

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____Петро ПЛЄШКОВ

“___” _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти

на тему:

**«Дослідження можливостей зменшення впливу частотно-
регульованих електроприводів на якість електричної
енергії в системі електропостачання»**

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу, групи *ЕЕ-22М*

ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»

спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»,

_____ Олександр ОСІПОВ

«___» _____ 2023 р.

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____ Катерина ПЕТРОВА

«___» _____ 2023 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

завідувач кафедри ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор

Петро ПЛЕСКОВ
« 09 » 10 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Осінова Олександра Миколайовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Дослідження можливостей зменшення впливу частотно-регульованих електроприводів на якість електричної енергії в системі електропостачання

Study of the possibilities of reducing the impact of variable frequency drives on the quality of electricity in the power supply system

2. Керівник роботи Петрова Катерина Григорівна, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 31.12.2023 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою роботи є дослідження можливого впливу частотно-регульованого електроприводу на якість електричної енергії в системах електропостачання. Досягнення поставленої мети було забезпечене вирішенням наступних завдань: 1) проаналізувати існуючий стан та виконати огляд тенденцій розвитку систем управління електроприводами; 2) виконати дослідження проблеми генерування вищих гармонік регульованими електроприводами, виявити їх негативний вплив на силові елементи електроприводу та мережу живлення; 3) виконати математичне моделювання системи «ПЧ-АД» задля аналізування динамічних характеристик електропривода; 4) виконати експериментальні дослідження складу кривих струму та напруги на шинах 0,4 кВ; 5) виконати розрахунок параметрів та вибір ФКП для досліджуваної мережі.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц., к.т.н. Савеленко І.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	10.10.2023 р.	
2	Аналіз існуючого стану та огляд тенденцій розвитку систем управління електроприводами	13.10.2023 р.	
3	Дослідження проблеми генерування вищих гармонік регульованими електроприводами	25.10.2023 р.	
4	Експериментальні дослідження складу кривих струму та напруги на шинах 0,4 кВ	30.10.2023 р.	
5	Розрахунок параметрів ФКП для мереж 0.4 кВ	15.11.2023 р.	
6	Висновки, список використаних джерел	30.11.2023 р.	
7	Оформлення додатків	07.12.2023 р.	
8	Оформлення презентаційної частини КР	15.12.2023 р.	

Дата видачі завдання

«____» _____ 2023 р.

Підпис керівника

Катерина ПЕТРОВА

Завдання прийнято до виконання

«____» _____ 2023 р.

Підпис здобувача

Олександр ОСІПОВ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 125 с., 50 рис., 12 табл., 24 джерела

Осіпов О. М. Дослідження можливостей зменшення впливу частотно-регульованих електроприводів на якість електричної енергії в системі електропостачання. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет; Кропивницький, 2023 р.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження можливостей впливу частотно-регульованого електроприводу на якість електричної енергії в системах електропостачання.

У роботі розглянуто доцільності впровадження частотно-регульованих електроприводів в залежності від типу навантаження; розглянуто питання його впливу на якість електроенергії в системі електропостачання; виявлена проблема генерації вищих гармонічних складових струму та напруги в системі електропостачання, запропоновано встановлення додаткових технічних засобів для зниження негативного впливу; розроблено математичну модель системи «ПЧ-АД» для аналізу впливу фільтра на виході інвертора на динамічні характеристики електропривода.

Результати досліджень можуть бути використані для обґрунтування інтенсифікації впровадження частотно-регульованого електроприводу та під час розроблення заходів щодо зменшення впливу частотно-регульованого електроприводу на якість електроенергії в системах електропостачання.

ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, ВИЩІ ГАРМОНІКИ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИЙ ПРИСТРІЙ

ABSTRACT

Qualification work: 125 p.; 50 fig.; 12 tables; 24 source

Osipov O.M. Study of the possibilities of reducing the impact of variable frequency drives on the quality of electricity in the power supply system. - Manuscript.

Qualification thesis second (master's) level of higher education on speciality 141 "Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics" professional program " Electrotechnical Systems of Power Consumption". – Central Ukrainian National Technical University; Kropyvnytskyi, 2023.

The purpose of the qualification work is to study the possibilities of the influence of the frequency-regulated electric drive on the quality of electrical energy in power supply systems.

The work considers the feasibility of introducing frequency-regulated electric drives depending on the type of load; the issue of its impact on the quality of electricity in the power supply system is considered; the problem of generating higher harmonic components of current and voltage in the power supply system was identified, it was proposed to install additional technical means to reduce the negative impact; a mathematical model of the "PCH-AD" system was developed to analyze the influence of the filter at the output of the inverter on the dynamic characteristics of the electric drive.

The results of the research can be used to justify the intensification of the introduction of the frequency-regulated electric drive and during the development of measures to reduce the impact of the frequency-regulated electric drive on the quality of electricity in power supply systems.

FREQUENCY REGULATED ELECTRIC DRIVE, POWER QUALITY,
HIGHER HARMONICS, ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY,
FREQUENCY CONVERTER, FILTER COMPENSATION DEVICE

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ ТА ОГЛЯД ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ	12
1.1. Загальний огляд.....	12
1.2. Фази розвитку електропривода з асинхронним частотним регулюванням.....	13
1.3. Огляд методів управління частотно-регульованими електроприводами відповідно до типу навантаження.....	17
Висновки до розділу 1	25
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК РЕГУЛЬОВАНИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ.....	26
2.1. Основні джерела генерування гармонік.....	26
2.2. Негативний вплив ВГ на силові елементи електроприводу та мережу живлення.....	29
2.3. Основні підходи до зниження рівня вищих гармонік.....	37
2.4. Математичне моделювання системи «ПЧ-АД» для аналізування динамічних характеристик електропривода.....	53
Висновки до розділу 2	66
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ КРИВИХ СТРУМУ ТА НАПРУГИ НА ШИНАХ 0,4 КВ.....	67
3.1. Методика дослідження складу кривих струму і напруги на шинах 0,4 кВ.....	67
3.2. Дослідження неефективної роботи електричного обладнання внаслідок великого рівня вищих гармонік.....	79
3.3. Електромагнітна сумісність перетворювачів частоти і асинхронних двигунів.....	82

3.4. Забезпечення електромагнітної сумісності ЧРП та СЕП.....	85
Висновки до розділу 3	91
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ФКП ДЛЯ МЕРЕЖ 0.4	
КВ.....	93
Висновки до розділу 4	104
ВИСНОВКИ.....	105
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	108
ДОДАТКИ.....	111
ДОДАТОК А. Охорона праці.....	112
ДОДАТОК Б. Апробація результатів кваліфікаційної роботи.....	125

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД	– асинхронний двигун;
АІН	– автономний інвертор напруги;
АФ	– активний фільтр;
БК	– батарея конденсаторів;
ВГ	– вищі гармоніки;
ГФ	– гібридний фільтр;
ДСП	– дугові сталеливарні печі;
ЕЕ	– електрична енергія;
ЕД	– електричний двигун;
ЕП	– електропривід;
ЕМС	– електромагнітна сумісність;
ККД	– коефіцієнт корисної дії;
ММ	– математична модель;
ПЗ	– програмне забезпечення;
ПС	– постійний струм;
ПЧ	– перетворювач частоти;
СД	– синхронний двигун;
СЕР	– система електропостачання;
СП	– силовий перетворювач;
ФКП	– фільтрокомпенсуючий пристрій;
ЧРП	– частотно-регульований електропривід.

ВСТУП

Актуальність теми. На разі однією з найгостріших проблем енергетики України є питання стабільного енергозабезпечення споживачів, що обумовлює підвищення актуальності проблеми раціонального використання та заощадження енергоносіїв.

Застосування енергозберігаючих технологій у побуті, промисловості та транспорті може значно знизити навантаження на енергетичну систему. Основні втрати (до 90 %) характерні частині енергоспоживання, що й обумовлює необхідність концентрації основних зусиль зі збереження електричної енергії у цьому напрямку. Оскільки електроприводи споживають близько 60-70 % виробленої електричної енергії, найбільшого значення її заощадження можна досягнути за рахунок поєднання регульованих електроприводів та можливостей їх автоматизації для управління технологічними процесами.

Частотно-регульовані приводи (ЧРП) займають домінуючі позиції серед інших типів приводів та широко використовуються у промисловості для регулювання обертового моменту й швидкості руху обладнання, що допомагає зменшити втрати енергії при частковому навантаженні, тому в роботі розглядається доцільність саме їх впровадження. У той же час, застосування ЧРП провокує генерування вищих гармонік (ВГ) та спотворення форми напруги та струму. ВГ, згенеровані потужним обладнанням, можуть провокувати додаткові втрати; викликати електромагнітні завади, які впливають на інші пристрої та системи, особливо якщо приводи встановлені в близькості до інших електронних пристроїв; завдають шкоди нормальній роботі інших споживачів, приладів керування, негативно впливають на стійкість енергосистем.

Отже, використання ЧРП з напівпровідниковими перетворювачами обумовлюють впровадження додаткових технічних засобів для нівелювання генерування у мережу ВГ струму та напруги. Найперспективнішим підходом є використання силових фільтрів у складі фільтрокомпенсуючих пристроїв.

Такий підхід не лише дозволить вирішити питання з наявністю ВГ у мережі, а й частково або повністю дозволить розв'язати задачу компенсації реактивної потужності.

У роботі розглянуто доцільності впровадження частотно-регульованих електроприводів в залежності від типу навантаження; досліджено його вплив на якість електроенергії в системі електропостачання; виявлена проблема генерації вищих гармонік, наведені шляхи її вирішення; розроблено математичну модель системи «ПЧ-АД» для аналізування впливу впровадження фільтра на динамічні характеристики електропривода; запропоновано впровадження технічних засобів для зниження рівня негативного впливу ВГ.

Мета та завдання дослідження – є дослідження можливого впливу частотно-регульованого електроприводу на якість електричної енергії в системах електропостачання.

Досягнення поставленої мети було забезпечене вирішенням наступних завдань:

- проаналізувати існуючий стан та виконати огляд тенденцій розвитку систем управління електроприводами;
- виконати дослідження проблеми генерування вищих гармонік регульованими електроприводами, виявити неативний їх вплив на силові елементи електроприводу та мережу живлення;
- виконати математичне моделювання системи «ПЧ-АД» задля аналізування динамічних характеристик електропривода;
- виконати експериментальні дослідження складу кривих струму та напруги на шинах 0,4 кВ;
- виконати розрахунок параметрів та вибір ФКП для досліджуваної мережі.

Об'єктом дослідження є частотно-регульований електропривод як елемент СЕП.

Предметом дослідження є методи та засоби зменшення впливу частотно-регульованих електроприводів на якість електричної енергії в системі електропостачання.

Основні тези за результатами кваліфікаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародній науково-практичній конференції «Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК», 9 листопада 2023 року (Державний біотехнологічний університет, м. Харків) (сертифікат участі - див. дод.Б).

Результати досліджень можуть бути використані для обґрунтування інтенсифікації впровадження частотно-регульованих електроприводів та під час розроблення заходів щодо зменшення впливу частотно-регульованого електроприводу на якість електроенергії в системах електропостачання.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ ТА ОГЛЯД ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

1.1. Загальний огляд

Електропривід - це система, призначена для перетворення ЕЕ в механічну роботу з метою керування рухом об'єкта або механізму. В основному, електроприводи використовуються для надання руху, зміни положення, обертання або інших механічних операцій обладнання та машин. Використання ЕП для промисловості, транспорту, а також і в побуті постійно зростає. На разі, близько 60-70 % виробленої ЕЕ в світі споживають електричні двигуни. Тому, підвищення рівня ефективності енергоощадних технологій корелює з рівнем ефективності електроприводу, а впровадження компактних, економічних та високопродуктивних систем приводу є одним з пріоритетних напрямків.

Виконаний аналіз наукових досліджень та продукції провідних виробників дозволяє виокремити основні тенденції розвитку ЕП [1, 2]:

- зменшення відсотку систем з двигунами постійного струму та відповідне зростання – на базі двигунів змінного струму. Така тенденція обумовлена низькими показниками надійності колектора та значно вищою вартістю двигунів постійного струму. Фахівці прогнозують зменшення відсотку приводів постійного струму за наступні десять років до 8-10 % від загальної кількості електроприводів;
- зменшення вартості статичних перетворювачів частоти обумовлює інтенсифікацію впровадження ЧРП, особливо для приводів нерегульованих АД з короткозамкненим ротором;
- більш широкого впровадження набувають електронно-комутовані (вентильні) двигуни; як виконавчі безколекторні ЕД ПС переважного

використання набули СД з електромагнітним збудженням (для значних потужностей) або зі збудженням від постійних магнітів;

- найперспективнішим є використання приводів на базі ВІД, технологічно такого типу двигуни простіші у виготовленні, і у той же час, технологічні та значно дешевші;

- переважна більшість приводів вимагає відносно незначного діапазону регулювання швидкості та незначної швидкодії, тому для них доцільно використовувати принципи скалярного управління; впровадження широкодіапазонних, швидкодіючих приводів у свою чергу вимагає застосування складніших структур векторного управління, відсоток таких приводів становить близько 5-8 % і невідомо зростає останнім часом;

- збільшення кількості обчислювальних можливостей вбудованих систем управління ЕП вимагає розширення їх функцій. В умовах прямого цифрового управління СП додаються й функції підтримання інтерфейсу з користувачем (зокрема, через пульт оперативного управління) та управління технологічними процесами.

Основні витрати під час розроблення систем управління приводами характерні не створенню апаратної частини безпосередньо контролера, а витрачаються на розроблення алгоритмічного та програмного забезпечення. А отже, функціональна роль спеціалістів з теорії електроприводу суттєво збільшується.

Наразі, існують регульовані ЕП змінного струму різних типів, системи яких постійно модернізуються. У той же час, низькою є вірогідність зменшення їх різноманіття до однієї-двох схем, що характерне приводам постійного струму, це обумовлено специфічними перевагами кожного з них.

1.2. Фази розвитку електропривода з асинхронним частотним регулюванням

Однією з найпростіших електричних машин, що широко застосовуються в промисловій галузі, є АД з короткозамкнутим ротором.

Конструкційно він доволі компактний незначної маси на одиницю потужності та нескладний під час експлуатації. Цей й обумовлює настільки широке його впровадження в різних галузях промисловості, особливо асинхронних електроприводів середньої потужності до 500 кВт (клас напруги 380, 660 В).

У той же час, АД органічно властивий значущий недолік, що полягає у складнощах регулювання швидкості обертання у разі живлення від системи з постійними значеннями напруги та частоти. Це й визначило доцільність впровадження приводів сталого струму для управління машинами і установками за наявності вимог регулювання швидкості. Однак недоліки, характерні двигунам постійного струму, залишають електропровід найслабшою ланкою технологічного обладнання.

Поява у 70-ті роки минулого сторіччя інверторних тиристорів з незначним періодом вимкнення ознаменувала початок етапу серійного виробництва ЧРП багатьма відомими електротехнічними фірмами світу. Цьому періоду характерний перехід в реалізації САУ електроприводів (від алгоритму підтримання сталого значення відношення напруги до частоти аж до найскладніших алгоритмів, наприклад частотно-струмових) та заміна елементної бази, що ґрунтувалась на схемах малої та середньої інтеграції до мікропроцесорних пристроїв [1-4].

Вже на початку 80-х років ХХ століття з'явилися передумови для наступного етапу впровадження асинхронних ЕП за рахунок появи нових комплектуючих, зокрема замикаючих тиристорів, потужних біполярних транзисторів, а також швидкодіючих мікропроцесорних засобів. Наявність таких комплектуючих дозволили виконати якісний стрибок основних показників ЧРП (енергетичних, масогабаритних та експлуатаційних), що, в свою чергу, розширило їх застосування для вирішення задач здебільшого притаманних для приводів ПС.

Другій половині 80-х років ХХ століття характерне зростання кількості наукових робіт та розробок спрямованих на вдосконалення алгоритмів функціонування систем управління та регулювання ЕП, а також засобів їх

реалізації. Такі зрушення викликані необхідністю покращення статичних та динамічних характеристик.

Наприкінці 1995 р. з'явилися ЧРП нового типу, зокрема ACS-600 фірми ABB, котрі за своїми характеристиками не поступалися ЕП постійного струму, а за деякими показниками й перевершували їх. Так, для ЕП типу ACS-600 характерне відпрацювання 100-відсоткового завдання моменту за (1,0...2,0) мс для потужностей в межах від 2,20 до 315,0 кВт, а це є межею для АД; точніше регулювання моменту за низьких значень частот, а також 100 % момент під час переходу АД ЕП через значення нульової швидкості; забезпечення точності підтримання швидкості 10 % ковзання без використання давача швидкості; за умов використання цифрового давача точність підтримання швидкості може сягати менше 0,01 %.

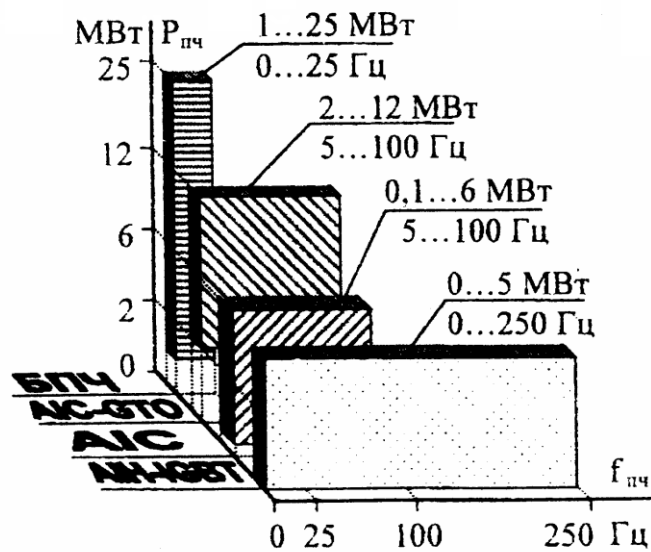
Отже, поява на ринку такого типу ЕП (ACS-600) за наявності ЕП постійного струму обґрунтувала їх взаємозамінність для потужностей від 2,20 до 315,0 кВт.

Тож, виробництво фірмою ABB ЧРП практично визначає закінчення другого та початок третьої фази розвитку такого класу ЕП. До інших виробників подібної продукції належать: Siemens, Schneider Electric, Toshiba, Control Techniques, Hitachi, Fuji Electric, Lovato Electric, General Electric, LS Industrial Systems, Danfoss, Helmke, Mitsubishi Electric, Vacon, Emotron тощо.

ПЧ поділяють на два основні типи:

- з безпосереднім зв'язком (безпосередні ПЧ, циклоконвертери);
- з проміжним контуром ПС (перетворювачі на базі автономних інверторів струму та напруги).

Доцільність використання певного перетворювача обумовлюється значеннями необхідних потужностей навантажувальних механізмів та режимів їх використання. На рис. 1.1. наведено діаграму розподілу ЕП за діапазонами регулювання частоти та значенням потужності.



АІН-ІGBT – перетворювачі із автономними інверторами напруги на IGBT-транзисторах,

АІС – перетворювачі із автономними інверторами струму на одноопераційних тиристорах;

АІС-ГТО – перетворювачі із автономними інверторами струму на двоопераційних GTO (або IGCT) тиристорах;

БПЧ – безпосередні перетворювачі частоти.

Рис. 1.1. Розподіл ЕП за діапазонами регулювання частоти та значенням потужності

Для ПЧ з безпосереднім зв'язком синусоїдальна форма вихідної напруги створюється з ділянок синусоїд перетворюваної вхідної напруги. У такому випадку максимальне значення вихідної частоти не буде дорівнювати значенню частоти мережі живлення. Частота на виході, характерна для таких перетворювачів, у діапазоні від 0,0 до 25,0..33,0 Гц. Найпоширенішими стали перетворювачі частоти з проміжним контуром ПС на базі інверторів напруги. На рис.1.2 наведена структурна схема такого перетворювача.

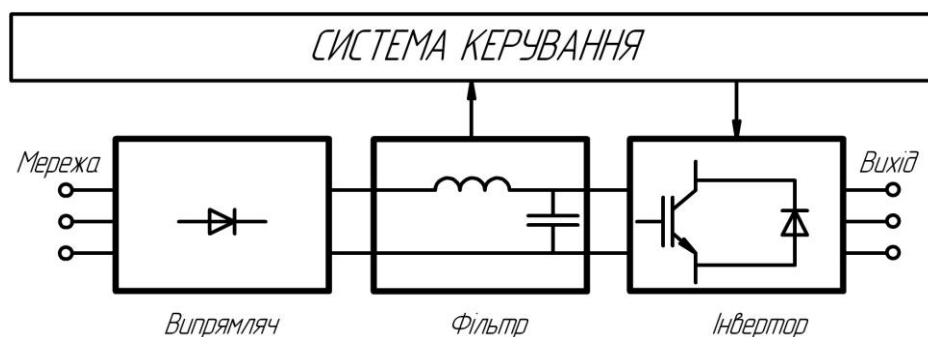


Рис. 1.2. Структурна схема перетворювача

1.3. Огляд методів управління частотно-регульованими електроприводами відповідно до типу навантаження

Основні вимоги до ЕП обумовлюються діапазоном необхідних швидкостей та типами навантажень. Залежність між значенням швидкості обертання та моменту опору різняться для різних типів навантажень (рис. 1.3). Деякі типи навантажень можуть мати постійний момент за всього діапазону зміни швидкості, зокрема: поршневі насоси, компресори, конвеєри тощо.

Іншим же видам навантажень притаманна змінна механічна характеристика, що характеризується зростанням моменту навантаження зі збільшенням значень швидкості обертання. До навантажень такого типу належать вентилятори та відцентрові насоси, для яких значення споживаної потужності пропорційне швидкості обертання у третій степені, а крива механічної характеристики описується рівнянням квадратичної параболи. Тобто, навіть незначне зменшення швидкості ЕП дає значну перевагу в потужності. Це і є головним аспектом доцільності впровадження керованого ЕП для насосів та вентиляторів. Так, теоретично зменшення швидкості на 10 % дає 30 % заощадження потужності.

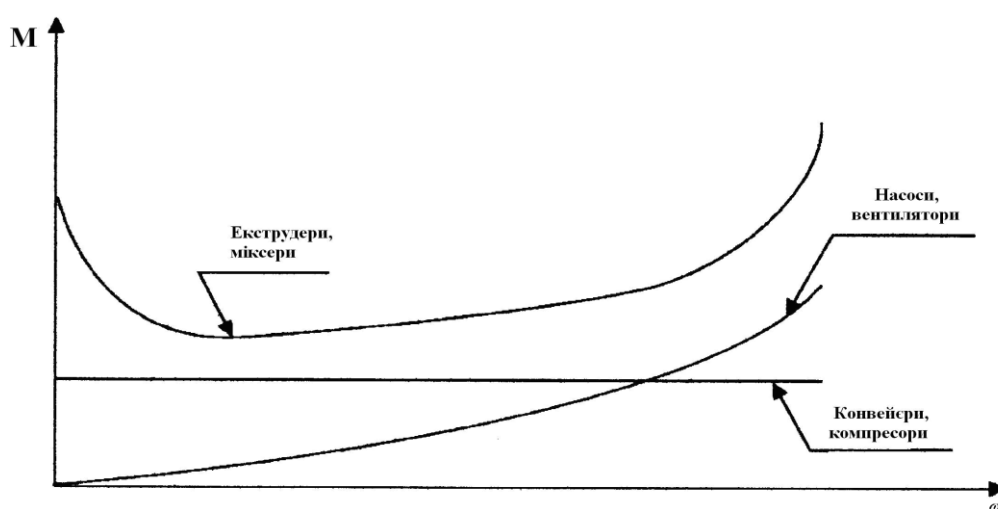


Рис. 1.3. Графік залежності швидкості обертання та моменту для різних типів навантажень

До видів навантажень, крива механічної характеристики яких близька до характеристики насосів та вентиляторів, належать, зокрема: екструдери, промислові міксери. Характерною відмінністю навантаження такого типу є високий пусковий момент, який із зростанням швидкості зменшується, а сягаючи деякого значення, форма характеристики набуває виду квадратичною.

Необхідно наголосити щодо значної кількості інших типів навантажень з абсолютно унікальними формами механічних характеристик. Тобто, в будь-якому випадку, перед процесом вибору типу електродвигуна та перетворювача частоти доцільно аналізувати тип навантаження та вид його механічної характеристики.

Відповідно до характеру навантаження ПЧ забезпечує режим управління ЕД, реалізуючи необхідну функціональну залежність між швидкістю обертання ЕД та значенням вихідної напруги.

Режим з лінійною залежністю напруги та частоти $U/f = \text{const}$ реалізують простими ПЧ, що дозволяє забезпечити стаке значення моменту навантаження та застосовується для управління СД або двигунами, під'єднаними в паралель. У той же час, у випадку зменшення частоти, починаючи з певного значення відповідний максимальний момент ЕД починає зменшуватись. Задля збільшення значення моменту за низьких значень частот в перетворювачах наявна функція підвищення стартового значення вихідної напруги, яка необхідна для компенсації падіння моменту, наприклад для навантажень з незмінним моментом, або збільшення стартового моменту для навантажень зі значним пусковим моментом, зокрема, таких як: промисловий міксер тощо.

Регулювання ЕП насосів та вентиляторів передбачає квадратичну залежність $U/f^2 = \text{const}$. Такий режим застосовують для управління паралельно під'єднаними ЕД. У той же час, підвищення якості управління ЕП вимагає використання більш досконалих методів управління. До таких методів

належать: безсенсорного векторного управління та метод управління потокозчепленням. Обидва методи ґрунтуються на використанні адаптивної моделі управління ЕД зі спеціалізованим обчислювальним пристроєм у складі блоку управління перетворювача.

Точніше та ефективніше регулювання можна забезпечити за рахунок векторного управління без давача зворотного зв'язку за швидкістю (SVC). У двигунах ПС наявні дві обмотки (збудження та якірні), що дозволяє здійснювати регулювання окремо швидкості обертання та електромагнітного моменту, для двигунів змінного струму з короткозамкненим ротором характерна одна статорна обмотка, яка й формує збуджуюче магнітне поле та визначає момент обертання. Це й обумовлює складність управління ЕД. А отже, єдиним можливим шляхом є управління амплітудою та фазою струму статора. Таку задачу доцільно розв'язувати з використанням давача положення, зокрема: шифратора приростів. Така конфігурація дозволяє привод змінного струму за якістю регулювання співвіднести з приводом ПС, однак переважна більшість стандартних ЕД змінного струму не мають вбудованих здавачів положення, адже це значно ускладнить конструкцію самого ЕД та збільшить його вартість.

Впровадження технології векторного управління дозволяє оминати ці обмеження за рахунок математичної адаптивної моделі ЕД для прогнозування положення ротора. У такому разі система управління має з високою точністю вимірювати вихідні значення струмів та напруг, забезпечувати визначення параметрів ЕД, зокрема: опору статора, індуктивності розсіювання, моделювати теплові характеристики ЕД з різними режимами роботи, виконувати із високою швидкістю значний об'єм розрахунків. Останнє може бути реалізоване впровадженням перетворювача інтегральних схем типу ASIC до системи управління.

Векторне управління за відсутності давачів зворотного зв'язку за швидкістю забезпечуватиме значення динамічних похибок, притаманних регульованому ЕП із замкненим типом зворотного зв'язку. Проте, повне

управління моментом за значень швидкості, близьких до нульового, унеможливлене без наявності зворотного зв'язку за швидкістю. Подібний зворотний зв'язок є необхідним задля досягнення значення похибки регулювання у межах до 1 %, при цьому контур зворотного зв'язку порівняно нескладно реалізується за допомогою власне ПЧ.

У той же час, режим векторного управління має певні обмеження та не може бути застосований для синхронних або реактивних синхронних ЕД, а також для деяких груп ЕД, номінальна потужність котрих менше половини потужності ПЧ або значно перевищує його.

Для ЕП верстатів, роботів та транспортних засобів, котрі працюють у високочастотних, широкодіапазонних та швидкодіяних режимах, доцільно використовувати складні системи векторного управління, що дозволяють забезпечувати:

- високий момент за низьких обертів;
- задання двигуну дуже великих значень прискорення;
- підхоплення ЕД за короткотривалого зникнення напруги живлення без перекидання інвертора;
- здійснення оминання небажаних для механізму швидкостей, зокрема, тих, які пов'язані з механічними проблемами резонансу.

Отож, механізми, для котрих доцільніше використовувати ПЧ з векторним управлінням, це: центрифуги, екструдери, млини, ліфти, крани, підйомні механізми та електротранспорт, екскаватори, бурові та металообробні верстати, високоточні системи позиціонування, папероробні машини, штампувальні преси, машини багатоколірного друку, робототехніка, тощо.

Для кранів. На противагу більшості ЕП промислових механізмів, електропривід крана, зазвичай, не має завчасно заданого циклу. Адже, його режим роботи залежить від комплексу зовнішніх чинників, а навантаження може змінюватись у достатньо широкому діапазоні. Векторне управління є підходом, що дозволяє реалізовувати плавний частотний розгін механізмів

крана з регульованим прискоренням, а також плавне регулювання швидкості у достатньо широкому діапазоні за різних значень та напрямів навантаження, дотяжку або ж точну зупинку механізмів; крім того, роботу головного механізму в режимах силового спуску та підйому.

Для ліфтів. Впровадження систем з векторним управлінням обумовило перехід до використання високошвидкісних ЕД, реалізацію відносно «м'яких» пускогальмівних режимів із високою точністю зупинки ліфтової кабіни, що дозволяє суттєво підвищити комфортності пасажирів.

Для **бурових механізмів** є характерним ротор, що приводить до обертання довгу пружну колону труб. І саме в цьому випадку векторне управління дає можливість зменшувати динамічні навантаження в трубах у разі заклинювання долота, швидко зменшувати кількість обертів ЕД і, за необхідності, реверсувати напрям його обертання. Такий підхід зберігає від механічних руйнувань не лише ЕД, але й власне вартісну колонну труб.

Для **верстатів** підхід на основі векторного управління дозволяє використовувати ЕП не лише на пристроях головного руху з циклічними режимами роботи з високими темпами реверсування, гальмування, розгону, а й на механізмах подавання з досягненням високої точності позиціонування. Впровадження векторного управління дозволяє оминати значень частот, за значень яких робота верстата небажана, і, у той же час, якісно регулювати значення швидкості у широкому діапазоні з обмеженням моменту навантаження.

Екструдери, млини, міксери, центрифуги. Великі значення пускових моментів, що можуть сягати до 150...200 %, є характерною ознакою такого типу механізмів. Зазвичай, ця проблема вирішувалась шляхом застосування керованих ЕП ПС. Однак, враховуючи значну вартість власне ЕД та складнощів, пов'язаних із їх обслуговуванням, присутності часток струмопровідного пилу в повітрі та значного діапазону робочих температур їх використання є досить сумнівним. У той же час, системи з векторним

управлінням дозволяють використовувати відносно дешеві асинхронні ЕД, мати необхідні значення початкового моменту й долати вплив сил тертя.

Насосні та вентиляційні системи. Квадратична характеристика U/f^2 дозволяє здійснювати управління насосами та вентиляторами з найбільшим рівнем ефективності максимально наближаючись до форми їх природної характеристики і, в той же час, зменшуючи рівень втрат енергії. Під час зниження навантаження на валу двигуна й відповідного зменшення значення струму статора перетворювач зменшує напругу на статорі ЕД за незмінної частоти. Внаслідок зниження рівня напруги зменшуються втрати енергії в статорі ЕД, що обумовлює відповідне зменшення загальних втрат енергії в приводній системі. Під час зростання навантаження на валу ЕД процес здійснюється у зворотньому напрямку та ПЧ повертається на визначену номінальну характеристику. Наявність програмованого регулятора пропорційно-інтегровально-диференційного типу дозволяє здійснювати автоматичний контроль аналогового сигналу, що надходить з давача зворотного зв'язку. Власне програмовані релейні виходи дають можливість організувати роботу насосної станції перекачування води у веєрному режимі, а це дає змогу зменшити потужність насосів шляхом збільшення кількості їх одиниць; перманентно контролювати кількість одночасно ввімкнених насосів, що значно зменшує витрату ЕЕ та збільшує їх ресурс. Доцільно зазначити також наявність пропускаємих частот, що задаються споживачем, які дають можливість уникнути резонансу в механізмі ЕД. Серед переліку корисних функцій під час управління насосами та вентиляторами, доцільно також підкреслити можливість «підхоплення» ЕД та можливість його автоматичного перезапуску у випадку зникнення живлення або рестарту під час аварійних вимкнень. Перетворювач може здійснювати перезапускання до десяти разів підряд з витримкою перед ввімкненням від 5,0 до 25,0 с, що є достатнім для переважної більшості насосів та вентиляторів.

Перетворювачі часто комплектуються зовнішнім фільтром радіочастот, використання якого дозволяє ПЧ відповідати усім вимогам ЕМС. Отож,

загальна сукупність позитивних властивостей ПЧ обґрунтовує доцільність його використання для управління відцентровими насосами та вентиляторами, а можливості додаткових модулів розширення дозволяють впроваджувати локальні системи управління та/або інтегрувати ПЧ у вже наявні системи управління.

Вибіг ЕД – це найпростіших спосіб зупинки двигуна. ЕД від'єднують від живлячої мережі та зупиняють інерційно. У такому випадку період часу до повної зупинки не регулюють, а його тривалість визначається інерційними характеристиками ЕД та його навантаження.

Регульований час гальмування може забезпечити генераторний спосіб, суть якого у тому, що перетворювач із заданою швидкістю зменшує значення вихідної частоти до визначеного значення. У такому випадку ЕД стає генератором, котрий перетворює механічну енергію обертання в електричну. Відповідно до типу випрямляючого пристрою ЕЕ або повертається у мережу СЕП або ж накопичується у контурі ПЧ. В іншому разі, за навантажень із значним моментом інерції, для розсіювання енергії може бути необхідним застосування додаткового гальмівного опору, під'єднання якого у випадку виникнення небезпечного значення перенапруги у проміжному контурі перетворювача виконує спеціальна контролююча схема. Отже, головною перевагою такого типу гальмування є визначена тривалість зупинки та відносно високий гальмівний момент. Однак, необхідність використання зовнішнього опору, є певним недоліком.

Для виконання динамічного гальмування з обмотки статора ЕД знімають змінну напругу та подають постійну напругу на одну або дві фази. У такому разі магнітне поле буде обумовлювати спочатку уповільнення, а потім й взагалі утримання ротора в нерухомому стані. Основною перевагою динамічного гальмування є вивільнення електричної енергії в роторі ЕД, що забезпечує відсутність необхідності використання додаткового гальмівного опору, і плавну зупинку. Проте, оскільки значення вихідної частоти перетворювачем не контролюється, то й час гальмування набуває

невизначеності. Ефективність гальмування у такому разі в порівнянні з генераторним методом становитиме близько 30...40 %.

У разі використання комбінованого способу гальмування використовується комбінація обох способів, а саме: до варіативної складової вихідної напруги перетворювача додається ще й постійна складова. Такий спосіб гальмування охоплює в собі переваги двох способів гальмування та, в свою чергу, дозволяє ефективно гальмувати ЕД за короткий час вивільнення тепла в перетворювачі.

Практика застосування ПЧ для управління такого типу навантаження доводить доцільність не лише застосування перетворювача для керування насосами та вентиляторам, а й створювати спеціалізовані системи управління технологічними процесами. Власне такий підхід дозволяє отримати бажаний економічний ефект не лише від зменшення значення споживаної з мережі ЕЕ, однак і отримати додаткову перевагу за рахунок зменшення експлуатаційних витрат, збільшення терміну експлуатації обладнання та значне поліпшення умов праці. Сучасні ПЧ дозволяють отримувати понад 20 параметрів стану ЕП. Відповідне оброблення визначених параметрів дозволяє виконувати достатньо глибоку діагностику обладнання системи та процесів, що відбуваються в ній. З'являється можливість не лише вчасно реагувати на аварійну ситуацію, але й завчасно запобігати її виникненню.

Побудова систем на базі ЧРП, для яких характерним є управління частотою, виконується спільно з контролем цілого комплексу технологічних параметрів та дозволяє зменшити не лише споживання ЕЕ, але й забезпечити заощадження енергоресурсів для всієї системи.

Висновки

1. Для промисловості та у побуті використовують переважно ЕД змінного та постійного струму, проте історично так склалося, що реалізація

регулювання швидкості обертання частіше виконувалась із застосуванням двигунів ПС. Перетворювач у такому разі здійснював регулювання виключно значення напруги, був конструкційно простим з відносно низькою вартістю. Однак, ЕД ПС характерна складність конструкції, критичний під час експлуатації щітковий апарат та й більша вартість.

2. На разі, АД набули більш широкого поширення, вони достатньо надійні, відносно незначної вартості з достатньо непоганими експлуатаційними властивостями. Складність систем електронного регулювання частоти напруги живлення обумовила їх значну вартість до початку 80-х років минулого століття, проте, на разі, вони набули масштабного використання.

3. Переважна більшість виробничих машин та механізмів загальнопромислового застосування (вентилятори, компресори, насоси, конвеєри тощо) вимагають незначного діапазону, невисокої точності регулювання швидкості (до 1:20) та відносно низької швидкодії. У такому разі використовують ЕП з системою скалярного управління АД, а саме із взаємозв'язаним регулюванням частоти та напруги живлення.

4. Впровадження ЧРП в технологічні процеси дозволяє зменшити енергоспоживання технологічним обладнанням. А використання системного підходу, тобто використання ПЧ не лише як елементи схеми керування певного механізму, а як часткових складових комплексних системних рішень з поєднанням широкого набору засобів автоматизації технологічних процесів. Саме такий підхід дозволяє отримати додатковий ефект, що є значно більшим, ніж просто заощадження ЕЕ.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК РЕГУЛЬОВАНИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

На разі, експлуатуються різноманітні системи ЕП, однак більшість з них як пристрій регулювання використовують напівпровідникові перетворювачі. Перетворювачі такого типу і є власне основними джерелом генерування вищих гармонійних складових.

Тож, основна проблема полягає в тому, що регульовані електроприводи можуть виробляти гармоніки у електричній мережі. А це, у свою чергу, може призводити до деформації струму та напруги, що має комплекс негативних наслідків, зокрема:

- додаткові збурення в електричній мережі: гармоніки можуть впливати на інші прилади, під'єднані до електричної мережі, і викликати збурення в їхній роботі;
- втрати енергії: гармоніки можуть призводити до додаткових втрат енергії в системі, особливо в обладнанні, не призначеному для роботи з високочастотними складовими струму чи напруги;
- перегрівання обладнання: надмірні гармоніки можуть призводити до перегрівання обладнання, оскільки вироблена ними енергія, може бути розсіяна у вигляді тепла.

Тож, для дослідження виокремимо три основні напрями: джерела генерування гармонік, їх безпосередній вплив на мережу та обладнання, а також методи та засоби зниження їх рівня.

2.1. Основні джерела генерування гармонік

До складу силової частини регульованого асинхронного ЕП здебільшого належать такі основні частини: випрямляч, ланка ПС з фільтром та інвертор. На рис.2.1. наведена схема силових кіл ЧРП.

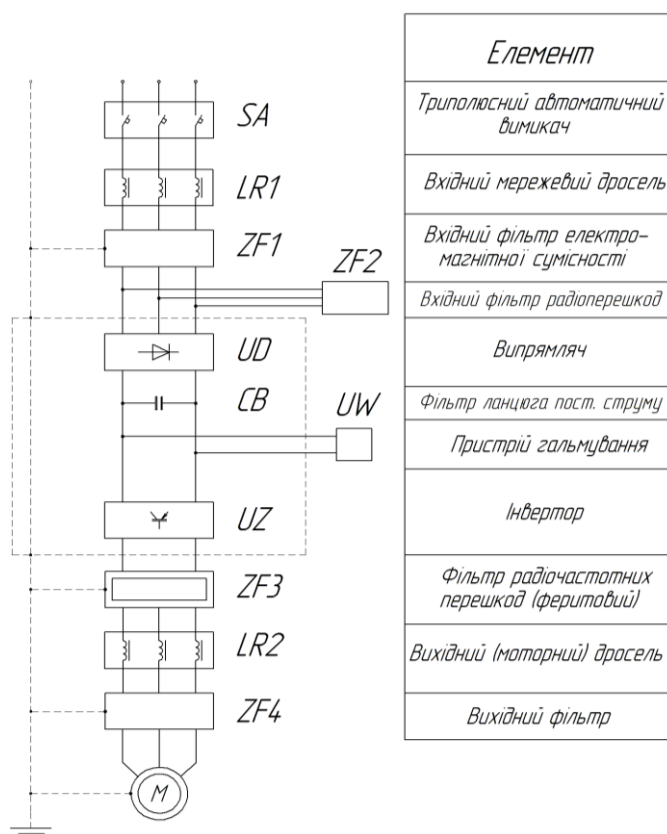


Рис. 2.1. Схема силових кіл ЧРП

Для асинхронних ЕП найпоширенішими є наступні системи:

- 1) ПЧ-АІН - регульований асинхронний ЕП на основі ПЧ з інвертором напруги, для такого типу керуючими сигналами є частота та напруга на статорі;
- 2) ПЧ - АІС ЕП - на основі ПЧ з інвертором струму, для такого типу керуючими сигналами є частота та струм на статорі;
- 3) ШПП – застосування якого дає можливість регулювати не лише напругу та частоту, а й отримувати необхідну, близьку до форми кривої струму на виході інвертора синусоїдальної [22].

Всі наведені системи внаслідок наявності напівпровідникових перетворювачів обумовлюють генерування вищих гармонік в мережу живлення та силові кола ЕП.

Тож, проблемному питанню зменшення негативного впливу вищих гармонійних складових на силові елементи ЕП вимагають особливої уваги.

Аналізуючи форму кривої струму, що створює електромагнітний момент в ЕД, доцільно наголосити, що вона не є чисто синусоїдальною загалом, оскільки перетворювач генерує ряд хвиль струму неоднакової амплітуди і частоти.

Синусоїдна хвиля напруги чи струму може бути подана у вигляді:

$$A_t = A_{\max} \sin(\omega t \pm \theta), \quad (2.1)$$

де $A_{\max}$ – амплітуда струму (напруги);

θ – значення початкової фази.

Викривлена форма кривої струму може бути подана у вигляді ряду Фур'є:

$$A_t = \sum_{\nu=2}^n A_{\nu \max} \sin(\nu \omega t \pm \theta), \quad (2.2)$$

де $\nu = 1, 2, 3, \dots$ – це натуральні числа.

Регульовані ЕП не здійснюють генерування 3-ї гармоніки, але в той же час, можуть генерувати потужні значення 5-ї та 7-ї ВГ, значення котрих може становити до 80 % від значення амплітуди основної). Головною відмінністю ПЧ з безпосереднім зв'язком є можливість генерування інтергармонік (гармонік з дробовими номерами). Крім того, регульованим перетворювачам характерні й неканонічні (аномальні) гармоніки, тобто такі, порядок яких не відповідає кількості пульсацій випрямленого струму. Найпоширеніше підґрунтя появи гармонік такого виду - відхилення кутів керування вентилів щодо заданого значення.

Ото ж, все це значною мірою погіршує рівень якості ЕЕ мережі, провокує зростання втрат в її елементах, негативно впливає на роботу власне ЕП.

2.2. Негативний вплив ВГ на силові елементи електроприводу та мережу живлення

Вплив спотвореної форми вихідної напруги перетворювача на характеристики ЕД корелюють із значенням відхилення та складу кривої напруги від синусоїди. Враховуючи, що ВГ змінюють характеристики ЕП, зростає й рівень втрат. Зокрема, ВГ обумовлюють зменшення значення максимального моменту ЕД орієнтовно на 1-2 %, значення струм статора за номінального навантаження зростає на 2-3 %. Наприклад, якщо значення амплітуд 5-ї та 7-ї гармонік напруги становлять 20 та 15 % значення амплітуди 1-ї гармоніки, то коефіцієнт потужності ЕД зменшується орієнтовно на 2-6 % [22]. Дослідження [21] підтверджують, що за несинусоїдальної напруги рівень відрахувань на капітальний ремонт ЕД зростають на 5,0-10,0 %, а конденсаторів на 10,0-20,0 %.

Узагальнимо наведений вплив ВГ на основне обладнання та елементи мережі живлення [23]:

Трансформатори та реактори:

1. Збільшення втрат енергії: ВГ створюють додаткові енергетичні збурення, які можуть призводити до збільшення втрат енергії в трансформаторах та реакторах. Це може спричинити підвищення температури обладнання та зменшення його ефективності.

2. Магнітне насичення: ВГ можуть викликати магнітне насичення в сердечнику трансформатора чи реактора, що може призводити до спотворень струму та напруги та впливати на нормальну роботу обладнання.

3. Створення ефекту непрямого навантаження на трансформатор: ВГ можуть створювати додаткові обмотки струму та напруги в трансформаторах, що може призводити до додаткових втрат та збільшення температури.

4. Резонансні явища: ВГ можуть викликати резонансні явища в системі, що можуть призводити до небезпечних струмів та напруг та пошкодження обладнання.

Конденсатори:

1. Підвищення струму в конденсаторі: ВГ можуть створювати навантаження на конденсатори, що викликає збільшення струму. Це може призвести до підвищення температури конденсатора та зменшення його ефективності.

2. Збільшення втрат потужності: ВГ можуть призводити до додаткових втрат потужності в конденсаторі через несинусоїдальний характер струму. Це може викликати збільшення теплового навантаження та погіршення роботи конденсатора.

3. Зниження робочого рівня напруги: ВГ можуть зменшувати робочий напруговий рівень конденсаторів. Це може вплинути на їх здатність витримувати робочі умови та призводити до зменшення тривалості експлуатації.

4. Резонансні явища: ВГ можуть викликати резонансні явища в конденсаторах та іншому обладнанні, що може призводити до небезпечних перенапруг та можливого пошкодження конденсаторів.

Силові кабелі:

1. Збільшення струму: ВГ створюють несинусоїдальні струми, які можуть бути більшими, ніж струми основної частоти. Це може призводити до збільшення теплового навантаження на силові кабелі та обладнання, через яке вони проходять.

2. Підвищення втрат потужності: ВГ можуть викликати додаткові втрати потужності в силових кабелях через їхню несинусоїдальну форму. Це може визначати збільшення температурного режиму та погіршення ефективності передачі електроенергії.

3. Ефекти скидання гармонік: силові кабелі можуть реагувати на ВГ в результаті ефекту скидання гармонік (skin effect), де струм, носивший гармоніки, стікає до поверхні провідника, зменшуючи ефективний поперечний переріз провідника.

4. Резонансні явища: ВГ можуть викликати резонансні явища в силових кабелях та прилеглому обладнанні, що може призводити до небезпечних перенапруг та можливого пошкодження кабелів.

5. Деформація напруги та струму: ВГ можуть провокувати деформацію форми струму та напруги в силових кабелях, що може, в свою чергу, впливати на ефективність передачі ЕЕ та працездатність обладнання.

Реле та контактори:

1. Зношення контактів: ВГ створюють несинусоїдальні форми струму та напруги, що може призводити до збільшення зносу контактів у реле та контакторах. Надмірний знос може призвести до втрати надійності та зменшення терміну експлуатації контактів.

2. Електромагнітні перешкоди: ВГ можуть створювати додаткові електромагнітні перешкоди, що впливають на роботу електромагнітних реле. Це може призвести до неправильного включення або виключення реле.

3. Деформація форми струму та напруги: несинусоїдальна форма струму та напруги, що створюється ВГ, може спричиняти деформацію сигналу у вході реле, що може погіршувати його точність та стійкість.

4. Перегрів контакторів: ВГ можуть призводити до збільшення струму в контакторах, що може викликати перегрівання та погіршення ефективності.

5. Резонансні явища: ВГ можуть викликати резонансні явища в реле та контакторах, що може призводити до небезпечних перенапруг та можливого пошкодження обладнання.

Генератори та турбіни:

1. Збурення в роботі генератора: несинусоїдальні коливання струму та напруги можуть викликати збурення в роботі генератора. Це може впливати на стабільність та ефективність генерації ЕЕ.

2. Загроза для ізоляції: ВГ можуть спричиняти збільшення напруги на ізоляційних матеріалах генератора, що може призводити до перенапруг та руйнування ізоляції.

3. Механічні напруги: вплив ВГ на турбіни може викликати додаткові механічні напруги, що може впливати на їхню міцність та термін експлуатації.

4. Втрати енергії: несинусоїдальна форма струму може викликати додаткові втрати енергії в обмотках генератора та інших елементах системи.

5. Перегрівання: збільшений струм, обумовлений дією ВГ, може призводити до перегрівання генератора та турбіни, що може погіршити ефективність та впливати на тривалість експлуатації обладнання.

Електропривід:

1. Теплові втрати: несинусоїдальні струми, генеровані частотними перетворювачами, можуть призводити до збільшення теплових втрат в обмотках ЕД. Це може призвести до підвищення температури і, в кінцевому рахунку, зменшення тривалості їх експлуатації.

2. Механічні втрати в обладнанні: ВГ можуть викликати механічні коливання в обладнанні, зокрема в механічних частинах ЕД та ЕП. Це може впливати на стійкість та надійність обладнання.

3. Збурення в роботі частотних перетворювачів: ВГ можуть викликати збурення в роботі частотних перетворювачів, що в свою чергу може призводити до погіршення якості електропостачання для під'єднаних пристроїв.

4. Перегрівання трансформаторів та інших компонентів: ВГ можуть призводити до додаткових теплових втрат у трансформаторах та інших компонентах ЕП, зокрема в обмотках.

5. Збурення в контрольних системах: несинусоїдальна форма струму може впливати на точність та стійкість контрольних систем ЕП, що може впливати на точність регулювання та відповідь системи на зміни.

Мережі живлення:

1. Загроза для інших споживачів: ВГ можуть поширюватися в електричній мережі і створювати споживачам інших пристроїв та обладнання

електромагнітні перешкоди. Це може впливати на коректність роботи інших під'єднаних пристроїв.

2. Збурення в роботі обладнання: ВГ можуть призводити до збурень у роботі чутливого обладнання, особливо тих, які вимагають чистий синусоїдальний сигнал.

3. Збільшення втрат енергії: несинусоїдальна форма струму може викликати додаткові втрати енергії в провідниках та електротехнічних пристроях. Це може привести до збільшення енерговитрат у системі.

4. Перегрівання обладнання: ВГ можуть призводити до додаткового перегрівання обладнання, такого як трансформатори та двигуни, через додаткові теплові втрати.

5. Перенапруги: наявність ВГ може викликати перенапруги в системі, що може впливати на ізоляцію та надійність обладнання.

6. Погіршення якості енергії: ВГ можуть призводити до погіршення якості ЕЕ, зокрема, викликаючи зміну форми напруги та струм.

Крім того, ВГ обумовлюють генерування в мережу реактивної енергії, що обмежує можливість мережі з передавання активної енергії та вимагає додаткових витрат на впровадження засобів компенсації реактивної енергії.

Тож, поява ВГ в мережі є небажаним явищем: з'являються додаткові втрати в обладнанні; значно ускладнюється процес компенсації потужності; зменшується експлуатаційний період ізоляції електричних машин та апаратів; унеможлиблюється нормальна робота пристроїв автоматики, телемеханіки і зв'язку.

Викривлення форми кривої напруги обумовлює виникнення та перебіг іонізаційних процесів в ізоляції обладнання, зокрема, електричних машин та трансформаторів. Газові включення в ізоляції викликають іонізуючі процеси, котрі полягають у створенні об'ємних зарядів з подальшою їх нейтралізацією. Процес нейтралізації, пов'язаний із розсіянням енергії, результатом якого є хімічний, механічний та електричний впливи на зовнішній діелектрик. Як наслідок, виникають дефекти ізоляції, що знижують рівень її електричної

міцності, збільшення діелектричних втрат, а отже й зменшення тривалості експлуатації.

Загальна кількість розрядів у газових частинках корелює із формою напруги. На рис. 2.1 наведено періодичні криві напруги з однаковим діючим значенням напруги.

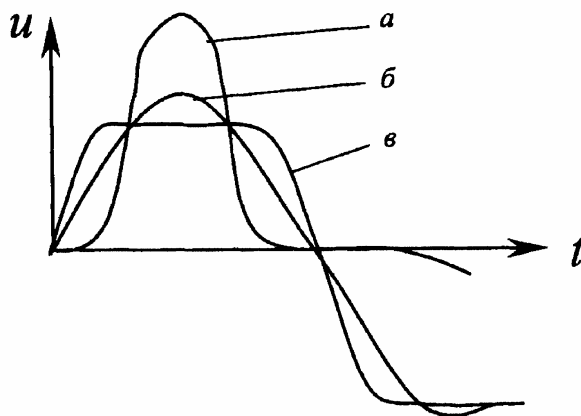


Рис. 2.2. Періодичні криві напруги різної форми: а - загостреної, б - синусоїдальної та в - сплющеної з рівним значенням діючої напруги

Співвідношення коефіцієнтів діелектричних втрат $\tan \delta$ становить 1,00 : 2,25 : 0,23. Загальне число розрядів у кожному газовому включенні за час рівний періоду кривої дорівнює 8; 16 та 4 відповідно.

Відповідно до результатів досліджень [23], доведено, що за рівних амплітуд кривої напруги, $\tan \delta$ набуватиме значних показників для кривої типу а (рис.2.2) та значно менших для кривих типу в (рис.2.2), якщо порівнювати із синусоїдальною формою кривої, проте розходження будуть не дуже значні, як у випадку однакового діючого значення.

У випадку появи ВГ у кривій напруги процес старіння діелектрика конденсаторів має інтенсивніший характер у порівнянні з випадком, коли конденсатори працюють за звичайної синусоїдальної напруги. Такий ефект обумовлюється прискоренням фізико-хімічних процесів в діелектриках за високих частот електричного поля. Подібним чином впливає й додаткове нагрівання, обумовлене наявністю ВГ струму.

Згідно з нормативами БК можуть тривалий час працювати за умов їх перевантаження струмами ВГ орієнтовно до 30 %; значення допустимого підвищення рівня напруги становитиме 10 %. Однак, впродовж тривалої експлуатації БК за таких умов тривалість експлуатації їх значно зменшується. У мережах промислових підприємств БК періодично працюють у режимах, близьких до резонансу струмів на частоті певної гармоніки. Тому, через постійні перевантаження досить швидко втрачають працездатність.

За викривленої форми напруги мережі має місце пришвидшене старіння ізоляції силових кабелів. Досліджуючи цей факт порівнювались результати вимірювань струмів витоку кабелів, розміщених в один і той же період часу та працювали в аналогічних температурних умовах. Деякий відсоток кабелів, які підлягали дослідженню працювала в умовах синусоїдальної форми кривої напруги, інший – за рівня ВГ у кривій напруги становили 6,0-8,5 % (превалювали 5 та 7-а ВГ). Значення струмів витоку в іншому випадку через 2,4 роки експлуатації виявилися орієнтовно на 36 %, а через 3,6 року орієнтовно на 45 % більше у порівнянні з першою групою.

Практичний досвід експлуатації підтверджує, що у мережах зі значним питомим відсотком наявності вентильних навантажень збільшується ймовірність появи однофазних замикань в кабелі [15]. Так, для мереж безперервного листового стану гарячого прокату з коефіцієнтом $K_U \approx 8,0\%$ кількість річних однофазних замикань на землю підвищилась на 30,0-40,0 % у порівнянні з мережами інших цехів за відсутності у складі навантаження перетворювачів та за значень $K_U \leq 2,0\%$. Для обидвох випадків рівень напруги мережі був відносно стабільним. Однофазні замкнення нерідко можуть перетворюватись у 2-о та 3-ри фазні у місці першого пробоя із-за згорання кабелю, оскільки ушкодження не самоліквідуються.

Це значно ускладнює процес обліку ЕЕ за несинусоїдних режимів, а також обумовлює появу значними неточностей. Додатково враховуючи той факт, що обліку ЕЕ здійснюють переважно лічильники з індукційною системою з негативним значенням частотної похибки на частотах ВГ.

Відповідно до типу навантаження (лінійне/нелінійне) існує ймовірність появи так званих пере- та недообліків споживаної ЕЕ. Частотна характеристика такого лічильника наведена на рис. 2.3.

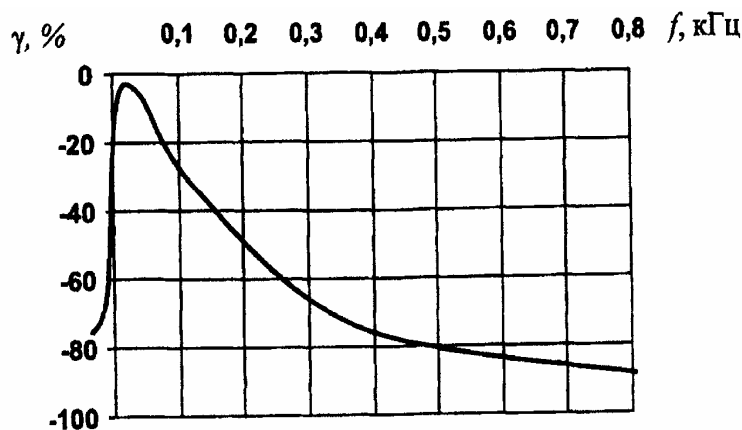


Рис. 2.3. Частотна характеристика лічильника

Потужність, споживана ВГ визначається:

$$P_{\text{вл}} = P_1 - \sum_{n=2}^l \Delta P_n (1 + \gamma_n), \quad (2.3)$$

де P_1 і $\sum_{n=2}^l \Delta P_n$ – це значення потужностей на частотах 1-ї та вищих гармонік;

γ_n – значення частотна похибка лічильника на n -й гармоніці.

Вираз матиме вигляд для лінійного типу навантаження:

$$P_{\text{л}} = P_1 + \sum_{n=2}^l \Delta P_n (1 + \gamma_n). \quad (2.4)$$

Тож, сумарне значення похибки обліку ЕЕ становитиме:

$$\gamma_{\Sigma} = \sum_{n=2}^l \Delta P_{n^*} \gamma_n, \quad (2.5)$$

де $\Delta P_{n^*} = \frac{\Delta P_n}{P_1}$.

Вплив ВГ на системи СІФК перетворювача може обумовити появу явища гармонічної нестійкості, котре полягає у виникненні на шинах

багатофазного перетворювача парних чи кратних 3-м ВГ. У такому випадку і в мережі з'являються ці ж типи ВГ, проте менші за значенням. Викривлення форми напруги мережі можуть набувати значних показників, обумовлюючи в інверторному режимі перетворювача комутаційні порушення. Та й власне робота СІФК може стати нестійкою.

2.3. Основні підходи до зниження рівня вищих гармонік

Серед головних підходів до зниження рівня ВГ можна виокремити основні групи:

- схемні рішення: виокремлення нелінійних навантажень на визначену систему шин; поділ навантажень на різні вузли системи з паралельним під'єднанням до них ЕД; під'єднання особливих навантажень до системи зі значною потужністю.
- впровадження багатофункціональних пристроїв, зокрема: коректорів потужності; пристроїв фільтросиметруючих та фільтрокомпенсуючих (ФКП); пристроїв типу «акумуляторна батарея - перетворювач»; статичні тиристорні компенсатори; швидкодіючі статичні джерела реактивної потужності на базі ФКП. Подібні пристрої забезпечують як компенсування реактивної потужності, так і безпосередню фільтрацію ВГ, а також зменшення відхилень та коливань напруги з відповідним її фазовим симетруванням;
- практичне використання інших типів пристроїв, наприклад: розділових трансформаторів, активних кондиціонерів ВГ, фільтрів, дроселів, магнітних синтезаторів тощо;
- впровадження спеціалізованого обладнання, котрому характерне невисокий рівень генерації ВГ; додаткове практичне використання трансформаторів тих типів, що «ненасичуються»;
- використання перетворювачів багатофазного типу з поліпшеними енергетичними показниками.

Фільтрокомпенсуючі пристрої. Реалізація комплексного підходу до вирішення питання покращення якості ЕЕ та компенсування впливу нелінійних навантажень на мережу забезпечується шляхом використання багатфункціональних пристроїв. Характерним прикладом подібних пристроїв є мультифункціональні резонансні фільтри ВГ, тобто ФКП. На рис.2.4 наведено типові схеми ФКП. Найпоширенішою з них є схема, наведена на рис.2.4 б, оскільки їй характерні зручність та надійність компонування електрообладнання.

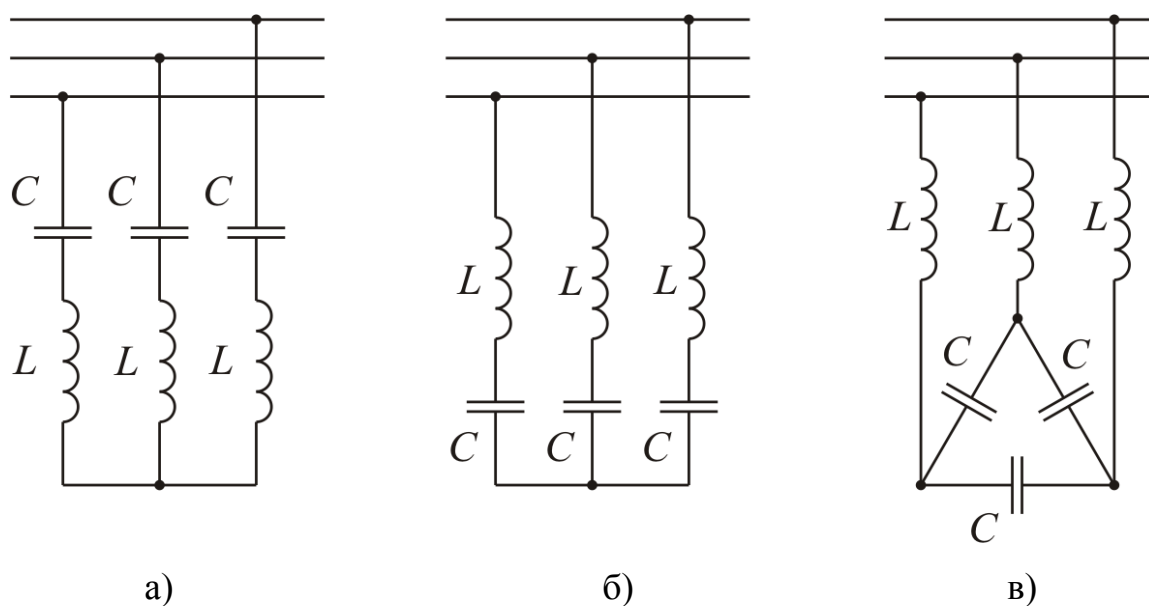


Рис. 2.4. Типові схеми ФКП

Зазвичай, за наявності 12-ти пульсних ВП розміщують ФКП 11, 13 - ї ВГ, для 6-ти пульсних - 5, 7, 11 та 13 ВГ. Для мереж до складу навантаження котрих входять ДСП доцільно розміщувати ФКП 2-ї, 3-ї, 4-ї та 5-ї ВГ або ж фільтри широкосмугового типу.

Нормативними умовами експлуатації БК передбачено певні обмеження за рівнем перевищення понадномінальних значень напруги c_u та струму c_i (у відсотках від номінальних значень). Ці величини набуватимуть значення $c_u = 1$ або $c_u = 1.1$; $c_i = 1.3$ або $c_i = 1.5$ відповідно до типу конденсаторів.

Для роботи конденсаторів в мережах із наявними ВГ необхідно додатково перевіряти значення відносного відхилення від частоти резонансу,

що корелює з добротністю ФКП, тобто: $\frac{f}{f_{рез}} = \sqrt{\frac{2 - \frac{1}{Q_\phi^2}}{2}}$. У випадку $Q_\phi \geq 6$ співвідношення $\frac{f}{f_{рез}} \approx 1$. Фактично ж $Q_\phi \geq 20$, а отже доцільно здійснювати розрахунок та підбір ФКП з врахуванням лише реактивних опорів.

Мережеві дроселі. Послідовне ввімкнення мережевих дроселів є найпростішим способом зменшення рівня ВГ струму, генерованих наявним нелінійним навантаженням в системі.

На рис. 2.5. наведена типова схема під'єднання мережевих дроселів.

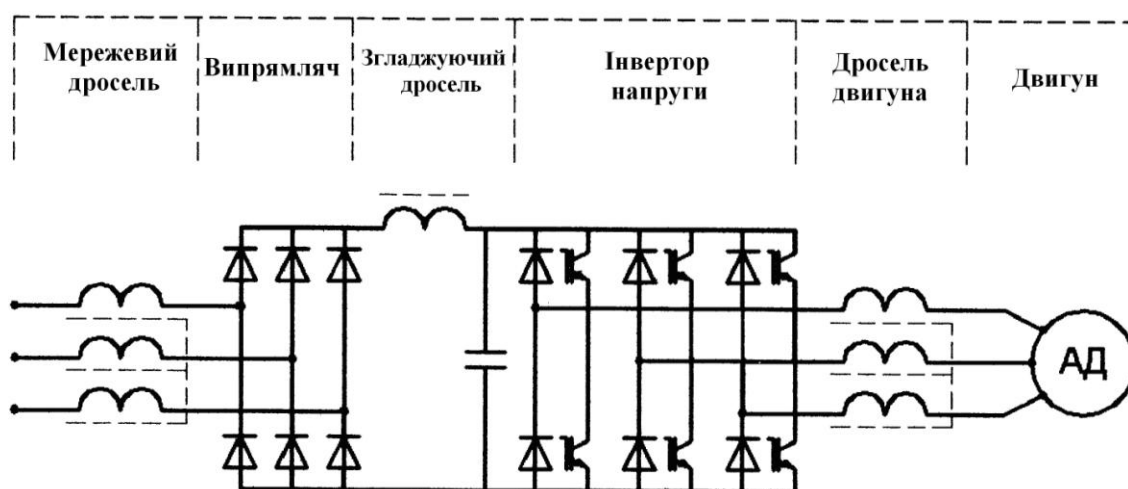


Рис. 2.5. Типова схема підключення енергоефективного ПЧ

Підбір мережевого дроселя доцільно виконувати, базуючись на бажаному рівні підвищення енергоефективності.

Пасивні фільтри. Впровадження пасивних LC-фільтрів, налаштованих на визначений порядок ВГ дозволяє помітно покращити гармонійний склад кривої струму (рис.2.6). Так, експериментально доведено, що під'єднання пасивних LC-фільтрів на вході 6-ти півперіодного випрямляча за 100 %-го навантаження може забезпечити зменшення коефіцієнта спотворення струму до 8,0–10,0 %. Для порівняння, значення коефіцієнта в подібній системі за відсутності фільтру може сягати 30-ти та більше відсотків.

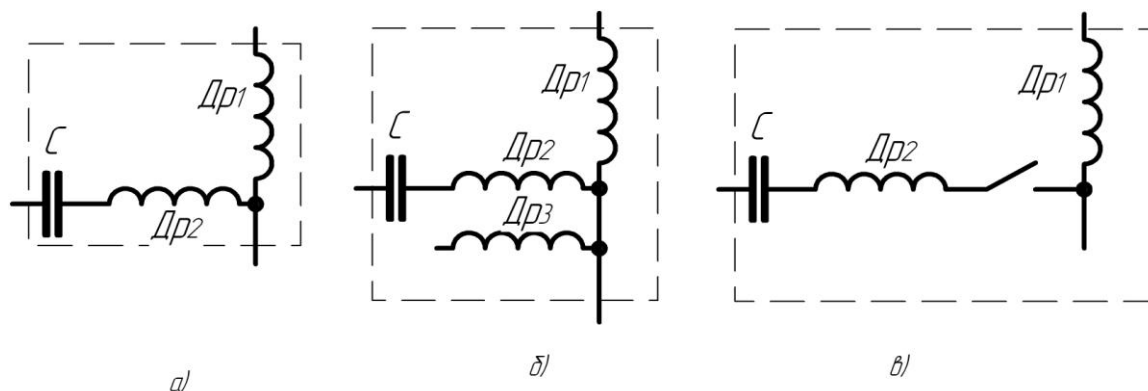


Рис. 2.6. Типові схеми різних видів пасивних фільтрів: а) некомпенсований LC-фільтр; б) скомпенсований LC-фільтр; в) некомпенсований LC-фільтр на базі комутатора

Активні фільтри. Принцип роботи активних фільтрів базується на використанні електронних компонентів і керованого джерела енергії для генерації сигналів, які компенсують або прибирають небажані гармонії та спотворення в електричному сигналі. Основні етапи принципу роботи можуть бути наступними:

1. Вимірювання гармоній та спотворень: Спершу активний фільтр вимірює гармонії та спотворення в системі електропостачання за допомогою спеціалізованих сенсорів або вбудованих мікроконтролерів.

2. Генерація компенсуючого сигналу: На основі вимірів активний фільтр генерує сигнали, які мають протилежні характеристики до виявлених гармоній та спотворень. Це може включати генерацію протилежного струму чи напруги з низькими гармоніями.

3. Внесення компенсуючого сигналу в мережу: Згенерований сигнал потім вводиться в систему електропостачання. Цей сигнал взаємодіє з оригінальним сигналом, компенсуючи гармонії та спотворення.

4. Сума сигналів: Сума оригінального та компенсуючого сигналів створює коректований сигнал, який має менше гармоній та спотворень.

5. Постійна корекція: Процес корекції може бути постійним, адаптуючись до змін у системі електропостачання та навантаженні. Активні

фільтри можуть мати системи зворотного зв'язку, які надають їм здатність адаптуватися до змін у гармонійній структурі сигналу.

Такий принцип дозволяє активним фільтрам ефективно компенсувати гармонії та інші спотворення в електричних мережах, забезпечуючи чистий та стабільний сигнал.

Рис. 2.7. наведено принцип дії активного фільтру.

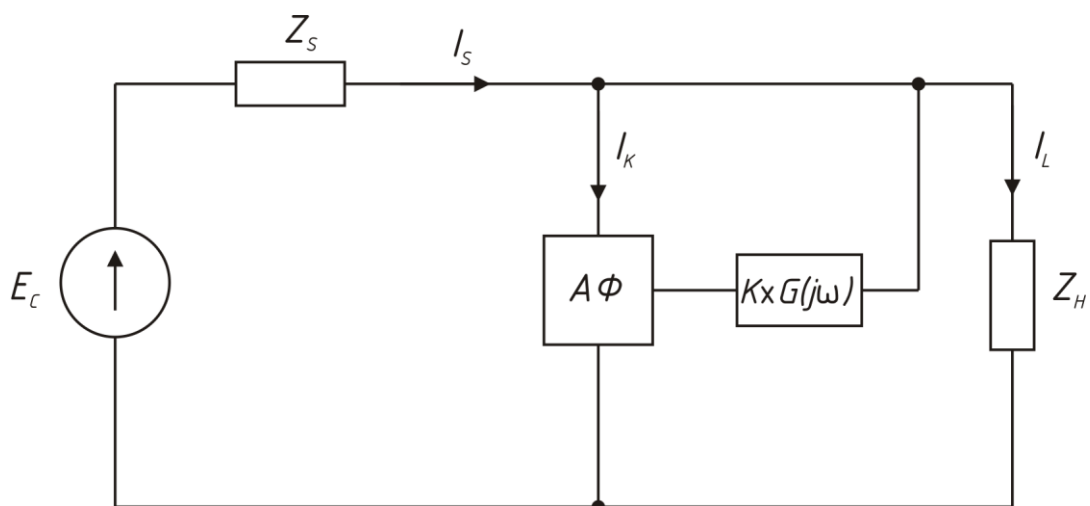


Рис. 2.7. Структурна схема до пояснення принципу роботи активного фільтру

Величина струму навантаження визначається давачем струму, аналізуються цифровим перетворювачем для виявлення загального спектру ВГ. Далі генератором струму задається необхідне значення певного гармонічного струму, що забезпечить компенсацію спотворень навантаження:

$$i_s = i_L + i_K \quad (2.6)$$

Практично можна досягнути таким чином зменшення значення гармонічного струму орієнтовно на 90 %.

Схема поздовжньої фільтрації та компенсації на базі активного фільтру наведена на рис. 2.8.

Принципова схема поздовжньої системи компенсації і фільтрації на базі активного фільтру наведена на рис. 2.8.

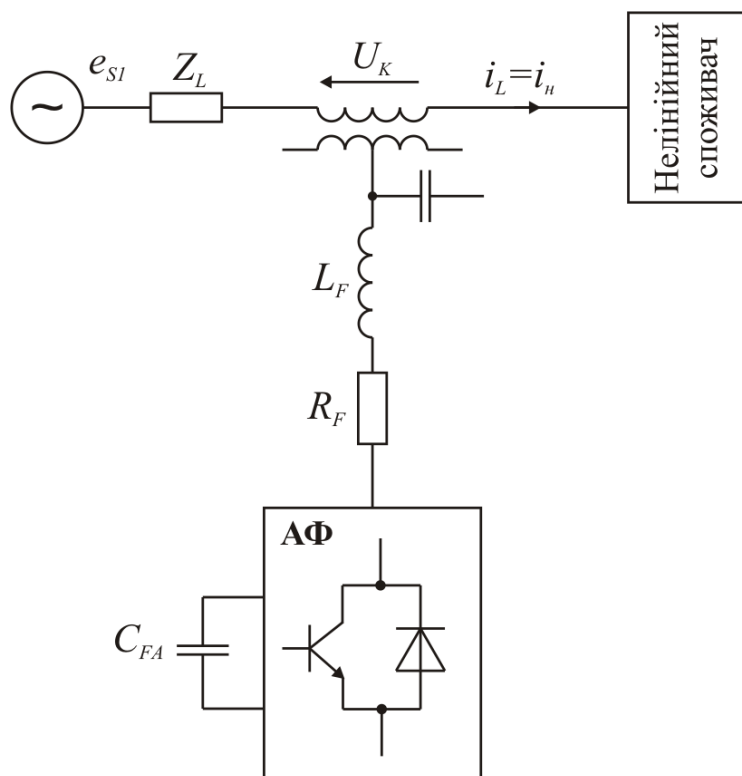


Рис. 2.8. Схема поздовжньої системи компенсації і фільтрації на базі активного фільтру

Місце встановлення АФ може бути у різних точках розподільної мережі (рис. 2.9): т. А - місце загального приєднання (на шинах ТП); т. В – місце встановлення для часткової компенсації ВГ; т. С – поряд із нелінійним навантаженням задля забезпечення місцевої компенсації ВГ.

Ще одним із варіантів приєднання є варіанти каскадної та паралельної конфігурації АФ (див. рис. 2.10).

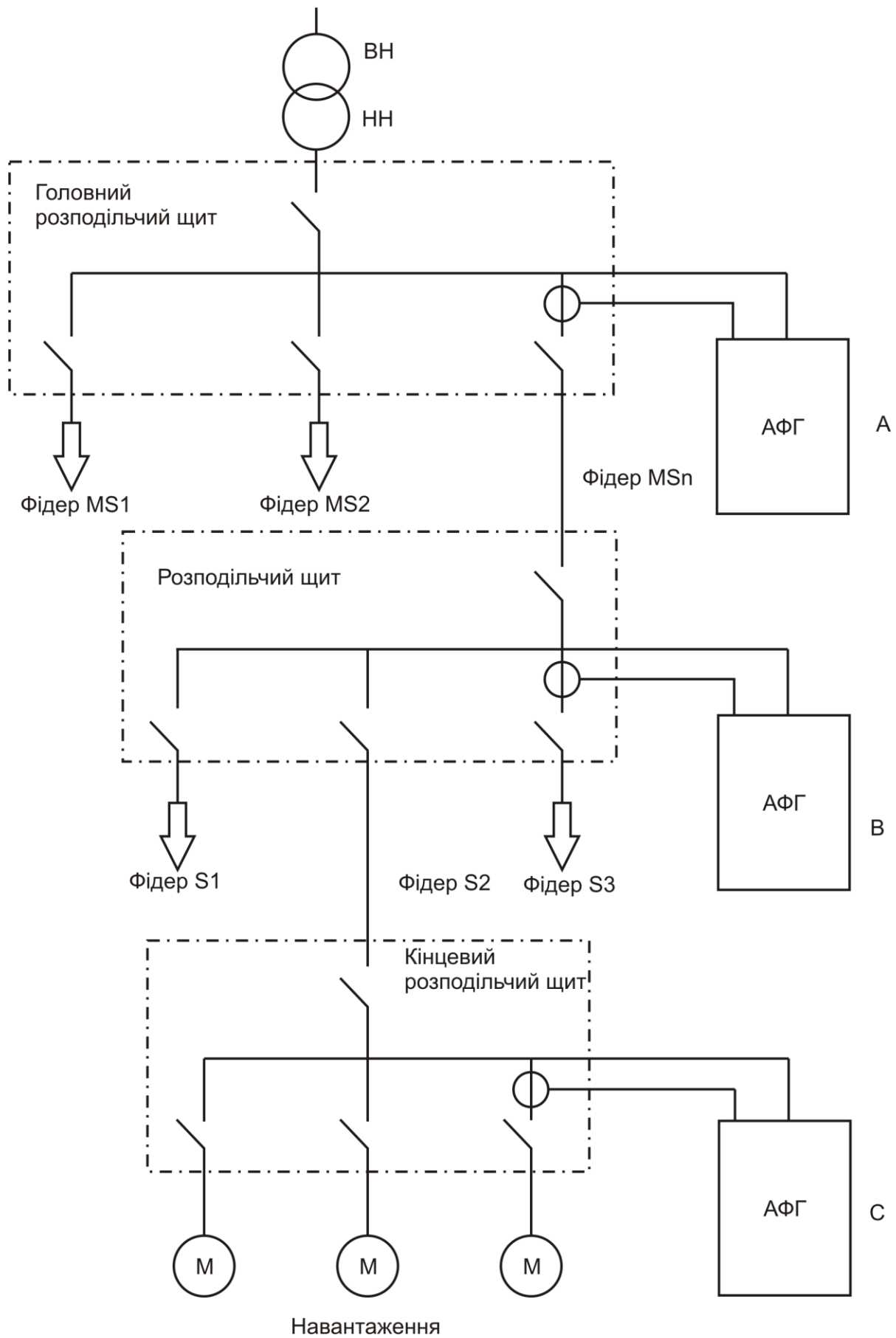


Рис. 2.9. Місця приєднання АФ у розподільній мережі СЕП

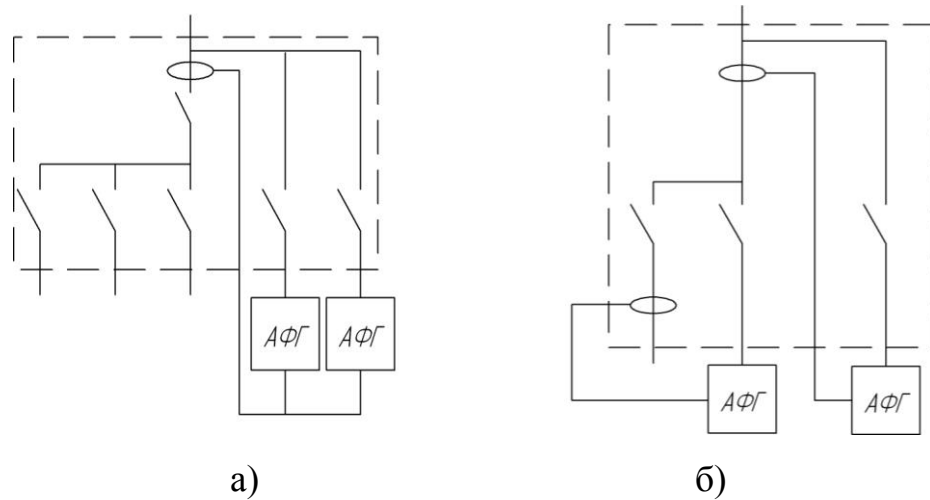


Рис. 2.10. Варіанти паралельної та каскадної конфігурації АФ

Гібридні фільтри. У випадку значних потужностей ВП використання АФ є економічно недоцільним. Кращим розв'язком такого питання є застосування схем, що поєднують АФ та резонансні фільтри.

Схеми паралельної (рис. 2.11) та послідовної (рис. 2.12) гібридної системи компенсації ВГ.

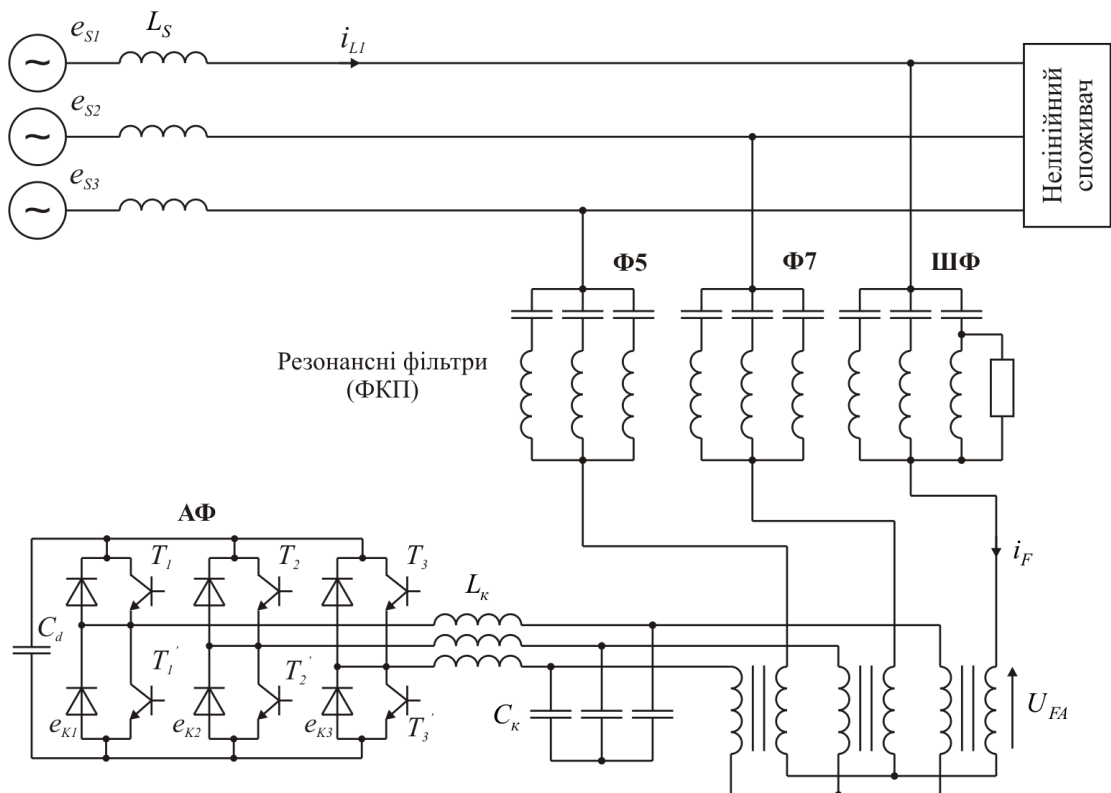


Рис. 2.11. Схема паралельної гібридної системи компенсації ВГ

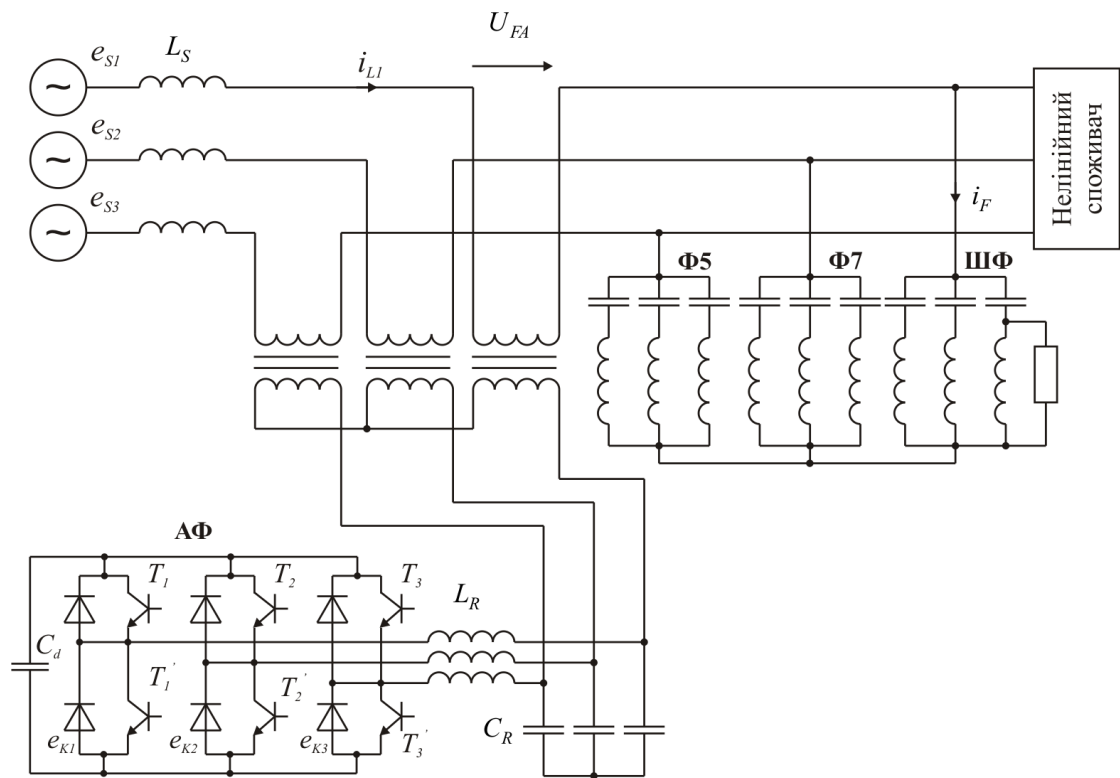


Рис. 2.11. Схема послідовної гібридної системи компенсації ВГ

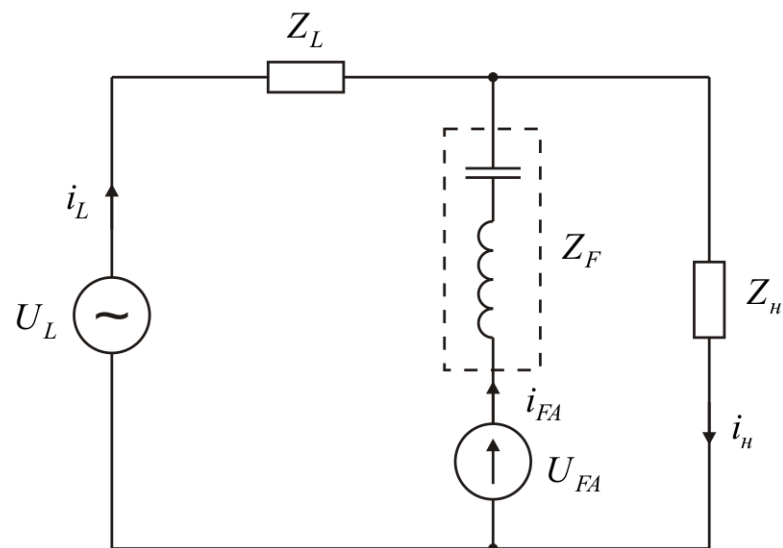


Рис. 2.12. Схема заміщення ГФ

Схема заміщення для ν -ї гармоніки (рис. 2.13) наведена на рис. 2.13.

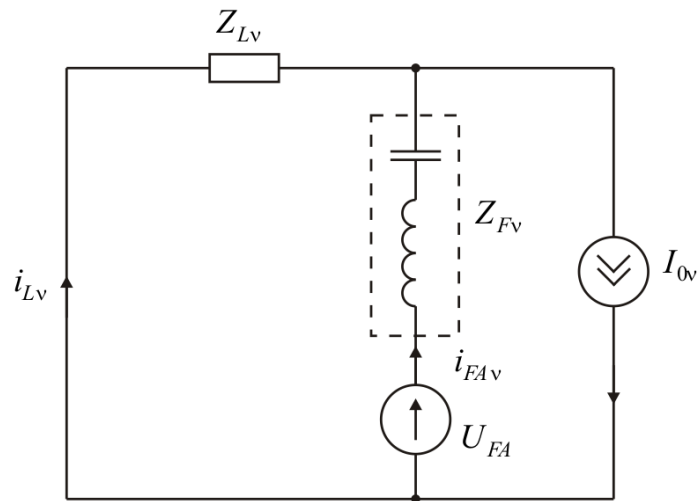


Рис. 2.13. Схема заміщення ГФ для ν –ї гармоніки

Ефективність дії гібридної системи за рахунок додаткового введення джерела можна визначити:

$$U_{FA} = K i_{Lv}, \quad (2.7)$$

де K – коефіцієнт пропорційності, який має розмірність опору;

i_{Lv} – струм ν –ї ВГ мережі, спричинений неповною фільтрацією за допомогою АФ.

Відповідно до другого закону Кірхгофа:

$$i_{Lv} (Z_{Lv} + K) = i_{F\nu} Z_{F\nu}, \quad (2.8)$$

Тобто, додаткове кероване джерело напруги провокує збільшення опору системи, тобто зростання її електричної віддаленості від місця приєднання нелінійного навантаження. Треба зазначити, що опір K зменшує резонансні процеси між Z_{Lv} та $Z_{F\nu}$, бо вхідний опір системи може набувати нелінійної форми АЧХ.

Широкосмугові та складні фільтри. Застосування широкосмугового фільтру є найдоцільнішим для випадку «щільного» спектру інтергармонік, зокрема під час роботи ПЧ за синусоїдальним законом управління. На рис. 2.14 наведена схема широкосмугового фільтру, а на рис. 2.15 – складного. Складний фільтр поєднує у своєму складі реактор та конденсатор у паралель до якого під'єднано активний опір. Зазвичай найбільшого використання набув фільтр з частотою резонансу $\nu_{ШФ} = 17$ та низькою добротністю $Q_{ШФ} \approx 0.5 \div 4,0$.

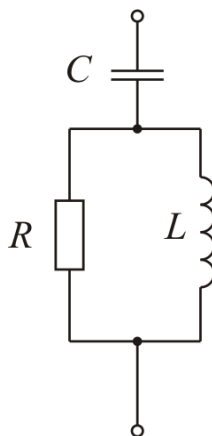


Рис. 2.14. Схема широкосмугового фільтру

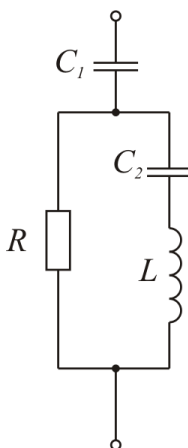


Рис. 2.15. Схема складного фільтру

Магнітні синтезатори. Такий пристрій дозволяє забезпечити захист навантаження від викривлень, у тому числі й наявності ВГ, високочастотних

та імпульсних завад, накидів та провалів напруги, що викликають викривлення синусоїдальної форми вхідної напруги.

На рис. 2.16 наведено приклад реалізації принципової схеми магнітного синтезатора [21].

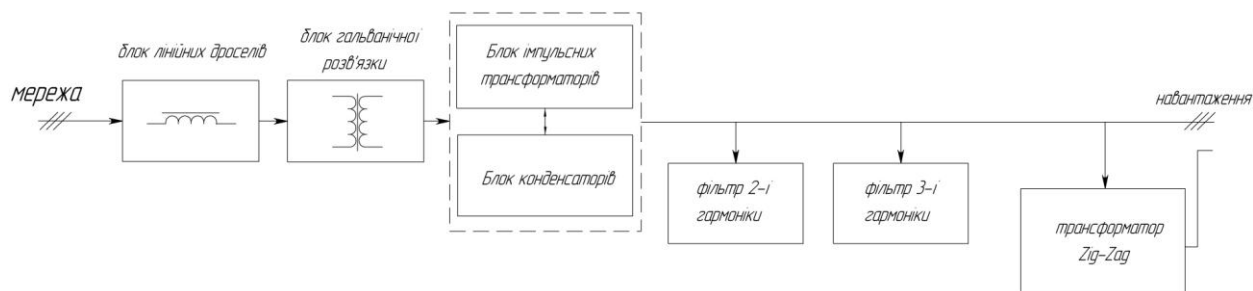


Рис. 2.16. Принципова схема магнітного синтезатора

Принцип формування кривої вихідної напруги магнітного синтезатора наведено на рис.2.17.

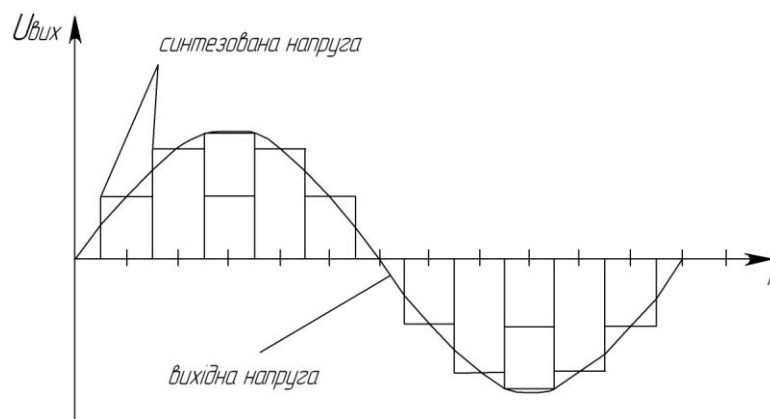


Рис. 2.17. Принцип формування кривої вихідної напруги

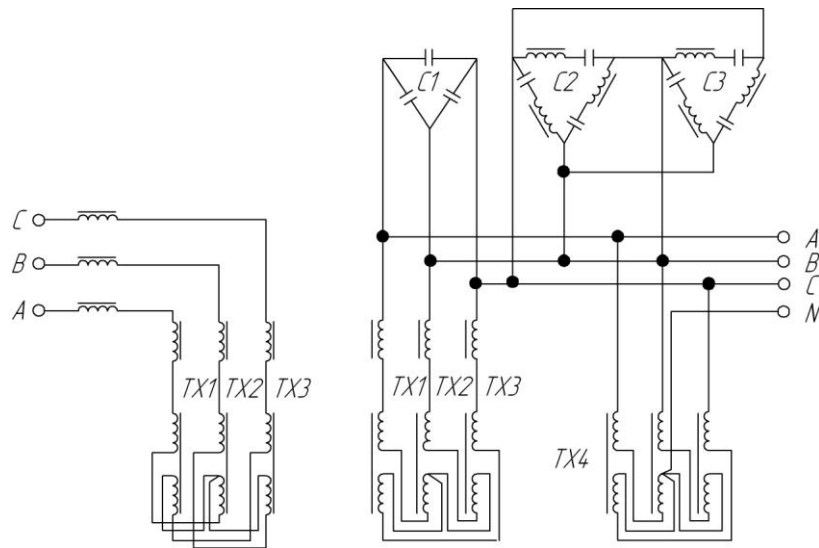


Рис. 2.18. Схемний варіант реалізації магнітного синтезатора

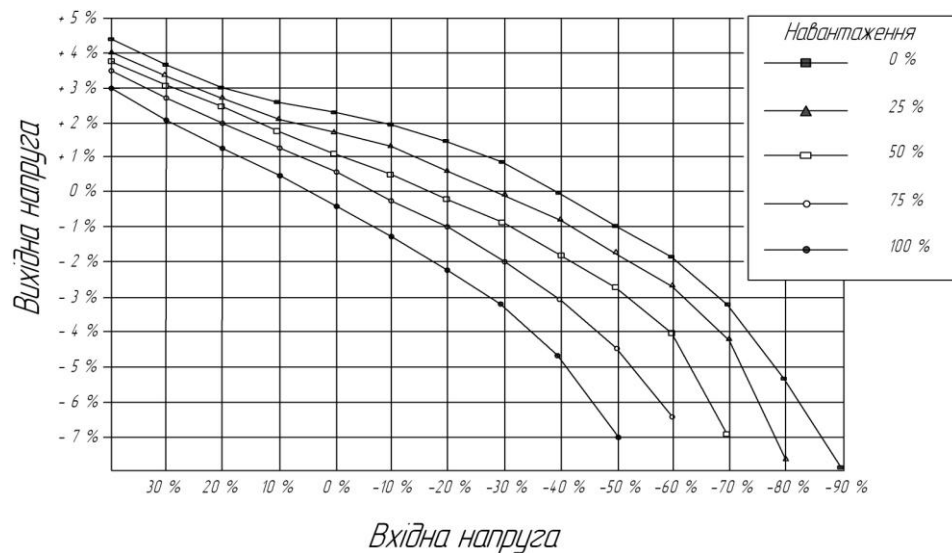


Рис. 2.19. Основні характеристики магнітного синтезатора за різних значень навантаження

Активні кондиціонери гармонік. Active Harmonic Conditioner [29, 30, 31] принципово під'єднують паралельно нелінійному навантаженню (рис. 2. 20). Їх принцип дії ґрунтується на аналізуванні гармонічних складових струму нелінійного навантаження та генерування в мережу аналогічних гармонік, проте з протилежною фазою. А це дозволяє нейтралізувати вищі гармонійні складові струму в місці під'єднання АГГ. Тобто, ВГ не мають змоги

розповсюджуватись від нелінійного навантаження в мережу та викривляти напругу первинного джерела живлення.

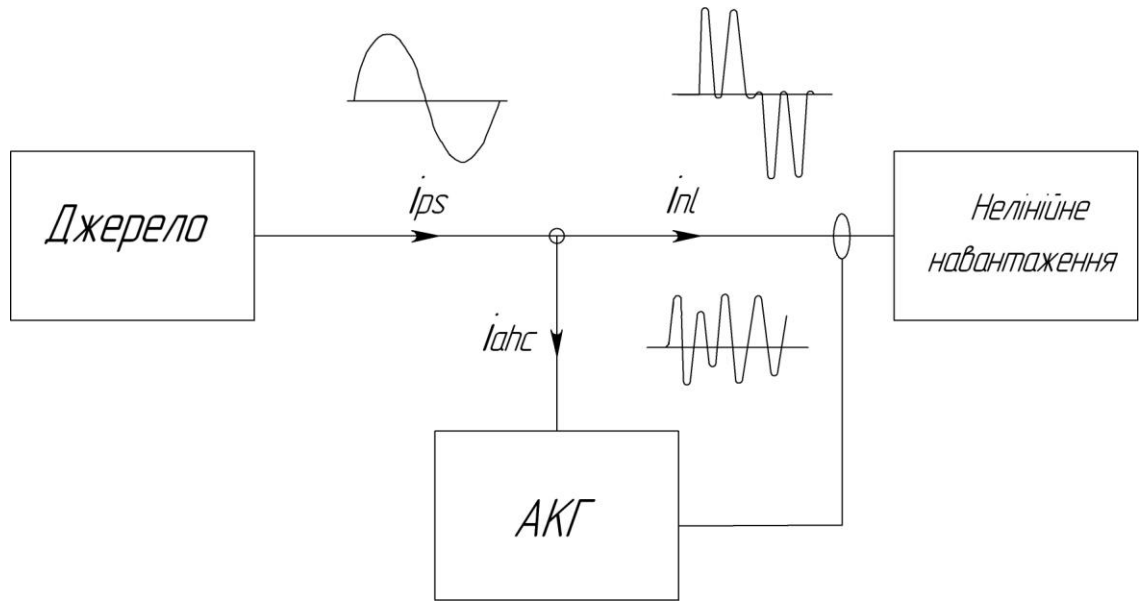


Рис. 2.20. Схема під'єднання АКГ

Крива струм нелінійного навантаження має основну та ВГ:

$$i_{nl} = i_1 + \sum_{n \geq 2} i_n \quad (2.9)$$

У свою чергу, струм АКГ має протифазні ВГ:

$$i_{ahc} = -\sum_{n \geq 2} i_n \quad (2.10)$$

А отже, сумарно споживаний від джерела, струм матиме майже синусоїдальний характер:

$$i_{ps} = i_{nl} + i_{ahc} = i_1 \quad (2.11)$$

Для прикладу наведемо схему АКГ типу "SineWave" (рис.2.21).

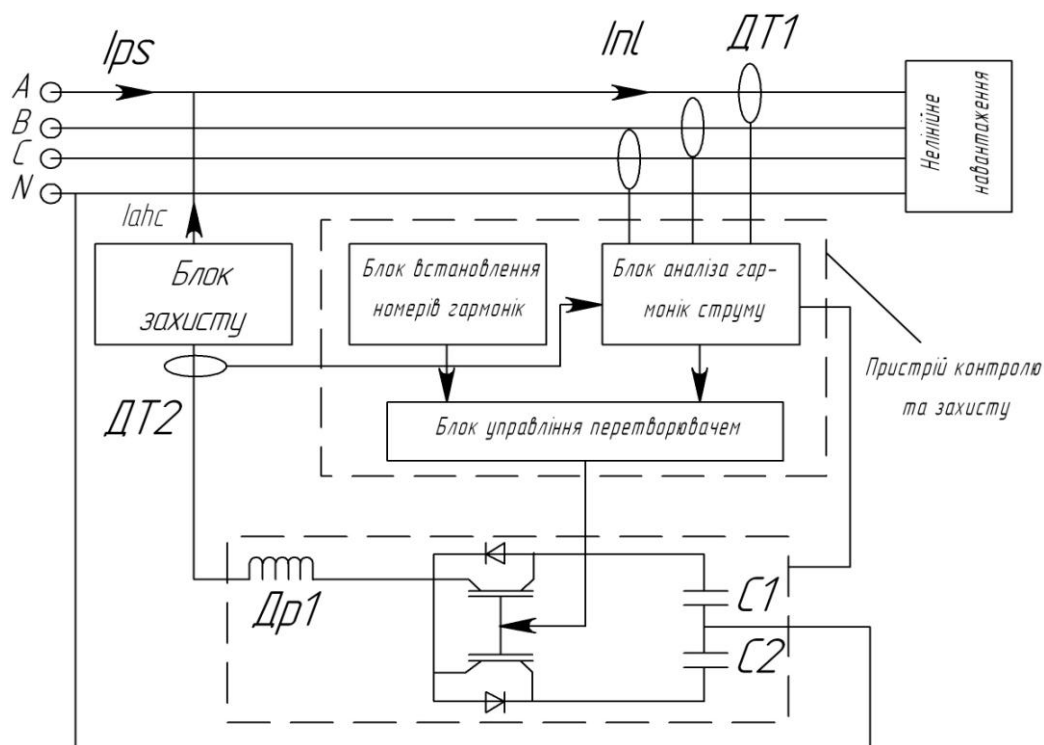


Рис. 2.20. Блок-схема АКГ "SineWave"

Зниження рівнів ВГ засобами мережі. Такий підхід може бути реалізований побудовою таких СЕП, що дозволять забезпечувати прийнятний рівень ВГ напруги на шинах споживача. Найпоширенішим підходом є використання у СЕП наступних принципів: під'єднання паралельно нелінійним навантаженням асинхронних та синхронних двигунів, застосування трансформаторів підвищеної напруги 110 - 220 (330) кВ; здійснення електропостачання нелінійних навантажень від різних трансформаторів або ж їх під'єднання до різних обмоток 3-ри обмоткових трансформаторів або ж до різних обмоток двообмоткових трансформаторів з розщепленою обмоткою тощо. Приклад схеми районної підстанції подано на рис. 2.21.

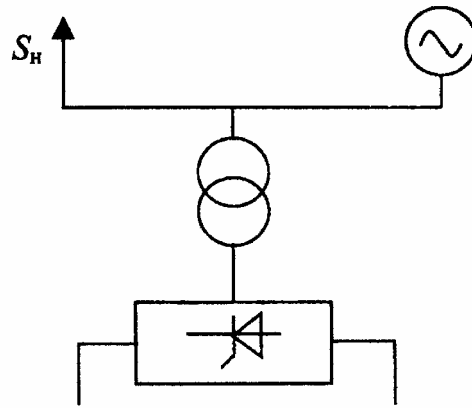


Рис. 2.21. Принципова схема живлення районної підстанції

Вхідний опір для тупикової лінії з навантаженням S_i становить:

$$X_{\text{вхл}} = Z_c \operatorname{tg} \left(n\alpha l + \operatorname{arctg} \frac{X_{\text{ин}}}{Z_c} \right), \quad (2.12)$$

де Z_c – значення хвильового опору;

α – значення коефіцієнта фази;

l – загальна довжина лінії.

Перетворивши маємо:

$$X_{\text{вхл}} = 0,45 \cdot \frac{U^2}{S_H} \cdot n; \quad (2.13)$$

$$S_H = (0,1 \div 0,2) S_K; \quad (2.14)$$

Для $n \geq 5$ з незначним рівнем похибки ($< 2\%$), маємо:

$$X_{\text{вхл}} = -Z_c \operatorname{ctg}(n\alpha l). \quad (2.15)$$

Відповідний опір становитиме:

$$X_{en} = k_{en} n X_{\kappa}, \quad (2.16)$$

А отже, умова виникнення резонансу струмів матиме вигляд:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{n\alpha l}{Z_c}\right) = \frac{1}{k_{en} n X_{\kappa}}, \quad (2.17)$$

звідси:

$$l = \frac{1}{n^2} \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{k_{en} n X_{\kappa}}\right). \quad (2.18)$$

Для енергосистем із значенням потужності $S_{\kappa} > 3000 \text{ МВА}$ значення резонансу струмів на визначених частотах може виникати для довжин $l \geq 60 - 80 \text{ км}$.

2.4. Математичне моделювання системи «ПЧ-АД» для аналізування динамічних характеристик електропривода

Встановлення фільтра (рис. 2.22) на виході СП обумовить зменшення пускового M_n та критичного моментів M_{κ} АД із-за додатково під'єднаних ємностей та індуктивностей перед статором ЕД. Однак, серйозним питанням є аналізування та оцінювання рівня ефективності роботи фільтра з позиції його впливу на динамічні характеристики ЧРП, а також розроблення підходів до управління, що зможуть забезпечити визначені навантажувальні характеристики ЕП.

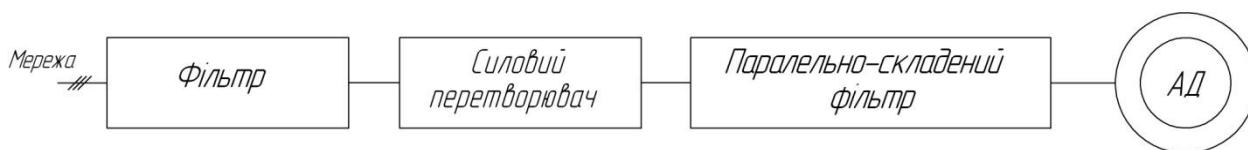


Рис. 2.22. Функціональна схема ЕП з АД

СП подамо у вигляді ММ ШІМ:

$$U_{ШІМ} = U_k \left(1 - \left(\omega_M t - [\omega_M t] + 1 - e^{-j(k\omega t + \varphi_k)} \right) \right), \quad (2.19)$$

де $U_{ШІМ}$ – напруга, сформована ШІМ;

U_k , φ_k – значення амплітуди та фази k – ї ВГ за відповідними фазами;

ω_M – значення частоти модуляції;

$[\dots]$ – визначення цілої частини.

Подібний підхід дозволяє подавати мережу живлення як джерело необмеженої потужності та аналізувати ступінь його впливу на ЕП під'єднаного на виході інвертора фільтра.

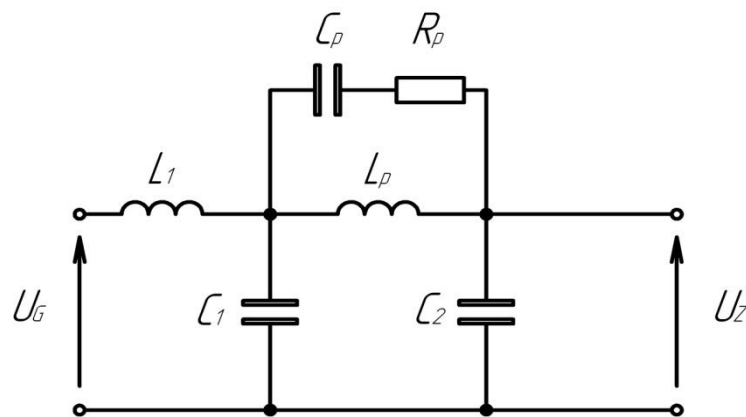


Рис. 2.23. Принципова схема фільтра

ММ фільтра (рис.2.23) розроблена з використанням законів Кірхгофа:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du_G}{dt} = L_1 \frac{d^2 i_{Gp}}{dt^2} + \frac{1}{C_1} i_{1p}; \\ 0 = -\frac{1}{C_1} i_{1p} + \frac{1}{C_p} i_p + R_p \frac{di_p}{dt} + \frac{1}{C_2} i_2; \\ 0 = -\frac{1}{C_1} i_{1p} + L_p \frac{d^2 i_{2p}}{dt^2} + \frac{1}{C_2} i_2; \\ i_2 = i_p + i_{2p}; \\ \frac{du_Z}{dt} = \frac{1}{C_2} i_2. \end{array} \right. \quad (2.20)$$

Вважаючи $\frac{d^2 i_G}{dt^2} = i_{G(1)}$; та $\frac{d^2 i_{2p}}{dt^2} = i_{2p(1)}$ система дифрівнянь набуде виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_1 \frac{d^2 i_G}{dt^2} = \frac{du_G}{dt} - \frac{1}{C_1} i_{1p}; \\ \frac{d^2 i_G}{dt^2} = i_{G(1)}; \\ R_p \frac{di_p}{dt} = \frac{1}{C_1} i_{1p} - i_p \left(\frac{1}{C_p} + \frac{1}{C_p} \right) + \frac{1}{C_2} i_2; \\ L_p \frac{di_{2p(1)}}{dt} = \frac{1}{C_1} i_{1p} - \frac{1}{C_2} (i_2 + i_{2p}); \\ \frac{di_{2p}}{dt} = i_{2p(1)}; \\ \frac{du_z}{dt} = \frac{1}{C_2} (i_{2p} + i_p). \end{array} \right. \quad (2.21)$$

З використанням ММ АД [11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{u} = \vec{i}_1 R_1 + \frac{d\vec{\psi}_1}{dt}; \\ 0 = \vec{i}_2 R_2 + \frac{d\vec{\psi}_2}{dt}; \\ M_e = \frac{\partial W_e}{\partial t}; \\ M_e - M_c = \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \end{array} \right. \quad (2.22)$$

де R_1 та R_2 – опори обмоток фаз статора та ротора;

$\vec{\psi}_1$ та $\vec{\psi}_2$ – вектор потокозчеплення фаз статора та ротора;

W_e – електромагнітна енергія обмоток АД;

ω – значення кутової швидкості обертання ротора;

$\vec{u}$ – вектор миттєвих значень напруг;

p – кількість пар полюсів;

M_c – статичний момент навантаження;

M_e – електромагнітний момент АД;

J – зведений до валу момент інерції ЕД.

Спільне вирішення систем рівнянь (2.21-2.22) дозволяє здійснити оцінювання зміни форми кривої напруги живлення та його гармонійного складу. Трансферна функція фільтра має вид:

$$W(s) = \frac{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_5 s^5 + b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0},$$

де $a_3 = L_0 C_0 R_0 C_1$, $a_2 = 2L_0 C_0 + L_0 C_1$, $a_1 = 2C_0 R_0$, $a_0 = 2$, $b_5 = L_1 L_0 C_0 C_1^2 R_0$,
 $b_4 = 2L_1 C_1 L_0 C_0 + L_1 C_1^2 L_0$, $b_3 = 2L_1 C_1 R_0 C_0 + L_0 C_0 R_0 C_1$, $b_2 = L_0 C_1 + 2L_1 C_1 + L_0 C_0$, $b_1 = C_0 R_0$,
 $b_0 = 1$.

Для фільтра (рис.2.23) коефіцієнти набуватимуть значення:

$a_3 = 8 \cdot 10^{-14}$, $a_2 = 2,4 \cdot 10^{-10}$, $a_1 = 1 \cdot 10^{-4}$, $a_0 = 2$, $b_5 = 1,28 \cdot 10^{-22}$, $b_4 = 3,84 \cdot 10^{-18}$,
 $b_3 = 2,4 \cdot 10^{-13}$, $b_2 = 5,2 \cdot 10^{-10}$, $b_1 = 5 \cdot 10^{-5}$, $b_0 = 1$.

Отже, трансферна функція фільтра набуде виду:

$$W(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}.$$

Якщо ж не спрощувати вираз, із збереженням 2-го порядку, вираз перехідної характеристики та враховуючи:

$$T_f = 2 \frac{b_2}{b_1}; A = \sqrt{\frac{1}{b_2^2 D}}; B = \sqrt{\frac{D}{b_2^2}}; D = 4b_0 b_2 b_1^2,$$

Матиме вигляд:

$$h(t) = \frac{a_0}{b_0} + \left[A \sin\left(\frac{Bt}{2}\right) \left(2a_1b_2 - a_2b_1 - \frac{a_0b_1b_2}{b_0} \right) + \cos\left(\frac{Bt}{2}\right) \left(\frac{a_2}{b_2} - \frac{a_0}{b_0} \right) \right] \cdot e^{-\frac{t}{T_f}}. \quad (2.23)$$

Загальний вигляд кривої вихідної напруги наведено на рис. 2.24. Доцільно зауважити, що наявність експоненціальної складової обумовлює збільшення тривалості перехідного процесу зміни напруги впродовж кожного імпульсу комутації.

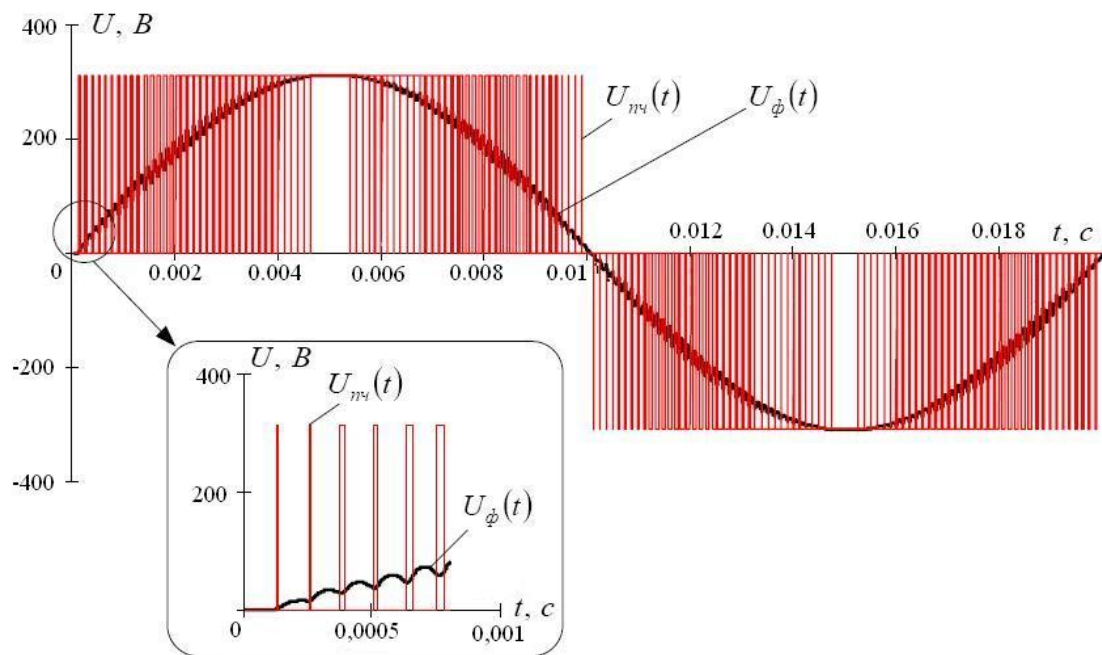


Рис. 2.24. Крива вихідної напруги на виході перетворювача та фільтра

Максимальна тривалість циклу за заданої частоти модуляції становить:

$$t_i = \frac{1}{8000} = 0,000125 \text{ c. А отже, } t_p = 0,000065 \text{ c.}$$

Досліджуючи вплив частоти модуляції на значення напруги на виході фільтра побудуємо перехідну характеристику за одиничної ступеневої дії (рис.2.25).

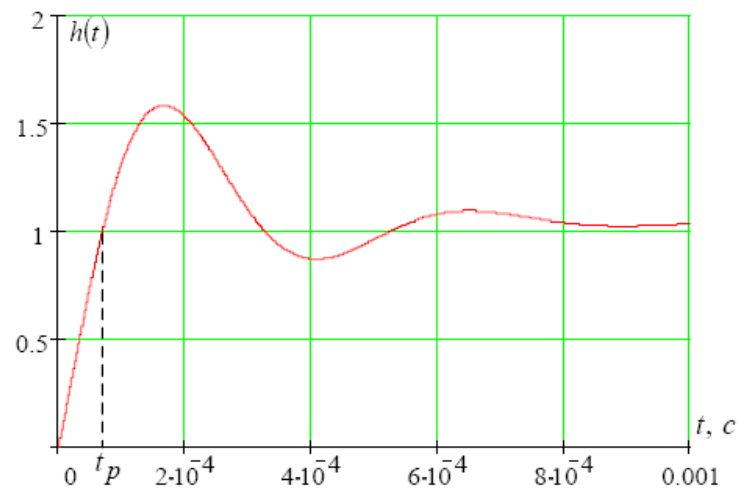


Рис. 2.25. Перехідна характеристика за одиничної ступеневої дії

На рис. 2.26 показана залежність діючого значення напруги від частоти комутації при зведених параметрах складового фільтра.

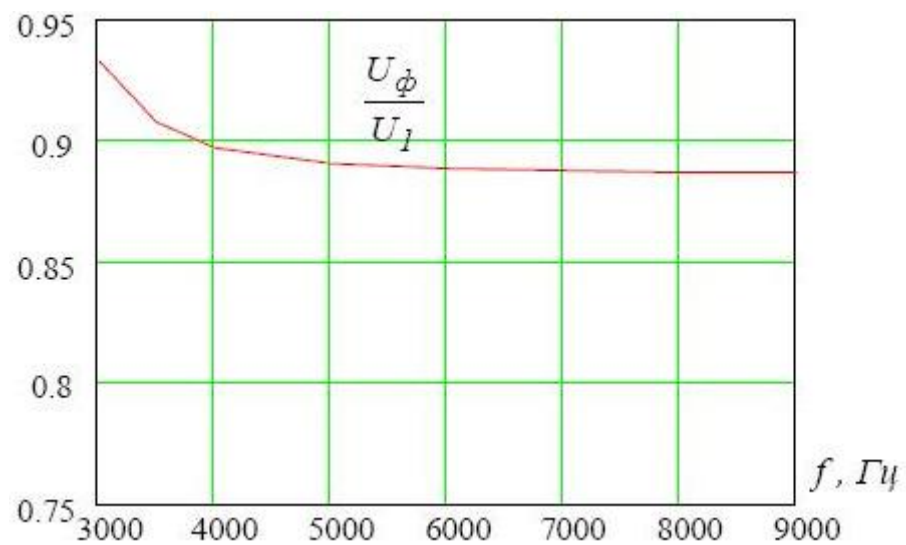


Рис. 2.26. Залежність діючого значення напруги на виході фільтра від частоти комутацій

Діаграми струмів статора та електромагнітного моменту АД наведені на рис. 2.27-2.28.

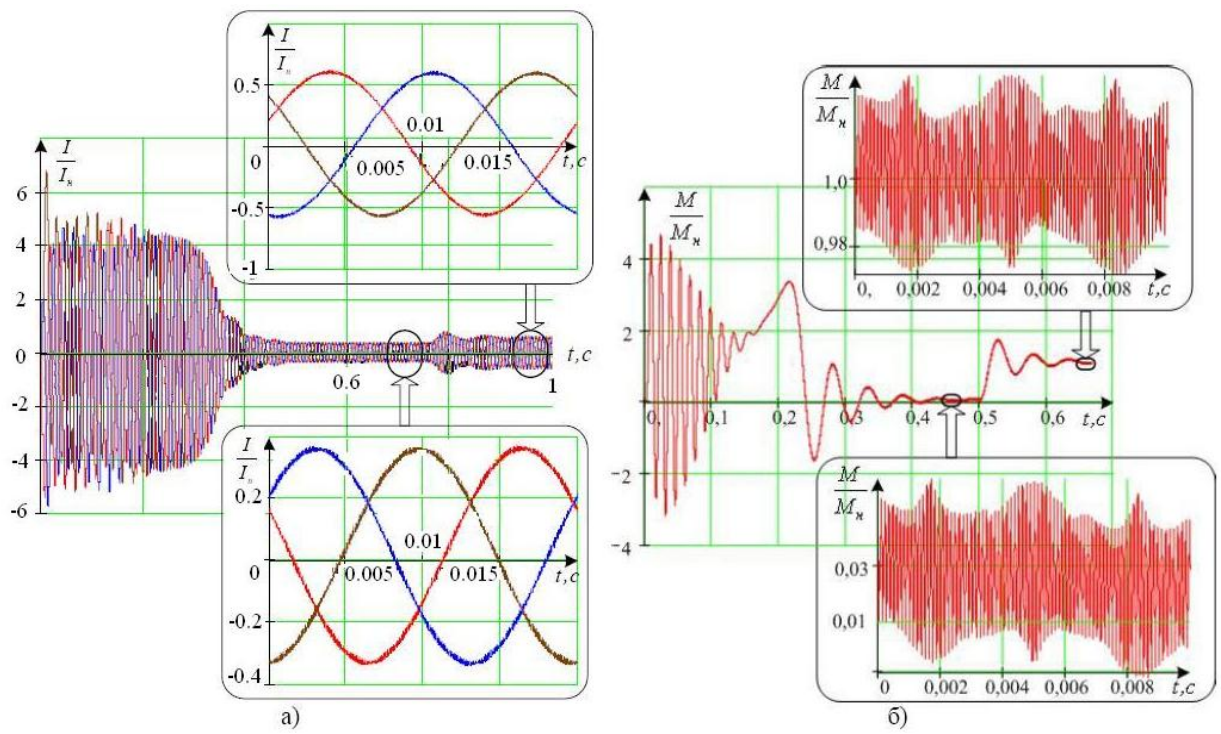


Рис. 2.27. Діаграми моменту (а) та струму статора при живленні від перетворювача без фільтра (б)

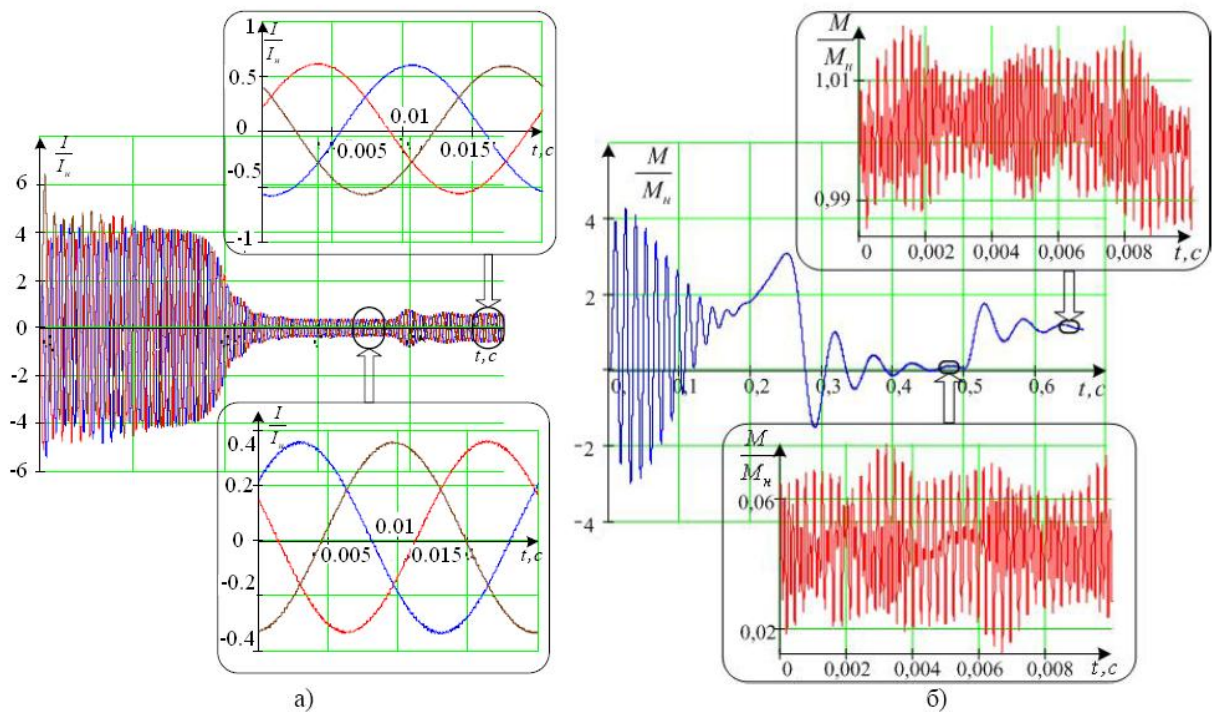


Рис. 2.28. Діаграми моменту (а) та струму статора при живленні від перетворювача з фільтром (б)

Основні параметри АД, для якого виконуємо дослідження наведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1. Основні параметри АД

Паспортні дані	Значення
Тип АД	М 54/2
Кратність пускового струму	6,50
Перевантажувальна здатність	2,50
Номінальне ковзання	0,120
Номінальна потужність, кВт	7,0
Максимальна напруга, В	250,0
Максимальний струм, А	180,0
Кількість пар полюсів	2,0
Коефіцієнт корисної дії	0,910
Коефіцієнт потужності	0,890

Визначені рівні ВГ фазної напруги наведені в табл. 2.2.

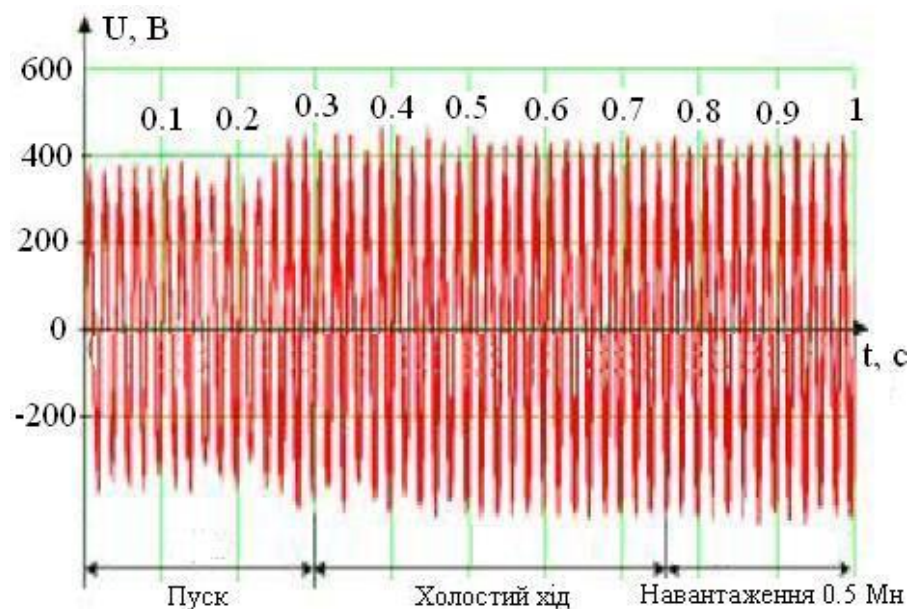


Рис. 2.29. Напруга на затискачах статора після фільтра під час пуску та накиду на валу АД

Таблиця 2.2. Амплітуди ВГ на затискачах АД після фільтра

Робочий режим	Відношення амплітуд ВГ, $\frac{U_k}{U_1}$		
	k_1	k_{80}	k_{160}
Режим пуску	0,9300	0,0130	0,0080
Режим холостого ходу	0,9890	0,0350	0,0080
Режим роботи під навантаженням	0,9940	0,0320	0,0080

Результати аналізування динамічних режимів зміни кутової швидкості обертання ротора у різних режимах наведені на рис. 2.30 – 2.31. Присутність постійних часу фільтра та зниження напруги обумовлює затягування тривалості перехідного процесу пуску, тож час першого узгодження становитиме для частоти 50 Гц без фільтра $t_{p50} = 0,3 \text{ с}$, в той же час з фільтром $t_{pf50} = 0,55 \text{ с}$. Для частоти 40 Гц становить відповідно $t_{p40} = 0,5 \text{ с}$ та $t_{pf40} = 0,75 \text{ с}$.

Підхід до зменшення впливу встановленого фільтра на динамічні характеристики АД може бути реалізовано із застосуванням підходу L – компенсації [11]. У такому випадку скалярний закон частотного регулювання набуде:

$$\frac{\left(U_1 \frac{1}{\gamma}\right)^2}{f^2} = \text{const}, \quad (2.24)$$

де $\gamma = k + \frac{f_{ном} - f_n}{f_{ном}}(1 - k)$; $k = \sqrt{\frac{L_k}{L_\Sigma}}$, де $L_\Sigma = L_k + L_{\Sigma\phi}$ – загальна індуктивність фільтра та короткого замикання двигуна; $L_{\Sigma\phi}$ – загальна індуктивність фільтра.

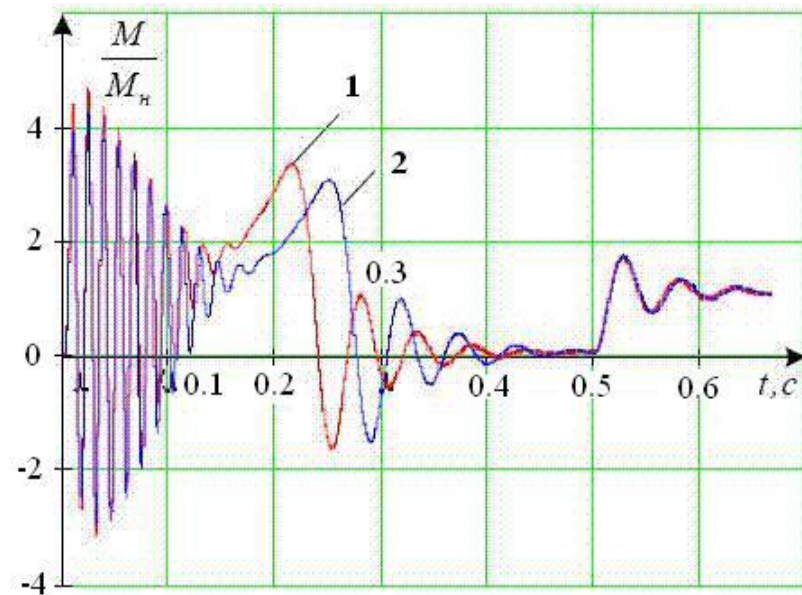
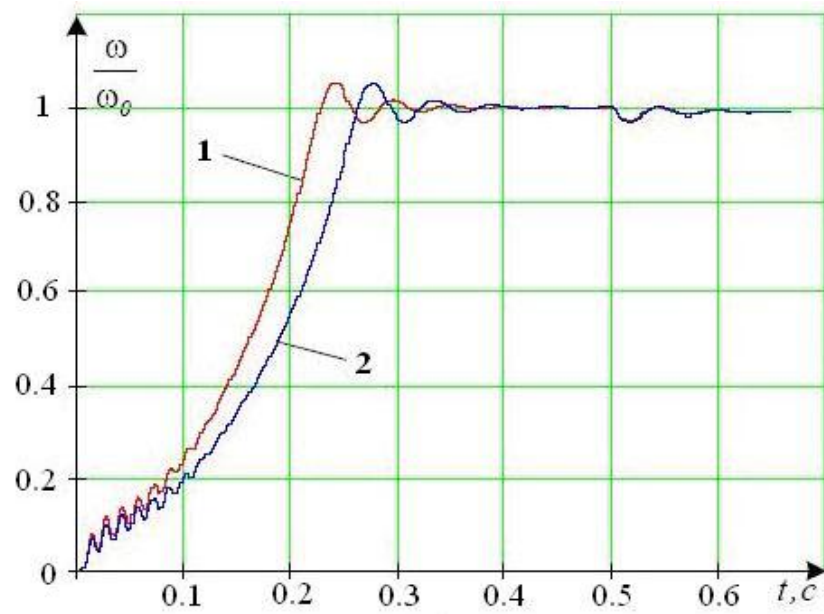


Рис. 2.30. Криві зміни кутової швидкості обертання та моменту АД під час пуску та накиді навантаження (крива 1 – за відсутності фільтра; крива 2- із наявним фільтром)

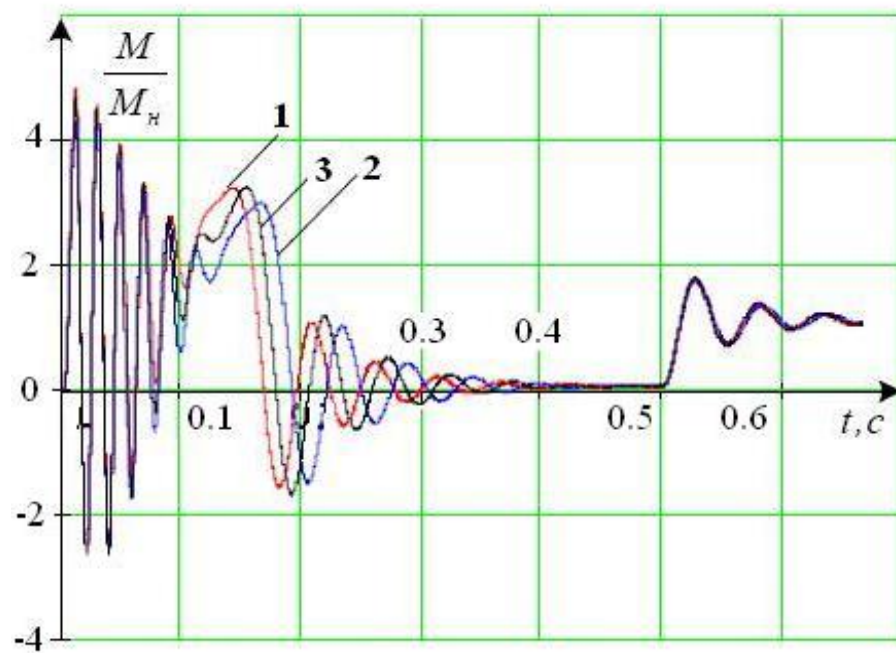
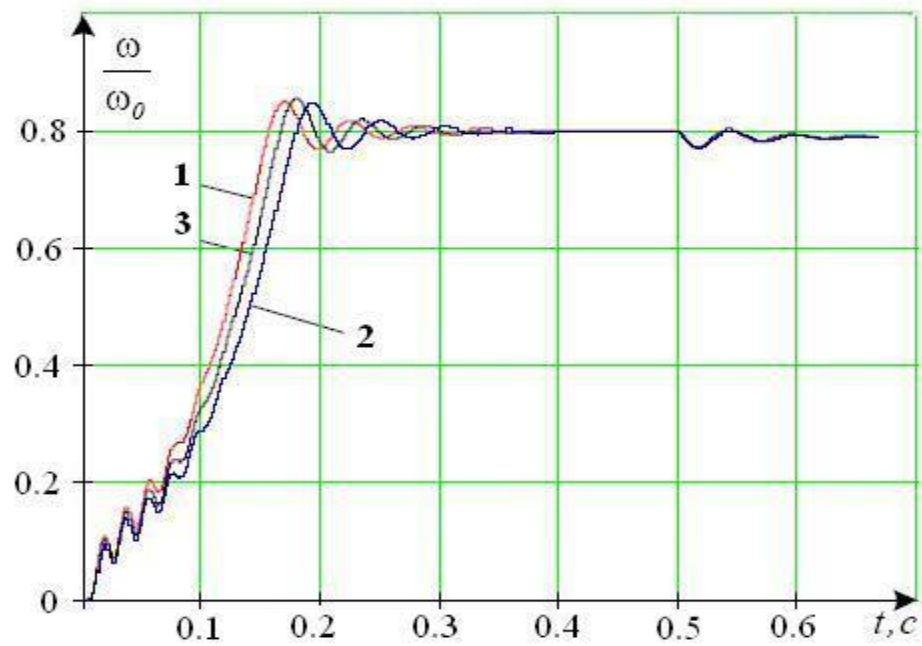


Рис. 2.31. Криві зміни кутової швидкості обертання та моменту АД під час пуску та накиді навантаження (крива 1 – за відсутності фільтра, 2 – із наявним фільтром, 3 - з наявним фільтром та компенсацією) за частоти живлення 40 Гц

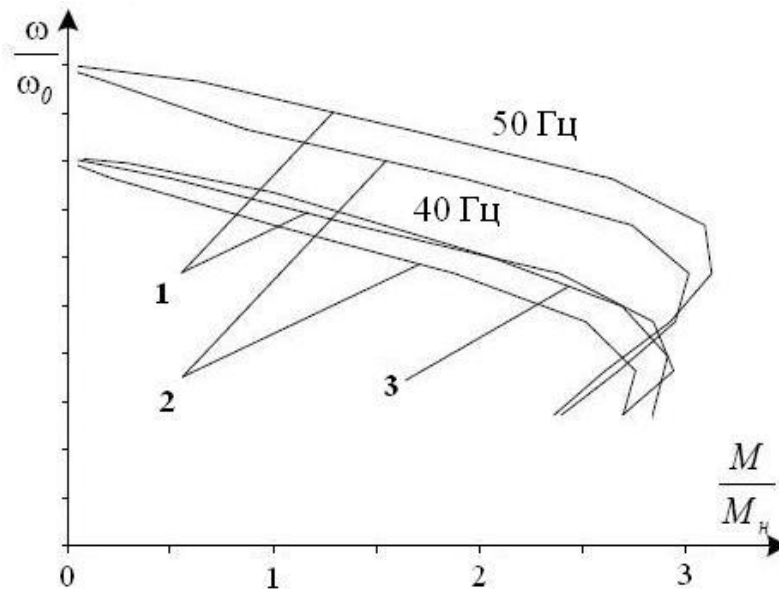


Рис. 2.32. Криві залежності середнього значення моменту динамічної характеристики АД від кутової швидкості обертання (крива 1- за відсутності фільтра; крива 2 - за наявності фільтром; крива 3 - з фільтром та L – компенсацією).

Оцінювання гармонійного складу виконаємо шляхом визначення коефіцієнтів несинусоїдальності фазного струму та напруги, результати розрахунків наводимо у табл. 2.3.

Значення еквівалентних активного та індуктивного опорів змінюються за принципом:

$$R_e = R_1 + \frac{X_\mu^2 \cdot R_2}{s \left(\frac{R_2^2}{s^2} + (X_2 + X_\mu)^2 \right)}; \quad (2.25)$$

$$X_e = X_1 + \frac{X_\mu \cdot R_2}{\left(\frac{R_2^2}{s^2} + (X_2 + X_\mu)^2 \right)} \left(\frac{R_2^2}{s^2} + X_2^2 + X_2 \cdot X_\mu \right). \quad (2.26)$$

Таблиця 2.3. Значення розрахункових коефіцієнтів

Робочий режим	Значення розрахункових коефіцієнтів	Після ШІМ	Після фільтра
Режим пуску	$K_U, \%$	34,01	1,56
	$K_I, \%$	0,94	0,63
Режим холостого ходу	$K_U, \%$	34,01	3,27
	$K_I, \%$	2,43	15,30
Робочий режим	$K_U, \%$	34,01	2,96
	$K_I, \%$	1,12	0,50

Аналізування табл. 2.3 підтверджує ефективність застосування фільтра в системі ЕП.

Кількісне оцінювання впливу застосування фільтра (табл. 2.4) виконаємо шляхом визначення додаткових втрат, перегрівання обмоток двигуна та відносного значення тривалості ефективної роботи ізоляції відповідно до методики [12].

Таблиця 2.4. Результати кількісного оцінювання впливу застосування фільтра

Найменування показників	Після ШІМ на АД, %	Після фільтра на АД, %
$\Delta P_{АД}, Вт$	8,11	0,641
$\Delta \tau, ^\circ C$	2,96	0,228
z	0,439	0,938

Висновки.

1. Активне впровадження регульованих ЕП вимагає додаткового використання пристроїв для зменшення рівня ВГ в мережі. На разі, це питання є досить важливим, оскільки до негативної практики відімкнень споживачів від електропостачання додається ще й проблема постачання неякісної енергії, генерації в мережі живлення реактивної енергії та ВГ, що значно підвищує рівень втрат в мережах та знижує тривалість безаварійної роботи електрообладнання на підприємствах.

2. Використання подібного фільтруючого обладнання дозволяє зменшити втрати в мережах та заощаджувати до 10 % електроенергії. Зважаючи на різноманітність методів та засобів споживачі мають можливість обрати найефективніший варіант з врахуванням вартості та технологічних вимог.

3. Результати досліджень підтвердили, що фільтр ввімкнений на виході інвертора, покращує склад кривої напруги та обумовлює зменшення додаткових втрат, перегрівання обмоток та зростання тривалості експлуатації ізоляції. Розрахунково визначено, що значення коефіцієнтів несинусоїдальності струму зменшується орієнтовно в 1,5-2,0 рази. Тобто, використання фільтра дозволяє зменшити значення додаткових втрат $\Delta P_{ад}$ у 12,7 разів; значення додаткового перегрівання обмоток $\Delta \tau$ у 14 раз, а відносне значення «тривалості життя» ізоляції z збільшується до 2 раз. У той же час, збільшення тривалості розгону та зменшення моменту ЕД погіршують динамічні характеристики ЕП. Компенсування подібних ефектів може здійснюватись за рахунок відповідного коректування закону частотного управління, зокрема, L – компенсації.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

СКЛАДУ КРИВИХ СТРУМУ ТА НАПРУГИ НА ШИНАХ 0,4 кВ

3.1. Методика дослідження складу кривих струму і напруги на шинах 0,4 кВ

Виконаємо експериментальні дослідження кривих струму та напруги на шинах 0,4 кВ ТП із наявними ПЧ у навантаженні, відповідно до методики [13]. Під час аналізування використовувався ПЧ розглядаємо 6-ти пульсний некерований випрямляч на базі трифазної мостової схеми. Його використання дозволить достатньо зменшити рівень наявних ВГ, якщо порівнювати зі схемами, побудованими на базі тиристорних випрямлячів.

Аналізування складу кривих струму і напруги було виконано для СЕП, поданої на рис. 3.1. Для аналізування обрано 3 ТП з різними типами ПЧ та відсотком ЕП, обладнаними ЧРП. Додатково було обрано 1 ТП (ТП №1), для котрої розраховувався не лише коефіцієнт несинусоїдальності, а й визначався характер зміни струму, що споживався ЧРП. Для досліджень обрано: ТП № 1 (ПЧ Altivar 66, 70 %); ТП № 2 (ПЧ Altivar 66, 70 %); ТП № 3 (ПЧ Altivar 66, 20 %); ТП № 4 (ПЧ ACS 600, 70 %).

Під час досліджень рівня ВГ було розглянуто наступні задачі:

1. Отримання даних щодо фактичного рівня ВГ у мережі 0,4 кВ;
2. Встановлення причин погіршення роботи електричного обладнання, обумовлених високим рівнем ВГ.

Попередньо виконано аналізування параметрів джерел ВГ, яке підтвердило:

- наявність ВГ в мережі, кратних трьом – низька ймовірність;
- високу ймовірність наявності ВГ ($6k \pm 1$) з доволі незначними амплітудами;

- високу ймовірність виникнення ВГ 2-го порядку із значною амплітудою внаслідок появи несиметрії напруг в мережі живлення;
- високу ймовірність появи парних ВГ з незначними амплітудами.
-

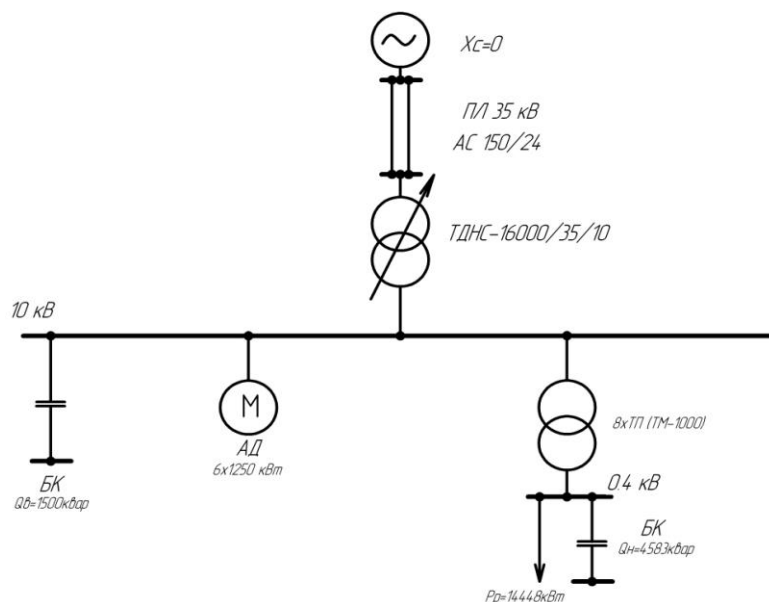


Рис. 3.2. Схема СЕП, для якої виконувалось аналізування складу кривих струму і напруги

Блок-схема вимірювальної системи, використаної для досліджень, наведена на рис. 3.3.

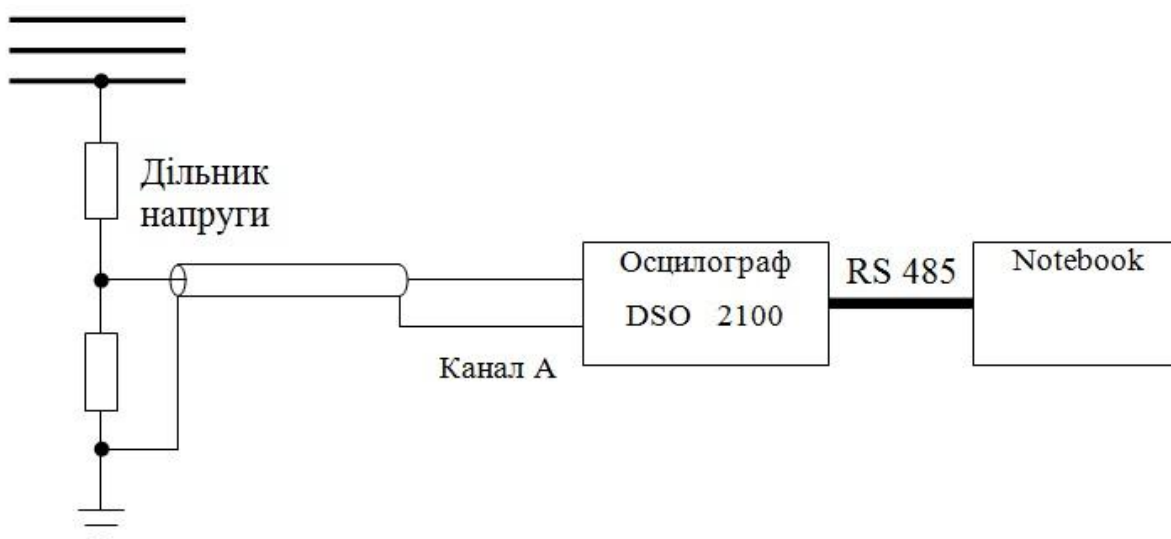


Рис. 3.3. Схема вимірювальної системи, використана для досліджень

Для досліджень використано неекранований діляник напруги з відсутньою компенсацією паразитних ємностей. Зі стандартними

параметрами дільника 1:100 на вхід цифрового осцилографа попадав сигнал зі змінним значенням напруги - 2,2 В та значенням амплітуди 3,1 В. Подібному типу дільників характерна майже ідеальна АЧХ. Низьке значення напруги у силовому колі дозволяє ігнорувати вплив паразитних ємностей.

Реєстрація спектру ВГ здійснювалась із використанням ноутбука та осцилографа типу DSO 2100. Цифровий осцилограф виконував запис кривих напруги та спектру (у режимі FFT). У режимі аналізатора спектру виконувалось дослідження частот та вимірювання значень амплітуд. Під час вимірювання ВГ досліджувані частоти порівнювалися із основною частотою та виокремлювались від іншої частини спектру шляхом використання внутрішнього фільтру. Головні параметри цифрового осцилографа подано у табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Головні параметри цифрового осцилографа

Основні параметри	Значення
Значення вхідної чутливості	від 15,0 мВ/см до 6,0 В/см
Ширина смуги спектру	50,0 МГц
Значення вхідного опору	1,0 МОм (25,0 пФ)
Тип вхідного з'єднання	AC-DC-GND
Відсоткова точність	$\pm 3,0 \%$
Робоча температура	0... +40°C (за 80% вологості)

Використання спеціалізованого ПЗ цифрового осцилографа дає можливість збереження отриманих кривих напруги та спектра ВГ. Під час виконання досліджень за допомогою осцилографа у режимі аналізатора спектру отримаємо діючі значення напруг ВГ у табличній (табл. 3.2) та графічній формах (рис. 3.5, 3.6.). На шинах 0,4 кВ ТП №2 зафіксовано вихідний сигнал аналізатора спектра в фазі В (рис.3.5) за відповідної ширини смуги пропускання $H_f = 1,25$ кГц.

Під час роботи на смузі з частотою пропускання 1,25 кГц, що відповідає 125 Гц/поділку на шкалі осцилографа (або 125 Гц/см). Шкала напруги для однієї поділки (h_u) становить 0,25 В, а для восьми поділок (H_u) - 2,0 В. З урахуванням коефіцієнта дільника напруги діюче значення напруги становить 224 В, лінійне відповідно - 387,8 В ($224 \times 1,73$). Діюче значення n -ної гармоніки визначається за формулою $U_n \times 0,25 \times 100$. Отримані значення амплітуд ВГ наведені в табл. 3.2.

Визначаємо коефіцієнт несинусоїдальності:

$$K_{U_{TP2}} = \frac{100}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} = \frac{100}{224} \sqrt{2500 + 900 + 2500 + 3600 + 1600} = 47,03 \% \quad (3.1)$$

$$K_{U_{TP3 \text{ фаза } A}} = \frac{100}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} = \frac{100}{223} \sqrt{30^2 + 10^2 + 8^2 + 8^2 + 15^2 + 22^2 + 15^2 + 12^2} = 21,062 \% \quad (3.2)$$

$$K_{U_{TP3 \text{ фаза } B}} = \frac{100}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} = \frac{100}{223} \sqrt{20^2 + 12^2 + 12^2 + 14^2 + 14^2 + 22^2 + 38^2} = 24,594 \% \quad (3.3)$$

$$K_{U_{TP3 \text{ фаза } C}} = \frac{100}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} = \frac{100}{223} \sqrt{20^2 + 18^2 + 10^2 + 14^2 + 12^2 + 28^2 + 14^2} = 20,763 \% \quad (3.4)$$

$$K_{U_{TP4 \text{ фаза } A}} = \frac{100}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} = \frac{100}{224} \sqrt{37^2 + 18^2 + 15^2 + 12^2} = 20,27 \% \quad (3.5)$$

$$K_{U_{TP4 \text{ фаза } B}} = \frac{100}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} = \frac{100}{224} \sqrt{35^2 + 20^2 + 18^2} = 19,707 \% \quad (3.6)$$

$$K_{U_{TP4 \text{ фаза } C}} = \frac{100}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} = \frac{100}{224} \sqrt{30^2 + 20^2 + 18^2 + 12^2} = 18,77 \% \quad (3.7)$$

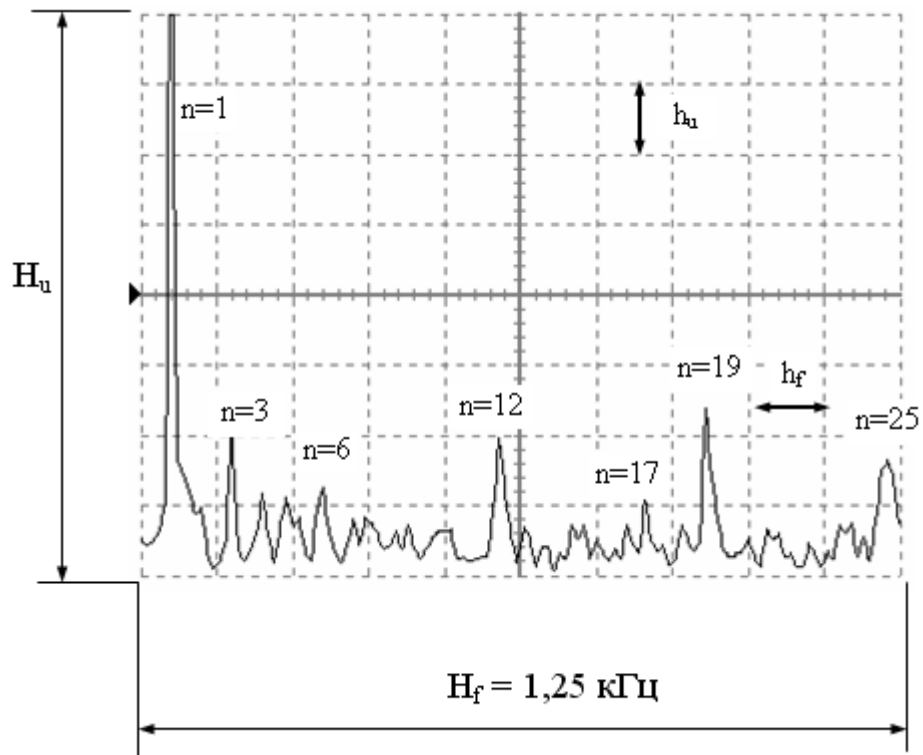


Рис. 3.5. Форма вихідного сигналу аналізатора спектра фази В

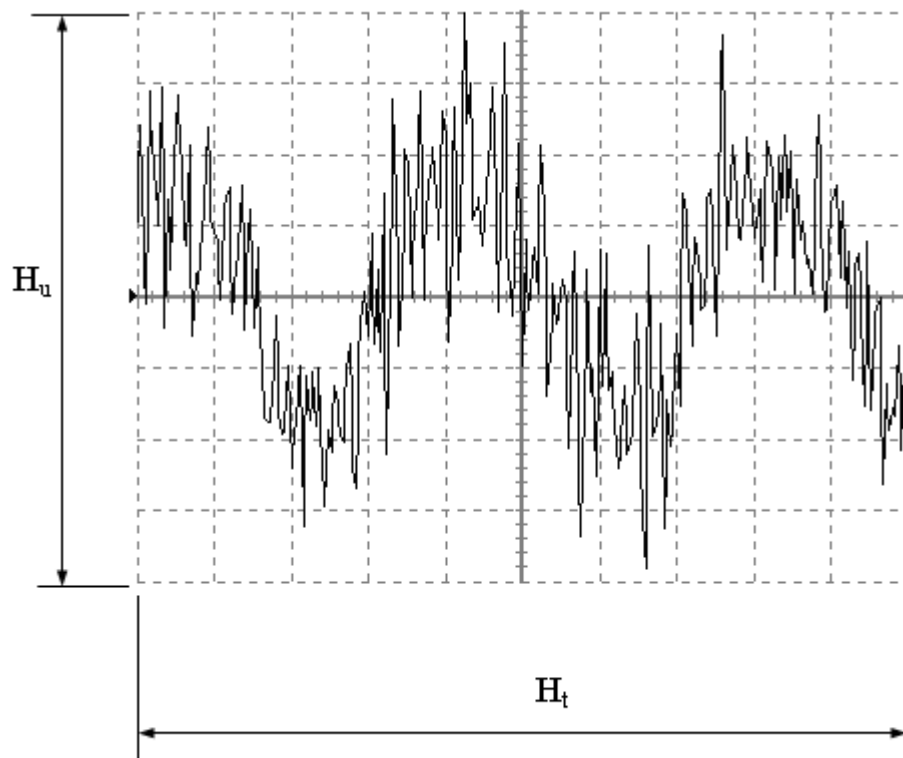


Рис. 3.6. Форма кривої напруги фази В ТП №2

Таблиця 3.2. Значення амплітуд ВГ ТП №2

Номер ВГ	Частота, Гц	U_n , В	U_n^2
1	50,0	223,0	-
2	100,0	-	-
3	150,0	50,0	2500,0
4	200,0	-	-
5	250,0	-	-
6	300,0	30,0	900,0
7	350,0	-	-
9	450,0	-	-
11	550,0	-	-
12	600,0	50,0	2500,0
15	750,0	-	-
17	850,0	-	-
19	950,0	60,0	3600,0
25	1250,0	40,0	1600,0

На рис. 3.9. наведені спектри ВГ ТП № 3. У табл. 3.3 подано діючі напруги ВГ за трьома фазами. Із порівнянь рис. 3.10. та табл. 3.3. викривлення кривої напруги за всіма фазами мають орієнтовно однакові значення. На рис. 3.11 подано криву напруги ТП № 4 (фаза В). На рис. 3.12 наведені спектри ВГ.

Таблиця 3.3. Значення амплітуд ВГ ТП №3

Номер ВГ	Задана частота, Гц	Амплітуди фаз, В		
		А	В	С
1	50,00	223,1	223,1	223,1
2	100,00	30,02	20,00	20,00
3	150,00	-	12,1	-
4	200,00	10,03	12,1	18,8
5	250,00	-	-	-
6	300,00	8,1	14,09	10,6
7	350,00	8,1	14,09	14
9	450,00	15,3	-	-
11	550,00	-	22,5	-
13	650,00	-	-	12,1
17	850,00	22,5	38,1	28,5
18	900,00	15,3	-	-
19	950,00	12,1	-	14,09

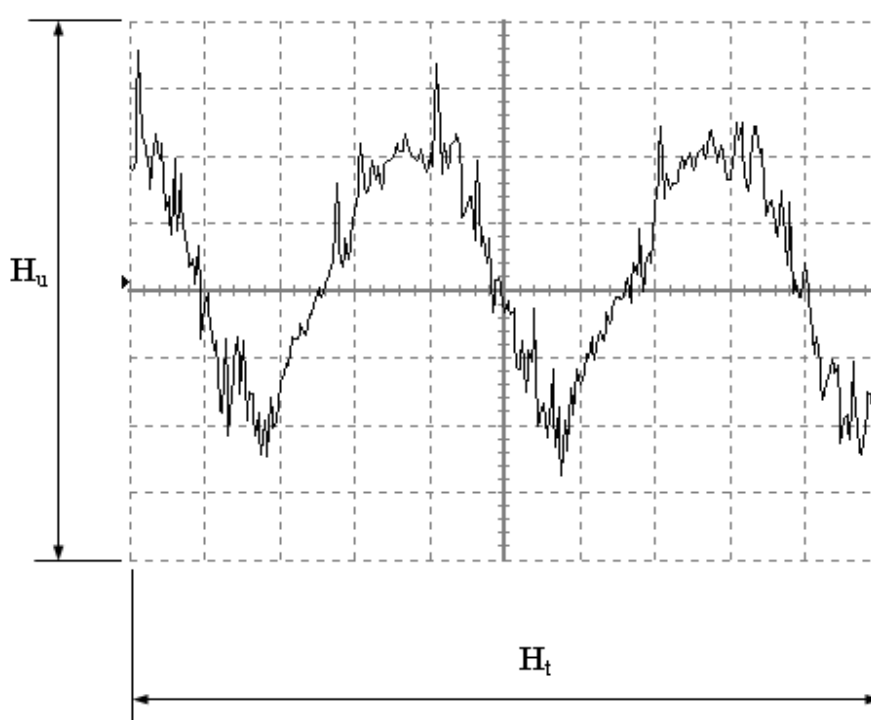
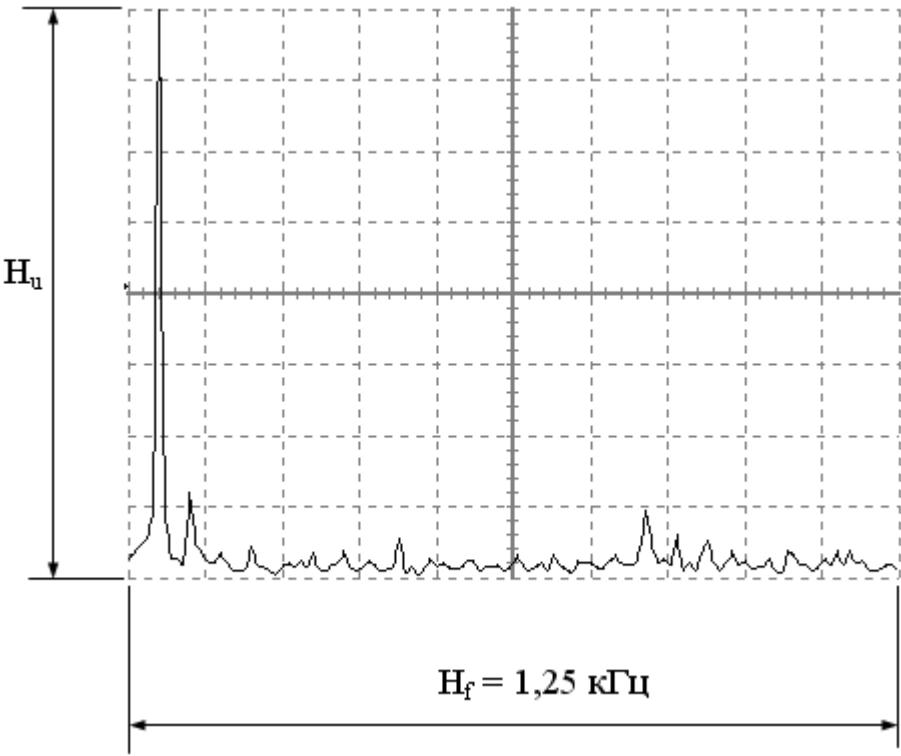
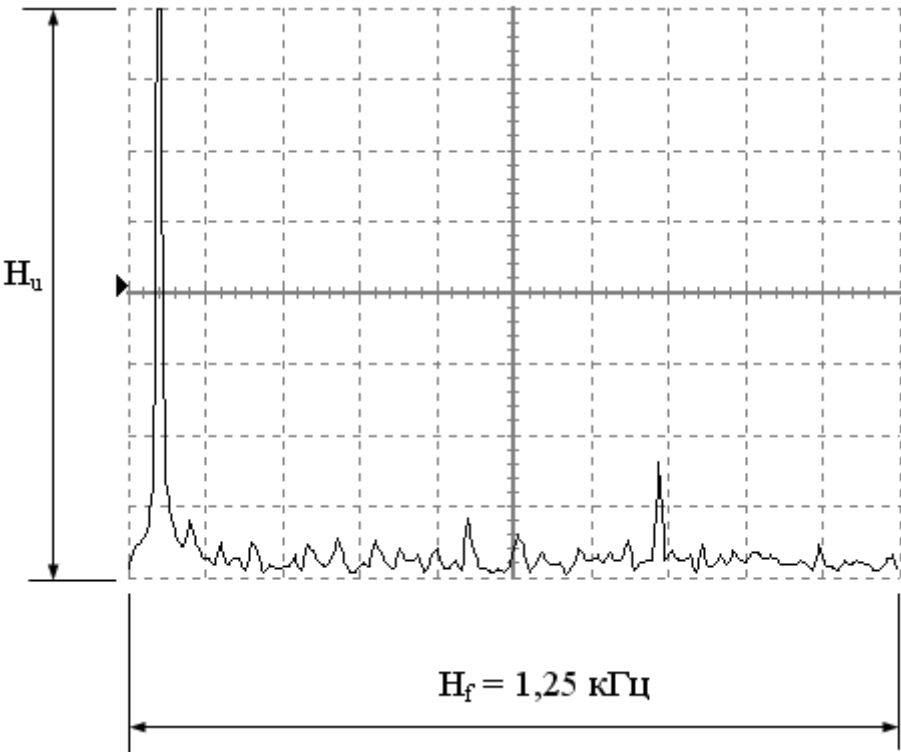


Рис. 3.9. Форма кривої напруги для ТП №3 (фаза А)

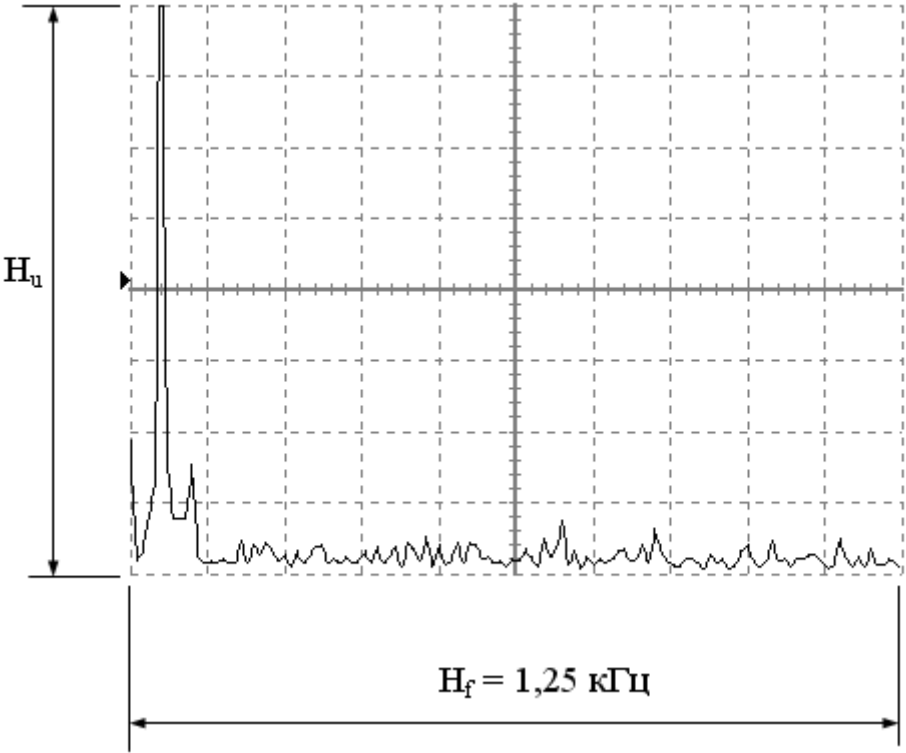


а)

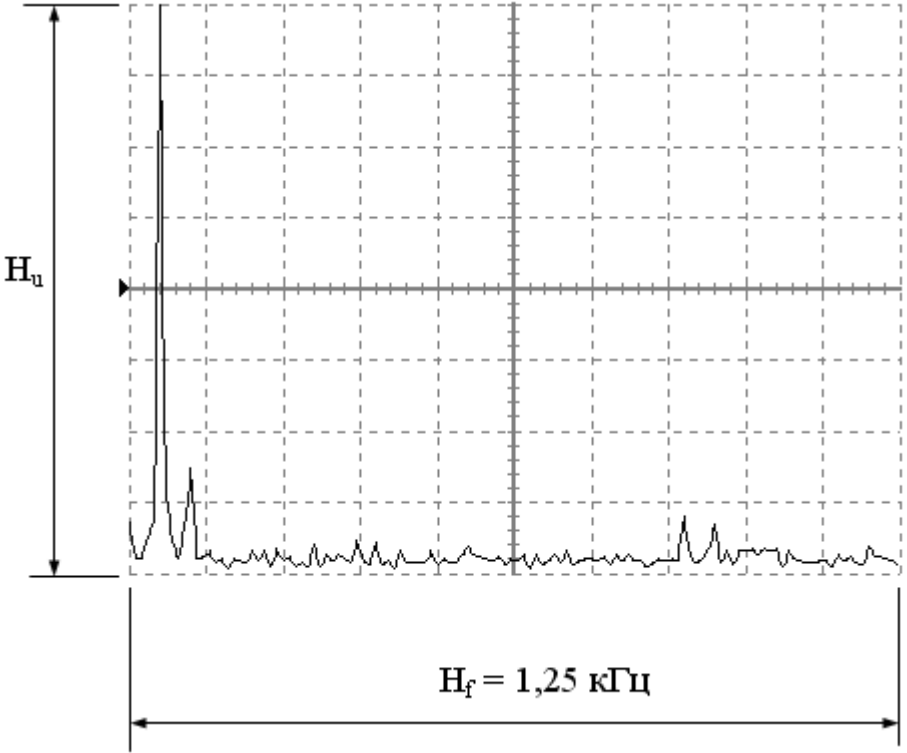


б)

Рис. 3.10. Спектры ВГ ТП №3 (а) - фаза А, (б) – фаза В



а)



б)

Рис. 3.12. Спектры ВГ ТП №4 (фаза А- (а), фаза В – (б))

Таблиця 3.4. Значення амплітуд ВГ ТП № 4

Номер ВГ	Задана частота, Гц	Амплітуди фаз, В		
		А	В	С
1	50,00	224,00	224,00	224,00
2	100,00	37,00	35,00	30,00
6	300,00	-	-	-
7	350,00	-	-	-
9	450,00	-	-	-
11	550,00	-	-	-
13	650,00	18,00	-	-
15	750,00	-	-	-
17	850,00	15,00	-	-
18	900,00	-	20,00	20,00
19	950,00	-	18,00	18,00
23	1150,00	12,00	-	12,00

3.2. Дослідження неефективної роботи електричного обладнання внаслідок великого рівня вищих гармонік

Лінії електропередач. Оцінювання зменшення тривалості експлуатації кабельних ліній можна визначити з використанням відповідної формули:

$$\left(\frac{U_{\max .\text{в.г.}}}{U_{\max}} \right)^2 = \left(\frac{712,76}{316,78} \right)^2 = 5,07, \quad (3.8)$$

де $U_{\max .\text{в.г.}} = 2,25 \cdot U_{\max} = 2,25 \cdot 316,78 = 712,76 \text{ В};$

$U_{\max} = \sqrt{2}U_{\phi} = \sqrt{2} \cdot 224 = 316,78 \text{ В}.$

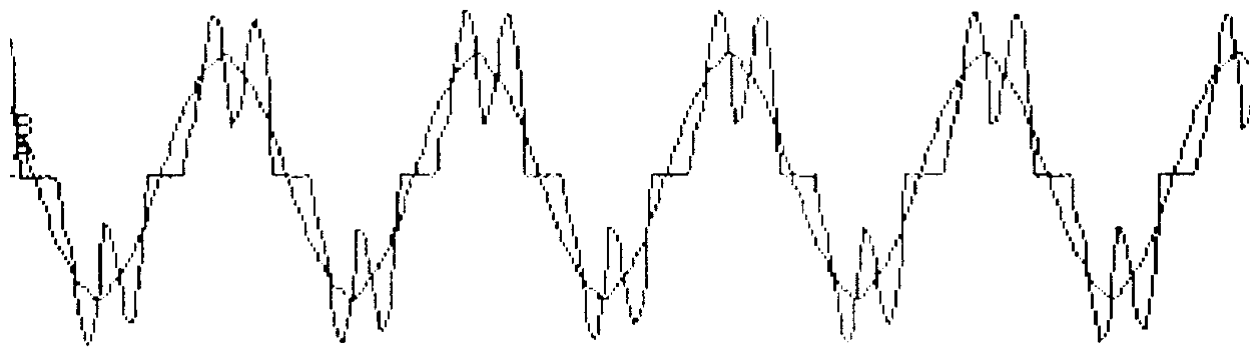
Трансформатори. ВГ напруги призводять до підвищення втрат у трансформаторах через гістерезис, вихрові струми в сталі та втрати в

обмотках. Також зменшується тривалість можливої експлуатації ізоляції. Можливе локальне перегрівання магнітопровода трансформатора. Доцільно відзначити, що ВГ нижчих порядків, мають високий коефіцієнт проникнення через трансформатор (орієнтовно до 0,9). Згідно з результатами аналізування впливу ВГ на електричне обладнання отримуємо висновки:

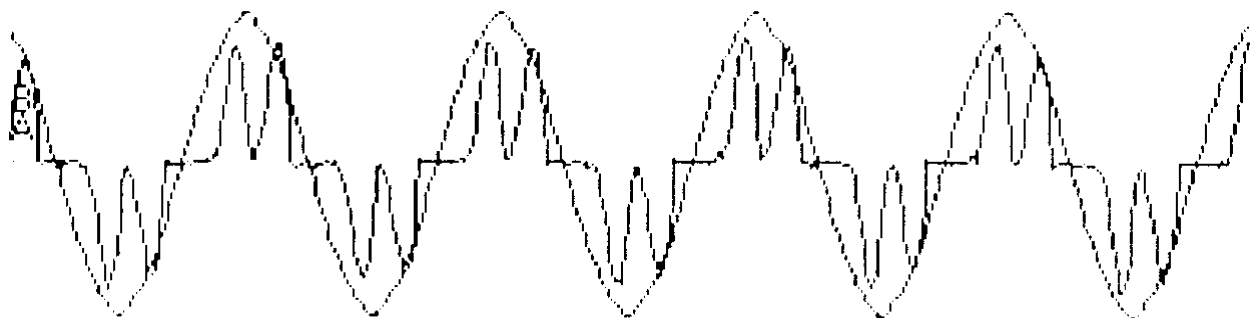
1. На шинах 0,4 кВ коефіцієнт несинусоїдальності значно перевищує рекомендовані значення ДСТУ EN 62586-2:2018, перевищуючи їх у 4 та більше разів.
2. Амплітуда напруги на цих шинах, через ВГ, досягає значення, що перевищує номінальне в 2,25 рази.
3. У спектрі основними є ВГ нижчих порядків ($n = 2, 4, 5, 6, 7, 11, 13, 17, 19$), при цьому друга, одинадцята і сімнадцята гармоніки найбільше впливають на спотворення форми кривої напруги.
4. Рівні ВГ значно зменшують період безаварійної експлуатації електричного обладнання.
5. Під час вибору нелінійних обмежувачів перенапружень доцільно враховувати збільшення амплітуди максимальної напруги.
6. Наявність ВГ кратних 3 в спектрі ТП №2 підтверджує перевантаження силових трансформаторів.

Аналогічні дослідження виконувались і щодо характеру зміни струму, споживаного частотно-регульованим електродвигуном. На рис. 3.13 подано осцилограми струму і напруги ПЧ, підключеного до шин 0,4 кВ ТП №1 при зміні навантаження від 50 до 100%.

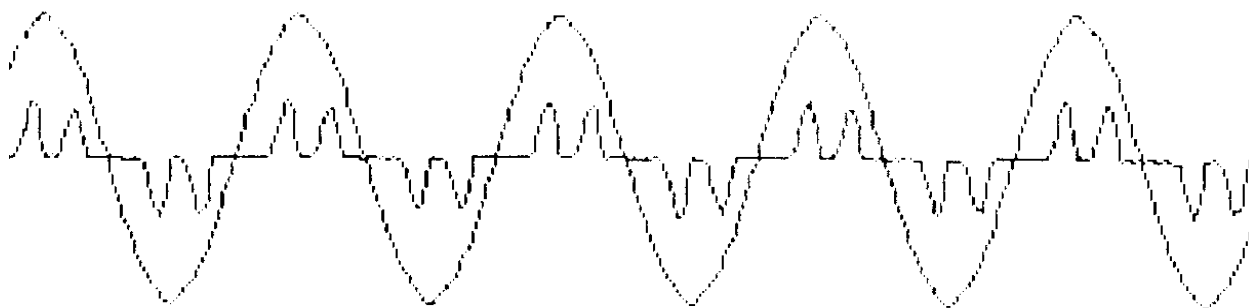
Відповідно до конфігурації кривих, наведених на рис. 3.12, можна помітити, що крива споживаного струму відображає форму, яка включає два виражені піки впродовж напівперіоду живлення. Величини амплітуд цих піків можуть варіюватися через нерівномірність напруги живлення.



Напруга 230 В, струм 12,50 А, 100% навантаження



Напруга 230 В, струм 9,37 А, 75% навантаження



Напруга 230 В, струм 6,24 А, 50% навантаження

Рис. 3.12. Форми кривих фазних струмів та напруг ПЧ

У спектрі наявні й інші ВГ, однак, в наслідок незначності їх рівня (менше 1 %) ми їх не подаємо.

Визначаємо коефіцієнт несинусоїдальності напруги:

$$K_{U_{TH}} = \sqrt{U_{3*}^2 + U_{5*}^2 + U_{7*}^2} = \sqrt{7,3^2 + 46,5^2 + 23,6^2} = 52,65 \%. \quad (3.9)$$

Таблиця 3.5. Результати дослідження складу кривих струму та напруги
ТП № 1

Номер ВГ	Задана частота, Гц	U_* , %	I , А
3	150,00	7,30	48,00
5	250,00	46,50	301,00
7	350,00	23,60	153,00

3.3. Електромагнітна сумісність перетворювачів частоти і асинхронних двигунів

Взаємодія між перетворювачами частоти і асинхронними двигунами визначається рівнями спотворень форми струму і напруги, що впливає на обмеження нагрівання двигуна та підвищення навантаження на ізоляцію статора. Вплив ПЧ визначається топологією та алгоритмами управління автономним інвертором. Електромагнітна сумісність досягається у випадку ПЧ з автономним інвертором на базі GTO або SGCT тиристорів, що використовують ШІМ. Ці інвертори, завдяки алгоритмам ШІМ, мінімізують спотворення струмів двигуна, і струм, який формується на виході, має практично 100% основної гармоніки. Форма напруги на статорі немає піків комутаційних перенапруг, є близькою до синусоїдальної, і частка основної гармоніки в напрузі статора також наближена до 100%. Таким чином, перетворювачі частоти на базі автономного інвертора з ШІМ можна використовувати зі стандартними асинхронними двигунами, без будь-яких обмежень на довжину сполучного кабелю між інвертором та двигуном.

У випадку використання перетворювачів частоти на базі АІН із ШІМ використовують модулі IGBT або послідовно з'єднані IGCT [15]. Зокрема, в частотно-регульованих електроприводах ці перетворювачі мають позитивні характеристики, але важливо забезпечити зменшення впливу імпульсів вихідної напруги АІН на ізоляцію обмотки статора та обмеження хвильових

процесів у сполучному кабелі між інвертором і двигуном, які супроводжуються перенапруженнями (відома як проблема "довгого кабеля").

Форма напруги АІН з ШІМ представляє собою послідовність високочастотних прямокутних імпульсів різної полярності та тривалості, з амплітудою, рівною напрузі ланки постійної напруги перетворювача частоти. Висока крутизна фронту імпульсу (du/dt) визначається швидкістю перемикання силових ключів АІН і становить 0,05-2 мкс для IGBT і IGCT. Зрозуміло, що хвиля імпульсної напруги, яка діє на ізоляцію обмотки статора двигуна, може викликати її пошкодження.

Цій важливій проблемі присвячено значну кількість публікацій [16, 17]. Хвилі імпульсної напруги, регулярно накладені на статор двигуна, призводять до передчасного ушкодження ізоляції міжвиткового простору. При цьому особливо сильно постраждають перші або останні витки будь-якої фази, що спричинює послідовне зниження електричної міцності міжвиткової ізоляції.

Іншим, не менш важливим питанням є перенапруження на статорі двигуна, що залежить від довжини сполучного кабелю між двигуном і АІН. Ця проблема, відома як "проблема довгого кабелю", пов'язана із розповсюдженням хвильових електромагнітних процесів у ланцюгу "АІН - сполучний кабель - АД". Залежно від довжини кабелю може виникнути відображена хвиля напруги на виходах двигуна, яка досягає подвійного значення напруги U_d , через несумісність хвильового опору кабелю Z_q і вхідного опору двигуна Z_g , який визначається індуктивністю розсіяння статора і еквівалентною частотою фронту імпульсу. Можливість ушкодження ізоляції зростає зі зменшенням часу наростання імпульсів вихідної напруги АІН, або, іншими словами, зі збільшенням du/dt . Здослідження показують, що критична довжина кабелю зазвичай знаходиться в межах від 20 до 42 м.

Для усунення негативних впливів, що виникають внаслідок форми вихідної напруги АІН, на практиці рекомендується: скорочення (за можливістю) довжини сполучного кабелю; використання на виході АІН L-, LC- та LCR-фільтрів, а також RC-демпферів.

Використання L-фільтрів, або трифазних реакторів, які включаються на виході АІН, не лише зменшує du/dt , але також змінює хвильовий опір кабелю. Штучне збільшення хвильового опору кабелю призводить до зниження коефіцієнта віддзеркалення хвилі перенапружень, що зменшує розмір відображеного фронту імпульсу і нижча напруга в кабелі і на виодах ЕД.

РС-демпфери підключаються безпосередньо до статора двигуна, представляють собою простий і відносно економічний засіб обмеження перенапружень. Параметри демпфера вибирають так, щоб повний опір двигуна був згоджений з характеристичним опором кабелю. У випадку співпадіння опорів ефект віддзеркалення імпульсу напруги відсутній, і ізоляція ЕД залишається захищеною від впливу перенапружень.

Фільтр LC, що розташований на виході АІН, функціонально є фільтром низьких частот. Зазвичай його резонансна частота знаходиться в діапазоні 1,00 -1,50 кГц, і вищі частоти поглинаються фільтром. А отже, частота перемикавання вентилів АІН повинна бути значно (принаймні в 2 рази) вищою, ніж резонансна частота LC-фільтра, щоб уникнути надмірного струму, який споживається фільтром, і порушень нормальної роботи електроприводу. LC-фільтр дозволяє створити в двигуні форму напруги, що наближається до синусоїдальної. У деяких випадках до LC-фільтру додається дисипативний елемент - резистор, який включається для уникнення можливості виникнення ударних процесів.

Використання спеціалізованого алгоритму управління силовими ключами АІН забезпечує задовільне вирішення завдання фільтрування вихідної напруги інвертора з пасивним LC-фільтром. Треба наголосити, що АІН керується так, щоб напруга залишалась в заданому "коридорі точності" [16].

У цьому випадку виявляється ще один корисний результат - виключається можливість з'явлення постійної складової в вихідній напрузі АІН, яка обумовлена розкидом характеристик силових ключів. Це робить можливим застосування схеми низьковольтного перетворювача частоти для

частотного регулювання асинхронних двигунів потужністю від 250,00 до 800,00 кВт і напругою 10,0 кВ, оскільки намагнічення осердя вихідного трансформатора повністю виключене.

3.4. Забезпечення електромагнітної сумісності ЧРП та СЕП

Проблема забезпечення електромагнітної сумісності між ЧРП та СЕП в основному виникає внаслідок викривлень форми напруги і струму. Обидва ці негативні чинники, що впливають на ЕМС, виникають внаслідок процесів комутації вентилів, хоча механізм їх виникнення різний.

Оцінювання впливу ЧРП на електричну мережу важливо враховувати, що вони під'єднуються до неї як навантаження у вигляді асинхронних двигунів і трансформаторів. Рівень електромагнітної сумісності визначається якістю ЕЕ, що підтверджується коефіцієнтом несинусоїдальності форми кривої напруги K_U .

Прогнозне оцінювання коефіцієнта несинусоїдальності у мережі з ЧРП, де ПЧ працює на базі шестипульсного випрямляча, може бути проведена відповідно до формули:

$$K_U = \frac{\gamma \sqrt{3K_n}}{\pi \alpha K_I K_u} \times \sqrt{\frac{\pi \alpha K_I K_u}{\sqrt{6K_n} \cdot \gamma \cdot (1 + \beta)}} - 1, \quad (3.10)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{S_{K3}}{S_{АДном}}; \beta = \frac{X_{П}}{X_{С.Е}}; \gamma = \frac{\omega}{\omega_{НОМ}};$$

$$K_n = \frac{M_{АД}(\omega/\omega_{ном})}{M_{АДном}} \text{ — коефіцієнт завантаження АД;}$$

$M_{АД}$ та ω - момент та частота обертання АД;

K_H - коефіцієнт, що враховує відсоток основної гармоніки в діючому значенні струму АД;

K_I - коефіцієнт зв'язку між вхідним струмом інвертора та вихідним струмом статора двигуна.

Із наведених співвідношень стає очевидним, що для визначення або прогнозу можливих значень, досить знати узагальнені параметри α , β , γ та коефіцієнта, оскільки коефіцієнти визначаються типом інвертора ПЧ і його управлінським алгоритмом. Отриманий діапазон варіативності узагальнених параметрів електротехнічного комплексу досліджуваного підприємства становить: $\alpha = 20,0 \div 60,0$, $\beta = 1,0 \div 4,0$, $\gamma = 0,20 \div 1,00$. Розрахунково визначено апроксимаційні вирази для залежностей (рис. 3.60. Крива 1 - це $\beta=0$, крива 2 - $\beta=0,5$, крива 3 - $\beta=1$, крива 4 - $\beta=1,5$, крива 5 - $\beta=5$, крива 6 - $\beta=2,5$, крива 7 - $\beta=3$. Аналітичні залежності $K_U = f(\alpha, \beta)$ для $\gamma = 1$ подано виразами (3.13)-(3.19), а власне значення індексу виразу для K_U дорівнює номеру кривої на рис. 3.13.

$$K_{U1} = -0,1065\alpha + 14,03, \quad (3.13)$$

$$K_{U2} = -0,0864\alpha + 10,11, \quad (3.14)$$

$$K_{U3} = -0,084\alpha + 9,23, \quad (3.15)$$

$$K_{U4} = -0,0568\alpha + 7,88, \quad (3.16)$$

$$K_{U5} = -0,0527\alpha + 6,45, \quad (3.17)$$

$$K_{U6} = -0,045\alpha + 5,66, \quad (3.18)$$

$$K_{U7} = -0,032\alpha + 4,782. \quad (3.19)$$

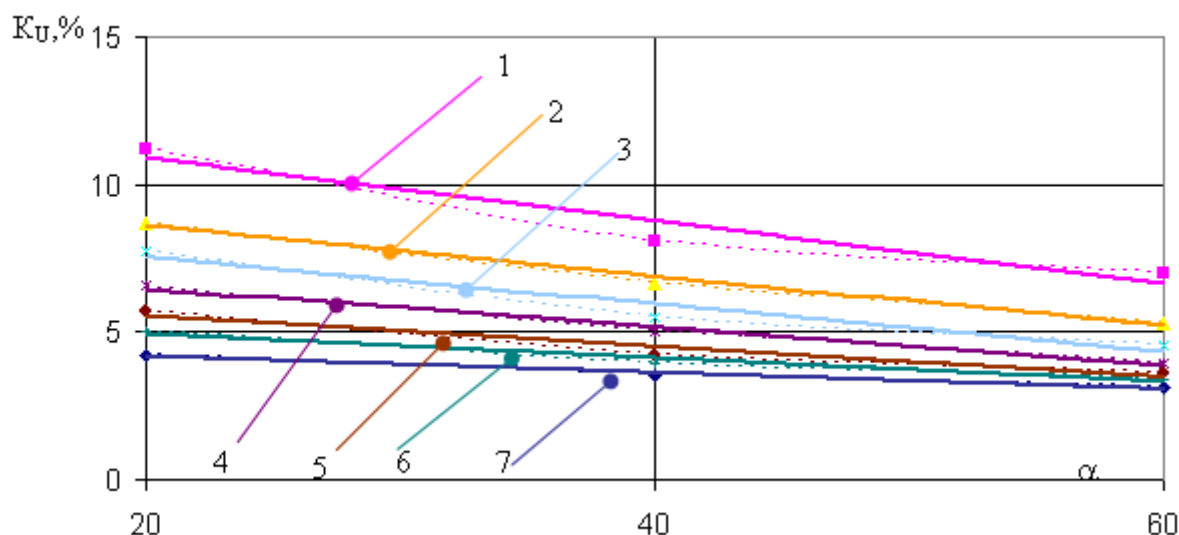


Рис.3.13. Функція $K_U = f(\alpha, \beta)$ для $\gamma = 1$

Для запропонованих виразів (3.13-3.19) значення максимальної відносної похибки апроксимації не перевищує 6,67%. Рівняння для визначення узагальнених параметрів, отримані у вигляді:

$$\alpha = 0,0011 \cdot \beta^2 - 0,209 \cdot \beta + 11,3. \quad (3.20)$$

та наведені на рис. 3.14.

Відповідно до (3.20), поданий вираз з похибкою, не перевищуючи 9%, дозволяє визначити індуктивний опір, через який ПЧ має бути під'єднаний до мережі. Це відбувається за умови, що коефіцієнт несинусоїдальності не перевищує допустиме значення, інакше кажучи:

$$X_{II} = \beta \cdot X_{C.E} \quad (3.21)$$

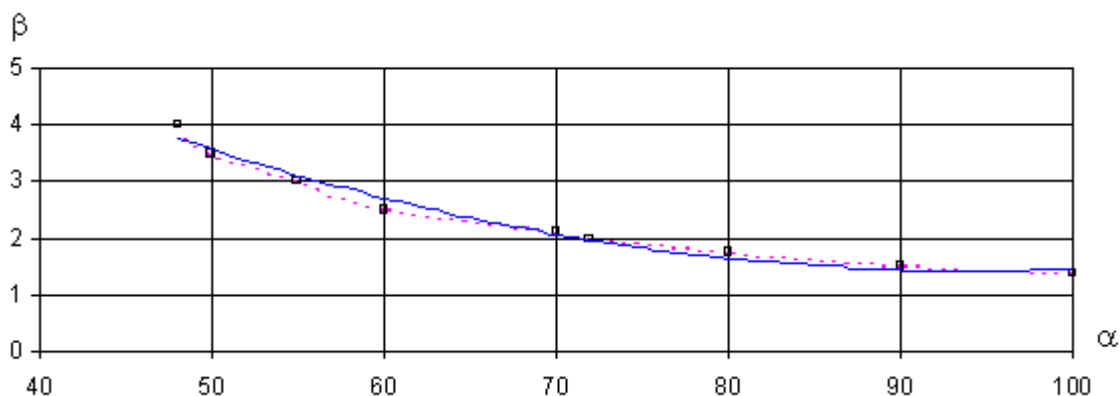


Рис. 3.14. Крива залежності $\alpha = 0,0011 \cdot \beta^2 - 0,209 \cdot \beta + 11,3$

З метою уникнення перевищення допустимого значення на шинах ТП у будь-якому режимі при під'єднанні до мережі ПЧ із 6-ти пульсним випрямлячем без додаткових фільтрів, важливо, щоб відношення потужності короткого замикання на цих шинах до номінальної повної потужності перетворювача частоти відповідало співвідношенню:

$$\alpha \geq 20\sqrt{\left(1/e_k^*\right)-1}, \quad (3.22)$$

де e_k^* - це напруга короткого замикання.

З огляду на те, що $6,00\% < e_k < 12,50\%$, тоді $53,0 < \min \alpha < 79,0$.

Очевидно, що забезпечення необхідного значення K_U , передбаченого стандартом, залежить від параметра α . У існуючих схемах електропостачання значення $S_{КЗ}$ визначається параметрами живлячих трансформаторів. Збільшення потужності ЧРП ускладнює і, в окремих випадках, унеможливорює забезпечення ЕМС без вживання спеціальних заходів.

Підвищення потужності короткого замикання на точці підключення перетворювального навантаження еквівалентне збільшенню параметра β за рахунок зменшення індуктивного опору $X_{C.E}$, що можна досягти путем збільшення потужності живлячого трансформатора. Реалізація цього методу вимагає заміни існуючого трансформатора на більш потужний. У цьому випадку його потужність залежить від значення перетворюваної потужності.

Додатково рекомендується підєднувати парні та еквівалентні за потужністю комплекти "перетворювач частоти - двигун" до мережі через узгоджуючі трансформатори, з'єднані за схемами " Δ - Δ " і " Δ -Y" з метою виключення наявності 5-ї ВГ зворотної послідовності і 7-ї ВГ прямої послідовності, які є найвпливовішими в шестипульсних перетворювачах. Такий підхід обумовить можливість компенсації цілого ряду ВГ, а саме: 5, 7, 17 і 19-ї для парної кількості шестипульсних випрямлячів. Однак в реальних умовах такий підхід для забезпечення ЕМС в СЕП виявляється неефективним.

Одним із перспективних та радикальних способів розв'язання проблеми електромагнітного впливу ЧРП, а також зменшення їх впливу на мережі СЕП та інші навантаження (такі як двигуни та трансформатори), є розділення споживачів. У цьому випадку формується окрема мережа електропостачання для регульованих електроприводів. Впровадження такого рішення дозволяє:

- новим способом та відносно просто вирішити проблему електромагнітної сумісності і повністю усунути вплив перетворювачів на приводні двигуни інших механізмів та трансформаторів;
- зменшити габаритні розміри та оптимізувати технічні характеристики устаткування (ПЧ, ЕД тощо).

Для стандартних СЕП, де ЕД потужністю від 250,00 кВт і вище працюють на напрузі 10 кВ, складно оптимізувати параметри ПЧ для ЕП потужністю 250,0-800,0 кВт і напругою 10 кВ. У зв'язку з цим, механізми з приводними асинхронними ЕД такого розмаху потужностей вимагають або заміни двигуна на низьковольтний (380, 660 В) і використання низьковольтного перетворювача частоти, або, при залишенні двигуна 10 кВ, використання низьковольтного ПЧ з вихідним підвищуючим трансформатором.

Запасний режим для випадку відмови будь-якого перетворювача забезпечується переведенням двигунів у нерегульований режим за допомогою вимикачів (так званий "електричний байпас") на час ремонту або профілактики перетворювача. Підключення резервного трансформатора до

високовольтних шин («глибоке введення») дозволяє повністю усунути вплив ПЧ як на мережу СЕП, так і на інших споживачів.

Зазначимо, що обов'язково повинна дотримуватися для всіх варіантів організації електропостачання головна умова - збереження установок в роботі. Тому резервування має проводитися на двох рівнях: забезпеченні надійного електропостачання та збереженні роботоздатності технологічного механізму у випадку несправності перетворювача частоти.

Встановлення припустимих рівнів гармонік є завданням не простим та однозначним. Наявність інформації про рівні та спектри гармонік недостатня для встановлення меж, в яких забезпечиться електромагнітна сумісність обладнання в розподільних мережах електроенергії. Стандарт встановлює норми якості електроенергії на межі між енергопостачальною організацією та споживачем. Нормативні документи, які визначають припустимі рівні гармонік в мережі споживачів, відсутні.

Тобто, розроблення переліку рекомендацій ґрунтується на вимірюваннях та аналізуванні попереднього практичного досвіду. Оригінальним способом зменшення ВГ в мережах змінного струму є впровадження фільтрів у складі ФКП. Допоки природа гармонійних явищ у складних розподільних системах не буде достатньо зрозумілою, СЕП залишатиметься під загрозою підвищеної небезпеки, і експлуатуючі організації будуть застосовувати заходи лише внаслідок аварій.

У системах регульованих приводів даного підприємства застосовуються ПЧ типу Altivar 66 та ACS 600 з напругою живлення 380 В та частотою 50 Гц. ККД власне ПЧ коливається від 0,9 до 0,97. Ці пристрої використовують 6-пульсний некерований силовий випрямляч на базі 3-фазної мостової схеми, що значно зменшує вміст вищих гармоній порівняно із тиристорним мостовим випрямлячем.

Вплив 6-пульсного випрямляча на трифазну мережу має наступні особливості:

- відсутність гармонік, кратних трьом;

- наявність вищих гармоній порядків $6k \pm 1$.

При використанні принципів ШІМ несуча частота в інверторі (до 20 кГц) на два порядки перевищує основну частоту, і крива вихідного струму не має напівхвильової симетрії через перекош фазових напруг джерела живлення. Таким чином, з точки зору генерації ВГ в мережу, ШІМ-інвертор має такі характеристики:

- відсутність гармонік, кратних трьом;
- наявність ВГ порядків $6k \pm 1$, які, як правило, не досягають великих амплітуд;
- у системі присутні парні ВГи.

Висновки.

1. Коефіцієнт несинусоїдальності прямо залежить від відносної частоти обертання АД та коефіцієнта завантаження, обернено пропорційний відношенню потужності короткого замикання мережі до номінальної потужності АД і параметрів ланки постійного струму і інвертора привода.

2. На підприємствах машинобудування частка перетворювального навантаження на шинах 0,4 кВ може сягати 70% від загального навантаження, а коефіцієнт несинусоїдальності при цьому може перевищувати 20%. Крива струмів має два піки за напівперіод напруги живлення, і амплітуди цих піків можуть розрізнятися через несиметрію напруги живлення.

3. Забезпечення ЕМС для ЧРП з мережами електропостачання може бути досягнуте шляхом розділення шин живлення лінійного навантаження та частотно-регульованого привода; обмеження відношення потужностей привода і лінійного навантаження, що підключені до одного трансформатора, на рівні не більше 0,2; підключення кожного привода через мережевий дросель і фільтр електромагнітних перешкод; встановлення вихідних фільтрів, що пригнічують вищі гармонійні в кривій струму двигуна і перешкоди, викликані широтно-імпульсною модуляцією вихідної напруги

інвертора; живлення пристроїв технологічної та мережевої автоматики від окремих джерел синусоїдальної напруги; широке застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв для компенсування гармонійних складових порядків $6k \pm 1$; забезпечення відсутності несиметрії напруги джерела живлення.

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ФКП ДЛЯ МЕРЕЖ 0.4 КВ

Один із найефективніших методів поліпшення електромагнітної сумісності (ЕМС) та зниження коефіцієнта несинусоїдальності у електроприводах з використанням перетворювачів частоти - це використання електричних фільтрів у ролі фільтруючих пристроїв. Інші, добре відомі та часто використовувані методи та засоби часто не дають очікуваного ефекту або є неекономічними.

Найперспективнішим вважається використання силових фільтрів у складі фільтрів компенсації потужності (ФКП), які в сучасності є основним технічним засобом зниження рівня вищих гармонік у системах електропостачання [13]. При підключенні таких пристроїв до мережі частково або повністю розв'язується завдання компенсації реактивної потужності, оскільки конденсатори фільтра виступають як джерела реактивної потужності на основній частоті.

Вибір параметрів ФКП для мереж напругою $<1\text{кВ}$ включає певні особливості, обумовлені значними активними опорами мережі, низькою добротністю ланцюгів ФКП і необхідністю компромісу при точному налаштуванні на резонансну частоту. За умови невеликої добротності ланцюгів ФКП через значні активні опори допоміжного обладнання, ФКП в мережах $U_{\text{ном}} < 1\text{кВ}$ менше відчують зміни частоти напруги живлення, а також менше реагують на відхилення параметрів елементів від номінальних значень. Однак наявність великих активних опорів зменшує ефективність роботи ФКП.

Практика вказує на те, що оптимальніше використання одного ФКП, налаштованого на частоту гармоніки найменшого порядку амплітудного спектра напруги мережі. Бажано обирати частоту налаштування меншою, ніж частота відповідної канонічної гармоніки.

Активні опори елементів мережі складаються з відповідних опорів кабелів та (або) шин, перехідних опорів контактних з'єднань, власне двигуна та інших навантажень. Значення k_{vk} для кожного з цих елементів може відрізнятися, що ускладнює розрахунки. Тому доцільно припустити різке виникнення поверхневого ефекту у всіх елементах мережі $k_{vk} = \sqrt{\nu}$: в цьому випадку похибка розрахунків збільшиться на 2-4%, що залишається в межах допустимих рамок для інженерних розрахунків.

Значення активних опорів для елементів та методи їх розрахунків для мереж $U_{ном} < 1 \text{ кВ}$ знаходяться в відповідних довідниках, аналогічно до того, як це робиться при визначенні струмів короткого замкнення у таких мережах. Розглянемо питання визначення параметрів ФКП з урахуванням активних опорів ФКП в мережі. Потужність БК ФКП ν -ї гармоніки:

$$Q_{\phi\nu} = \frac{3 \cdot U_{нб} \cdot I_{\phi\nu}}{\sqrt{1,6 - a_p^2 \left(\frac{U_{\max}}{U_{нб}} \right)^2}}, \quad (4.1)$$

де $U_{нб}$ – значення номінальної напруги БК ФКП, кВ;

$I_{\phi\nu}$ – значення номінального струму БК ФКП, кА.

З врахуванням додаткових опорів ФКП:

$$a_p = \frac{\nu^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_{\phi}}{\sqrt{1 + (\nu^2 - 1) \operatorname{tg}^2 \varphi_{\phi}}}. \quad (4.2)$$

Значення коефіцієнт струморозподілу:

$$k_{vp} = k_{iv} = \sqrt{\frac{1 + \nu_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{екв}}{\left(1 + \frac{R_{\phi}}{R_{екв}} \right)^2 + \nu_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{екв}}}, \quad (4.3)$$

де $R_{екв}$ та $X_{екв}$ - еквівалентні опори мережі;

ν_p – номер гармоніки, на частоту якої буде налаштовано ФКП.

Внаслідок похибок в заданні параметрів електрообладнання, частота налаштування ФКП відрізняється від розрахункової. У розглядуваному випадку:

$$k_{\nu_p}^{(\Delta)} \approx \sqrt{\frac{1 + \nu_p^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_{екв}}{\left(1 + \frac{R_\phi}{R_{екв}}\right)^2 + \frac{\nu_p^2}{R_{екв}^2} (X_{екв} \pm \Delta X_\phi)^2}}, \quad (4.4)$$

Множник зменшення напруги ν_p –ї гармоніки після приєднання ФКП цієї гармоніки із ідеальним резонансним налаштуванням:

$$k_{uv}^{(p)} = \frac{R_\phi}{R_{екв}} \cdot \frac{k_{\nu_p}}{1 + \nu_p^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_{екв}}. \quad (4.5)$$

У таблиці 4.1 наведене обладнання, яке необхідне для комплектації ФКП для мереж 0,4 кВ та перелік обмежень допустимого значення активного опору ФКП.

Для зниження активного опору ланцюга ФКП рекомендується використовувати реактори з малими активними опорами, застосовувати автоматичні вимикачі замість рубильників та запобіжників, розташовувати ФКП максимально близько від трансформаторів ТП, зменшувати кількість з'єднань шин та їх перехідні опори. Особливу увагу доцільно звертати на підвищення ефективності ФКП у випадку збільшення потужності БК.

Впродовж останнього десятиліття впроваджено значну кількість ФКП в електромережах 0,4 кВ різноманітних виробництв, зокрема в галузях чорної та кольорової металургії, целюлозно-паперових комбінатів, нафтопереробних, машинобудівних та тощо.

Таблиця 4.1. Список обладнання для ФКП

Ном. пот. БК, квар	Тип обладнання		Акт. опір л. ФКП, мОм
	Конденсатори	Реактори	
для 7-ї гармоніки			
342,0	КМ1-0,38-13-3У3	РТСТ-660-0,027	4,7-6,0
276,0	КМ1-0,38-13-3У3	РТСТ-660-0,034	6,0-7,0
145,5	КС1-0,38-18-3У3 КС0-0,38-12,5-3У1	РТСТ-660-0,064	7,0-8,0
для 5-ї гармоніки			
678,0	КС2-0,38-40У3 КМ1-0,38-13У3	РТСТ-820-0,027	4,0-6,0
360,0	КС2-0,38-40-373	РТСТ-820-0,0505	6,0-7,0
240,0	КС2-0,38-40-371	РТСТ-410-0,076	8,0-9,0
для 3-ї гармоніки			
500,0	КС2-0,38-50-373	РТСТ-410-0,101	7,0-8,0
144,0	КС2-0,38-36-373	ФРОС-250-0.5	8,0-9,0
84,0	КС1-0,38-14-371	2хФРОС-250-0.5	8,0-10,0

Виконаємо розрахунок парвметрів ФКП для впровадження в електромережу 0,4 кВ ТП №1. ТП №1 обрана через те, що коефіцієнт несинусоїдальності на її шинах є найвищим. Трансформатор ТМ-1000/10, який буде враховуватися, має навантаження в 567 кВА, включаючи ЧРП та інші нелінійні навантаження, такі як газорозрядні лампи та зварювальні апарати. Крім того, у цьому навантаженні присутні компресори, насоси, сушильні шафи, загальною встановленою потужністю 132 кВА, і частка автоматизованих приводів, які регулюються ПЧ, у загальному навантаженні становить понад 80%.

Потужність КЗ на 10 кВ шинах становить $S_k = 150 \text{ MVA}$, наявний дефіцит реактивної потужності у розмірі 200 квар. Струм 3-ї, 5-ї, 7-ї гармоній

становить $I_3 = 48 \text{ A}$, $I_5 = 301 \text{ A}$ та $I_7 = 153 \text{ A}$, а напруга 3-ї, 5-ї, 7-ї ВГ виражена у відсотках $U_{3*} = 7.3\%$, $U_{5*} = 46.5\%$, $U_{7*} = 23.6\%$. Коефіцієнт несинусоїдальності також визначено: $K_{U \text{ ТП1}} = \sqrt{U_{3*}^2 + U_{5*}^2 + U_{7*}^2} = \sqrt{7.3^2 + 46.5^2 + 23.6^2} = 52.7\%$.

Схема електропостачання та її заміщення для ТП №1 подано на рис. 4.1 та 4.2 відповідно.

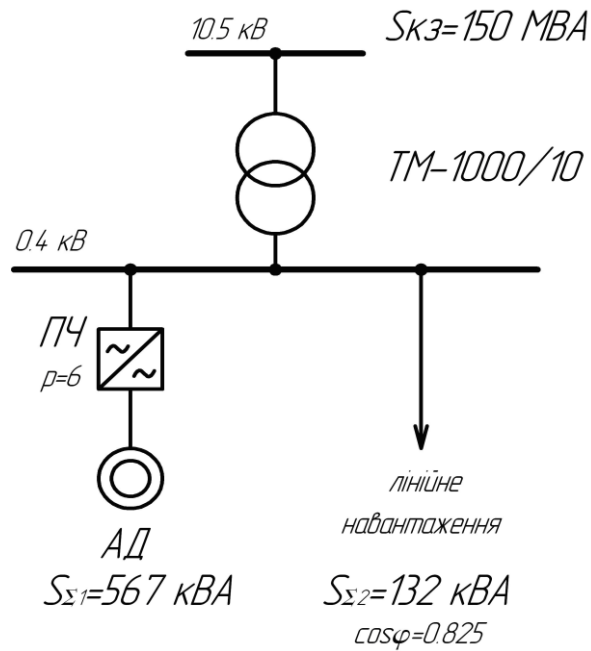


Рис. 4.1. СЕП споживачів 0.4 кВ ТП №1

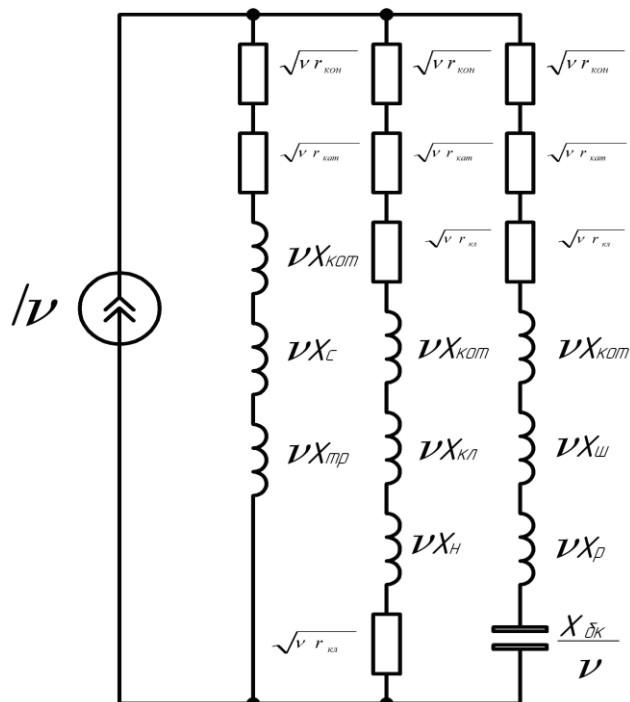


Рис. 4.2. Схема заміщення елементів мережі СЕП ТП №1

1. Проведемо розрахунок опорів елементів відповідно до схеми на рис.4.2. Опір системи:

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_k} \cdot \left(\frac{U_{nn}}{U_{вн}} \right)^2 = \frac{10.5^2}{150} \cdot \left(\frac{0.4}{10.5} \right)^2 = 1 \text{ мОм},$$

Вихідні дані трансформатора ТМ-1000/10:

$$U_{вн} = 10 \text{ кВ};$$

$$U_{nn} = 0.4 \text{ кВ};$$

$$\Delta P_{xx} = 2.1 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{кз} = 12.2 \text{ кВт};$$

$$U_{к\%} = 5.5 \%.$$

Розрахуємо опори:

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_{nn}^2}{S_{нтр}} = \frac{12.2 \cdot 0.4^2}{1000} \cdot 10^3 = 1.952 \text{ мОм},$$

де $S_{нтр}$ – значення номінальної потужності, кВА;

$\Delta P_{кз}$ – значення втрат КЗ, кВт.

Визначимо повний опір:

$$Z_{mp} = \frac{U_{к\%} \cdot U_{nn}^2}{100 \cdot S_{нтр}} = \frac{5.5 \cdot 0.4^2}{100 \cdot 1000} = 8.8 \text{ мОм}.$$

Визначимо індуктивний опір:

$$X_{mp} = \sqrt{Z_{mp}^2 - R_{mp}^2} = \sqrt{8.8^2 - 1.952^2} = 8.72 \text{ мОм}.$$

Відповідно отримаємо еквівалентні опори:

$$X_{екв1} = X_c + X_{mp} = 1 + 8.72 = 9.72 \text{ мОм}.$$

$$R_{екв1} = R_{mp} + R_{нтр} = 1.952 + 10 = 11.952 \text{ мОм}.$$

Опори навантаження з врахуванням перехідних контактних з'єднань та опорів кабельних ліній становлять:

$$X_{екв2} = 372 \text{ мОм}; R_{екв2} = 316 \text{ мОм}.$$

Загальний еквівалентний опір:

$$\begin{aligned} Z_{екв} &= \frac{(R_{екв1} + jX_{екв1}) \cdot (R_{екв2} + jX_{екв2})}{(R_{екв1} + R_{екв2}) + j(X_{екв1} + X_{екв2})} = \frac{(11.952 + j9.72) \cdot (316 + j372)}{(11.952 + 316) + j(9.72 + 316)} = \\ &= \frac{3776.832 + j4446.144 + j3071.52 - 3615.84}{327.952 + j325.72} = \frac{160.992 + j7517.664}{327.952 + j325.72} = \\ &= \frac{7519.386 \cdot e^{j88.77^\circ}}{462.219 \cdot e^{j44.8^\circ}} = 16.268 \cdot e^{j43.97^\circ} = 16.268 \cos 43.97^\circ + j16.268 \sin 43.97^\circ = \\ &= (11.7 + j11.2) \text{ мОм}. \end{aligned}$$

2. Розрахуємо орієнтовну потужність БК, яка обумовлюється струмами вищих гармонік.

Потужність БК 3, 5 та 7-ї гармонік:

$$Q_{БК3} \geq 1.2 \cdot k_c \cdot U_n \cdot I_3 = 1.2 \cdot \sqrt{3} \cdot 0.38 \cdot 48 = 37.9 \text{ квар};$$

$$Q_{БК5} \geq 1.2 \cdot k_c \cdot U_n \cdot I_5 = 1.2 \cdot \sqrt{3} \cdot 0.38 \cdot 301 = 237.7 \text{ квар};$$

$$Q_{БК7} \geq 1.2 \cdot k_c \cdot U_n \cdot I_7 = 1.2 \cdot \sqrt{3} \cdot 0.38 \cdot 177 = 120.8 \text{ квар},$$

Відповідно до табл. 4.1 та з врахуванням дефіциту реактивної потужності обираємо ФКП:

3-ї гармоніки: $Q_{БК3} = 84 \text{ квар}$ з конденсатором КС1-0.38-14-371 та реактором 2хФРОС-250-0.5; активний опір ланцюга ФКП: $R_{\phi3} = 10 \text{ мОм}$.

5-ї гармоніки: $Q_{БК5} = 240 \text{ квар}$ з конденсатором КС2-0.38-40-371 та реактором РТСТ-410-0.076; активний опір ланцюга ФКП: $R_{\phi5} = 9 \text{ мОм}$.

7-ї гармоніки: $Q_{BK7} = 145.5 \text{ кварз}$ конденсатором КС1-0.38-18-3У3 та реактором РТСТ-660-0.064; активний опір ланцюга ФКП: $R_{\phi7} = 8 \text{ МОм}$.

3. Коефіцієнти струмозподілу між ФКП та мережею відповідно до (4.3):

$$k_{3p} = \sqrt{\frac{1 + \nu_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{екв}}{\left(1 + \frac{R_{\phi3}}{R_{екв}}\right)^2 + \nu_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{екв}}} = \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot 0.95^2}{\left(1 + \frac{10}{11.7}\right)^2 + 3 \cdot 0.95^2}} = 0.777;$$

$$k_{5p} = \sqrt{\frac{1 + \nu_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{екв}}{\left(1 + \frac{R_{\phi5}}{R_{екв}}\right)^2 + \nu_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{екв}}} = \sqrt{\frac{1 + 5 \cdot 0.95^2}{\left(1 + \frac{9}{11.7}\right)^2 + 5 \cdot 0.95^2}} = 0.849;$$

$$k_{7p} = \sqrt{\frac{1 + \nu_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{екв}}{\left(1 + \frac{R_{\phi7}}{R_{екв}}\right)^2 + \nu_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{екв}}} = \sqrt{\frac{1 + 7 \cdot 0.95^2}{\left(1 + \frac{8}{11.7}\right)^2 + 7 \cdot 0.95^2}} = 0.89,$$

$$\text{де } \operatorname{tg} \varphi_{екв} = \frac{X_{екв}}{R_{екв}} = \frac{11.2}{11.7} = 0.95.$$

4. Розрахована кратність зниження напруг 3, 5 та 7-ї ВГ визначаємо (4.5):

$$k_{u3}^{(p)} = \frac{R_{\phi3}}{R_{екв}} \cdot \frac{k_{3p}}{1 + \nu_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{екв}} = \frac{10}{11.7} \cdot \frac{0.777}{1 + 3 \cdot 0.95^2} = 0.18;$$

$$k_{u5}^{(p)} = \frac{R_{\phi5}}{R_{екв}} \cdot \frac{k_{5p}}{1 + \nu_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{екв}} = \frac{9}{11.7} \cdot \frac{0.849}{1 + 5 \cdot 0.95^2} = 0.1;$$

$$k_{u7}^{(p)} = \frac{R_{\phi7}}{R_{екв}} \cdot \frac{k_{7p}}{1 + \nu_p \operatorname{tg}^2 \varphi_{екв}} = \frac{8}{11.7} \cdot \frac{0.89}{1 + 7 \cdot 0.95^2} = 0.083.$$

5. Значення залишкової напруги 3, 5 та 7-ї ВГ:

$$U_{3*3ал} = k_{u3}^{(p)} \cdot U_{3*} = 0.18 \cdot 7.3 = 1.314 \%;$$

$$U_{5*3ал} = k_{u5}^{(p)} \cdot U_{5*} = 0.1 \cdot 46.5 = 4.65 \%;$$

$$U_{7*3ал} = k_{u7}^{(p)} \cdot U_{7*} = 0.083 \cdot 23.6 = 1.959 \%.$$

6. Значення коефіцієнта несинусоїдальності у випадку встановлення комплексу з 3-х ФКП:

$$K_{U\text{ ТП1}} = \sqrt{U_{3*3ал}^2 + U_{5*3ал}^2 + U_{7*3ал}^2} = \sqrt{1.314^2 + 4.65^2 + 1.959^2} = 5.21 \% < 8 \%.$$

Згідно з [23] нормально допустиме значення коефіцієнта несинусоїдальності для напруги 0,38 кВ становить 8 %, а гранично - 12 %, отже отримане значення менше, ніж допустиме.

Розрахунок базується на використанні ФКП, зорієнтованих на частоти ВГ, що переважають в амплітудному спектрі, зокрема, 3, 5 та 7-ї. Цей підхід визначається основною метою зниження рівня ВГ у мережі до мінімально можливого (теоретично до нуля). Однак аналіз втрат, зумовлених ВГ, підтверджує, що збитки досягають максимуму за великих напруг ВГ та зменшуються зі зниженням напруг, що демонструє квадратичну тенденцію. Отож, необхідність абсолютного зниження рівнів ВГ фактично відсутня; досить зменшити їх до межі, визначеної технічними вимогами.

Очевидно, що за такого підходу немає необхідності у встановленні великої кількості ФКП. Практично рекомендується [13] в мережах з 6-пульсовими випрямлячами встановлювати лише ФКП 5-ї ВГ, якщо досягнуте необхідне зниження несинусоїдальності напруги до встановлених меж.

У випадку встановлення ФКП 3, 5 та 7-ї ВГ потужність БК фільтрів становить:

$$Q_{BK\Sigma} = Q_{BK3} + Q_{BK5} + Q_{BK7} = 84 + 240 + 145.5 = 469.5 \text{ квар},$$

Це значно більше, ніж необхідне значення компенсації реактивної потужності.

Коефіцієнт відносної потужності становить:

$$k_p = \frac{Q_p}{S_{\kappa 3}} = \frac{700}{18 \cdot 10^3} = 3.89 \cdot 10^{-2}.$$

Визначаємо частку струмів 3 та 7-ї гармоній, які пройдуть через ФКП 5-ї ВГ:

$$\sigma_{v3} = \frac{1}{\frac{1}{k_p v_p^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_p}{v_q} \right)^2 \right] + 1} = \frac{1}{\frac{1}{3.89 \cdot 10^{-2} \cdot 5^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{5}{3} \right)^2 \right] + 1} = 1.2;$$

$$\sigma_{v7} = \frac{1}{\frac{1}{k_p v_p^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_p}{v_q} \right)^2 \right] + 1} = \frac{1}{\frac{1}{3.89 \cdot 10^{-2} \cdot 5^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{5}{7} \right)^2 \right] + 1} = 0.665.$$

Значення струму в колі БК становитиме:

$$I_{v\Sigma} = \sqrt{I_3 \sigma_{v3} + I_5 + I_7 \sigma_{v7}} = \sqrt{(48 \cdot 1.2)^2 + 301^2 + (153 \cdot 0.665)^2} = 322.9 \text{ А}.$$

Значення мінімальної потужності БК:

$$Q_{p\min} \geq 1.2 \cdot k_c \cdot U_n \cdot I_{\Sigma} = 1.2 \cdot \sqrt{3} \cdot 0.38 \cdot 322.9 = 255.03 \text{ квар}.$$

Отже, перевіряємо встановлені обмеження на перевантаження за потужністю БК та перевищення напруги відповідно до:

$$K_Q a_p k_u \leq \sqrt{1 - \frac{0.7}{\nu_p}},$$

$$\text{де } K_Q \approx 1 + \frac{Q_p}{S_K} = 1 + 3.89 \cdot 10^{-2} = 1.00389;$$

$$a_p = \frac{\nu_p^2}{\nu_p^2 - 1} = \frac{5^2}{5^2 - 1} = 1.042;$$

$$k_u = \frac{U_{\text{макс}}}{U_{\text{ном.роб}}} = \frac{0.4}{\sqrt{3} \cdot 0.4} = 0.577.$$

Тобто:

$$1.00389 \cdot 1.042 \cdot 0.577 \leq \sqrt{1 - \frac{0.7}{5}}$$

$$0.604 < 0.927.$$

Тобто, перевантаження відсутнє.

У випадку встановлення запропонованого ФКП значення залишкової напруги ВГ становитиме:

$$\Delta U_{3*} = U_{3*} \cdot (1 - \sigma_{\nu 3}) = 7.3 \cdot (1 - 1.2) = 1.46 \%;$$

$$\Delta U_{5*} = 0;$$

$$\Delta U_{7*} = U_{7*} \cdot (1 - \sigma_{\nu 7}) = 23.6 \cdot (1 - 0.665) = 7.8 \%.$$

А, відповідно, значення коефіцієнту несинусоїдальності становитиме:

$$K_{U \text{ ТПІ}} = \sqrt{\Delta U_{3*}^2 + \Delta U_{5*}^2 + \Delta U_{7*}^2} = \sqrt{1.46^2 + 0^2 + 7.8^2} = 7.93 \% < 8 \%.$$

Висновки

1. Зменшення рівнів ВГ напруги можна досягти шляхом впровадження схемних рішень або використання спеціалізованих технічних засобів. Серед

таких засобів найбільш розповсюдженим у сучасних системах електропостачання є ФКП, а їх параметри підбираються так, щоб виникало явище резонансу на частоті налаштування.

2. Після проведення необхідних розрахунків виявилось, що у даному випадку оптимально використовувати лише один ФКП, налаштований на 5-ту ВГ. Такий підхід дозволяє забезпечувати зниження несинусоїдальності напруги до визначених меж. Зазначено, що отримана мінімально необхідна потужність менша за розрахункову мінімально необхідну потужність при використанні комплекту із трьох ФКП.

3. Отже, для встановлення на шинах 0,4 кВ ТП №1 обираємо наступний ФКП 5-ї ВГ: $Q_{БК5} = 360 \text{ квар}$ на базі КС2-0.38-40-373 та РТСТ-820-0.0505.

ВИСНОВКИ

Переважна частина втрат електроенергії характерна сектору енергоспоживання, де й, вочевидь, потрібно акцентувати більшу увагу на її ефективному використанні. Оскільки ЕП використовують приблизно 70% виробленої ЕЕ, найбільше значущі економічні вигоди можна отримати за допомогою регульованих електроприводів для управління технологічними процесами. Це, спільно з можливостями автоматизації, може забезпечити оптимальне використання електроенергії та інших ресурсів.

Ефективність впровадження ЧРП для різних типів навантаження варіює. Це пояснюється різницею у взаємозв'язках між швидкістю обертання та моментом опору.

Найбільш оптимальним є використання ЧРП для тих навантажень, чия механічна характеристика описується рівнянням квадратичної параболи, що означає, що споживана потужність пропорційна кубу швидкості обертання. Це означає, що навіть невелике зниження швидкості обертання електропривода може призвести до значної економії електричної енергії. Теоретично, для таких навантажень зниження швидкості на 10% може призвести до 30% економії потужності. До цього типу навантажень відносяться відцентрові насоси та вентилятори.

Особливо важливим є використання ЧРП для установок, що перекачують рідини, оскільки вони можуть забезпечити ще більшу економію електричної енергії.

В результаті техніко-економічних порівнянь прийшли до висновку, що найбільш цілеспрямованим є використання ЧРП для управління насосами. Використання ЧРП, в поєднанні з управлінням технологічним процесом, часто веде до раціонального вирішення енергетичних завдань. Однак використання ЧРП призводить до генерації вищих гармоній та спотворення синусоїдальної форми напруги та струму, що може викликати додаткові втрати енергії в електромережах та негативно впливати на інші системи та пристрої.

Проведений аналіз експериментальних досліджень гармонійного складу кривих струму та напруги на шинах 0.4 кВ трансформаторних підстанцій, де використовуються приводи частотного регулювання (ПЧ), призвів до таких висновків:

1. Коефіцієнт несинусоїдальності на шинах 0,4 кВ значно перевищує значення, визначені нормативними документами, майже у 6 разів.

2. Значення амплітуди напруги на шинах 0,4 кВ досягає рівня, що становить 2,25 від номінального, через вплив ВГ.

3. У спектрі гармоній переважають гармоніки нижчих порядків $n = 3, 6, 13, 19$, в той час як інші, хоча й присутні, не мають вагомого внеску (складають до 0,1%) і, отже, не розглядаються детально.

4. Рівні ВГ суттєво впливають на зменшення терміну експлуатації електричного обладнання.

5. Збільшення амплітуди максимальної напруги важливо враховувати під час підбирання нелінійних обмежувачів перенапружень.

6. Наявність в спектрі ВГ кратних 3 свідчить про можливі перевантаження силових трансформаторів та локальні перегрівання магнітопровода.

7. Гармоніки струму в лініях призводять до підвищення втрат потужності і напруги. В кабельних лініях і шинопроводах гармоніки напруги збільшують струм витоку, а їх вплив на діелектрик пропорційний квадрату максимального значення амплітуди. Термін служби кабельних ліній скорочується, у даному випадку, в 5 разів.

Розроблено математичну модель системи «СП-АД» для аналізу впливу фільтра на динамічні характеристики електроприводу.

Порівняльний аналіз гармонічного складу показав, що фільтр не лише поліпшує гармонічний склад напруги живлення, струмів статора АД та моменту двигуна, але також змінює його залежно від режиму роботи (пуск двигуна, холостий хід, під навантаженням).

Запропоновано встановлення додаткових технічних засобів для зниження негативного впливу ЧРП на СЕП.

Проведено розрахунки економічної ефективності прийнятих рішень, зокрема впровадження ЧРП та встановлення додаткового фільтра для зменшення вищих гармонік, генерованих ним в електричну мережу. З отриманих результатів розрахунків експлуатаційних витрат, економічної ефективності та орієнтовного періоду окупності, що становить приблизно 1,5 року, а впровадження запропонованих заходів є економічно виправданим і період їх окупності не перевищує 8 років.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи електропривода: підручник / Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, О.Ю. Синявський, Д.Г. Войтюк, В.В. Савченко, І.М. Голодний. – К.: Видавництво Ліра-К, 2017. – 524 с.
2. Електропривод робочих машин: підручник / П. О. Василега. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 290 с.
3. Василега П. О. Електропостачання: підручник / П. О. Василега. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 525 с.
4. Василега П. О. Електротехнологічні установки: навчальний посібник / П. О. Василега. – Суми: Видавництво СумДУ, 2010. – 548 с.
5. Видмиш А. А. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1 : навчальний посібник / А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. – Вінниця : ВНАУ, 2020. – 387 с.
6. Зеленов А. Б. Теорія електропривода. Методика проектування електроприводів : Підручник / А. Б. Зеленов. – Луганськ : Видавництво «Ноулідж», 2010. – 670 с.
7. Регульований електропривод. Теорія. Моделювання / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Л.С. Червінський, Д.А. Абдураманов, А.В. Торопов, О.В. Санченко; За ред. І.М. Голодного. – К.: Аграр Медіа Груп, 2015. – 509 с.
8. Павленко Т. П. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / Т. П. Павленко, О. В. Донець, О. М. Петренко – Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 132 с.
9. Dergeregelte Asynchronantriebe — eine Moeglichkeit zur Energiesparung / I. Braslavsky, Z. Ishmatov, S. Shilin, W. Haehle. Beitrage fuer Lehre und Forschung. Heft 1/98.— Leipzig: Hochschule Technik, Wirtschaft, Kultur, 2018.

10. Електричні системи і мережі. Частина 1 : навчальний посібник / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський; за ред. П. Д. Лежнюка. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 200 с.

11. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посіб. / [Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П.Г. та ін.] ; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.

12. Техніко-економічні розрахунки систем електропостачання промислових підприємств: навч. посіб./ Соловей О. І., Ситник О. О., Розен В. П. та ін.; за заг. ред. О. І. Солов'я. – Черкаси: ЧДТУ, 2012. – 247 с.

13. Маліновський А. А., Музичак А. З., Турковський В. Г. Ефективні технології енерговикористання: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2022. 348 с.

14. Сегеда М. С., Олійник М. Й., Лисяк В. Г. Режими систем пересилання та споживання електричної енергії. Навчальний посібник / За заг. ред. проф. М. С. Сегеди. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. 304 с.

15. Ефективне використання електроенергії в системах енергоспоживання : метод. рекомендації до виконання курс. проекту / [уклад. : П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, О. І. Сіріков та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 128 с. Режим доступу: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/12661>

16. Кваліфікаційна робота магістра: метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с. Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/13066>

17. Міхайков С. С. Пристрій керування навантаженням частотно-регульованого електропривода на базі ПЛК / Вісник Національного

технічного університету «ХПІ». Серія «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», № 4 (1358) 2020.

18. Drankova A, Mukha M., Mikhaykov S., Krasovskyi I. Electromechanical laboratory complex for power quality studies of the ship electrical system. Proceedings of the 20th International conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). Lviv-Slavske: Lviv Polytechnic National University, Ukraine, 15-18. September, 2019. DOI: 10.1109/CPEE47179.2019.8949147.

19. Electronic multi-measuring instrument model ME96SSRA-MB: user's manual. URL: <https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/pmd/ym-i-ib63c45/ib63c45a.pdf>. (accessed 15.12.2019).

20. Prousalidis J., Styvaktakis E., Hatzilau I.K., Kanellos F., Perros S. Sofras E. Electric power supply quality in ship systems: an overview. International Journal of Ocean Systems Management. 2008. Vol. 1, №1. pp.68 – 83.

21. Braslavsky I. Energy saving in electric drive // Proceeding of the 5-th international conference on unconventional and electrical systems. — Vol. 2. — Szczecin, 2021.

22. Bernard S., Trochain G. Compensation of Harmonic Currents Generated By Computers Utilizing an Innovative Active Harmonic Conditioner // MGE UPS Systems, MGE 0128, 2020.

23. ДСТУ EN 62586-2:2018 Вимірювання якості електроенергії в системах електроживлення. Частина 2. Функційні випробування та вимоги щодо невизначеності (EN 62586-2:2017, IDT; IEC 62586-2:2017, IDT).

24. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.

ДОДАТКИ

Додаток А. Охорона праці

А.1. Технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках. Оперативне обслуговування.

Одним із заходів, що забезпечують безпеку робіт в електроустановках є захисне заземлення.

Захисне заземлення – навмисне електричне з'єднання з землею чи її еквівалентом металічних неструмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою внаслідок замкнення на корпус і по іншим причинам (індуктивний вплив сусідніх струмоведучих частин, виніс потенціалу тощо).

Еквівалентом землі може слугувати вода ріки чи моря, кам'яне вугілля в корінному заляганні тощо.

Призначення захисного заземлення – усунення небезпеки враження струмом у випадку доторкання до корпусу електроустановки та до інших неструмоведучих металічних частин, що опинилися під напругою внаслідок замкнення на корпус та з інших причин.

Робоче заземлення – навмисне сполучення з землею окремих точок струмового кола, наприклад нейтральних точок обмоток генераторів, силових та вимірювальних трансформаторів, дугогасячих апаратів, реакторів поперечної компенсації в дальніх лініях електропередач, а також фази при використанні землі в якості фазного чи зворотного проводу. Робоче заземлення призначене для забезпечення належної роботи електроустановки в нормальних чи аварійних умовах і здійснюється безпосередньо (тобто шляхом з'єднання провідником частин, що заземлюються із заземлювачем) чи через спеціальні апарати – пробивні запобіжники, розрядники, резистори тощо.

Заземлення блискавкозахисту – навмисне з'єднання із землею блискавкоприймачів і розрядників з метою відводу від них струмів блискавки в землю.

Принцип дії захисного заземлення – зниження до безпечних значень напруги доторкання і кроку, обумовлених замкненням на корпус та іншими причинами. Це досягається шляхом зменшення потенціалу заземленого обладнання (зменшенням опору заземлювача), а також шляхом вирівнювання потенціалів основи, на якій стоїть людина, і заземленого обладнання (підйом потенціалу основи, на якій стоїть людина, до значення, близького до значення потенціалу заземленого обладнання).

Область застосування захисного заземлення:

- *мережі напругою до 1000 В* змінного струму – трифазні трипроводні з ізольованою нейтраллю, однофазні двопроводні, ізольовані від землі, а також постійного струму двопроводні з ізольованою середньою точкою обмоток джерела струму;
- *мережі напругою вище 1000 В* змінного і постійного струму з будь – яким режимом нейтралі чи середньою точкою обмоток джерела струму.

Захисне заземлення є найбільш простою і в той же час ефективною мірою захисту від ураження електричним струмом при виникненні напруги на металевих неструмоведучих частинах.

Перед початком роботи в електроустановках оперативним персоналом даної електроустановки повинні бути виконані технічні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

1. Вимкнення обладнання, що виводиться в ремонт та використання заходів проти його помилкового включення або самоувімкнення.
2. Установка тимчасових огорож, плакатів: “Не вмикати працюють люди”, “Не відкривати працюють люди”.
3. Приєднання переносного заземлення до заземлюючої шини і перевірка відсутності напруги на струмопровідних частинах, які з метою безпеки виробництва робіт потрібно заземлювати.
4. Накладання переносного заземлення на вимкнені струмопровідні частини електроустановок одразу після перевірки, відсутності напруги або

включення заземлюючих ножів, що мають бути на кожному приєднанні електроустановки.

5. Огородження робочого місця і вивішування плакатів, що дозволяють працювати “Працювати тут”.

Захисні заходи при пошкодженні ізоляції:

Контроль ізоляції – вимірювання її активного або омичного опору для знаходження дефектів і попередження замкнень на землю та коротких замикань. Стан ізоляції в значній мірі визначає степінь безпеки експлуатації електроустановок, оскільки опір ізоляції в мережах з ізолюваною нейтраллю визначає величину струму замикання на землю, а отже і струму, що проходить через людину. В мережах напругою вище 1000 В зменшення опору ізоляції майже завжди призводить до пробоя ізоляції і до глухого замикання на землю.

При глухозаземленій нейтралі струм замикання на землю і струм, що проходить через людину, не залежать від величини опору ізоляції. Але при поганому стані ізоляції часто виникають її пошкодження, що призводить до глухих замкнень на землю (корпус) і до коротких замикань. При замиканні на землю і не спрацюванні захисту на відключення виникає небезпека ураження електричним струмом, так як не струмоведучі металічні частини, з якими людина нормально має контакт, виявляються під напругою.

Щоб попередити замикання на землю і інші пошкодження ізоляції, при яких виникає небезпека ураження електричним струмом, а також виходить з ладу обладнання, необхідно проводити випробування підвищеною напругою та контроль опору ізоляції.

Прийнятно - здавальні випробування проводяться при введенні в експлуатацію заново змонтованих і виведених з ремонту електроустановок. Об'єм і норми прийнятно-здавальних випробувань регламентуються Правилами технічної експлуатації електроустановок.

При випробування підвищеною напругою дефекти ізоляції виявляються в результаті пробоя і наступного про палення ізоляції. Виявлені дефекти

усуваються, а потім проводяться повторно випробування налагодженого обладнання.

Експлуатаційний контроль ізоляції – вимірювання її опору при прийманні електроустановки після монтажу періодично в строк, визначений Правилами, або в випадку знаходження дефектів. Опір ізоляції вимірюється на відімкнені установці. При такому вимірюванні можна визначити опір ізоляції окремих ділянок мережі, електричних апаратів, машин і т.п. В мережі вимірюється опір ізоляції кожної фази відносно землі і між кожною парою фаз на кожній ділянці між двома послідовно встановленими апаратами захисту, а також за останнім апаратом захисту до затискачів електроприймача. Опір ізоляції кожної ділянки в мережах напругою до 1000 В має бути не нижче 0,5 МОм. Для електричних апаратів і машин норми інші, тому вони відмикаються від мережі, і опір їх ізоляції міряється окремо.

Судити про нормальну роботу або про появу дефектів ізоляції за результатами вимірювань під напругою можна лише шляхом порівняння з даними попередніх вимірювань. Якщо результати співпадають, ізоляція робоча. Якщо ж виявлене різке зниження опору ізоляції в порівнянні з даними попередніх вимірювань, це вказує на наявність дефектів ізоляції.

В мережах напругою до 1000 В невеликої ємності (до 0,05 мкФ) слід підтримувати опір ізоляції на такому рівні, щоб струм, який проходить через людину, яка торкнулася до фази, не перебільшував тривало допустимої величини.

Постійний контроль ізоляції – вимірювання опору ізоляції під робочою напругою на протязі всього часу роботи електроустановки з дією на сигнал. Величина опору ізоляції відраховується за шкалою приладу. При зниженні опору ізоляції до гранично допустимої величини або нижче прилад подає звуковий або світловий сигнал.

Прилад постійного контролю ізоляції має задовольняти наступним основним вимогам:

- 1) показувати лише активний або омичний опір ізоляції фаз відносно землі незалежно від величини ємності;
- 2) на точність показань приладу не повинні впливати коливання напруги мережі;
- 3) бути досить надійним;
- 4) здійснювати самоконтроль, тобто при несправності приладу стрілка вказувача повинна встановлюватися на нуль, а не на ∞ ;
- 5) опір внутрішніх кіл опору приладу має бути значно вищим повного опору фаз відносно землі (не нижче 100 кОм). У іншому випадку підключення приладу до мережі підвищує небезпеку ураження електричним струмом при експлуатації електрообладнання.

Організація безпечної експлуатації електроустановок

Керівник підприємства зобов'язаний забезпечити утримання, експлуатацію і обслуговування електроустановок відповідно до вимог чинних нормативних документів.

Для цього він повинен:

- призначити відповідального за справний стан і безпечну експлуатацію електрогосподарства з числа інженерно-технічних працівників, які мають електротехнічну підготовку і пройшли перевірку знань у встановленому порядку;
- забезпечити достатню кількість електротехнічних працівників;
- затвердити Положення про енергетичну службу підприємства, а також посадові інструкції і інструкції з охорони праці;
- встановити такий порядок, щоб працівники, на яких покладено обов'язки з обслуговування електроустановок, вели ретельні спостереження за дорученим їм обладнанням і мережами – оглядом, перевіркою дії, випробуванням і вимірюванням;
- забезпечити перевірку знань працівників у встановлені строки згідно з вимогами;

- забезпечити проведення проти аварійних, приймально-здавальних і профілактичних випробувань та вимірювань електроустановок згідно з правилами і нормами;

- забезпечити проведення технічного огляду електроустановок.

Фахівці служб охорони праці зобов'язані контролювати безпечну експлуатацію електроустановок і повинні мати групу IV з електробезпеки.

Забороняється покладати на енергослужбу обов'язки, що не входять до її професійної компетенції.

Оперативне обслуговування

Оперативне обслуговування може здійснюватися як місцевими оперативними чи оперативно-ремонтними працівниками, за якими закріплена ця електроустановка, так і виїзними, за якими закріплена група електроустановок.

Вид оперативного обслуговування, кількість оперативних працівників в зміну чи на електроустановці визначаються особою, відповідальною за електрогосподарство, за узгодженням з керівником підприємства (організації) і зазначається в місцевих інструкціях.

До оперативного обслуговування електроустановок допускаються працівники, які знають оперативні схеми, посадові і експлуатаційні інструкції, інструкції з охорони праці, особливості обладнання і пройшли навчання, дублювання та перевірку правил.

Оперативні працівники, які обслуговують електроустановки одноосібно, та ті старші в зміні чи бригаді оперативні працівники, за якими закріплені електроустановки, повинні мати групу з електробезпеки IV в електроустановках напругою вище 1000 В і III – в електроустановках напругою до 1000 В.

Оперативні працівники, які заступають на чергування, мають прийняти зміну від попереднього чергового, здати зміну наступному черговому у відповідності з графіком.

Під час приймання зміни оперативний працівник зобов'язаний:

- ознайомитися зі схемою і станом та режимом роботи устаткування на своїй ділянці особистим оглядом в обсязі, встановленому інструкцією;
- одержати від чергового, який здає зміну, інформацію про стан устаткування, за яким необхідно вести ретельний нагляд для запобігання аваріям та неполадкам, а також про стан устаткування, що перебуває в ремонті або резерві;
- перевірити й прийняти інструмент, матеріали, ключі від приміщень, засоби захисту, оперативну документацію та інструкції;
- ознайомитися з усіма записами та розпорядженнями за час, що минув з його останнього чергування;
- оформити приймання зміни записом у журналі, відомості, а також в оперативній схемі власним підписом та підписом працівника, який її здає;
- доповісти старшому зміни про початок чергування та про неполадки, виявлені під час прийняття зміни.

Прийняття і здача зміни безпосередньо під час ліквідації аварії, виконання перемикачів чи операцій по вмиканню та вимиканню обладнання забороняється.

Старший в зміні оперативний працівник зобов'язаний негайно повідомити диспетчера енергопостачальної організації про аварії, які спричинили відключення однієї або кількох ліній електропередачі, що живлять підприємство.

В разі порушення режиму роботи, пошкодження чи аварії електроустаткування оперативний працівник зобов'язаний негайно вжити заходів з відновлення схеми нормального режиму роботи і повідомити про те, що сталося, безпосередньо старшому у зміні працівнику або особі, відповідальній за електрогосподарство.

У випадку неправильних дій оперативних працівників під час ліквідації аварії старший в зміні оперативний працівник зобов'язаний прийняти на себе керівництво і відповідальність за подальший перебіг ліквідації аварії.

Оперативні працівники повинні проводити обходи та огляди устаткування і виробничих приміщень на закріплений за ними діляниці.

Забороняється під час огляду електроустановок виконувати будь-яку роботу.

Огляди, виявлення і ліквідація несправностей в електроустановках без місцевих чергових працівників виконується централізовано виїзними працівниками, що здійснюють нагляд і роботи на об'єкті. Результати оглядів фіксуються в оперативному журналі.

Двері приміщень електроустановок (щитів, збірок тощо) мають бути постійно замкнені.

В приміщеннях електроустановок забороняється зберігання матеріалів та інструментів, що не належать до даної електроустановки.

Занулення

Небезпека ураження струмом при торканні до корпусу та інших не струмоведучих металічних частин електрообладнання, що виявилися під напругою внаслідок замикання на корпус та по іншим причинам, може бути усунена швидким відключенням пошкодженої електроустановки від живлячої мережі і разом з тим зниженням напруги корпусу відносно землі. Цій меті слугує занулення, принципова схема якого в мережі трифазного струму показана на рис.

Занулення - металічне з'єднання металічних не струмоведучих частин електроустановки, які можуть потрапити під напругу, з глухо заземленою нейтральною точкою обмотки джерела струму в трифазних мережах, при цьому провідник який забезпечує вказане з'єднання занулених частин з глухо заземленою нейтраллю називається нульовим захисним провідником.

Призначення занулення – усунення небезпеки пошкодження струмом в разі доторкання до корпусу електроприймача та других металічним не струмоведучим частинам які опинилися під напругою відносно землі в наслідок замикання на корпус та по другим причинам.

Принцип дії занулення це перетворення замикання на корпус в однофазне коротке замкнення з метою визвати найбільший струм, здатний забезпечити спрацювання захисту і тим самими автоматичну від'єднати пошкоджену установку від живлячій мережі. Крім того заземлення корпусів через нульовий провідник знижує в аварійний період їх напругу відносно землі.

Таким чином – занулення здійснює дві захисних дії - швидке автоматичне від'єднання пошкодженої ділянки від живлячої мережі і зниження напруги занулених металічних неструмоведучих частин, які опинилися під напругою, відносно землі.

Занулення застосовується в трифазних чотирьох провідних мережах до 1000 В глухо заземленою нейтраллю напругою 380/220, 220/127 660/380 В. Занулення застосовується і в три провідних мережах постійного струму з глухо заземленою середньою точкою обмотки джерела живлення, а також в однофазних двопровідних мережах змінного струму з глухо заземленим виводом обмотки джерела струму.

Нульовий захисний провідник призначений для забезпечення необхідного для відключення установки значення струму однофазного короткого замкнення, шляхом утворення для цього струму ланцюга з малим опором.

Заземлення нейтралі обмоток джерела живлення, живлячого мережу до 1000 В необхідне для зниження напруги занулених корпусів (і нульового захисного провідника) відносно землі до безпечного значення при замкненні фази на землю.

Повторне заземлення нульового робочого провідника практичне не діє на відключаючу здатність схеми, але значно зменшує небезпеку враження струмом виникаючу в результаті обриву нульового захисного провідника і замикання фази на корпус за місцем обриву, але не може усунути її повністю, тобто не може забезпечити тих умов безпеки котрі існували до пошкодження. У зв'язку з цим треба здійснювати прокладку нульового захисного провідника

так, щоб виключити можливість його пошкодження. В нульовому захисному провіднику забороняється встановлювати вимикачі, запобіжники та інші прибори які здатна порушувати його цілісність.

Таким чином призначення повторного заземлення провідника - зниження напруги відносно землі занулених конструкцій в період замкнення фази на корпус як при справній схемі занулення, так і в разі обриву нульового захисного провідника.

Занулення повинно виконуватися у наступних випадках:

В приміщеннях з підвищеною небезпекою та особо небезпечних по відношенню враження електричним струмом, а також ззовні приміщень при напрузі електроустановок 42 В.

В приміщеннях без підвищеної небезпеки при напрузі електроустановок 380 В та вище змінного струму і 440 В і вище постійного струму.

В вибухонебезпечних приміщеннях усіх класів незалежно від напруги електроустановок.

Зануленню також підлягають металічні не струмоведучі частини котрі підлягають заземленню в тому числі корпуси електричних машин, трансформаторів апаратів, світильників, металічні кабельні з'єднувальні муфти, металічні оболонки і броня контрольних та силових кабелів, металічні рукава та труби електропроводки.

А.2. Розрахунок заземлення

У відповідності з ПУЕ, всі металеві частини електроустановок, які в процесі роботи не мають з'єднання з струмопровідними частинами, але можуть потрапити під напругу, повинні бути заземлені.

Трансформаторні підстанції напругою 10/0,4 кВ на стороні 0,4 кВ мають глухозаземлену нейтраль. З'єднання обмоток цехових трансформаторів - Δ/Y з нулем. Струм замикання на землю 27 А. Для цехового обладнання

використовується заземлення. Цехові підстанції отримують живлення від 2 кабелів, що прокладені в одній траншеї.

Ґрунт – супісь , другий кліматичний район.

Розрахунок зводиться до визначення вертикальних заземлювачів і довжини з'єднувальної смуги з розміщенням на плані.

1. Визначається норма на опір заземлення R_3^H .

Якщо заземлюючий пристрій використовується одночасно для електроустановок напругою до 1000 В та вище:

$$R_3 \leq \frac{125}{I_3} = \frac{125}{27} = 4,63 \text{ Ом}$$

Згідно ПУЕ , так як сумарна потужність струмоприймачів більш 100 кВА то R_3 повинен бути не більше 4 Ом. Приймається $R_3 = 4 \text{ Ом}$.

2. Визначається розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_p = \rho_{табл} \cdot \psi = 250 \cdot 1,4 = 350 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

де $\rho_{табл}$ - табличне значення, для супіску $\rho_{табл} = 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

ψ - підвищуючий коефіцієнт, для України, для стержньових заземлювачів $\psi = 1,4$.

3. Опір одинарного вертикального заземлювача:

$$\begin{aligned} R_o &= 0,366 \frac{\rho_{розр}}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \\ &= 0,366 \frac{350}{5} \left(\lg \frac{2 \cdot 5}{2,5} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3 + 5}{4 \cdot 3 - 5} \right) = 20,361 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

де l – довжина заземлювача, приймається 5 м; d – діаметр заземлювача (приймаються стрижні діаметром 2,5 см).

$$t = h + \frac{l}{2} = 0,5 + \frac{5}{2} = 3 \text{ м},$$

де h – глибина прокладки смуг (згідно ПУЕ – 0,5...0,8 м).

Приймаються електроди прокладені по замкнутому контуру згідно плану та визначається орієнтовна кількість заземлювачів:

$$n_o = \frac{R_o}{R_z \cdot \eta_t} = \frac{20,361}{4 \cdot 0,59} = 8,628 \approx 9 \text{ шт}$$

де η_o – коефіцієнт використання ряду заземлювачів, для $a/l=4/5=0.8$, $\eta_o=0,59$.

де $a = 4$ м – відстань між електродами.

4. Довжина горизонтальної з'єднувальної смуги:

$$l_n = 1,05a \cdot n = 1,05 \cdot 4 \cdot 9 = 37,8 \text{ м.}$$

5. Опір смуги з урахуванням екранування:

$$R_n = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{l_n \cdot \eta_n} \lg \frac{2l_n}{b \cdot n} = 0,366 \frac{350}{37,8 \cdot 0,59} \lg \frac{2 \cdot 37,8^2}{0,01 \cdot 0,5} = 24 \text{ Ом,}$$

де η_n – коефіцієнт використання з'єднувальної смуги шириною $b = 10$ мм та товщиною 5 мм.

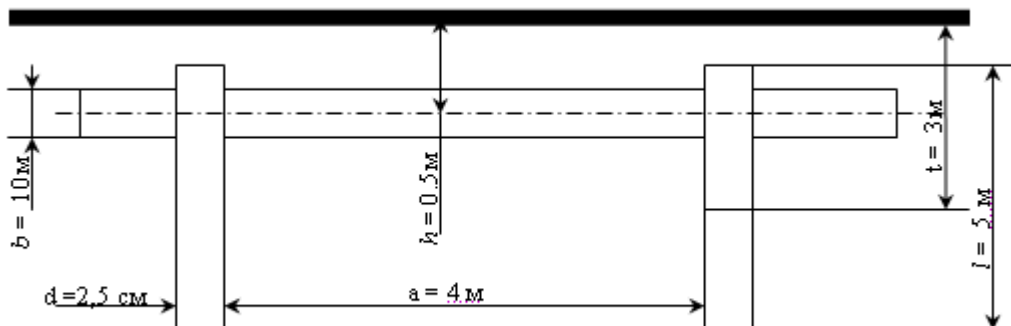


Рис. А. 1 - Схема прокладення заземлення

6. Необхідний опір вертикальних заземлювачів з урахуванням опору з'єднувальної смуги:

$$R_{mp} = \frac{R_n \cdot R_3^H}{R_n \cdot R_3^H} = \frac{24 \cdot 4}{24 - 4} = 4,8 \text{ Ом.}$$

7. Остаточна кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_o}{R_{mp} \cdot \eta_o} = \frac{20,361}{4,8 \cdot 0,59} = 7,49 \approx 8 \text{ шт.}$$

8. Проводиться перевірка опору заземлювача і порівнюється отримане значення з нормованим:

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{mp}} + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\frac{1}{4,8} + \frac{1}{24}} = 4 \text{ Ом.}$$

Дійсний опір заземлюючого пристрою з 8-ма заземлювачами не перевищує нормуючого значення.

Додаток Б. Апробація результатів кваліфікаційної роботи



СЕРТИФІКАТ

Осіпов О. М.

виступав(ла) із доповіддю

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ
ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В
СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

на Міжнародній науково-практичній конференції
**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА
ТА ТЕХНОЛОГІЇ В АПК**

9 листопада 2023 р.
(on-line)
м. Харків

Секція №1

В.о.ректора  Андрій КУДРЯШОВ