

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Кафедра Інтелектуальні системи електропостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

В.о. завідувача кафедри

_____ /Д. О. Босий/
«_____» _____ 20____р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Зниження вищих гармонійних складових на тягових підстанціях постійного струму**

Theme **Reduction of higher harmonic components at DC traction substations**

Керівник дипломної роботи проф. _____ Д. О. Босий

Нормоконтролер доц. _____ В. М. Ляшук

Студентка групи ЕС1926 _____ Х. І. Тижбір

Student Tyzhbir Khrystyna

Дніпро – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Факультет «Управління енергетичними процесами»
Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»
Галузь 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Спеціалізація Електротехнічні системи електроспоживання

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зав. кафедри
Сиченко В.Г.
(підпис)
«20» січня 2020р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

студента групи ЕС1926Тижбір Х.І.

(номер групи)

(ПІБ)

1. Тема дипломного проекту (роботи): **«Зниження вищих гармонійних складових на тягових підстанціях постійного струму».**

затверджена наказом по університету від «17» січня 2020 р. № 53ст.

2. Термін подання студентом закінченої роботи: «7» грудня 2020р.

3. Вихідні дані до дипломного проекту (роботи):

параметри розрахункової міжпідстанційної зони, тип перетворювальних трансформаторів, тип випрямлячів, тип реактору.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки):

4.1 Джерело гармонік в системах електропостачання постійного струму

4.2 Дослідження роботи випрямлячів тягових підстанцій

4.3 Моделювання випрямних перетворювачів підстанцій постійного струму в системі Matlab.

4.4 Аналіз застосування сучасних фільтрів вищих гармонік для зниження вищих гармонійних складових

5. Перелік креслень (демонстраційного матеріалу):

5.1 Аналіз впливу вищих гармонік

5.2 Схеми випрямних агрегатів тягових підстанцій

5.3 Модель 6-пульсового випрямного перетворювача в системі Matlab

5.4 Модель 12-пульсового випрямного перетворювача в системі Matlab

5.5 Модель згладжуючих фільтрів тягової підстанції

5.6 Результати моделювання для різних схем випрямлення

5.7 Аналіз роботи фільтрів вищих гармонік

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Термін виконання	Обсяг розділу, %
Вступ	09.09	5
Джерело гармонік в системах електропостачання постійного струму	21.10	15
Джерело гармонік в системах електропостачання постійного струму	11.11	20
Моделювання випрямних перетворювачів підстанцій постійного струму в системі Matlab	20.11	25
Аналіз застосування сучасних фільтрів вищих гармонік для зниження вищих гармонійних складових	27.11	25
Висновки	05.12	5
Список використаних джерел	07.12	5

Дата видачі завдання: «20» січня 2020р.

Керівник дипломної роботи

(підпис)

професор Босий Д.О.

(ПБ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Тижбір Х.І.

(ПБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 86 сторінок, складається з 4 розділів, та містить 39 ілюстрацій, 3 таблиці, 17 бібліографічних джерел.

У даній роботі розглядається проблема зниження вищих гармонік, що виникла у зв'язку з застосуванням напівпровідникової перетворювальної техніки з нелінійною вольт-амперною характеристикою.

При випрямному навантаженні виходить спотворення, тобто відмінна від синусоїдальної, форми кривої споживаного струму. Ця спотворена форма кривої споживаного струму може бути представлена як сума ряду синусоїдальних кривих, що складається з основної синусоїди і вищих гармонійних синусоїд, що мають частоти, в кратне число раз перевищуючі частоту основної синусоїди. Падіння напруги, обумовлені цими струмами, викликають спотворення кривої напруги живлення. А це веде до погіршення показників якості електроенергії.

В роботі проведено аналіз погіршення показників якості електроенергії при появі вищих гармонік напруги та струму.

У ході виконання роботи, були проведено дослідження роботи випрямлячів тягових підстанцій постійного струму та визначено оцінку можливої появи та рівня вищих гармонійних складових.

Пр о в е д е н о моделювання випрямних перетворювачів підстанцій постійного струму в системі Matlab. За допомогою розроблених моделей проведено імітацію роботи різних типів випрямних перетворювачів тягових підстанцій за наявності фільтрів вищих гармонік та без них. На основі аналізу зроблено висновки про можливість застосування сучасних фільтрів вищих гармонік для зниження вищих гармонійних складових.

Ключові слова: ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ГАРМОНІКИ СТРУМУ, ГАРМОНІКИ НАПРУГИ, ВИПРЯМЛЯЧ, СХЕМА ВИПРЯМЛЕННЯ, ФІЛЬТР ВИЩИХ ГАРМОНІК.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ДЖЕРЕЛА ГАРМОНІК В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	10
2. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВИПРЯМЛЯЧІВ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ	22
2.1. Схеми випрямних агрегатів тягових підстанцій	22
2.2. Застосування схеми дванадцятипульсового випрямного агрегату в системі тягового електропостачання	27
2.3 Вищі гармонійні складові при роботі випрямного пристрою	34
2.4 Оцінка можливого рівня вищих гармонійних складових	38
2.5 Порівняння схем випрямлення трифазного струму	40
3. МОДЕЛЮВАННЯ ВИПРЯМНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПІДСТАНЦІЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В СИСТЕМІ MATLAB	43
3.1 Загальні відомості про систему MATLAB	43
3.2 Моделювання електротехнічних пристроїв у системі MATLAB пакеті розширення Simulink	47
3.3 Випрямні перетворювачі в системі тягового електропостачання	52
3.4 Модель 6-пульсного випрямного перетворювача	55
3.5 Модель 12-пульсного випрямного перетворювача	62
4. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ФІЛЬТРІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІЙНИХ СКЛАДОВИХ	65
4.1 Проведення моделювання випрямних перетворювачів в діапазоні робочих струмів тягової підстанції	65
4.2 Результати моделювання для симетричного живлення мережі	70
4.3 Результати моделювання для несиметричного живлення мережі	73
ВИСНОВОК.....	84
СПИСОК ВИКОРОСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	85

					02.15.EC1926.РД.2020–ПЗ			
З	Ар	№ докум.	Підпи	Да				
Розробник	К.	Тижбір Х.	с	та				
М								
Керівн		Босий Д.						
Н. контр		Данилюк Д.						

Зниження вищих гармонійних складових на			Підп.	Арх.	Архивів
02.15.EC1926.РД.2020–ПЗ			ПЗ		86
ДНУЗТ, ICE, гр. EC1926					

ВСТУП

Актуальність роботи

Транспортні мережі, що зв'язують між собою промислові центри, міста і населені пункти грають велику роль в нормальному функціонуванні і розвитку народного господарства нашої країни. Нині в Україні основний об'єм вантажоперевезень здійснює залізничний транспорт. Це пов'язано з простотою і дешевизною його експлуатації, швидким самоокуповуванням і універсальністю в плані різноманітності вантажів, що перевозяться. Застосування електричної тяги на залізничному транспорті і розвиток техніки в цьому напрямі ще більше здешевили та спростили експлуатацію і обслуговування залізничних магістралей. Проте існує ряд проблем при експлуатації електричної тяги.

Проблема якості електричної енергії в системах електропостачання продовжує залишатися однією з найважливіших, яка визначає надійність і ефективність електропостачання споживачів. Однією з основних її складових частин є проблема наявності вищих гармонік в напрузі мережі.

Одним з основних пристроїв на тягових підстанціях постійного струму являється випрямний агрегат, що складається із тягового трансформатора, випрямляча та згладжуючого пристрою (фільтра). Наявність вентильних перетворювачів приводить до появи нелінійних спотворень кривої напруги мережі або, іншими словами, несинусоїдальних режимів.

Несинусоїдні режими несприятливо позначаються на роботі силового електрообладнання, систем релейного захисту, автоматики, телемеханіки і зв'язку. Виникаючі в результаті вищі гармоніки негативно позначаються на показниках якості електроенергії. Економічні збитки обумовлені головним чином погіршенням енергетичних показників, зниженням надійності функціонування електричних мереж і скороченням терміну служби електроустаткування.

Зниження рівня вищих гармонік в електричних мережах є важливою частиною проблеми підвищення якості електричної енергії.

Через це випрямні перетворювачі повинні піддаватись дослідженням для їх вдосконалення, аналізу роботи та можливості покращення їх характеристик.

Крива випрямленої напруги багатопульсових перетворювачів, особливо з урахуванням несиметричних режимів роботи, має складну форму і аналітично записується сукупністю диференціальних рівнянь по окремих інтервалах періоду кривої напруги живлення. У загальному вигляді формули для визначення вищих гармонійних в кривій випрямленої напруги, записані у вигляді коефіцієнтів Ейлера ряду Фур'є, мають досить громіздкий вигляд і вимагають використання сучасної обчислювальної техніки. З метою зниження трудомісткості цих розрахунків розроблено спрощену методику по визначенню вищих гармонійних випрямленої напруги багатофазних перетворювачів.

Аналіз і розробку будь-яких складних пристроїв здійснюють за допомогою моделей. При рішенні задач, зокрема електропостачання, варто враховувати складність конкретних виробничих ситуацій. Це найкращим чином забезпечується проведенням експериментів в реальних умовах. Але деякі завдання, які не допускають експериментів, оскільки можна допустити аварію, перевантаження та інші відхилення від нормальних режимів роботи. Тому при дослідженні будь-яких об'єктів і систем широко використовується математичне моделювання.

Моделювання можна розглядати як заміщення досліджуваного об'єкта його умовним образом, описом або іншим об'єктом, іменованим моделлю й, що забезпечує адекватне з оригіналом поведіння в рамках деяких допущень і прийнятих похибок. Моделювання звичайно виконується з метою пізнання властивостей оригіналу, шляхом дослідження його моделі, а не самого об'єкта. Зрозуміло, моделювання виправдане в тому випадку, коли воно простіше створення самого оригіналу або коли останній з якихось причин краще взагалі не створювати.

Складання моделей за допомогою математичного моделювання та їх розрахунок на ЕОМ набуває все більшої актуальності.

У даній роботі розроблені моделі випрямних перетворювачів та сучасних фільтрів вищих гармонік підстанцій постійного струму за допомогою системи MATLAB+Simulink, проведене моделювання роботи при наявності несиметричного живлення, при відключеному та підключеному згладжуючому пристрої для аналізу можливості зниження вищих гармонійних складових на тяговій підстанції постійного струму.

Зв'язок роботи з науковими програмами

Робота відповідає науковим напрямам роботи кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Мета і завдання роботи – аналіз можливості зниження вищих гармонійних складових на тяговій підстанції постійного струму.

Відповідно до поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати джерело гармонік в системах електропостачання постійного струму;
- провести дослідження роботи випрямлячів тягових підстанцій;
- виконати моделювання випрямних перетворювачів підстанцій постійного струму в системі Matlab;
- провести аналіз застосування сучасних фільтрів вищих гармонік для зниження вищих гармонійних складових.

Об'єкт дослідження – тягова підстанція.

Предмет дослідження – випрямні перетворювачі та згладжуючі фільтри тягових підстанцій.

Методи дослідження. Основні теоретичні положення магістерської роботи отримані за допомогою математичного моделювання.

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист.

1. Отримані нові моделі випрямних перетворювачів та фільтрів вищих гармонік підстанцій постійного струму в системі Matlab.
2. Виконано розрахунки, проведено моделювання та зроблено висновки про можливість застосування сучасних фільтрів вищих гармонік для зниження вищих гармонійних складових.

Практичне значення отриманих результатів: запропоновані моделі випрямних перетворювачів та фільтрів вищих гармонік тягових підстанцій можуть бути використані при проектуванні підстанцій.

Особистий внесок здобувача

Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження отримані здобувачем самостійно.

Апробація результатів магістерської роботи

Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на X-ій науково-практичній конференції «Проблеми безпеки на транспорті» (Гомель, 26-27 листопада 2020р.)

Публікації

Босый Д.А., Тижбир Х.І., «Снижение высших гармонических составляющих на тяговой подстанции постоянного тока» [Текст] / Проблемы безопасности на транспорте: материалы X Междунар. Науч.-практ. Конф. (Гомель, 26-27 ноября, 2020г.): в 5ч. Ч.5 / М-во трансп. И коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж.д. Белорус. гос.ун-т трансп.; под общ. Ред. Ю. И. Кулаженко.- Гомель:БелГУТ, 2020.-229 с. ISBN 978-985-554-946-9 (ч. 5)

1. ДЖЕРЕЛО ГАРМОНІК В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Всі електроприймачі проектуються і виготовляються з розрахунку на певні номінальні електричні параметри: частоту, напругу, струм і т.д. При цьому передбачається що підведена напруга змінного струму синусоїдальна і для трифазних систем симетрична. В основі проектування електроприймачів лежить вимога забезпечення їх найекономнішої роботи саме при номінальних параметрах.

Якість електроенергії на виході з електростанцій достатньо висока, але в процесі її передачі по мережі і споживання вона погіршується.

По-перше, внаслідок втрат напруги в мережі значення її у споживача зменшується; по-друге, в результаті впливу ряду специфічних електроприймачів і перетворювачів електроенергії виникають несиметрія та несинусоїдність напруги [1].

Дуже важливо підтримувати рівень напруги, що підводиться до споживачів електроенергії, в певних межах. Для цього проводять різні заходи для компенсації і зниження втрат напруги в електричних мережах живлячої енергосистеми які дозволяють забезпечити при змінах її навантаження достатньо стабільний рівень напруги на приєднаних до енергосистеми електроустановках. Ці заходи проводять як в самій системі, так і в установках, приєднаних до неї споживачів зокрема в пристроях електричної тяги.

Характерною особливістю роботи електроспоживачів є вплив їх на якість електроенергії живильних мереж. У свою чергу нормальна робота електрообладнання залежить від якості електроенергії живильної системи. Такий взаємний вплив електрообладнання і живильної системи визначають терміном "електромагнітна сумісність".

Вирішення проблеми електромагнітної сумісності пов'язано з визначенням і підтримкою оптимальних показників якості електроенергії, при яких виконуються технічні вимоги з мінімальними витратами.

При розробці нових приймачів електроенергії необхідно враховувати той негативний вплив, який вони можуть чинити на живлячу електричну мережу. При оцінці повинні прийматися в увагу додаткові пристрої, що запобігають погіршенню якості електричної енергії. Необхідні норми якості електричної енергії можуть бути досягнуті вже на стадії проектування електропостачання підприємств шляхом відповідних розрахунків і застосування технічних засобів.

Сучасна промисловість і сфера послуг сьогодні не можуть обійтися без різноманітних напівпровідникових пристроїв. Даний список складається з побутових приладів, вентильних перетворювачів, зварювальних апаратів, електродвигунів і т. п. Всі ці пристрої є досить сильними джерелами електромагнітних перешкод. Наприклад целюлозно-паперова промисловість характеризується тільки відхиленням напруги. А ось машинобудівні підприємства, що використовують потужні зварювальні апарати, впливають на якість електроенергії набагато сильніше. Тут присутні коливання, відхилення і несиметрія напруги. Несинусоїдність також є поширеним явищем на металургійних підприємствах і тягових підстанціях залізничного транспорту. Низька якість електроенергії пов'язана зі значним економічним збитком, який складається з електромагнітних і технологічних складових. Перша група характеризується зменшенням експлуатаційного терміну ізоляції електричного обладнання. Причиною того є електричне та теплове старіння ізоляції. Друга – впливом якості електроенергії на технологічні установки та їх продуктивність. Це безпосередньо пов'язано із собівартістю виробленого продукту. Саме тому кількісний аналіз надійності електрообладнання при зниженій якості електричної енергії є таким важливим.

Проблема несинусоїдності - проблема вищих гармонік - виникла в останній час у зв'язку з застосуванням потужних електроприймачів з нелінійною вольт-амперною характеристикою, таких, як електрозварювання, дугові сталеплавильні печі, некеровані і, особливо, керовані вентильні перетворювачі. В даний час проблема вищих гармонік є однією з важливих частин загальної

проблеми електромагнітної сумісності приймачів електроенергії з живильної електричної мережею.

В електричних мережах із значною питомою вагою вентильних перетворювачів несинусоїдність форми кривої напруги може значно перевищувати нормовані стандартом межі.

В даний час основними джерелами гармонік струму є некеровані та керовані випрямлячі та інвертори з фазовим керуванням. Всі вони поділяються на три групи: 1) потужні перетворювачі, що можуть бути використані, наприклад, в металургії та для передачі постійного струму високої напруги; 2) перетворювачі середньої потужності, подібні тим, що використовуються в промисловості для керування електродвигунами та на залізниці; 3) малопотужні перетворювачі однофазних пристроїв, таких як телевізори, комп'ютери та пристрої підзарядки батарей і т.п [2].

Якщо говорити про джерела вищих гармонік, то ними можуть бути не тільки споживачі, але і джерела живлення. При цьому синхронні генератори є джерелами лише невеликої частки вищих гармонік, тому ними часто нехтують. Спотворення ж, що генеруються споживачами, які мають нелінійну вольт-амперну характеристику, ігнорувати не можна. Список споживачів, які мають найбільший вплив на синусоїду, складається з: вентильних перетворювачів; перетворювачів частот; печей (індукційних, дугових сталеплавильних і т. п.); електричних двигунів та трансформаторів; електрозварювальних установок; газорозрядних ламп [3]. Вентильним перетворювачам відводиться роль досить сильних джерел вищих гармонік.

Перетворювальні установки, перетворюють змінний струм в постійний за допомогою випрямлячів. Випрямні установки знайшли широке застосування в промисловості і на залізничному транспорті. Залізничний транспорт в нашій країні майже повністю електрифікований, причому значна частина залізниць використовує постійний струм перетворювальних установок.

Перетворювальні установки мають дуже великий вплив на якість електроенергії в системах електропостачання. Інтенсивний розвиток силової напівпровідникової перетворювальної техніки та її використання в тиристорних електроприводах змінного і постійного струму, вентильних перетворювачах для електротехнічних установок різного призначення призвело до погіршення показників якості електроенергії, передбачених стандартом, а також до зниження природного коефіцієнта потужності в мережах промислового електропостачання.

При всій своїй прогресивності та технологічній ефективності тиристорні перетворювачі є одними з головних порушників якості електроенергії в мережі живлення, тобто існує проблема електромагнітної сумісності з мережею живлення. Це пояснюється тим, що всі зміни режиму роботи перетворювальних установок прямо передаються в живильну електричну мережу.

Особливо помітно це виявляється в коливаннях напруги і частоти живильної електричної мережі. Це обумовлюється різкою зміною як активної (коливання частоти), так і реактивної (коливання напруги) потужності. Крім того, робота установок супроводжується великими спотвореннями напруги, що відбуваються із-за комутації вентилів.

При випрямному навантаженні виходить спотворення, тобто відмінна від синусоїдальної, форма кривої споживаного струму. Ця спотворена форма кривої споживаного струму може бути представлена як сума ряду синусоїдальних кривих, що складається з основної синусоїди (50 Гц) і вищих гармонійних синусоїд, що мають частоти, в кратне число раз перевищуючі частоту основної синусоїди. Ці складові називають вищими гармоніками струму і привласнюють їм номер, який вказує в скільки разів частота даної вищої гармоніки струму більше частоти основної синусоїди.

Струми, що споживаються з мережі вентильними перетворювачами, мають зазвичай спотворену форму, а основна гармоніка струму зрушена по фазі убік відставання по відношенню до напруги живлення. Це означає, що в мережі з'являються вищі гармоніки струму і, крім того, з мережі споживається реактивна

потужність. Це веде до зростання втрат електроенергії в мережі живлення і до погіршення якості енергії, що підводиться до інших споживачів. На додаток до цього в потужних пристроях з швидкою зміною кута затримки клапанів (наприклад, в перетворювачах) виникають великі короткочасні накиди реактивної потужності, які несприятливо впливають на інших споживачів.

Несинусоїдний струм в опорі живильної мережі створює несинусоїдальні падіння напруги так, що навіть при синусоїдальній ЕРС джерела енергії в мережі з випрямної навантаженням мають місце несинусоїдальні струми і напруги. Таким чином, навантаження споживає з мережі спотворений струм, до складу якого входять гармоніки з частотами, що перевищують основну частоту. Падіння напруги, обумовлені цими струмами, викликають спотворення кривої напруги живлення, що веде до додаткових втрат переданої потужності, може порушити роботу інших приймачів, створює небезпеку виникнення резонансу і перевантаження ланцюгів, що містять ємності. Тому випрямні навантаження можна розглядати як генератор вищих гармонійних напруги. Вищесказане пояснює необхідність застосування пристроїв, що протидіють спотворення струму, що споживається з мережі.

Вентильні перетворювачі роблять все більш сильний негативний вплив на якість напруги в живильній мережі в зв'язку з розширенням їх застосування і збільшенням одиничної потужності. Це пояснюється тим, що перетворювачі, в особливості регульовані, за рахунок зсуву першої гармоніки струму відносно напруги споживають значну реактивну потужність, часто з дуже нерівномірним тимчасовим графіком, а за рахунок вищих гармонік споживаного струму є джерелами сильних спотворень кривої напруги мережі. Обидва цих чинника, крім того, викликають додаткові втрати потужності в живильній мережі [4]. Тому проблема поліпшення коефіцієнта потужності перетворювачів належить до однієї з найбільш актуальних у сучасній перетворювальній техніці та електроенергетиці.

Поряд з широко відомими перевагами (порівняльна простота регулювання, зручність експлуатації, а також невеликі втрати потужності) керовані вентильні випрямлячі мають ряд серйозних недоліків, основним з яких є низький коефіцієнт потужності при глибокому регулюванні випрямленої напруги. Споживання реактивної потужності перетворювальними агрегатами обумовлено в основному двома причинами: природним комутаційним процесом і штучної затримкою моменту відкриття вентиля в цілях регулювання випрямленої напруги. Саме ці фактори створюють зсув струму в ланцюгах вентилів щодо напруги, знижують коефіцієнт потужності в мережах, що живлять випрямлячі, підвищують споживання реактивної потужності та приводять до погіршення форми кривої напруги.

Випрямлячі електрорухомого складу змінного струму є споживачами реактивної потужності, яка обумовлюється процесом комутації струму у вентилях, спотворенням форми кривої первинного струму, струмом трансформатора, що намагнічує, а також кутом регулювання керованих випрямлячів.

Вищі гармоніки струму, потрапляючи в проводи лінії електропередачі живлячої енергосистеми, викликають дію, що негативно впливає, на пристрої дротяного зв'язку в результаті електромагнітної індукції а також приводить до збільшення втрат активної потужності в пристроях електропостачання. Крім того, вищі гармонійні складові струму викликають додатковий нагрів генераторів електростанцій живлячої системи.

Через несиметрію струму навантаження і проходження вищих гармонік струму в живлячій електричній мережі виникають додаткові втрати напруги, які приводять до несиметрії та спотворення форми кривої напруги, що підводиться до електроустановок які отримують живлення від даної енергосистеми. Несиметрія і спотворення форми кривої напруги викликають збільшення нагріву асинхронних і синхронних електродвигунів, а також синхронних компенсаторів що у ряді випадків може приводити до необхідності збільшення їх встановленої

потужності. Величина несиметрії напруги, створюваним тяговим навантаженням, залежать від співвідношення навантажень на окремих ділянках тягової мережі які отримують живлення від різних фаз трифазної електричної мережі, і постійно застосовується в процесі роботи електрифікованої лінії.

Таким чином, перетворювальні агрегати є великими споживачами реактивної потужності, режим споживання яких має особливості, пов'язані з нелінійністю та нестабільністю параметрів навантаження. В умовах зростаючого використання вентильних перетворювачів зазначені їх недоліки супроводжуються відчутним техніко-економічним збитком.

Як і багато інших форм спотворень, гармоніки впливають на всі види електричного обладнання, що знаходиться на досить великій відстані від місця генерації гармонік. Найчастіше в трифазних розподільчих мережах зустрічаються непарні гармоніки. Зі збільшенням частоти амплітуди гармонік, зазвичай, зменшуються. Гармоніки вище 50-го порядку мають незначну амплітуду, тому їх вимірювання не мають сенсу. Достатньо точні результати можна отримати при вимірюванні гармонік до 30-го порядку. Підприємства-постачальники електричної енергії контролюють вміст 3, 5, 7, 11 та 13-ої гармонік у мережах живлення [5]. В цілому, достатнім є усунення гармонік нижчих порядків (до 13-го). При більш ретельному контролі враховуються гармоніки до 25-ої включно. Водночас проблема компенсації реактивної потужності завжди займала важливе місце в загальному комплексі питань підвищення ефективності передачі, розподілу та споживання електричної енергії. Правильне вирішення таких завдань значною мірою зумовлює економію грошових і матеріальних ресурсів, підвищення якості електропостачання. Одним із ефективних шляхів зменшення перетоків реактивної потужності та навіть усунення їх повністю, є використання секцій конденсаторних батарей, які встановлюються безпосередньо в місцях споживання реактивної потужності. Обмін енергією, в даному випадку, буде відбуватися між індуктивністю та ємністю кола. Між індуктивністю та джерелом енергії буде відбуватися обмін

лише некомпенсованою частиною енергії. Забруднення мереж вищими гармоніками небезпечно, зокрема, для конденсаторних батарей тим, що існує небезпека виникнення паралельного резонансу в коливальному контурі, створеному ємністю батареї та індуктивністю споживача (мережі), що, в свою чергу, може призвести до виходу з ладу обладнання керування та захисту конденсаторних батарей та всієї компенсаційної установки.

Вищі гармоніки спричиняють негативний вплив на технологічний процес. При проходженні струмів вищих гармонік по елементах системи електропостачання виникають додаткові втрати активної потужності та електроенергії. Найбільші додаткові втрати активної потужності мають місце в трансформаторах, двигунах і генераторах. У ряді випадків ці втрати можуть привести до неприпустимого перегріву обмоток електричних машин і у всіх випадках призводять до додаткових втрат електричної енергії.

Вищі гармоніки напруги скорочують експлуатаційний термін ізоляції трансформаторів та сприяють збільшенню втрат, які пов'язані з виникненням вихрових струмів в сталі. Крім цього, страждає від таких гармонік і обмотка, і гістерезис. Що стосується перетворювальних трансформаторів, то тут найважливішу роль відіграють втрати в обмотці. Ще одна проблема пов'язана з місцевими перегрівами баків трансформаторів. Негативний аспект впливу гармонік на потужні трансформатори полягає в циркуляції потроєного струму нульової послідовності в обмотках, з'єднаних в трикутник. Це може привести до їх перевантаження.

При наявності гармонік в кривій напруги процес старіння ізоляції протікає більш інтенсивно, що пояснюється прискоренням при високих частотах електричного поля фізико-хімічних процесів в діелектриках, що обумовлюють їх старіння.

Спотворення форми кривої напруги помітно позначається на виникненні і протіканні іонізаційних процесів в ізоляції електричних машин і трансформаторів. За наявності газових включень в ізоляції виникає іонізація,

суть якої полягає в утворенні об'ємних зарядів і подальшої нейтралізації їх. Нейтралізація зарядів пов'язана з розсіянням енергії, наслідком якого є електрична, механічна і хімічна дія на навколишній діелектрик, в результаті розвиваються місцеві дефекти в ізоляції, що призводить до зниження її електричної міцності, зростанню діелектричних втрат і кінець кінцем до скорочення терміну служби. Кількість розрядів в газових включеннях залежить від форми кривої напруги, прикладеної до ізоляції [6].

Вищі гармоніки струму і напруги впливають на похибки електровимірювальних приладів. В практиці експлуатації істотне значення має збільшення похибок індукційних лічильників активної і реактивної енергії. У більшості випадків ці прилади при несинусоїдних напругах і струмах мають досить велику похибку, яка може досягати 10%. Значення цих похибок істотно позначаються при обліку споживання електричної енергії.

Вищі гармоніки, які сприяють збільшенню піку напруги, часто стають причиною різних перешкод та негативно впливають на вимір потужності і енергії. Процес калібрування вимірювального обладнання, як правило, відбувається при напрузі, синусоїда якого позбавлена електромагнітних перешкод, оскільки наявність вищих гармонік може збільшити його похибку. Найважливішими показниками при цьому є напрямок і розміри вищих гармонік, адже саме від них і буде залежати розмір похибки.

При великих спотвореннях напруги і переважанні 5-13-й гармонік струмів позитивні погрішності виміру енергії, споживаної перетворювачами тиристорів, можуть досягати 3...4%. Більшою мірою вплив несинусоїдальності на похибки індукційних лічильників виявляється на частотах 11-ої та 13-ої гармонік [7].

Необхідність точних вимірювань може бути задоволена установкою дорогих високоякісних лічильників. Реактивна потужність також опиняється під впливом вищих гармонік, які можуть зробити результати її вимірювання некоректними. Дана величина може бути визначена тільки в випадках з синусоїдальними напругами і струмами. Крім цього, гармоніки спотворюють і

результати вимірювань коефіцієнтів потужності. При цьому вплив вищих гармонік на калібрування та повірку лабораторних приладів згадується досить рідко, проте дане питання має також дуже важливий характер.

Наявність вищих гармонік ускладнює і в ряді випадків робить неможливим використання силових ланцюгів в якості каналів для передачі інформації. Вищі гармоніки погіршують роботу телемеханічних пристроїв, викликають збої в їх роботі, якщо силові ланцюги використовуються в якості каналів зв'язку.

Несинусоїдність форми кривої напруги негативно позначається і на роботі вентильних перетворювачів, погіршуючи якість випрямлення струму. На частотах вище 1000 Гц в системах електропостачання можливі резонансні явища, які значно збільшують діючі значення напруг гармонік резонансних частот.

Таким чином, наявність високого рівня гармонічних складових у системі електропостачання залізниці призводить до таких негативних явищ:

- 1) появи додаткових втрат активної потужності і електроенергії в елементах мережі;
- 2) зниження коефіцієнта потужності;
- 3) обмеження області застосування конденсаторних батарей внаслідок можливості появи резонансних або близьких до них режимів на частотах вищих гармонік;
- 4) прискорення старіння ізоляції електрообладнання;
- 5) появи вищих гармонік струму в мережі випрямленої напруги;
- 6) істотного збільшення похибки лічильників для обліку активної і реактивної енергії, а також вимірників струмів і напруг;
- 7) шкідливої дії на комутацію трифазних колекторних двигунів;
- 8) неправильного дії деяких видів релейних захистів, погіршення якості, а в деяких випадках до збоїв у роботі систем контролю, автоматики, телемеханіки і зв'язку.

Обмеження несинусоїдальності напруги з найбільшою ефективністю може бути досягнуто на стадії проектування електропостачання ділянок залізниці, але вимагає додаткових витрат.

Поява збитку від вищих гармонік обумовлює необхідність зниження їх рівнів у системах електропостачання. В даний час основними заходами щодо зменшення впливу вищих гармонік напруги на елементи електроустановок є: раціональна побудова схеми електропостачання; застосування багатофазних схем випрямлення, спеціальних законів керування перетворювачами; використання резонансних фільтрів.

Одним з найбільш перспективних способів зменшення струмів і напруги вищих гармонік в мережах електропостачання є застосування силових фільтрів вищих гармонік, що представляють собою послідовне поєднання індуктивного та ємнісного опорів, налаштованих в резонанс на фільтровану гармоніку [8].

Проблема забезпечення якості електричної енергії залишається актуальною для сучасної електроенергетики як в Україні, так і далеко за її межами. Це пояснюється постійним зростанням кількості силової електроніки, що сприяє зростаючому впливу вищих гармонік струму на режим роботи промислових і побутових електроприймачів, а також на роботу обладнання систем електропостачання та електричних мереж високої напруги. Тому дослідження спектрального складу струмів, що генеруються різними нелінійними споживачами, і розробка схмотехнічних рішень, зниження викривлення кривих струму і напруги є, актуальними завданнями сучасної електроенергетики, особливо на тлі зростаючої потужності нелінійного навантаження, особливо в напівпровідникових перетворювачах.

Аналізуючи вищевикладене, можна зробити висновок, що саме прогресом в галузі силової перетворювальної техніки, який привів до більш широкого застосування в промисловому електропостачанні потужних вентильних перетворювачів та інших силових пристроїв, які мають в процесі своєї роботи нелінійні вольт-амперні характеристики, а також широке застосування

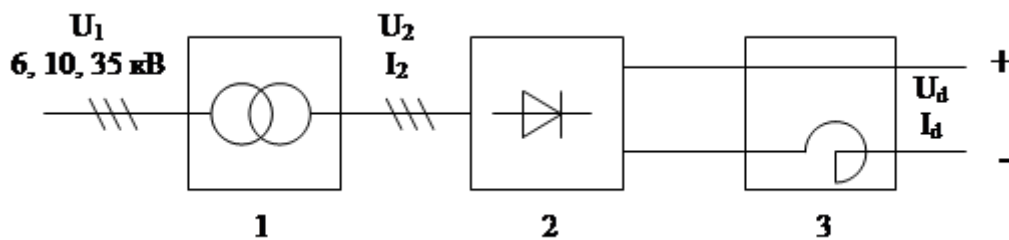
напівпровідникових перетворювачів, привело до появи потужних джерел електромагнітних перешкод. Вищеперерахована електрична техніка широко використовується в побуті, промисловості та на залізниці. Тому питома потужність, яку вона споживає, досить велика і цей показник постійно зростає з року в рік. Відповідно, збільшується і рівень електромагнітних складових струму, тому гостро постає проблема більш детального дослідження спектрального складу струму та розробки заходів щодо зменшення кількості вищих гармонічних складових струму.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВИПРЯМЛЯЧІВ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

2.1 Схеми випрямних агрегатів тягових підстанцій

Для перетворення змінного струму в постійний для живлення тягових двигунів ЕРС постійного струму застосовуються силові трифазні випрямні агрегати. Класифікація випрямних агрегатів показує особливості їх схем і застосовуваних силових напівпровідникових приладів. Розрізняють схеми із загальним проводом (нульові, «Дві зворотні зірки з зрівняльним реактором») і мостові; за кількістю пульсів випрямленої напруги – трьохпульсові, шестипульсові, дванадцятипульсові і багато пульсові (24-х, 48-ми пульсові). Випрямні агрегати також бувають некеровані (у схемі використовуються діоди) і керовані (на тиристорах) [9].

Структурна схема випрямного агрегату представлена на рис. 2.1.



1 - перетворювальний (тяговий) трансформатор; 2 - вентильний комплект;

3 - згладжувач реактор

Рисунок 2.1 – Структурна схема випрямного агрегату

Первинна обмотка перетворювального трансформатора підключається до розподільного пристрою 6, 10 або 35 кВ, а до його вторинної обмотки, напруга на якій залежить від схеми випрямляча, підключається вентильний комплект. Для згладжування пульсацій випрямленої напруги застосовується згладжувач реактор.

Робота будь-якої схеми випрямляча характеризується наступними електричними параметрами:

- середнє значення випрямленої напруги U_d ;

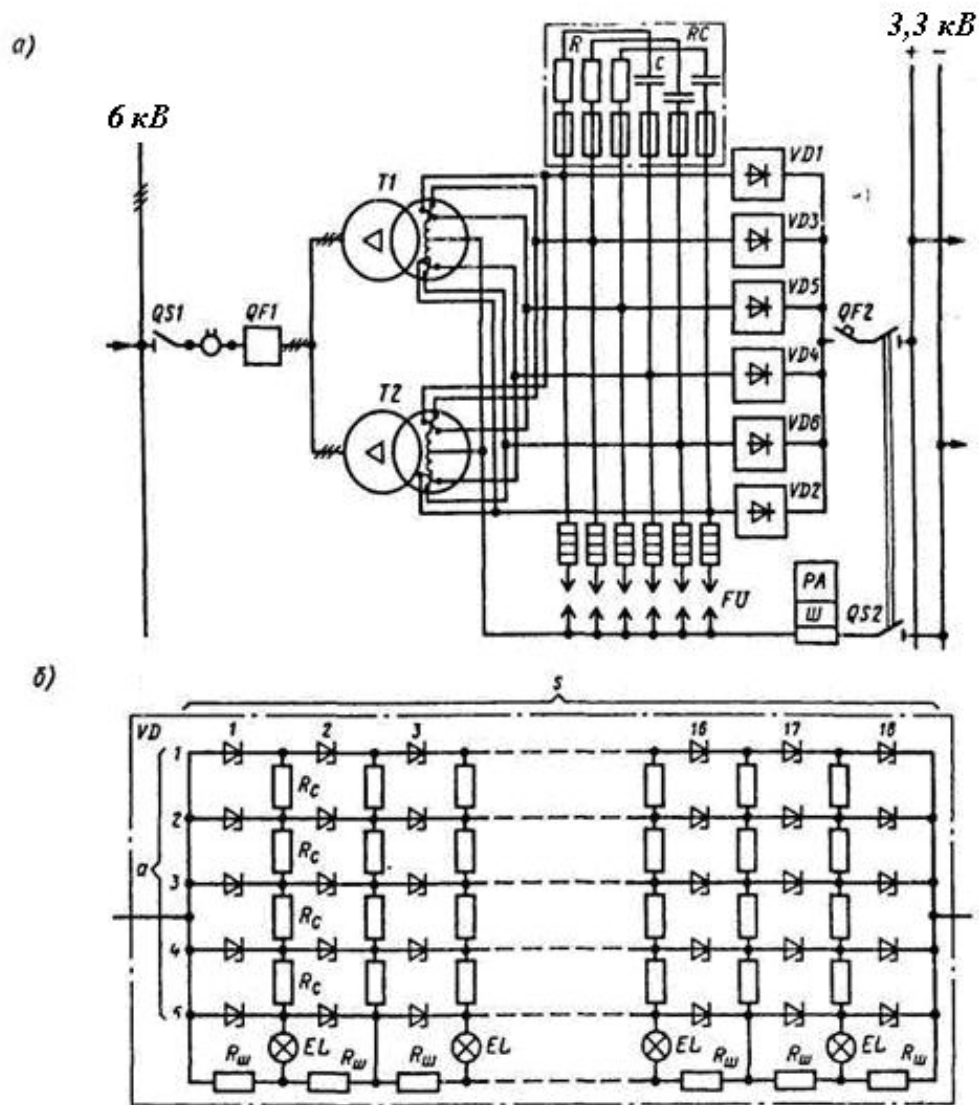
- середнє значення випрямленого струму I_d ;
- потужність випрямляча $P_d = U_d I_d$;
- діюче значення струму і напруги на вторинній обмотці трансформатора I_2, U_2 ;
- діюче значення струму і напруги на первинній обмотці трансформатора I_1, U_1 ;
- розрахункова потужність первинної, вторинної обмоток і типова потужність трансформатора S_1, S_2, S_T ;
- середній струм діода (вентильного плеча) I_a ;
- максимальна зворотна напруга на закритому діоді (вентильному плечі) U_{bmax} ;
- зовнішня характеристика випрямляча $U_d = F(I_d)$.

Розглянемо схеми випрямлячів ПВЕ-3, ТПЕД-3150.

Схема випрямляча «Дві зворотні зірки з зрівняльним реактором» була розроблена для ртутних вентилів. Ртутні вентиля можуть бути включені тільки за схемою із загальним катодом і не можуть з'єднуватися паралельно для збільшення випрямленого струму. Тому для збільшення випрямленого струму з'єднують паралельно два випрямляча через зрівняльний реактор - аналогічно індуктивному ділителю струму для паралельно з'єднаних діодів.

У схемі випрямляча використовується трифазний трансформатор, включений за схемою «зірка - дві зворотні зірки». Вторинні обмотки трансформатора утворюють дві трифазні системи, зрушені по фазі на 180° (рис.2.2).

Трифазний шестипульсовий випрямляч "дві зворотні зірки з зрівняльним реактором" ПВЕ-3 (рис. 2.2, а) виконаний на основі перетворювальних трансформаторів, що залишилися після заміни ртутних установок на напівпровідникові. Для збільшення потужності в одному агрегаті два трансформатора включені паралельно. Кожне плече випрямної установки має п'ять паралельних гілок ($a = 5$) і 18 послідовних діодів в кожній гілці ($S = 18$).



QS1 - роз'єднувач на напругу 6 кВ; QF1 - вимикач на напругу 6 кВ; T1, T2 - перетворювальні трансформатори, VD1-VD6 - діодні плечі силової схеми; ФУ - розрядники РБК-3,3; КС - шафа з RC-ланцюгами; QF2 - швидкодіючий автоматичний вимикач; QS2 - шинний роз'єднувач постійного струму на напругу 3,3 кВ, Ш - шунт вимірювальний; $a = 5$ - число паралельних гілок діодів ВЛ200-8; $S = 18$ - число послідовних діодів в одній гілці, Rш - шунтуючий резистор ПВЕ-50; Rc - резистор зв'язку; EL - лампа комутаторна КМ-3

Рисунок 2.2 – Схеми випрямляча ПВЕ-3 (а) і діодного плеча (б)

До виводів вторинних обмоток анодами під'єднані шість діодів, включених із загальним катодом. Це - позитивний полюс випрямляча.

Негативний полюс утворює загальна точка зрівняльного реактора, крайні виводи якого підключені до нульових точках вторинних обмоток трансформатора.

Застосування зрівняльного реактора забезпечує одночасну роботу обох зірок в результаті вирівнювання потенціалів на анодах двох діодів: одного в прямій і одного в зворотній зірках.

Так як діоди лавинні, то при груповому з'єднанні не використовуються ЛС-ланцюги. Застосовані тільки активні шунтуючі ланцюги Кш, загальні на п'ять паралельних гілок. Зв'язок гілок по рядах здійснюється резисторами зв'язку Rc опором 0,8 Ом. Через один ряд Rш-ланцюг з'єднується з діодами за допомогою сигнальних ламп EL, які загораються при пробіі одного з діодів в сусідніх рядах. З боку вторинних обмоток перетворювальних трансформаторів включені розрядники FU для захисту від атмосферних перенапруг і шафа RC-ланцюгів для захисту від комутаційних перенапруг. До збірних шин змінного струму напругою 6 кВ і постійного струму напругою 3,3 кВ випрямляч приєднується за допомогою роз'єднувачів QS1, QS2 і високовольтних вимикачів QF1 QF2. При надструмах перевантажень і коротких замикань спрацьовують пристрої автоматичного захисту, що впливають на відключення вимикачів.

Випрямлена напруга становить:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} \frac{U_{2m}}{2} \left(\cos \omega t + \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{3} \right) \right) d\omega t = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{2}}{2\pi} U_{2л} = 1,17U_2$$

де U_{2m} , U_2 – відповідно амплітудне і діюче значення фазної напруги вторинної обмотки трансформатора.

Середній струм діода:

$$I_a = \frac{I_d}{6}$$

Максимальна зворотна напруга на закритому діоді:

$$U_{b\max} = \sqrt{3}U_{2m} = 2,09U_d .$$

Струм у фазі вторинної обмотки:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} \left(\frac{I_d}{6}\right)^2 d\omega t} = \frac{I_d}{2\sqrt{3}} = 0,29I_d .$$

Струм у фазі первинної обмотки:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} \left(\frac{I_d}{2}\right)^2 d\omega t} = \frac{I_d}{\sqrt{6}} = 0,41I_d .$$

Типова потужність трансформатора:

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{3U_1I_1 + 6U_2I_2}{2} = \frac{1,05 + 1,48}{2} U_d I_d = 1,26P_d .$$

Комутація вентиляльних струмів з однієї зірки вторинної обмотки на іншу неможлива внаслідок великої індуктивності зрівняльного реактора, тобто зрівняльний реактор забезпечує незалежну роботу кожного трифазного випрямляча із загальним проводом. В результаті тривалість роботи кожного вентиля така ж, як і в трифазній схемі випрямлення із загальним проводом, а частота пульсацій випрямленої напруги в шість разів більше частоти мережі живлення ($50 \times 6 = 300$ Гц).

Зрівняльний реактор являє собою дросель із замкнутим феромагнітним сердечником, з двома однаковими обмотками. Схема з'єднання обмоток зрівняльного реактора виключає підмагнічування його сердечника випрямленим струмом навантаження внаслідок того, що струми, рівні $I_d/2$ в обох половинах реактора спрямовані зустрічно, а потоки розсіяння в осерді зменшені за рахунок з'єднання кожної половини обмотки «в зигзаг».

2.2 Застосування схеми дванадцятипульсового випрямного агрегату в системі тягового електропостачання

Випрямні пристрої для тягових підстанцій електрифікованих залізниць постійного струму розробляються відповідно до специфічних вимог, обумовлених характером тягового навантаження (змінна і циклічна), піковими навантаженнями та перевантаженнями в нормальних і аварійних режимах роботи підстанції, комутаційних і атмосферних перенапружень, засобів охолодження та установки, кліматичних умов, якості перетворення електроенергії, економічності і експлуатаційної надійності.

На тягових підстанціях, в основному, використовуються некеровані випрямні пристрої – найбільш прості, надійні і зручні в експлуатації. При їх роботі досягається відносно високий коефіцієнт потужності і мінімальна перешкоджаюча дія вищих гармонійних складових на лінії телефонного зв'язку.

Кероване електропостачання тяги, що використовується для забезпечення якнайкращого режиму електропостачання рухомих потягів і економічності тяги, здійснюється за допомогою нових типів керованих випрямних пристроїв, які разом з перетворенням змінного струму в постійний забезпечують плавне регулювання випрямленої напруги, безконтактне відключення навантаження по ланцюгу управління тиристорами, можуть бути використані як випрямляючо-інверторні агрегати. Застосування керованих випрямних пристроїв пов'язане з погіршенням енергетичних показників: зниженням коефіцієнта потужності, збільшенням вмісту вищих гармонійних складових в тяговій мережі.

Тому керовані випрямні пристрої повинні мати відповідні компенсуючі і фільтруючі пристрої.

Вихідна напруга випрямних пристроїв для підстанцій магістральних залізниць визначається напругою в контактній мережі та при номінальному навантаженні складає 3,3 кВ, а максимальна напруга не повинна перевищувати 4,0 кВ. Навантаження випрямних пристроїв тягових підстанцій відрізняється крайньою нерівномірністю. Для роботи з таким навантаженням випрямні пристрої розроблені з урахуванням нормованих перевантажень: $1,25 I_{\text{дном}}$ протягом 15 хв 1 раз в 2 год; $1,5 I_{\text{дном}}$ протягом 2 хв 1 раз в 1 год; $2,0 I_{\text{дном}}$ протягом 10 с 1 раз в 2 хв.

Випрямні пристрої повинні витримувати перенапруження 9000 В на стороні випрямленої напруги.

Випрямні пристрої тягових підстанцій виконуються по трифазній мостовій схемі або по трифазній нульовій схемі із зрівняльним реактором. Остання схема використана в напівпровідникових випрямних установках, що замінили ртутні установки, які по конструктивних міркуваннях виконувалися по нульовій схемі. Напівпровідникові випрямні пристрої на нових підстанціях виконуються тільки по дванадцятипульсовій двухмостовій схемі послідовного типу.

Напівпровідникові випрямні установки виконуються для внутрішньої і зовнішньої установки, мають повітряне охолодження, відповідно примусове і природне.

В якості перетворюючих трансформаторів для випрямних і випрямно-інверторних агрегатів використовуються спеціальні трансформатори тягового виконання.

Розглянемо схему випрямного пристрою ТПЕД-3150 як найбільш характерну для сучасних тягових підстанцій.

Схема дванадцятипульсового випрямного агрегату складається з випрямної установки ТПЕД-3150 і перетворюючого трансформатору

ТРДП-12500/10. Випрямна установка на діодах ДЛ133-500-14 з трьома паралельними ($a = 3$) і чотирма послідовними ($S = 4$) діодами в одному плечі змонтована в шести шафах. У кожній шафі розміщуються діоди і RC-ланцюги двох плечей, створюючих одну фазу одного з двох послідовних мостів. Шафи мають зовнішнє виконання і встановлюються на спеціальних фундаментах на відкритій частині підстанції. Шафи мають універсальне застосування. При певній схемі з'єднань виводів 1...6 на їх основі можна виконати шестипульсові схеми випрямлення (мостову і нульову).

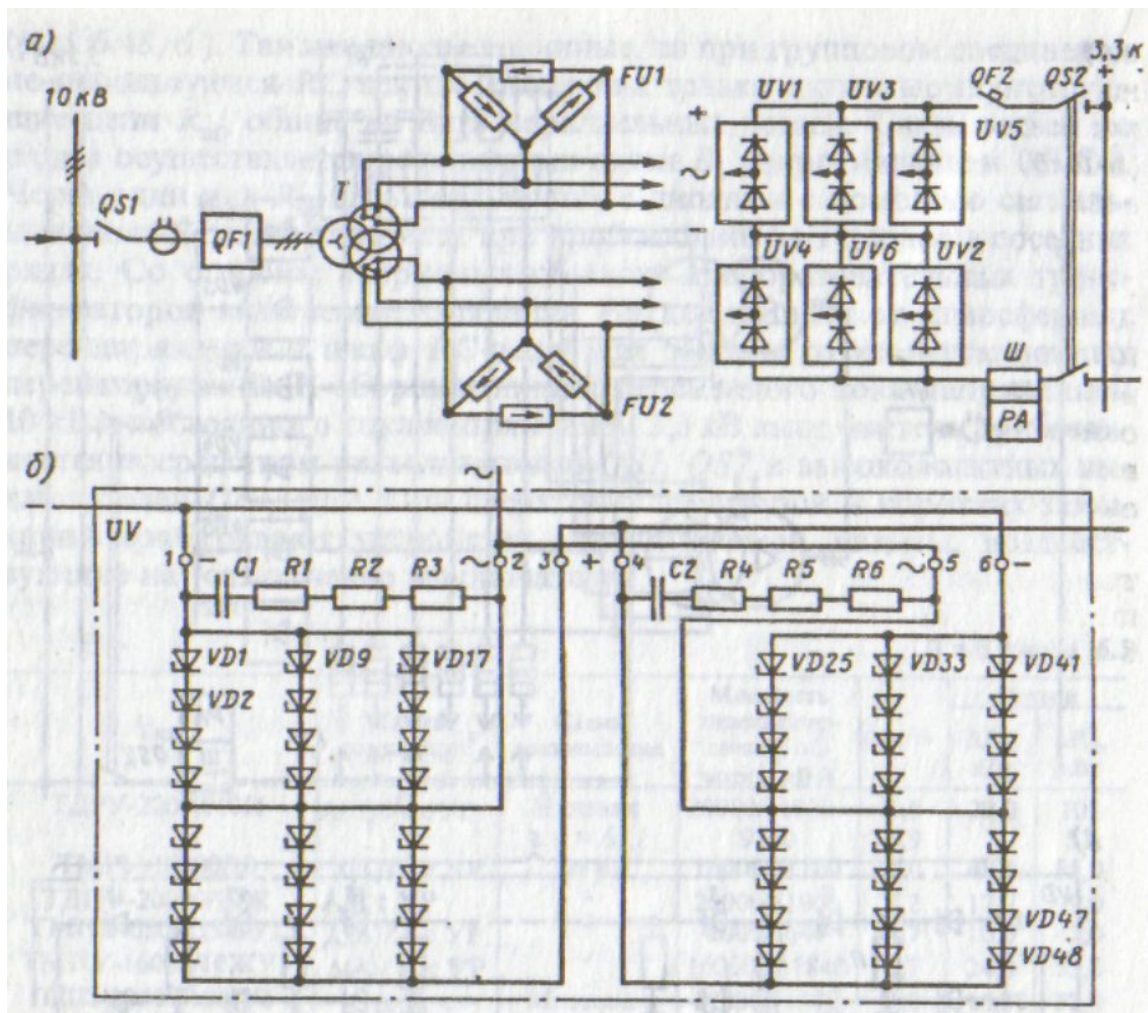


Рисунок 2.3 – Схема дванадцятипульсового випрямного пристрою послідовного типу ТПЕД-3150(а) і шафа з діодами(б)

На рисунку 2.3 прийняті такі позначення: QS1, QS2 – роз'єднувачі; QF1, QF2 – високовольні вимикачі на напругу 10 і 3,3 кВ; Т – перетворюючий трансформатор ТРДП-12500; FU1, FU2 – розрядники РВКУ-1,65 ДО1; UVI-UV6 – шафи діодів і RC-ланцюгів; VD1-VD49 – діоди ДЛ133-500-14 з охолоджувачами 0243-150; С1, С2 – конденсатори К75-15-І6 кВ, 0,1 мкФ; R1-R6 – резистори ПЭВ-199-47 Ом; 1...6 – виводи з шафи через прохідні ізолятори.

Згладжуючі фільтри тягових підстанцій з випрямними пристроями.

Змінна складова випрямленої напруги $U_{\sim}$, як правило, перевершує значення, допустиме за умовами нормальної роботи суміжних пристроїв електричної залізниці (ліній зв'язку, пристроїв автоблокування, СЦБ і т.д.). Тому на кожній підстанції встановлюється згладжуючий фільтр, загальний для всіх тягових випрямних пристроїв даної підстанції.

В пристроях зв'язку, підсилювачах звукової частоти і т.д. допустиме значення коефіцієнта пульсації визначають виходячи з рівня "фону" змінного струму, тобто співвідношення корисного сигналу і сигналу перешкод, обумовлених пульсаціями живлячої напруги. При оцінці рівня "фону" враховують різну чутливість вуха до різних по частоті гармонійних складових. Акустична дія "фону" з частотою 800 Гц прийнято за одиницю порівняння. Тоді відносну інтенсивність дії інших частот можна оцінювати за коефіцієнтом акустичної дії p , який при $f = 800$ Гц рівний 1, а для інших частот визначається по кривій (рис.2.4).

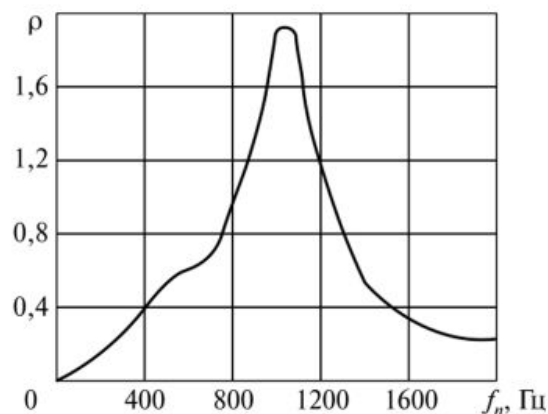


Рисунок 2.4 – Псофометрична крива

При частоті 1100 Гц p досягає максимального значення 1,9. Допустимий коефіцієнт пульсацій для частоти f_2 може бути визначений співвідношенням:

$$k_{q(f_2)} = k_q(f_1)^{p_{f_1}/p_{f_2}},$$

де p_{f_1}, p_{f_2} – коефіцієнти акустичної дії;

k_{qf_1}, k_{qf_2} – відповідно коефіцієнти пульсації для гармонійних складових з частотами f_1, f_2 .

Згладжуючу дію фільтру для даної гармонійної з частотою f_n оцінюється коефіцієнтом згладжування на даній частоті:

$$k_n = \frac{U_{1n}}{U_{2n}},$$

де U_{1n}, U_{2n} – напруги гармонік n на вході і виході фільтру.

При зображенні частотних характеристик фільтрів використовують коефіцієнт загасання фільтру в неперах і дицибеллах: $\alpha_n = \ln k_n, \alpha_n = 20 \lg k_n$.

Еквівалентна заважаюча напруга (псофометрична напруга) змінної складової випрямленої напруги $U_{d\sim}$, що містить спектр гармонійних складових, визначається по формулі:

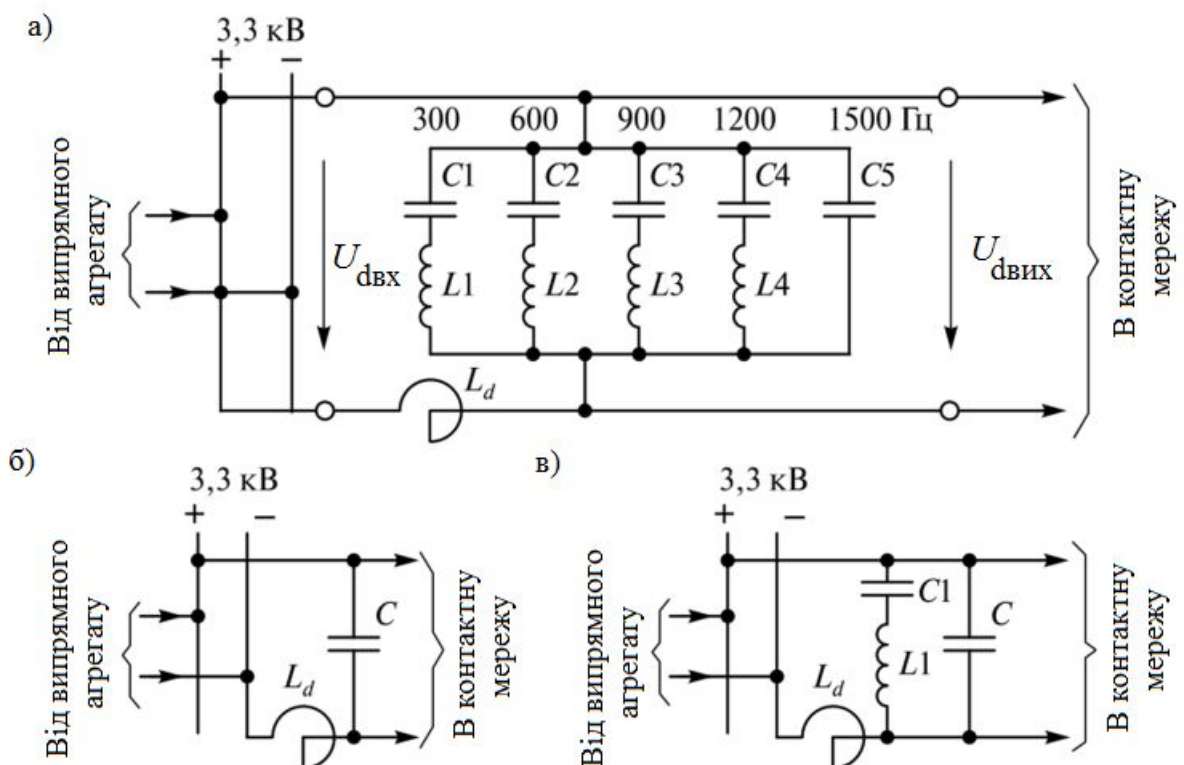
$$U_{nc} = \sqrt{\sum_{n=gk, k=1,2,\dots} (U_{d(n)} p_n)^2}.$$

Згладжуюча дія фільтра в цьому випадку визначається коефіцієнтом фільтрації (згладжування):

$$s = \frac{U_{nc1}}{U_{nc2}},$$

де U_{nc1}, U_{nc2} – еквівалентна заважаюча (псофометрична) напруга змінної складової відповідно до і після згладжуючого фільтра.

Для отримання необхідної згладжуючої дії фільтру необхідно забезпечити придушення всіх гармонійних складових випрямленої напруги на даній підстанції. При шестипульсових випрямних пристроях використовуються одноланкові згладжуючі фільтри, що складаються із згладжуючого реактора і чотирьох резонансних LC-контурів, налаштованих на резонанс напруги з частотами 300, 600, 900, 1200 Гц і п'ятого C – контура для частот, більших 1200 Гц (рис. 2.5, а).



а – одноланковий резонансний; б – одноланковий аперіодичний;

в – одноланковий резонансно-аперіодичний

Рисунок 2.5 – Схеми згладжуючих фільтрів тягових підстанцій

Важливою перевагою дванадцятипульсових випрямних пристроїв є можливість застосування простіших і економічніших згладжуючих фільтрів: одноланкових аперіодичних (рис. 2.5, б) і резонансно-аперіодичних (рис. 2.5, в).

Коефіцієнт згладжування одноланкового аперіодичного згладжуючого фільтру для будь-якої частоти $\omega_n = 2\pi f_n$:

$$k_n = \sqrt{\frac{(1 - \omega_n^2 L_d C)^2 + [\omega_n C (R_d + R_c)]^2}{1 + (\omega_n C R_c)^2}}.$$

Для окремого випадку, коли нехтують активними опорами згладжуючого реактора R_d і конденсатора R_c можна записати:

$$k_n = \left| 1 - \omega^2 L_d C \right| = \left| 1 - \left(\frac{f_n}{f_c} \right)^2 \right|,$$

де $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_d C}}$ – частота резонансу напруги або частота зрізу фільтру (рис. 2.4).

У діапазоні частот від нуля до $f_1 \approx \sqrt{2} f_c$ $k_n < 1$ і, таким чином напруга U_{2n} всіх гармонік, що потрапляють в цей діапазон, не зменшується, а зростає. Найменший коефіцієнт k_n при частоті зрізу f_c .

У спектрі частот реальних кривих випрямленої напруги окрім класичних частот ідеального випрямного пристрою виявляються гармонійні складові частотою 100 Гц і кратні їй частоти, що пов'язано з асиметричністю і

несинусоїдністю кривих живлячої напруги трифазної системи. Тому при виборі параметрів одноланкового аперіодичного фільтру небажано допускати, щоб частота f_c співпадала або була близька до частоти однієї із старших гармонік випрямленої напруги.

Псофометрична напруга на виході підстанцій по умові шкідливої дії на колі повітряної лінії зв'язку не повинна перевищувати 4В, тобто $U_{nc} \leq 4$ В. Напруга будь-якої гармоніки на виході фільтру при тривалості дії більше 1с не повинна перевищувати 100 В, тобто $U_{2n} \leq 100$ В. Це, перш за все, відноситься до частоти 100 Гц. Тому слід додатково включити один резонансний контур, налаштований на згладжування саме на даній частоті. При частоті $f_2 = 100$ Гц спостерігається найбільший коефіцієнт згладжування $k \gg 1$, а при частотах f_{p1}, f_{p2} виникає резонанс напруги, і на цих частотах може відбуватися посилення коливань. При частотах $f > f_1$ коефіцієнт $k_n > 1$. Це робоча смуга частот фільтру.

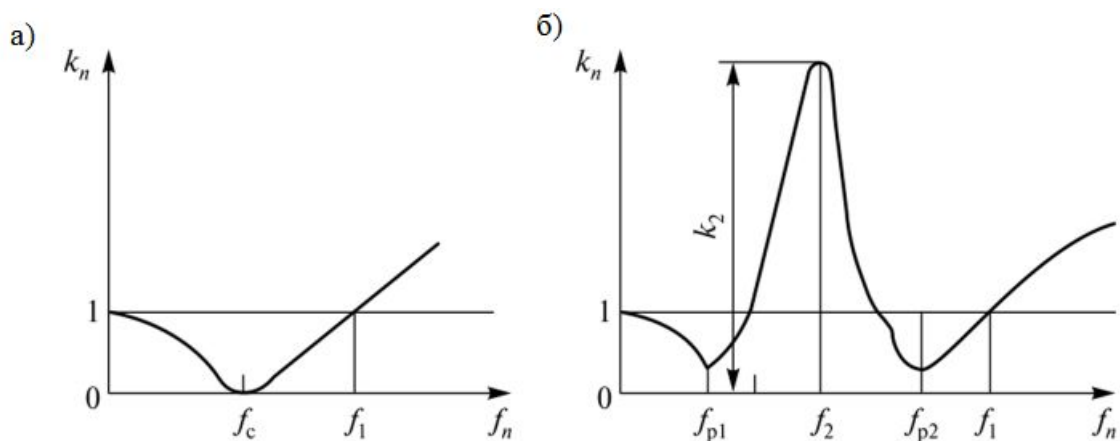


Рисунок 2.6 – Характеристики коефіцієнта згладжування (частотні) одноланкового аперіодичного (а) і резонансно-аперіодичного (б) згладжуючих фільтрів

2.3 Вищі гармонійні складові при роботі випрямного пристрою

При роботі випрямного пристрою в системі електропостачання з'являються вищі гармоніки струму та напруги, які негативно впливають на деякі показники якості електроенергії. В залежності від схеми випрямлення змінного струму величина негативного впливу на систему електропостачання також суттєво відрізняється.

Змінна складова випрямленої напруги створює в контактній мережі змінний струм, коло якого замикається через тягові двигуни і рейки. Змінний струм викликає електромагнітну, електростатистичну і гальванічну дію на лінії зв'язку. Електростатична дія створюється електричним полем проводів контактної мережі, значення якого невелике, внаслідок чого не потребується спеціальних засобів для уникнення такого впливу на лінію зв'язку. Гальванічна дія створюється накладенням змінного струму вищих гармонік, що проходить в рельсовому колі, на струми ліній зв'язку, у яких другим проводом є земля. На електрифікованих лініях не допускається по цим міркуванням однопровідні лінії зв'язку і повинна бути забезпечена надійна ізоляція від землі двопровідних ліній зв'язку.

Електромагнітний вплив створюється магнітним полем проводів контактної мережі. Магнітний потік цього поля має складові, пропорційні струмам гармонік. Змінна складова магнітного потоку, перетинаючи проводи, що знаходяться поблизу один від одного, наводять в них ЕРС різної величини одного напрямку. Різниця цих ЕРС в двох проводах великої довжини створює в телефонній мережі перешкоджаючий змінний струм, що складається із тих же вищих гармонік, що і струм в тяговій мережі. Цей струм викликає шум в телефонних апаратах і заважає вести переговори чи викривляє телеграфні передачі. Радикальними засобами для усунення електромагнітного впливу тягового струму є віднесення ліній зв'язку на відстань більш ніж 100 м від контактної мережі або кабельне виконання ліній зв'язку. Однак ці міри вимагають великих капітальних затрат. Більш доцільним є застосування на тягових підстанціях згладжуючих пристроїв, не пропускаючих в контактну

мережу струм вищих гармонік. Кабельне виконання ліній зв'язку значно дорожче згладжуючих пристроїв і застосовується при системі однофазного струму, бо він визиває не тільки перешкоджаючий, але й небезпечний вплив на лінії зв'язку. В проводах цих ліній при близькій відстані рейок виникає значна ЕРС (100 і більше), небезпечна для персоналу і ліній зв'язку.

Вищі гармоніки небажані з ряду причин: з'являються додаткові втрати в електричних машинах, трансформаторах і мережах; ускладнюється компенсація реактивної потужності за допомогою батарей конденсаторів; скорочується термін служби ізоляції електричних машин і апаратів; погіршується робота пристроїв автоматики, телемеханіки і зв'язку.

При роботі асинхронного електродвигуна в умовах несинусоїдної напруги знижуються його коефіцієнт потужності і обертаючий момент на валу. Так, наприклад, якщо амплітуди 5-ої і 7-ої гармонік напруги складають відповідно 20 і 15 % амплітуди 1-ої гармоніки, то коефіцієнт потужності двигуна зменшується на 2,6 % в порівнянні із значенням його при синусоїдальній напрузі [9]. В умовах промислових підприємств спотворення напруги, як правило, буває меншим, тому вплив вищих гармонік на коефіцієнт потужності асинхронного електродвигуна можна не враховувати.

Моменти, що викликаються вищими гармоніками струму, також дуже малі. Для асинхронного двигуна середньої потужності при питомій вазі 5-ої гармоніки напруги, що рівняється 20 % основної, момент, обумовлений 5-ю гармонікою, не перевершує 0,1% моменту, що розвивається при промисловій частоті.

Вплив гармонік на ізоляцію електричних машин і конденсаторів, а також на вимірювальні прилади і пристрої автоматики розглянуті вище. Спотворення форми кривої напруги помітно впливає на виникнення і протікання іонізаційних процесів в ізоляції електричних машин і трансформаторів. При наявності газових включень в ізоляції виникає іонізація, суть якої полягає в утворенні об'ємних зарядів і подальшій нейтралізації їх. Нейтралізація зарядів пов'язана з розсіянням

енергії, наслідком якого є електрична, механічна і хімічна дія на навколишній діелектрик; у результаті розвиваються місцеві дефекти в ізоляції, що призводить до зниження її електричної міцності, збільшенню діелектричних втрат і таким чином до скорочення терміну працездатності.

У відповідності з стандартом 1282-68 батареї конденсаторів можуть тривало працювати при перевантаженні струмами вищих гармонік не більше ніж на 30%; допустиме підвищення напруги складає 10%. Проте при тривалій експлуатації конденсаторів в цих умовах термін служби їх скорочується. В умовах промислових підприємств конденсатори періодично виявляються в режимі, близькому до резонансу струмів на частоті якої-небудь із гармонік; внаслідок систематичних перевантажень вони швидко виходять з ладу.

При несинусоїдній напрузі в мережі відбувається прискорене старіння ізоляції силових кабелів. Для підтвердження цього положення були зіставлені результати вимірів струмів витoku кабелів, прокладених майже одночасно і працюючих в схожих температурних умовах; частина обстежених кабелів працювала при практично синусоїдній напрузі, інша — при рівні вищих гармонік в кривій напруги в межах 6...8,5 % (переважали 5-та і 7-ма гармоніки). Струми витoku у другому випадку через 2,5 роки експлуатації опинилися в середньому на 36 %, через 3,5 роки - на 43 % більше, ніж в першому.

При великих спотвореннях напруги ($k_{нс} = 7...10 \%$) і переважанні 5-13-ої гармонік струмів позитивні похибки вимірювання енергії, споживаної тиристорними перетворювачами, можуть досягати 3...4 %. У найбільшій мірі вплив несинусоїдальності на похибки індукційних лічильників виявляється на частотах 11-ої і 13-ої гармонік. При $k_{нс} \leq 5 \%$, що допустимо згідно стандартом 13109-67, додаткові похибки вимірювання виявляються нехтувано малими.

Вимірювання напруги і струму за наявності вищих гармонік також зв'язане з появою додаткових похибок. Вимірювальні пристрої систем управління і автоматики, такі як безконтактний автоматичний регулятор напруги під навантаженням, автоматичний регулятор потужності конденсаторної батареї

типу АРКОН і ін., реагують на зміни амплітудного, середнього за період або середньоквадратичного за період значення напруги.

Відомі випадки виникнення автоколивань в системах управління вентильними перетворювачами внаслідок проникнення в систему імпульсно-фазового управління 30...40-х гармонік струму. Внаслідок автоколивань виникали значні коливання струму навантаження, що приводило до аварійного відключення перетворювача.

Вплив гармонік на індукційні датчики положення може привести до порушення технологічного процесу; такі випадки мали місце на машинобудівних підприємствах. Вищі гармоніки струму і напруги в мережі погіршують роботу телемеханічних пристроїв і викликають збої, якщо силові ланцюги використовуються в якості каналів зв'язку між напівкомплектами диспетчерського і контрольованого пунктів. Ускладнюється використання простої і дешевої системи циркулярного телеуправління по лініях розподільних мереж з використанням парних гармонік. Вищі гармоніки струму в повітряних лініях електропередачі погіршують роботу каналів зв'язку.

Відомі випадки корисного використання вищих гармонік. Широке застосування на промислових підприємствах одержали системи сигналізації однофазних замикань на землю, засновані на використанні природних вищих гармонік струму замикання на землю, що штучно генеруються. У мережах 6...10 кВ багатьох великих промислових підприємств передбачається компенсація ємнісного струму, однофазного замикання на землю за допомогою дугогасячих апаратів, тому при резонансній наладці цих апаратів використання ємнісного струму промислової частоти для сигналізації не є можливим. Застосування вищих гармонік дозволяє забезпечити необхідні чутливість і селективність роботи сигналізації.

2.4 Оцінка можливого рівня вищих гармонійних складових

Найважливішим етапом рішення задачі зниження впливу, є визначення джерел перешкод і їх характеристик.

На залізницях використовуються випрямні пристрої різних типів: УШЗ-І, ПВЗ-З, ПВЕ-ЗМ, П8Е5, ПВКЕ, ТПЕД та інверторно-випрямні перетворювачі ЕІПЕ-1, ШПЕ-2Уэ.

Всі вказані перетворювачі мають схему з'єднання із зрівнюючим реактором, або трифазну мостову (див. рис. 2.2,2.3). Обидва типи цих схем мають на виході перетворювача шестикратну та дванадцятикратну пульсацію напруги, тому при дослідженні вмісту вищих гармонійних в кривій випрямленої напруги тягової підстанції достатньо провести розрахунки для однієї з них.

Аналіз спектрів показує, що при симетричній живлячій напрузі в кривій випрямленої напруги мають місце основні гармоніки з частотами, кратними 300 Гц. При цьому абсолютна величина гармонійних збільшується із зростанням струму навантаження випрямного пристрою тягової підстанції. Якщо ж з'являється несиметрія живлячої напруги, то в спектрі випрямленої напруги з'являються гармоніки з частотами, кратними 100 Гц.

Із збільшенням коефіцієнта несиметрії живлячої напруги величина гармонік з частотами, кратними 100 Гц різко зростає, тоді як величина основних гармонік (кратних 300 Гц) при зміні величини несиметрії живлячої напруги змінюється мало. При збільшенні струму навантаження випрямного пристрою гармоніки, кратні 100 Гц, змінюються в невеликих межах.

Таким чином, можна зробити висновок, що на величину основних гармонік (кратних 300 Гц), більшою мірою впливає зміна навантаження випрямного пристрою; на неосновні гармоніки з частотами, кратними 100 Гц - зміна коефіцієнта несиметрії.

Для розрахунку випрямленої напруги некерованого перетворювача:

$$E_d(k) = \left[\frac{2}{\pi} x_s (1 - e^{-jk2\pi/3}) - \frac{2}{\pi} x_f (1 + e^{-jk\pi/3}) \right] i_a(\alpha),$$

де k – номер гармоніки;

x_s – опір системи, Ом;

x_f – індуктивний опір живлячої мережі, Ом;

α – кут управління;

i_d – випрямлений струм, А;

Приведемо приклад розрахунку для $k = 100$:

$$E_d(100) = \left[\frac{2}{\pi} 0.237(1 - e^{-j100\frac{2\pi}{3}}) - \frac{2}{\pi} 0.283(1 + e^{-j100\frac{\pi}{3}}) \right] 100 = 27.6 \text{ В}$$

Всі інші розрахунки зведемо до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Гармоніки випрямленої напруги некерованого перетворювача

№ п/п	$K_n, \%$	$I_d, \text{А}$	Вищі гармоніки, Гц											
			100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
1	1	100	27,6	5,5	156,4	4,4	2,9	44,9	2,8	2,1	22,5	2,2	1,7	13,4
2	2	100	26,8	5,1	156,4	4,4	2,9	44,9	2,8	2,1	22,5	2,2	1,7	13,4
3	3	100	80,4	10	138	13,4	8	44,3	8,7	5,5	21,3	6,8	4	12
4	4	100	80,5	15,9	158,2	13,4	8	44,3	8,7	5,5	21,3	6,8	4	12

2.5 Порівняння схем випрямлення трифазного струму

У таблиці 2.2 наведено зведені розрахункові співвідношення трифазних випрямлячів, за якими можна порівняти шестипульсову і дванадцятипульсову схеми випрямлення.

Таблиця 2.2 – Порівняльні характеристики схем випрямлення

Показники	Схема випрямлення
-----------	-------------------

	Нульова шестипульсова з вирівнюючим реактором	Мостова шестипульсова	Дванадцятипульсова
$U_{b\max}$	$2,09 U_d$	$1,45 U_d$	$0,52 U_d$
I_a	$I_d/6$	$I_d/3$	$I_d/3$
S_T	$1,26 P_d$	$1,05 P_d$	$1,028 P_d$
K_p	0,8	0,95	0,97
S_y	$2,09 P_d$	$2,09 P_d$	$2,09 P_d$

В таблиці 2.2 основні параметри:

$U_{b\max}$ – максимальна зворотна напруга діоду;

I_a – середнє значення струму діоду;

S_T – розрахункова (типова) потужність трансформатору;

K_p – коефіцієнт використання трансформатору;

S_y – встановлена потужність напівпровідникових пристроїв;

U_d – середнє значення випрямленої напруги;

P_d – активна потужність на виході випрямляча.

Перевага випрямлячів з великим числом пульсацій випрямленої напруги наступні: підвищення якості випрямленої напруги, краще використання трансформатора. Встановлена потужність напівпровідникових приладів у всіх схемах випрямлення однакова.

Порівнявши попередні характеристики схем випрямлення можна зробити висновок, що зі збільшенням числа пульсацій за період вміст вищих гармонійних складових зменшується, отже, якість випрямленої напруги підвищується.

Внаслідок наявності вищих гармонійних складових ефективне значення струму в мережі живлення зростає, що викликає додаткові втрати енергії в живильній системі. Відношення ефективної основної гармонійної складової

струму до його повного ефективного значення називається коефіцієнтом спотворення струму та визначається за формулою:

$$k_{н1} = \frac{I_{1(1)}}{I_1}$$

Для оцінки якості випрямленої напруги застосовується показник, який показує відношення ефективного значення змінної складової випрямленої напруги U_d до середнього його значення U_{d0} та називається коефіцієнт хвилястості випрямленої напруги:

$$k_{\omega} = \frac{U_d}{U_{d0}}$$

У таблиці 2.3 приведені значення коефіцієнтів хвилястості k_{ω} та коефіцієнта спотворення струму $k_{н1}$. Зі збільшенням числа пульсацій коефіцієнт хвилястості зменшується, а коефіцієнт спотворення струму наближується до одиниці.

Таблиця 2.3 – Порівняльні характеристики схем випрямлення

Число пульсацій	2	3	6	12
Коефіцієнт хвилястості, k_{ω}	0,48	0,18	0,04	0,01
Коефіцієнт спотворення струму,	0,900	0,827	0,955	0,989

$k_{н1}$				
----------	--	--	--	--

Для одержання необхідної згладжуючої дії фільтра необхідно забезпечити придушення всіх гармонійних складових випрямленої напруги на даній підстанції. При шестипульсових випрямлячах використовувалися одноланкові фільтри, що складаються із реактора, що згладжує, і чотирьох резонансних LC -контурів, настроєних на резонанс напруги із частотами 300, 600, 900, 1200 Гц і п'ятого C - контуру для частот, більших 1200 Гц .

Важливою перевагою дванадцятипульсових випрямлячів є можливість застосування більш простих і економічних фільтрів, що згладжують: одноланкових аперіодичних і резонансно-аперіодичних [10].

Значення коефіцієнта спотворення струму наведені в таблиці 2.2. З наведених даних випливає, що з підвищенням кратності пульсацій значення коефіцієнта спотворення струму наближується до 1. Для 12-пульсової схеми випрямлення $k_{н1} = 0,989$, для 6-пульсової схеми випрямлення $k_{н1} = 0,955$. Це підкреслює енергетичну ефективність 12-пульсових схем випрямлення завдяки пониженому вмісту вищих гармонійних складових первинного струму.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ВИПРЯМНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПІДСТАНЦІЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В СИСТЕМІ MATLAB

3.1 Загальні відомості про систему MATLAB

У наші дні комп'ютерна математика отримала відповідну популярність і перебуває на етапі швидкого розвитку. Почавши свій шлях із застосування програмувальних мікрокалькуляторів і розрахунків на персональних ЕОМ (комп'ютерах), вона породила цілий ряд своїх спеціальних програмних засобів - систем комп'ютерної математики і пакетів їх розширення.

Серед систем комп'ютерної математики, у першу чергу орієнтованих на чисельні розрахунки, особливо виділяється матрична математична система MATLAB - найефективніша серед систем для чисельних обчислень. Система фактично стала світовим стандартом в області сучасного математичного й науково-технічного програмного забезпечення. У розробці MATLAB і пакетів розширення цієї системи беруть участь великі наукові школи світу, багато провідних університетів та інші організації.

Ефективність MATLAB обумовлена насамперед її орієнтацією на матричні обчислення із програмною емуляцією паралельних обчислень і спрощеними засобами завдання циклів [11]. В MATLAB вдало реалізовані засоби роботи з багатомірними масивами, великими й розрідженими матрицями й багатьма типами даних. MATLAB має потужні засоби діалогу, графіки й комплексної візуалізації обчислень, у тому числі із залученням засобів дескрипторної графіки й віртуальної реальності.

Система MATLAB пропонується розробниками (корпорація The Math Works, Inc.) як лідируючий на ринку, у першу чергу на підприємствах військово-промислового комплексу, в енергетиці, в аерокосмічній галузі й в автомобілебудуванні, мова програмування високого рівня для технічних обчислень, розширювана більшим числом пакетів прикладних програмних розширень. У нових реалізаціях їх число становить сотні, причому понад 80 пакети розширень фірми Math Works входять у повну поставку новітньої

системи MATLAB R2007b. Найвідомішим з них стало розширення Simulink, що забезпечує блокове імітаційне моделювання різних систем і обладнань із застосуванням сучасної технології візуально-орієнтованого програмування.

Пакет розширення Simulink системи MATLAB є ядром інтерактивного програмного комплексу, призначеного для математичного моделювання лінійних і нелінійних динамічних систем і пристроїв, представлених своєю функціональною блок-схемою, іменованою S-моделлю, або просто моделлю. При цьому можливі різні варіанти моделювання: у часовій області, у частотній області, із подібним керуванням, на основі спектральних перетворень Фур'є, з використанням методу Монте-Карло (реакція на впливи випадкового характеру) тощо.

Для побудови функціональної блок-схеми модельованих пристроїв Simulink має велику бібліотеку блокових компонентів і зручний редактор блок-схем. Він заснований на графічному інтерфейсі користувача та по суті є типовим засобом візуально-орієнтованого програмування. Використовуючи палітри компонентів (набори блоків), користувач за допомогою миші переносить потрібні блоки з палітр на робочий стіл пакета Simulink і з'єднує лініями входи й виходи блоків. Таким чином, створюється діаграма (блок-схема) системи або пристрою, тобто модель.

S-Модель фактично є програмою, яку можна переглянути за допомогою тестового редактора або за допомогою редактора файлів системи MATLAB. Файли моделі мають розширення «.mdl». Однак слід зазначити, що ці файли дуже громіздкі й навіть для досить простих моделей можуть містити тисячі рядків програмного коду. Програма в кодах автоматично генерується в процесі введення обраних блоків компонентів, їхніх з'єднань і завдання параметрів компонентів, користувач практично не має справи із програмуванням.

Simulink автоматизує наступний, найбільш трудомісткий етап моделювання: він складає та вирішує складні системи алгебраїчних і диференціальних рівнянь, що описують задану функціональну схему (модель),

забезпечуючи зручний і наочний візуальний контроль за поведінкою створеного користувачем віртуального пристрою. Досить уточнити (якщо потрібно) вид аналізу й запустити Simulink у режимі симуляції (звідки й назва пакета Simulink) створену модель системи або пристрою. Simulink практично миттєво змінює математичний опис моделі в міру введення її нових блоків, навіть у тому випадку, коли цей процес супроводжується зміною порядку системи рівнянь і веде до істотної якісної зміни поведінки системи. Втім, це є однією з головних цілей пакета Simulink.

Цінність Simulink полягає й у великій, відкритій для вивчення й модифікації, бібліотеці компонентів (блоків). Вона включає джерела впливів (сигналів) із практично будь-якими часовими залежностями, масштабуючі, лінійні й нелінійні перетворювачі з різноманітними формами передатних характеристик, квантуючі пристрої, інтегруючі і диференціюючі блоки тощо.

У бібліотеці є набір віртуальних пристроїв, що реєструють, - від простих вимірників типу вольтметра або амперметра до універсальних осцилографів, що дозволяють переглядати часові залежності вихідних параметрів модельованих систем, наприклад струмів і напруг, переміщень, тисків і т.п. Simulink має засоби анімації й звукового супроводу.

Важлива перевага Simulink - це інтеграція не тільки із системою MATLAB, але й з рядом інших пакетів розширення, що забезпечує, по суті, необмежені можливості застосування Simulink для рішення практично будь-яких задач імітаційного та подібного моделювання [12].

Бібліотека блоків SimPowerSystems (Power System Blockset) є однією з додаткових бібліотек Simulink, орієнтованих на моделювання конкретних пристроїв. SimPowerSystems містить набір блоків для імітаційного моделювання електротехнічних пристроїв. До складу бібліотеки входять моделі пасивних і активних електротехнічних елементів, джерел енергії, електродвигунів, трансформаторів, ліній електропередачі й тому подібного устаткування. Є також розділ, що містить блоки для моделювання пристроїв силової електроніки,

включаючи системи керування для них. Комбінуючи можливості Simulink і SimPowerSystems, користувач може не тільки імітувати роботу пристроїв у часовій області, але й виконувати різні види аналізу таких пристроїв.

Безсумнівною перевагою SimPowerSystems є те, що складні електротехнічні системи можна моделювати, сполучаючи методи імітаційного й структурного моделювання. Наприклад, силову частину напівпровідникового перетворювача електричної енергії можна виконати з використанням імітаційних блоків SimPowerSystems, а систему керування - за допомогою звичайних блоків Simulink, що відображають лише алгоритм її роботи, а не її електричну схему. Такий підхід, на відміну від пакетів схемотехнічного моделювання, дозволяє значно спростити всю модель, а значить, підвищити її стійкість і швидкість роботи. Крім того, у моделі з використанням блоків SimPowerSystems можна використовувати блоки й інших бібліотек Simulink, а також функції самого MATLAB, що дає практично не обмежені можливості для моделювання електротехнічних систем [13].

Бібліотека SimPowerSystems досить велика. У тому випадку, якщо все-таки потрібного блоку в бібліотеці немає, є можливість самостійно створити свій власний блок як за допомогою вже наявних у бібліотеці блоків, реалізуючи можливості Simulink по створенню підсистем, так і на основі блоків основної бібліотеки Simulink і керованих джерел струму або напруги.

Таким чином, SimPowerSystems у складі Simulink на теперішній час може вважатися одним із кращих пакетів для моделювання електротехнічних пристроїв і систем.

3.2 Моделювання електротехнічних пристроїв у системі MATLAB пакеті розширення Simulink

Робота з пакетом Simulink починається із запуску системи MATLAB. У результаті відкривається вікно (рис. 3.1), що містить:

- назву вікна - MATLAB;

- панель меню: File (файл), Edit (редагування), View (вид), Web (взб-сайт), Window (вікно), Help (допомога);
- панель інструментів, на якій розташовані у своїй більшості відомі кнопки, але серед них є кнопка, що має спливаючу підказку Simulink;
- поле командного вікна, для набору;
- рядок стану.

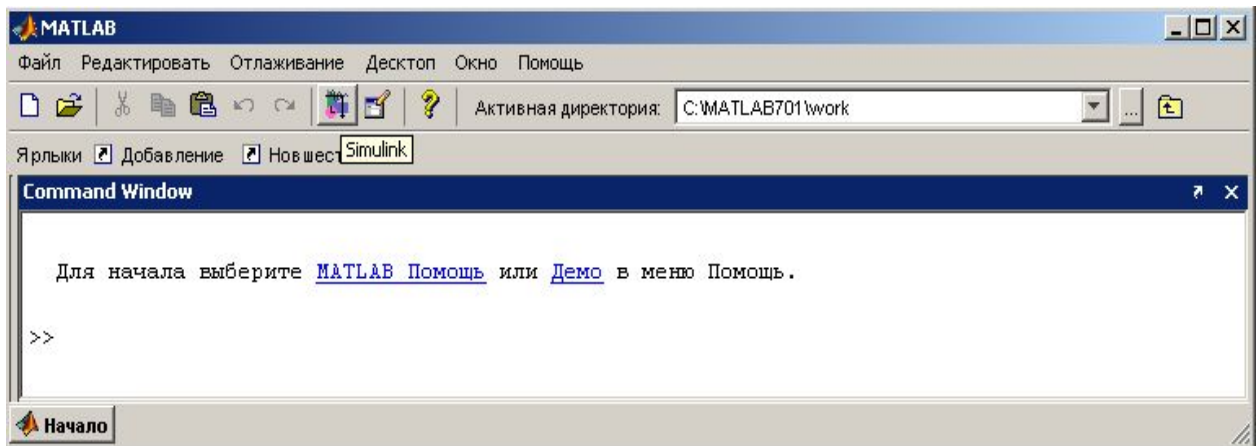


Рисунок 3.1 – Вікно системи MATLAB

Запуск пакета Simulink здійснюється одним з наступних способів:

- за допомогою кнопки Simulink  на панелі інструментів (при цьому викликається вікно оглядача (браузера) бібліотеки Simulink Library Browser);
- набором у рядку командного вікна слова Simulink з наступним натисканням кнопки Enter на клавіатурі (так само викликається вікно оглядача);
- послідовним вибором пунктів меню File/New/Model (відкривається вікно для створення S- або Sps-Моделі);
- за допомогою кнопки відкриття документа на панелі інструментів (викликається вікно зі створеною раніше моделлю, збереженої у вигляді mdl-файлу).

Останній з перерахованих способів потрібно застосовувати для запуску налагодженої моделі, у яку не потрібно додавати які-небудь блоки. Відразу відзначимо, що під S- і Sps-моделями розуміються відповідно моделі, створені за допомогою програм Simulink і SimPowerSystems. Основні маніпуляції в процесі роботи здійснюються за допомогою лівої клавіші миші (ЛКМ). Використання правої клавіші миші (ПКМ) буде обумовлюватися окремо. Натиснувши кнопку , що має спливаючу підказку Simulink, відкривається вікно бібліотеки Simulink Library Browser (рис. 3.2).

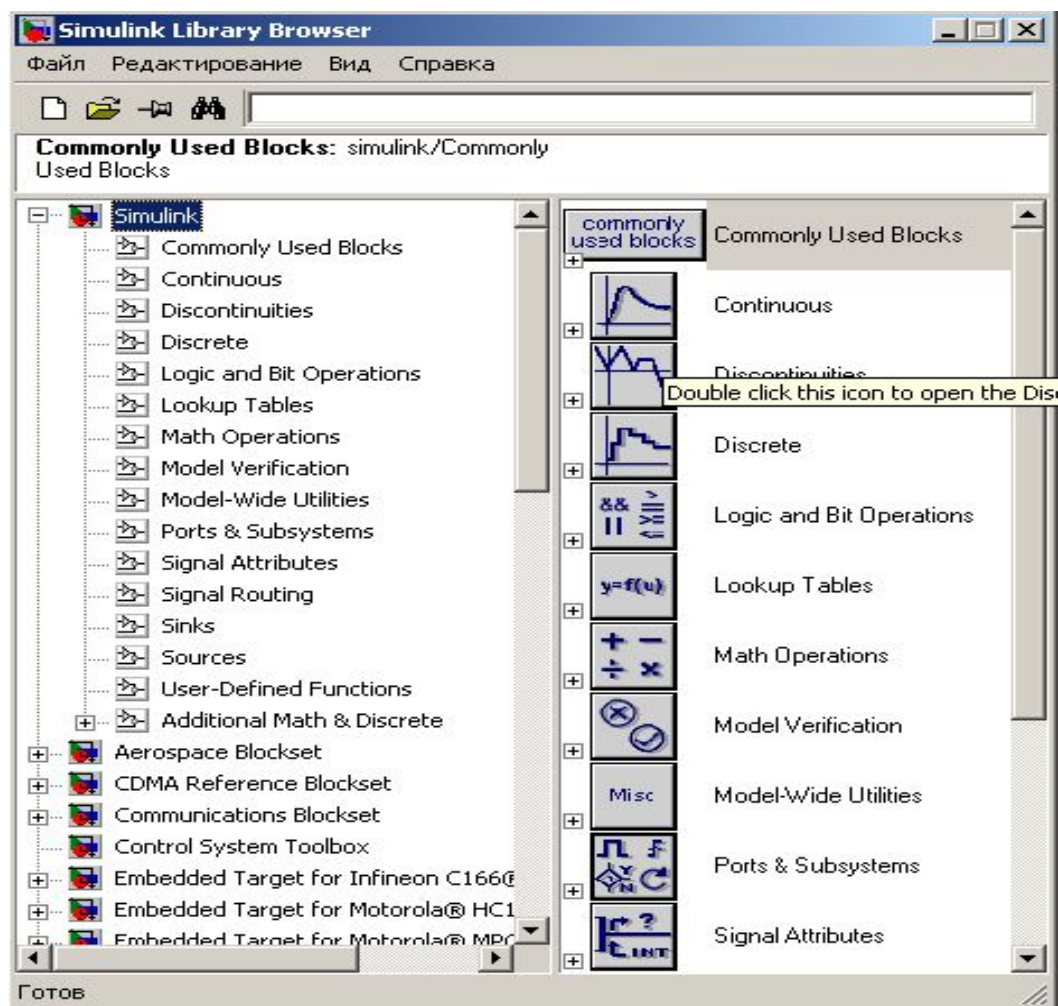


Рисунок 3.2 – Вікно оглядача бібліотеки Simulink Library Browser

При виклику вікна оглядача (див. рис. 3.2) автоматично відкривається

розділ бібліотеки Simulink, який розміщується в лівій і правій частинах цього вікна. У лівій частині поміщене підрядкове підменю у вигляді дерева. А в правій - піктограми підрозділів цього розділу. Відзначимо, що в нижній частині списку лівої частини вікна є рядок з назвою розділу SimPowerSystems.

Програма SimPowerSystems містить набір блоків для побудови віртуальних моделей електричних кіл, джерел вторинного електроживлення і пристроїв силовій електроніки. Використовуючи бібліотеки Simulink і SimPowerSystems із застосуванням функцій і команд MATLAB, користувач може не тільки імітувати роботу пристроїв у часовій області, але й вивчати їхні частотні властивості, оцінювати динамічні параметри й здійснювати гармонійний аналіз струмів і напруг.

Безсумнівною перевагою SimPowerSystems є те, що при моделюванні складних систем силовій електроніки можна використовувати функціональні, віртуальні й структурні моделі. Так, силовий блок напівпровідникового перетворювача електричної енергії будується на основі віртуальних блоків SimPowerSystems, а система керування – з допомогою функціональних блоків Simulink, що відбивають лише алгоритм її роботи без електричної схеми. Такий підхід значно спрощує саму модель і, як наслідок, підвищує швидкість її роботи. Важливо відмітити, що бібліотека SimPowerSystems має відносно велику кількість блоків, а також дає можливість створювати нові підсистеми із блоків, наявних в бібліотеці, і залучати функції MATLAB. Усе це значно розширює можливості програми SimPowerSystems і Simulink. Побудова Sps-Моделей мало відрізняється від побудови S-Моделей (моделей Simulink). Для їхнього створення необхідно відкрити вікно моделі й вікно бібліотеки й, застосувавши технологію «drag-and-drop», скласти модель із блоків з виконанням з'єднань між ними. У той же час у створенні SPS-моделей є своя специфіка.

Входи й виходи Sps-Моделей не критичні до напрямку протікання струму, а сполучні лінії між блоками є аналогами електричних проводів, по яких протікає струм. Для з'єднання блоків слід клацнути ЛКМ на затискачі

якого-небудь блоку й, тримаючи ЛКМ, простягнути сполучну лінію (проведення) до затискача іншого блоку. Вихід одного блоку може бути з'єднаний із входом іншого й навпаки.

Безпосереднє з'єднання між собою блоків з бібліотеки Simulink і блоків з бібліотеки SimPowerSystems неприпустимо. Передавати сигнал від S-блоку до Sps-блоку можна через керовані джерела струму або напруги, а у зворотну сторону через вимірювачі струму або напруги.

У віртуальних моделях задаються початкові умови для струмів і напруг у реактивних елементах за допомогою спеціального блоку Powergui або за допомогою функції powerinit.

При аналізі віртуальних моделей разом з функціональними моделями доцільно використовувати наступні вирішувачі диференціальних рівнянь: ode15s, ode23s, ode23t, ode23tb. При цьому вибір здійснюється за результатами апробації й порівняння ефективності роботи перерахованих вище вирішувачів у процесі моделювання після запуску конкретної моделі з урахуванням задовільної швидкості розв'язку й одержуваної картини процесів, тобто при відсутності непояснених викидів або розривів на тимчасових діаграмах. Як правило, установлюваний по умовчання вирішувач ode45 використовувати для аналізу Sps-Моделей небажано через його повільну роботу, і ця рекомендація видається самим пакетом при запуску моделі [14].

Відкриємо вікно MATLAB, а з нього кнопкою викличемо вікно оглядача Simulink Library Browser (рис. 3.3). Закриємо в лівій частині вікна, що відкрилося дерево бібліотеки Simulink, клацнувши ЛКМ по значковій «-» (біля Simulink), а потім відкриємо дерево SimPowerSystems клацанням ЛКМ по значковій «+» (біля SimPowerSystems). Частіше буває зручніше працювати з вікном, що містить піктограми розділів SimPowerSystems. Щоб його відкрити, потрібно установити покажчик миші на головний рядок дерева SimPowerSystems і нажати ПКМ. З'явиться рядок з написом «Open the SimPowerSystems Library». Після клацання по цьому рядку ЛКМ відкривається вікно «Library:powerlib» з піктограмою

розділів (див. рис. 3.3). Відзначимо, що порядок проходження розділів у дереві SimPowerSystems і у вікні Library: powerlib відрізняється.

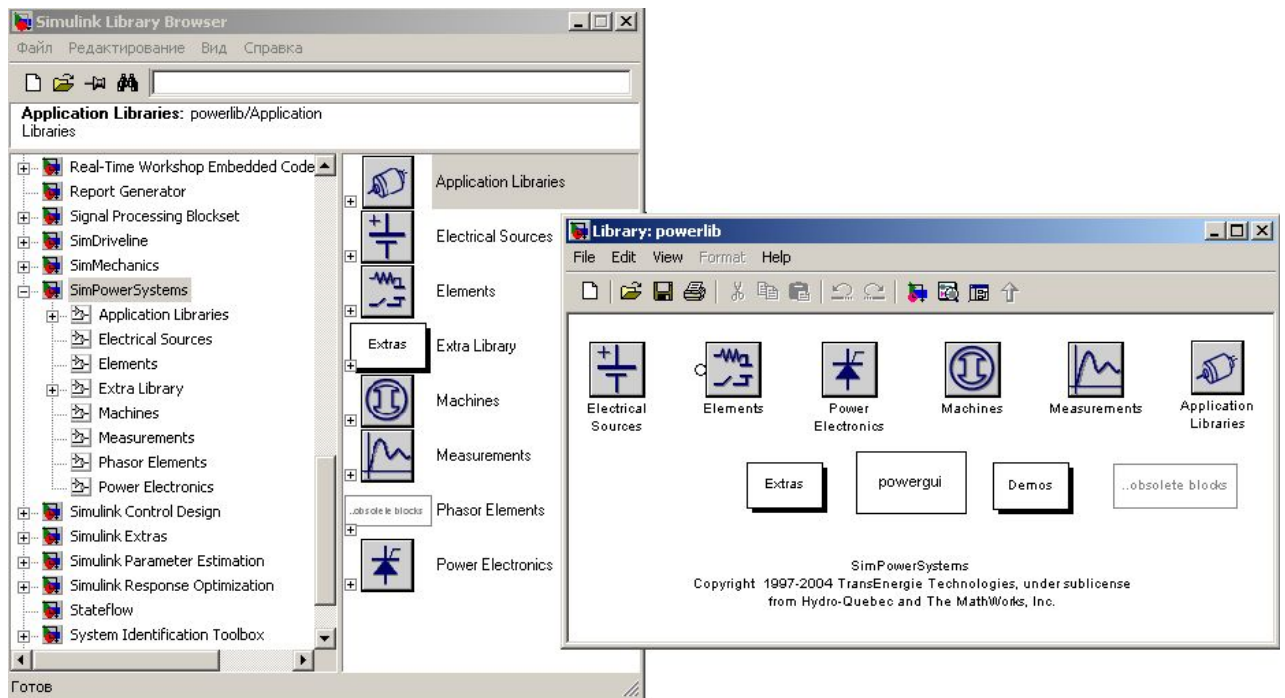


Рисунок 3.3 – Відкриття розділів бібліотеки SimPowerSystems Library

Видно, що бібліотека SimPowerSystems в MATLAB (версія 7.0) містить наступні основні розділи (див. рис. 3.3):

Electrical Sources – джерела електричної енергії;

Elements – електротехнічні елементи;

Power Electronics – пристрої силової електроніки;

Machines – електричні машини;

Connectors – сполучні елементи;

Measurements – вимірювальні й контрольні пристрої;

Extras (Extra Library) – додаткові пристрої;

Demos – набір демонстраційних моделей.

Крім того, у цьому вікні знаходиться блок Powergui для проведення аналізу властивостей досліджуваної моделі. На основі блоків з перерахованих розділів є можливість створювати віртуальні моделі досить складних в

схемо-технічному відношенні джерел електроживлення й пристроїв силової електроніки.

Опис практично будь-якого стандартного блоку як бібліотеки SimPowerSystems, так і будь-якої іншої бібліотеки представленої у дереві Simulink Library Browser, наведене в інструкціях Help. Для виклику Help конкретного блоку необхідно навести курсор миші на його піктограму в «дереві» розділу (вікно оглядача рис. 3.3) і натиснути ПКМ, у відкритому вікні слід клацнути ЛКМ на команду Help по даному блоку. Можна також скористатися меню Help вікна Simulink Library Browser – «Help / Help on the selected block».

3.3 Випрямні перетворювачі в системі тягового електропостачання

Для створення моделі та дослідження її характеристик потрібно розглянути роботу випрямного перетворювача, як частину системи тягового електропостачання. Випрямний перетворювач являється основним обладнанням тягової підстанції, тому розглянемо особливості тягової підстанції постійного струму.

Тягові підстанції системи постійного струму одержують змінний струм високої напруги із загальної енергетичної мережі і за допомогою трансформаторів і випрямлячів перетворюють його в постійний струм зниженої напруги. Як вхідні ланцюги змінного струму, так і вихідні постійного струму захищені швидкодіючою комутаційною апаратурою. Тягові підстанції постійного струму розташовуються уздовж ліній через кожні кілька кілометрів. Рівень напруги й вихідна потужність залежать від багатьох факторів, включаючи тип електрорухомого складу, інтенсивності руху та ін.

Загальну, спрощену структурну схему тягової підстанції постійного струму можна представити у вигляді показаному на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 – Структурна схема тягової підстанції постійного струму

В даний час на діючих підстанціях постійного струму, що споруджуються використовують обладнання типове для більшості підстанцій. Мережа 3-фазного змінного струму, від якої живиться тягова підстанція може бути напругою 110 і 220 кВ, вона понижується тяговим трансформатором до 10 кВ, що подається в РУ-10 кВ. Напруга 10 кВ слугує для живлення не тягових споживачів і перетворювальних агрегатів, які забезпечують електроенергією постійного струму електрорухомий склад.

На сьогоднішній день в експлуатації знаходяться різні перетворювальні трансформаторами, для шестифазної нульової схеми випрямлення із зрівнювальним реактором типів ТМПУ-16000/10ЖУ1, ТМПУ-6300/10ЖУ1 і для мостових – ТДП-12500/10ЖУ1, ТМП-6300/35ИУ1. Для дванадцятипульсової схеми на базі трансформатора ТДП-12500/10ЖУ1 розроблений перетворювальний трансформатор ТРДП-12500/10ЖУ1.

Тип трансформатора розшифровується так:

Т – трифазний, М – масляний, Д-Д– з повітряним охолодженням, Р – з розщепленою вторинною обмоткою, П – для напівпровідникових випрямлячів, У – зі зрівнювальним реактором; число після літерного позначення – типова потужність; число через дріб — номінальна напруга первинної обмотки; Ж – залізничний; У – для помірного клімату, 1 – для зовнішнього розміщення.

В якості випрямляча використовують ТПЕД-3150-3.3к-У1 (трифазний перетворювальний із природнім охолодженням, діодний) виготовляється на номінальний струм 3150 А та номінальна напруга 3.3 кВ для експлуатації в помірному кліматі й призначається для розміщення на відкритій частині підстанції. Випрямляч складається із шести шаф, у кожній з яких розміщено 48 діодів з охолоджувачами, а також конденсатори та резистори. На даху кожної шафи розміщаються шість прохідних ізоляторів, через які здійснюється підключення до шин (плюсової й мінусової) і вторинних обмоток перетворювальних трансформаторів. Схеми головних електричних з'єднань випрямлячів залежать від схеми випрямлення.

Результатом подальшої розробки випрямлячів цієї серії є випрямляч типу ВТПЕД-3.15-3.3к-У1 на номінальний струм 3,15 кА і напругу 3,3 кВ, виконаний на діодах ДЛ-153-2000-20 УХЛ2, на струм 2000 А [4].

При перетворенні трифазного змінного струму в постійний за допомогою випрямлячів крива випрямленої напруги є пульсуючою. У шестипульсових перетворювачів, що застосовуються на тягових підстанціях, на інтервал часу одного період основної частоти змінного струму 50 Гц доводиться шість пульсацій, у дванадцятипульсових — дванадцять. Періодичність пульсацій при цьому становить відповідно 300 Гц і 600 Гц. Випрямлену напругу можна розкласти на постійну і змінну складові. Змінна складова випрямленої напруги, як правило, перевершує значення, припустиме за умовами нормальної роботи суміжних пристроїв електрифікованої залізниці (ліній зв'язку, пристроїв автоблокування, СЦБ і ін). Тому на кожній підстанції встановлюється фільтр, що

згладжує випрямлену напругу, загальний для всіх тягових випрямлячів даної підстанції.

Згладжувальні пристрої, що встановлюються в РУ-3.3 кВ, призначені не пропускати з тягової підстанції в контактну мережу струми вищих гармонік. Для одержання необхідної згладжуючої дії фільтра необхідно забезпечити придушення всіх гармонійних складових випрямленої напруги на даній підстанції. При шестипульсових випрямлячах використовується одноланкові фільтри, що складаються із згладжуючого реактора і чотирьох резонансних LC -контурів, настроєних на резонанс напруги із частотами 300, 600, 900, 1200 Гц і п'ятого C -контур для частот, більших 1200 Гц. При дванадцяти-пульсових випрямлячах застосовують більш прості і економічні згладжуючі фільтри: одноланкові аперіодичні і резонансно-аперіодичні.

В згладжувальних пристроях тягових підстанцій застосовують реактори типу РБФАУ-3.3-6500/3250 У2 (реактор бетонний, фільтровий, алюмінієвий, універсальний, номінальна напруга 3.3 кВ, номінальний струм 6500 або 3250 А, для помірного клімату, для установки в камерах з металевими огороженнями)[2].

На ділянках залізниць електрифікованих постійним струмом використовують різні типи контактних підвісок, в залежності від навантаження і інтенсивності руху, наприклад: М120+2МФ-100, М120+2МФ-100+2А185 та інші.

Навантаженням являється різного типу електричний рухомий склад (локомотиви, електропоїзди та ін.).

3.4 Модель 6-пульсного випрямного перетворювача

Проведемо моделювання трьохфазного випрямляча із 6-пульсовою схемою випрямлення. Запустимо MATLAB і викличемо пакет розширення Simulink, створимо файл нової моделі (Ctrl+N). У відкритому вікні, за допомогою блоків бібліотеки Simulink побудуємо модель для дослідження роботи 6-пульсного випрямляча. Для перенесення стандартного блоку в модель, необхідно клацнути лівої кнопкою миші на блоці, що необхідний, у вікні

«Simulink Library Browser» і, утримуючи ЛКМ, перетягнути блок у вікно моделі. Для редагування параметрів блоку слід двічі клацнути на ньому ЛКМ і внести необхідні дані.

Для побудови в середовищі Simulink розрахункової схеми та моделі випрямних перетворювачів необхідні наступні функціональні блоки, що знаходяться в бібліотеках Simulink та SimPowerSystems:

- три синусоїдальні джерела напруги AC Voltage Source, що здійснюють живлення перетворювача, імітуючи силовий трансформатор. Амплітуди фазних напруг були задані $U_A = 8165 \text{ В}$, $U_B = 8165 \text{ В}$, $U_C = 8165 \text{ В}$;

- три блоки Series RLC Branch, послідовного з'єднання опору і індуктивності з однаковими параметрами $R = 0.001 \text{ Ом}$, $L = 0.001 \text{ Гн}$, що обмежують потужність живлення;

- підсистема Measurement, що вимірює струми I_A , I_B , I_C , напругу U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} та коефіцієнт несиметрії k_{2U} ;

- трифазний двообмоточний трансформатор Three-phase Transformer (Two Windings) з первинною напругою $U_1 = 10 \text{ кВ}$, вторинною $U_2 = 2605 \text{ В}$ і потужністю $S = 11800 \text{ кВА}$;

- універсальний міст Universal Bridge з 3 плечами, вид напів-провідникових приладів – діоди, характеристики вказані відповідно випрямлячу ВТПЕД-3.15к-3.3;

- послідовне з'єднання опору і індуктивності Series RLC Branch, з параметрами $R = 0.06 \text{ Ом}$, $L = 0.005 \text{ Гн}$, що імітує реактор підстанції;

- блок Constant, стала величина, задається необхідне значення в залежності від схеми моделі;

- вимикач Breaker, який має вивід для керуючого сигналу;

- підсистема Filter, яка імітує згладжуючий пристрій;

- вольтметр Voltage, що вимірює напругу на виході випрямляча;

- амперметр Current, що вимірює струм на навантаженні;

– два блоки Series RLC Branch, які імітують контактну мережу М-120+2МФ-100, з параметрами $R = 0,35 \text{ Ом}$, $L = 0,0065$ і рейкову мережу – $R = 0,3 \text{ Ом}$, $L = 0,025$;

– блок Series RLC Branch, що імітує електричний рухомий склад, величина задається в залежності від необхідного навантаження;

– два спеціальні блоки, що виділяють амплітуду і фазу гармонік напруги і струму заданого порядку Fourier Voltage і Fourier Current, задано 48 гармонік;

– два осцилографи, що відображають осцилограми напруг і струмів на вході та виході перетворювального агрегату;

– блок Active & Reactive Power, що розраховує активну і реактивну енергію яку споживає перетворювач;

– блок RMS, виділяє діюче значення напруги;

– Add – суматор фаз гармонійних складових, знаходить різницю між фазами зсуву напруги і струму гармоніки;

– Deg to RAD, переводить градусну міру величини в радіанну міру, необхідну для обчислень тригонометричних функцій;

– два блоки тригонометричних функцій Trigonometric Function, один для обчислення косинусу, другий – синусу кута;

– два блоки множення Product, знаходять добуток значень сигналів, що надходять на його вхід;

– два блоки суматора Sum, знаходять суму значень сигналів, що надходять на його вхід;

– шість блоків цифрового дисплею, відображають значення сигналу у вигляді числа;

– два блоки To Workspace – блоки передачі значень сигналів в робочий простір MATLAB, передають значення напруг і струмів гармонік.

Побудована модель 6-пульсового випрямного перетворювача у робочому вікні Simulink відображена на рисунку 3.5.

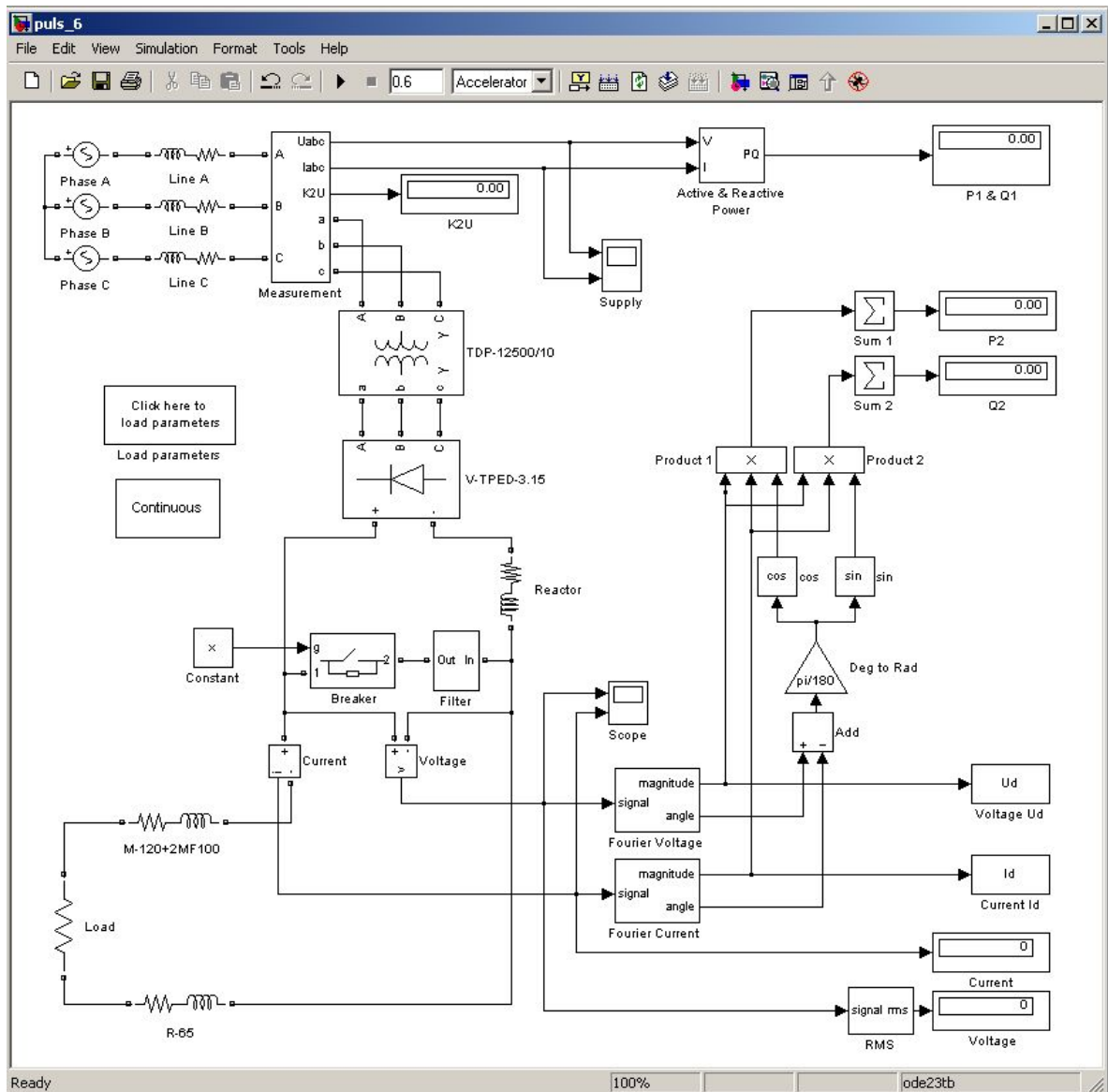


Рисунок 3.5 – Модель 6-пульсового випрямного перетворювача

Блок під назвою «Load parameters» призначений для завантаження m-файлу, що являється текстовим документом і містить список команд необхідних для завантаження значень параметрів блоків моделі, а також проведення запуску моделювання. Блок Continuous є інструментом графічного інтерфейсу користувача і забезпечує розв'язок наступних завдань: розрахунок режиму, що встановився; дискретизація моделі; завдання початкових умов; ініціалізація трифазних схем електричних машини, таким чином, щоб розрахунок почався з режиму, що встановився; аналіз схеми за допомогою інструмента Simulink Lti-viewer; визначення повного опору (імпедансу) ланцюга;

виконання гармонійного аналізу; створення звіту; створення файлу характеристик намагнічування для моделі нелінійного трансформатора.

Розглянемо підсистему Measurement (рис.3.6), що не являється стандартним блоком бібліотеки Simulink, а розроблений спеціально для знаходження коефіцієнта несиметрії k_{2U} .

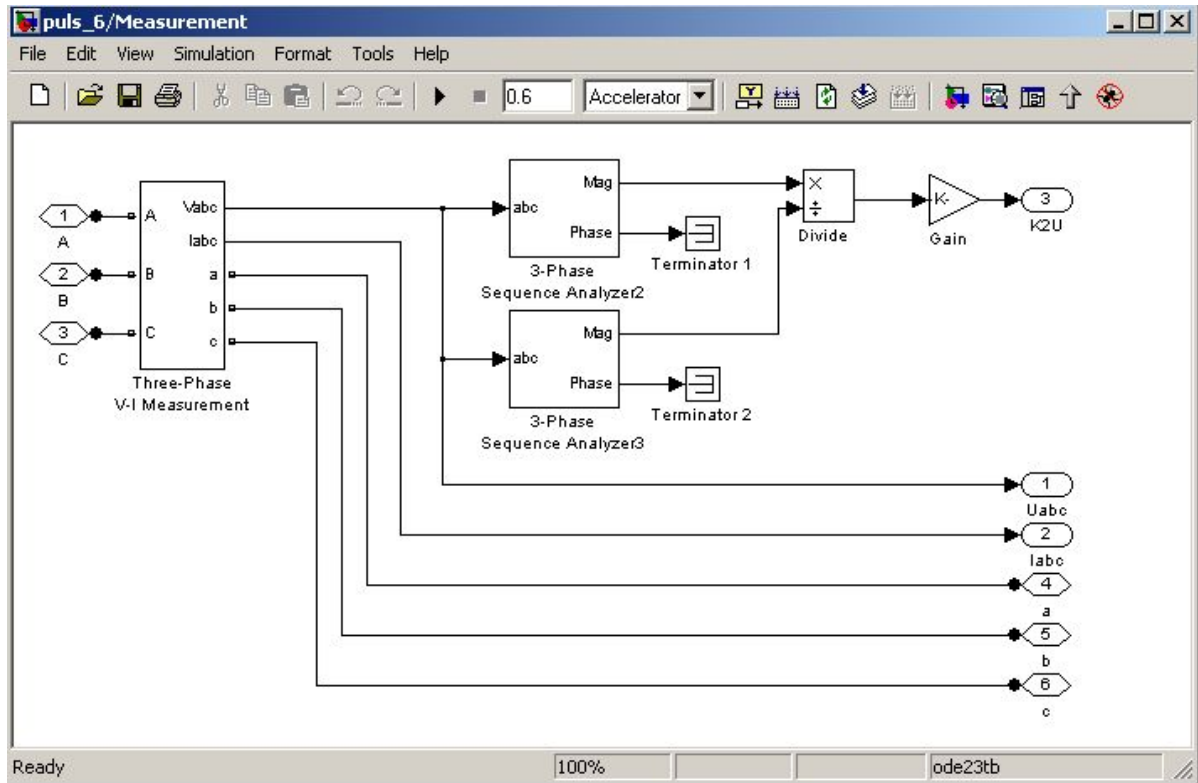


Рисунок 3.6 – Підсистема Measurement моделі 6-пульсового випрямного перетворювача

Підсистема складається з блоку Three-Phase V-I Measurement, що вимірює струми і напруги в мережах 3-фазного струму, двох блоків 3-Phase Sequence Analyzer, які знаходять: $U_{2(1)}$ – діюче значення напруги оберненої послідовності основної частоти, $U_{1(1)}$ – діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти трьохфазної системи напруг. Блок Divide виконує функцію ділення вхідних сигналів, а блок Gain множення на 100. Таким чином при запуску

моделі, за допомогою цієї підсистеми виконується знаходження коефіцієнта несиметрії: $k_{2U} = U_{2(1)} / U_{1(1)} \cdot 100$.

Розглянемо підсистему Filter (рис.3.7), вона являє собою одноланковий резонансний згладжуючий фільтр тягової підстанції, що складається з паралельного з'єднання чотирьох віток блоків Series RLC Branch, що імітують послідовне з'єднання конденсатора і котушки індуктивності, та вітки Series RLC Branch, що імітує конденсатор.

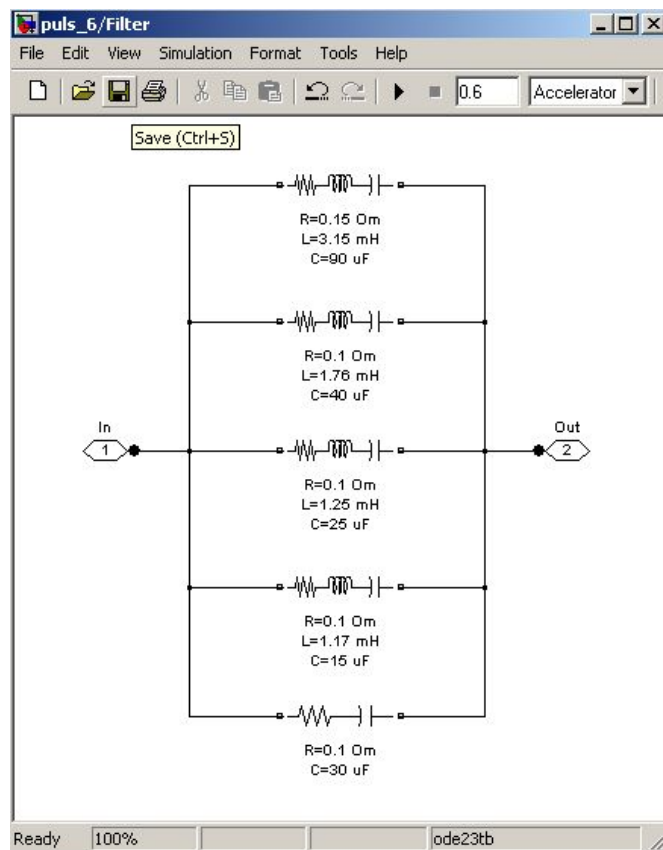


Рисунок 3.7 – Підсистема Filter моделі 6-пульсового випрямного перетворювача

Параметри одноланкового резонансного згладжуючого фільтру вказані на рисунку 3.7.

Набір блоків математичних функцій, що знаходяться в правій частині моделі призначені для знаходження активної та реактивної потужності, яка

споживається навантаженням. При запуску моделі виконується підрахунок формул активної ($P=U^{(0)} \cdot I^{(0)} + U^{(1)} \cdot I^{(1)} \cdot \cos(\varphi_U^{(1)} - \varphi_I^{(1)}) + \dots + U^{(n)} \cdot I^{(n)} \cdot \cos(\varphi_U^{(n)} - \varphi_I^{(n)})$) та реактивної ($Q=U^{(1)} \cdot I^{(1)} \cdot \sin(\varphi_U^{(1)} - \varphi_I^{(1)}) + \dots + U^{(n)} \cdot I^{(n)} \cdot \sin(\varphi_U^{(n)} - \varphi_I^{(n)})$) потужності несинусоїдальної напруги.

Блок Constant призначений для подачі сигналів на вхід вимикача Breaker. При значенні сигналу блока Constant рівному «0» – вимикач знаходиться у відключеному положенні і фільтр не приймає участі у роботі схеми. Якщо значення сигналу блока Constant стає більшим за «0» то вимикач включає в схему згладжуючий пристрій [15].

Перед моделюванням необхідно задати параметри моделювання в відповідному меню моделі “Simulation\Simulation Parameters...” (Ctrl+E) розділ Solver. За замовчуванням вибирається вирішувач ode45 (Dormand-Prince), його настійно рекомендується змінити на ode23tb (stiff/TR-BDF2), що більш підходить для розв'язку розглянутого класу завдань. Поліпшити точність розрахунків можна, якщо задати вручну максимальний розрахунковий крок (max step size) - рекомендується не більш $1e-5$ при частоті мережі 50 Гц [16].

Для правильних розрахунків важливо також коректно задати час закінчення розрахунків (stop time). Час розрахунків повинний бути завжди кратний півперіоду напруги первинного джерела, у цьому випадку всі інтегральні характеристики визначаються вірно. Слід пам'ятати, що конденсатор фільтра спочатку розряджений і моделюється процес його заряду, який не встигне завершитись і система не вийде у квазіустановившийся режим, якщо буде обраний малий час розрахунків.

На рисунку 3.8 зображено вікно налагодження параметрів моделювання в якому необхідно встановлювати значення у відповідності до вимог точності та швидкості моделювання.

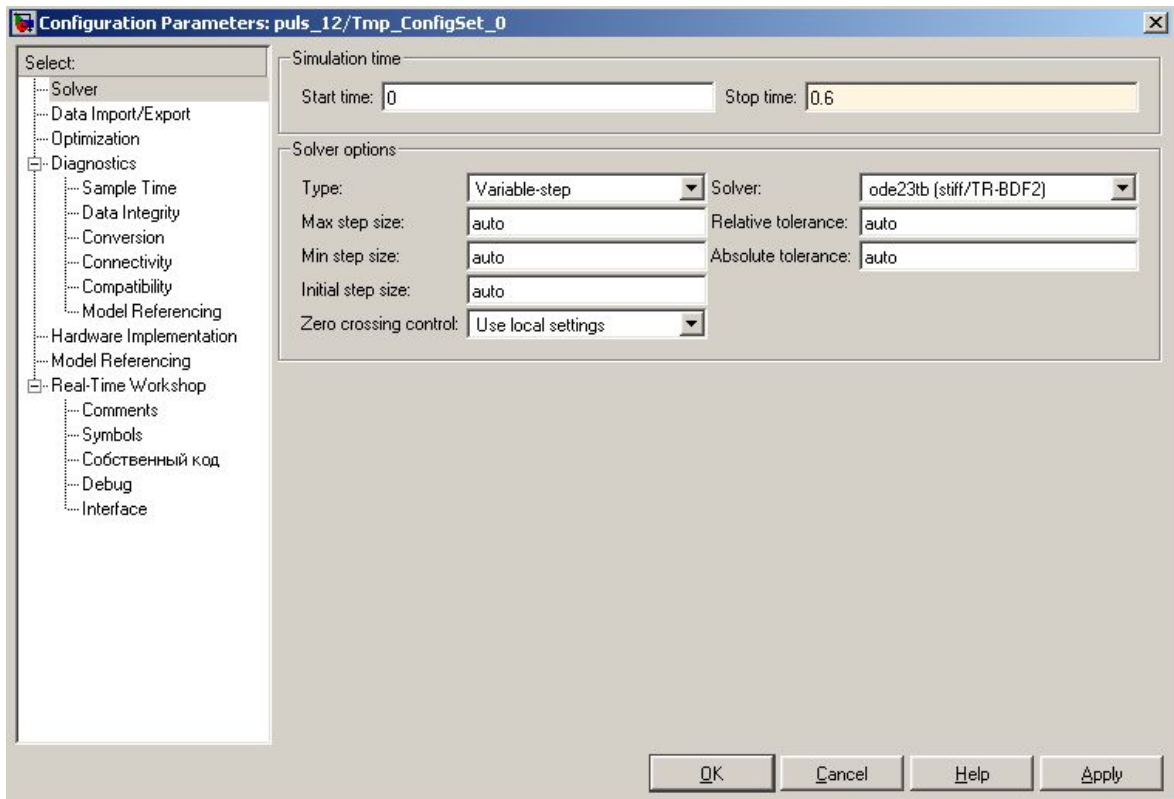


Рисунок 3.8 – Вікно налагодження параметрів моделювання

3.5 Модель 12-пульсного випрямного перетворювача

При моделюванні 12-пульсної схеми випрямлення було використано більша частина тих блоків, що вже використовувались при моделюванні 6-пульсної схеми випрямлення. Були змінені блоки які принципово відрізняються у схематичному виконанні цих схем. Були використані такі нові блоки:

- трифазний триобмоточний трансформатор Three-phase Transformer (Three Windings) з первинною напругою $U_1 = 10$ кВ, вторинною $U_{2\Delta} = 1305$ В і $U_{2Y} = 1305$ В, потужністю $S = 11400$ кВА;
- два універсальних моста Universal Bridge з 3 плечами, вид напів-провідникових приладів – діоди, характеристики вказані відповідно випрямлячу ВТПЕД-3.15к-3.3;
- підсистема Filter, яка імітує згладжуючий пристрій.

Всі інші блоки подібні до блоків моделі 6-пульсової схеми випрямлення. Побудована модель 12-пульсового випрямного перетворювача у робочому вікні Simulink відображена на рисунку 3.9.

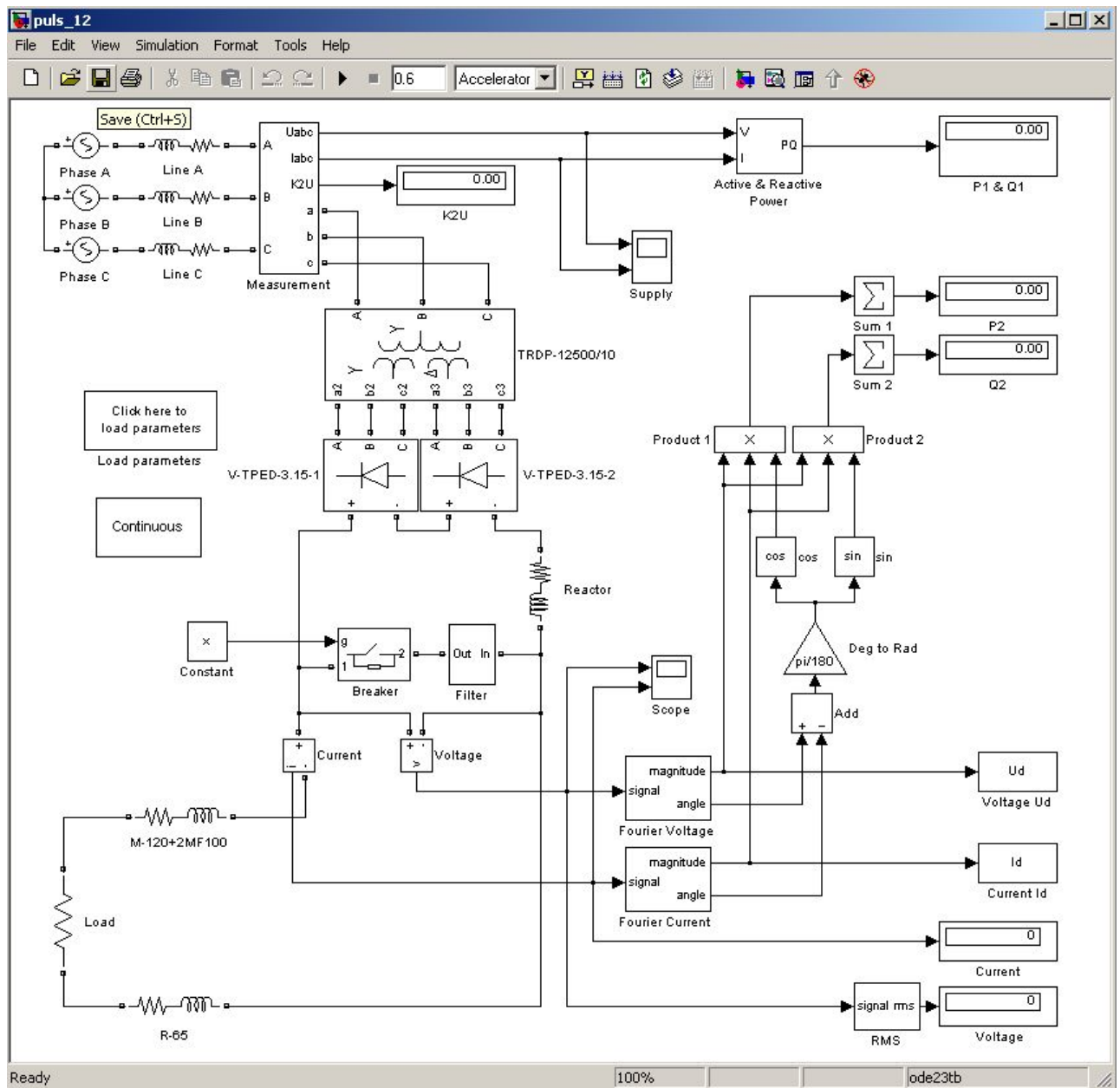


Рисунок 3.9 – Модель 12-пульсового випрямного перетворювача

Розглянемо підсистему Filter (рисунок 3.10), вона являє собою одноланковий резонансно-аперіодичний згладжуючий фільтр тягової підстанції, що складається з паралельного з'єднання двох віток блоків Series RLC Branch,

одна вітка імітує послідовне з'єднання конденсатора і котушки індуктивності, інша вітка – конденсатор.

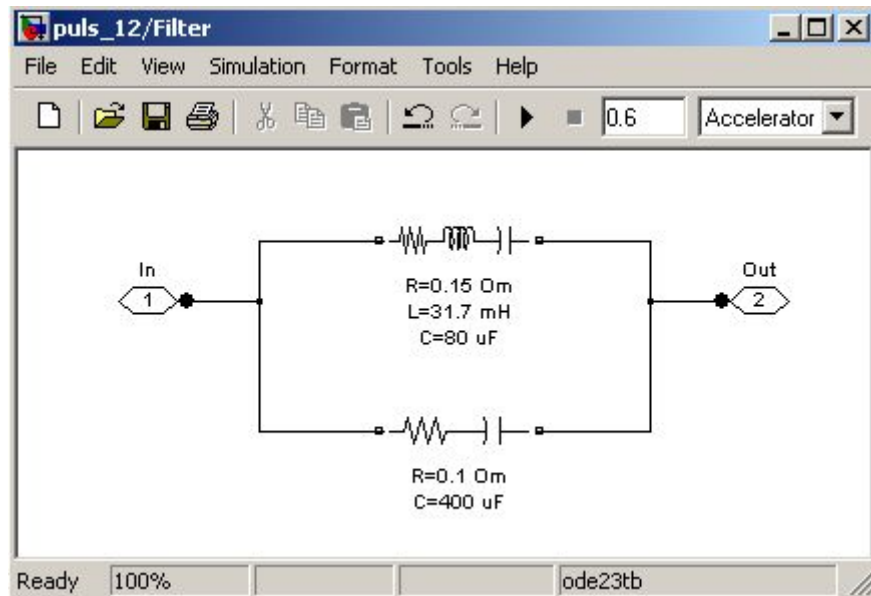


Рисунок 3.10 – Підсистема Filter моделі 12-пульсового випрямного перетворювача

Параметри одноланкового резонансно-аперіодичного згладжуючого фільтру вказані на рисунку 3.10.

Параметри налагодження процесу моделювання використанні аналогічно моделі 6-пульсового випрямного перетворювача.

4 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ФІЛЬТРІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІЙНИХ СКЛАДОВИХ

4.1 Проведення моделювання випрямних перетворювачів в діапазоні робочих струмів тягової підстанції

В даній роботі поставлена задача створення моделей 6-пульсної і 12-пульсної схеми випрямлення та за їх допомогою необхідно дослідити зовнішні характеристики випрямних перетворювачів, визначити наявність гармонічних спотворень у кривій випрямленої напруги, визначити вплив несиметричного живлення мережі та ефективність використання згладжуючих фільтрів. Зовнішня характеристика випрямляча являє собою залежність середнього значення напруги на його виході від середнього значення струму, моделі розроблені для розрахунку цих величин, а також розкладання кривих випрямленої напруги і струму навантаження на гармонійні складові.

Запуск розрахунку моделі виконується за допомогою вибору пункту меню Simulation Start, або інструмента ► на панелі інструментів вікна моделі. Процес розрахунків можна завершити достроково, вибравши пункт меню Simulation/Stop або інструмент у. Розрахунки також можна зупинити (Simulation => Pause) і потім продовжити (Simulation Continue). Після закінчення процесу моделювання за допомогою блоку осцилографа Scope, двічі натиснувши по зображенні його блоку, можна розглянути криву напруги та струму. На рисунку 4.1 зображено вигляд вікна осцилографа Scope моделі 6-пульсної схеми випрямлення, він відображає напругу на виході випрямляча, та струм на навантаженні.

У вікні осцилографа червоним кольором позначені значення при схемі з фільтром, а синім кольором – без фільтру. На графіках видно, що при наявності фільтра відбувається згладження вихідної напруги, але при цьому збільшується час перехідного процесу, що викликано включенням реактивних елементів у схему.

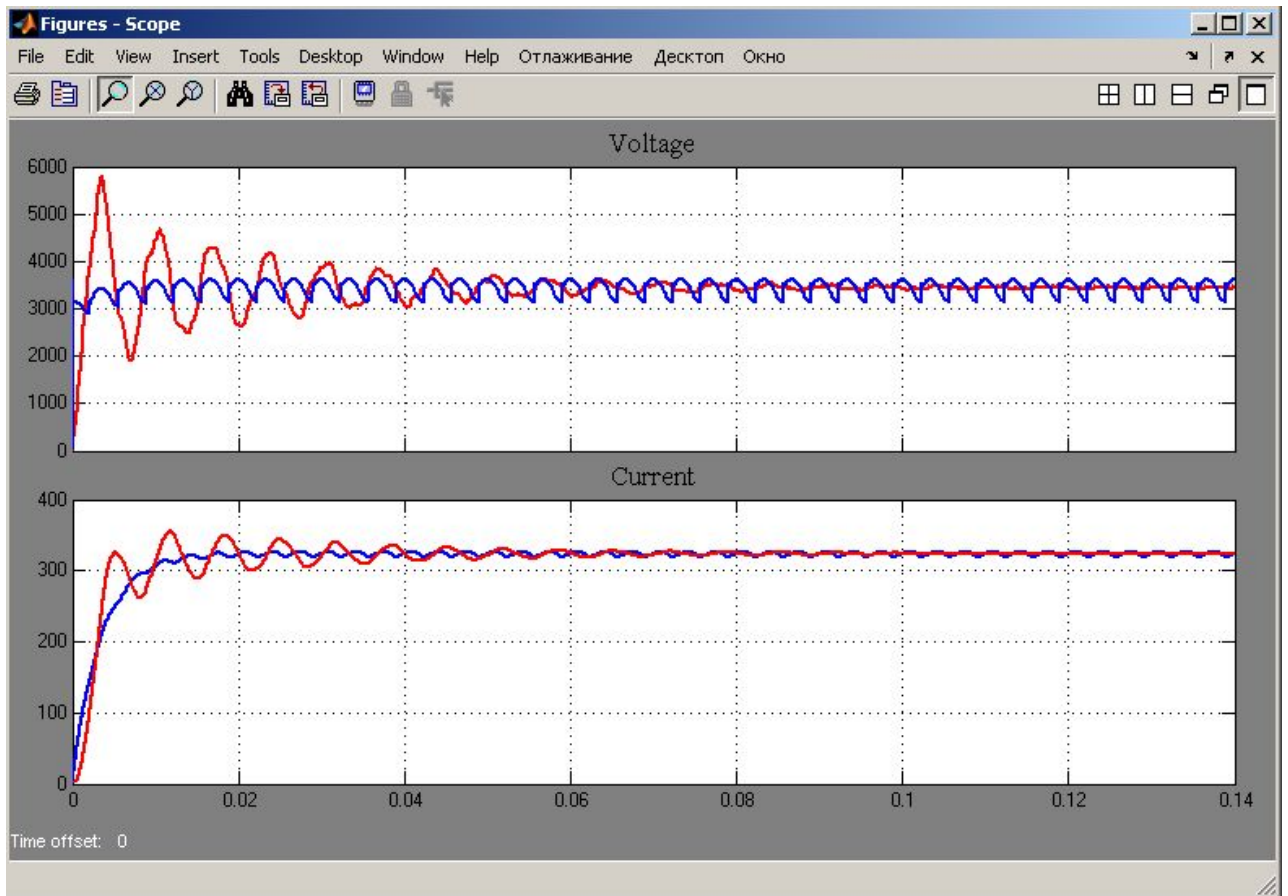


Рисунок 4.1 – Вікно осцилографа Scope

Викличемо вікно блоку «Continuous» для чого двічі клацнемо на ньому ЛКМ, виберемо розділ FFT Analysis, за його допомогою крива напруги розкладається в ряд Фур'є і проводиться гармонійного аналіз. Виведемо амплітудний спектр випрямленої напруги випрямного пристрою, налаштування вікна відображає рисунок 4.2. Дослідимо гармонічні складові в рамках від 0 до 2000 Гц. Натиснувши клавішу Display у вікні з'явиться період імпульсів напруги та відображені у процентному відношенні гармонічні складові. Оскільки крива напруги несиметрична щодо осі часу, то в ній відсутні непарні гармоніки. Крім основної гармонійної, свій внесок вносять інші гармонійні складові, номери гармонік залежать від схеми випрямлення перетворювального агрегату.

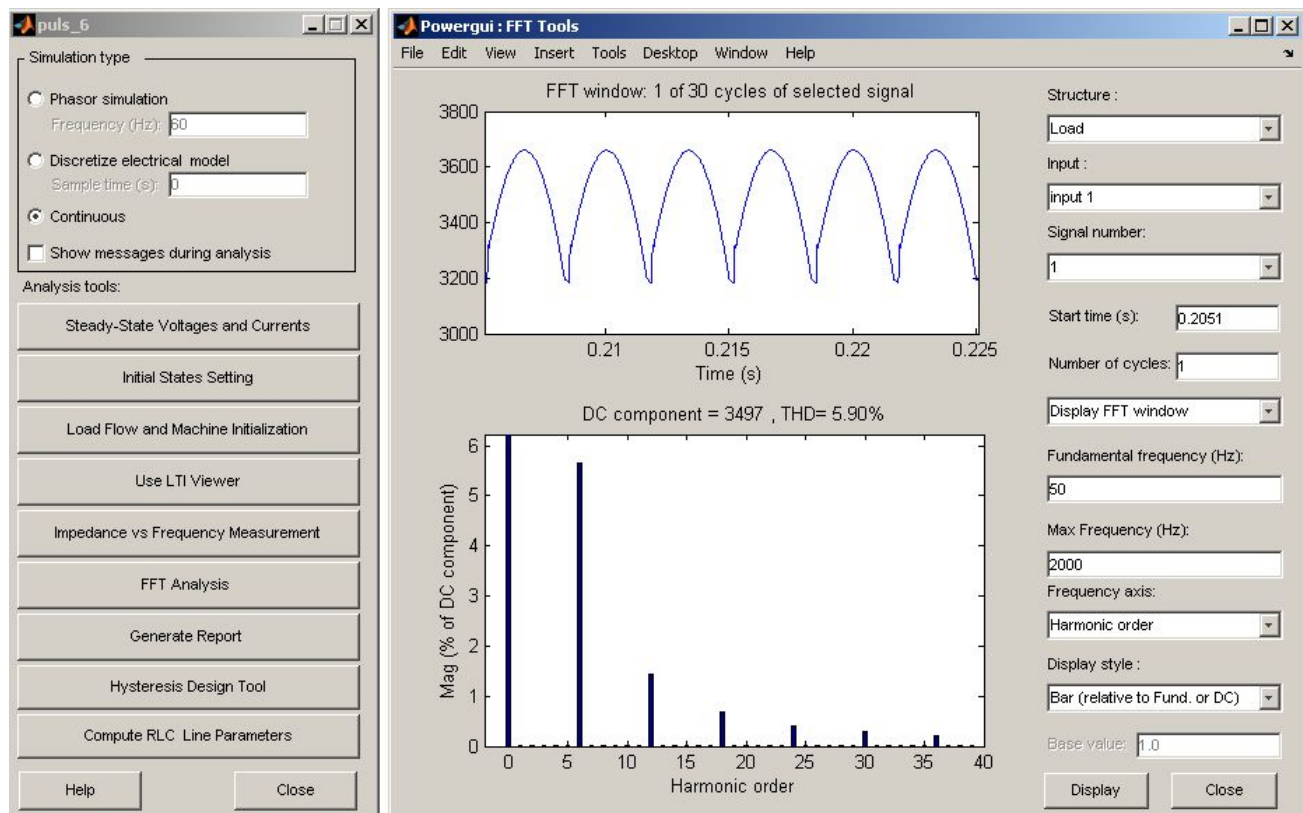


Рисунок 4.2 – Розділ FFT Analysis блоку «Continuous» з даними гармонійного аналізу кривої напруги

Побудуємо зовнішню (навантажувальну) характеристику випрямляча в пакеті MATLAB. Для її побудови необхідно отримати декілька розрахункових точок при різних значеннях навантаження, а це неможливо якщо провести запуск моделі лише один раз. Оскільки при однократному моделюванні параметри схеми повинні бути незмінні, то слід створити m-файл у якому буде задаватись деяка змінна і модель буде запускатися необхідну кількість разів з різними значеннями цієї змінної. М-файл представляє собою текстовий файл, що зчитується системою MATLAB, він містить перелік команд для управління процесу моделювання. У нашому випадку стоїть завдання дослідити випрямні перетворювачі при різних режимах роботи при яких змінюється схема та параметри моделі. Тому введемо в моделі декілька змінних (рисунок 4.3) в параметри блоків: у вікні налаштування блоку «Load», що імітує навантаження

задамо змінну – R_d , блоку «Phase A» задамо змінну U_a , «Phase B» – U_b , у вікні налаштування блоку «Constant» – змінну x .

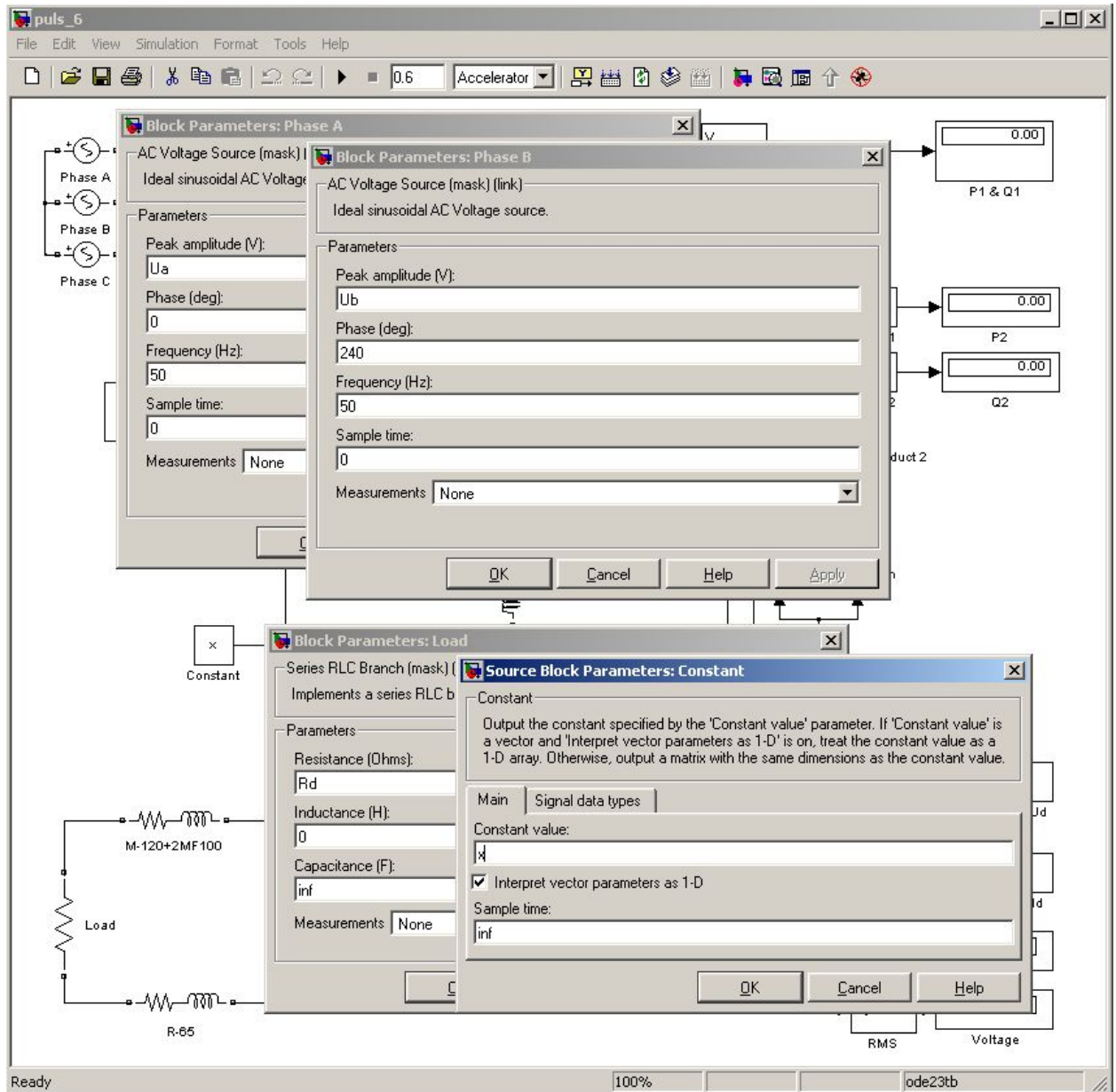


Рисунок 4.3 – Введення змінних у вікна параметрів блоків моделі

Тепер створимо m-файл в якому задамо для змінних величини, що необхідні для отримання результатів поставлених завдань. Після запуску m-файлу відбувається багаторазове моделювання зі збереженням даних. Через деякий час програма завершує роботу, масиви значень напруги U_d і струму I_d , а

також графіки їх залежності зберігаються у файли, що будуть знаходитись у робочій папці системи MATLAB.

В процесі запусків моделей величини змінних будуть задаватись ті, що прописані у тексті цього m-файлу.

Програма, що написана у m-файлі, складає три цикли: цикл міні навантаження, цикл зміни несиметрії живлення та цикл зміни підключення фільтра. Для проведення всіх необхідних досліджень був написаний текст програми, що представлений у додатку А. Програма цього m-файлу виконує прорахунок для 6-пульсної схеми випрямлення. Для 12-пульсної схеми випрямлення був створений окремий m-файл з подібним текстом програми.

Щоб запустити m-файл необхідно у командному вікні MATLAB прописати команду «run 'LONG_6'» (де LONG_6 – назва створеного m-файла) і натиснути клавішу Enter, або двічі натиснути на блок моделі під назвою «Load parameters». Після цього система MATLAB почне у відповідній черзі виконувати команди прописані в тексті програми.

Спочатку програма задає значення змінної $x=0$, що означає відключення фільтру, потім присвоюються значення змінним $U_a = 8165$, $U_b = 8165$, що створює параметри моделювання симетричного живлення, далі проводиться 11 запусків моделювання 6-пульсної схеми випрямлення з різними значеннями змінної R_d . Після проведення всіх прорахунків проходить зберігання результатів. Таким самим чином модель запускається для несиметричного живлення з коефіцієнтом несиметрії 1...4%, що досягається присвоєнням значень змінних U_a , U_b . Потім програма задає значення змінної $x=1$, що означає включення фільтру, проходить моделювання схем зі значеннями змінних аналогічно моделюванню без фільтра.

В результаті, після виконання всіх команд m-файлу в робочій папці «work» будуть збережені всі результати проведених моделювань. Дані збережені у текстових файлах можна передавати для використання в інших

програмах, а збереженні графічні файли редагувати за допомогою системи MATLAB та перезберігати в інших форматах.

4.2 Результати моделювання для симетричного живлення мережі

Розглянемо результати моделювання схем випрямлення. Графіки результатів моделювання зберігається у графічному файлі з розширенням «.fig», що зчитується системою MATLAB. Він представляє собою вікно в якому знаходиться графік зовнішньої характеристики та графік зміни гармонічних складових випрямленої напруги.

На рисунку 4.4 зображено графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і симетричному живленні.

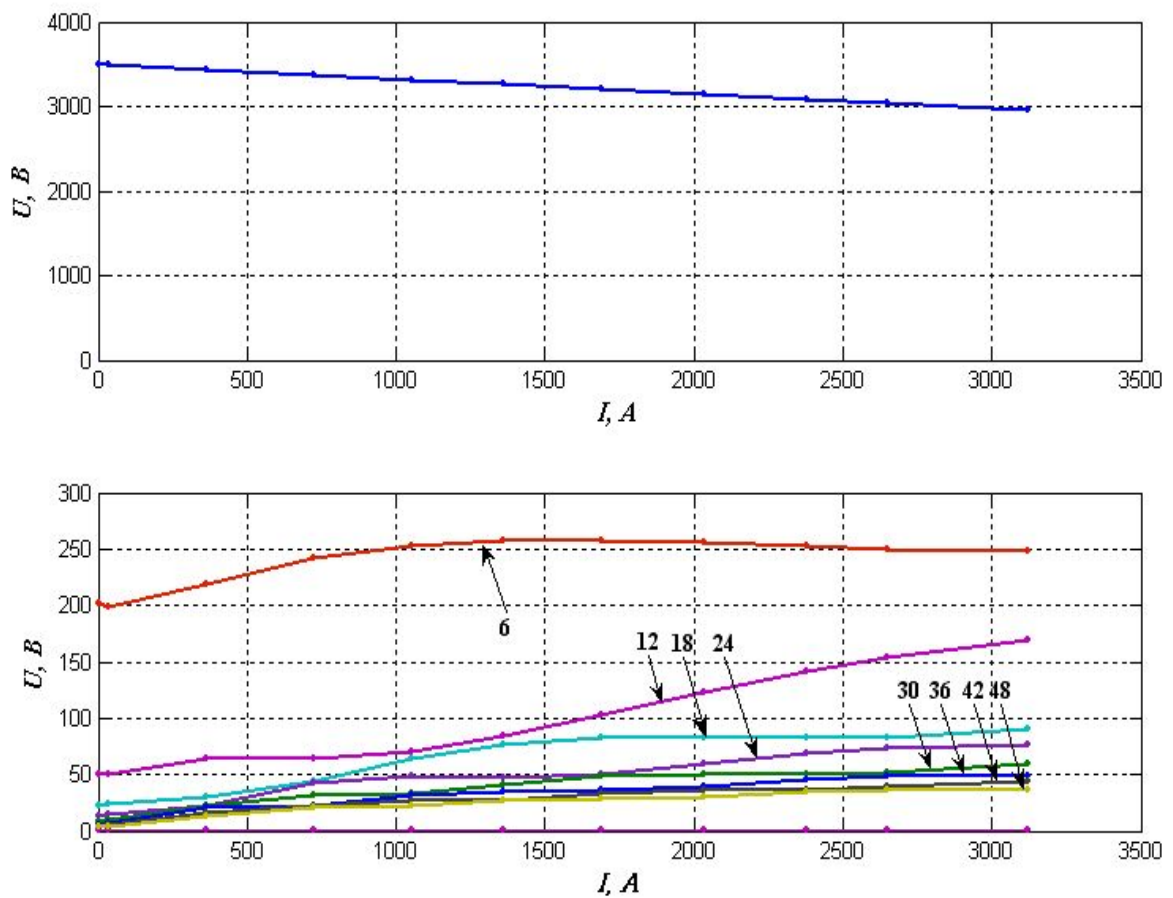


Рисунок 4.4 – Графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і симетричному живленні

На верхньому графіку зображено зовнішню характеристику, а на нижньому зміну гармонічних складових при зміні навантаження. Цифрами на графіку позначені номери гармонік напруги. Відзначимо, що зовнішня характеристика має спадаючий вигляд, це викликане збільшенням спаду напруги на напівпровідникових приладах випрямляча.

На графіку видно, що для 6-пульсної схеми гармонічними складовими являються гармоніки кратні шести, їх величина зростає зі збільшенням навантаження. Найбільші амплітуди у шостої та дванадцятої гармоніки.

На рисунку 4.5 зображено графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення з фільтром і симетричному живленні.

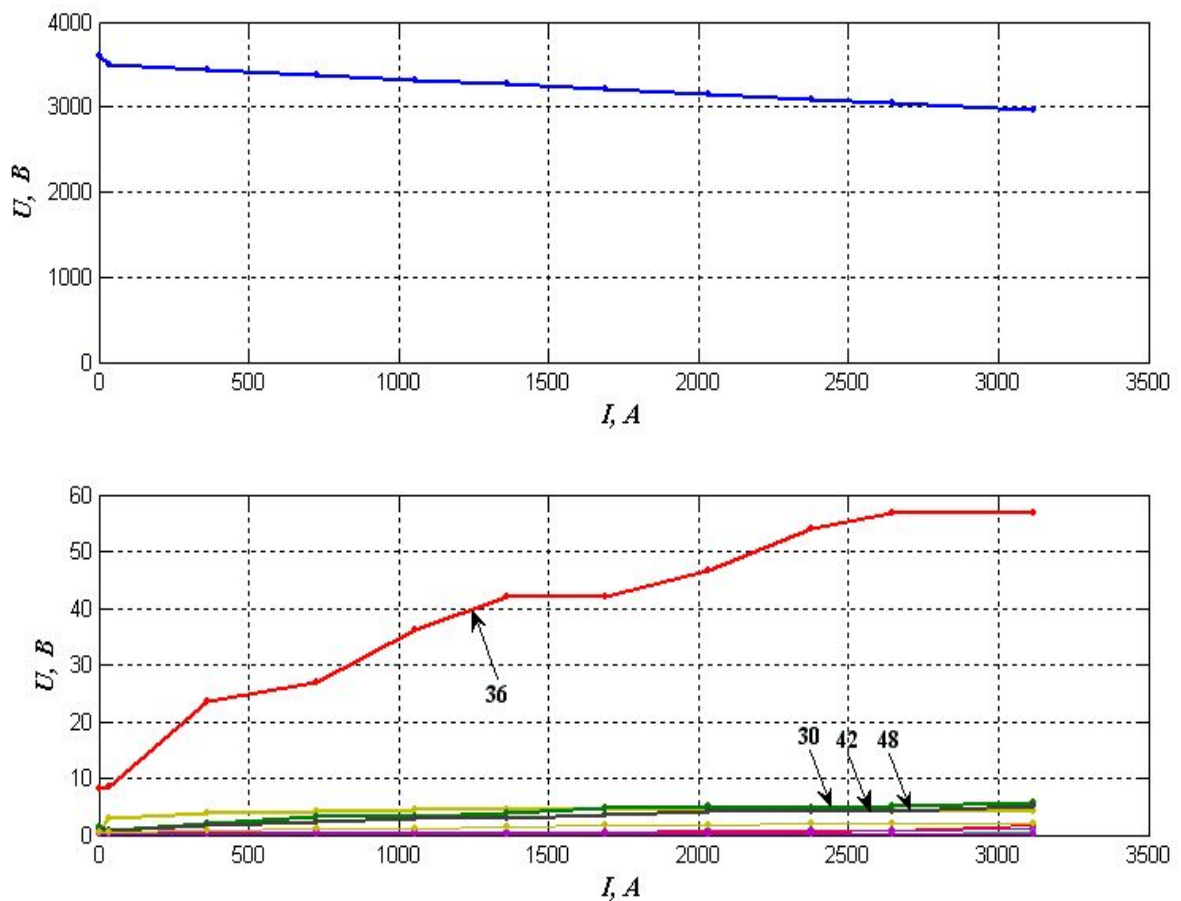


Рисунок 4.5 – Графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення з фільтром і симетричному живленні

На графіку видно дію згладжуючого пристрою, що фільтрує частину гармонічних складових. Видно, що використання згладжуючого пристрою на тягових підстанціях зменшує амплітуди гармонічних складових випрямленої напруги, на які налаштовані вітки фільтру.

На рисунку 4.6 зображено графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і симетричному живленні.

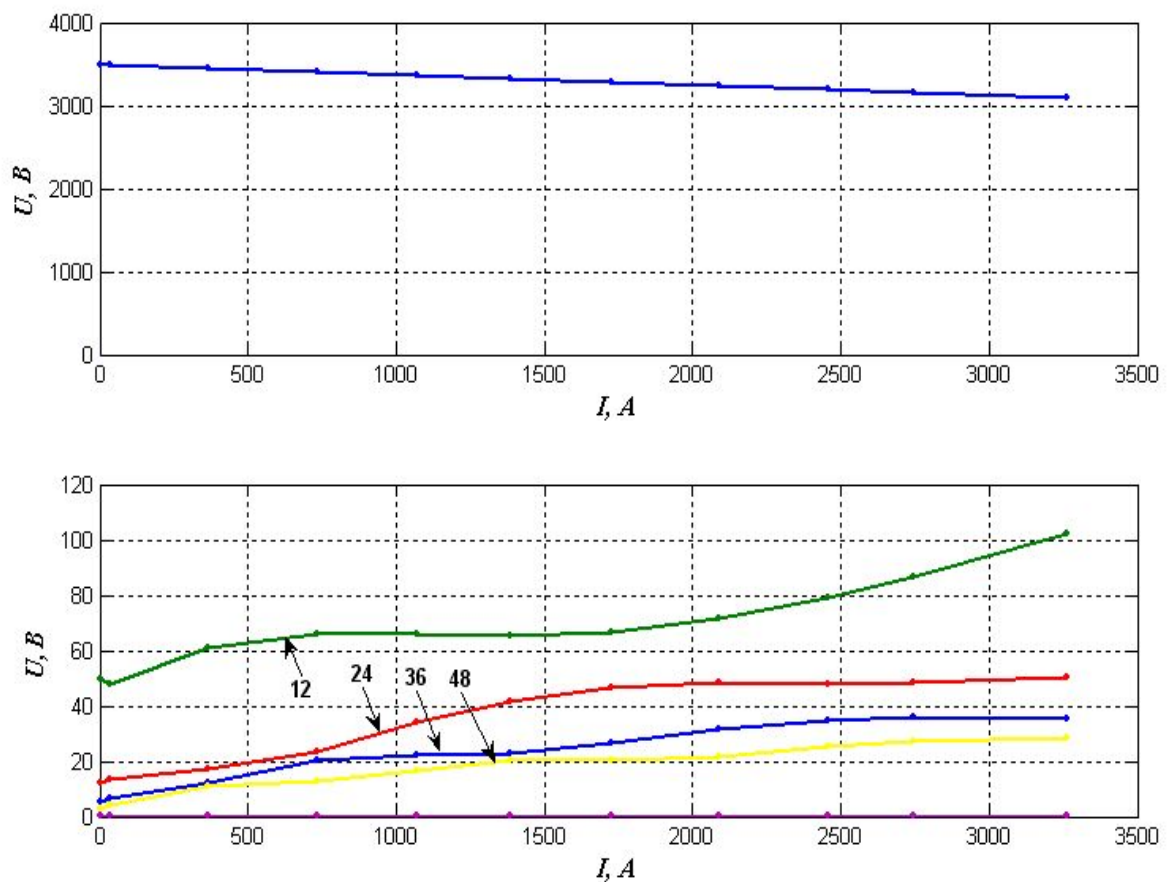


Рисунок 4.6 – Графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і симетричному живленні

На графіку видно, що для 12-пульсної схеми гармонічними складовими являються гармоніки кратні дванадцяти, їх величина зростає зі збільшенням навантаження. Найбільші амплітуди у 12, 24, 36 та 48 гармоніки.

На рисунку 4.7 зображено графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення з фільтром і симетричному живленні.

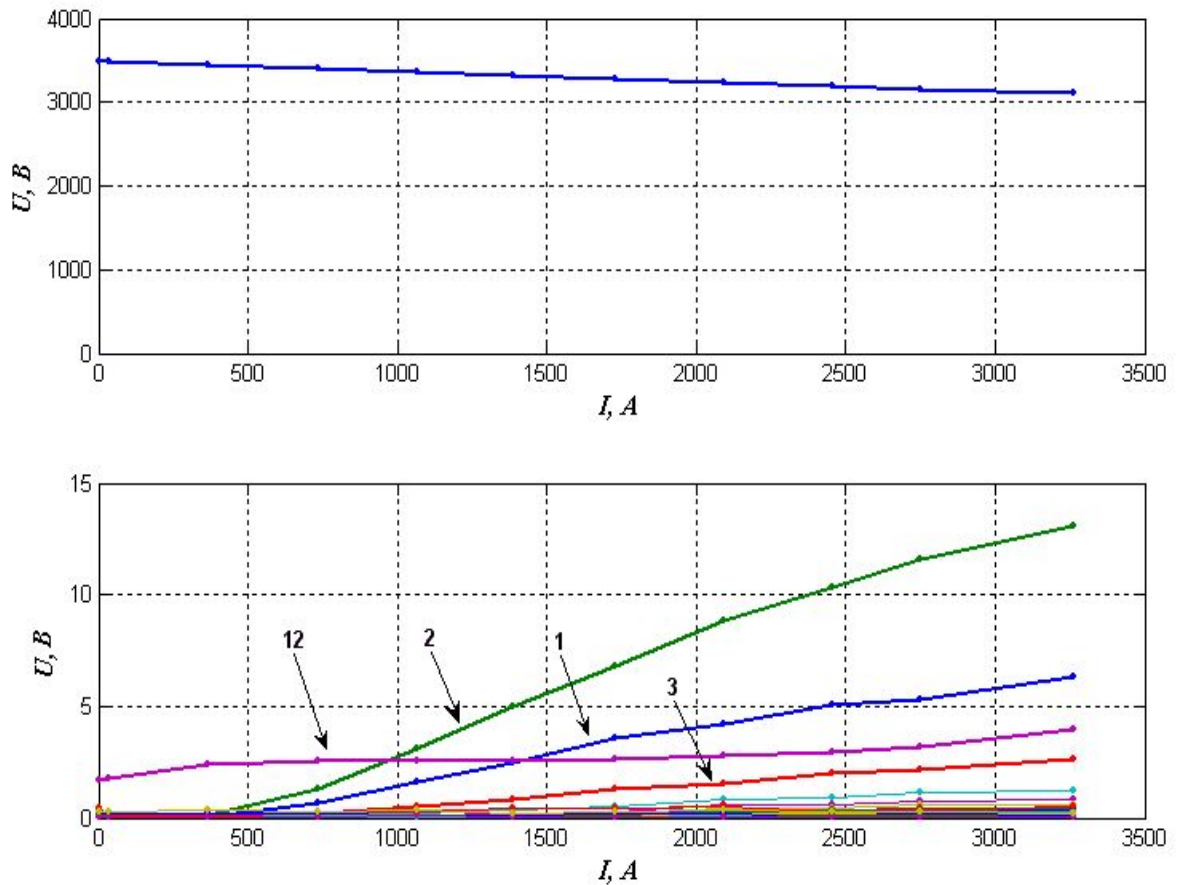


Рисунок 4.7 – Графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення з фільтром і симетричному живленні

На графіку видно, що використання згладжуючого пристрою на тягових підстанціях зменшує амплітуди гармонічних складових випрямленої напруги, на які налаштовані вітки фільтру, але при цьому з'являються неканонічні гармонічні складові – 1, 2 і 3 гармоніки.

4.3 Результати моделювання для несиметричного живлення мережі

Розглянемо результати моделювання схем випрямлення при несиметричному живленні та дослідимо його вплив на гармонічний склад випрямленої напруги.

4.3.1 Несиметричне живлення мережі 1 %

На рисунку 4.8 зображено графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 1 %.

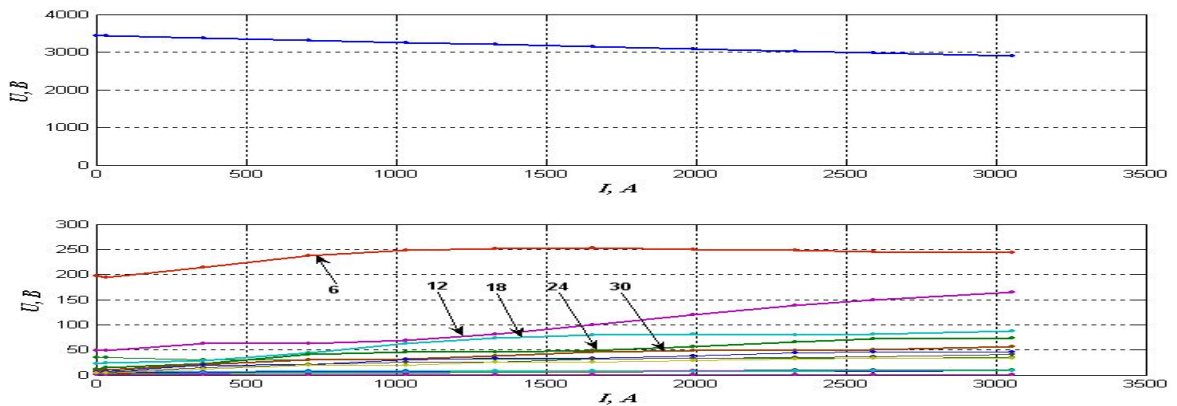


Рисунок 4.8 – Графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 1 %

На графіку видно, що несиметрія створює появу неканонічних гармонік, але амплітуда їх при несиметрії в 1 % не значна в порівнянні з основними гармоніками.

На рисунку 4.9 зображено графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні 1 %.

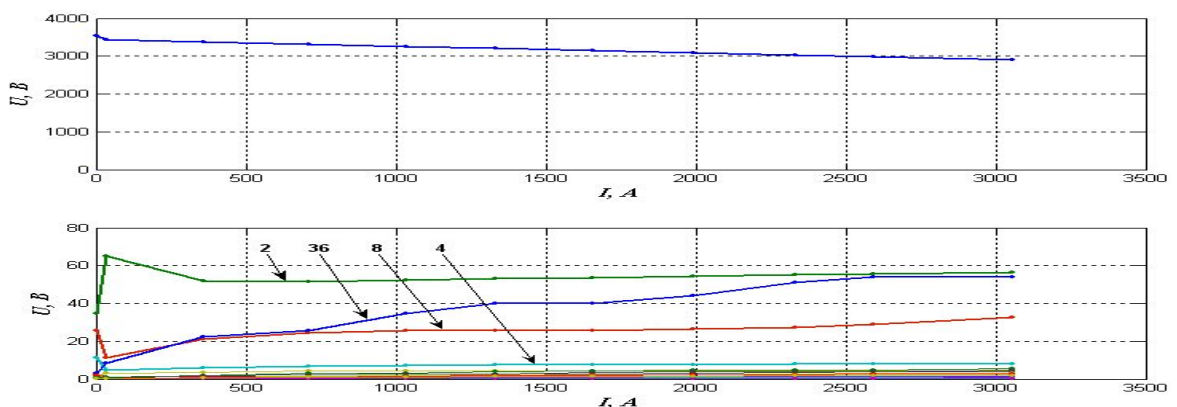


Рисунок 4.9 – Графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні мережі 1 %

При застосуванні згладжуючого пристрою амплітуди основних гармонік значно зменшуються, але з'являються неканонічні гармоніки – 2, 8 та 4 гармоніка.

На рисунку 4.10 зображено графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 1 %.

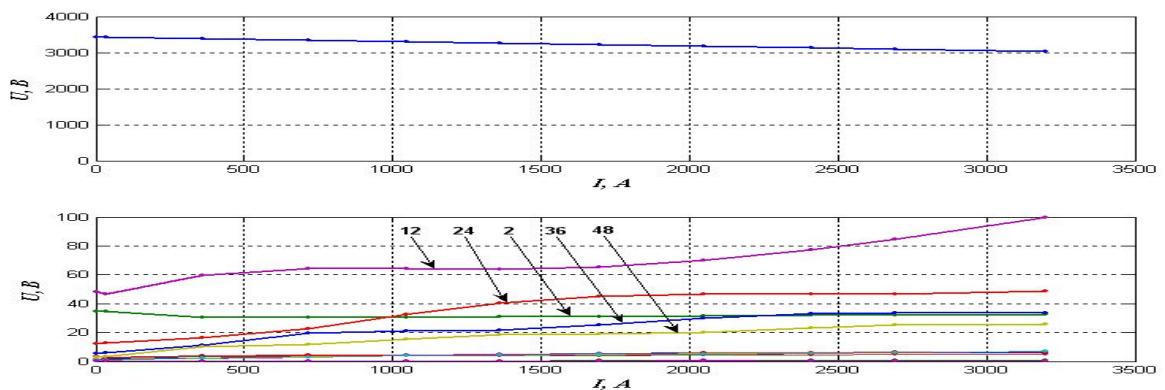


Рисунок 4.10 – Графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 1 %

На рисунку видно, що несиметрія спричинила появу неканонічної 2-ої гармоніки ряду.

На рисунку 4.11 зображено графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні 1 %.

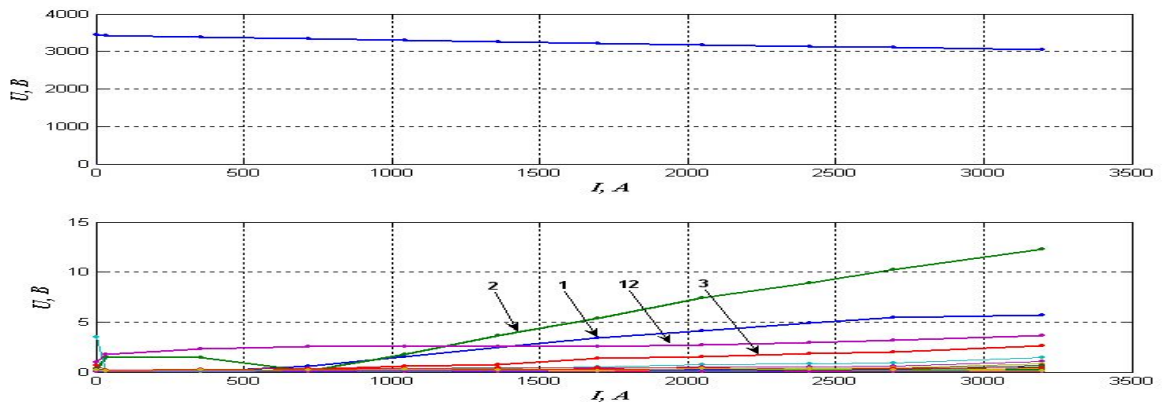


Рисунок 4.11 – Графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні мережі 1 %

Застосування згладжуючого пристрою знижує спотворення випрямленої наруги, але при збільшенні навантаження зростають амплітуди 1, 2 і 3 неканонічних гармонік.

4.3.2 Несиметричне живлення мережі 2 %

На рисунку 4.12 зображено графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 2 %.

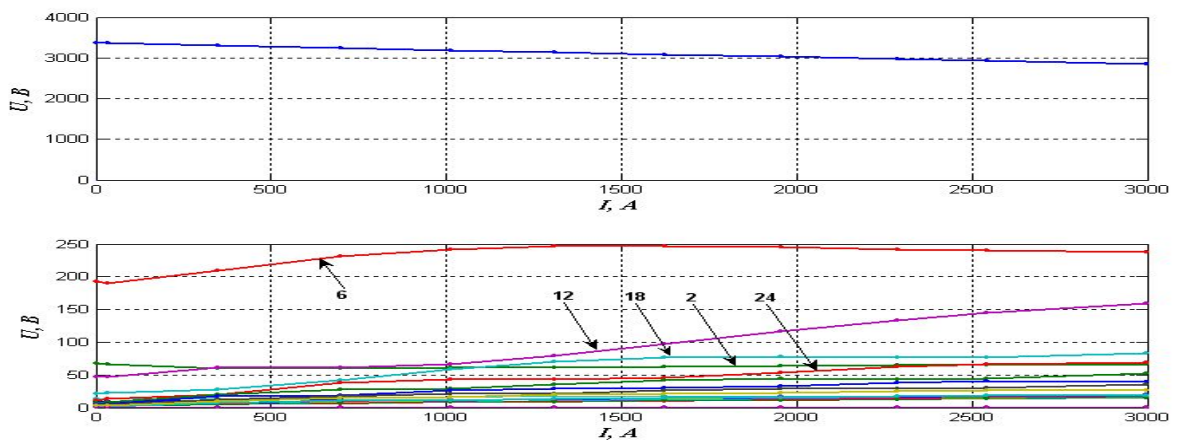


Рисунок 4.12 – Графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 2 %

На рисунку видно, що несиметрія спричинила зростання гармонічного спотворення кривої напруги.

На рисунку 4.13 зображено графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні 2 %.

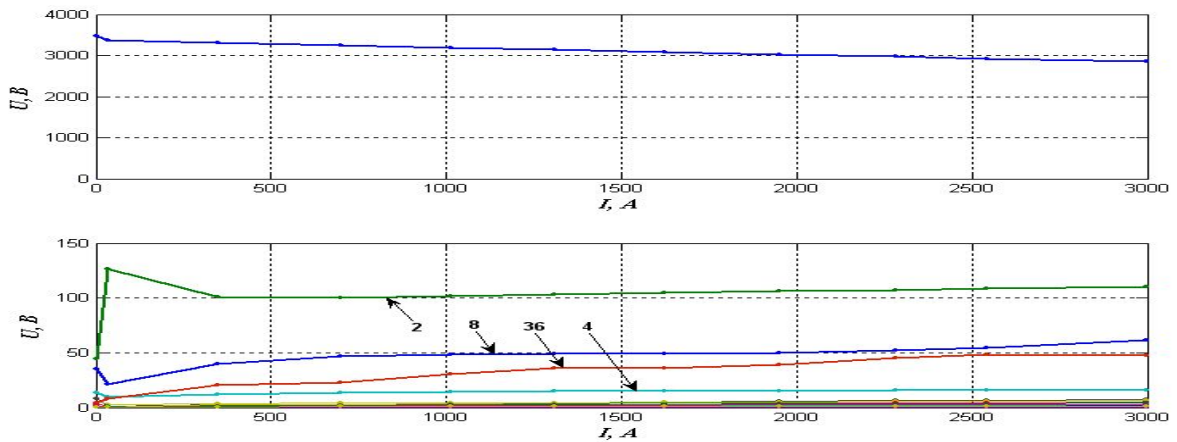


Рисунок 4.13 – Графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні мережі 2 %

Застосування згладжуючого пристрою призводить до зменшення гармонічних складових, але з'являються неканонічні гармонічні складові.

На рисунку 4.14 зображено графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 2 %.

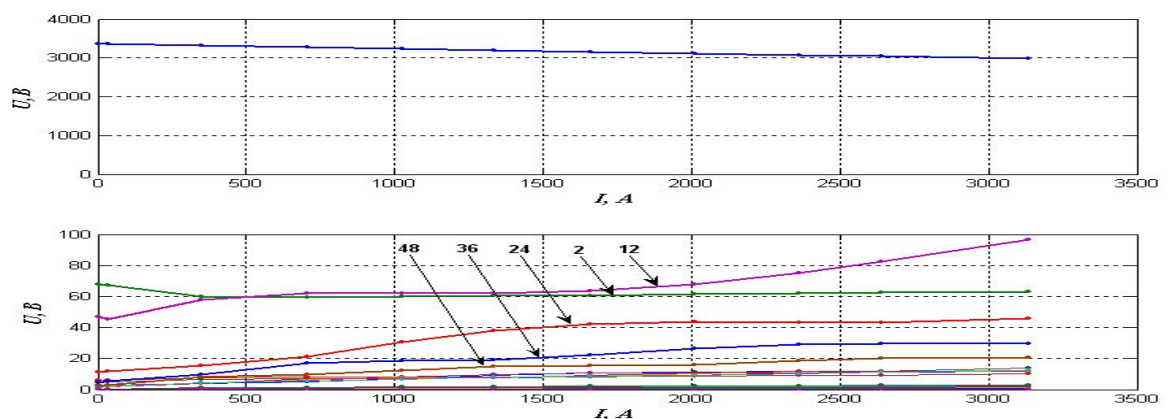


Рисунок 4.14 – Графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 2 %

На рисунку 4.14 видно, що при несиметричному живленні мережі 2 % значно збільшується амплітуда 2-гої гармоніки.

На рисунку 4.15 зображено графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні – 2 %.

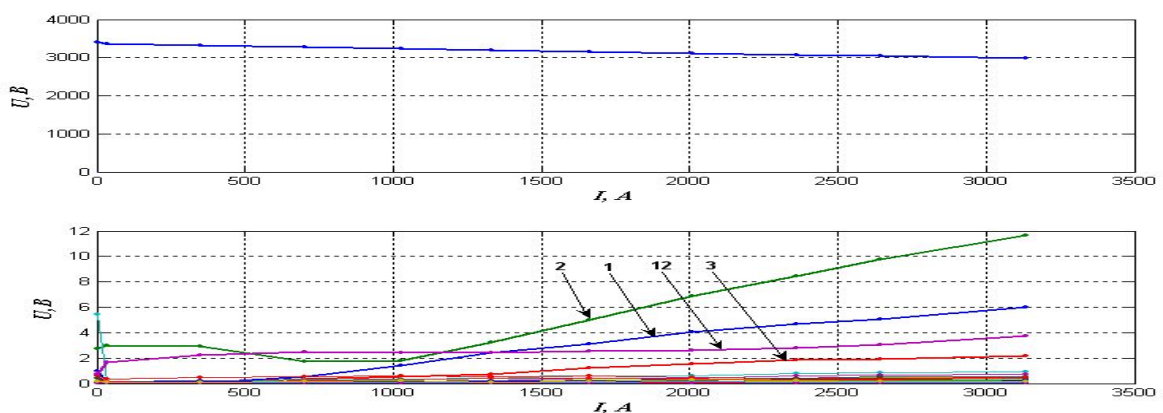


Рисунок 4.15 – Графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні мережі 2 %

Застосування згладжуючого пристрою призводить до зменшення гармонічних складових, але з'являються неканонічні гармонічні складові.

4.3.3 Несиметричне живлення мережі 3 %

На рисунку 4.16 зображено графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 3 %, на ньому видно, що зростає велика кількість гармонік, але їх амплітуда не велика, вирізняється лише 2 гармонічна складова.

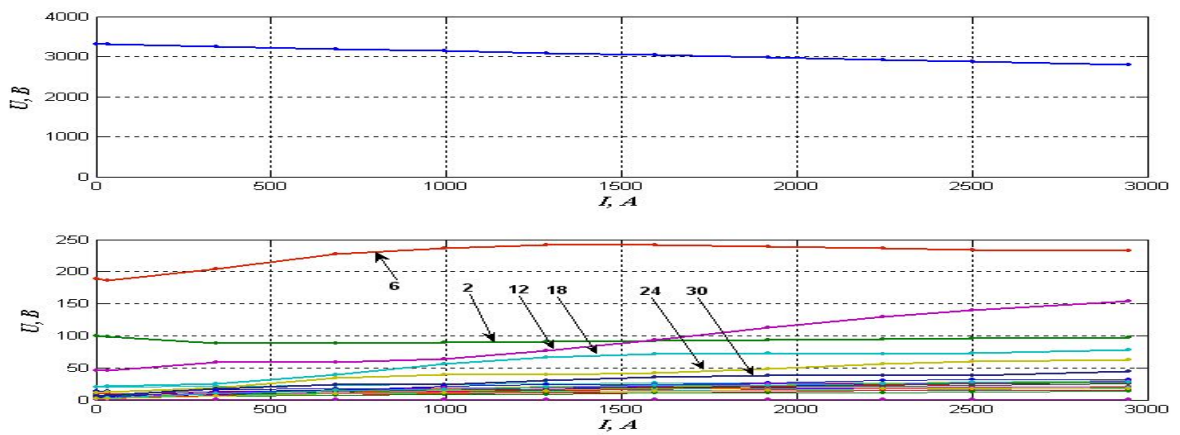


Рисунок 4.16 – Графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 3 %

На рисунку 4.17 зображено графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні – 3 %.

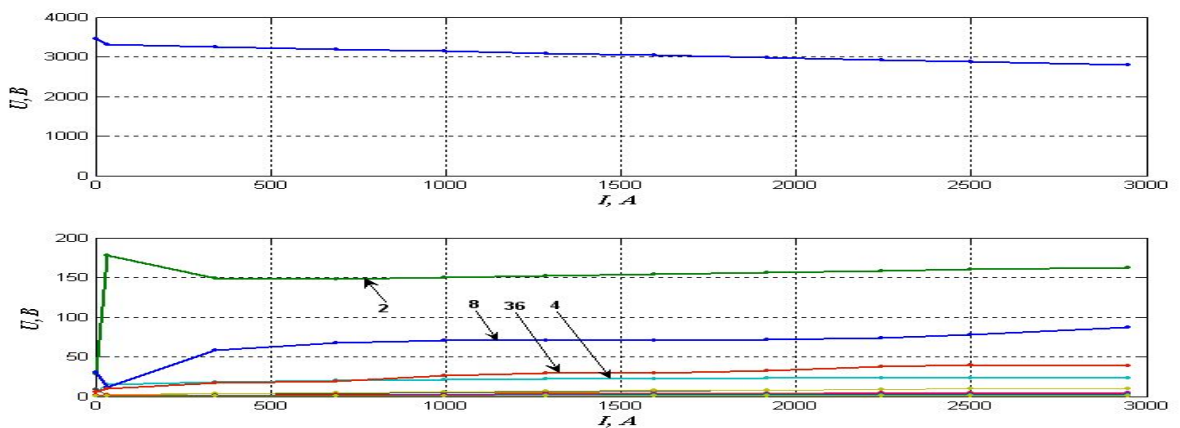


Рисунок 4.17 – Графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні мережі 3 %

На рисунку 4.18 зображено графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 3 %.

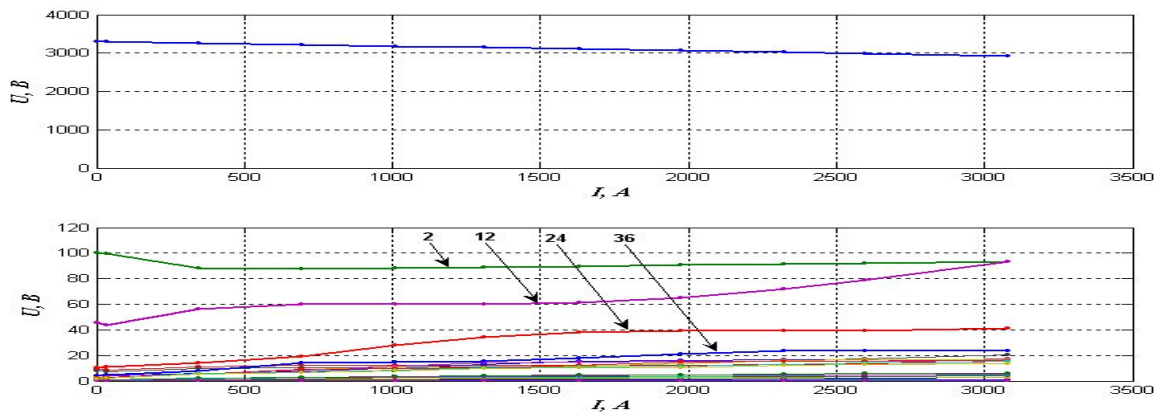


Рисунок 4.18 – Графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 3 %

На рисунку 4.19 зображено графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні мережі 3 %.

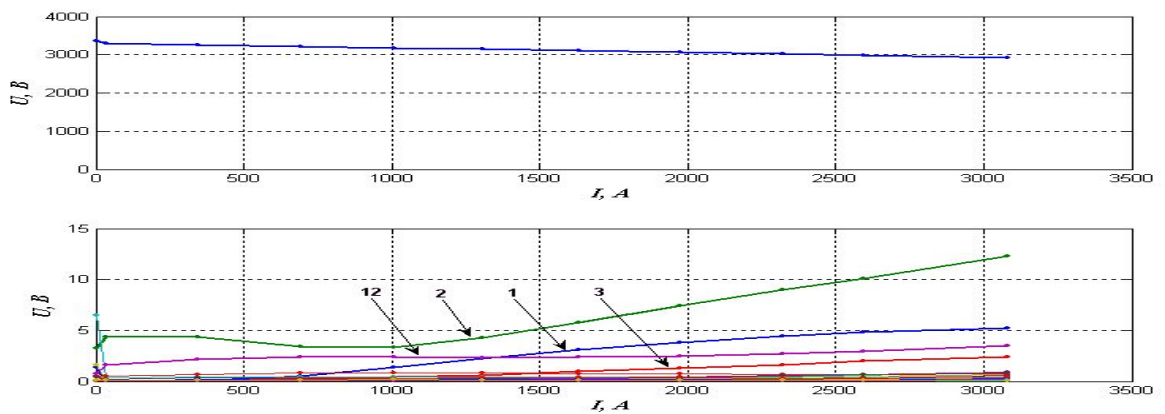


Рисунок 4.19 – Графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні мережі 3 %

4.3.4 Несиметричне живлення мережі 4 %

На рисунку 4.20 зображено графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 4 %.

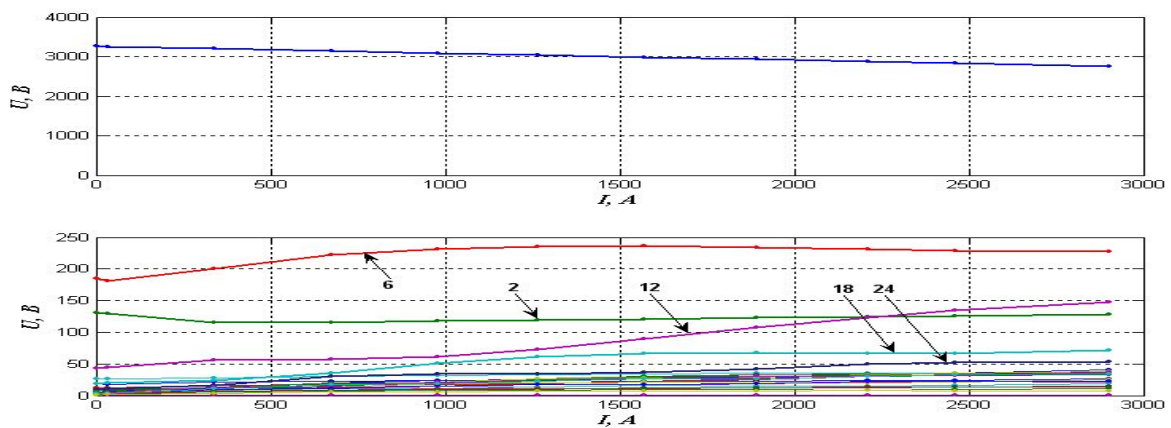


Рисунок 4.20 – Графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 4 %

На рисунку 4.21 зображено графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні – 4 %.

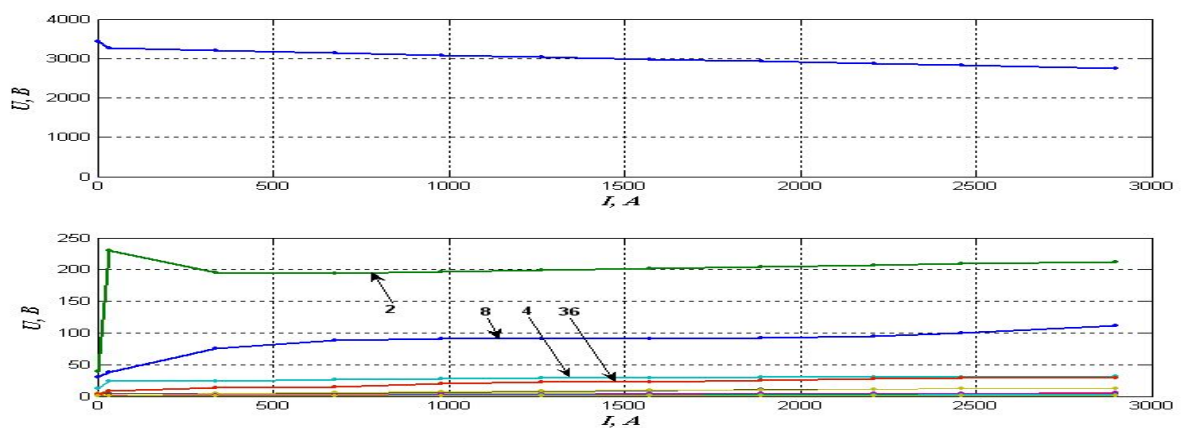


Рисунок 4.21 – Графіки результатів моделювання для 6-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні мережі 4 %

На рисунку 4.22 зображено графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 4 %.

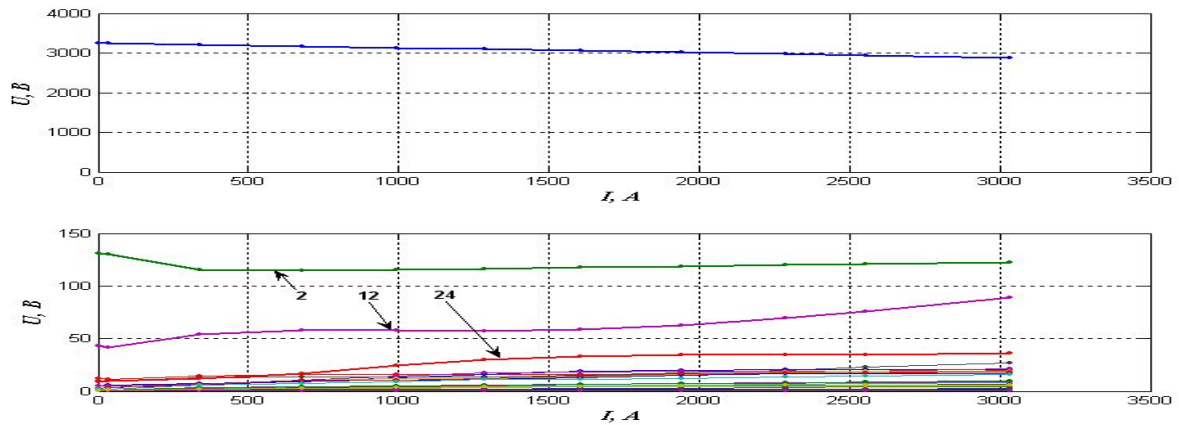


Рисунок 4.22 – Графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення без згладжуючого пристрою і несиметричному живленні мережі 4 %

На рисунку 4.23 зображено графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні – 4 %.

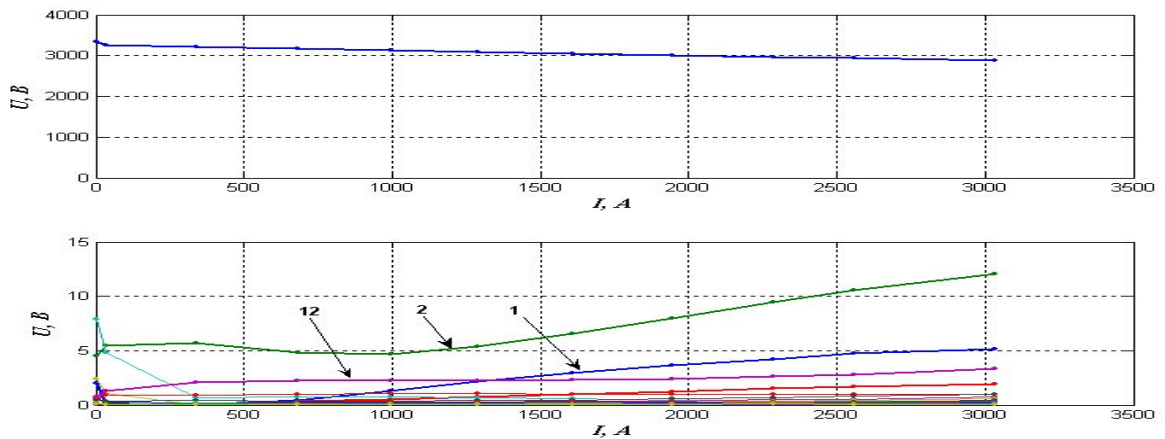


Рисунок 4.23 – Графіки результатів моделювання для 12-пульсної схеми випрямлення з фільтром і несиметричному живленні мережі 4 %

В результаті досліджень різних режимів роботи сучасних схем випрямлення при симетричному та несиметричному живленні, без фільтру та за його наявності, зроблено висновки про необхідність та якість застосування сучасних фільтрів вищих гармонік для зниження вищих гармонійних складових.

Встановлено, що особливості конструкції фільтрпристрою та способи його застосування, відповідальні за прояв його стабілізуючих та фільтруючих властивостей, призводять до різного ступеню фільтрації вищих гармонійних складових.

Проаналізувавши результати проведення імітації роботи випрямних перетворювачів тягових підстанцій за допомогою створених моделей визначено, що при збільшенні навантаження на випрямлячі збільшуються величини гармонічних складових випрямленої напруги, при цьому для 6-пульсної схеми випрямлення відповідають гармоніки кратні шести, а для 12-пульсної схеми – дванадцяти.

На графіках результатів моделювання показано дію згладжуючого пристрою, що фільтрує значну частину гармонічних складових. Видно, що використання згладжуючого пристрою на тягових підстанціях значно зменшує амплітуди гармонічних складових випрямленої напруги, на які налаштовані вітки фільтру, та знижує спотворення випрямленої напруги, але при збільшенні навантаження зростають амплітуди неканонічних гармонік, проте їх амплітуда не велика.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В результаті виконання роботи було проведено імітацію роботи випрямних перетворювачів тягових підстанцій за допомогою створених моделей. Провівши ряд моделювань були отримані результати, які відповідають дійсним показникам режимів роботи випрямлячів та фільтрів вищих гармонік і задовольняють поставлену перед проектом задачу. По результатах моделювання було досліджено вплив несиметричного живлення мережі на роботу перетворювачів та зміну величини спотворення випрямленої напруги при збільшенні навантаження.

При збільшенні навантаження на випрямлячі збільшуються величини гармонічних складових випрямленої напруги, при цьому для 6-пульсної схеми випрямлення відповідають гармоніки кратні шести, а для 12-пульсної схеми – дванадцяти. При несиметричному живленні мережі з'являються неканонічні гармоніки, що не кратні основним гармонічним складовим. Збільшення коефіцієнту несиметрії викликає зростання амплітуди цих гармонік.

Використання згладжуючих пристроїв призводить до покращення кривої випрямленої напруги, зменшуються гармонічні складові, але при несиметричному живленні зростають неканонічні гармонійні складові, проте їх амплітуда не велика.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Почаевец В. С. Электрические подстанции: Учебник для техникумов и колледжей ж.-д. трансп. – М.: Желдориздат, 2001. – 512 с.
2. Ополева Г. Н. Схемы и подстанции электроснабжения. Справочник. – М.: Форум, 2006. – 480 с.
3. Рожкова Л. Д., Карнеева Л. К, Чиркова Т. В. Электрооборудование электрических станций и подстанций, – М.: Академия, 2004. – 448 с.
4. Низов А.С. Штин А.Н. Электронная техника и преобразователи. Часть 2. Многопульсовые выпрямительные и инверторные преобразователи. – Екатеринбург: УрГУПС, 2005. – 140 с.
5. Соколов С. Д., Бей Ю.М., Гуральник Я.Д., Чаусов О.Г. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций. – М.: Транспорт, 1979. – 264 с.
6. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи: Учебник для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
7. Барковский Б. С. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.
8. Прохорский А.А. Тяговые и трансформаторные подстанции. – М.: Транспорт, 1983. – 496 с.
9. Бей Ю. М., Мамошин Р. Р., Пупынин В. Н., Шалимов М. Г. Тяговые подстанции / Учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Транспорт, 1986. – 319
10. Гук Ю.Б., Петрова С.С. Проектирование электрической части станций и подстанций.- Ленинград: Энергоатомиздат, 1985.
11. Мартынов Н.Н. Matlab 7. Элементарное введение. М: «Кудиц-Образ», 2005г. – 416 стр.
12. Дьяконов В. П. SIMULINK 5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.: ил.
13. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Simpowersystems и Simulink. – М.: ДМК-Пресс; спб.; Питер, 2008. – 288 с.: ил.

14. Черных И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений. – М.: Диалог-МИФИ, 2004. – 491 с.
15. Борисов П.А., Томасов В.С. Расчет и моделирование выпрямителей. Учебное пособие по курсу «Элементы систем автоматики» (Часть I) .– СПб: СПб ГУ ИТМО, 2009 – 169 с.
16. Герман-Галкин С. Г. MATLAB & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: Корона-Век, 2008. – 368 с.
17. Розанов Ю. К. Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.