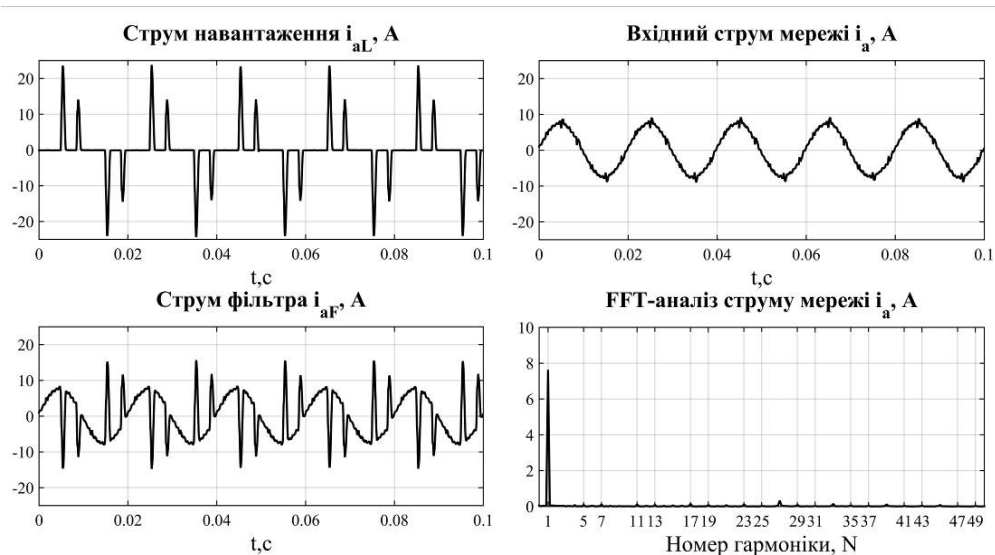


Рисунок 4.4 – Дослідження режиму «Мережа–Навантаження–Фільтр» з повною компенсацією.

Аналізуючи графіки на рис.4.1 режиму «Мережа–Навантаження» можемо зробити висновок, що зі збільшенням потужності нелінійного споживача, зростають струми вищих гармонік. Найбільш суттєвими по амплітуді є 5, 7, 11, 13 та 17 гармоніки.

В режимі «Мережа–Навантаження–Фільтр» без компенсації представленому на рис.4.2, що АФГ споживає чисто синусоїдальний струм і

не привносить додаткових гармонік у мережу. Порівнюючи спектральний аналіз бачимо, що амплітуда першої гармоніки зросла за рахунок споживання струму АФГ, коли рівень вищих гармонік залишився на попередньому рівні.

На рис.4.3 представлено осцилограми роботи в режимі «Мережа–Навантаження–Фільтр» з увімкненою частковою компенсацією до 11 гармоніки включно. Порівнюючи з попереднім режимом бачимо, що АФГ повністю нівелював вищі гармоніки до 11-ї включно. Разом з цим порівнюючи спектральний аналіз на рис.4.3 та рис.4.2 спостерігається збільшення гармонік вище 11-ї. Суттєво збільшились 13-та і 17-та гармоніки. Тобто, пригнічуючи гармонічний сигнал більш низької частоти ми спонукаємо приріст амплітуд більш високих частот.

Аналізуючи режим «Мережа–Навантаження–Фільтр» для випадку повної компенсації на рис.4.4 бачимо, що для всього діапазону досліджуваних потужностей, ПАФ повністю компенсує струми вищих гармонік.

Також, в рамках досліджень було знято числові характеристики якості споживаної електроенергії мережі при роботі ПАФ на нелінійне навантаження, а саме: P , Q , S – активна, реактивна та повна споживані потужності, $\cos \varphi$, PF (Power Factor) – коефіцієнт потужності; THDI (Total Harmonic Distortion I) – коефіцієнт гармонічних спотворень струму для кожної з фаз. Показники споживання електроенергії мережі в досліджуваних режимах отримано за допомогою панелі керування ПАФ в меню індикації «Measurements\Power». Результати отриманих досліджень в узагальненому вигляді представлено в табл. 4.1–4.3.

Таблиця 4.1 – Показники мережі режиму «Мережа–Навантаження–Фільтр» без компенсації

Навантаження, %	S, кВА	P, кВт	Q, кВАр	$\cos \varphi$	PF, %	THDI, %			
						A	B	C	середн.
50	5,53	2,87	3,04	0,69	0,52	94	94	100	96

Таблиця 4.2 – Показники мережі режиму «Мережа–Навантаження–Фільтр» з частковою компенсацією

Навантаження, %	S, кВА	P, кВт	Q, кВАр	cosφ	PF, %	THDI, %			
						A	B	C	середн.
50	5,26	3,62	3,35	0,73	0,69	36	34	41	37

Таблиця 4.3 – Показники мережі режиму «Мережа–Навантаження–Фільтр» з повною компенсацією

Навантаження, %	S, кВА	P, кВт	Q, кВАр	cosφ	PF, %	THDI, %			
						A	B	C	середн.
50	5,15	3,74	3,58	0,71	0,71	8	7	9	8

Порівнюючи отримані результати досліджень в табл.4.1 і 4.2 бачимо, що за рахунок часткової компенсації до 11-ї гармоніки включно, відсотковий показник несинусоїдальності (THDI) споживаного струму знизився в середньому на 60%. В режимі повної компенсації (табл.4.3) коефіцієнт знизився на 80–90%, не перевищуючи при цьому 8%.

Що стосується споживання енергії, то в активному режимі роботи фільтра (режимах часткової та повної компенсації) при навантаженні 50% споживання активної, реактивної і відповідно повної потужності зменшується. Отже, при роботі в режимах близьких до номінального, енергетичні показники вищі, ніж при занадто низькому навантаженні (граничні режими).

Важливими характеристиками споживання електроенергії є $\cos\varphi$ і PF (Power Factor). В деякій професійній вітчизняній літературі обидві характеристики називають «коефіцієнтом потужності» вважаючи, що вони нічим не відрізняються, проте це не відповідає дійсності. Помилку викликає той факт, що вони обчислюються за однаковим математичним виразом:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}; \quad PF = \frac{P}{S}.$$

Проте цей вираз справедливий лише у випадку ідеальної синусоїдальності напруг і струмів. У випадку несинусоїдальних струмів і напруг $\cos\varphi$ визначається як :

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{S_1},$$

де P_1 та S_1 – активна і повна потужність струмів та напруг першої гармоніки.

Таким чином, чим ближчі значення $\cos\varphi$ і PF один до одного, тим більша синусоїдальність спожитого струму. Дійсно, при порівнянні часткової компенсації з режимом без компенсації бачимо, що різниця між $\cos\varphi$ і PF зменшується для відповідної потужності. В режимі повної компенсації $\cos\varphi$ і PF повністю співпадають.

Якщо порівнювати $\cos\varphi$ і PF окремо в різних режимах видно, що $\cos\varphi$ в активних режимах майже не змінився при навантаженні близькому до номінального (50%). Останній факт пов'язано з тим, що при навантаженні близькому до номінального, $\cos\varphi$ без компенсації достатньо високий ($\approx 0,69$). Що стосується PF, то зі зменшенням THDI в активних режимах суттєво виріс PF.

Висновок до 4 розділу

В четвертому розділі описано дослід, який був проведений згідно поставленого завдання .

З даного дослідження ми бачимо, що зі збільшенням потужності нелінійного споживача, зростають струми вищих гармонік. В режимі «Мережа–Навантаження–Фільтр» пригнічуючи гармонічний сигнал більш низької частоти ми спонукаємо приріст амплітуд більш високих частот. В даному режимі без компенсації АФГ споживає чисто синусоїдальний струм і не привносить додаткових гармонік у мережу. А для випадку з повною компенсацією на протязі всього діапазону досліджуваних потужностей, ПАФ повністю компенсує струми вищих гармонік.

ВИСНОВКИ

В роботі представлено результати дослідження процесів компенсації вищих гармонік за допомогою силового активного фільтру.

Дослідження були проведені для того, щоб продемонструвати один із способів вирішення проблеми підвищення ефективності використання електроенергії і надійності енергозабезпечення споживачів.

1. В ході досліджень було виявлено і представлено ряд негативних впливів вищих гармонік на стан електричної мережі та електро обладнання. В роботі представлено спосіб вирішення цієї проблеми, шляхом використання силового активного фільтру вищих гармонік. Розглянуто види та способи підключення даних фільтрів.

2. Для кращого розуміння роботи САФ, було проведено розробку та моделювання математичної моделі трипровідної мережі, та активного фільтра в середовищі MatLab.

3. В ході моделювання було виявлено та досліджено способи, та умови, при яких вдається значною мірою покращити ефективність фільтрації вищих гармонік в мережі використовуючи, активний фільтр.

4. В роботі було більш детально розглянуто лабораторний комплекс, який використовується для проведення практичних досліджень компенсації гармонік, на основі активного фільтру ABB PQFS. Описано його структурну частину та надано приклади можливостей проведення різних дослідів.

5. В ході проведення практичних досліджень, на вище зазначеному стенді, було розглянуто характеристики мережі при роботі нелінійного навантаження; Характеристики при роботі не лінійного навантаження та паралельного активного фільтру, з повною та частковою компенсацією.

6. Було зроблено висновок, що при роботі без компенсації АФГ споживає чисто синусоїдальний струм і не приносить додаткових гармонік у мережу. А для випадку з повною компенсацією на протязі всього діапазону досліджуваних потужностей, ПАФ повністю компенсує струми вищих гармонік.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. А. Шидловский, А. Жаркин, Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. Киев: Наукова думка, 2005, 211с.
2. Д. Арриллага, Д. Брэдли, П. Боджер, Гармоники в электрических системах. Москва: Энергоатомиздат, 1990, 320 с.
3. Борисов Г.И., Колиушко Г.М., Колиушко Д.Г. Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости на электроэнергетических объектах в современных условиях / Техн. электродинамика : Проблеми сучасної електротехніки, 2002, ч.4, с. 99-103.
4. Вагин Г.Я., Борисов Б.П. Электромагнитная сщвместимость электротехнологических установок и питающих сетей: Техн. Електродинамика, 1986, №2, с.35-39.
5. Гурвич И.С. Защита ЭВМ от внешних помех - М. Энергоатомиз, 1984, 224 с.
6. Липковский К.А., Федоров С.Д. Определение требований к блоку гарантированного питания управляющих микроЭВМ, работающих в условиях сетевых помех. Институт электродинамики, Киев, 1990, 44 с.
7. Москаленко Г.А., Пономарев В.А., Жаркин А.Ф., Козлов А.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения: Обзор отечественных и зарубежных литературных источников. Институт электродинамики, Киев, 1988, 41 с.
8. Арп К., Шнетлер А. Сучасне планування промислових мереж: Енергетика та ринок, № 1(2), 1997, с. 25-27.
9. Двали Д.И., Мерабишвили П.Ф., Брегвадзе И.Т. Электромагнитная совместимость энергосберегающих компактных люминисцентных ламп с электрической сетью / Техн. Електродинамика: Проблеми сучасної електротехніки, 2002, ч.1, с. 77-78.
10. Липковський К.А., Кирик В.В, Жаркин А.Ф., Самков А.В. Особенности электропитания «энергоэффективных потребителей» / Техн. Електродинамика: Моделювання електронних, енергетичних та технологічних

систем, ч.1, 1999, с. 94-96.

11. Klinghsirn E.A., Jordan H.E. Polyphase induction motor performance and losses on non-sinusoidal voltage sources: IEEE Trans, Vol.PAS-87, 1968, pp.624-631.
12. Chalmers B.J., Sarkar B.R. Induction motor losses due to non-sinusoidal wavforms: Proc.IEE, Vol.115, 1968, pp.1777-1782.
13. F. C. D. L. Rosa, Harmonics and Power Systems. Boca Raton: CRC Press, 2006, 216 p.
14. T. C. Sekar and B. J. Rabi, ‘A review and study of harmonic mitigation techniques’, in 2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM), Dec. 2012, pp. 93–97, doi: 10.1109/ICETEEEM.2012.6494450
15. L. Motta and N. Faúndes, ‘Active / passive harmonic filters: Applications, challenges trends’, in 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Oct. 2016, pp. 657–662, doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783319.
16. H. Sasaki and T. Machida, ‘A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Flux Compensation-Considerations on Basic Design’, IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-90, no. 5, pp. 2009–2019, Sep. 1971, doi: 10.1109/TPAS.1971.292996.
17. H. Fujita and H. Akagi, ‘A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters’, in Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Oct. 1990, pp. 1107–1112 vol.2, doi: 10.1109/IAS.1990.152323.
18. F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, ‘Compensation characteristics of the combined system of shunt passive and series active filters’, in Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Oct. 1989, pp. 959–966 vol.1, doi: 10.1109/IAS.1989.96760.
19. W. Tangtheerajaronwong, T. Hatada, K. Wada, and H. Akagi, ‘Design of a Transformerless Shunt Hybrid Filter Integrated into a Three-Phase Diode

Rectifier', Jun. 2006, pp. 1–7, doi: 10.1109/PESC.2006.1711974.

20. H. Manafi, F. Moosazadeh, Y. Pourebrahim, and D. Mirabbasi, 'A New Control Method/or Parallel High-power Active Power Filters', in *Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, Proceedings of NDES 2012*, Jul. 2012, pp. 1–4.

21. K. Ruanmakok, K. Areerak, K. Areerak, and W. Sangtungong, 'The control of shunt active power filter using sliding mode controller', in *2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, May 2014, pp. 1–5, doi: 10.1109/ECTICon.2014.6839899.

22. M.-X. Wang, H. Poulighen, and M. Grandpierre, 'Performance of an active filter using PWM current source inverter', in *Fifth European Conference on Power Electronics and Applications*, 1993, Sep. 1993, pp. 218–223 vol.8.

23. R. E. Shatshat, M. M. A. Salama, and M. Kazerani, 'Artificial intelligent controller for current source converter-based modular active power filters', *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 3, pp. 1314–1320, Jul. 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2004.829148.

24. S. A. Oliveira da Silva, P. Donoso-Garcia, P. C. Cortizo, and P. F. Seixas, 'A three-phase line-interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning capabilities', in *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference*, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting, Sep. 2001, vol. 4, pp. 2389–2396 vol.4, doi: 10.1109/IAS.2001.955956.

25. S. A. O. da Silva, P. F. Donoso-Garcia, and P. C. Cortizo, 'A three-phase series-parallel compensated line-interactive UPS system with sinusoidal input current and sinusoidal output voltage', in *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference*, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, 1999, vol. 2, pp. 826–832 vol.2, doi: 10.1109/IAS.1999.801603.

26. K. Nohara, A. Ueda, A. Torii, and K. Doki, 'Compensating Characteristics of a Series-Shunt Active Power Filter Considering Unbalanced Source Voltage and Unbalanced Load', in *Power Conversion Conference - Nagoya*, 2007. PCC '07, Apr. 2007, pp. 1692–1697, doi: 10.1109/PCCON.2007.373190.

27. R. Khanna, S. T. Chacko, and N. Goel, 'Performance and investigation of hybrid filters for Power Quality Improvement', in Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2011 5th International, Jun. 2011, pp. 93–97, doi: 10.1109/PEOCO.2011.5970409.
28. H.-K. Chiang, B.-R. Lin, K.-T. Yang, and K.-W. Wu, 'Hybrid Active Power Filter for power quality compensation', in International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005, Nov. 2005, vol. 2, pp. 949–954, doi: 10.1109/PEDS.2005.1619824.
29. P. S. Modi and S. K. Joshi, 'New combined Hybrid active filter for twelve pulse converter operating under asymmetrical operation', in Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2011 21st Australasian, Sep. 2011, pp. 1–6.
30. F. Ronchi and A. Tilli, 'Three-phase positive and negative sequences estimator to generate current reference for selective active filters', in 10th 175 Mediterranean Conference on control and automation, Lisbon, Portugal, Jul. 2002, p. 378.