

**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) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 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: Асинхронний електропривод з паралельним активним фільтром у

системі живлення

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕП-62

(шифр групи)

Альошін Олег Олександрович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник: проф., д.т.н. Михальський В.М. _____

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

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

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

(підпис)

Рецензент _____

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

(підпис)

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

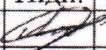
Студент _____

(підпис)

Київ – 2020 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141.620101.001.БР	Пояснювальна записка	76	
3	A1	141.620101.001.БР	Структурні схеми АФ	1	
4	A1	141.620101.001.БР	Силова схема ПАФ	1	
5	A1	141.620101.001.БР	Моделювання АФ	1	

				141.620101.001.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Розробн.	Альошін О.О.				2	84
Керівн.	Михальський В.М.				КП ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-62	
Консульт.						
Н/контр.	Теряєв В.І.					
Зав.каф.	Пересада С.М.					

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему:

Асинхронний електропривод з паралельним активним фільтром у системі
живлення

Київ – 2020 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)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Альохіну Олег Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: «Асинхронний електропривод з паралельним активним фільтром в системі живлення»

керівник проекту: Михальський Валерій Михайлович, проф., д.т.н. _____ ,
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Термін подання студентом проекту

3. Вихідні дані до проекту: $P_{2n} = 11$ кВт, $\omega = 314$ рад/с, $U_{1n} = 380$ В, $p_n = 4$,

$J_d = 0.18$ кг·м², $\eta = 0.87$, $\cos(\varphi) = 0.75$, $\lambda = 2.2$, $S_k = 10.49$ %, $S_n = 2.7$ %.

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ; 1. Аналітичний огляд в області активної фільтрації; 2. Формулювання вимог та принципів керування паралельного активного фільтра; 3. Паралельний активний фільтр для електроприводу; 4. Розрахунок параметрів двигуна; 5. Вибір силового обладнання; 6. Дослідження

динамічних та статичних характеристик при відпрацюванні заданої траєкторії швидкості та потокозчеплення ;7. Висновок; 8. Перелік використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Структурні схеми АФ; Силова схема ПАФ; Моделювання АФ;

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.

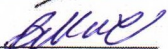
7. Дата видачі завдання: 24 березня 2020 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вступ. Аналітичний огляд	03.04.20	
2	Формулювання вимог та принципів керування паралельного активного фільтра	20.04.20	
3	Паралельний активний фільтр для електроприводу	05.05.20	
4	Розрахунок параметрів двигуна	10.05.20	
5	Вибір силового обладнання	15.05.20	
6	Дослідження динамічних та статичних характеристик при відпрацюванні заданої траєкторії швидкості та потокозчеплення	31.05.20	
7	Висновок.Перелік використаних джерел.	05.06.20	
7	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини проекту		

Студент

Керівник проекту

Олег АЛЬОХІН

Валерій МИХАЛЬСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок – 84, рисунків – 27, таблиць – 4, графічна частина на листах А1.

В даному дипломному проекті було проведено огляд пролематики активної фільтрації, сформовано вплив електропривода на мережу живлення, промодельовано паралельний активний фільтр та вибрано двигун.

Розрахунок і реалізація даного дипломного проекту забезпечувались за допомогою використання наступних програм: Microsoft Office Word 2016, Microsoft Office Visio 2013, Mathcad 15.0, MatLab R2009b, MathType 6.9.

ЕЛЕКТРОПРИВОД ЗМІННОГО СТРУМУ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, АВТОНОМНИЙ ІНВЕРТОР НАПРУГИ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ПАРАЛЕЛЬНИЙ, ПОСЛІДОВНИЙ, КОМБІНОВАНИЙ АКТИВНИЙ ФІЛЬТР

					<i>141.620101.001.БР</i>			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Асинхронний електропривод з паралельним активним фільтром у системі живлення <i>РЕФЕРАТ</i>	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Альохін О.О.					6	84
Перевір.		Михальський В.М.						
Н. Контр.		Теряєв В.І.				НТУУ «КПІ», ФЕА		
Затверд.		Пересада С.М.				Кафедра АЕМС-ЕП		

SUMMARY

A diploma project contains: pages - 84, figures - 27, tables - 4 and graphic part on letters of A1.

In this diploma project the review of the problem of active filtration was carried out, the influence of the electric drive on the power supply network was formed, the parallel active filter was modeled and the motor was selected.

The calculation and implementation of this diploma project were provided using the following programs: Microsoft Office Word 2016, Microsoft Office Visio 2013, Mathcad 15.0, MatLab R2009b, MathType 6.9.

ACCESSORIES OF THE VARIABLE STAGE, FREQUENCY CONVERTER, SHIFT-PULSE MODULATION, AUTOMATIC VOLTAGE INVERTER, QUALITY OF ELECTRICITY

					<i>141.620101.001.BP</i>			
	Letter	No of doc.	Sign.	Date				
Devel.	O. Alokhin				"Development of the layout of the electromechanical system of the gantry crane"	L.	Page	Pages
Checked	V. Mikhalsky						7	84
N. Contr.	V. Tervaev					NTUU «KPI», FEA		
Approved.	S. Peresada					Department AEMS-ED		
					Summary			

ЗМІСТ

Висновок.Перелік використаних джерел.	5
ВСТУП	11
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ АКТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ..	13
1.1. Типові технічні рішення активних фільтрів.....	13
1.2. Опис паралельного активного фільтра	21
1.3 Силовий паралельний активний фільтр як засіб формування вхідного синусоїдального струму при нелінійних навантаженнях та несиметрії мережі живлення	27
Висновок до розділу 1	33
2 ФОРМУЛЮВАННЯ ВИМОГ ТА ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ	34
2.1 Формування струмів в системі "мережа живлення з несиметричними напругами – матричний перетворювач з паралельним активним фільтром"....	35
2.2 Загальні принципи використання теорії миттєвої потужності для активної компенсації.	41
2.3 Визначення умов доцільного застосування активної фільтрації	45
Висновок до розділу 2	50
3 ПАРАЛЕЛЬНИЙ АКТИВНИЙ ФІЛЬТР ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.	51
3.1 Аналіз впливу електроприводів змінного струму на мережу живлення.	51
3.2 Моделювання активного фільтра в програмному середовищі MatLab .	55
Висновок до розділу 3	60

4 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА	61
4.1.Енергосиловий розрахунок параметрів	61
4.2 Розрахунок номінальних даних двигуна	62
4.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення	63
Висновок до розділу 4	67
5 ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ.....	68
Висновок до розділу 5	72
6 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ТА СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ ЗАДАНОЇ ТРАЄКТОРІЇ ШВИДКОСТІ ТА ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ	73
Висновок до розділу 6	77
ВИСНОВОК	78
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун

АІН – автономний інвертор напруги

МП – матричний перетворювач

ПЧ – перетворювач частоти і напруги

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

АФЕ – активний фільтр електроенергії

ПАФЕ – паралельний активний фільтр електроенергії

THD – Total harmonic distortion або сумарний коефіцієнт гармонійних складових

ВСТУП

Поряд зі збільшенням попиту на поліпшення якості електроенергії, найпопулярнішою технікою, яка застосовується, є фільтр активної потужності це тому, що він може легко усунути небажані гармоніки, покращити коефіцієнт потужності та подолати спотворення напруги.

Основні принципи роботи активних фільтрів та їх структурні схеми відомі з кінця минулого століття, коли перед розробниками пристроїв силової електроніки постали проблеми гармонічних спотворень в мережі живлення. Сучасні активні фільтри кращі за ефективністю фільтрації, мають менші розміри та вагу і більш гнучкі в застосуванні в порівнянні з пасивними фільтрами.

Силовий активний фільтр - це перетворювач змінного / постійного струму з ємнісним або індуктивним накопичувачем електричної енергії на стороні постійного струму, який методами ШІМ формує усереднене значення струму (напруги), рівне різниці струму або напруги нелінійного навантаження і синусоїдального струму(напруги) його основної гармоніки. Ідея активної фільтрації розглядається в роботах не тільки зарубіжних, а й вітчизняних вчених. Аналіз даних робіт показує, що активна фільтрація є новим і перспективним напрямком розвитку напівпровідникової перетворювальної техніки та дозволяє поліпшити якість електроенергії у вузлах навантажень.

Основні переваги активних фільтрів гармонік у порівнянні з іншими пристроями полягають у наступному:

- фільтри ефективно працюють в режимі реального часу;
- можлива одночасна компенсація декількох (або і всіх) вищих гармонік, що істотно поліпшує масогабаритні показники апаратури;
- можливо повністю компенсувати вищі гармоніки напруги або струму незалежно від амплітуд і початкових фаз гармонік;

- можливо нарощувати потужності компенсації до необхідного рівня за рахунок паралельного підключення ідентичних активних фільтрів;
- відсутність резонансу на будь-яких частотах;
- відсутність необхідності в додаткових налаштуваннях фільтра.

В останні роки до підвищення якості електроенергії приділяють особливу увагу, тому що якість може впливати на витрату електроенергії, на технологічний процес, на термін служби електротехнічного обладнання.

Маловивченими питаннями щодо АФК є:

- динаміка активних фільтрів-компенсаторів;
- статика спільно з електроприводами змінного струму.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ АКТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

1.1. Типові технічні рішення активних фільтрів

Ідеї активного фільтра електроенергії (АФЕ) і основні принципи активної фільтрації нелінійних спотворень були сформульовані ще в 70-х роках ХХ-го століття [7]. Однак, через недостатній розвиток керованих ключів, їх високу вартість і недостатнього рівня мікропроцесорних технологій того часу, не було практичної можливості реалізації АФЕ [3, 4]. З розвитком напівпровідникової техніки і появою DSP мікроконтролерів, швидкодіючих IGBT і MOSFET транзисторів, а також датчиків струму і напруги на основі ефекту Холла, з'явилася можливість практичної реалізації АФЕ [8 - 16].

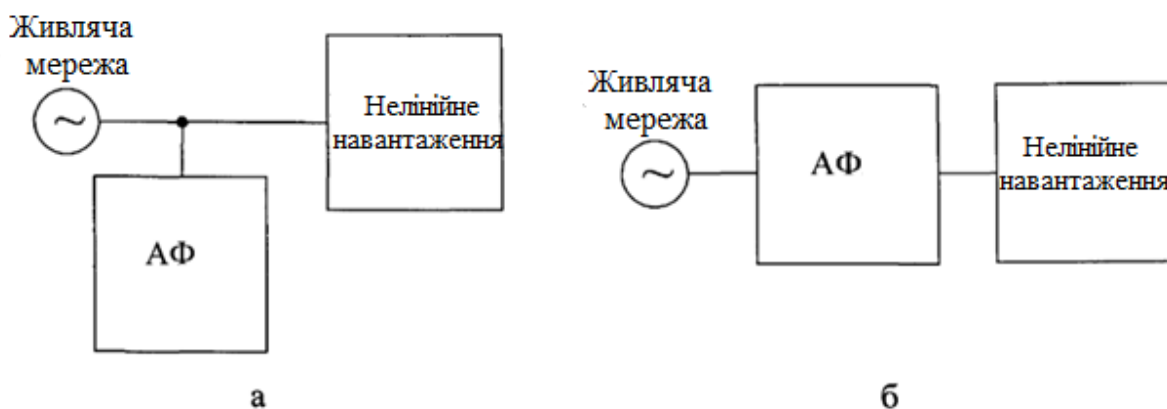


Рисунок 1.1 – Структурна схема: а) ПАФЕ; б) послідовного АФЕ

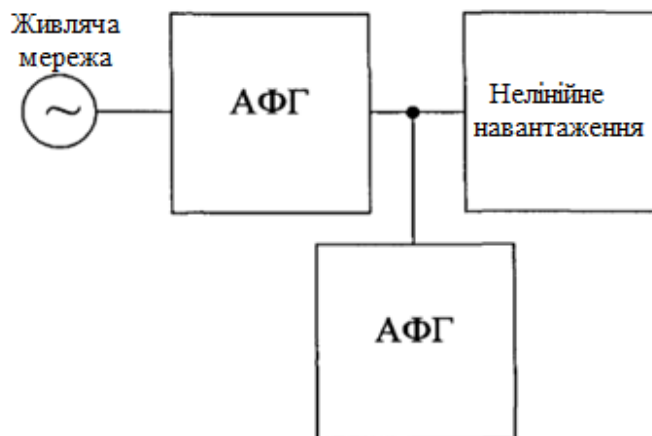


Рисунок 1.2 – Структурна схема паралельно-послідовного АФЕ

Основними елементами АФЕ є автономний інвертор (струму або напруги), накопичувач електричної енергії (ємність або індуктивність) і система управління [20, 21]. На відміну від пасивних фільтрів, АФЕ дозволяють компенсувати практично повний спектр гармонійних складових і реактивну потужність, споживану з мережі електропостачання, видаючи її в мережу лише в ті моменти часу, коли це необхідно, виключають резонансні явища в мережі електропостачання, дозволяють зробити балансування несиметрії навантаження, а так само сприяють зменшенню флікера. Таким чином, АФЕ дозволяють позбутися від усіх недоліків пасивних фільтрів гармонік і є найбільш ефективними і перспективними комплексними фільтрокомпенсуючими пристроями [20]. В процесі розвитку АФЕ були розроблені чотири основні структури АФЕ: паралельні, послідовні, паралельно-послідовні АФЕ і гібридні (пасивно-активні) ФЕ.

Паралельний АФЕ (ПАФЕ) є регульованим джерелом струму і використовується для компенсації гармонійних складових струмів, споживаних нелінійними споживачами електроенергії [15]. Такий АФЕ підключається паралельно нелінійному споживачеві і формує на виході інвертора миттєвий струм, рівний по величині і амплітуді миттєвому сумарному струму нелінійних

спотворень, споживаному з мережі нелінійним споживачем електроенергії, але протилежний йому по фазі. У результаті роботи ПАФЕ відбувається практично повна компенсація всього спектру гармонійних складових струму, споживаних нелінійним споживачем електроенергії з мережі електропостачання і результуючий струм, споживаний системою «ПАФЕ - нелінійний споживач електроенергії» матиме форму, максимально наближену до синусоїдальної. Крім компенсації гармонійних складових струму, ПАФЕ здійснює також компенсацію реактивної потужності, споживаної нелінійним навантаженням з мережі електропостачання. Таким чином, ПАФЕ являє собою пристрій для захисту мережі живлення від негативного впливу нелінійних споживачів електроенергії. Структурна схема ПАФЕ представлена на рисунку 1.1а.

Послідовний АФЕ є регульований джерело напруги і компенсує нелінійні спотворення напруги, а також коливання, провали, флікери, скачки і несиметрію напруги на вході споживачів електроенергії [15, 16]. Такий АФЕ підключається послідовно зі споживачем електроенергії і формує на виході інвертора миттєву напругу, рівну по амплітуді спотворень вхідної напруги, але протилежне йому по фазі. Ці миттєві компенсуючі напруги впливають на вхідну напругу споживача електроенергії за допомогою трансформатора і компенсують спотворення вхідної напруги споживача електроенергії. В результаті такої компенсації на вхід споживача електроенергії надходить синусоїдальна напруга. Таким чином, послідовний АФЕ являє собою пристрій для захисту споживачів електроенергії від неякісного напруги в мережі живлення. Істотною перевагою послідовного активного фільтра є виправлення спотвореної форми напруги незалежно від природи виникнення спотворень. Структурна схема послідовного АФЕ представлена на малюнку 1.1 б.

Комбінований (послідовно-паралельний) активний фільтр, який зображений на рисунку 1.2, являє собою суміш паралельного і послідовного АФЕ

і є найперспективнішим напрямом у розвитку напівпровідникових пристроїв, що компенсують [15, 16].

Комбінований АФЕ підключається в близькості від споживача і забезпечує в якість струмів мережі і регулювання реактивної потужності.

Послідовна частина містить узгоджувальний трансформатор, який функціонує як в інверторному, так і випрямному режимах. Вихідний ланцюг з широтно-імпульсною модуляцією містить пасивний фільтр у вигляді LC ланцюгів, які служать для зменшення високочастотних пульсацій.

Паралельна частина представлена пристроєм, який виконує функції паралельного АФЕ, але головна відмінність - в її склад входить кілька безконтактних вимикачів, які забезпечують часткове або повне відключення навантаження.

Комбінований АФЕ може працювати в декількох режимах роботи:

- компенсаційний режим. Напруга в межах норми, безконтактні ключі замкнуті, і послідовний і паралельний АФЕ працюють в режимах трифазного джерела напруги і струму;
- режим резервного джерела. Напруга за межами норми, ключі розімкнуті, мережа відключена, навантаження живиться від паралельного АФЕ, який завдяки накопиченій електромагнітній енергії виступає як джерело синусоїдальної напруги.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки АФЕ

Вид АФ	Переваги	Недоліки
Паралельний	Можливість одночасної фільтрації декількох вищих гармонік; Ефективне придушення мультигармонічних складових незалежно від типу навантаження.	Через імпульсний режим АІН з'являються додаткові високочастотні гармоніки.
Послідовний		
Комбінований	Робота в кількох режимах; Ефективне придушення мультигармонічних складових незалежно від типу навантаження.	Силова частина вибирається на високі значення потужності, що перевищують параметри навантаження; Споживані струми мають негармонічну форму якщо напруга мережі спотворюється.

Головною перевагою активного мережного фільтра перед усіма іншими компенсуючими пристроями є його висока швидкодія, що досягає значень 0,5-1,0 мс.

Більш перспективним, з урахуванням швидкодіючих вентильних компенсаторів, створених на IGBT- транзисторах, є управління, що забезпечує компенсацію не тільки потужності спотворення, а й реактивної потужності, тобто компенсацію пасивної потужності. Іншими словами, управління повинно здійснюватися так, щоб сумарний струм, споживаний з мережі, наближався до оптимального, тобто щоб струм був синусоїдальним і мав заданий кут зсуву φ щодо напруги. При цьому постійна напруга на виході має підтримуватися стабільно.

Пристрої, які можуть компенсувати пасивну потужність, називаються активними фільтрами-компенсаторами (АФК).

Компенсація пасивної потужності - відмінна риса між активним фільтром-компенсатором і активним мережевим фільтром.

Основним недоліком АФК є велика потужність компенсації, отже, необхідна побудова пристрою на велику потужність, яка порівняна з активною потужністю всіх навантажень змінного струму.

Рисунок 1.3 ілюструє, яким повинен бути струм АФК I_k , щоб при споживанні усіма навантаженнями несинусоїдального струму I_n , зсунутого щодо напруги на кут $\varphi > 0$, з мережі споживався синусоїдальний струм I_s , передає необхідну активну потужність і зсунутий щодо напруги мережі U_s на кут $\varphi = 0$

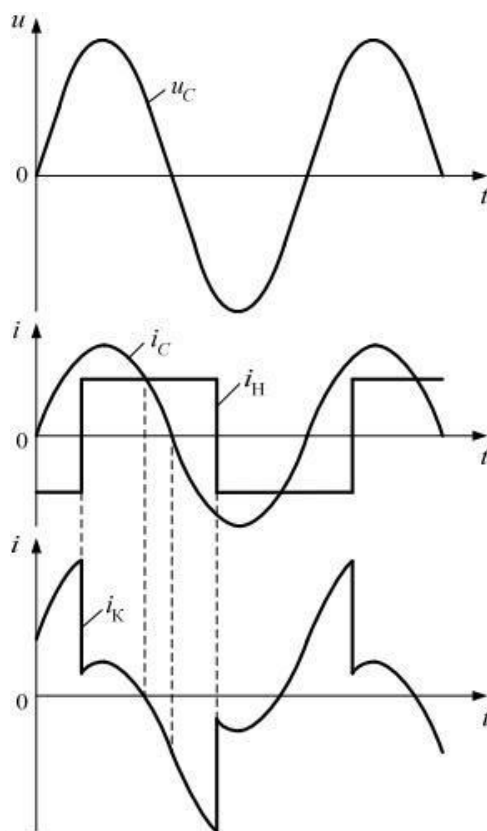


Рисунок 1.3 – Пояснення до принципу роботи активного фільтра-компенсатора

З вищесказаного випливає, що активні фільтри-компенсатори забезпечують автоматичне підлаштування до всіх змін навантаження таким чином, щоб з мережі споживався синусоїдальний струм, що співпадає по фазі з напругою мережі. Сьогодні активні фільтри-компенсатори широко застосовуються в таких країнах, як США, Японія, Південна Корея.

Найактуальнішим і маловивченим напрямком у розвитку компенсуючих пристроїв є активний фільтр-компенсатор. Він поєднує в собі всі переваги АСФ, а також здатний компенсувати пасивну потужність. На сучасному виробництві регульовані електроприводи змінного і постійного струму виконують безліч функцій і вирішують не один десяток завдань. Потужність перетворювачів

частоти і тиристорних перетворювачів на виробництві сягає кількох МВт, тому компенсація пасивної потужності в сучасному світі - головне завдання.

Гібридний, пасивно-активний фільтр електроенергії (ФЕ) являє собою комбінацію пасивного і активного ФЕ [13, 14]. Оскільки АФЕ мають значну встановлену потужність, порівняну з потужністю споживача електроенергії, то вартість АФЕ в разі самотійного застосування досить велика. Застосування гібридних фільтрів дає можливість знизити потужність і вартість як пасивних, так і активних ФЕ в порівнянні з випадками їх окремого застосування, при цьому зберігаються переваги даних фільтрів. Принцип роботи гібридного ФЕ полягає в тому, що пасивний фільтр може бути налаштований на компенсацію однієї або декількох певних гармонік струму, споживаного нелінійним споживачем електроенергії, а АФЕ може бути використаний або як компенсатор решти спектру гармонік струму (ПАФЕ), або в якості компенсатора спотворень напруги живлення (послідовний АФЕ). Структурна схема гібридного ФЕ представлена на рисунку 1.4.

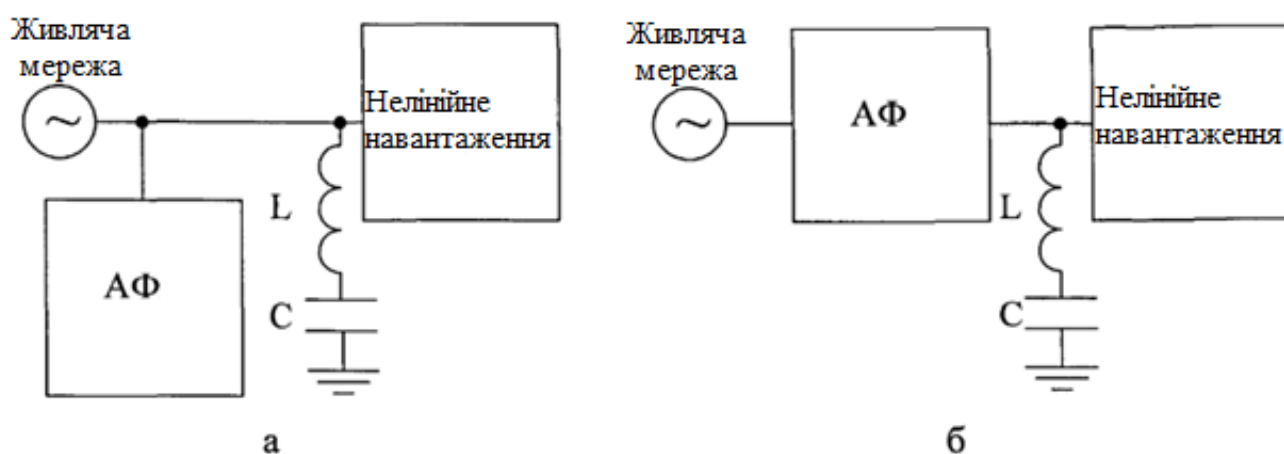


Рисунок 1.4 – Структурна схема гібридного пасивно-активного ФЕ:

а) - паралельного; б) - послідовного

Оскільки розглянуті типи АФЕ є усталеними і загальноприйнятими, то основна частка проведених у цей час досліджень і розробок в області АФЕ спрямовані на удосконалення існуючих систем та алгоритмів управління АФЕ, аналіз взаємодії АФЕ з нелінійними споживачами електроенергії в різних режимах роботи, підвищення ефективності та швидкодії АФЕ, зниження собівартості АФЕ. В результаті розвитку АФЕ, у багатьох зарубіжних країнах АФЕ стали основним засобом компенсації нелінійних спотворень струму і напруги і, в даний час, проводяться такими великими закордонними компаніями, як Danfoss, ABB, Schneider Electric [10 - 12]. В даний час реалізовані вітчизняні розробки АФЕ від компаній: «Славенерго», «ЗАТ Електрон», «Матик-Електро». АФЕ використовуються як для активної компенсації гармонійних складових струму, так і напруги. Однак, оскільки нелінійні спотворення струму є першопричиною нелінійних спотворень напруги в мережі живлення, то доцільно впливати на джерело нелінійних спотворень напруги, усуваючи нелінійні спотворення струмів нелінійних споживачів електроенергії за допомогою ПАФЕ.

1.2. Опис паралельного активного фільтра

На рис. 1.5 представлена схема паралельного активного фільтра в однофазному варіанті, ємнісний накопичувач якого підключений паралельно до мережі. Така схема зазвичай використовується для компенсації спотворень струмів, викликаних нелінійним навантаженням. Для підвищення ефективності фільтрації активний фільтр підключається безпосередньо до шин навантаження. При відсутності активного фільтра спотворений струм навантаження викликає падіння напруги на вихідному опорі мережі. В результаті напруга на шинах різних споживачів стає несинусоїдальною. Для усунення цього явища або зменшення ступеня спотворення струму споживачів активний фільтр, підключений до шин нелінійного навантаження, створює струм $i_{\text{АФ}}$, який в сумі зі спотвореним струмом навантаження i_n забезпечує споживання з мережі

близького до синусоїдального струму, рівного струму основної гармоніки навантаження.

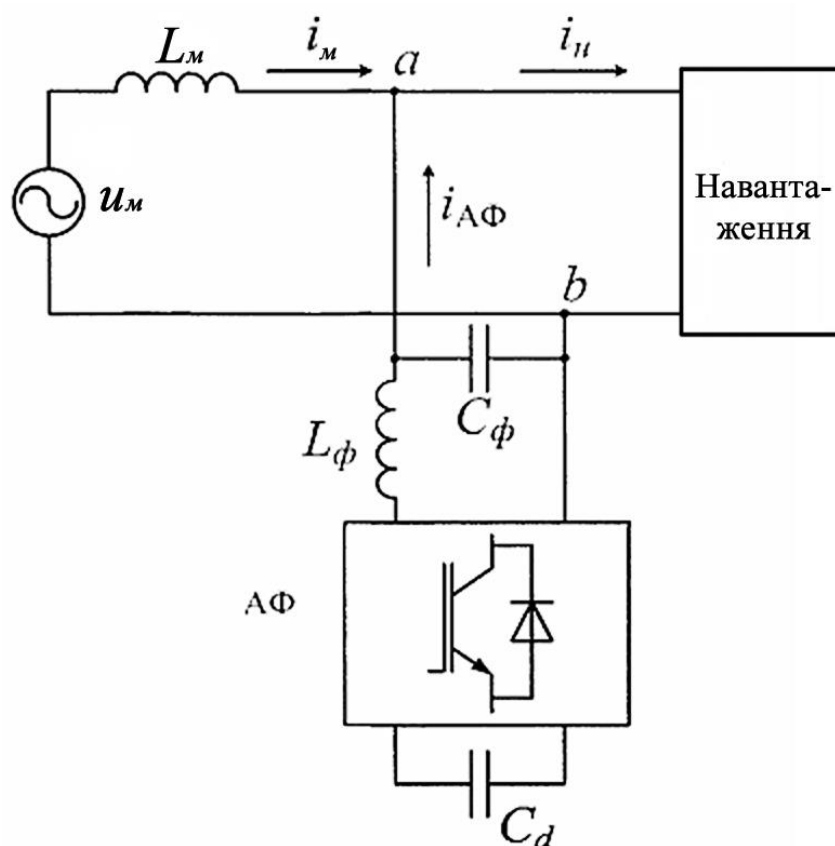


Рисунок 1.5 – Паралельний активний фільтр

Одночасно з функцією фільтрації вищих гармонічних складових струму активний фільтр може компенсувати реактивну потужність основної гармоніки струму нелінійного споживача. При цьому необхідно враховувати, що максимальне значення потужності активного фільтра буде визначатися максимальними значеннями суми струму компенсації та фільтрованого струму.

Складним і не менш важливим є завдання розробки системи керування активним фільтром гармонік у режимі несиметрії навантаження. У цьому випадку активний фільтр повинен перерозподіляти активні потужності фаз і симетрувати струми, споживані з мережі живлення.

Розглянемо більш детально можливості компенсації паралельним активним фільтром неактивних складових, які можуть бути викликані як несиметрією мережі живлення, (створену в тому числі і іншими навантаженнями), так і несиметрією навантаження. Трифазну конфігурацію паралельного АФ приведено на рис.1.6. Компенсатор під'єднується безпосередньо в точках підключення навантаження через індуктивність L_m з напругою u_n . C_ϕ – конденсатор для фільтрації пульсацій струму активного фільтра i_ϕ , u_m , i_m – напруга і струм мережі живлення з вихідним імпедансом Z_m , i_n – струм навантаження.

Трифазну мережу живлення та навантаження будемо відповідно вважати симетричними, якщо амплітуди фазних напруг, струмів та кути зсуву між їхніми фазами рівні між собою ($2\pi/3$ для трьохфазної мережі). Для АФ, підключеного паралельно навантаженню, існує два види розбалансу мережі живлення: викликане несиметрією навантаження та самим джерелом.

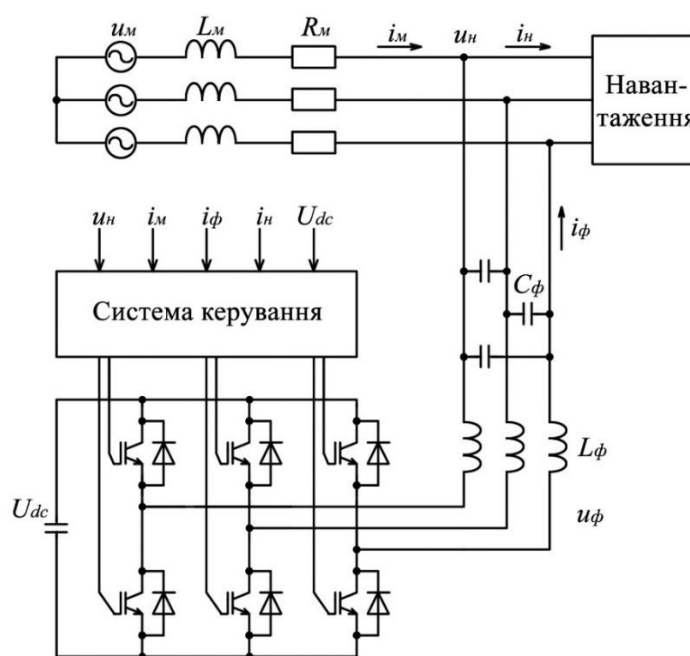


Рисунок 1.6. – Схема підключення паралельного АФ до трифазної мережі живлення

В залежності від обраної стратегії керування паралельний активний фільтр дозволяє компенсувати спотворення вхідного струму чи напруги в точках підключення навантаження, а також при обраній стратегії «керування струмом», забезпечити значення $\cos \varphi$ близьким до одиниці [13].

Таблиця 1.2 Можливості паралельного компенсатора при несиметрії, створеній мережею живлення чи навантаженням.

Стратегія керування	Результат компенсації	Несиметрія навантаження	Несиметрія мережі	
Керування напругою	i_M	так; $\cos \varphi \neq 1$	ні; $\cos \varphi \neq 1$	
	u_n	так; регулюється	так; регулюється	
Керування струмом	i_M	так; $\cos \varphi = 1$	так; $\cos \varphi = 1$	
	u_n	так; не регулюється	ні; не регулюється	
Комбіноване керування	i_M	так; $\cos \varphi \neq 1$	так; $\cos \varphi \neq 1$	ні; $\cos \varphi \neq 1$
	u_n	так; регулюється	ні; регулюється	так; регулюється

Наприклад, стратегія «керування струмом» паралельним активним фільтром може забезпечити синусоїдальні симетричні вхідні струми, споживані

з мережі навантаженням, та $\cos \varphi = 1$ при несиметрії навантаження та несиметрії мережі живлення, а також компенсацію напруги на навантаженні при його несиметрії. Компенсація ж напруги на навантаженні при несиметрії мережі живлення неможлива. І навпаки, стратегія «керування напругою» дозволяє стабілізувати напругу на навантаженні як при несиметрії навантаження, так і несиметрії мережі живлення.

Більшість ПАФЕ, що розробляються і що застосовуються в даний час, складаються з АІН на повністю керованих силових ключах (IGBT транзисторах), синхронізуючого індуктивності, конденсаторної батареї і системи управління з датчиками струму і напруги (рисунок 1.7). Конденсаторна батарея призначена для накопичення енергії в ланці постійного струму АІН ПАФЕ. Синхронізуюча індуктивність є проміжною ланкою між напругою мережі і напругою на виході АІН ПАФЕ. Різниця між миттєвою напругою мережі і миттєвою напругою на виході АІН ПАФЕ прикладається до синхронізуючої індуктивності, оберігаючи транзистори АІН ПАФЕ від перенапруг. Крім того, синхронізуюча індуктивність створює ЕРС самоіндукції при перемиканні ключів АІН ПАФЕ, за рахунок якої забезпечується заряд конденсаторної батареї ланки постійного струму АІН ПАФЕ до напруги вищої, ніж середньовипрямлена напруга мостового випрямляча.

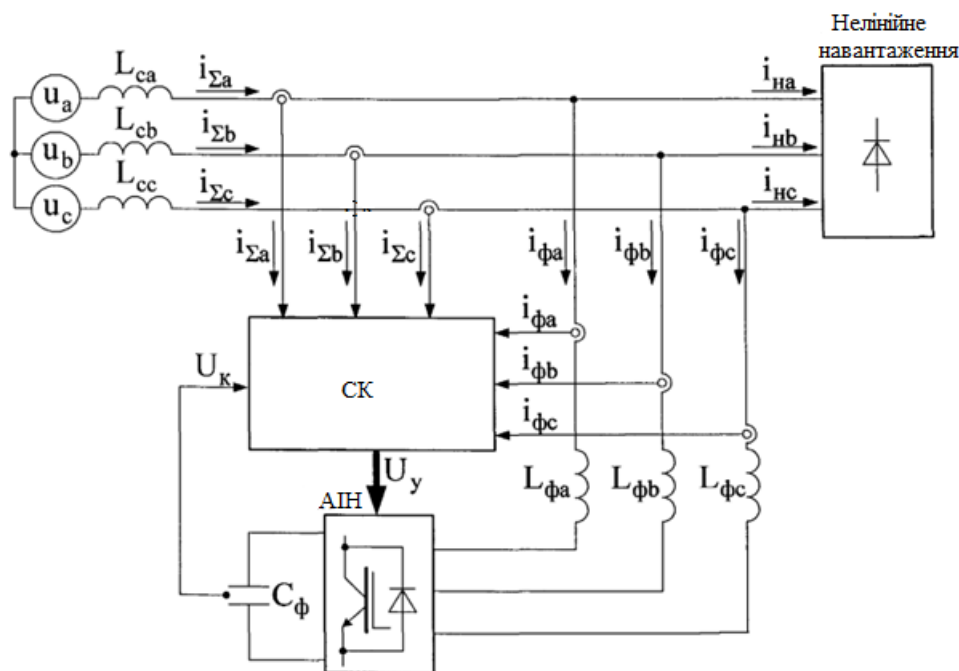


Рисунок 1.7 – Принципова схема класичного ПАФЕ

Існуючі методи управління ПАФЕ підрозділяються на тимчасові і частотні. Методи управління тимчасового типу не вимагають великих ресурсів обчислювальних потужностей, що дозволяє спростити систему управління і отримати високу швидкодію, однак, вони не дозволяють досягти високої точності відпрацювання завдання і не забезпечують коректне управління при несинусоїдальності напруги мережі живлення. Методи частотної корекції дозволяють здійснити розрахунок необхідних компенсуючих величин з високою точністю, проте через великі обсяги обчислень в таких методах існує запізнювання не менше одного періоду частоти мережі. Система управління більшості розроблених ПАФЕ заснована на контролі енергії в конденсаторної батареї ПАФЕ і тимчасових методах управління. При цьому недоліками методу контролю напруги на накопичувальному конденсаторі АІН ПАФЕ є необхідність використання згладжуючих фільтрів для усунення пульсацій сигналу напруги на накопичувальному конденсаторі АІН ПАФЕ, що викликаються активними втратами в АІН ПАФЕ і потужністю спотворень нелінійного навантаження, і

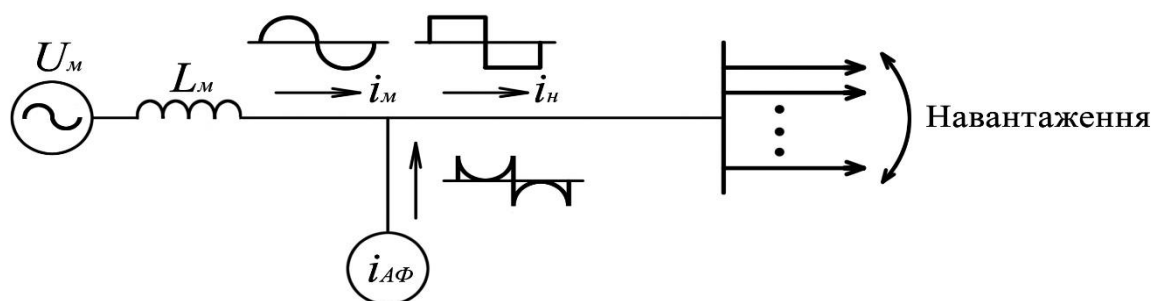
виникнення резонансних коливань, обумовлених взаємодією накопичувального конденсатора АІН ПАФЕ з сумарною індуктивністю, яка визначається індуктивністю мережі живлення і синхронізуючою індуктивністю ПАФЕ. Крім того, даним системам управління притаманні недоліки, пов'язані з тимчасовими методами управління ПАФЕ.

1.3 Силовий паралельний активний фільтр як засіб формування вхідного синусоїдального струму при нелінійних навантаженнях та несиметрії мережі живлення

Залежно від схеми і принципів керування активні фільтри прийнято класифікувати на джерела струму та джерела напруги. На рис. 1.11 наведені спрощені схеми включення активних фільтрів в якості джерела напруги (послідовний активний фільтр) і джерела струму (паралельний активний фільтр). Для забезпечення синусоїдальності кривої напруги на шинах навантаження послідовно з джерелом живлення включається активний фільтр гармонік у вигляді еквівалентного джерела напруги, (рис.1.8 а), а для забезпечення фільтрації несинусоїдального струму, створюваного нелінійним навантаженням, використовуються активні фільтри, що формують несинусоїдальний струм, рівний різниці фільтрованого струму і струму його основної гармоніки. Зазвичай такий активний фільтр підключається паралельно до нелінійного навантаження. При цьому місце підключення активного фільтра гармонік вибирається з умови його максимальній близькості до шин навантаження (рис.1.8 б) [13].



а



б

Рисунок 1.8 – Схеми підключення активного фільтра: (а) - послідовне підключення; (б)- паралельне підключення

Оскільки в роботі основна увага приділяється забезпеченню в першу чергу якості вхідного струму, споживаного з мережі живлення, то надалі мова буде йти про паралельні активні фільтри, які також називають „активними фільтрами потужності”, «активними кондиціонерами якості електроенергії» тощо.

З урахуванням прийнятого допущення про відсутність втрат потужності в активному фільтрі можна записати:

$$\begin{cases} i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \sin(n\omega t - \varphi_{in}); \\ i_{A\phi}(t) = \sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{mn} \sin(n\omega t - \varphi_{in}); \\ i_m(t) = i_n(t) - i_{A\phi}(t) = I_{m1} \sin(\omega t - \varphi_{i1}); \\ P_{A\phi} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{mn} \sin(n\omega t - \varphi_{in}) \right] U_{m1} \sin(\omega t - \varphi_{i1}) dt = 0. \end{cases} \quad (1.1)$$

В виразі (1.1): i_n – струм навантаження, $i_{A\phi}$ – струм активного фільтра, i_m – струм мережі, $P_{A\phi}$ – активна потужність, споживана активним фільтром, n – номер гармонічної складової струму та напруги, I_{mn} , U_{mn} – амплітуди n -ої гармонічної складової струму та напруги відповідно, φ_{in} – фазовий зсув n -ої гармонічної складової струму по відношенню до напруги.

Згідно з виразом (1.1) паралельний активний фільтр, який працює в режимі формування компенсуючого струму навантаження, не впливає на баланс активної потужності в системі „джерело живлення – навантаження”, але, на відміну від послідовного активного фільтра, обмін потужністю спотворення відбувається між нелінійним навантаженням і паралельним активним фільтром гармонік.

Одночасно з функцією фільтрації вищих гармонічних складових струму і напруги, активний фільтр може компенсувати реактивну потужність основної гармоніки струму нелінійного споживача. При цьому необхідно враховувати, що максимальне значення потужності активного фільтра буде визначатися максимальними значеннями суми струмів компенсації та навантаження.

Найбільше практичне застосування отримали схеми активних фільтрів гармонік з ємнісним накопичувачем завдяки їх більш високій швидкодії і кращим техніко-економічними показниками. Нижче на рис.1.9 наведено структурну схему паралельного активного фільтра з системою керування. На рис.1.10 введено наступні позначення: U_a мережі, U_b мережі, U_c мережі і $U_{a\phi}$, $U_{b\phi}$, $U_{c\phi}$ – фазні

напруги мережі живлення та вихідні напруги активного фільтра, i_ϕ – струм активного фільтра, C_d - конденсатор фільтра.

Коротко, для прикладу, розглянемо один з можливих алгоритмів керування для такої схеми. На початку роботи проводиться вимірювання миттєвих значень струмів навантаження та напруг мережі живлення в момент часу t . Отримані дані в трифазній системі координат перетворюються в систему координат, яка максимально відповідає поставленому перед активним фільтром завданню (компенсація складових реактивної або активної потужності, компенсація складових нульової послідовності, вибіркова компенсація вищих гармонік струму та інше). В залежності від необхідності це можуть бути вже відомі α, β, o , dqo , pqr , або інші координатні системи, що дозволять максимально спростити необхідні математичні обчислення для забезпечення роботи системи керування. Наступним кроком є обрахування сигналу завдання, що являє собою різницю між ідеальною (заданою) синусоїдою та струмом навантаження в вибраній системі координат [13].

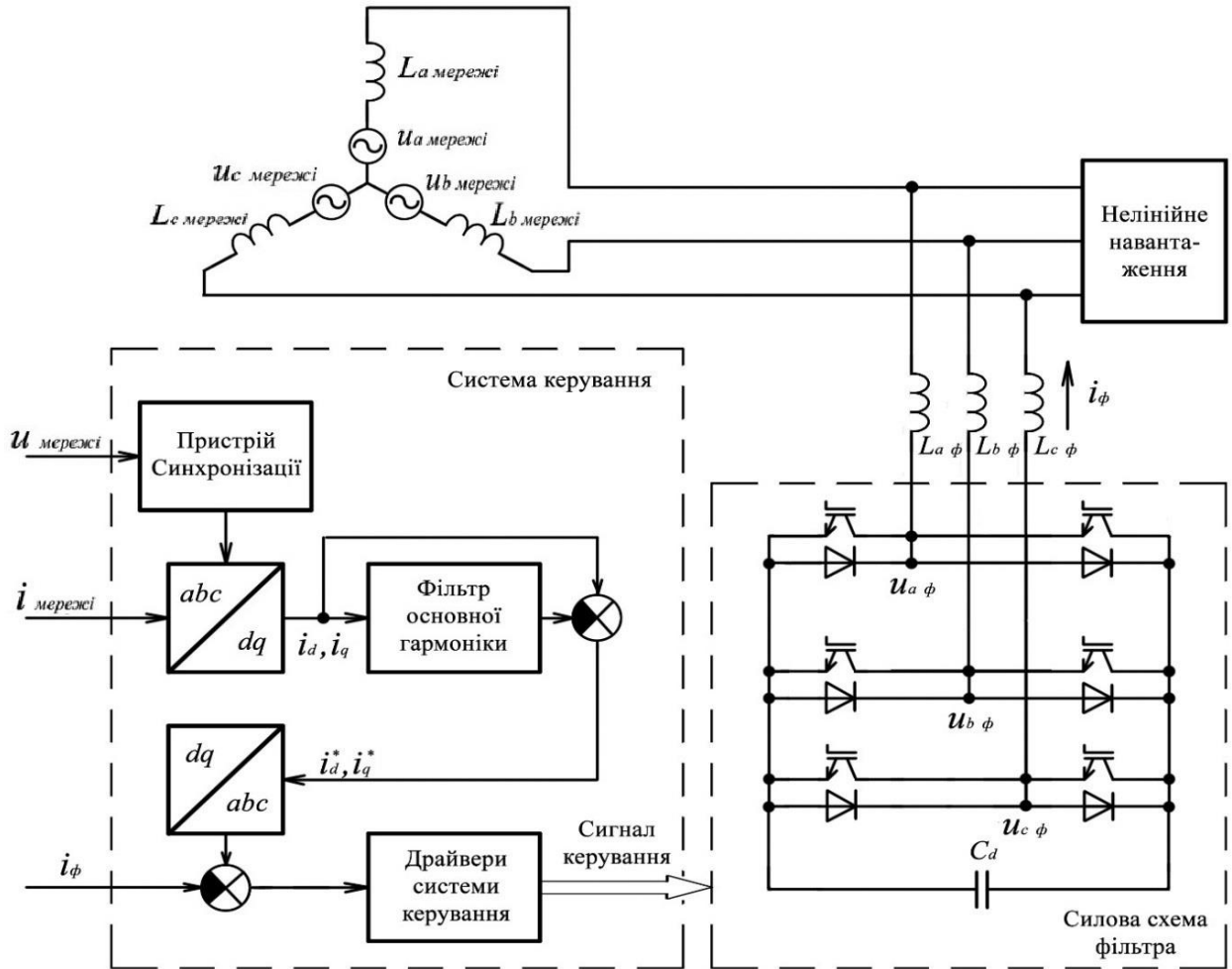


Рисунок 1.9 – Структурна схема силового паралельного активного фільтра

На основі отриманого сигналу завдання після зворотного перетворення координат отримуємо керуючий ШІМ сигнал в векторній формі, під дією якого силова частина активного фільтра шляхом комутації силових ключів задає струм активного фільтра i_ϕ , який „дзеркально” відображає спотворюючий струм нелінійного навантаження. На кінцевому етапі струм фільтра i_ϕ з затримкою Δt , обумовленою часом, затраченим системою керування на обчислення та роботу силових ключів, сумується зі струмом мережі (в момент часу $t + \Delta t$). В результаті відбувається компенсація вищих гармонік з невеликою похибкою. Ця похибка тим менша, чим вища швидкість обробки даних вимірювання (тобто можливості

контролера системи керування). Далі система повторює цикл заново. Алгоритм роботи такої системи керування приведено на рис.1.10.



Рисунок 1.10 – Алгоритм роботи системи керування активним фільтром

Відтак, якщо спростити повний цикл обчислень шляхом отримання прямих співвідношень для значень координат векторів струмів, напруг та реактивних потужностей у відомих системах координат та розглянути ймовірні нові, більш ефективні системи координат, можна зменшити трудомісткість та збільшити швидкість обчислень при роботі системи керування, що в свою чергу, дасть можливість підвищити якість фільтрації за допомогою активних силових фільтрів.

Втрати в силових кабелях чотирьохпровідних трифазних мереж живлення призводять до додаткових спотворень напруги в точках під'єднання нелінійних навантажень і, як наслідок, струму, що споживається цими навантаженнями. Розробка системи керування паралельними активними фільтрами для таких мереж з забезпеченням мінімізації потужності втрат в цих кабелях дозволить

підвищити як енергетичні показники системи живлення, так і покращити гармонічний склад згаданих струму та напруги [12].

Висновок до розділу 1

У даному розділі було зроблено аналітичний огляд активних фільтрів, опис паралельного активного фільтра та розгляд силового паралельного активного фільтра, як засоб формування вхідного синусоїдального струму при нелінійних навантаженнях та несиметрії мережі живлення. Були описані типові технічні рішення активних фільтрів, наведені структурні схеми послідовного, паралельного, послідовно-паралельного фільтрів та гібридно пасивно-активного ФЕ. Також показано схеми підключення фільтра, наведено структурну схему силового ПАФ та алгоритм роботи системи керування АФ.

2 ФОРМУЛЮВАННЯ ВИМОГ ТА ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ

За своєю структурою активний фільтр гармонік складається з силової частини та системи керування. Силова частина традиційно представляє собою трифазний міст, побудований на IGBT-транзисторах або інших повністю керованих елементах (аналогічно АІН). Що стосується системи керування, то в даний час використовують декілька основних принципів керування активними фільтрами гармонік:

- релейний, який використовує два канали управління: перший канал формує сигнал фільтрації, використовуючи виділення першої гармоніки з сигналу струму і потім її віднімання від сигналу повного струму, другий канал забезпечує заряд накопичувального елемента фільтра (конденсатора), формуючи постійну складову струму, пропорційну за амплітудою до втрат у силовій схемі активного фільтра гармонік; сигнали обох каналів додаються і надходять на релейний модулятор;
- керування на основі використання сучасних теорій миттєвої потужності, в основі яких лежить поділ активної і реактивної складових потужності; при цьому струм компенсації, який формується активним фільтром, визначається змінними складовими миттєвих активної та реактивної потужності; до таких теорій, в першу чергу, відносяться $p-q$ та удосконалена $p-q$ теорії, крос-векторна (узагальнена) та $p-q-r$ теорії миттєвої потужності; основні відмінності згаданих теорій миттєвої потужності обумовлені їх ефективністю при компенсації струму в чотирьохпроводній трифазній мережі живлення, коли напруга живлення несиметрична та спотворена; в першу чергу це стосується крос-векторної теорії, яка не дозволяє забезпечити повну компенсацію струму нульового проводу та повне симетрування фазних струмів [39];

- частотні принципи, основою яких служить математичний апарат спектрального аналізу, головним чином дискретне перетворення Фур'є (ДПФ); вихідний струм активного фільтра формується шляхом отримання ДПФ зображення струму навантаження в частотному діапазоні (в кожній фазі окремо); після цього проводиться корекція вектора першої гармоніки та забезпечення балансу потужності, як і при використанні методів теорії миттєвої потужності.

Кожен зі згаданих принципів керування активними фільтрами має свої особливості та області застосування, та практично кожен з них, тією чи іншою мірою, при практичній реалізації потребує перетворення координатних систем.

2.1 Формування струмів в системі "мережа живлення з несиметричними напругами – матричний перетворювач з паралельним активним фільтром"

Одним з найхарактерніших перетворювальних пристроїв, керування якими дозволяє забезпечити електромагнітну сумісність як системи

„перетворювач – навантаження”, так і системи „мережа живлення – перетворювач”, є матричний перетворювач, метою якого є узгодження потреб споживачів з параметрами джерел електроенергії.

В умовах синусоїдальності і симетричності мережі живлення, а також симетричному навантаженні перетворювачем формуються симетричні періодичні системи вихідних напруг і вхідних струмів, у яких, крім основних гармонік, присутні складові із частотами, що вищі від частоти широтно-імпульсної модуляції. Високочастотні складові вхідного струму фільтруються за допомогою малогабаритних LC -фільтрів. Функції ж вихідних фільтрів у більшості випадків виконує саме навантаження, зважаючи на ту обставину, що у всіх випадках в його складі присутня індуктивна складова. Коли система напруг живлення несиметрична і несинусоїдальна, виникають проблеми з формуванням

якісних вихідних напруг і вхідних струмів. В той час, як у перетворювачах з ланкою постійного струму внаслідок наявності енергонакопичуючих силових елементів забезпечується роздільне формування напруг і струмів, матричні перетворювачі набагато чутливіші до будь-яких спотворень напруг мережі живлення. Незважаючи на те, що в МП реалізується принцип інваріантності стосовно вхідної напруги і узгодження процесу перетворення з потребами навантаження, при цьому все ж виникає проблема одночасного формування системи вихідних напруг і квазісинусоїдальних вхідних струмів.

Наряду з формуванням якісних вхідних струмів перетворювачів не менш важливою проблемою є забезпечення нульових фазових зсувів між вхідними фазними напругами і струмами. Вирішення цієї проблеми дозволяє звести до нуля циркуляцію реактивних складових повної потужності в системі „перетворювач – мережа”.

Тому, при таких вимогах, для компенсації спотворень у вхідних струмах доцільно використати паралельний напівпровідниковий компенсатор з накопичувачем енергії, керування яким здійснюється на основі сучасних теорій миттєвих потужностей.

Як універсальний варіант запропоновано комбінацію паралельного та послідовного активних фільтрів використати для матричного перетворювача. Така структура дозволяє мінімізувати вплив як мережі живлення, так і навантаження на якість споживаного з мережі струму та вихідні параметри перетворювача.

Запропонована структурна схема (рис.2.1) складається з двох частин: паралельний активний фільтр на вході МП замінює пасивний високочастотний фільтр та забезпечує високу якість мережі живлення на вході; послідовний активний фільтр забезпечує якісні вихідні параметри МП. Така структура МП з

паралельним та послідовним АФ дозволяє підтримувати необхідні задані параметри на вході та виході МП при трифазній мережі живлення як без нульового, так і з нульовим проводом, забезпечує роботу схеми з довільним коефіцієнтом потужності. Використання можливостей керування МП, розглянутих в розділі 3, для підвищення якості споживаного з мережі струму, в поєднанні з активним фільтром дозволить суттєво зменшити його встановлену потужність до рівня потужності спотворень, що підлягають компенсації.

Оскільки основна увага в роботі зосереджена на забезпеченні сумісності перетворювальних пристроїв з мережею живлення шляхом формування, в першу чергу, синусоїдальних входних струмів, більш детально розглянемо принцип роботи системи керування паралельним активним фільтром.

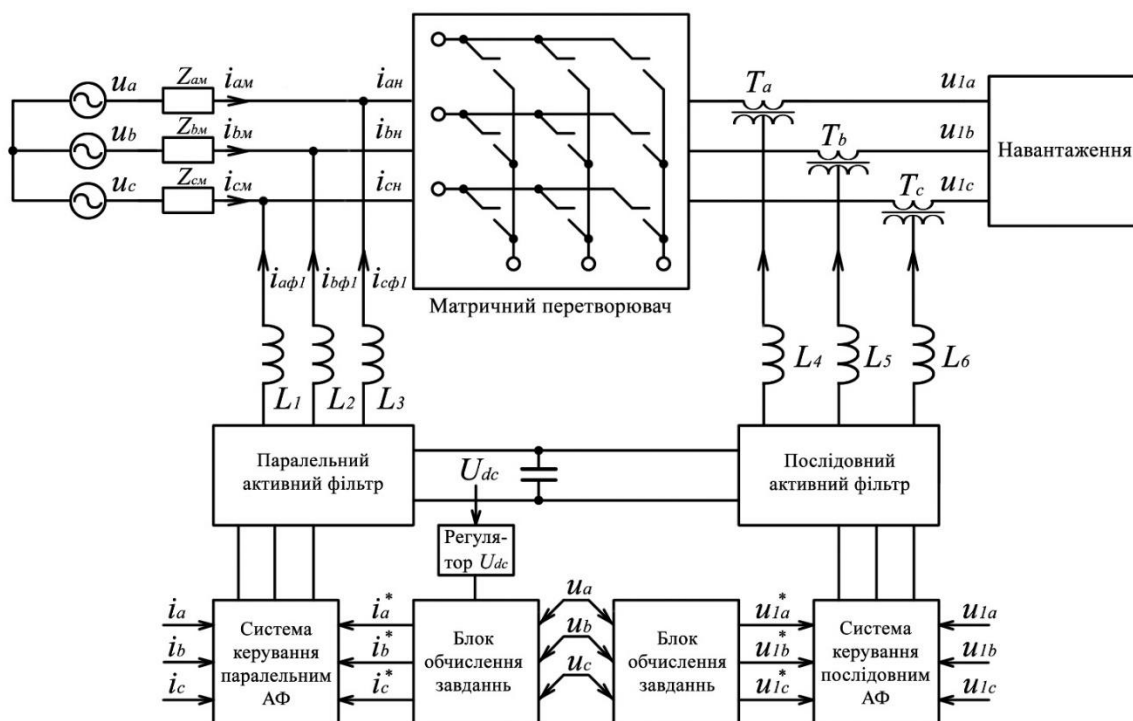


Рисунок 2.1 – Структура МП з паралельним та послідовним АФ для коригування миттєвих струмів і напруг мережі та навантаження

Паралельний АФ може бути використаний як в однофазній, так і трифазній мережі живлення. Фільтр забезпечує компенсацію гармонічних спотворень вхідного струму матричного перетворювача, що можуть бути викликані як самим перетворювачем, так і навантаженням та мережею живлення. Функціональна схема керування паралельним активним фільтром, що базується на застосуванні положень теорії миттєвої потужності в реальному масштабі часу, наведено на рис. 2.2 [39].

Згідно з теорією миттєвої потужності, миттєві значення фазних напруг та струмів трансформуються з abc в $\alpha\beta o$ систему координат відповідно виразам:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ma} \\ u_{mb} \\ u_{mc} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{mc} \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

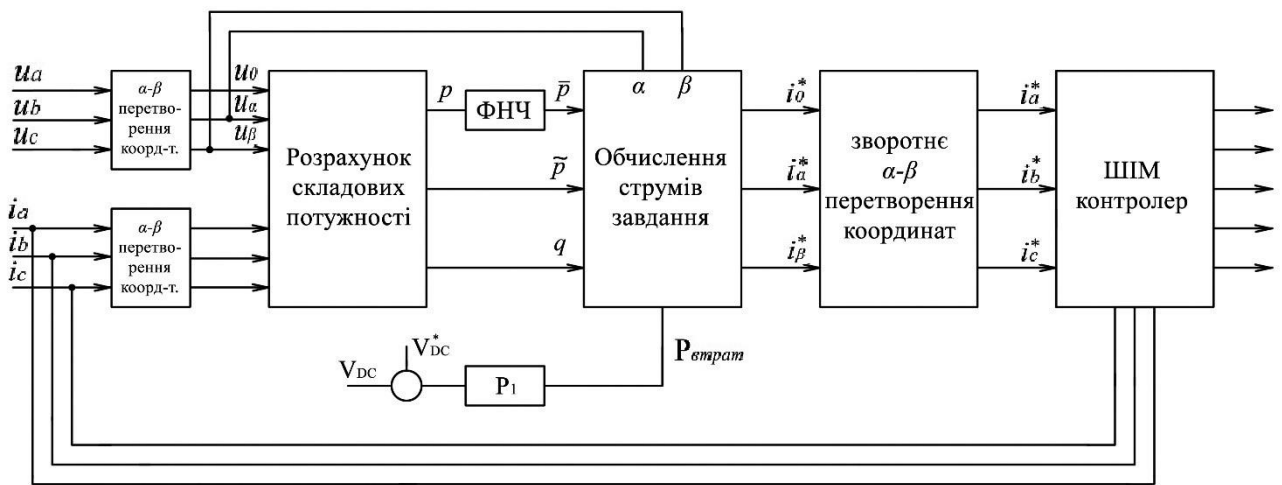


Рисунок 2.2 – Функціональна схема системи керування паралельним АФ для
МП

Наступним кроком є розрахунок активних і реактивних складових потужності відповідно до виразу:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} u_0 & 0 & 0 \\ 0 & u_\alpha & u_\beta \\ 0 & -u_\alpha & u_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}; \quad \begin{aligned} p_0 &= u_0 i_0 \\ p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Миттєва активна і реактивна потужності включають в себе як постійну складову $\bar{p}, \bar{q}$, так і змінну $\tilde{p}, \tilde{q}$. Постійні складові $\bar{p}, \bar{q}$ обчислюються з компонентів p і q навантаження і визначаються прямою послідовністю складових струму навантаження.

Змінні складові активної та реактивної потужності $\tilde{p}, \tilde{q}$ визначаються наявністю вищих гармонік та зворотною послідовністю струму навантаження.

При необхідності компенсації струму в нейтралі значення p_0 (потужність втрат в нульовому проводі) визначається постійною і змінною складовими реактивної потужності відповідно (2.2)

Якщо мова йде про компенсацію вищих гармонік та реактивної потужності, то:

$$\begin{bmatrix} i_{m\alpha}^* \\ i_{m\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} + p_0 + p_{втрat} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

де $i_{m\alpha}^*, i_{m\beta}^*$ – завдання струму для АФ в α, β -координатах.

$p_{втрat}$ – додаткова складова активної потужності, зумовлена втратами в активному фільтрі.

Виконавши зворотне перетворення з системи координат $\alpha\beta$ в abc , отримуємо сигнали завдання для керування ключами АФ, які забезпечують

компенсацію струму в нейтралі, гармонічних спотворень та реактивних струмів навантаження, в залежності від складових потужності, обраних для компенсації:

$$\begin{bmatrix} i_{ma}^* \\ i_{mb}^* \\ i_{mc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0^* \\ i_{m\alpha}^* \\ i_{m\beta}^* \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

а для компенсації струму в нейтралі в (2.4) необхідно задати $i_0^* = -i_0$.

Поява нових підходів в розробці систем векторного керування пристроями перетворювальної техніки, заснованих на сучасних теоріях миттєвих потужностей, потребує представлення трифазних напруг та струмів в різних стаціонарних та обертових системах координат, що дозволяє суттєво спростити аналіз таких пристроїв. Автори робіт першими у вітчизняній літературі привернули увагу спеціалістів в галузі перетворювальної техніки до нових теорій потужності та узагальнили співвідношення для послідовного переходу від однієї системи координат до іншої. Дані теорії покликані, в першу чергу, сприяти розв'язанню наступних задач:

- покращення гармонічного складу струму, споживаного від джерел живлення, за рахунок зменшення рівня вищих гармонік;
- компенсація реактивних складових основної гармоніки струму мережі;
- симетрування струмів і напруг в фазах трифазної системи живлення шляхом компенсації складових зворотної та нульової послідовностей.

2.2 Загальні принципи використання теорії миттєвої потужності для активної компенсації.

Складові миттєвої потужності та розрахунок струмів компенсації.

Активні фільтри, призначені для "кондиціонування потужності", також називають "активними фільтрами потужності", "активними кондиціонерами ліній електропередачі", "активними кондиціонерами якості електроенергії", "автокомутуваними статичними VAR компенсаторами (SVC)" і т.д. Термін "кондиціонування потужності" має значно ширше значення, ніж термін "фільтрація гармонік". Кондиціонування потужності не обмежується лише фільтрацією гармонік, це означає повне або часткове придушення гармонік напруги чи струму, контроль реактивної потужності шляхом керування коефіцієнтом потужності, регулювання напруги, балансування навантаження, зниження коливання напруги та всі можливі взаємні комбінації. Компенсація реактивної потужності в системах електропостачання є тільки часткою загальної проблеми кондиціонування. Для оцінки електромагнітних процесів з енергетичної точки зору багатьма дослідниками використовується розширена теорія миттєвих потужностей p-q-r [39].

Визначення складових потужності в p-q-r теорії здійснюється, виходячи з миттєвих значень напруг і струмів та їх подальших матричних перетворень в інші координатні системи. Отримані значення складових потужності характеризують енергетичні процеси в системі, де проводиться вимірювання напруг мережі живлення u_A, u_B, u_C та струмів навантаження i_a, i_b, i_c (рис. 2.3).

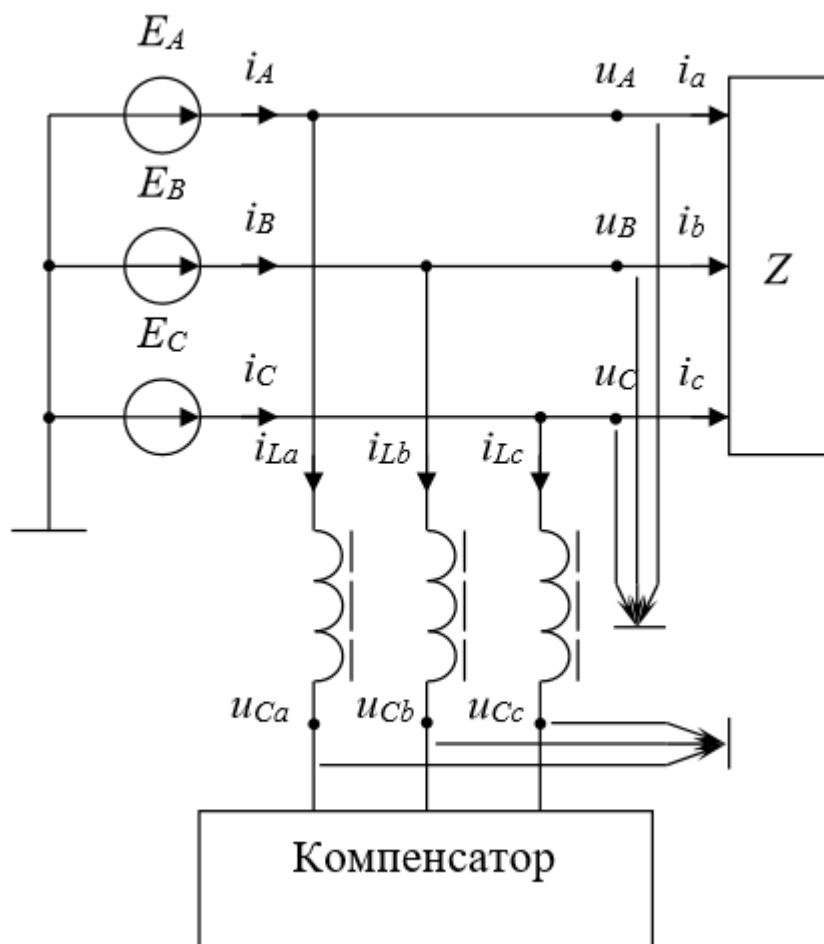


Рисунок 2.3 – Паралельний активний фільтр

Тобто, застосування р-q-г теорії дозволяє проаналізувати складові повної потужності в указаній системі і використовувати отримані значення для аналізу, контролю, метрології та інших потреб. Складові потужності, які обрані для компенсації, вводяться у співвідношення з від'ємним знаком для обчислення струмів компенсатора за зворотнім р-q-г перетворенням. Розрахунок миттєвих значень складових потужності здійснюється шляхом почергового використання матричних перетворень миттєвих значень напруг і струмів для представлення їх в різних координатних системах. Математичне перетворення миттєвих значень напруг та струмів в координати $\alpha\beta 0$ здійснюється за допомогою Clarke - оператора, який представляє собою ортогональну матрицю:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \text{де } K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

де $u_A, u_B, u_C, i_a, i_b, i_c$ – миттєві значення фазних напруг та струмів відповідно; $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta$ – миттєві значення напруг та струмів в координатах α - β , u_0 та i_0 – миттєві значення напруги та струму нульової послідовності. Модуль вектора напруги в α - β -0 координатах являє собою просторову діагональ системи $(u_\alpha - u_\beta - u_0)$:

$$u_{\alpha\beta 0} = \sqrt{u_{\alpha\beta}^2 + u_0^2} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2 + u_C^2} = u_p, \quad (2.6)$$

Де $u_{\alpha\beta 0} = \sqrt{u_{\alpha\beta}^2 + u_0^2}$ – діагональ прямокутника $(u_\alpha - u_\beta)$ на площині.

Перехід до координат р-q-г для струму здійснюється шляхом перемноження отриманого вектора струму $i_{\alpha\beta 0}$ на матрицю коефіцієнтів, нормованих за модулем вектора напруги $u_{\alpha\beta 0}$. В такий спосіб отримуються відокремлені модулі струмів для різних складових потужності. Складові струму в системі координат потужності р-q-г визначаються таким чином:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta & u_0 \\ -u_\beta \cdot \frac{u_{\alpha\beta 0}}{u_{\alpha\beta}} & u_\alpha \cdot \frac{u_{\alpha\beta 0}}{u_{\alpha\beta}} & 0 \\ -u_0 \cdot \frac{u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} & -u_0 \cdot \frac{u_\beta}{u_{\alpha\beta}} & u_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

Складові потужності в р-q-г координатах є добутками модуля вектора напруги на складові струму та отримуються наступним способом:

$$p = \begin{bmatrix} p \\ p_q \\ p_r \end{bmatrix} = u_p \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \\ \bar{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \\ \tilde{r} \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

де p - просторовий вектор складових потужностей, u_p - модуль просторового вектора напруг мережі живлення, p – миттєва активна потужність, q_q – миттєва реактивна потужність, q_r – миттєва реактивна потужність, що замикається через нульовий провід. Також, розглядаючи криві миттєвих значень потужності, можна розділити кожен складову потужності в р-q-г теорії на постійну та змінну для кожного виду потужності.

Таким чином, р-q-г теорія оперує складовими потужності з наступними визначеннями:

$\bar{p}$ - постійна складова активної потужності на інтервалі повторюваності;

$\bar{q}$ - постійна складова реактивної потужності на інтервалі повторюваності, яка відображає додатковий енергообмін між джерелом та навантаженням;

$\bar{r}$ - постійна складова потужності, що замикається через нульовий провід;

$\tilde{p}$ - змінна складова активної потужності, яка споживається навантаженням (представлена як пульсація споживання активної потужності);

$\tilde{q}$ - змінна складова реактивної потужності (представлена як пульсація споживання реактивної потужності, в загальному випадку виявляється при несиметрії і несинусоїдальності напруг мережі живлення чи струмів навантаження);

$\tilde{r}$ - змінна складова потужності, що замикається через нульовий провід (відтворюється при несиметричному навантаженні). [19, 20]

2.3 Визначення умов доцільного застосування активної фільтрації

Відповідно з визначенням всіх можливих складових потужності p , q , r та їх уявним розділенням на додаткові складові можна стверджувати, що всі складові потужності, крім p , які споживає навантаження, є небажаними та спонукають до створення умов для їх мінімізації. Зазначені вище складові вимагають роз'яснення умов їх появи, причин появи та наслідків їх дії в системі «мережа живлення – навантаження». Поява небажаних складових миттєвих потужностей обумовлена властивостями мережі та навантаження рис. 2.4. Різновиди мережі можна розбити за трьома основними ознаками: симетрична синусоїдальна, несиметрична синусоїдальна, несинусоїдальна. Навантаження поділено наступним чином: симетричне та несиметричне; з нульовим проводом та без нього. Іншим критерієм для класифікації навантажень є їх імпедансна характеристика: чисто активна, активно-реактивна, нелінійна. Таким чином, з'являється велика кількість варіантів за типами мереж та навантажень, при яких можна очікувати виникнення небажаних складових миттєвої потужності та окреслити основні способи їх мінімізації. Кожен варіант може бути окремо розглянутий з точки зору причин та наслідків виникнення цих складових. В

системі «мережа живлення – навантаження», що схематично показана на рис. 2.4, а, за основу взято джерела синусоїдальних та симетричних напруг необмеженої потужності (струми навантаження не викликають спотворення напруг мережі). Негативними явищами в такій системі будуть тільки реактивні і/або несинусоїдальні струми навантаження, що призводять до перевантаження ліній електропостачання. Використання компенсатора на стороні навантаження зменшить перевантаження ліній електропостачання. Іншим випадком є варіант на рис. 2.4, б, коли мережа живлення має обмежену потужність, співрозмірну з потужністю навантаження. Негативними явищами в такій системі будуть реактивні і/або несинусоїдальні струми навантаження, що призводять до перевантаження лінії електропостачання та спотворень кривих напруг мережі живлення. Використання компенсатора на стороні навантаження зменшить перевантаження мережі та усуне спотворення кривих напруги мережі.

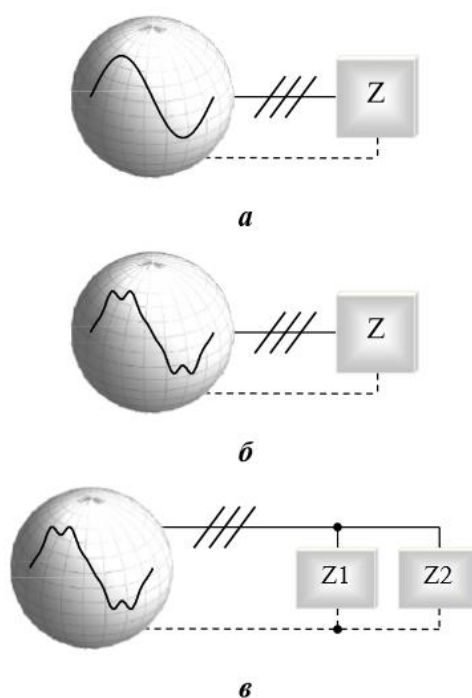


Рисунок 2.4 – Системи мережа живлення – навантаження

Третім випадком є ситуація на рис. 2.4, в, коли навантаження розгалужені. Припустимо, що мережа має обмежену потужність, співрозмірну з потужністю навантажень, і при цьому потужність навантаження P_{Z1} значно більша за потужність навантаження P_{Z2} . Також приймемо, що навантаження $Z1$ спотворює криві напруг мережі живлення. В такому випадку навантаження $Z2$ отримує спотворені криві напруг мережі живлення з несиметрією і/або несинусоїдальністю. При цьому, навіть якщо навантаження $Z2$ є симетричним та лінійним, споживані ним струми можуть бути несиметричними та несинусоїдальними, а крива активної потужності буде з пульсаціями. Основні умови появи небажаних складових потужності та вибір тих, що підлягають мінімізації, зведено в таблицю 2.1. Типи навантаження позначені як «R», «RLC» та «S+RLC» (нелінійне навантаження з ключовими елементами). Сірим кольором позначено клітинки, які відповідають наявності вказаних складових потужності за даних умов. В останню колонку зведено складові потужності, які підлягають мінімізації для зазначених типів навантаження. Символами «○» «○» та «✧» позначено характеристики мережі живлення: «○» – симетрична синусоїдальна, «○» – несиметрична синусоїдальна, «✧» – несиметрична несинусоїдальна. Як видно з таблиці, для типових систем «мережа живлення – навантаження» в переважній більшості випадків циркулюють складові потужності, які повинні бути мінімізовані. Причому, як правило, небажані складові потужності можна мінімізувати лише з використанням активних фільтрів (активного способу). Пасивні системи компенсації дозволяють мінімізувати лише постійну складову реактивної потужності $\bar{q}$.

Таблиця 2.1 – Умови появи небажаних складових потужності, які можуть компенсуватись паралельним активним фільтром

Складові потужності			$\bar{p}$			$\bar{q}$			$\bar{r}$			$\tilde{p}$			$\tilde{q}$			$\tilde{r}$			Складові, що мінізуються
мережа навантаження			○	○	◇	○	○	◇	○	○	◇	○	○	◇	○	○	◇	○	○	◇	
3-х провідна система	симетричне	R	■	■	■							■	■	■							$\tilde{p}, \tilde{q}$
		RLC	■	■	■	■	■	■				■	■	■							$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}$
		$S+RLC$	■	■	■	■	■	■				■	■	■							$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}$
	несиметричне	R	■	■	■							■	■	■	■	■	■				$\tilde{p}, \tilde{q}$
		RLC	■	■	■	■	■	■				■	■	■							$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}$
		$S+RLC$	■	■	■	■	■	■				■	■	■							$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}$
4-х провідна система	симетричне	R	■	■	■							■	■	■				■	■	■	$\tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		RLC	■	■	■	■	■	■				■	■	■				■	■	■	$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		$S+RLC$	■	■	■	■	■	■				■	■	■				■	■	■	$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
	несиметричне	R	■	■	■							■	■	■	■	■	■				$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		RLC	■	■	■	■	■	■				■	■	■				■	■	■	$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		$S+RLC$	■	■	■	■	■	■				■	■	■				■	■	■	$\bar{q}, \bar{r}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$

До пасивних віднесено системи компенсації реактивної потужності з використанням статичних компенсаторів, найхарактернішими з яких є комутовані конденсаторні батареї, активними названо системи компенсації з використанням напівпровідникових перетворювачів, які відслідковують криві струмів та напруг у реальному часі. На рис. 2.5 схематично представлено циркуляцію складових миттєвої потужності в системі «мережа живлення – навантаження з паралельним активним фільтром».

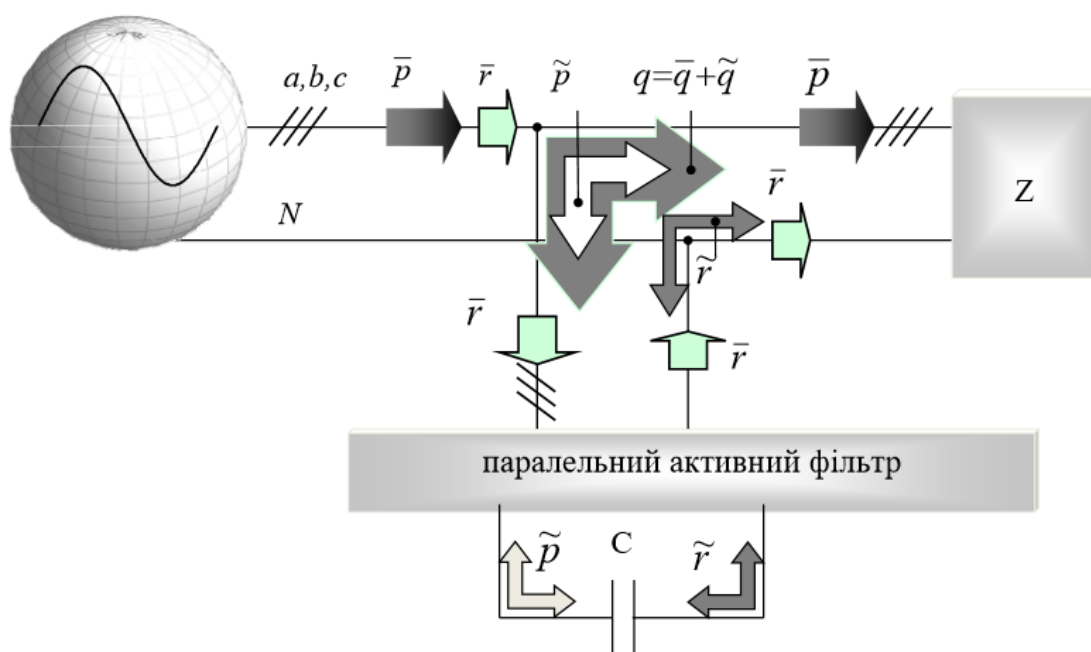


Рисунок 2.5 – Циркуляція складових миттєвої потужності в системі

«мережа живлення – навантаження з паралельним активним фільтром»

Узагальнюючи вищесказане, можна стверджувати, що паралельні активні фільтри – системи з контрольованим генеруванням струму, який узгоджується зі струмом навантаження таким чином, щоб результуючий струм мережі був симетричним, близьким до синусоїдальної форми та протікав у фазі зі складовою прямої послідовності напруги мережі живлення для забезпечення електромагнітної сумісності систем «мережа живлення - навантаження».

Розробки принципів роботи та алгоритмів керування системами фільтрації небажаних складових потужності були започатковані з появою $p-q$ теорії миттєвої потужності. Подальший розвиток цієї теорії здійснювався шляхом розширення її можливостей та створенням підходів до визначення складових миттєвої потужності в різних координатних системах з метою розділення окремих складових, які не відтворюються в базовій $p-q$ та інших теоріях. [31,32]

Висновок до розділу 2

У даному розділі були сформовані вимоги до паралельного активного фільтру, розглянуто матричний перетворювач з ПАФ та загальні принципи використання теорії миттєвої потужності для активної компенсації. Також ми визначили умови доцільного застосування активної фільтрації і вирішили, що паралельний активний фільтр повинен бути засобом підвищення якості електроживлення при наявності в мережі спотворення гармонік струму, викликаних нелінійними навантаженнями. Використання паралельного активного фільтра має знижувати сумарний коефіцієнт гармонік струму до рівня, який задовольняє сучасним вимогам до електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів з промислової мережею.

3 ПАРАЛЕЛЬНИЙ АКТИВНИЙ ФІЛЬТР ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.

3.1 Аналіз впливу електроприводів змінного струму на мережу живлення.

Електрична енергія є одним з основних енергоресурсів, що використовуються в усіх галузях промисловості, а так само в комерційному і побутовому секторі. Як і будь-який енергоресурс, електрична енергія є товаром, і має сукупність фізичних і технологічних характеристик, що визначають її якість [21]. Якість електроенергії має велике значення, оскільки вона впливає на характеристики електрообладнання кінцевих споживачів, їх продуктивність, термін служби і міжремонтні інтервали, а також впливає на якість і характеристики продукції, що виготовляється з використанням електроустаткування [21]. В Україні якість електроенергії характеризується відповідними державними стандартами, що визначають показники і норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення в Україні встановлені ГОСТ 13109-97 [38].

У міжнародному стандарті IEEE Standard 519-1992 нелінійні спотворення в системі електропостачання розглядаються в двосторонньому порядку, з точки зору взаємодії споживачів електроенергії (гармонійні струми, споживані з мережі електропостачання), і джерел електроенергії (гармонійні напруги мережі живлення) [22]. Комплексний підхід до розгляду нелінійних спотворень струмів і напруг в мережах електропостачання пов'язаний зі світовою тенденцією збільшення частки споживачів електроенергії з нелінійними вольт-амперних характеристиками [22, 23].

Виникнення і розвиток силових напівпровідникових елементів дало початок розвитку і масового розповсюдження нового класу електроприладів - силових напівпровідникових пристроїв. В даний час силові напівпровідникові

пристрої поширені повсюдно у всіх сферах життєдіяльності людини, при цьому кількість нелінійних споживачів електроенергії і рівень гармонійних складових струму і напруги в мережі живлення продовжують збільшуватися все більшими темпами в світі [24, 25].

Напівпровідникові елементи й, відповідно, прилади та пристрої на їх основі є нелінійними споживачами електроенергії і споживають гармонійно насичений несинусоїдальний струм з мережі живлення. Такий струм, створює падіння напруги енергосистеми і викликає нелінійні спотворення і несинусоїдальність напруги в мережі електропостачання [26]. Вищі гармоніки струму і напруги в залежності від їх характеру, інтенсивності і тривалості негативно впливають на роботу всього електроустаткування, знижують економічність і надійність роботи електричних мереж і призводять до відчутних економічних збитків, обумовленим, головним чином, погіршенням енергетичних показників обладнання, додатковими втратами в обмотках статора, в ланцюзі ротора, а також в сталі статора і ротора машин, збільшенням втрат на гістерезис, втрат, пов'язаних з вихровими струмами і втрат в обмотках трансформаторів, однофазними короткими замиканнями на землю в кабельних лініях, пробоями конденсаторів, вібраціями в електромашинних системах, виходом з ладу або скороченням терміну служби електроустаткування через інтенсифікацію теплового і електричного старіння ізоляції, зниженням надійності функціонування електричних мереж і технологічних процесів, порушенням роботи і передчасним виходом з ладу високоточних вимірювальних приладів, збільшенням додаткових втрат в мережах і елементах електрооборудовання, перешкодами і спотвореннями сигналів в мережах телекомунікацій і систем зв'язку, порушенням роботи пристроїв захисту і погіршенням їх характеристик, скороченням терміну служби основного електрообладнання енергетичних систем, зниженням надійності і збоями в роботі систем автоматики і

мікропроцесорних систем [27]. Крім цього, нелінійні навантаження мають високий рівень споживання реактивної потужності, що призводить до зростання втрат в енергосистемі, перевантаження генераторів, трансформаторів, ліній електропередач, коливань напруги і загального погіршення якості електроенергії [28].

При цьому, незважаючи на велику кількість приладів і пристроїв, що використовують в своєму складі силові напівпровідникові елементи, найбільшою і найбільш важливою областю застосування силовії електроніки є електропривод. Електропривод використовується практично у всіх областях людської діяльності і споживає більше 60% усієї виробленої електроенергії. В даний час частка електроприводу змінного струму становить 68%, частка електроприводу постійного струму - 15%, а решта 17% складають механічні, гідравлічні та інші типи приводу. Така істотна частка електроприводу змінного струму пов'язана з розвитком математичної теорії машин змінного струму, створенням вдосконалених силових напівпровідникових елементів і ПЧ на їх основі і використанням сучасних засобів управління, які дозволили створити високоякісні, надійні, економічні і доступні системи регульованого асинхронного електроприводу [29, 30]. Таким чином, в даний час, регульований асинхронний електропривод змінного струму є найбільш поширеним типом електроприводу, і тенденція збільшення його частки збережеться і надалі. Отже, саме цей тип електроприводу є основним нелінійним споживачем електроенергії і головним джерелом нелінійних спотворень в системі електропостачання.

Для оцінки рівня вмісту гармонійних складових напруг в системі електропостачання, і гармонійних складових струмів нелінійних споживачів електроенергії зручно використовувати показник THD (Total harmonic distortion) або вітчизняний аналог, сумарний коефіцієнт гармонійних складових [22].

ПЧ з ланкою постійного струму в складі регульованого асинхронного електроприводу змінного струму є джерелом широкого спектра вищих гармонійних, інтергармонічних, субгармонічних складових і радіоперешкод, що виникають в результаті дискретного управління потоками електричної енергії, і що впливають, як на ПЧ, так і на мережу живлення [31]. Крім того, регульований асинхронний електропривод на основі ПЧ є споживачем реактивної потужності з мережі електропостачання, що призводить до зниження коефіцієнта потужності. При цьому, ступінь впливу ПЧ на мережу живлення залежить від потужності джерела живлення, типу регульованого електроприводу, випрямляча, інвертора, що згладжують фільтрів і способу управління випрямляча і інвертора. Отже, сукупність всіх перерахованих вище факторів визначає необхідність забезпечення умов для електромагнітної сумісності електроприводу змінного струму з мережею живлення.

В останній час можна відзначити перехід промислового сектора економіки на використання сучасних високотехнологічних та енергоефективних типів регульованого електроприводу. В результаті такої тенденції частка електроприводу змінного струму на основі перетворювача частоти (ПЧ) і асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором (АД) досягає значного рівня. З точки зору взаємодії з мережею живлення система «ПЧ-АД» є одним з головних джерел нелінійних спотворень струмів і напруг і споживачів реактивної потужності, що робить негативний вплив, як на мережу живлення в цілому, так і на інших споживачів електроенергії зокрема, і призводить до значних економічних збитків. В даний час найбільш ефективними пристроями компенсації нелінійних спотворень і реактивної потужності є активні фільтри електроенергії (АФЕ).

3.2 Моделювання активного фільтра в програмному середовищі MatLab

Зараз буде показано та проаналізовано результат моделювання для трифазного фільтра активної потужності за допомогою програми MATLAB / Simulink. Це моделювання дозволить реалізувати нелінійне навантаження та компенсувати гармонійні струмові лінії при балансуванні та невірному навантаженні. В результаті моделювання встановлено, що фільтр активної потужності є кращим способом зменшити сумарний коефіцієнт гармонійних складових (THD), що вимагається стандартами якості.

Форма хвилі трифазного джерела напруги показана на рис. 3.1.

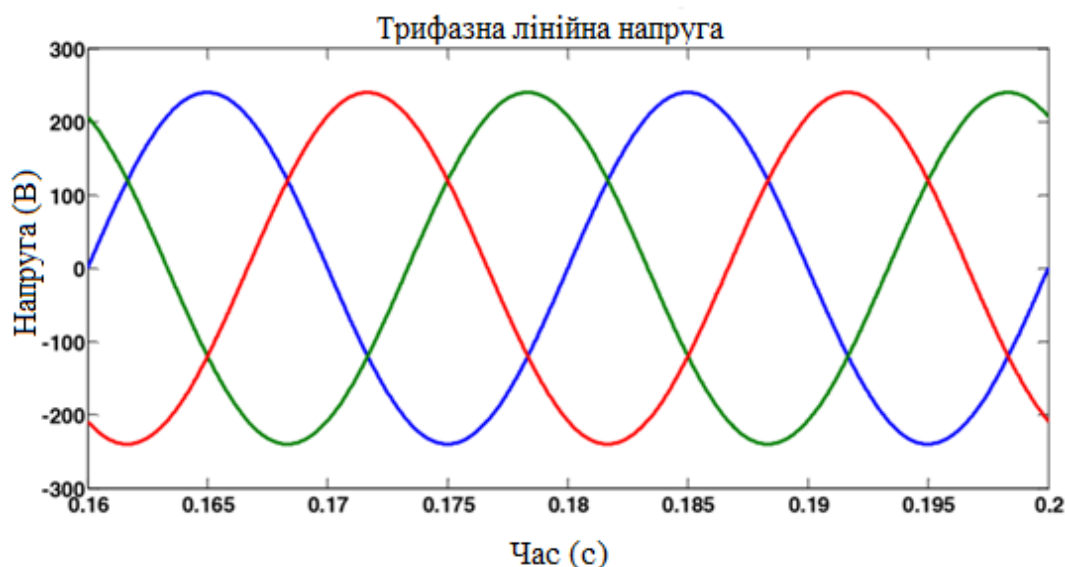


Рисунок 3.1 – Трифазна лінійна напруга

Моделювання виконується на трифазному симетричному нелінійному навантаженні, яка представляє собою трифазний діодний випрямляч 3 кВА і подає напругу постійного струму на чисто резистивне навантаження. В результаті струм трифазного навантаження буде виглядати так, як показано на рис. 3.2.

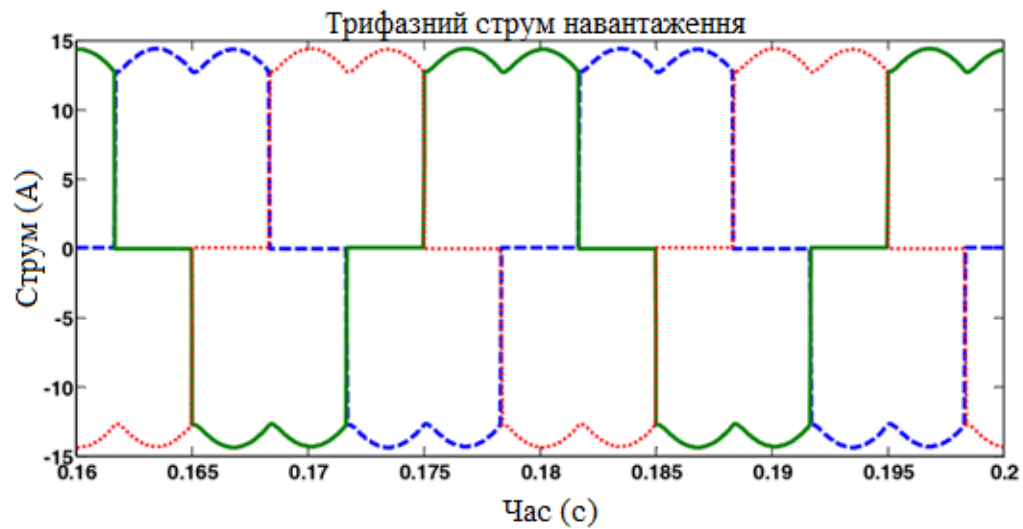


Рисунок 3.2 – Трифазний струм навантаження

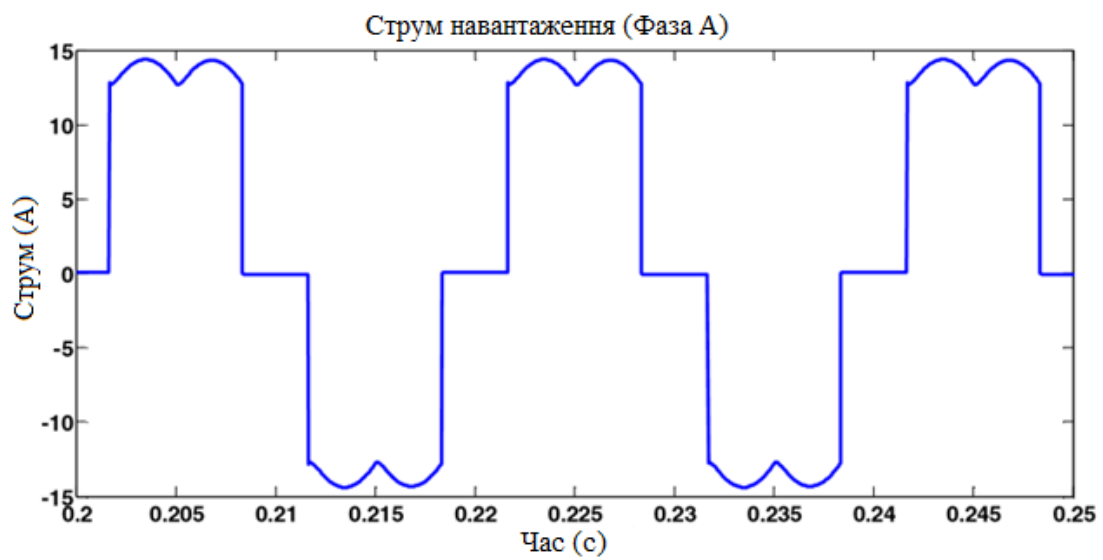


Рисунок 3.3 – Струм навантаження для фази А

На рис. 3.4 показан струм трифазної лінії, який знаходиться майже в синусоїдальній формі.

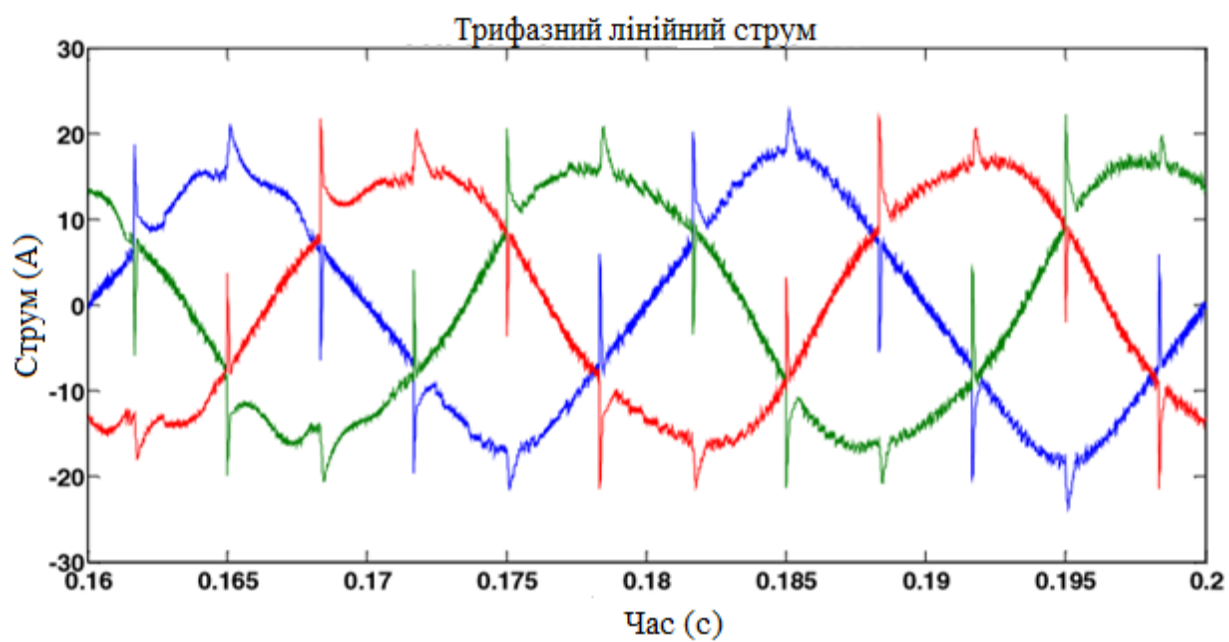


Рисунок 3.4 – Трифазний лінійний струм

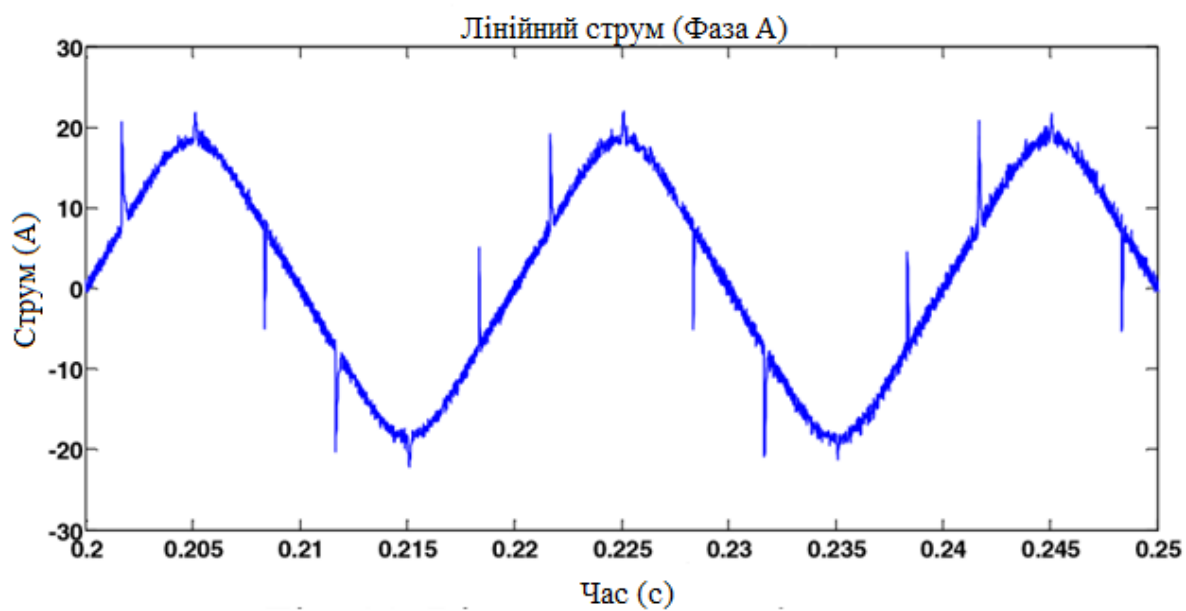


Рисунок 3.5 – Лінійний струм для фази А

Струм активного фільтра показано на рис. 3.6.

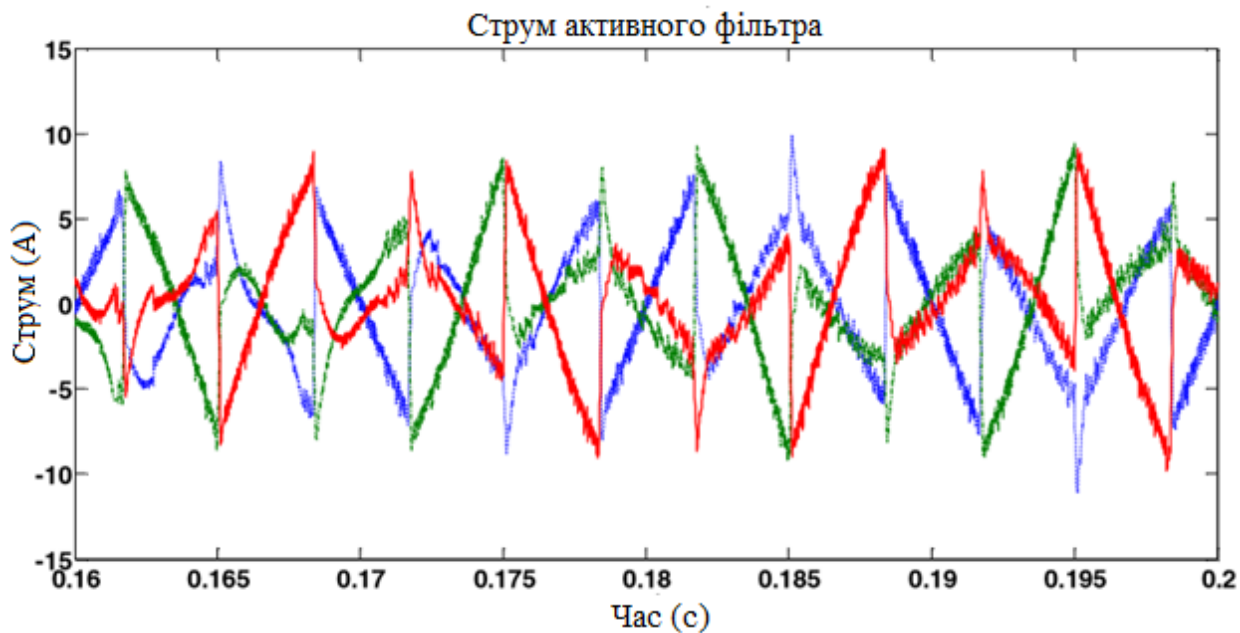


Рисунок 3.6 – Струм активного фільтра

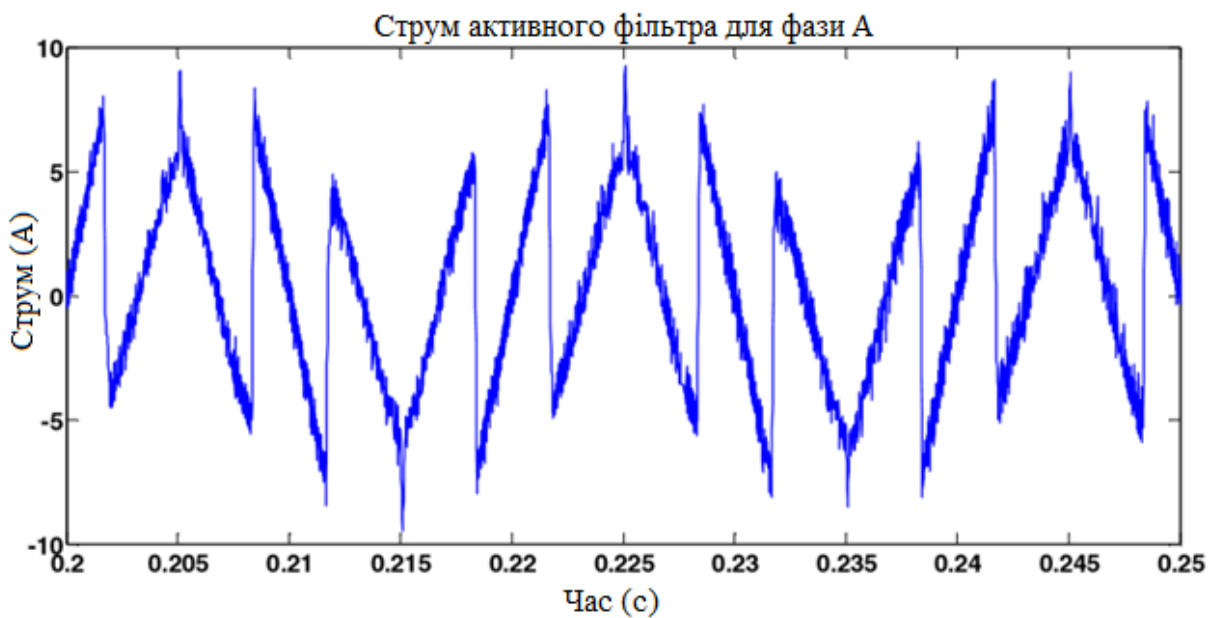


Рисунок 3.7 – Струм активного фільтра для фази А

З сумарного коефіцієнту гармонійних складових (THD) для лінійного струму та струму навантаження, як показано на рис. 3.8 та рис. 3.9, можна

сказати, що ефективність активного фільтра в компенсації гармонічних компонентів знизить гармонічні коливання з 30,76% до 12,68%. Це означає, що THD лінійного струму відповідає стандарту IEEE-519.

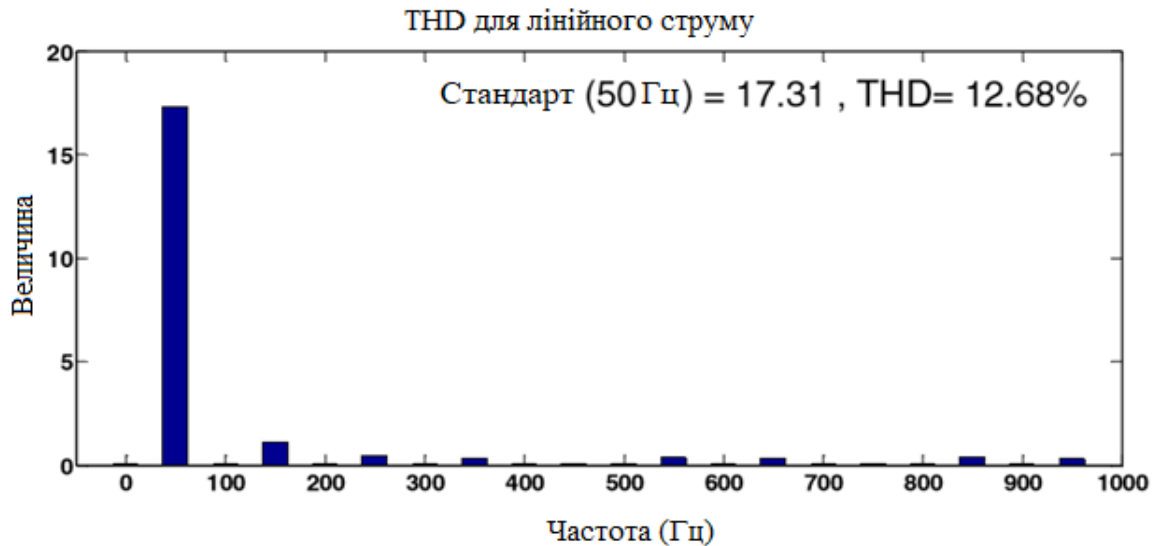


Рисунок 3.8 – THD для лінійного струму

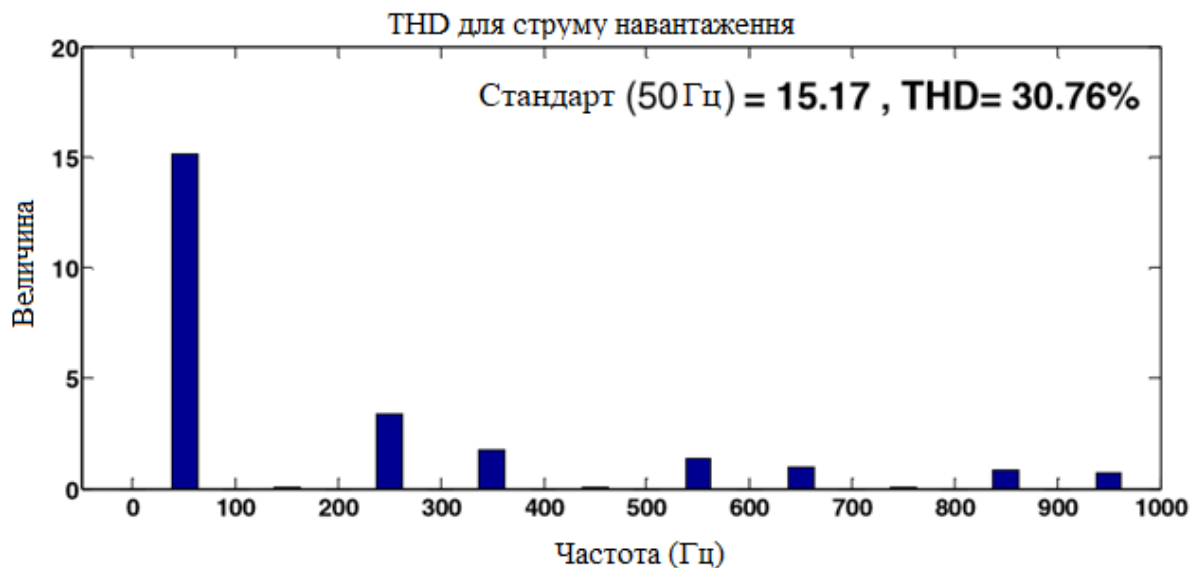


Рисунок 3.9 – THD для струму навантаження

Зростаюче використання нелінійного навантаження в електроенергетичній системі, яка створюватиме струм і напругу гармонік, і пов'язана з нею проблема гармонік в енергосистемі стають більш серйозними і безпосередньо впливають на якість електроенергії. Звичайний спосіб усунення гармонік за допомогою пасивного фільтра може страждати від паразитарної проблеми. Показано, що для пом'якшення гармонік та корекції коефіцієнта потужності може бути реалізовано трифазний фільтр на основі теорії $p-q$. Пом'якшення гармонік, здійснене активним фільтром, відповідає стандартам IEEE-519.

Висновок до розділу 3

У даному розділі було проведено моделювання ПАФ у програмному середовищі MATLAB. Представлені рисунки трехфазного лінійної напруги, трехфазний загрузений струм, трехфазний лінійний струм, та струм активного фільтра. Було визначено, що завдяки фільтру для пом'якшення гармонік та корекції коефіцієнта потужності може бути реалізований трифазний фільтр на основі теорії $p-q$. Пом'якшення гармонік, здійснене активним фільтром, відповідає стандартам IEEE-519

4 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА

4.1. Енергосиловий розрахунок параметрів

Паспортні дані двигуна 4A160M8УЗ при з'єднанні обмоток статора у зірку наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Паспортні дані двигуна 4A160M8УЗ

Номінальна потужність	$P_{2n} = 11 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 4$
Момент інерції	$J_d = 0.18 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.87$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.75$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.2$
Номінальне ковзання	$s_n = 2.7\%$
Критичне ковзання	$s_k = 10.49\%$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\bar{x}'_1 = 0.13$
Активний опір статора	$\bar{R}'_1 = 0.066$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\bar{x}''_2 = 0.18$
Приведений активний опір ротора	$\bar{R}''_2 = 0.031$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{x}_\mu = 2$

4.2 Розрахунок номінальних даних двигуна

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.1593 \text{ рад/с.}$$

Швидкість ідеального неробочого ходу двигуна:

$$\omega_{nx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{4} = 78.5398 \text{ рад/с.}$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{nx} (1 - s_n) = 78.5398 \cdot (1 - 0.027) = 76.4192 \text{ рад/с.}$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{11000}{76.4192} = 143.9428 \text{ Нм.}$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності λ з каталогу):

$$M_k = \lambda M_n = 2.2 \cdot 143.9428 = 316.6742 \text{ Нм.}$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = U_{1n} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В,}$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3U_n \eta \cos(\varphi)} = \frac{11 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.87 \cdot 0.75} = 25.6134 \text{ А.}$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2} U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ В,}$$

$$I_{na} = \sqrt{2} I_n = \sqrt{2} \cdot 25.6134 = 36.2228 \text{ А.}$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі неробочого ходу при $R_l = 0$:

$$\psi_{1nx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{311}{314} = 0.9876 \text{ Вб.}$$

4.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

Математична модель АД (отримана для Т-подібної схеми заміщення, що показана на рис. 4.1, в той час як приведені в [1] параметри відповідають Г-подібній схемі заміщення, рис. 4.2. Для перерахунку параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну використовується методика, яка наведена в [2].

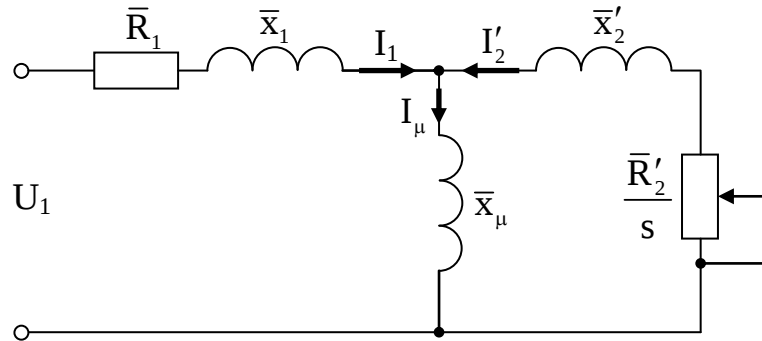


Рисунок 4.1 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

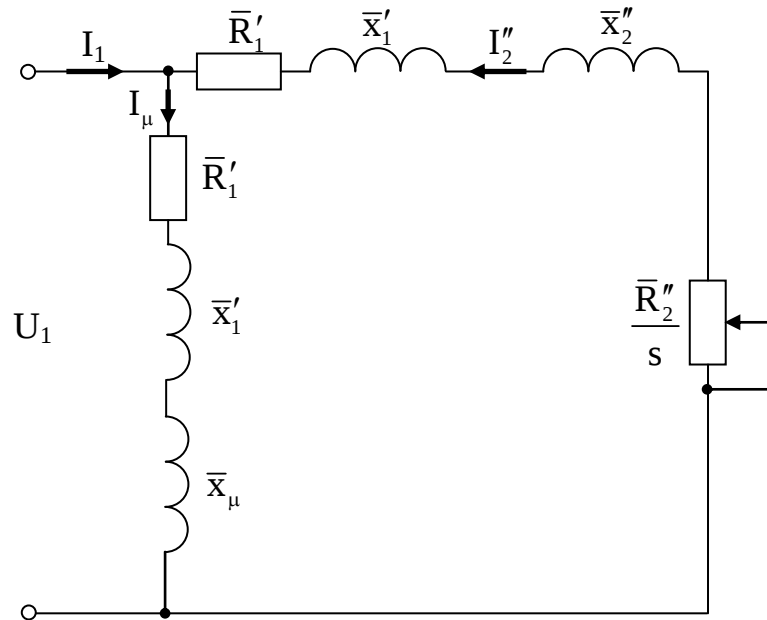


Рисунок 4.2 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення [2]:

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}'_1\bar{x}_\mu}}{2\bar{x}_\mu} = \frac{2 + \sqrt{2^2 + 4 \cdot 0.13 \cdot 2}}{2 \cdot 2} = 1.0612.$$

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення подано, як це наведено у [1].

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\bar{x}_1 = \frac{\bar{x}'_1}{c_1} = \frac{0.013}{1.0612} = 0.1225, \quad \bar{R}_1 = \frac{\bar{R}'_1}{c_1} = \frac{0.066}{1.0612} = 0.0622,$$

$$\bar{x}'_2 = \frac{\bar{x}''_2}{c_1^2} = \frac{0.18}{1.0612^2} = 0.1598, \quad \bar{R}'_2 = \frac{\bar{R}''_2}{c_1^2} = \frac{0.031}{1.0612^2} = 0.0275.$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишуться:

$$x_1 = \bar{x}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.1225 \frac{220}{25.6134} = 1.0493 \text{ Ом},$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.0622 \frac{220}{25.6134} = 0.5327 \text{ Ом},$$

$$x'_2 = \bar{x}'_2 \frac{U_n}{I_n} = 0.1598 \frac{220}{25.6134} = 1.3690 \text{ Ом},$$

$$R_2 = \bar{R}'_2 \frac{U_n}{I_n} = 0.0275 \frac{220}{25.6134} = 0.2358 \text{ Ом},$$

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \frac{U_n}{I_n} = 2 \frac{220}{25.6134} = 17.1311 \text{ Ом}.$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{1.0493}{314} = 0.0033 \text{ Гн},$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x'_2}{\omega_0} = \frac{1.3690}{314} = 0.0044 \text{ Гн}.$$

Індуктивність контуру намагнічування:

$$L_m = \frac{\chi_\mu}{\omega_0} = \frac{17.1311}{314} = 0.0545 \text{ Гн.}$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.0545 + 0.0033 = 0.0579 \text{ Гн,}$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.0545 + 0.0044 = 0.0589 \text{ Гн.}$$

На основі проведених розрахунків обчислюємо значення параметрів $\alpha, \alpha_1, \beta, \gamma, \sigma, \mu_1$:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.2358}{0.0589} = 4.0037 (\text{Ом/Гн}),$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.5327}{0.0579} = 9.2051 (\text{Ом/Гн}),$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}\right) = 0.0579 \left(1 - \frac{(0.0545)^2}{0.0579 \cdot 0.0589}\right) = 0.0074 (\text{Гн}),$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.0545}{0.0589 \cdot 0.0074} = 125.5597 (1/\text{Гн}),$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.5327}{0.0074} + 4.0037 \cdot 0.0545 \cdot 125.5597 = 99.6427 (\text{Ом/Гн}),$$

$$\mu_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.0545}{0.0589} = 1.3890.$$

Таблиця 4.2 – Параметри двигуна 4А160М8УЗ

$P_{2n}, (\text{кВт})$	11	$R_1, (\text{Ом})$	0.5327
$\omega_{\text{нх}}, (\text{рад/с})$	78.5398	$R_2, (\text{Ом})$	0.2358
$\omega_n, (\text{рад/с})$	76.4192	$L_1, (\text{Гн})$	0,0579
$M_n, (\text{Н} \cdot \text{м})$	143.9428	$L_2, (\text{Гн})$	0,0589
$M_k, (\text{Н} \cdot \text{м})$	316.6742	$L_m, (\text{Гн})$	0,0545
λ	2.2	$\alpha, (\text{Ом/Гн})$	4.0037
$I_{\text{на}}, (\text{А})$	36.2228	$\alpha_1, (\text{Ом/Гн})$	9.2051
$\psi_{\text{нх}}, (\text{Вб})$	0,9876	$\sigma, (\text{Гн})$	0.0074
η	0,87	$\beta, (1/\text{Гн})$	125.5597
$\cos \varphi$	0,75	$\gamma, (\text{Ом/Гн})$	99.6427
$J_d, (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$	0.18	μ_1	1.3890

4.4. Обґрунтування вибору потужності електродвигуна

Електродвигуни серії 4А загальнопромислового виконання відповідають загальним вимогам і призначені для нормальних умов експлуатації (двигуни асинхронні).

Це трифазні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором і розраховані на частоту 50 Гц, що мають ступінь захисту IP44 або IP23.

Модифікації та спеціальні виконання ел. двигунів 4А побудовані на базі їх основного виконання, тобто мають ті ж конструктивні рішення основних елементів і висоти осі обертання. Вони випускалися на певні висоти осі обертання і потужності і призначалися для застосування в механізмах пред'являють специфічні вимоги до приводу, або працюють в умовах експлуатації відмінних від нормальних, регламентованих ГОСТ 183-74.

Висновок до розділу 4

1. В результаті обчислень було розраховано номінальні механічні та електричні параметри асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором 4A160M8УЗ.

2. Було розраховано параметри Г- та Т-подібних схем заміщення. Розрахунки Т-подібної схеми було записано в абсолютних одиницях.

В результаті обчислень було отримано значення параметрів двигуна для його подальшого дослідження шляхом математичного моделювання представленого у розділі 4.

5 ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ.

При живленні перетворювача від трифазної мережі живлення $U_{grid} = 380$ В, напруга в ланці постійного струму при ідеальній фільтрації буде приблизно рівною:

$$U_{dcn} = \sqrt{2}U_{grid} \approx 540 \text{ В}$$

При виборі IGBT для автономних інверторів напруги їх максимально-допустима напруга колектор-емітер має бути мінімум в 1.5 разів вищою, ніж максимальна напруга в ланці постійного струму, тобто:

$$U_{ce} > 1.5U_{dcmax} \quad (5.1)$$

Максимальна напруга в ланці постійного струму сучасних перетворювачів визначається допустимою напругою встановлених електролітичних конденсаторів фільтру, і складає приблизно 750 В для перетворювачів з трифазним живленням $U_{grid} = 380$ В, і 375 В для перетворювачів з однофазним живленням $U_{grid} = 220$ В.

Таким чином:

$$U_{ce} = 1.5 \cdot 750 = 1125 \text{ В}$$

IGBT транзистори, які випускаються сучасною промисловістю, мають стандартний ряд максимальних напруг колектор-емітер: 250, 600, 1200, 1700, 3300, 4500, 6500 В.

Вибір IGBT може бути здійснений за критерієм:

$$I_c > I_{max}, U_{cemax} > U_{ce} \quad (5.2)$$

де I_c та U_{cemax} – відповідно тривалий струм колектора та напруга колектор-емітер, які вказані в паспортних даних IGBT. Обов'язковою є умова наявності

антипаралельного діода, який в більшості випадків є вбудованим в один корпус із транзистором і не потребує окремого розрахунку.

Для побудови силової частини перетворювача зручно використовувати так звані IGBT-модулі [32], які в одному корпусі містять 6 або 7 транзисторів з антипаралельними діодами та вбудований випрямляч.

Вибираємо IGBT модуль типу FS50R12KT4P_B11 [32] з вбудованим, інвертором та клампером з параметрами $U_{ce} = 1200$ В, $I_c = 50$ А.

Ємність випрямляча визначається за формулою:

$$C = \frac{1}{2\pi k_p m f R_0} \quad (5.3)$$

де k_p – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги, який для перетворювачів частоти вибирають в діапазоні $(0.02 \div 0.05)$, m – число фаз випрямляча, f – частота напруги мережі живлення, R_0 – еквівалентний опір навантаження ланки постійного струму.

Для визначення R_0 розрахуємо значення струму ланки постійного струму з врахуванням перевантаження:

$$I_{dc} = \frac{k_{ovl} P_n}{U_{dcn} \eta \eta_{inv}} = \frac{1.2 \cdot 11000}{540 \cdot 0.87 \cdot 0.96} = 29.26 \text{ А} \quad (5.4)$$

де $\eta_{inv} = (0.95 \div 0.97)$ – коефіцієнт корисної дії інвертора напруги.

Тоді еквівалентний опір навантаження розраховується як:

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} = \frac{540}{29.26} = 18.45 \text{ Ом} \quad (5.5)$$

У відповідності з (5.5) розрахункове значення ємності фільтра для $k_p = 0.04$ буде дорівнювати:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 0.04 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 18.45} = 1437 \text{ мкФ}$$

Вибираємо конденсатори ємністю $C_c = 3300$ мкФ [33], максимальною напругою 385 В, допустима температура 85 градусів. Потрібна ємність та робоча напруга фільтра досягається послідовним включенням двох конденсаторів, як показано на рис. 5.2. При цьому сумарна ємність буде:

$$C_{12} = \frac{C_c}{2} = \frac{3300}{2} = 1650 \text{ мкФ}$$

Вибір датчиків струму здійснюють за максимальним струмом, який необхідно вимірювати, тобто щоб вимірюваний діапазон датчика був більшим від максимально допустимого струму в системі. Для вимірювання струмів на виході перетворювача для вибору використовують значення максимального струму (5.4).

Якщо для керування координатами двигуна використовуються методи, які не потребують організації зворотних зв'язків за струмом, а вимірювання струму здійснюється лише для захисту системи, то для здешевлення перетворювача датчики на виході інвертора можна не встановлювати і обмежитися лише датчиком струму в ланці постійного струму.

Вибираємо давач типу HCS-K5-200A [34], номінальний струм якого складає 200 А, діапазон вимірювання 400 А, точність 1.0%, напруга живлення 5 В.

Канал вимірювання напруги ланки постійного струму може бути побудований з використанням датчика типу LV-25P [35], схема підключення якого показана на рис. 5.2.

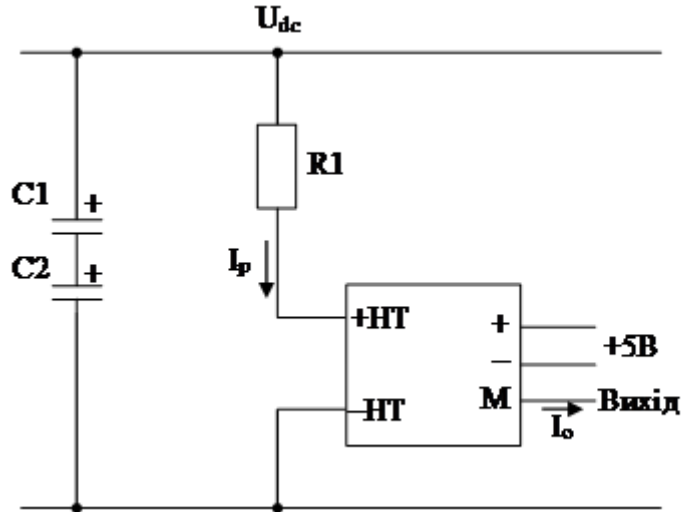


Рисунок 5.1 – Підключення датчика напруги

В документації на датчик вказано, що максимальний струм первинного кола $I_{p\max} = 14$ мА. Тому значення опору резистора R1 дорівнює:

$$R_1 = \frac{U_{dc\max}}{I_{p\max}} = \frac{750}{0.014} = 53571 \text{ Ом}$$

Зі стандартного ряду резисторів вибираємо $R1 = 56 \text{ кОм}$.

Обираємо оптичний енкодер HEDS 5500 [36], [37] з двома каналами сигналів з робочою зоною частоти в 100 Гц, розподільча здатність 1024 імпульсів на оберт.

Нехай, датчик має розподільчу здатність, яка вказана в його паспорті, N імп/об. Тоді ціна одного імпульсу результуючої послідовності АВ буде рівною

$$\theta_{1i} = \frac{2\pi}{4N} = 0.0015 \text{ рад}$$

Виміряна кутова швидкість розраховується як

$$\omega = \frac{n\theta_{1i}}{T_{s\omega}}$$

де n – кількість імпульсів результуючої послідовності АВ, які надійшли від датчика за час $T_{s\omega}$.

Вибираємо випрямляч типу SQL-50A , максимальний допустимий струм в якого 200 А, повторююча імпульсна напруга якого 100-1200 В.

Висновок до розділу 5

В даному розділі були розраховані параметри основних елементів електроприводу, таких як еквівалентний опір навантаження, ємність, IGBT модуль який складається з випрямляча, клампера та інвертора, давачі струму, напруги та швидкості. Побудовано функціональну схему електроприводу.

Давачі струму слугують для захисту та забезпечення зворотного зв'язку, який необхідний для алгоритму прямого векторного керування швидкістю асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Давач швидкості забезпечує зворотній зв'язок за швидкістю, яка входить в алгоритм прямого векторного керування швидкістю. Давач напруги слугує для захисту, контролю заряду конденсатора та для формування сигналів ШІМ.

6 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ТА СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ ЗАДАНОЇ ТРАЄКТОРІЇ ШВИДКОСТІ ТА ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ

Для даного двигуна було експериментально визначено кутову швидкість, при якій напруга статора не перевищує 311 В $\omega = 70$ рад/с. В процесі дослідження буде виконана наступна послідовність дій:

1. Виконаємо збудження двигуна починаючи з $t=0$ с протягом $t_{zb} = 0.25$ с від початкового значення $\psi = 0.02$ Вб до значення $\Psi = 0.96$ Вб;
2. В момент часу $t = 0.5$ с необхідно подати сигнал на розгін двигуна до значення $\omega = 70$ рад/с за час $t_p = 0.1$ с;
3. Після розгону двигуна в момент час $t = 0.9$ с накидаємо статичний момент збурення, рівний $M = 140$ Н·м і тримаємо його до часу $t = 1.3$ с;
4. Гальмуємо двигун починаючи з $t = 1.6$ с протягом часу $t_r = t_p = 0.1$ с, де t_r – час гальмування двигуна.

В результаті моделювання системи непрямого векторного керування кутовою швидкістю асинхронного двигуна отримаємо наступні перехідні процеси, зображені на рисунку 6.1.

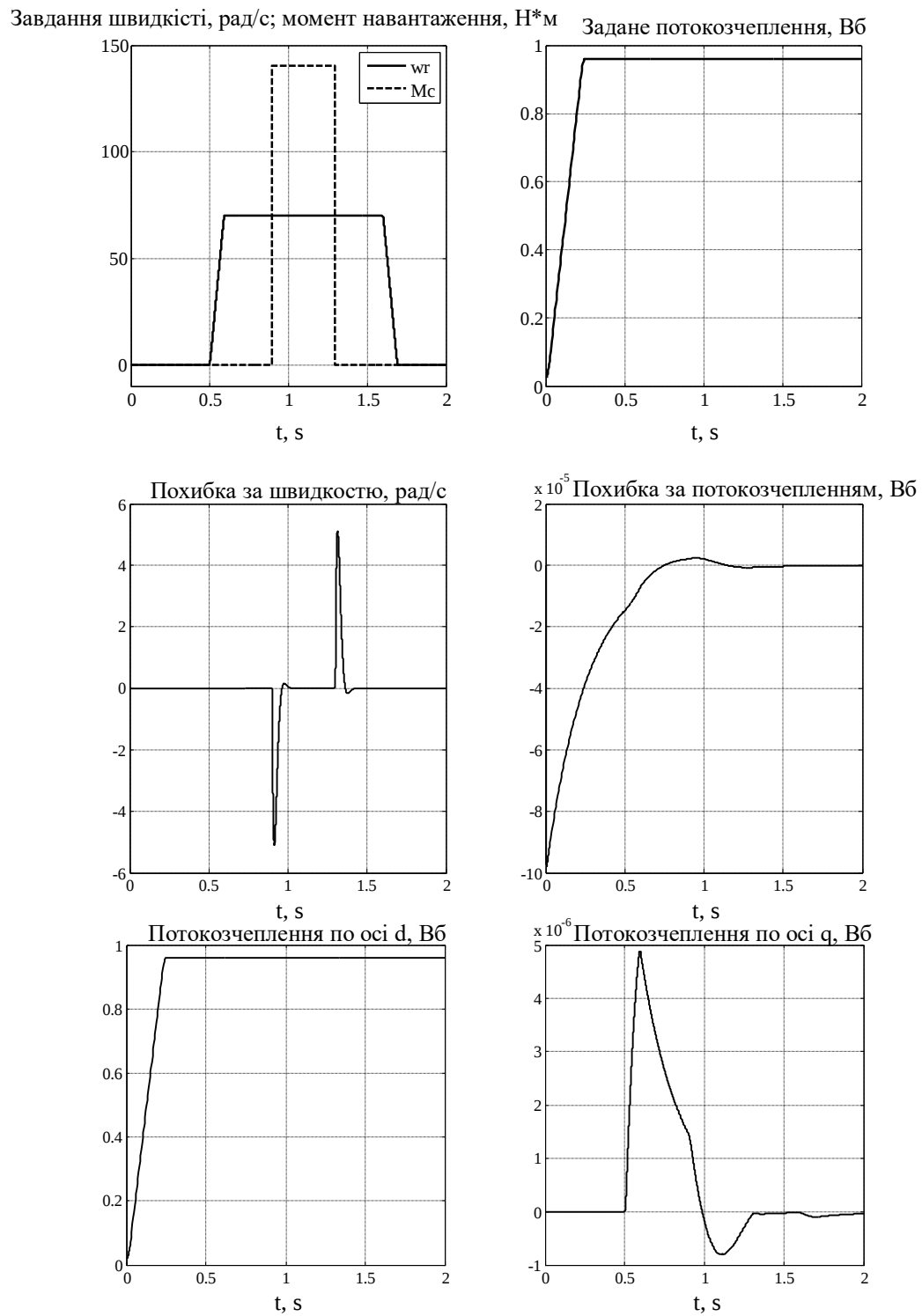


Рисунок 6.1, аркуш 1 – Перехідні процеси АД при відпрацюванні заданої траєкторії швидкості та потокозчеплення ($\omega = 70$ рад/с)

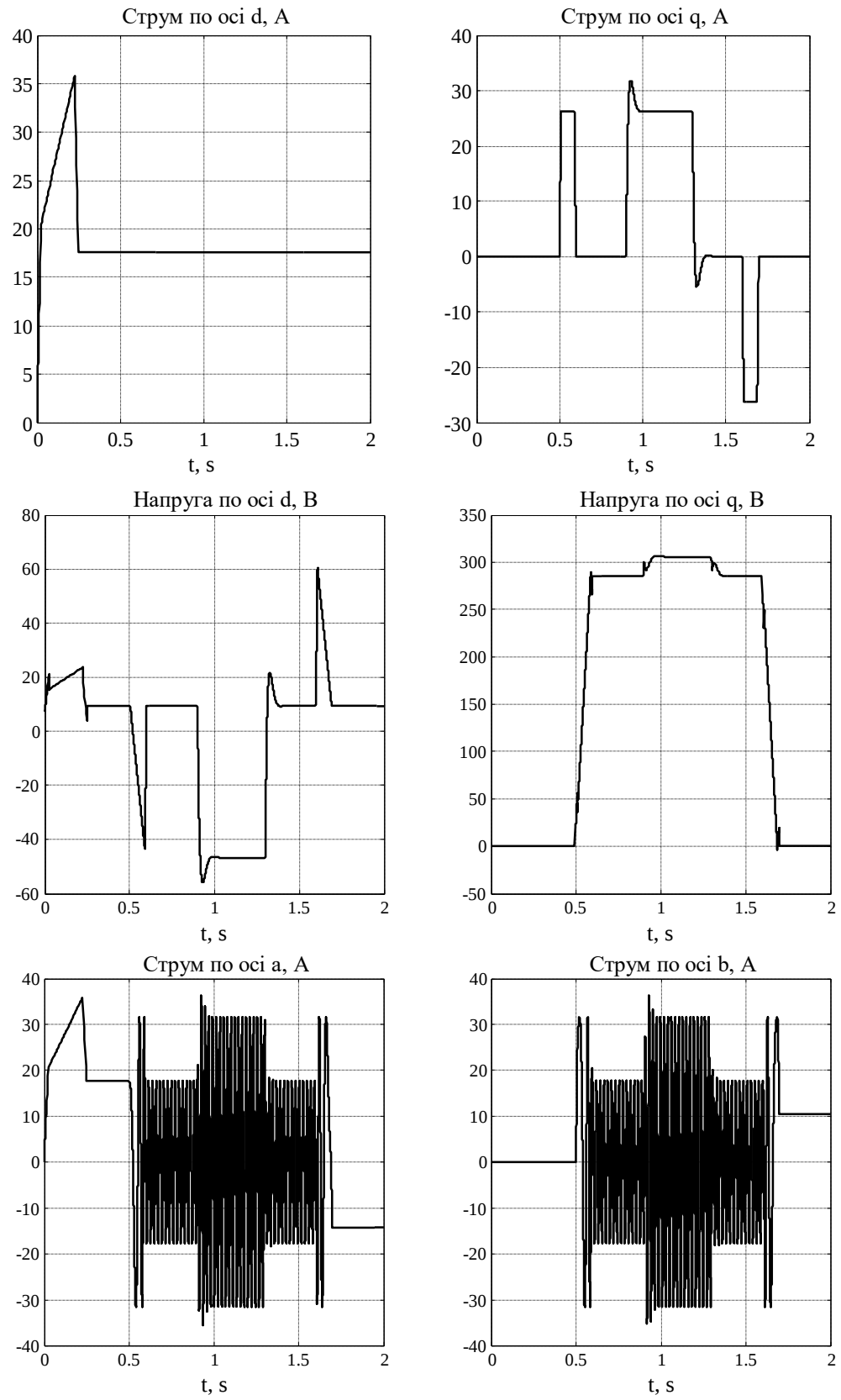


Рисунок 6.1, аркуш 2

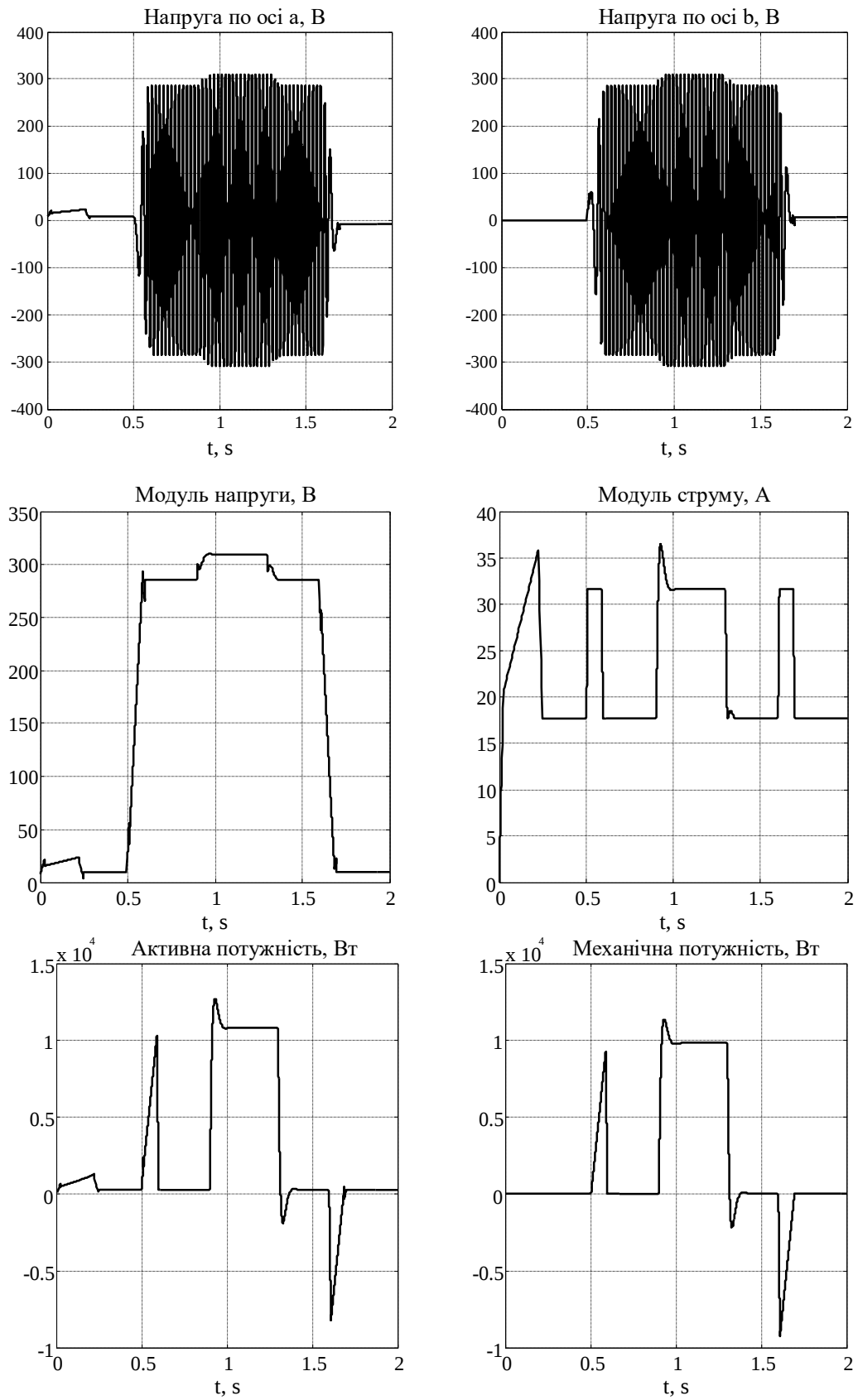


Рисунок 6.1, аркуш 3

Аналізуючи отримані результати зображені на рис. 6.1, побачимо, що здійснюється асимптотичне відпрацювання швидкості та потокозчеплення. В системі повністю відсутня статична похибка по швидкості. Динамічна похибка при накиданні та скиданні номінального моменту складає 5 рад/с, яка затухає до нуля за час $t = 0.1$ с.

Дослідивши похибку відпрацювання модуля потокозчеплення, що зображена на рисунку 6.1, аркуш 1 можна побачити, що в системі присутня похибка, яка рівна його початковому значенню і затухає до нуля за час $t = 1.2$ с.

Аналізуючи графік струму по осі q , що відповідає за момент, на рисунку 6.1, аркуш 2 можна побачити, що динамічний момент при розгоні, гальмуванні, накиданні моменту збурення та його скиданні, майже однакові і рівний номінальному моменту двигуна.

Модуль напруги статора (рисунок 6.1, аркуш 3) не перевищує 311 В. Система полеорієнтована тому, що значення потокозчеплення по осі q дуже мале і асимптотично прямує до 0 за час, який приблизно дорівнює $t = 1.3$ с, що можна побачити з рисунку 6.1, аркуш 1. Механічна потужність (рисунок 6.1, аркуш 3) в статичному режимі приблизно дорівнює номінальній. З графіку потокозчеплення можна побачити, що електромеханічна та механічна системи між собою розв'язані, оскільки прикладання моменту збурення не впливає на похибку відпрацювання модуля потокозчеплення.

Висновок до розділу 6

В даному розділі було досліджено статичні та динамічні характеристики системи керування при відпрацюванні заданої траєкторії швидкості та потокозчеплення, а також було проаналізовано отримані результати які зображені на рис. 6.1.

ВИСНОВОК

Було зазначено, що в даний час найбільшою і найбільш важливою областю застосування силових електроніки є електропривод і його використовують у всіх областях людської діяльності і він споживає більше 60% усієї вироблюваної електроенергії. Та саме електропривод є основним нелінійним споживачем електроенергії і головним джерелом нелінійних спотворень в системі електропостачання, і напруг, і споживачів реактивної потужності, що робить негативний вплив як на мережу живлення в цілому, так і на інших споживачів електроенергії зокрема, і призводить до значних економічних збитків. В даний час найбільш ефективними пристроями компенсації нелінійних спотворень і реактивної потужності є активні фільтри електроенергії (АФЕ).

1. В результаті аналітичного огляду в області активної фільтрації, було розглянуто типові технічні рішення активних фільтрів, а саме паралельні, послідовні, комбіновані активні фільтри, а також гібридного пасивно-активний ФЕ. Були зазначені переваги та недоліки активного фільтру електроенергії. Окремо здійснили опис паралельного активного фільтру, навели схему його підключення до трифазної мережі живлення, принципову схему, структурну схему та його можливості при не симетрії, створеній мережею живлення чи навантаженням. Та навели алгоритм роботи системи керування активним фільтром.

2. Було сформовано вимоги та принципи керування паралельного активного фільтра, було розглянуто матричний перетворювач з паралельним та послідовним активним фільтром для коригування миттєвих струмів і напруг мережі та навантаження, також наведені загальні принципи використання теорії миттєвої потужності для активної компенсації. Та було визначенні умов доцільного застосування активної фільтрації.

3. Проведено аналіз впливу електроприводів змінного струму на мережу живлення, зазначено о переході промислового сектора економіки на використання сучасних високотехнологічних та енергоефективних типів регульованого електроприводу і у зв'язку з цим взаємодія з мережею живлення системи «ПЧ-АД» стала одним з головних джерел нелінійних спотворень струмів, напруг і споживачів реактивної потужності. Було проведено моделювання активного фільтра в програмному середовищі MATLAB. За допомогою цього дослідили нелінійне навантаження та компенсували гармонійні струмові лінії при балансуванні та неврівноваженому навантаженні. В результаті моделювання встановлено, що активний фільтр є кращим способом зменшення сумарного коефіцієнту гармонійних складових, що вимагається стандартами якості IEEE - 519.

4. Розраховані параметри та номінальні дані АД 4A160M8Y3. Розраховано силову частину перетворювача частоти та здійснено вибір силових елементів.

5. Виконано дослідження динамічних та статичних характеристик при відпрацюванні заданої траєкторії швидкості та потокозчеплення. Результати дослідження динамічних режимів свідчать про те, що розроблений ЕП задовольняє стандартним показникам якості двигуна. На основі цих графіків видно, що здійснюється асимптотичне відпрацювання швидкості та потокозчеплення, в системі повністю відсутня статична похибка по швидкості та система полеорієнтована

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Пересада С. М., Ковбаса С.М. Теорія мехатронних систем – 1. «Електромеханіка» спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» Київ:, 2011. 96 с.
- 2) Пересада С. М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть I. Проблемы векторного управления в асинхронном электроприводе: краткий обзор и формулировка проблем // Техн. електродинаміка. Київ, 1999. №27, С. 27 – 32.
- 3) Железко, Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю.С. Железко - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 224 с.
- 4) Шидловский, А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. - Киев: Наукова Думка, 1985. - 268 с.
- 5) Каргин, СВ. Управление качеством электроэнергии в распределительных сетях общего назначения / СВ. Каргин, А.Н. Краснова, Р.Р. Бекбулатов. М.: НТФ "Энергопрогресс", 2012.-108 с.
- 6) Pitel, I. A review of the effects and suppression of power converter harmonics / I. Pitel, S.Talukdar // IAS annual meeting, 1977. - С 119-127.
- 7) Розанов, Ю.К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий // Электротехника. 1998.-№3.-С 10-17.
- 8) Климов, В.П. Способы подавления высших гармоник тока в системах электропитания / В. П. Климов, А. Д. Москалев. - М.: АОЗТ ММП-Ирбис, 2002. 8 с.
- 9) Шидловский, А.К. Частотно-регулируемые источники реактивной мощности/ А.К. Шидловский, В.С. Федий. - Киев: Наук. Думка, 1980. – 304с.

10) Cameron, M. M. Trends in Power Factor Correction with Harmonic Filtering / M. M. Cameron // Spectrum IEEE. - 1993. - № 7, - С 45-18.

11) David, A. T. Single-phase active power filters for Multiple nonlinear loads / A. T. David, M.A.M. Al-Zamel. Adel // IEEE Trans, on power electronics. - 1995. №3.-С 263-272.

12) Moran, L. Using active power filters to improve power quality / L. Moran, J. Dixon, J. Espinoza, R. Wallace // 5th Brazilian Power Electronics Conference COBEP, 1999.-С 108-110.

13) Волков, А.В. Исследование функционирования и энергоэффективности применения силового активного фильтра для четырехпроводной трехфазной сети переменного напряжения / А.В. Волков, В.П. Метельский, В.А. Волков // Техническая электродинамика. - 2010. - №5. - С. 61-68.

14) Moran, L. Using active power filters to improve power quality / L. Moran, J. Dixon, J. Espinoza, R. Wallace // 5th Brazilian Power Electronics Conference, COBEP'1999.

15) Fujita, H. A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems / H. Fujita, H. Akagi // Series Connection of Passive and Active Filters IEEE Trans. Ind. App.-1991.-№5.-С. 1020-1025.

16) Крутиков, К.К. Применение многофункциональных силовых активных фильтров в составе мощного частотно-регулируемого электропривода / К.К. Крутиков, В.В. Рожков // Электричество. - 2011. - №2. - С. 32-38.

17) Driesen, J. The development of power quality markets / J. Driesen, T. Green, T. Van Graenenbroeck, R. Belmans // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002 - №1. - С 262-267.

18) Sandeep, G. J. Importance of Active Filters for Improvement of Power Quality / G. J. Sandeep, Sk. Rasoolahemmed // International Journal of

Engineering Trends and Technology (IJETT). - 2013. - № 4. - С. 1164-1171.

19) H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits, IPEC'83 - Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983, pp. 1375-1386.

20) H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", IEEE Trans. Industry Applic., vol. 20, May/June 1984.

21) Карташев, И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения / И.И. Карташев. - М.: Издательство МЭИ, 2000.- 120 с.

22) IEEE Standart 519-1992 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. - New York: IEEE, 1993. - 65 с.

23) Кужекин, И.П. Основы электромагнитной совместимости современного энергетического оборудования: учебное пособие для вузов / И.П. Кужекин. - М.: Издательский дом МЭИ, 2008. - 144 с.

24) Nejdawi, I.M. Harmonic Trend in the USA: A Preliminary Survey / I.M. Nejdawi, A.E. Emanuel, D.J. Pileggi, M.J. Corridori, R.D. Archambeault // IEEE Transactions on Power Delivery. - 1999. - № 4. - С. 1488-1494.

25) Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения пром-предприятий / И.В. Жежеленко. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1984.- 160 с.

26) Глебов, И.А. История электротехники / И.А. Глебов. - М.:Издательство МЭИ, 1999.-524 с.

27) Карпов, И В Высшие гармоники в трехфазных цепях текст. / ИВ. Карпов // Электричество. - 1992. - №11. - С. 53-54.

28) Крайчик, Ю.С. Связь между реактивной мощностью и искажениями напряжений / Ю.С Крайчик // Электричество. - 1998. - №5. - С. 71-73.

29) Лабунцов, В.А. Трехфазный выпрямитель с емкостным фильтром и улучшенной кривой потребляемого тока / В.А. Лабунцов, Чжан Дайжун // Электричество. - 1993.-№12. - С. 45-48.

30) Баханов, Л.Е. Влияние на сеть мощных управляемых выпрямителей с фильтрокомпенсирующими устройствами /Л.Е. Баханов, И.Т. Коваленко, И.И. Левитан // Электричество. - 1986. - №9 - С. 32-36.

31) Беляев, В. Л. Гармонический состав сетевого тока частотных электроприводов с широтно-импульсной модуляцией / В. Л. Беляев, С. Н. Радимов // Электромеханические и энергосберегающие системы. - 2012. - №3. - С. 469-471.

32) Каталог конденсаторів URL: <https://ru.mouser.com> (дата звернення 15.05.2020).

33) Датчик струму URL: <http://coretech.com.ua/current-sensor-hall> (дата звернення 15.05.2020).

34) Датчик напруги URL: <https://in.element14.com/lem/lv-25-p/voltage-transducer-pcb/dp/1617416> (дата звернення 15.05.2020).

35) Енкодери та їх підбір по параметрам двигуна URL: <http://www.svaltera.ua/enkoderi/> (дата звернення 15.05.2020).

36) Каталог енкодерів URL: <https://prom.ua> (дата звернення 15.05.2020).

37) Каталог випрямлячів URL: <https://asenergi.com/catalog/diodnyemosty/sql.html> (дата звернення 15.05.2020).

38) ГОСТ 13109-97. Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах

електропостачання загального призначення. - Введ. в Україні 01.01. 2000. - (Міждержавний стандарт).

39) H. S. Kim, H. Akagi, "The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames," in Proc. IEEE/PEDS 1999 Conf., Hong Kong, Jul., pp. 422–427.