

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації енергосистем

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

_____ Анатолій МАРЧЕНКО

«12» червня 2024 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Управління, захист та
автоматизація енергосистем»**

**спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

**на тему: «Захист обладнання підстанції 110/10 кВ від впливу
гармонічних складових напруги»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ЕК-01

Рибась Леонід Федорович

Керівник:

ст. викл., к.т.н.

Лавренова Дарина Леонідівна

Рецензент:

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

Студент _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра автоматизації енергосистем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Управління, захист та автоматизація енергосистем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Анатолій МАРЧЕНКО

«12» червня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Рибасю Леоніду Федоровичу

1. Тема проекту «Захист обладнання підстанції 110/10 кВ від впливу гармонічних складових напруги», керівник проекту Лавренова Дарина Леонідівна, к.т.н., затверджені наказом по університету від «28» травня 2024 р. № 2127-с
2. Термін подання студентом проекту: 12 червня 2024 року.
3. Вихідні дані до проекту:
електрична схема підстанції 110/10 кВ; програмний пакет MATLAB;
стандарти з якості електроенергії; рекомендації щодо захисту обладнання від гармонічних складових напруги.
4. Зміст пояснювальної записки:
Опис об'єкту: опис та аналіз обладнання підстанції 110/10 кВ;
розрахунок струмів КЗ підстанції; вибір основних електричних апаратів і елементів підстанції.

Гармонічна складова напруги: опис джерел виникнення, характеру дії та впливу на обладнання шляхи усунення впливу чи зменшення гармонічної складової.

Захист обладнання підстанції 110/10 кВ від впливу гармонічних складових: моделювання дії гармонічної складової на обладнання підстанції; технічне рішення усунення впливу гармонічної складової.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо):

Головна схема електричних з'єднань підстанції 110/10 кВ.

Модель фільтру гармонічних складових на підстанції 110/10 кВ.

Розрахунок параметрів об'єкту дослідження.

Результати досліджень ефективності фільтрації гармонічних складових на підстанції.

6. Дата видачі завдання: 28 травня 2024 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Пошук літературних джерел, аналіз завдання.	1.05.2024 – 09.05.2024	
2	Аналіз обладнання ПС, розрахунок струмів короткого замкнення.	09.05.2024 – 12.05.2024	
3	Аналіз джерел виникнення, характеру дії та впливу на обладнання підстанції гармонічної складової напруги	13.05.2024 – 20.05.2024	
4	Моделювання дії гармонічної складової на обладнання підстанції	21.05.2024 – 28.05.2024	
5	Проектування системи фільтрації для запобігання впливу на обладнання підстанції гармонічної складової напруги	28.05.2024 – 7.06.2024	
6	Оформлення пояснювальної записки та підготовка графічного матеріалу.	7.06.2024 – 11.06.2024	

Студент

Леонід РИБАСЬ

Керівник

Дарина ЛАВРЕНОВА

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	1	
2	A4	141.EK0118.009.ДБ	Пояснювальна записка	71	
3	A1	141.EK0118.009.ТК1	Головна схема електричних з'єднань підстанції 110/10 кВ	1	
4	A1	141.EK0118.009.ТК2	Модель фільтру гармонічних складових на підстанції 110/10 кВ	1	
5	A1	141.EK0118.009.ТК3	Результати розрахунків параметрів об'єкту та моделі	1	
6	A1	141.EK0118.009.ТК4	Результати досліджень ефективності фільтрації сигналів на ПС	1	

					141.EK0118.009.ДБ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Відомість дипломного проекту		
Розроб.	Рибась Л. Ф.		12. 06. 2024				
Перев.	Лавренова Д. Л.		12. 06. 2024				
Реценз.							
Н. Контр.	Шполянський О. І		12. 06. 2024				
Затвер.	Марченко А. А.		12. 06. 2024		КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА гр. ЕК-01		
					Лист.	Аркуш	Аркушів
						3	1

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Захист обладнання підстанції 110/10 кВ від впливу
гармонічних складових напруги»

Київ – 2024 року

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка виконана на 71 аркуші, містить 9 таблиць, 29 рисунків, має 21 бібліографічне посилання. Графічна частина складається з 4 креслеників.

Об'єкт роботи: підстанція 110/10 кВ.

Предмет роботи: засоби фільтрації гармонічних складових.

Мета роботи: оцінити ефективність застосування фільтрації гармонічних складових сигналу на підстанції 110/10 кВ

Перелік ключових слів: ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ФІЛЬТРАЦІЯ СИГНАЛІВ, ГАРМОНІЧНІ СКЛАДОВІ, КАСКАД ПАСИВНИХ ФІЛЬТРІВ.

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		5

ABSTRACT

The explanatory note is made on 71 pages, contains 9 tables, 29 figures, and 21 bibliographic references. The graphic part consists of 4 drawings.

Object of work: 110/10 kV substation.

The subject of work: means of filtering harmonic components.

Purpose of the work: filtering of harmonic components of the signal at the 110/10 kV substation

List of keywords: ELECTRICITY QUALITY, SIGNAL'S FILTERING, HARMONIC COMPONENTS, PASSIVE FILTER CASCADE.

					141.EK0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		6

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
1 СХЕМА ТА ОБЛАДНАННЯ ПІДСТАНЦІЇ.....	12
1.1 Загальні відомості.....	12
1.2 Опис схеми підстанції 110/10 кВ.....	13
1.3 Склад основного обладнання підстанції.....	14
1.3.1 Силові трансформатори.....	14
1.3.2 Вимикачі.....	15
1.3.3 Роз'єднувачі, заземлювачі	17
1.4 Розрядники та запобіжники	18
1.4.1 Розрядники.....	18
1.4.2 Запобіжники.....	19
1.5 Струми короткого замкнення (КЗ) на підстанції.....	20
Висновки	26
2 ВПЛИВ ГАРМОНІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ...	28
2.1 Поняття гармонічної складової	28
2.2 Джерела гармонічних спотворень	30
2.3 Вплив гармонічних складових на якість електричної енергії	31
2.4 Вплив гармонічних складових на обладнання.....	33
2.4.1 Двигуни та генератори.....	33
2.4.2 Трансформатори.....	34
2.4.3 Лінії електропередач.....	36
2.4.4 Конденсатори.....	37
2.4.5 Побутові прилади.....	37
2.4.6 Вплив на засоби вимірювальної техніки.	38
2.5 Пристрої усунення впливу гармонічних складових сигналу.	39
2.5.1 Синхронний компенсатор.	39
2.5.2 Пасивний фільтр.....	41

2.5.3 Активні фільтри.....	42
2.5.4 Гібридні фільтри гармонік.	48
Висновки	50
3 ФІЛЬТРАЦІЯ ГАРМОНІЧНОГО СПОТВОРЕННЯ СИГНАЛУ НА ПІСТАНЦІЇ 110/10 кВ	51
3.1 Обладнання для фільтрації.....	51
3.2 Вибір місця приєднання фільтра.	52
3.3 Розрахунок параметрів трьохфазних фільтрів гармонік.....	54
3.3.1 Розрахунок частот налаштування фільтрів	54
3.3.2 Розрахунок ємності фільтрів для n-ї гармоніки.....	55
3.3.3 Розрахунок ємнісних та індуктивних опорів фільтрів	55
3.3.4 Розрахунок індуктивності резонансних фільтрів.	56
3.4 Моделювання роботи каскаду фільтрів.....	56
Висновок	66
ВИСНОВКИ.....	67
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	69

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВРП – вузлові розподільчі підстанції;

ГПП – головні понижуючі підстанції;

КЗ – коротке замикання;

ЛЕП – лінія електропередач;

ПГВ – підстанції глибокого введення;

ПЛ – повітряна лінія;

СК – синхронний компенсатор;

ТП – трансформаторні пункти;

FACTS – flexible alternating current transmission system;

FFT – fast fourier transform;

HVDC – high-voltage direct current;

SVC – static VAR compensation;

THD – total harmonic distortion.

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		9

ВСТУП

З розвитком сучасної електроенергетики зростають навантаження на енергетичні мережі, що ускладнює їх експлуатацію та знижує якість електроенергії. Гармонічні спотворення, спричинені використанням нелінійних навантажень (таких як випрямлячі, інвертори та силові електронні пристрої), є однією з основних проблем у цьому контексті.

Спотворення, спричинені появою гармонічних складових сигналів струму та напруги, негативно впливають на роботу обладнання підстанцій, які є важливими вузлами в системах розподілу електроенергії. Зокрема, вони можуть викликати підвищені втрати, перегрівання обладнання, зменшення його терміну служби та, врешті-решт, призводять до аварійних ситуацій. Тому захист підстанцій від гармонічних спотворень є актуальним питанням.

Метою цієї дипломної роботи є вивчення методів та засобів захисту обладнання підстанції 110/10 кВ від гармонічних спотворень.

Одним з методів захисту енергосистеми від гармонічних спотворень є встановлення пристроїв фільтрації сигналів у вузлових точках.

Використання фільтрів гармонік є необхідним через кілька причин:

- Покращення якості електроенергії. Гармонічні спотворення знижують якість електроенергії, що негативно впливає на роботу обладнання та споживачів.
- Зниження втрат електроенергії. Втрати в проводах і трансформаторах через гармонічні спотворення знижують ефективність електромереж.
- Захист обладнання. Нелінійні навантаження спричиняють нагрівання і знос електротехнічного обладнання, що скорочує його термін служби та може призвести до аварій.
- Економія на обслуговуванні та ремонті. Фільтри гармонік знижують кількість аварійних ситуацій, що зменшує витрати на обслуговування та ремонт обладнання.

Запровадження фільтрів гармонік на підстанціях 110/10 кВ може забезпечити стабільну та надійну роботу енергетичних систем, покращити якість електроенергії, підвищити ефективність її розподілу, знизити експлуатаційні витрати та підвищити надійність електропостачання споживачів.

Таким чином, дослідження та впровадження методів захисту обладнання підстанцій від гармонічних спотворень є надзвичайно важливим і сприятиме подальшому вдосконаленню енергетичної системи України.

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		11

1 СХЕМА ТА ОБЛАДНАННЯ ПІДСТАНЦІЇ

1.1 Загальні відомості

Підстанцією називається електроустановка, призначена для перетворення та розподілу електроенергії. Вона складається з трансформаторів, розподільних пристроїв, пристроїв керування, захисту та вимірювання [5].

Залежно від споживаної потужності та віддаленості від джерела живлення підстанції діляться на:

- вузлові розподільчі підстанції (ВРП);
- головні понижуючі підстанції (ГПП);
- підстанції глибокого введення (ПГВ);
- трансформаторні пункти (ТП).

Вузловою розподільчою підстанцією (ВРП) називається центральна підстанція класів напруги від 110 кВ до 220 кВ, що отримує електроенергію від енергосистеми і розподіляє її (без трансформації або з частковою трансформацією) по підстанціям глибоких введів (ПГВ) напругою від 20 кВ до 35 кВ.

Головною понижувальною підстанцією (ГПП) називається підстанція класів напруги від 35 кВ до 220 кВ, що отримує живлення безпосередньо від районної енергосистеми і розподіляє електроенергію на нижчій напрузі по всьому району.

Підстанцією глибокого введення (ПГВ) називається підстанція класів напруги від 35 кВ до 220 кВ, виконана зазвичай за спрощеними схемами комутації на первинній напрузі, що отримує живлення безпосередньо від енергосистеми або від ВРП окремого підприємства та призначена для живлення окремого об'єкта або групи електроустановок підприємства.

					141.ЕК0118.009.ДБ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Технічний опис заданого енергооб'єкту	Лит.	Аркуш	Архів
Розроб.		Рибась Л. Ф.		12.06.24			12	16
Перев.		Лавренова Д. Л.		12.06.24				
Реценз.								
Н. Контр.		Шполянський О. Г.		12.06.24		КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА гр. ЕК-01		
Затвер.		Марченко А. А.		12.06.24				

Трансформаторним пунктом (ТП) називається підстанція з первинною напругою 6 кВ, 10 кВ або 35 кВ, що безпосередньо живить приймачі електроенергії на напрузі 0,4 кВ і 0,66 кВ [5].

1.2 Опис схеми підстанції 110/10 кВ.

Об'єктом цієї бакалаврської роботи є підстанції 110/10 кВ, схема якої наведена на рис. 1.1. Ця підстанція є двохтрансформаторною головною понижувальною підстанцією та відгалуджувальною, що означає дана підстанція має два блоки з вимикачем та неавтоматичну перемичку з боку ліній 110 кВ. Живлення підстанції надходить з двох повітряних ліній 110 кВ.

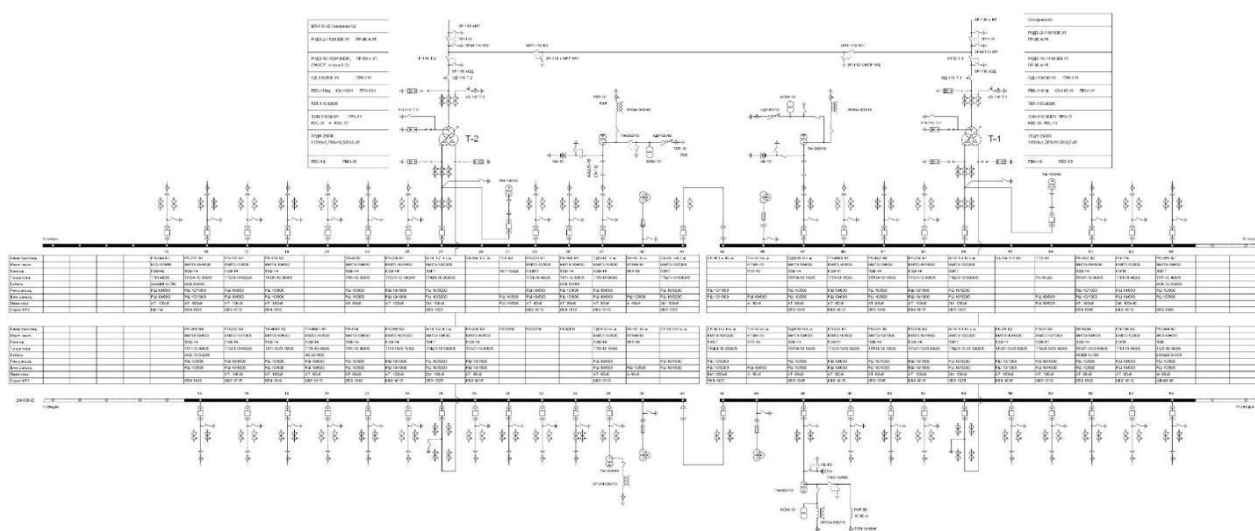


Рисунок 1.1 – Схема електричних з'єднань ПС 110/10 кВ

Задля перетворення напруги на підстанції задіяні два однакові трансформатори типу ТРДН-25000/110 з розщепленою обмоткою НН та з РПН. На лініях встановлено роз'єднувачі РНДЗ-2-110/1000 (зі сторони ПЛ) та РНДЗ-16-100/100091 (на перемичці та зі сторони ВН трансформаторів). Перемичку з двох роз'єднувачів використовують при вимиканні однієї з ліній. В нормальному режимі один із роз'єднувачів перемички повинен бути увімкненим.

На високій стороні трансформатора встановлені автоматичні триполюсні роз'єднувачі ОД-110/100 У1 та розрядники РВС-110М, які будуть захищати обладнання від атмосферних перенапруг ізоляції. Трансформатори струму ТВТ-110-600/5 забезпечують живлення чотирьох секцій шин з номінальною

напругою 10 кВ через лінії ЛЕП разом із вимикачами ВМПЄ-10-3200 (окрім 2-ї секції шин де використовується вимикач ВМПЄ-10-630).

Секції шин 10 кВ з'єднані між собою секційними вимикачами ВМПЄ-10-3200 (з'єднання I, II, III, IV секцій шин) з приводами ПЕПТ. Також встановлено два трансформатори власних потреб ТМ-100/10 (I та III система шин), ТМ-320/10 (II система шин), ТМ-400/10 (IV система шин). На кожній з шин встановлені вимірювальні трансформатори напруги НТМИ-10.

1.3. Склад основного обладнання підстанції

1.3.1 Силові трансформатори

Загалом, трансформатор - статичний електромагнітний пристрій, що має дві (або більше) індуктивні обмотки і призначений для перетворення за допомогою явища електромагнітної індукції однієї (первинної) системи змінної величини в іншу (вторинну) систему змінної величини [4].

На розглянутій у дипломному проекті підстанції встановлено два однакові трансформатори типу ТРДН-25000/110, два ТМ-100/10 в якості ТВП, два ТМ-320/10 та два ТМ-400/10.

ТРДН-25000/110/10/10 Силовий трифазний двообмотковий трансформатор потужністю 25000кВА напругою 110 кВ. Трансформатор силовий масляний трифазний двообмотковий ТРДН-25000/110 з регулюванням напруги під навантаженням та системою охолодження. Трансформатор призначений для перетворення електричної енергії змінного струму класу напруги 110 кВ електричну енергію класу напруги 10 кВ.

Трансформатори з маркуванням ТРДН мають розщеплення обмоток з боку низької напруги (НН).

Регулювання напруги в трансформаторах такого типу відбувається під навантаженням (РПН), пристрій, що перемикає, встановлюється в нейтралі обмотки високої напруги (ВН), межа регулювань – $9 \times 1,78\%$ від номінальної напруги трансформатора.

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		14

Основні параметри трансформаторів, що використовуються на нашій схемі описані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 –Параметри трансформаторів встановлених на підстанції

Тип трансформатора	Номинальна потужність обмоток, МВА.	Номинальні значення напруги, кВ		Втрати, кВт		Струм холостого ходу, %	Напруга короткого замикання, %
		ВН	НН	Холостого ходу	Короткого замикання		
ТРДН-25000/110	25	115	10,5	27	120	0,7	10,5
ТМ-100/10	0,1	10	0,4	0,4	2,4	4	4,5
ТМ-320/10	0,32	10	0,4	1,9	6,2	6	4,5
ТМ-400/10	0,4	10	0,4	0,83	5,5	4,5	4,5

1.3.2 Вимикачі

В електричних мережах 35 кВ та вище основним комутаційним апаратом є вимикач.

Вимикачі необхідні для увімкнення та відключення струмів, що протікають у нормальних та аварійних режимах роботи електричної мережі. Найбільш важкі умови роботи вимикача виникають при відключенні струмів КЗ.

Основні типи вимикачів, які використовуються для комутації в електричних ланцюгах, такі [6].

- Масляні вимикачі.

У цих апаратах пристрій дугогасіння заповнений трансформаторним маслом. Гасіння електричної дуги здійснюється шляхом ефективного її охолодження потоками газу, що виникає при розкладанні олії дугою. Найбільшого поширення набули маломасляні вимикачі на напруги 10-20 кВ і 110-220 кВ.

- Електромагнітні вимикачі

На електричну дугу, що виникає в процесі відключення, діє магнітне поле, яке заганяє дугу в керамічну камеру гасіння. Охолодження дуги в камері створює умови для її гасіння. Електромагнітні вимикачі випускаються на напругу 6-10 кВ.

- Повітряні вимикачі.

Гасіння дуги здійснюється потоком тиснутого повітря. Номінальна напруга до 1150 кВ.

- Елегазові вимикачі.

Гасіння дуги проводиться потоком елегазу, або шляхом підйому тиску в камері за рахунок дуги, що горить у замкнутому обсязі газу. Застосовуються на всі класи напруги.

- Вакуумні вимикачі.

Контакти розходяться у вакуумі. Вакуумні вимикачі використовуються при напрузі до 110 кВ включно.

На підстанції, що розглядається, на стороні НН трансформаторів встановлені вимикачі типу ВМПЭ-10/3200. У якості міжсекційних вимикачів використовуються також вимикачі ВМПЭ-10/3200. На інших приєднаннях використовуються вимикачі ВКЭ-10/650, ВМПЭ-10/1000, ВМПЭ-10/630, ВМПЭ-10/1600.

Вимикачі типу ВМПЕ-10 (вимикач олійний з підвісним виконанням полюсів і вбудованим електромагнітним приводом, номінальна напруга 10 кВ) відносяться до типу маломасляних і є триполюсним комутаційним апаратом, призначеним для роботи в закритих установках змінного струму високої напруги частотою 50 гц. Управління вимикачами здійснюється вбудованими електромагнітними приводами постійного струму. Номінальний струм такого вимикача може становити 630 А, 1000 А, 1600 А, 3200 А.

Вимикачі типу ВКЕ-10 колонкового типу належать до типу маломасляних, мають вбудований електропривод та номінальну напругу 10 кВ і являють

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		16

собою триполюсний комутаційний апарат, призначений для роботи в закритих установках змінного струму високої напруги частотою 50 гц. Можливий номінальний струм 630 А, 650А, 1000 А та 1600 А.

Характеристики всіх наявних на даній підстанції вимикачів представлено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 –Параметри вимикачів, що встановлено на підстанції

Тип	U _{ном} , кВ	I _{ном} , А	S _{відкл} , МВА	I _{відкл} , кА	i _{уд} , кА	t _{відкл} , с	t _{вкл} , с
ВМПЭ-10	10	630, 1000, 1600, 3200	550	31,5	80	0,12	0,3
ВКЭ-10	10	1600, 1000, 650	550	31,5	80	0,07	0,3
		1600, 1000, 651	350	20	52	0,07	0,3

1.3.3 Роз'єднувачі, заземлювачі

Роз'єднувачі – це ключові елементи електричних систем, які використовуються для безпечного відключення електричних кіл для обслуговування, ремонту або інших робіт. Вони дозволяють вимкнути електричне коло без будь-якого струму або за мінімального струму. У вимкненому положенні роз'єднувачі мають видимий ізоляційний проміжок, що забезпечує безпечну роботу персоналу [6].

Зазвичай роз'єднувачі комплектуються заземлюючими ножами для забезпечення заземлення вимкнених частин електричного кола, що додатково підвищує безпеку обслуговування.

Важливо зауважити, що роз'єднувачі не призначені для вимикання під навантаженням, оскільки вони не мають дугогасильних пристроїв. Спроба вимкнення під навантаженням може призвести до утворення дуги, яка в свою чергу може спричинити коротке замкнення між фазами, що може призвести до серйозних аварійних ситуацій. На підстанції встановлені роз'єднувачі типу РНДЗ-16-100/100091, РНДЗ-2-110/1000 У1 та РНДЗ-16-1000 У1 зі сторони 110 кВ. Зі сторони 10 кВ встановлені роз'єднувачі типу РШ-10/3200.

Також на підстанції підстанції встановлені заземлювачі типу ЗОН-110М-II У1.

Заземлювач типу ЗОН-110М-II У1 призначений для заземлення нейтралі силових трансформаторів, які не мають захисту від замикань на землю. Заземлювач складається з основи, ізоляційної колонки, нерухомого контакту та ножа заземлення. Основа являє собою куточок і призначена для встановлення заземлювача. На основі кріпиться ізоляційна колонка, на верхній частині якої встановлюється нерухомий контакт. Заземлювальний ніж виготовлений з алюмінієвої труби, з'єднаної через пластину з валом. Під час оперування заземлювальний ніж, на кінці якого є рознімний контакт, вбирається в нерухомий контакт. Контактний тиск у роз'ємному контакті забезпечується пружиною.

1.4. Розрядники та запобіжники

1.4.1 Розрядники

Розрядники є важливими складовими системи захисту електричних мереж від перенапруг. Вони забезпечують ефективний захист, дозволяючи відводити надлишковий струм, що виникає під час перенапружених явищ, на землю або іншу місцевість. Це сприяє підтриманню стабільності роботи системи та запобігає пошкодженню обладнання [7].

У зоні великих атмосферних розрядів, таких як блискавка, розрядники можуть значно знижувати ризик пошкодження електричного устаткування, будівель та інфраструктури. Їхнє вчасне виявлення та заміна, якщо вони виявляють ознаки пошкодження або зносу, є ключовими для ефективного функціонування системи захисту.

Окрім того, розрядники можуть бути використані в електричних мережах для захисту від перенапруг, що виникають внаслідок переривного збудження або вимикання обладнання, а також для усунення перенапруг, що виникають унаслідок високовольтних випробувань і виправлення дефектів. Такі заходи

захисту забезпечують надійну та безпечну роботу електричних мереж у різних умовах експлуатації.

На підстанції, що розглядається, використовуються розрядники типу РВС-110м, РВС-35, РВС-15 та РВО-10. Розрядники серії РВС виготовляються для роботи в мережах із будь-якою системою заземлення нейтралі. Розрядники розраховані на тривалу роботу в умовах закритих та відкритих електричних установок за температури навколишнього середовища від мінус 40° до плюс 40°С та призначені для застосування на висоті до 1000 м над рівнем моря.

Таблиця 4.1 – Характеристики вимикачів на підстанції

Тип розрядника	Клас напруги, кВ	Номінальна напруга розрядника, кВ	Пробивна напруга за частоти 50 Гц в сухому стані та під дощем, кВ		Максимальна імпульсна пробивна напруга при перерозрядному часі 2-20мкс, кВ
			Не менше	Не більше	
РВС-110	110	102	200	250	285
РВС-35	35	40,5	78	98	125
РВС-15	15	18	38	48	67
РВО-10	10	12,8	26	30,5	48

1.4.2 Запобіжники

Високовольтні запобіжники (ВП) - це пристрої, які є засобами захисту електроустаткування і електричних мереж від короткого замикання, а також неприпустимих перевантажень [6].

На підстанції, що розглядається на приєднаннях вимірювальних трансформаторів використовуються запобіжники типу ПКТ-10*20, ПКТ-10, ПК-10*20. Це запобіжники з кварцовим наповнювачем, які використовуються для силових трансформаторів.

Запобіжники високовольтні серії ПК призначені для захисту високовольтних силових ланцюгів трансформаторів, повітряних і кабельних мереж, змінного струму частоти 50-60 Гц від перевантажень і струмів

короткого замикання. Запобіжник ПК створено для захисту силових трансформаторів та електричних ліній напругою 10 кВ. За стандартом запобіжники розподіляються за кліматичними умовами і категоріями розміщення [ГОСТ 15150-69]. Вони відрізняються конструкцією ізоляторів і наявністю герметизуючих елементів у патроні.

ПК-запобіжники мають здатність ефективно відключати лінію в разі перевищення допустимих значень струму або короткого замикання, запобігаючи пошкодженню обладнання та забезпечуючи безпеку електричних мереж. Вони є важливою складовою системою електрозахисту та надійними елементами для забезпечення безперебійності електропостачання.

1.5. Струми короткого замикання (КЗ) на підстанції

Короткі замикання можуть відбуватись всередині чи поза обладнанням системи, що призводить до псування обладнання. Поява короткого замикання в більшості випадків пов'язана з порушенням ізоляції обладнання, комутаційними перенапругами або ударами блискавки і призводить до псування та руйнування ізоляційних матеріалів через підвищення температури або внутрішніх часткових розрядів та випадкове електричне з'єднання між двома провідниками через стороннє тіло (знаряддя праці, тварини, гілки дерев).

Крім того, короткі замикання можуть виникати через недоліки конструкції або при виробництві обладнання, наприклад, недоліки в електричних компонентах, неправильне монтажне або експлуатаційне обслуговування [8]. Коротке замикання може також виникнути внаслідок відмови електричного обладнання через знос, старіння або вплив зовнішніх факторів, таких як агресивне середовище або непередбачені умови експлуатації. Потенційні наслідки короткого замикання можуть призводити до пожежі, матеріальних збитків, порушення виробничого процесу, а також загрози життю та здоров'ю персоналу. Тому важливо регулярно проводити інспекції, технічне

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		20

обслуговування та вчасно виявляти та усувати будь-які потенційні дефекти або недоліки в електричних системах.

Види коротких замикань у трифазній мережі представлено на рис. 1.2.

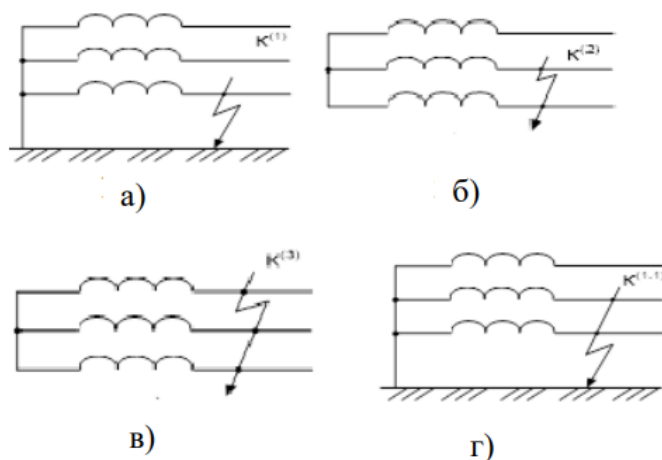


Рисунок 1.2 – Види коротких замикань:

- а) однофазне (замикання фази на землю);
- б) двофазне (замикання двох фаз між собою);
- в) трифазне (замикання трьох фаз між собою);
- г) двофазне на землю (замикання двох фаз між собою та на землю одночасно).

Трифазне коротке замикання, або трьохфазне КЗ, є однією з найбільш серйозних аварійних ситуацій у електричних мережах. Воно виникає, коли усі три фази електричної системи з'єднуються між собою безпосередньо або через дефект у системі. Це призводить до раптового зростання струму в лініях живлення, що може спричинити серйозні пошкодження обладнання та інфраструктури.

Оскільки у трьохфазному КЗ струми короткого замикання в усіх трьох фазах однакові за величиною, вони можуть бути значно вищими, ніж у випадку однофазного короткого замикання. Це може призвести до надзвичайно великих механічних навантажень на електричне обладнання та пошкодження елементів системи.

Розрахунки струмів короткого замикання необхідні для визначення або перевірки характеристик електрообладнання. Такі розрахунки також

використовуються для налаштування або перевірки параметрів релейного захисту та автоматики, що є критично важливим для безпеки та ефективності електричних мереж.

Задля розрахунку струмів КЗ використаємо спрощену схему підстанції (рис. 1.3).

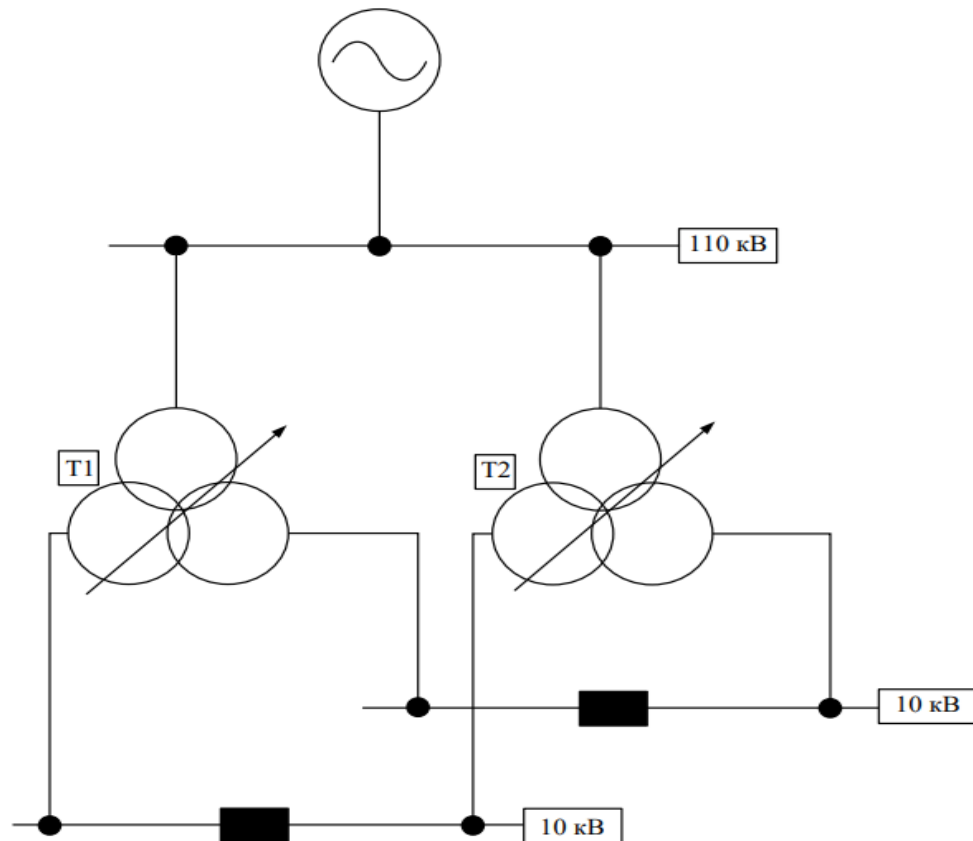


Рисунок 1.3 - Спрощена схема підстанції

Схема заміщення буде мати наступний вигляд наведений на рис. 1.4.

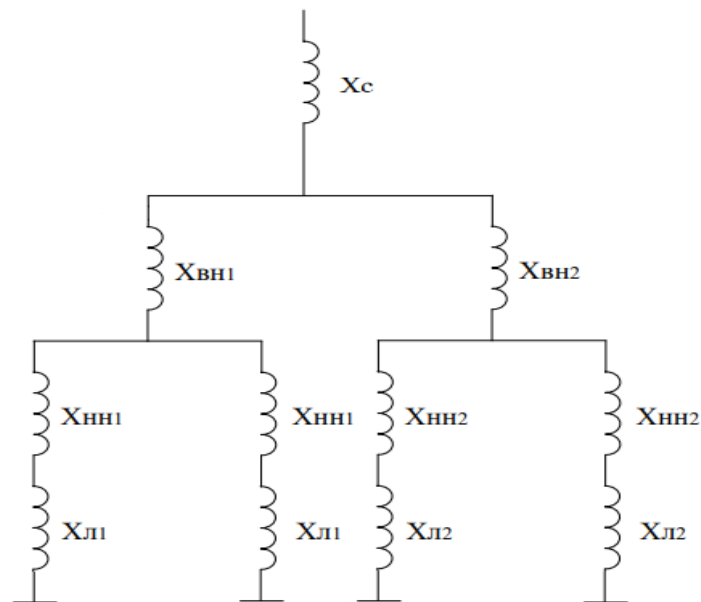


Рисунок 1.4 – Схема заміщення підстанції

Для підстанції, що розглядається маємо однакові трансформатори та під'єднання ліній. Окрім цього можна відмітити, що схема дзеркальна, тому можна її спростити (рис. 1.5).

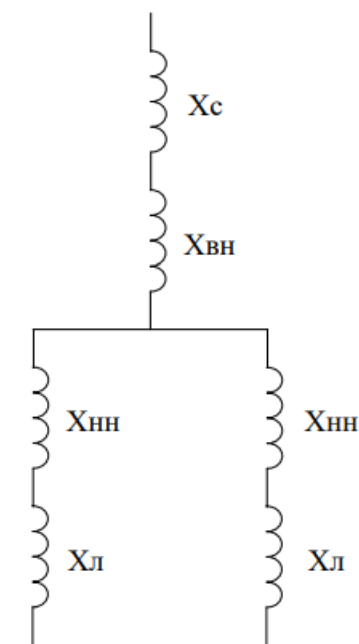


Рисунок 1.5 – Спрощена схема заміщення підстанції

Розрахунок струмів короткого замикання буде виконуватись у точках, що вказані на рис.1.6.

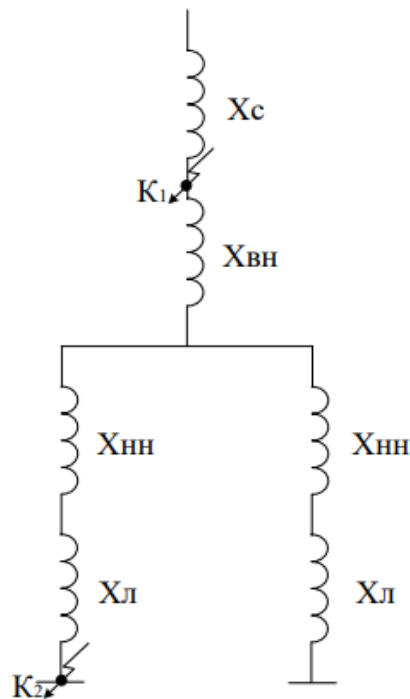


Рисунок 1.6 – Точки розрахунку струмів КЗ

Приймемо базисну потужність мережі:

$$S_B = 120 \text{ МВА}$$

Базисна напруга трансформатора зі сторони ВН:

$$U_{B.VH} = 115 \text{ кВ}$$

Базисна напруга трансформатора зі сторони НН:

$$U_{B.HH} = 10,5 \text{ кВ}$$

Напруга короткого замикання для трансформатора:

$$U_K = 10,5 \%$$

Розрахуємо базисний струм на стороні ВН трансформатора:

$$I_{B.VH} = \frac{S_B}{\sqrt{3} * U_{B.VH}} = \frac{120 * 10^6}{\sqrt{3} * 115 * 10^3} = 602,45 \text{ А}$$

Розрахуємо базисний струм на стороні НН трансформатора:

$$I_{B.HH} = \frac{S_B}{\sqrt{3} * U_{B.HH}} = \frac{120 * 10^6}{\sqrt{3} * 10,5 * 10^3} = 6598,29 \text{ А}$$

Визначаємо опори схеми заміщення. В цьому випадку відсутні дані про струм короткого замикання у віддаленій частині електроенергетичної системи. Мінімальне значення опору можна оцінити за допомогою

параметрів вимикачів. Під час розрахунку опорів схеми заміщення приймемо струм короткого замикання рівний номінальному струму вимкнення вимикачів.

Опір системи:

$$X_C = \frac{I_{Б.ВН}}{I_{ВМ.}} = \frac{602,45}{1000} = 0,602 \text{ в. о.}$$

Визначимо опір трансформатора:

$$X_T = \frac{U_k * S_B}{100 * S_T} = \frac{10.5 * 120 * 10^6}{100 * 25 * 10^6} = 0.504 \text{ в. о.}$$

Визначимо лінії:

$$X_L = \frac{x_0 * l * S_B}{U_{Б.ВН}^2} = \frac{0.318 * 2 * 120 * 10^6}{(10.5 * 10^3)^2} = 0.692 \text{ в. о.}$$

Погонний опір лінії було визначено виходячи з того, що довжина лінії складає 2 км.

Визначаємо еквівалентний опір точок КЗ. Для точки К₁ опір точки КЗ буде дорівнювати опору системи оскільки перед цією точкою за напрямком руху струму короткого замикання немає ніяких елементів з еквівалентним опором, окрім самої системи.

$$X_{k1} = X_C = 0,602 \text{ в. о.}$$

Еквівалентний опір для точки К₂ буде дорівнювати сумі всіх опорів елементів, що ввімкнені попереду за напрямком руху струму КЗ.

$$X_{k2} = X_C + X_L + X_T = 0,602 + 0.692 + 0.504 = 1,798 \text{ в. о.}$$

Струми КЗ для кожної точки наступні:

Струм короткого замикання для точки К₁.

У відносних одиницях:

$$I_{В01} = \frac{1}{X_{k1}} = \frac{1}{0,602} = 1,66 \text{ в. о.}$$

В іменованих одиницях:

$$I_{КЗ1} = I_{В01} * I_{Б.ВН} = 1,66 * 602,45 = 1000 \text{ А}$$

Струм короткого замикання для точки К₂.

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		25

У відносних одиницях:

$$I_{B02} = \frac{1}{X_{k2}} = \frac{1}{1,798} = 0,556 \text{ в. о.}$$

В іменованих одиницях:

$$I_{K32} = I_{B02} * I_{Б.НН} = 0,556 * 6598,29 = 3668,65 \text{ А}$$

Ударні струми КЗ для кожної точки наступні:.

Ударний струм короткого замикання для точки К₁:

$$I_{уд1} = \sqrt{2} * K_{уд1} * I_{K31} = \sqrt{2} * 1,65 * 1000 = 2,34 \text{ кА}$$

де $K_{уд1} = 1,65$ – ударний коефіцієнт при короткому замиканні на збірних шинах, що з'єднанні мережою ЛЕП номінальною напругою 110-150 кВ.

Ударний струм короткого замикання для точки К₂:

$$I_{уд2} = \sqrt{2} * K_{уд2} * I_{K32} = \sqrt{2} * 1,6 * 3668,65 = 8,301 \text{ кА}$$

$K_{уд2}$ - ударний коефіцієнт який дорівнює $K_{уд1} = 1,6$ при короткому замиканні в системі зв'язаній шинами з трансформаторами потужністю 5,6-32 МВА.

Висновки

Об'єктом бакалаврської роботи є відгалужувальна двотрансформаторна підстанція 110/10 кВ, яка виконана за схемою з двома блоками вимикачів та неавтоматичною перемичкою з боку ліній, живлення подається за допомогою двох повітряних ліній.

Також було виконано розрахунок струмів короткого замикання. Для цього була обрана схема заміщення та розраховані еквівалентні опори елементів схеми. Під час виконання розрахунків було отримано наступні результати:

з боку високої напруги (110 кВ)

- струм короткого замикання $I_{K31} = 1 \text{ кА}$;
- ударний струм $I_{уд1} = 2,34 \text{ кА}$.

з боку низької напруги (10 кВ)

- струм короткого замикання $I_{K32} = 3668,65$;

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		26

- ударний струм $I_{уд2} = 8,301$ кА.

Отримані розрахунки підтверджують, що обладнання яке встановлене на підстанції здатне підтримувати нормальну роботу електричної мережі.

Підстанція, що розглядається в дипломному проекті, може жити електроенергією велику кількість споживачів. Всі споживачі зацікавлені в отриманні електроенергії належної якості, яка не буде псувати обладнання. Тому важливим завданням при проектуванні та експлуатації підстанцій є завдання контролю та підтримування належної якості переданої електроенергії. Одним з основних важливих показників якості електричної енергії, що має вплив на обладнання як споживачів, так і самої підстанції є спотворення синусоїдальності сигналу.

Проблеми спричиненні гармонічними спотвореннями можуть бути дуже серйозними, наприклад великі втрати потужності, постійні кидки частоти, зниження або збільшення фактичної напруги мережі, передчасне старіння ізоляції, вихід з ладу пристроїв. Це все в свою чергу призводить до величезних грошових втрат як з боку споживача, так і з боку постачальника електроенергії. Тож виникає потреба встановлені додаткових пристроїв не тільки моніторингу, але й для компенсації гармонічних спотворень.

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		27

2 ВПЛИВ ГАРМОНІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1 Поняття гармонічної складової

Очікується, що система, яка працює в ідеальних умовах, буде ідеально збалансованою, та матиме одну частоту, і з синусоїдальним струмом і постійною формою хвилі напруги та амплітудою. Однак, на практиці, в енергосистемі цей ідеальний робочий режим не зустрічається, оскільки компоненти мережі, меншою чи більшою мірою, мають небажаний ефект спотворення вихідної синусоїдальної форми сигналу.

Не всі сигнали змінної напруги та струму на виході елементів є синусоїдальними з частотою, що дорівнює робочій частоті. Ті, що мають частоту, яка дорівнює частоті енергосистеми, є формами сигналів основної частоти (50 Гц відповідно стандарту). Інші з частотами, кратними основній частоті (наприклад, 100 Гц, 150 Гц, 200 Гц тощо) називаються гармонічними формами сигналу. Кратність визначає порядок гармоніки. В енергосистемі, зазвичай, присутні лише непарні гармоніки, тобто непарної кратності

Коли гармоніки додаються до основної частоти, синусоїдальна форма сигналу спотворюється. Рівень спотворення може варіюватися від незначного до впливового. На рис. 1 показано синусоїду, що містить гармоніку третього порядку з амплітудою 10% від основної. Синфазна третя гармоніка просто згладжує верхню частину синусоїди, і є ледь помітною.

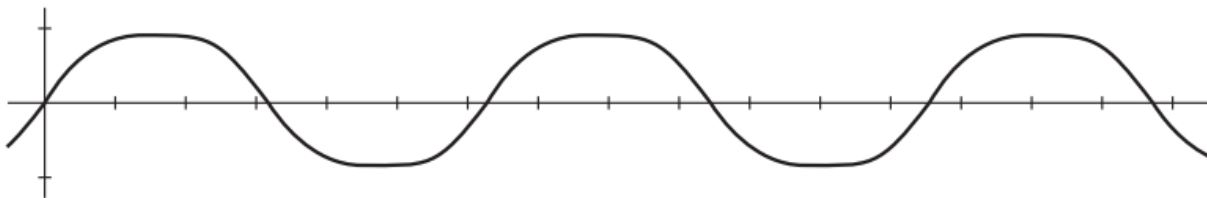


Рисунок 2.1 – Синусоїдальний сигнал з присутністю 3-ї гармоніки

					141.ЕК0118.009.ДБ					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Рибась Л. Ф.		12.06.24	ВПЛИВ ГАРМОНІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ		Лист.	Аркуш	Аркушів	
Перев.		Лавренова Д. Л.		12.06.24					28	22
Реценз.							КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА гр. ЕК-01			
Н. Контр.		Шполянський О. Г.		12.06.24						
Затвер.		Марченко А. А.		12.06.24						

Якщо додати рівні амплітуди п'ятої, сьомої, дев'ятої, одинадцятої та тринадцятої гармонік до форми сигналу, то рівень спотворень зростає, як показано на рис. 2.2.

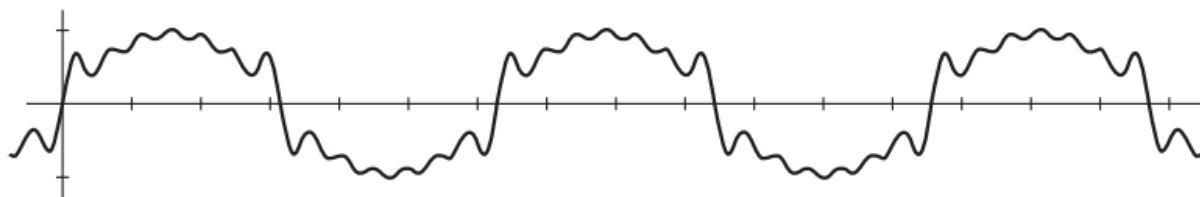


Рисунок 2.2 – Синусоїдальний сигнал з пристуністю 3-ї, 5-ї, 7-ї, 9-ї, 11-ї та 13-ї гармонік

Гармоніки також можна класифікувати на основі їхньої поведінки в електричних мережах. У трифазній мережі гармоніки можна розглядати як симетричні компоненти. Симетричні складові являють собою метод подання будь-якої трифазної системи векторів різних величин (таких як струми, напруги, магнітні потоки тощо) у формі трьох окремих систем. Ці системи відомі як пряма, зворотна і нульова послідовності. Основна частота є гармонікою прямої послідовності. Якщо n - натуральне число, то порядки гармонік додатної послідовності визначаються як

$$h_{h1} = 3n - 2 \quad (2.1)$$

Основний сигнал в енергомережах має буди в ідеалі «чистою» синусоїдою. Синусоїда є функцією непарного порядку, тобто її розклад у ряд Фур'є містить лише непарні гармоніки (1-а, 3-я, 5-а тощо). Парні гармоніки (2-а, 4-а, 6-а тощо) зникають через властивість симетрії синусоїдального сигналу. Тоді рівняння (2.1) можна модифікувати, наступним чином:

$$h_{h1} = 6n + 1$$

Гармоніки зворотної послідовності – це гармоніки, порядок яких визначається формулою:

$$h_{h2} = 3n - 1 \quad (2.2)$$

Рівняння (2.2) можна модифікувати так, щоб виключити гармоніки парного порядку:

$$h_{h2} = 6n - 1$$

Нульова послідовність, або потрійна гармоніка, має порядок, який визначається як:

$$h_{h0} = 3n \quad (2.3)$$

Або, якщо виключити гармоніки парного порядку, рівняння (2.3) можна модифікувати:

$$h_{h0} = 6n - 3$$

У той час як сигнали прямої та зворотної послідовності гармонік мають тенденцію до згладжування лінійних струмів трифазної мережі, потріпні гармоніки, або гармоніки нульової послідовності є адитивними і, як правило, спричиняють найбільше проблем.

Гармоніки є однією з основних проблем забезпечення певної якості електроенергії. Це вимагає ретельного аналізу генерації гармонік та їх вимірювань, а також вивчення шкідливих ефектів, контролю гармонік. Інтерес до гармонійного аналізу виник на початку 1990-х років у зв'язку з появою високовольтних ліній постійного струму високої напруги (HVDC) і статичними компенсаторами реактивної потужності, що регулюються (SVC).

2.2 Джерела гармонічних спотворень

Системи електроенергії повинні бути розроблені не тільки для синусоїдальних струмів і напруг, але також для нелінійного навантаження. Останнім часом спостерігається збільшення таких навантажень, і вони можуть спричиняти гармонічне збудження, спотворювати форми сигналів струму та напруги, створювати резонанси, збільшувати втрати в системі та зменшувати термін служби електричного обладнання.

Нелінійні компоненти та навантаження, такі як перетворювачі потужності, пристрої гнучкої системи передавання змінного струму (FACTS), нелінійне насичення та гістерезис у компонентах з магнітними осердями, люмінесцентні лампи і дугові печі, високий рівень впровадження відновлювальних джерел енергії (фотоелектричні системи), складають основну причину появи гармонійних складових.

					141.EK0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		30

Під час їх роботи з одночасним спотворенням сигналу відбувається і формування великого потоку реактивної потужності до зовнішньої мережі, що негативно впливає на якість роботи інших користувачів електроенергії. Це також потребує використання систем автоматичної компенсації реактивної потужності або інших пристроїв, які виправляють форму вхідного струму.

2.3 Вплив гармонічних складових на якість електричної енергії

Напруга, що подається споживачеві, має бути синусоїдальною з номінальною частотою з середньоквадратичним значенням, що знаходиться в рекомендованому діапазоні [3]. Поширення нелінійного навантаження останні кілька десятиліть погіршує форму сигналу. Це може мати вплив на деякі типи обладнання, і спричинює додаткові втрати тепла, вищі рахунки за електроенергію та втрата заданої продуктивності. Керування гармоніками в енергосистемі детально описано в стандартах, якими керуються виробники обладнання, комунальні підприємства і клієнти, щоб викривлення сигналу завжди не виходило за межі допустимих значень.

Оскільки енергосистема України працює синхронно, тобто підключена до об'єднаної енергосистеми Європи, то для споживача України за нормами [1] номінальним значенням частоти є:

- 50 Гц, $\pm 1 \%$ (тобто від 49,5 Гц до 50,5 Гц) протягом 99,5 % часу за рік;
- 50 Гц, $+4 \%$ / -6% (тобто від 47 Гц до 52 Гц) протягом 100 % часу спостережень;

За нормальних умов роботи впродовж кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, усереднених на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути меншими або дорівнювати орієнтовним значенням, які наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Величини напруг окремих грмонік до 25-го порядку у відсотках відносно основного сигналу напруги

Непарні гармоніки				Парні гармоніки	
Не кратні 3		Кратні 3			
Порядок гармоніки	Відносні амплітуда, U_h	Порядок гармоніки	Відносні амплітуда, U_h	Порядок гармоніки	Відносні амплітуда, U_h
5	5%	3	3%	2	1,90%
7	4%	9	1,3%	4	1%
11	3%	15	0,5%	6...24	0,5%
13	2,5%	21	0,5%		

Також нормується і вміст гармонічних спотворень на різних класах напруг [2]. Ці норми наведені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Нормування коефіцієнту спотворення синусоїдальності сигналу напруги

Показники	Допустимий рівень	
	Нормальний	Граничний
K_u , % для різних класів напруги		
0,4 кВ	8	12
6-20 кВ	5	8
35 кВ	4	6
110-330 кВ	2	3
K_u , % для різних класів напруги	$n = 5$	$n = 3$
0,4 кВ	6	3
6-20 кВ	4	3
35 кВ	3	3
110-330 кВ	1,5	1,5

Як можна побачити з табл. 2.2 граничне значення $K_{U(n)}$ завжди буде більше в півтора рази за нормальне значення вмісту гармонічних спотворень.

Одним з основних показників якості електричної енергії вважається коефіцієнт нелінійних спотворень THD (Total harmonic distortion). THD – це

відношення середньоквадратичного значення гармонік до середньоквадратичного значення основного сигналу, включно із гармоніками аж до 50-го порядку за відсутності інтергармонік. Інтергармоніки – це будь-які сигнали, частота яких не є цілим числом, кратним основній частоті. Коефіцієнт нелінійних спотворень (THD) не повинен перевищувати 5% [2]. THD може перевищувати 5%, якщо обладнання в цій системі вибрано для компенсування наявних гармонік. Але в жодному разі загальний коефіцієнт гармонік не може перевищувати 8%. Такий великий відсоток призведе до дуже серйозних наслідків для обладнання [2].

Типові значення THD:

- 0% – сигнал ніяк не спотворений, та має вигляд синусоїди;
- 3% – такий відсоток викликає спотворення, які не помітно на око;
- 5% – значний відсоток відхилення від ідеальної форми сигналу, помітно на око;
- 20% – сигнал який має форму трапеції.
- 40% – сигнал прямокутної форми.

2.4 Вплив гармонічних складових на обладнання

Енергоустаткування є чутливим до впливу гармонік вищого порядку. Найменш чутлива група обладнання до спотворень форми напруги це пристрої які призначенні для нагрівання, наприклад, печі або нагрівачі. У цьому випадку енергія гармонік, фактично, використовується тому вона є припустимою. Але є випадки коли гармоніки можуть викликати діелектричне навантаження, що, в свою чергу, спричиняє старіння ізоляції. Найбільший вплив гармоніки вищого порядку мають на обладнання, яке має живитись ідеальним синусоїдальним сигналом, наприклад, пристрої для зв'язку або обробки даних.

2.4.1 Двигуни та генератори.

Основним негативним ефектом впливу гармонік на роботу роторного устаткування є перегрів через витрати в міді або сталі. Явище перегріву

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		33

пов'язано з збільшенням активного опору обмоток ротора. Тобто, опір збільшується і як наслідок зростає частота та зростають втрати корисної потужності.

Гармоніки спричиняють перерозподіл потоку в повітряному проміжку, це в свою чергу спричинює явище, яке називається моментом двигуна. Тобто, в результаті зміни моменту генератора створюються значні пульсації обертового моменту, це спричиняє підвищення механічного навантаження цього генератора або навіть вихід цього генератора в режим хитання. Також гармонічні складники викликають різке збільшення ковзання (дуже велике ковзання). Ковзання генератора визначається за формулою:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

де n_s – синхронна частота ротора;

n – реальна частота ротора

Гармонічні спотворення можуть змінювати частоту ротора n і цим самим викликати нестабільність роботи генератора.

В критичних випадках має місце виникнення великої вібрації на резонансній частоті ротора, це призводить до розриву валу ротора, тобто до повного руйнування генератора.

2.4.2 Трансформатори.

Ефект від дії гармонічних складових на трансформатори має подвійний характер. З одного боку гармоніки сигналу струму спричиняють збільшення втрат в міді, з іншої гармоніки сигналу напруги викликають збільшення втрат в сталі. Через це виникають великі втрати корисної потужності та струми Фуко. Втрати в сталі трансформатора визначаються за формулою:

$$P_X = B_c^m * f^n$$

де $B_c = \frac{U_B}{4,44 * f * S_c}$ – індукція, Тл

U_B – напруга на виток обмотки, В;

S_c – площа перерізу стрижня магнітопроводу, см²;

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		34

Значення коефіцієнтів m та n змінюється залежно від матеріалу і умов роботи сталі.

$m=2$, $n=1,3$ за $B=1-1,5$ Тл для гарячекатаної сталі;

$m=2$, $n=1,25$ за $B=1-1,5$ Тл для холоднокатаної сталі;

$m=3$, $n=1,25$ за $B=1,5-1,5$ Тл для холоднокатаної сталі.

Не залежно від того чи це гармонічна складова сигналу струму чи сигналу напруги, вони призводять до нагрівання трансформатора. Нагрівання трансформатора спричиняє збільшення втрат активної потужності та зменшують його термін служби. В свою чергу, часто великі втрати активної потужності призводять до пошкодження ізоляції і як наслідок вихід трансформатора з ладу.

Також варто зазначити, що підвищені втрати і теплові навантаження внаслідок дії гармонічних складових можуть потребувати додаткових заходів щодо охолодження трансформаторів, таких як встановлення примусової вентиляції або більш потужних систем охолодження. Це збільшує експлуатаційні витрати та складність обслуговування.

Вищі гармоніки в трансформаторах також спричиняють великі електродинамічні моменти. Це, в свою чергу спричинює високий рівень шуму трансформатора, що є критичним в трансформаторних пунктах розміщених поруч з житловими масивами.

Гармонічні спотворення також можуть спричиняти резонансні явища в електричній системі. Коли частота гармоніки співпадає з власною частотою коливань системи, це може призводити до значних перенапруг і перевантажень трансформатора та інших компонентів системи. Резонансні явища є небезпечними і можуть викликати аварійні ситуації в електромережі [9].

Якщо подати спотворену напругу на вхід трансформатора, то на виході отримаємо спотворені і напругу, і струм.

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		35

2.4.3 Лінії електропередач

Наявність гармонічних складових у ЛЕП спричинюють нагрівання що призводиться до перегріву та передчасного старіння матеріалу. Поява несинусоїдального струму в провіднику може спричинити додаткове нагрівання, що перевищує очікуване значення для середньоквадратичного струму. Це пояснюється двома явищами: "поверхневим ефектом" та "ефектом близькості", які також залежать від частоти та розміру провідників.

Зміна опору лінії електропередач в залежності від її хвильових параметрів визначається наступним чином.

$$r_0 = r_0^{\Omega}(1 + \gamma_s + \gamma_p)$$

де r_0^{Ω} – фактичний опір ЛЕП при фактичній температурі, Ом/м;

γ_s – коефіцієнт поверхневого ефекту;

γ_p – коефіцієнт близькості, ним нехтують коли виконують розрахунки для ПЛ з одним проводом.

При цьому коефіцієнт поверхневого ефекту можна визначити за формулою.

$$\gamma_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4}$$

де $x_s^2 = \frac{8\pi * f * k_s * 10^{-7}}{r_0^{\Omega}}$ – реактивний опір лінії;

f – частота, Гц;

k_s – коригувальний коефіцієнт, який враховує матеріальні властивості провідників ($k_s = 1$ для багатопровідних ПЛ з міді, алюмінію та сплавів цих металів).

Ефект нагрівання від гармонік зазвичай не набуває критичних значень. Однак це значення всеодно створює проблеми.

Також слід зазначити, що за великої кількості складових гармонік в повітряних лініях (ПЛ) частіше виникають короткі замикання [9].

2.4.4 Конденсатори.

Конденсатор є одним з найважливіших компонентів електричної мережі та приладів компенсації реактивної потужності. Якщо подати напругу з високою частотою, то опір конденсатора значно зменшиться. Опір конденсатора визначається за формулою:

$$x_c = \frac{1}{2\pi * f * C}$$

де C – ємність конденсатора

Через суттєві зменшення опорів конденсаторів, виникають значні струми вищих гармонік. Наявність цих струмів призводить до перегрівання ізоляції, поламки конденсатора, пришвидшення фізико-хімічних процесів у діелектричних матеріалах (тобто старіння ізоляції).

Основна проблема використання конденсаторів в електричній мережі є можливість резонансу. Ефект резонансу викликає ріст амплітуди, коли частота збігається з власною частотою коливань. Також явище резонансу у електричних мережах суттєво ускладнює можливість регулювання реактивної складової потужності.

Резонансну частоту для конденсатора можна знайти за формулою:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{LC}}$$

де L – індуктивність;

C – ємність конденсатора.

З усього наведеного вище можна сказати, що конденсатори є найбільш чутливими до впливу гармонічних спотворень, через це завжди завод виробник вказує граничне значення складових гармонік серед його паспортних характеристик.

2.4.5 Побутові прилади

Значний вплив спотворення напруги струму мають і на побутових споживачів, наприклад на комп'ютери або телевізори. Гармоніки завжди

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		37

впливають на пікові значення напруги, саме тому це може стати приводом до виникнення різних перешкод роботи цих пристроїв, яскравості зображенні, чіткість зображення. Саме тому існують межі на допустимі рівні гармонічних спотворень, для комп'ютера та телевізора в середньому це 5% відносно базового значення.

Постійна присутність гармонічних спотворень може спричинити передчасне старіння компонентів електронних пристроїв через підвищені теплові навантаження. Наприклад, електролітичні конденсатори в блоках живлення швидше висихають, що призводить до виходу з ладу пристрою.

Захисні пристрої, такі як безперебійні джерела живлення (UPS), стабілізатори напруги та фільтри, можуть не справлятися з великими рівнями гармонічних спотворень. Це може знизити їх ефективність і надійність у захисті електроніки від перепадів напруги та інших аномалій.

2.4.6 Вплив на засоби вимірювальної техніки.

Як відомо, калібрування обладнання для вимірювань повинно відбуватись при ідеальній формі струму та напруги без впливу на нього гармонічного спотворення [9]. Через гармонічні спотворення засоби вимірювання можуть втратити частину свого функціоналу, це значно зменшує точність вимірювання вимірювання.

Наприклад, за наявності джерела спотворення форми електричної енергії, звичайний індуктивний лічильник електроенергії може вимірювати значення спожитої енергії з похибкою в середньому 6-8%, що в декілька разів перевищує клас точності лічильника. З боку споживачів це призводить до збільшення плати за електричну енергію, тому слід використовувати різноманітні компенсуючі пристрої.

Інтелектуальні лічильники, які широко використовуються для покращення керування електроспоживанням, також потерпають від впливу гармонічних спотворень. Хоча вони більш стійкі до таких впливів порівняно з

індуктивними лічильниками, високі рівні гармонік все ж можуть зменшувати точність вимірювання та заважати нормальному процесу передавання даних.

Крім лічильників електроенергії, гармонічні спотворення впливають на точність інших засобів вимірювання, наприклад, вольтметри, амперметри та частотоміри. Це може ускладнювати контроль та діагностику електричних систем та мереж, що призводить до неправильних висновків і рішень щодо технічного обслуговування та експлуатації обладнання.

2.5 Пристрої усунення впливу гармонічних складових сигналу.

Відомо, що для усунення гармонічних складових сигналів струму та напруги можна використовувати не лише вузько спеціалізовані фільтри гармонік, але і пристрої компенсації реактивної потужності.

Пристрої які можуть використовуватись в якості компенсаторів гармонічних складових:

- Пристрої пасивної фільтрації;
- Пристрої активної фільтрації;
- Синхронні компенсатори (СК);
- Тиристорні пристрої компенсації реактивної потужності;
- Параметричні джерела струму;
- Випрямлячі з якісними енергетичними показниками.

2.5.1 Синхронний компенсатор.

Компенсатори – найбільш вживані на практиці пристрої. Але в процесі переходу використання навантаження яке містить пристрої перетворення енергії цей метод компенсації втратив свою популярність. На сьогодні проводяться дослідження статичних синхронних компенсаторів, які виконані з використанням схем на основі транзисторів [10].

СТАТКОМ (статичний синхронний компенсатор) створений на основі абсолютно керованих біполярних транзисторах з ізольованим затвором (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor. Зазвичай вони використовуються за схемою перетворювача напруги. Під'єднання їх до системи здійснюється

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		39

через спеціальний трансформатор або реактор приєднання. На рис 2.3 . наведено приклад підключення СТАТКОМУ до мережі з вітрогенераторами.

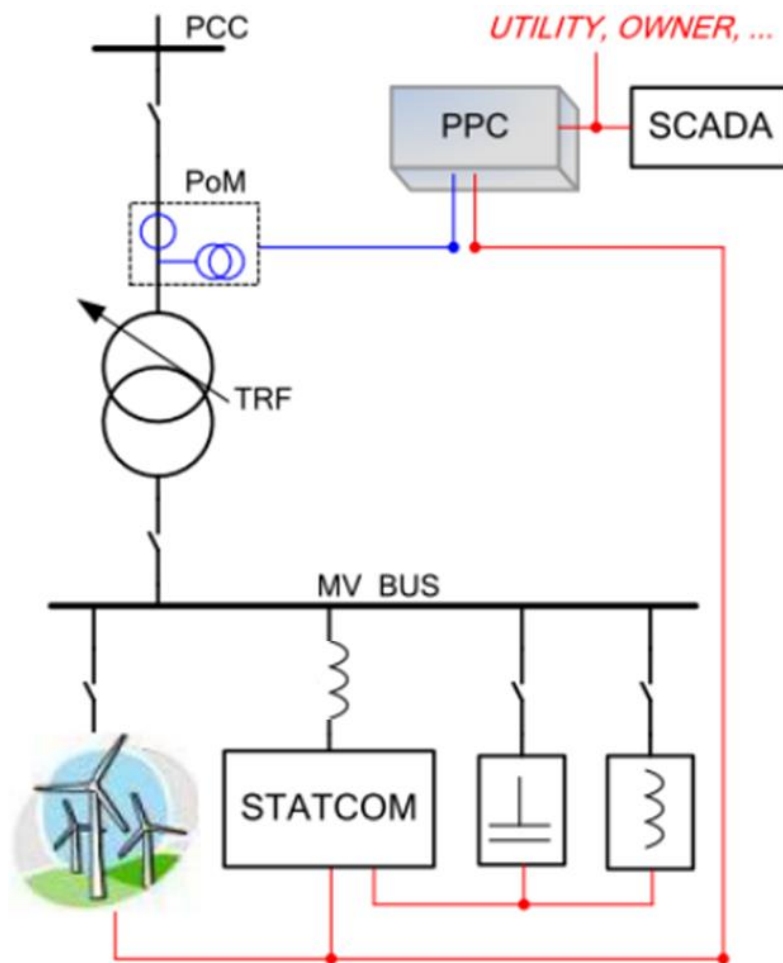


Рисунок 2.3 – Схема приєднання СТАТКОМУ

Основні елементи СТАТКОМУ це конденсаторні батареї, компенсуючі фільтри, що під'єднуються за допомогою комутаційних апаратів, а саме вимикачів. Ці фільтри вмикаються паралельно в так званий трикутник керованих транзисторами реакторів або тристорно-реактовану групу.

Переваги такого пристрою:

- Низький рівень втрат;
- Порівняно компактні розміри;
- Низький рівень акустичного шуму
- Легкість заміни несправних частин;
- В середньому сумарний рівень вищих гармонік до 50 порядку матимуть частку приблизно 1.2%.

Недоліки пристрою:

- Велика вартість;
- Додаткове споживання реактивної потужності, тому їх доцільно використовувати в мережах з напругою 110 кВ і вище.

2.5.2 Пасивний фільтр.

Пасивний фільтр гармонік це частотно-селективний ланцюг, який забезпечує зменшення впливу гармонічних складових на систему.

Основними перевагами таких пристроїв є їх дешевизна та простота використання. Вони також не вимагають постійного обслуговування та виконують одночасно дві функції, а саме послаблення гармонік та корекція коефіцієнта потужності [10].

Його основним та найбільшим недоліком є те, що це статичний пристрій, тобто вони налаштовуються на фільтрацію гармоніки конкретного порядку. Також коли змінюються параметри схеми або змінюється гармонійний склад сигналів напруги та струму їх ефективність значно зменшується. Ще одним недоліком пасивного фільтра є високий ризик виникнення резонансу в паралельному коливальному контурі, який утворюється фільтром та індуктивністю ліній мережі живлення на частотах вищих гармонік.

Існує велика кількість видів пасивних фільтрів та способів їх налаштування.

Найпростішим прикладом пасивного фільтра є смуговий фільтр, або односмуговий фільтр. Принцип дії цього виду фільтра полягає в тому, що на налаштованій частоті якоїсь гармоніки відбувається резонанс індуктивного та ємнісного елементу і комплексний опір фільтра зменшується до свого мінімального значення. На рис. 2.4 зображена схема такого пристрою



Рисунок 2.4 – Схема односмугового пасивного фільтра

Частоту налаштування даного виду фільтра можна визначити за рівнянням:

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		41

$$f_1 = n f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.4)$$

де f_0 – основна частота;

n – порядок гармоніки;

L – індуктивність котушки;

C – ємність конденсатору.

Добротність такого типу пасивного фільтра можна визначити за співвідношенням між індуктивним або ємнісним опором на частоті налаштування та активним опором:

$$Q_f = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}$$

де R – активний опір фільтру;

X_L – комплексний опір котушки фільтру на частоті налаштування;

X_C – комплексний опір конденсатора фільтру на частоті налаштування.

Тоді номінальну реактивну потужність можна розрахувати за формулою:

$$Q_r = \frac{U^2}{X_{C0} - X_{L0}}$$

Значущим мінусом цього типу фільтрації є великі втрати потужності. Це спричинено відносно низьким опором самого фільтру.

2.5.3 Активні фільтри

Активний фільтр не має тих недоліків, що має пасивний фільтр. Він має здатність активно видаляти частоти вищих гармонік. Такий фільтр складається зі схем силової електроніки які керуються схемою виділення гармонік малої потужності в точці приєднання. Принцип його дії полягає в тому, що за допомогою імпульсної модуляції формується середнє значення струму або напруги, що дорівнює різниці нелінійного струму або напруги і струму або напруги його основної гармоніки. Вони генерують струми та напруги гармонік та подають їх у протифазі в мережу [10].

В світі проводиться величезна кількість досліджень активних фільтрів, оскільки це найперспективніший напрямок значного зниження впливу гармонічних спотворень на мережу.

Переваги активного фільтру:

- Відбувається зниження втрат потужності через компенсацію реактивної потужності;
- Значне зменшення нелінійних спотворень струму;
- Присутня можливість повної компенсації вищих гармонік;
- Відсутність резонансу на будь яких частотах;
- Не реагують на коливання частоти;
- Майже повна відсутність перенавантаження;
- Гнучкість налаштування на будь-який порядок гармоніки;

Окрім компенсації гармонік, активні фільтри виконують і інші функції, наприклад зміна коефіцієнту потужності, зменшення флікеру, виключення паралельних резонансів. Такі можливості пояснюються тим, що вони підлаштовуються під будь-які параметри мережі та здатні змінювати свої параметри в залежності від зміни параметрів системи.

Основним і єдиним недоліком активного фільтра є його велика ціна. Зумовлено це високою потужністю приладу, у порівнянні з потужністю споживача, що вносить спотворення в систему.

Розрізняють чотири види активних фільтрів: паралельні, послідовні, паралельно-послідовні та гібридні. Своє застосування принципово знайшли лише два типи: послідовні та паралельні.

На рис. 2.5 зображено типи активних фільтрів:

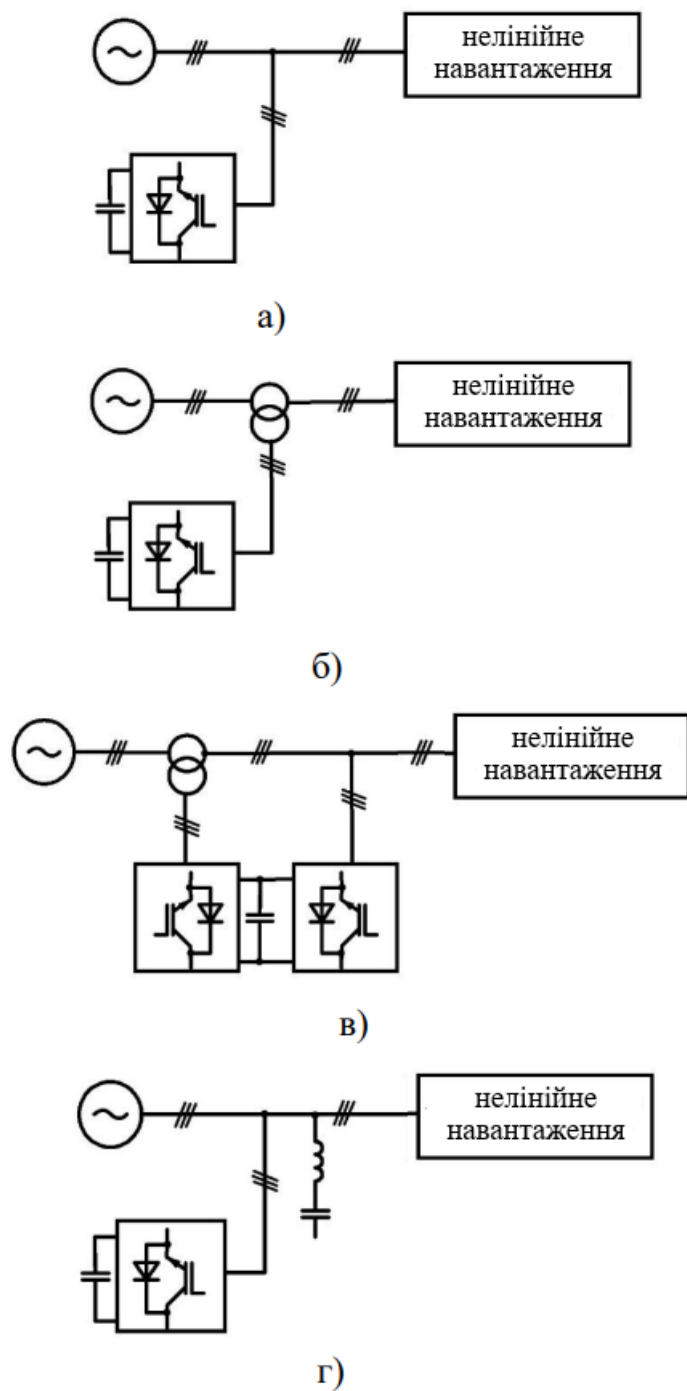


Рисунок 2.5 – Типи активних фільтрів: а) паралельний; б) послідовний; в) послідовно паралельний; г) гібридний.

Послідовний активний фільтр, є відносно простим генератором напруги і є ефективним методом для згладжування провалів, флікера і гармонічних складових напруги в мережі. В нього є лише два істотні недоліки. По-перше, це його висока вартість, яка спричинена його високою номінальною потужністю. По-друге цей фільтр не може виправляти форму струму для

навантаження під'єданого за ним, а впливає на це навантаження лише за допомогою зміни напруги. Перевагою такого типу фільтру є те що, він здатен виправляти спотворення форми напруги незалежно від природи їх виникнення.

Однак цей пристрій не так часто використовується в енергосистемі, через його недоліки, натомість більш поширеного використання набули паралельні активні фільтри (ПАФ). Ці пристрої здатні компенсувати вплив гармонічних спотверень струму, також дозволяють майже повністю вирівняти реактивну потужність.

Такий тип фільтру є комутованим пристроєм і, зазвичай, побудований за схемою інвертору струму з імпульсною модуляцією інтервалів провідності вентилів [10]. Так само реалізуються фільтри з параметрами, що можна перелаштовувати, та фільтри які адаптуються під параметри мережі.

Особливість такого типу фільтру є те, що він повинен налаштовуватись лише на гармонічні спотворення спричинені нелінійним навантаженням. Перевагою паралельного фільтру є принцип його регулювання з налаштуванням струму. Тобто заснований фільтр на тверджені, що коли прибрати вищі гармоніки струму в мережі, то синусоїдальність напруги відновиться.

При встановленні паралельного активного фільтру обираються затискачі нелінійного навантаження.

Якщо розглядати конструкцію паралельного активного фільтру, то він складається з 2 основних частин: силова частина з накопичувальним елементом, та система управління. Схема підключення та загальний вигляд активного паралельного фільтра зображена на рисунку 2.6.

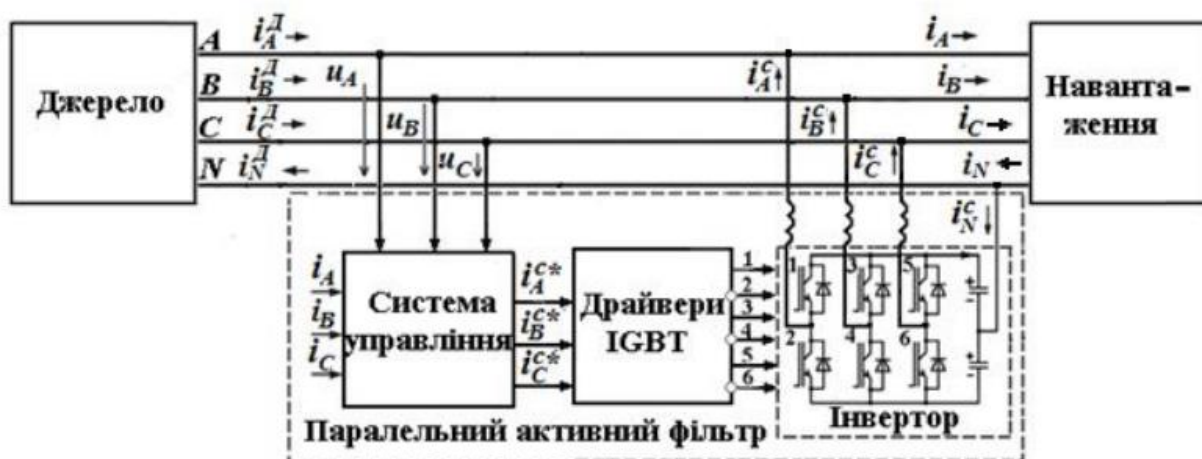


Рисунок 2.6 – Схема приєднання паралельного активного фільтра

Якщо розглянути конкретно силову частину, то вона також складається з двох частин: інвертор на базі IGBT-транзисторів, що живляться постійним струмом, та вхідний індуктивний фільтр. Система керування фільтром складається з первинних сенсорів струму та напруги, блоків, що реалізують алгоритм корекції коефіцієнта потужності та компенсації вищих гармонік.

Принцип дії активного паралельного фільтра полягає в наступному. Сенсори струму та напруги отримують та аналізують інформацію прийняту з мережі, далі система керування генерує керуючі імпульси для силових ключів інвертора, до якого підведено напругу накопичувального пристрою. Тоді через інвертор в систему генерується форма струму яка визначається за законом керування силовими ключами IGBT. Спектральний склад струму який подається в мережу від паралельного активного фільтра однаковий за амплітудою, але має протилежну фазу відносно струму нелінійного навантаження.

Основною задачею системи керування є підтримання рівня напруги накопичувальних пристроїв. Це досягається завдяки формуванню сигналів компенсації з урахуванням зміни струму нелінійного навантаження. Практична реалізація схем керування паралельного активного фільтра завжди визначається алгоритмом який у неї закладений. Основним елементом системи керування є підсистема генерації керуючих сигналів. Ця

підсистема визначає його основні характеристики як в перехідному, так і в сталому режимі.

Для створення силової частини ПАФ використовують три основні схеми виконання:

- три однофазні Н-мости з одним конденсатором;
- два конденсатори з трьома однофазними Н-мостами;
- два конденсатори з чотирма однофазними Н-мостами.

Найбільш поширеною та універсальною є схема виконання із трьома однофазними Н-мостами та з одним конденсатором (рис. 2.7)

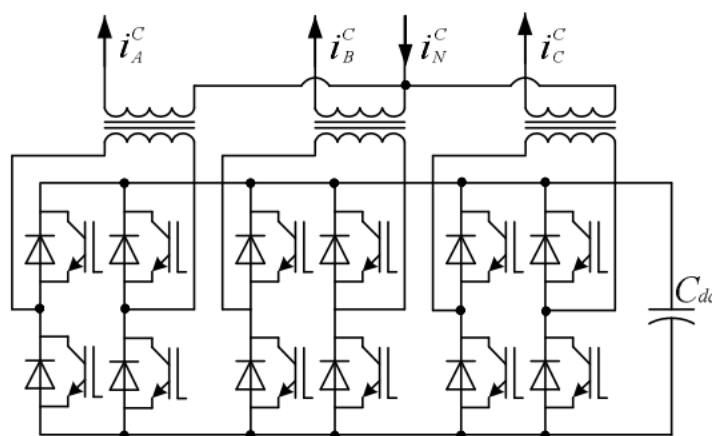


Рисунок 2.7 – Схема керування ПАФ - із трьома однофазними Н-мостами та з одним конденсатором

Ця схема складається з трьох однофазних Н-мостів. Вони є перетворювачами напруги і мають одну загальну шину постійного струму. Ці мости приєднуються до мережі через три однофазні двообмоткові трансформатори.

Також є варіанти виконання цієї схеми керування ПАФ у вигляді трифазного блоку та у вигляді окремих однофазних блоків. Використовуючи зміну коефіцієнта трансформаторів можна змінювати напругу на Н-мостах. Ця напруга також є напругою накопичувального пристрою. Найбільшим недоліком цієї схеми є велике число комутаційних пристроїв.

Також часто використовується схема інвертора ПАФ з двома конденсаторами (рис. 2.8).

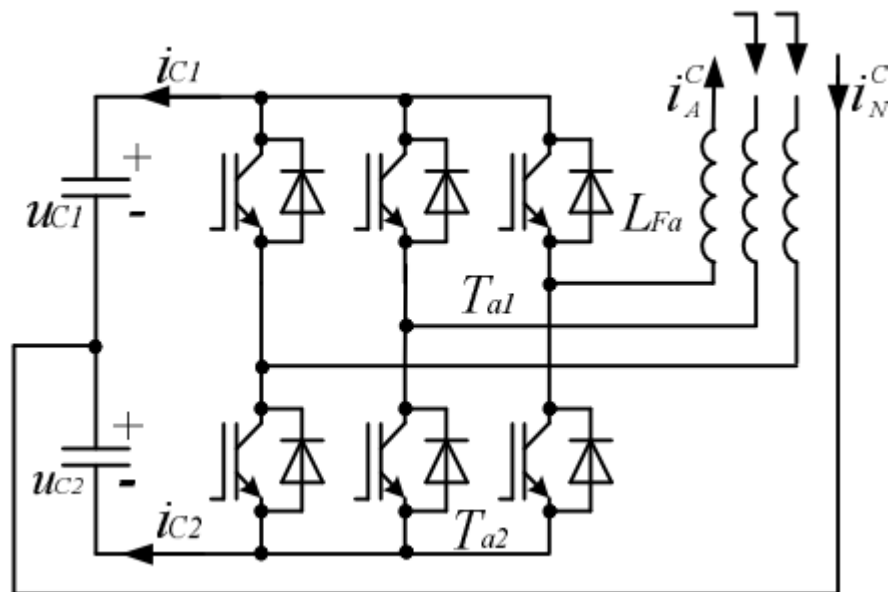


Рисунок 2.8 – Схема інвертора ПАФ з двома конденсаторами.

На відміну від схеми на рис. 2.7 така схема не так часто використовується через свій недолік, нерівність напруги між конденсаторами.

Схему з чотирьма плечами та двома конденсаторами, майже ніде не використовують через її значну вартість. Проте вона знайшла своє місце використання у схемах з великим струмом у нейтральному проводі.

Останні розробки ПАФ створюють із використанням багаторівневих напівпровідникових перетворювачів [10]. Також починають використовувати схеми з каскадними перетворювачами. Проте їх велика вартість, перешкоджає їхньому широкому застосуванню.

2.5.4 Гібридні фільтри гармонік.

Для того, щоб зменшити номінальні параметри активних фільтрів і тим самим зробити їх виготовлення більш дешевим в кінці ХХ століття вчені почали дослідження гібридних фільтрів. Принцип таких фільтрів полягав у тому, щоб основним фільтруючим елементом виступали пасивні шунтуючі фільтри. Під'єднується такий фільтр безпосередньо в лінію живлення або послідовно до пасивного фільтра. При цьому активний фільтр виконує функцію гармонійної розв'язки між джерелом гармонічних спотворень та

джерелом живлення системи. На рис. 2.12 наведені схеми виконання гібридних фільтрів.

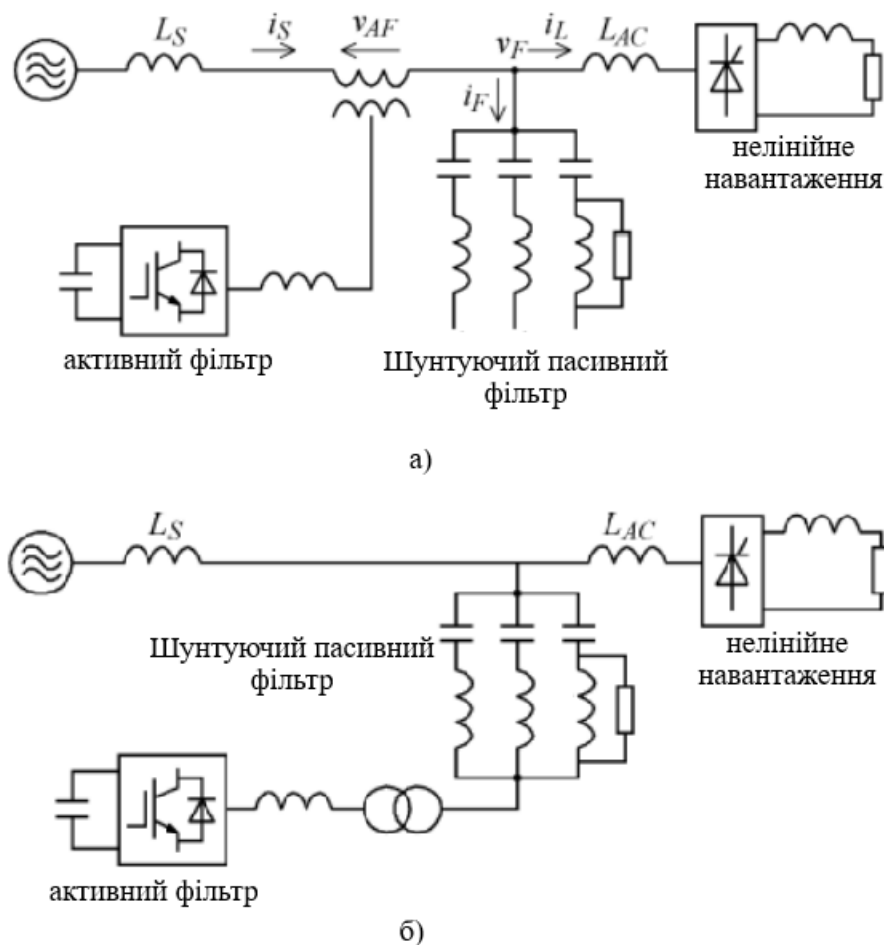


Рисунок 2.9 – Схеми виконання гібридних фільтрів: а) гібридний фільтр з підключенням активного фільтра безпосередньо в лінію живлення; б) послідовний гібридний фільтр

Пасивний фільтр включає два підсистеми, які налаштовані на фільтрацію п'ятої та сьомої гармонік, а також фільтр високих частот другого порядку, призначений для фільтрації 11-ї гармоніки. Хоча самі гібридні фільтри можуть мати відрізняються схемотехнічною побудовою, принцип їх дії та характеристики фільтрації залишаються практично ідентичними.

Таке поєднання активних та пасивних фільтрів дозволяє значно знизити номінал активного фільтра. Це досягається завдяки ефективній роботі пасивного фільтра, який передає частину фільтраційної роботи на себе, зменшуючи тим самим навантаження на активний фільтр.

Висновки

В цьому розділі дипломного проєкту, було розглянуто поняття гармонічної складової спотворень, джерела її виникнення та вплив на якість електроенергії. Було показано, що гармонічні спотворення, це негативне явище, яке значно збільшує витрати як споживачів, так і виробників електроенергії.

Зазначено, що синусоїда є функцією непарного порядку, тобто її розклад у ряд Фур'є містить лише непарні гармоніки. Парні гармоніки зникають через властивість симетрії синусоїдального сигналу.

Було показано, що такий параметр, як коефіцієнт нелінійних спотворень THD не має перевищувати 5% задля підтримання нормальної роботи електроенергетичного устаткування та різноманітного обладнання споживачів. При цьому було зазначено, що для нормальної роботи енергомережі не припустиме значення коефіцієнту нелінійних спотворень THD вище за 8%.

Також в цьому розділі було зроблено огляд пристроїв для усунення впливу гармонічної складової. Зокрема синхронний компенсатор, пасивні, активні та гібридні фільтри.

Задля подальшої перевірки ефективності роботи пристроїв усунення гармонічних складових сигналів на підстанції 110/10 кВ було обрано каскад пасивних фільтрів.

З ФІЛЬТРАЦІЯ ГАРМОНІЧНОГО СПОТВОРЕННЯ СИГНАЛУ НА ПІСТАНЦІЇ 110/10 кВ

3.1 Обладнання для фільтрації

Для дослідження впливу гармонік та способів їх фільтрації було обрано каскад фільтрів який складається з трьох різних пасивних трьохфазних фільтрів. Кожен з фільтрів має власну частоту налаштування, тобто відсікатиме певний порядок гармоніки.

Каскади фільтрів використовуються для того, щоб відразу компенсувати декілька найбільш шкідливих гармонік в мережі. Задля досягнення цієї мети можна використовувати С-фільтр, смуговий фільтр з подвійним налаштуванням та фільтр високих частот другого порядку. Такий вибір набору фільтрів пояснюється їх дешевизною, простотою обслуговування та легкістю налаштування.

Фільтр високих частот, С-типу Особливістю цього фільтру є те, що С-фільтр має менші втрати потужності, оскільки тут присутнє паралельне з'єднання котушки, конденсатора і резистора. Загальний вигляд С-фільтру наведено на рис. 2.7.

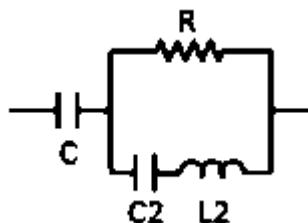


Рисунок 3.1 – Фільтр високих частот, С-типу

Добротність фільтра визначається за формулою:

$$Q_r = \frac{R}{2\pi f_0 n L_2}$$

					141.ЕК0118.009.ДБ					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ФІЛЬТРАЦІЯ ГАРМОНІЧНОГО СПОТВОРЕННЯ СИГНАЛУ			Лист.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Рибась Л. Ф.		12.06.24						
Перев.		Лавренова Д. Л.		12.06.24					51	16
Реценз.								КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА гр. ЕК-01		
Н. Контр.		Шполянський О. Г.		12.06.24						
Затвер.		Марченко А. А.		12.06.24						

Смуговий фільтр, з подвійним налаштуванням Особливість цього типу фільтру полягає в тому, що він має дві частоти налаштування f_1 та f_2 . На відміну від пасивного фільтра, він має два резонансних контури, один послідовний LC-контур та один паралельний RLC-контур. На рис. 2.5 наведено загальну компоновку смугового фільтра з подвійним налаштуванням.

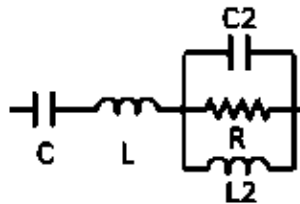


Рисунок 3.2 - Смуговий фільтр, з подвійним налаштуванням

Добротність цього фільтра можна визначити за наступною формулою:

$$Q_r = \frac{R}{2\pi\sqrt{f_1 f_2} L_2}$$

Фільтр високих частот другого порядку Особливість такого фільтру полягає в тому, що його можна налаштувати на шунтування великої кількості гармонік, при чому це буде відбуватись на частотах вище ніж частота налаштування. Загальний вигляд фільтру наведено на рис. 2.6

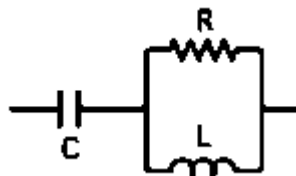


Рисунок 3.3 – Фільтр високих частот другого порядку

Добротність цього фільтра можна визначити за формулою:

$$Q_f = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}$$

3.2 Вибір місця приєднання фільтра.

Вибір місця приєднання фільтру гармонік є ключовим етапом в процесі оптимізації роботи електромережі. Вибір місця для їх розташування вимагає комплексного аналізу різних факторів, таких як розподіл навантаження, характеристики мережі та вимоги щодо якості електропостачання.

Зазвичай, фільтри гармонік приєднуються до мережі через спеціальні знижувальні трансформатори та працюють на напрузі 10 кВ та нижче. На сьогодні використанню високовольтних фільтрів гармонік заважає лише одна перешкода, їх висока вартість. Проте, використання фільтрів гармонік безпосередньо в мережі 110 кВ без використання трансформаторів надає ряд переваг:

- Ефективність. Розміщення фільтрів безпосередньо з боку 110 кВ дозволяє працювати на високих напругах і забезпечує більшу ефективність у видаленні гармоній.
- Економія місця. Відсутність потреби у трансформаторах для зниження напруги перед фільтрами дозволяє зберегти простір у підстанції, що особливо важливо в умовах обмеженої території.
- Менша втрата потужності. Використання фільтрів на з боку вищої напруги допомагає уникнути додаткових втрат потужності, що можуть виникнути при перетворенні напруги на нижчий рівень.
- Зниження витрат на обслуговування. Відсутність додаткового обладнання (трансформаторів) спрощує систему та зменшує витрати на обслуговування та ремонт.
- Швидкість реакції. Розміщення фільтрів на рівні 110 кВ дозволяє їм реагувати швидше на зміни у споживанні електроенергії та гармонічних спотворень у мережі.

В цілому, використання фільтрів гармонік безпосередньо в мережі 110 кВ є раціональним рішенням для забезпечення якості електропостачання та ефективного керування гармонічними спотвореннями без зайвих витрат та ускладнення, пов'язаних з використанням трансформаторів.

Спираючись на все вищезазначене було обрано місце розташування каскаду фільтрів на підстанції з боку напруги 110 кВ. Насьогодні це не є розповсюдженою практикою в Україні, тому виникає необхідність у проведенні досліджень ефективності запропонованого методу. Таке

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
						53
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

дослідження ефективності роботи каскаду фільтрів було проведено на основі моделювання із використанням програмного середовища MATLAB.

3.3 Розрахунок параметрів трьохфазних фільтрів гармонік.

Для початку потрібно визначити загальну потужність всіх фільтрів які будуть встановлюватись. Це необхідно для вибору номінальної потужності фільтрів, на базі якої можна визначити параметри кожного фільтру з каскаду.

Номінальна потужність всіх фільтрів визначається за формулою:

$$Q_c = \frac{U^2}{X_c} = \frac{(110 * 10^3)^2}{40.5} = 298 \text{ МВАр}$$

де U – номінальна напруга мережі;

X_c – імпеданс на фундаментальній частоті 50 Гц.

Тобто номінальна потужність кожного з фільтрів має дорівнювати:

$$Q = \frac{Q_c}{3} = \frac{298}{3} \approx 100 \text{ МВАр}$$

3.3.1 Розрахунок частот налаштування фільтрів

Обрані фільтри потрібно налаштувати на певну частоту. Для того щоб дослідити якомога більший спектр гармонічних спотворень, було обрано наступні гармоніки:

- 3-я гармоніка, оскільки це гармоніка нульової послідовності;
- 11-а гармоніка, оскільки це гармоніка зворотної послідовності;
- 13-а гармоніка, оскільки це гармоніка прямої послідовності;
- 24-а гармоніка, для того щоб дослідити вплив парних гармонік.

Визначаємо частоту налаштування С-фільтру. Цей фільтр налаштовується на фільтрацію гармоніки третього порядку. Частота налаштування обчислюється за формулою:

$$f = n * f_0 = 3 * 50 = 150 \text{ Гц}$$

де n – порядок гармоніки, які потрібно компенсувати;

f_0 – номінальна частота мережі.

Для смугового фільтра з подвійним налаштуванням, обираємо 2 частоти налаштування, для фільтрації 11-ї та 13-ї гармоніки:

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		54

$$f_1 = n * f_0 = 11 * 50 = 550 \text{ Гц}$$

$$f_2 = n * f_0 = 13 * 50 = 650 \text{ Гц}$$

Фільтр високих частот другого порядку налаштовується на відсікання гармоніки 24-го порядку:

$$f = n * f_0 = 24 * 50 = 1200 \text{ Гц}$$

3.3.2 Розрахунок ємності фільтрів для n-ї гармоніки

Розрахуємо ємність для С-фільтру:

$$C_3 = \frac{k_3 * Q}{U^2 * 2\pi f * n} = \frac{1,3 * 100 * 10^6}{(110 * 10^3)^2 * 2\pi * 50 * 3} = 11,3995 \text{ мкФ}$$

де $k_3 = 1,3$ – коефіцієнт запасу для запобігання перевантаженню;

U – фазна напруга мережі, В;

f – частота основної гармоніки, Гц;

n – номер гармоніки.

Аналогічно розрахуємо ємність для інших типів фільтрів. Смуговий фільтр з подвійним налаштуванням налаштований на фільтрацію 11-ї та 13-ї гармоніки, тому розрахуємо ємність паралельного та послідовного контуру:

$$C_{11} = \frac{k_3 * Q}{U^2 * 2\pi f * n} = \frac{1,3 * 100 * 10^6}{(110 * 10^3)^2 * 2\pi * 50 * 11} = 3,10896 \text{ мкФ}$$

$$C_{13} = \frac{k_3 * Q}{U^2 * 2\pi f * n} = \frac{1,3 * 100 * 10^6}{(110 * 10^3)^2 * 2\pi * 50 * 13} = 2,63066 \text{ мкФ}$$

Фільтр високих частот другого порядку налаштований на фільтрацію гармоніки 24-го порядку. Тоді ємність цього фільтра буде дорівнювати:

$$C_{24} = \frac{k_3 * Q}{U^2 * 2\pi f * n} = \frac{1,3 * 100 * 10^6}{(110 * 10^3)^2 * 2\pi * 50 * 24} = 1,42494 \text{ мкФ}$$

3.3.3 Розрахунок ємнісних та індуктивних опорів фільтрів

При розрахунках ємнісного та індуктивного опорів, індуктивний опір за числовим значенням прирівнюють до ємнісного [].

Значення ємнісного опору для С-фільтру:

$$X_{C_3} = \frac{1}{2\pi f * C_3 * n} = \frac{1}{2\pi * 50 * 11,3995 * 10^{-5} * 3} = 93,077 \text{ Ом}$$

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		55

Значення ємнісного опору для смугового фільтру з подвійним налаштуванням:

$$X_{C_{11}} = \frac{1}{2\pi f * C_{11} * n} = \frac{1}{2\pi * 50 * 3,10896 * 10^{-6} * 11} = 93,1 \text{ Ом}$$

$$X_{C_{13}} = \frac{1}{2\pi f * C_{13} * n} = \frac{1}{2\pi * 50 * 2,63066 * 10^{-6} * 13} = 93,05 \text{ Ом}$$

Значення ємнісного опору фільтру високих частот другого порядку:

$$X_{C_{24}} = \frac{1}{2\pi f * C_{24} * n} = \frac{1}{2\pi * 50 * 1,42494 * 10^{-6} * 24} = 93,079 \text{ Ом}$$

3.3.4 Розрахунок індуктивності резонансних фільтрів.

Оскільки $X_{C_n} = X_{L_n}$, то індуктивності для фільтрів визначаються наступним чином.

Для С-фільтру:

$$L_3 = \frac{X_{L_3}}{2\pi f * n} = \frac{93,077}{2\pi * 50 * 3} = 0,0987 \text{ Гн}$$

Для смугового фільтру з подвійним налаштуванням:

$$L_{11} = \frac{X_{L_{11}}}{2\pi f * n} = \frac{93,1}{2\pi * 50 * 11} = 0,0269 \text{ Гн}$$

$$L_{13} = \frac{X_{L_{13}}}{2\pi f * n} = \frac{93,05}{2\pi * 50 * 13} = 0,0228 \text{ Гн}$$

Для фільтру високих частот другого порядку:

$$L_{24} = \frac{X_{L_{24}}}{2\pi f * n} = \frac{93,079}{2\pi * 50 * 24} = 0,0123 \text{ Гн}$$

3.4 Моделювання роботи каскаду фільтрів

Для проведення дослідження було створено схему, що моделює роботу підстанції з номінальним напругою 110/10 кВ із нелінійним навантаженням.

У моделі використовуються наступні елементи.

- Джерело живлення. Основне джерело живлення має номінальну напругу 110 кВ, що відповідає типовим параметрам високовольтних мереж, та параметрам об'єкта бакалаврської роботи.

- Паралельний RLC контур. Цей прилад імітує повітряні лінії електропередачі і складається з резисторів, індуктивностей і конденсаторів. Він слугує для моделювання поведінки ліній під навантаженням.

- Силовий трансформатор ТРДН-25000 110/10 кВ. Трансформатор з розщепленою обмоткою використовується для пониження напруги з 110 кВ до 10 кВ, що дозволяє жити низьковольтні споживачі. Цей трансформатор має потужність 25 МВА, що відповідає завданню на бакалаврську роботу та умовам експлуатації на підстанціях.

- Нелінійне навантаження. Для моделювання нелінійного навантаження використовується лінія постійного струму з випрямлячем. Випрямляч складається з двох 6-ти імпульсних тиристорних мостів, з'єднаних послідовно. Цей прилад безпосередньо вносить гармонічні спотворення до мережі.

- Резистивне навантаження та згладжувальний реактор. До сторони постійного струму підключено резистивне навантаження потужністю 1000 МВт через згладжувальний реактор з індуктивністю 0,5 Гн. Це навантаження слугує для аналізу впливу великих потужностей на систему. Реактор з індуктивністю 0,5 Гн допомагає зменшувати пульсації струму на стороні постійного струму, забезпечуючи більш стабільний режим роботи випрямляча.

Для забезпечення можливості підключення та відключення фільтрів гармонік, а також для проведення досліджень різних режимів роботи, у схемі встановлено вимикач на приєднаннях фільтрів до мережі. Коли вимикач відкрито, фільтр деактивується і не впливає на вихідну форму сигналу системи. Це дозволяє дослідити роботу системи як з активованим фільтром, так і без нього, що є важливим для аналізу ефективності фільтрації гармонік та впливу нелінійних навантажень на електромережу.

Остаточні дослідну модель наведено на рис. 3.4.

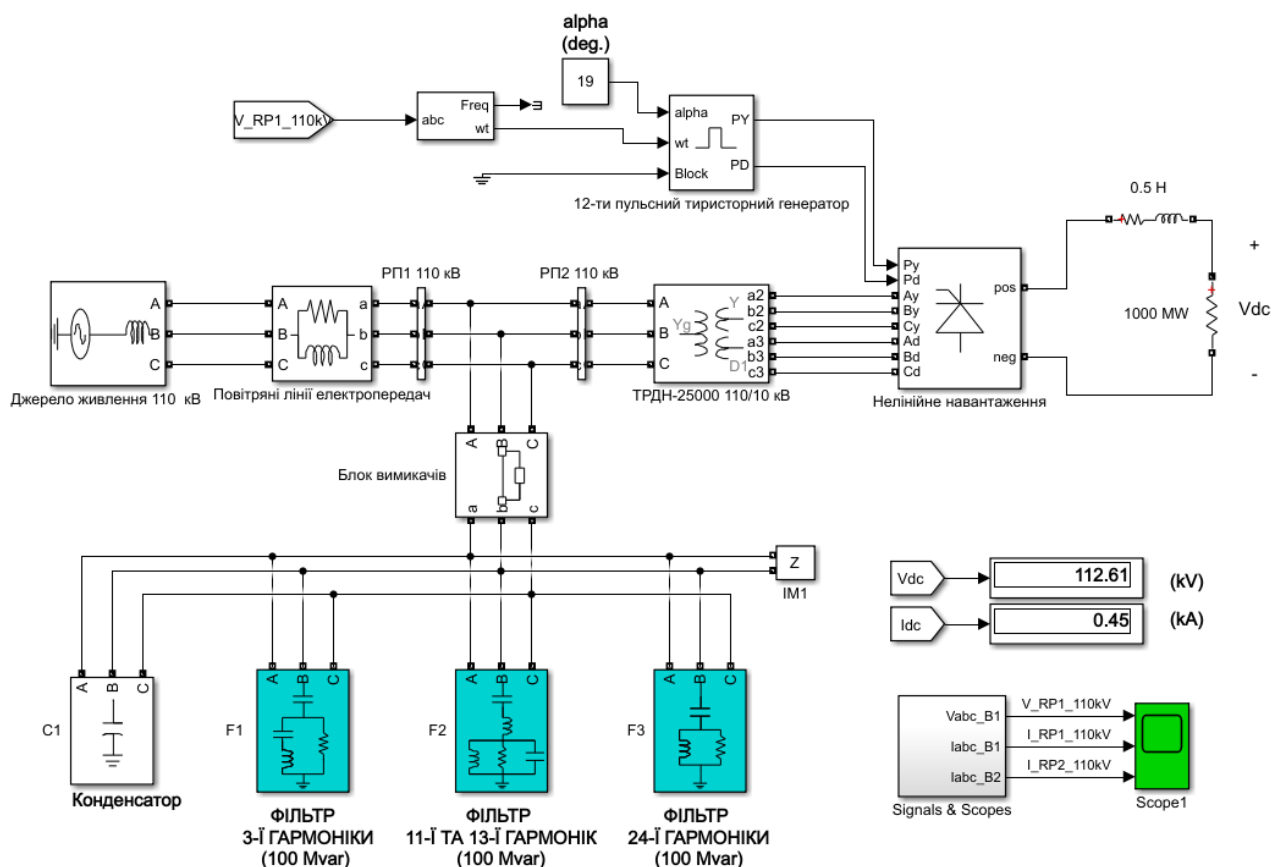


Рисунок 3.4 – Модель для дослідження ефективності роботи каскаду фільтрів на підстанції з боку 110 кВ.

Параметри налаштування елементів моделі наведено в таблицях 3.1–3.4:

Таблиця 3.1 – Параметри трансформатора

Трансформатор	Номінальна потужність обмоток, МВА	Номінальні значення напруги, кВ		Втрати, кВт	
		ВН	НН	XX	КЗ
ТРДН-25000 110/10 кВ	25	115	10,5	27	120

Таблиця 3.2 – Параметри фільтрів гармонік

Фільтри	Номінальна потужність, МВАр	Частота налаштування, Гц	Ємність, мкФ	Ємнісний опір, Ом	Індуктивність, Гн
С-фільтр (3-я гармоніка)	100	150	0,13995	93,077	0,0987
Смуговий фільтр з подвійним налаштуванням (11-а гармоніка)	100	550	3,10896	93,1	0,0269
Смуговий фільтр з подвійним налаштуванням (13-а гармоніка)	100	650	2,63066	93,05	0,0228
Фільтр високих частот другого порядку (24-а гармоніка)	100	1200	1,42496	93,079	0,0123

Таблиця 3.3 – Параметри джерела живлення

	Номінальна напруга, кВ	Номінальна частота, Гц	Індуктивність, мГн	Тип генератора
Джерело живлення	110	50	98,3	Балансуючий вузол (PV - генерація з фіксацією модуля напруги)

Таблиця 3.4 – Параметри лінії електропередачі

Лінія електропередачі	Номінальна напруга, кВ	Активний опір, Ом	Реактивний опір, Ом	Провідність, мСм	Заряджена потужність, МВАр
АС-120	110	24,9	42,3	0,269	3,6

Таким чином, схема має робочу напругу 112,61 кВ, що знаходиться в допустимих межах відхилення напруги у мережах 110 кВ, а саме $\pm 15\%$ від номінального значення [3]. Робочий струм мережі становить 0,45 кА, що також знаходиться в допустимих межах [3].

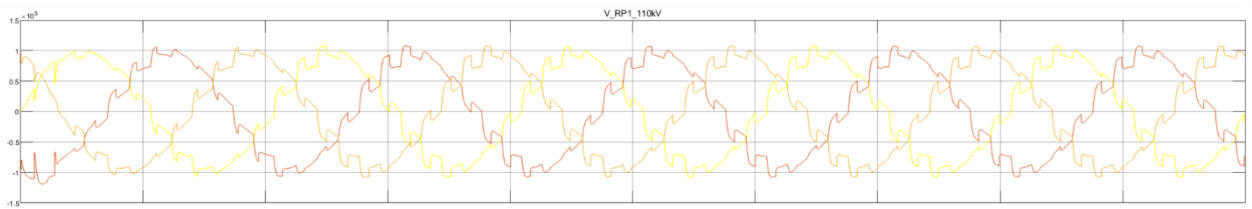
Всі досліді моделі виконано для шини РП1 110 кВ та шини РП2 110 кВ. Результати представлено у вигляді графіків.

Перший дослід виконано із розімкненим вимикачем, тобто неактивним фільтром гармонік. Це дозволило встановити загальний рівень гармонічного спотворення у мережі. Визначення базового рівня вищих гармонік дозволяє оцінити, наскільки серйозною є проблема спотворень в модельованій мережі.

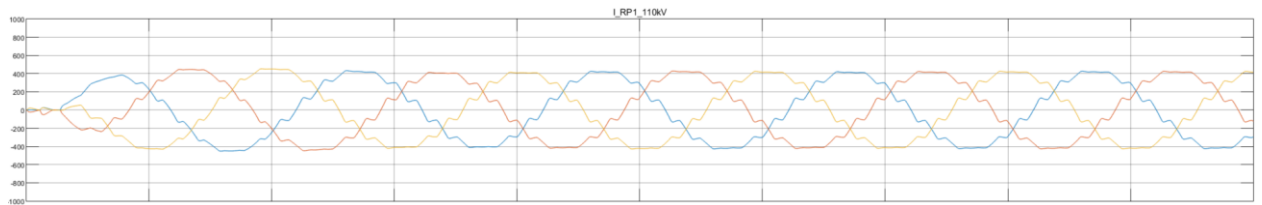
При відключенні фільтра спостерігалось падіння робочої напруги мережі до значення 100 кВ, що є майже критичним для мереж. Це підкреслює важливість використання фільтрів гармонік для підтримки стабільності напруги та забезпечення високої якості електропостачання. Відсутність фільтрації гармонік може призвести до значних коливань напруги, що негативно впливає на роботу всього електричного обладнання.

На рис. 3.5 наведено спотворені форми сигналу у модельованій мережі.

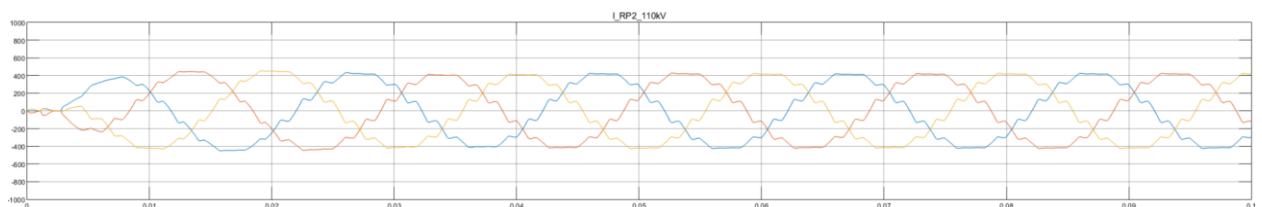
					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		60



а)



б)



в)

Рисунок 3.5 – Гармонічні спотворення у мережі з деактивованим фільтром:

а) форма напруги на РП1-110кВ; б) форма струму в РП1-110кВ; в) форма струму в РП2-110кВ.

З графіків видно, що спотворення які вносяться нелінійним навантаженням значні. Для того щоб оцінити числові значення спотворень, проведено FFT-аналіз (Fast Fourier transform або аналіз Фур'є) із визначенням коефіцієнту нелінійних спотворень THD. Результат FFT-аналізу для струму та напруги наведено на рис. 3.6 та 3.7.

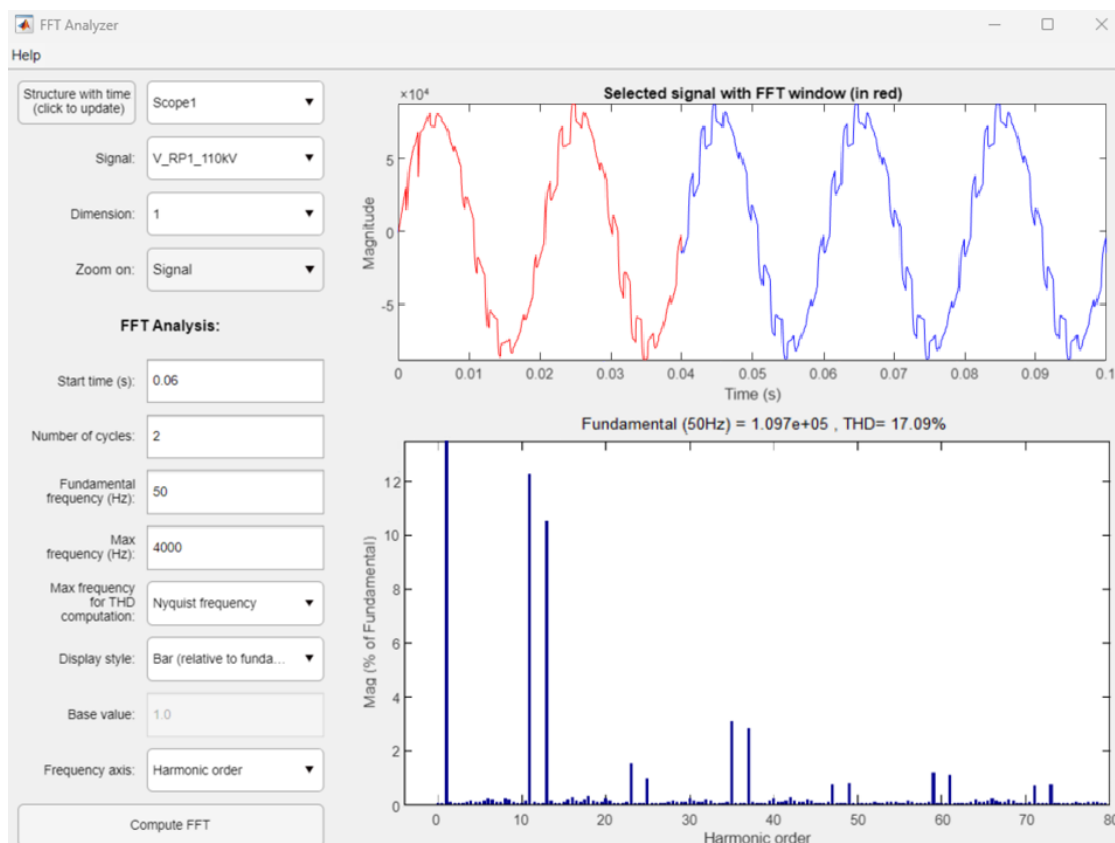


Рисунок 3.6 – FFT аналіз напруги з відключеним фільтром.

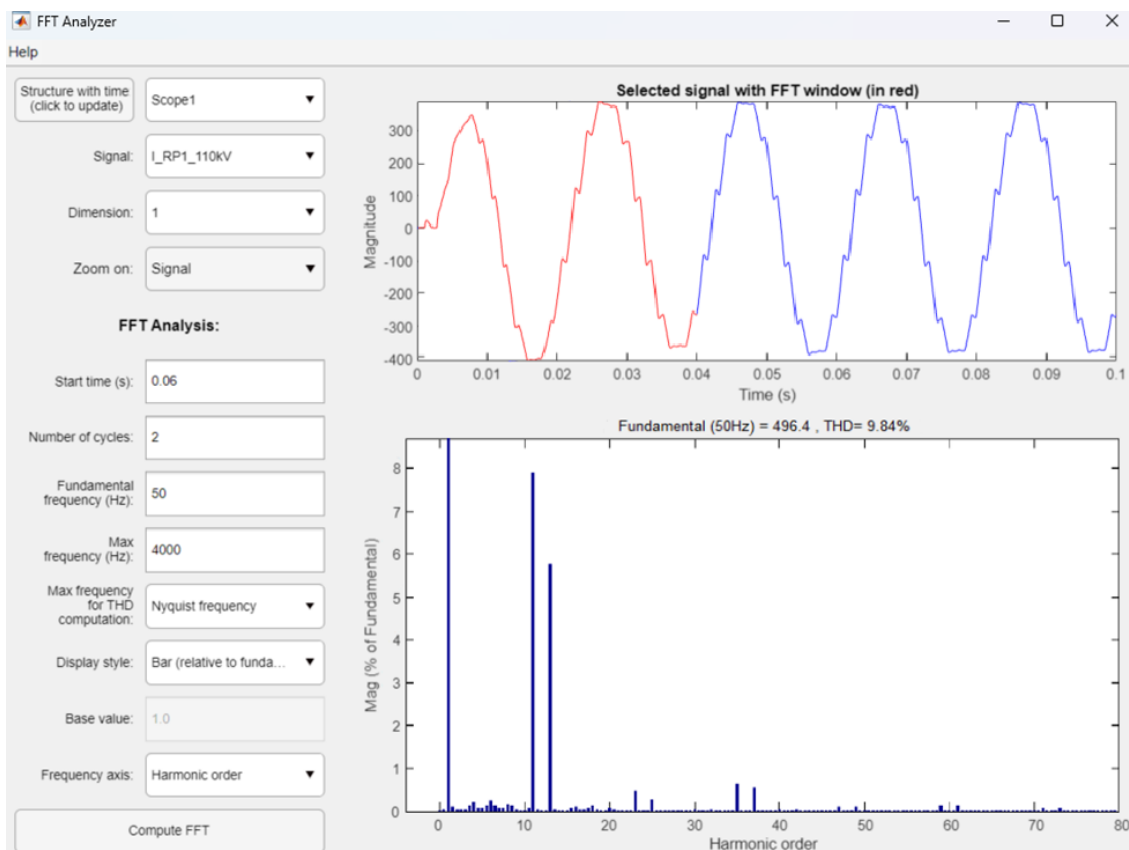


Рисунок 3.7 – FFT аналіз струму з відключеним фільтром.

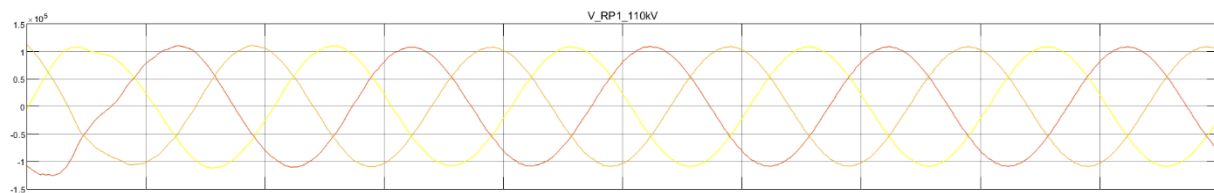
З графіків FFT-аналізу видно, що для сигналу напруги та струму модельованої системи рівень THD становить 17,09% та 9,84% відповідно.

Аналіз результатів розкладу сигналу напруги в ряд Фур'є показав, що найбільший вплив має 3-я гармоніка, а рівень спотворень, який вона вносить, становить 15%. Також можна зазначити, що великий вплив мають 11-а гармоніка (вносить спотворення на рівні 12%) та 13-а гармоніка (вносить спотворення на рівні 5,8%).

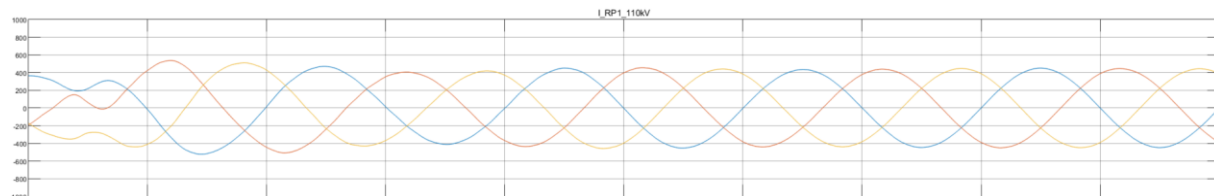
По результатах аналізу можна зробити висновок, що рівень THD є високим та не прийнятним відповідно [1].

Другий дослід проведено із замкненим вимикачем, тепер фільтр гармонік активовано і він безпосередньо бере участь у компенсації гармонік.

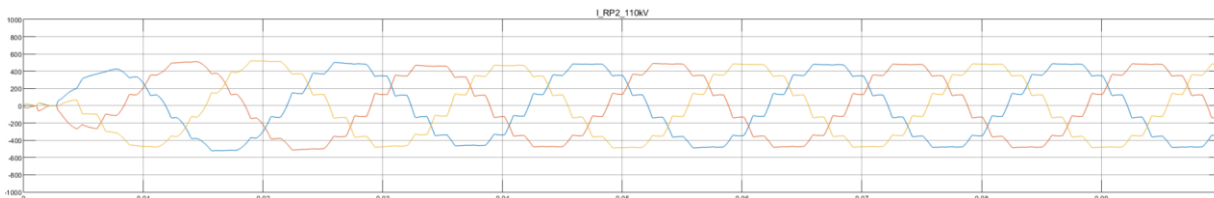
На рис. 3.8 наведено форми сигналу у модельованій мережі з використанням каскаду фільтрів.



а)



б)



в)

Рисунок 3.8 – Форма сигналу з активованим фільтром гармонік:

а) форма напруги на РП1-110кВ; б) форма струму в РП1-110кВ; в) форма струму в РП2-110кВ.

На графіках помітно, що було компенсовано великий відсоток гармонік, та частково відновлено синусоїдальну форму сигналів. Це свідчить про те, що фільтри гармонік не здатні до повної відсічки гармоніки, вони лише компенсують більший відсоток спотворень. Проте, вони забезпечують рівень гармонічних спотворень, який не буде шкодити обладнанню. Такий рівень відновлення синусоїдальної форми сигналів є показником ефективності застосування фільтрів гармонік для зниженні рівня гармонічних спотворень на підстанції. Це досягається шляхом компенсації гармонік вищих порядків, що найбільше впливають на якість сигналу. Для того, щоб це оцінити було проведено FFT-аналіз струму та напруги із активованим каскадом фільтрів. FFT-аналіз дозволяє детально оцінити спектральний склад сигналів і виявити присутність гармонік різних порядків. Результати аналізу наведено на рис. 3.9 та 3.10.

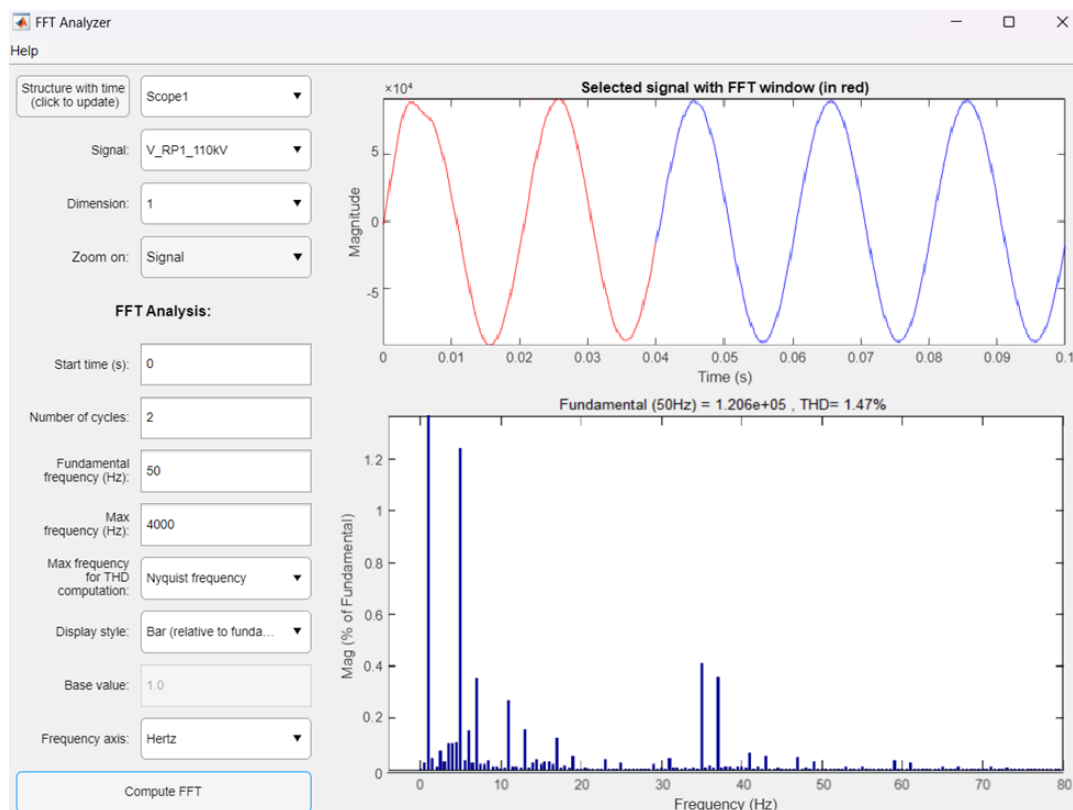


Рисунок 3.9 – FFT аналіз напруги з включеним фільтром.

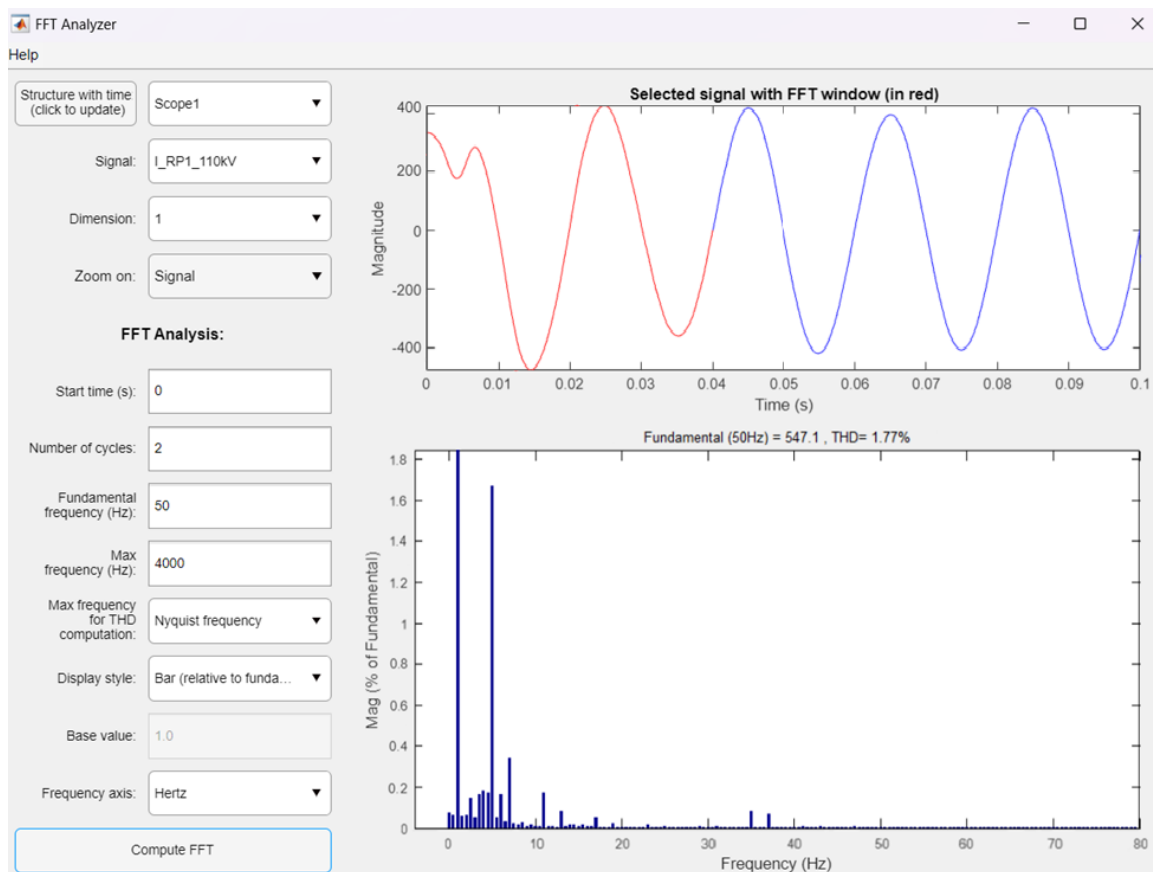


Рисунок 3.10 – FFT аналіз струму з включеним фільтром.

З графіків FFT-аналізу видно, що для сигналу напруги та струму модельованої системи рівень THD становить 1,47% та 1,77% відповідно.

В цьому досліді аналіз Фур'є показав, що із застосуванням каскаду фільтрів значно зменшуються спотворення від гармонічних складових. А саме найбільше спотворення сигналу має 3-я гармоніка, однак тепер вона вносить всього 1,4 % спотворення сигналу. Тобто вплив цієї гармоніки зменшився у 10,7 разів. Вплив 11-ї та 13-ї гармонік зменшився у 66 разів та 41 раз відповідно (рівень спотворення після фільтрації становив 0,18 % та 0,14 % відповідно).

Початок моделювання на графіках є вихід системи на усталений режим роботи, тому червону частину графіків можна не враховувати.

Аналізуючи отримані результати, можна сказати, що запропонована конфігурація фультру гармонічних спотворень ефективна для фільтрації гармонік від 13-ї до 23-ї включно. Всі інші гармоніки фільтруються, але їх

кількість дуже велика, тому після фільтрації цих гармонік, всеодно залишаться де-яке спотворення сигналів.

Висновок

Пристроєм покращення якості електричної енергії, було обрано каскад пасивних фільтрів вищих гармонік. Було обрано точку приєднання каскаду фільтрів до мережі. Запропоновано використовувати пасивні фільтри вищих гармонік на високій стороні напруги підстанції 110/10 кВ без використання спеціальних трансформаторів приєднання. Це дозволить скоротити витрати на трансформатори, підняти ефективність фільтрів, зменшити втрати корисної потужності та пришвидшити їх реакцію на спотворення сигналу.

Було розраховано параметри каскаду пасивних фільтрів, які забезпечують нормальну роботу цих фільтрів.

За допомогою цифрового моделювання роботи мережі у середовищі MATLAB, було встановлено, що обрані фільтри майже повністю усувають гармонічні спотворення. Після ввімкнення фільтрів рівень THD для сигналів напруги та струму складає 1,47% та 1,77% відповідно. Це є допустимим значенням відповідно [1]. Також за результатами моделювання слід зазначити, що на форму сигналу найбільший вплив мають 3-я, 11-а та 13-а гармоніки. А каскад фільтрів зменшують цей вплив відповідно у 11, 66 та 41 раз. Тобто запропонований каскад фільтрів із розрахованими параметрами найкраще відфільтровує 11-у гармоніку.

ВИСНОВКИ

Об'єктом бакалаврської роботи було обрано підстанцію 110/10 кВ, а предметом було використання засобів фільтрації гармонічних спотворень на цій підстанції.

В дипломній роботі було зроблено огляд обладнання підстанції 110/10 кВ, а також розраховано параметри аварійного режиму, зокрема струми короткого замикання. Отримано наступні результати:

з боку високої напруги (110 кВ)

- струм короткого замикання $I_{K31} = 1$ кА;
- ударний струм $I_{уд1} = 2,34$ кА.

з боку низької напруги (10 кВ)

- струм короткого замикання $I_{K32} = 3668,65$;
- ударний струм $I_{уд2} = 8,301$ кА.

Також було детально розглянуто проблему впливу гармонічних спотворень на якість електроенергії та джерела їх виникнення. Показаний негативний вплив таких спотворень на обладнання підстанцій та споживачів електроенергії. Було проведено огляд засобів та методів запобігання впливу гармонічних спотворень таких як синхронний компенсатор, пасивні та активні фільтри різних типів, гібридні фільтри.

При цьому було зазначено, що для оцінки рівня загальних гармонічних спотворень використовується коефіцієнт нелінійних спотворень THD. За стандартами [2] він не має перевищувати 5% задля підтримання нормальної роботи електроенергетичного устаткування та різноманітного обладнання споживачів, а для нормальної роботи енергомережі не має перевищувати 8%.

Дослідження на основі комп'ютерного моделювання показало, що використання каскаду пасивних фільтрів є ефективним засобом для зниження рівня гармонічних спотворень. Було проведено дослідження на створеній моделі підстанції, яке продемонструвало значне зменшення рівня коефіцієнту нелінійних спотворень THD після впровадження каскаду

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
						67
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

пасивних фільтрів. Зокрема, з використанням каскаду фільтрів загальний коефіцієнт THD за напругою зменшився майже в 11 разів (з 17,09% без фільтрації до 1,47% із застосуванням фільтрів), а коефіцієнт THD за струмом зменшився майже в 6 разів (з 9,84% без фільтрації до 1,77% із застосуванням фільтрів). Отриманий рівень коефіцієнту нелінійних спотворень після фільтрації задовольняє вимогам стандартів якості електроенергії [1].

За результатами, отриманими в ході виконання дипломної роботи можна зробити наступні висновки.

Каскад пасивних фільтрів значно знижує рівень гармонічних спотворень у мережі, що позитивно впливає на роботу обладнання підстанції 110/10 кВ, зменшуючи ризик його пошкодження та підвищуючи надійність роботи.

Зниження рівня THD до прийнятного рівня сприяє підвищенню якості електроенергії, що позитивно позначається на всій системі електропостачання та зменшує втрати в мережі.

Також можна відмітити, що хоча впровадження пасивних фільтрів вимагає початкових інвестицій, довгострокова економія на обслуговуванні та підвищення ефективності роботи системи електропостачання можуть зробити цей підхід економічно вигідним. А крім того, застосування пасивних фільтрів знижує витрати на обслуговування та ремонт обладнання, адже зменшується ризик його передчасного зносу та виникнення передаварійних та аварійних ситуацій.

На основі проведених досліджень можна рекомендувати впровадження каскаду пасивних фільтрів як ефективний засіб захисту обладнання підстанцій 110/10 кВ від гармонічних спотворень. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію параметрів фільтрів та інтеграцію їх з активними методами компенсації гармонічних спотворень для досягнення ще більш високої ефективності.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT): ДСТУ EN 50160:2023 – [Чинний від 2023-12-04].
2. 519-1992-IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE 519-2014 – The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: New York, NY, USA, – 1993
3. Кодекс системи передачі. Постанова НКРЕКП № 309 від 14.03.2018 – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text>.
4. Трансформатори силові. Терміни та визначення: ДСТУ 3270-95 – [Чинний від 1996-07-01].
5. Електричні мережі та системи: Конспект лекцій / С. П. Шевчук, О. В. Мейта. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 167 с.
6. Апарати електричні комутаційні. Основні поняття. Терміни та визначення: ДСТУ 2848-94 – [Чинний від 1996-01-01].
7. Електричні і магнітні кола та пристрої. Терміни та визначення: ДСТУ 2815-94 – [Чинний від 1996-01-01].
8. Розрахунок струмів короткого замикання. [Електронний ресурс] – Режим доступу URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fceem/9kulyk_modelyuvannya_zadachah_rozvytku_elektrsystem/4_2.htm
9. Das J. C. Passive filters – potentialities and limitations, IEEE Trans. Ind. Appl. 40. – 2004. – Pp. 829.
10. Батрак Л. М. Енергоефективне управління паралельним активним фільтром трифазної чотирипровідної системи живлення: дис. канд. тех. наук: 05.09.12 / Батрак Лариса Миколаївна. – К., 2016. – 176с.
11. Moran, L. Using active power filters to improve power quality / L. Moran, J. Dixon, J. Espinoza, R. Wallace // 5th Brazilian Power Electronics Conference COBER, 1999. – С 108-110.

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		69

12. Сегеда М. С. Режими систем пересилання та споживання електричної енергії / Сегеда М. С., Олійник М. Й., Лисяк В. Г. – Л.: Львівська політехніка, 2021 – 304 с.
13. Бабак В. П. Сигнали і спектри / Бабак В. П., Білецький А.Я., Гуржій А. Н. – К.: НАУ, 2005. – 490 с.
14. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
15. С.С. Забара. Характеристики Моделювання систем у середовищі MATLAB / Забара С.С., Гагарін О.О., Кузьменко І.М., Щербашин Ю.Д. – К.: Университет Украина, 2011. – 137 с.
16. Поліщук С. Й., Артеменко М. Ю., Михальський В. М., Шаповал І. А., Батрак Л. М. Стратегія керування паралельним активним фільтром з частковим послабленням складової нульової послідовності напруг трифазної чотирипровідної мережі // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 12-19.
17. Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітичні матеріали в 2-х т. Т.2: Механізми реалізації політики енергозбереження. /За ред. В. А. Жовтянського, М. М.Кулика, Б. С.Стогнія. – К.: Академперіодика, 2006. – 600 с.
18. Akagi H., Kanazawa Y., Nabai A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits // Proceeding of Int. Power Electronics Conf. – Tokyo (Japan). – 1983. – Pp. 1375-1386.
19. Akagi H. Active harmonic filters / Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93. – No. 12. – Pp. 2128–2141.
20. Herrera R.S., Salmeron P. Instantaneous reactive power theory: A Comparative Evaluation of different formulations // IEEE Trans. Power Delivery. – 2007. – Vol. 22. – No 1. – Pp. 595–604.

21. Herrera Reyes S., Salmeron P. Instantaneous Reactive Power Theory: A Reference in the Nonlinear Loads Compensation // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – 2009. – Vol. 56. – No. 6. – Pp. 2015–2022.

					141.ЕК0118.009.ДБ	Арк.
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		71