

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістра

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему: Дослідження показників якості споживання електричної енергії у мережі живлення у процесі мінливості режимів роботи прокатного стану

ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг»

КНУ.МР.141.25.667-07

Виконав студент _II_ курсу, групи _СЕР-24м_ Данило Маловічко

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«Системи електропостачання промислових підприємств, міст та локальних об'єктів»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник: д.е.н.,
професор

_____Тетяна БЕРІДЗЕ/

Керівник: д.е.н.,
професор

_____Тетяна БЕРІДЗЕ/

Завідувач кафедри,
д.т.н., професор

_____Олег СІНЧУК/

Гарант ОПП:
к.т.н., доцент

_____Юрій ОСАДЧУК/

Кривий Ріг

2025 р.

Криворізький національний університет
Факультет: електротехнічний
Освітній рівень: Магістр
Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Маловічка Данила Вікторовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Дослідження показників якості споживання електричної енергії у мережі живлення у процесі мінливості режимів роботи прокатного стану ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг»

1. Термін подання студентом роботи: 12 грудня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: *Розрахунок та розробка активного фільтра для компенсації впливу роботи прокатного стану на якість електричної енергії у мережі*
3. *Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Показники якості електроенергії електроенергетичних систем; II. Математичні основи розрахунку гармонік та фільтрів; III. Моделювання та дослідження отриманих характеристик моделі*
4. 4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1.Схема електропостачання груп двигунів прокатного стану 2.Графіки синусоїдальності напруги та струму. 3.Зовнішній вигляд моделі у Matlab/Simulink 4.Графіки досліджень струму та напруги у моделі. 5.Графіки струмів якорів двигунів постійного струму.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Тетяна БЕРІДЗЕ		
II	Тетяна БЕРІДЗЕ		
III	Тетяна БЕРІДЗЕ		
IV			

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Дослідження впливу якості електричної енергії на роботу електрообладнання	19.09.2025
2	Ознайомлення з об'єктом дослідження та даними до розрахунку	09.10.2025
3	Складання теоретичної частини дипломної роботи	13.10.2025
4	Розрахунок впливу роботи обладнання на якість електроенергії	22.10.2025
5	Створення та дослідження моделі устаткування у MatLab (Simulink)	03.11.2025
6	Розробка компенсуючих пристроїв для поставлених задач	13.11.2025
7	Проведення тестів та аналіз результату роботи фільтруючого пристрою	24.11.2025
8	Узагальнення отриманих даних та висновки щодо проведених досліджень	05.11.2025

Дата видачі завдання . _____

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

Маловічко Д.В.

(ПБ)

Керівник роботи _____

(підпис)

Берідзе Т.М.

(ПБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра на тему:
«Підвищення показників якості електричної енергії у системах промислового електропостачання»

КНУ.МР.141.25.667-07

Дипломна робота присвячена дослідженню показників якості електричної енергії в системі електропостачання промислового підприємства напругою 6 кВ. Розглянуто вплив нелінійних навантажень, зумовлених роботою тиристорних реверсивних випрямлячів електроприводів постійного струму прокатного стану, на режими роботи електричної мережі та формування гармонічних спотворень напруги і струму.

У роботі проаналізовано основні показники якості електричної енергії, наведено їх нормативні значення та виконано оцінку відповідності режимів роботи мережі вимогам чинних стандартів. Проведено гармонічний аналіз струмів і напруг у мережі 6 кВ, визначено рівні вищих гармонік та коефіцієнти несинусоїдальності для окремих секцій електроприводів.

На основі результатів розрахунків виконано оцінку впливу гармонічних спотворень на втрати активної потужності та умови експлуатації елементів системи електропостачання. Обґрунтовано доцільність застосування фільтро-компенсувальних пристроїв для зниження рівня гармонічних складових та покращення якості електричної енергії. Наведено розрахунок основних параметрів фільтрів з урахуванням фактичного гармонічного складу навантажень.

MATLAB, SIMULINK, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЮЧА СИСТЕМА, ПРОМИСЛОВІСТЬ,
ПРОКАТНИЙ СТАН, ГАРМОНІЧНІ СКЛАДОВІ, ФІЛЬТР,
МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ

Зміст

Вступ.....	6
РОЗДІЛ 1 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ.....	7
1.1 Основні показники якості електричної енергії.....	7
1.1.1. Основні визначення якості електроенергії в промислових електросистемах	7
1.1.2. Ключові показники якості: напруга, частота, симетрія та форма кривої	8
1.1.3. Нормативні вимоги та допустимі відхилення для промислових споживачів	9
1.2. Джерела погіршення якості електроенергії в промислових електроенергетичних системах	11
1.2.1. Елементи енергопостачальної системи як джерела відхилень	11
1.2.2. Нелінійні навантаження та перетворювальна техніка	12
1.3. Вплив погіршення показників якості електроенергії на обладнання та технологічні процеси	13
1.3.1. Додаткові втрати, нагрівання та старіння ізоляції електрообладнання	13
1.3.2. Порушення роботи систем керування та реверсивних електроприводів	15
1.4 Предмет дослідження.....	16
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ГАРМОНІК ТА ФІЛЬТРІВ.....	20
2.1 Методика визначення гармонік й коефіцієнта несинусоїдальності.....	20
2.1.1. Теоретичні основи гармонічного аналізу (ряди Фур'є, визначення n-ї гармоніки).	20
2.1.2. Показники несинусоїдальності напруги та струму	22
2.2 Методика розрахунку фільтрів вищих гармонік.....	24
2.3 Розрахунок гармонійного складу електроенергетичних систем.....	28
2.4 Розрахунок фільтрів вищих гармонік.....	45
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ФІЛЬТРІВ	53
3.1 Розробка та дослідження моделі системи електропостачання з фільтром гармонік.....	53
3.1.1. Вибір середовища для моделювання.	53
3.1.2. Опис структурної моделі електропривода з реверсивним тиристорним перетворювачем та дослідження	54
3.2 Аналіз результатів дослідження роботи фільтрів	64
ВИСНОВОК	68
ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА.....	72
ДОДАТКИ.....	76

Вступ

У сучасних промислових системах електропостачання все ширше застосовуються напівпровідникові перетворювачі, зокрема тиристорні випрямлячі та електроприводи постійного струму. Робота такого обладнання суттєво впливає на режими електричних мереж, що проявляється у виникненні вищих гармонік струму та напруги, порушенні синусоїдальної форми напруги та зниженні коефіцієнта потужності. У мережах середньої напруги 6 кВ ці явища є особливо відчутними через значні потужності навантажень та концентрацію нелінійних споживачів.

Погіршення якості електричної енергії негативно впливає на роботу електрообладнання та систем електропостачання в цілому. Наявність гармонічних спотворень призводить до зростання додаткових втрат потужності, підвищеного нагріву елементів мережі, прискореного старіння ізоляції трансформаторів і кабельних ліній, а також до зниження надійності роботи електроустановок. Особливо актуальною ця проблема є для систем електропостачання прокатних станів, де застосовуються потужні тиристорні реверсивні випрямлячі, що є основними джерелами гармонічних спотворень.

У зв'язку з цим виникає необхідність аналізу показників якості електричної енергії в мережах 6 кВ, оцінки рівня гармонік напруги та струму, а також розробки заходів щодо зменшення їх негативного впливу. Одним із найбільш ефективних способів зниження гармонічних спотворень є застосування фільтро-компенсувальних пристроїв, параметри яких повинні визначатися з урахуванням реальних режимів роботи електричної мережі.

РОЗДІЛ 1 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ.

1.1 Основні показники якості електричної енергії

1.1.1. Основні визначення якості електроенергії в промислових електросистемах

Якість електричної енергії в промислових електроенергетичних системах визначається сукупністю параметрів, що характеризують відхилення режимів напруги й струму від встановлених нормативами значень.[2] Ці параметри відображають, наскільки фактичні умови електроживлення здатні забезпечити стабільну й безпечну роботу технологічного обладнання, особливо того, що має високі динамічні навантаження або використовує перетворювальну техніку.

У промислових мережах поняття якості електроенергії пов'язане не лише з відсутністю аварійних режимів, а й із тим, наскільки електроприводи, тиристорні перетворювачі, системи керування та допоміжне обладнання працюють у межах своїх номінальних характеристик. Будь-які відхилення параметрів — зміни амплітуди напруги, частоти, симетрії фаз, форми кривої — безпосередньо впливають на енергоспоживання, ресурс деталей та точність роботи технологічних процесів. [7]

У сучасних промислових системах поняття якості електроенергії також включає оцінку спектрального складу напруги й струму. Це зумовлено тим, що використання нелінійних навантажень, таких як реверсивні тиристорні випрямлячі чи частотні приводи, формує у мережі вищі гармоніки та спотворення синусоїдальної форми. Такі явища є нормальними для реальних промислових об'єктів, однак їхній рівень повинен бути контрольованим, оскільки перевищення встановлених меж призводить до перегрівання

трансформаторів, зростання втрат і погіршення стійкості роботи електроприводів.

Тому якість електричної енергії в умовах промислового підприємства — це комплексний технічний показник, від якого залежить надійність роботи електрообладнання, ефективність виробництва та тривалість експлуатації всіх елементів системи живлення.

1.1.2.Ключові показники якості: напруга, частота, симетрія та форма кривої

У промислових електричних мережах основні показники якості електроенергії визначаються тим, наскільки стабільно підтримуються параметри напруги та частоти при мінливих режимах роботи обладнання. Напруга вважається якісною тоді, коли її відхилення не виходять за межі, за яких електроприводи, трансформатори та системи керування зберігають номінальні характеристики. Для промислових об'єктів особливо важливе утримання рівня напруги під час різких змін навантаження, оскільки саме такі коливання найчастіше викликають збої у роботі важких механізмів. [2]

Частота струму є другим фундаментальним параметром якості. Навіть невеликі її зміни у мережі з великою кількістю двигунів призводять до порушення моментних характеристик, нестабільності швидкості та порушення синхронності окремих вузлів. У мережах із потужними перетворювачами частотна стабільність визначає здатність системи витримувати колективні навантаження без переходу в аварійні або перенавантажені режими.

Для трифазних промислових мереж важливим показником є симетрія напруги. Будь-яке відхилення між фазами створює векторні складові, які викликають зростання втрат, додаткове нагрівання двигунів та нерівномірний розподіл навантаження. У випадку реверсивних випрямлячів

або асиметричної роботи окремих секцій технологічних агрегатів такі відхилення проявляються особливо помітно.

Окремим критерієм є форма кривої напруги та струму. Вона повинна наближатися до ідеальної синусоїди, оскільки будь-які спотворення змінюють внутрішні процеси перетворення енергії й можуть спричинити появу вищих гармонік. У реальних промислових умовах форма кривої рідко залишається ідеальною, проте саме ступінь її відхилення визначає подальшу потребу в гармонічному аналізі й застосуванні компенсуючих фільтрувальних пристроїв. [7]

1.1.3. Нормативні вимоги та допустимі відхилення для промислових споживачів

Нормативні документи, що регламентують показники якості електроенергії, встановлюють конкретні межі відхилень параметрів, у межах яких електрообладнання зберігає працездатність і не переходить у небезпечні режими. Для промислових підприємств ці межі мають особливе значення, адже робота важких приводів, тиристорних випрямлячів і технологічних механізмів істотно навантажує мережу та підвищує чутливість системи до відхилень.

Нормовані значення напруги в мережах середньої напруги (6–10 кВ) передбачають допустиме довготривале відхилення $\pm 10\%$ від номіналу. У короткочасних режимах допускається відхилення до $\pm 15\%$, [1] однак тривалість таких змін обмежена умовами безпечної роботи електроприводів. Для мереж низької напруги (0,4 кВ) межі дещо жорсткіші: довготривалий діапазон становить від -5% до $+10\%$, що забезпечує коректну роботу обладнання з чутливими силовими електронними вузлами.

Допустимі частотні коливання за нормою $50\text{ Гц} \pm 0,2\text{ Гц}$ у нормальних умовах та $\pm 0,4\text{ Гц}$ у післяаварійних режимах встановлені з урахуванням

стійкості роботи потужних двигунів і перетворювальної техніки. Для приводів прокатного обладнання навіть такі, на перший погляд, незначні, зміни можуть впливати на точність регулювання швидкості та рівномірність навантаження.

Симетрія трифазної напруги нормується за коефіцієнтом негативної послідовності, який у промислових мережах не повинен перевищувати 2 %, а у виняткових режимах 4 %. Перевищення цих величин створює додаткове теплове навантаження на двигуни та може викликати зниження їхнього електромагнітного моменту, що критично для реверсивних приводів і механізмів з частими навантажувальними циклами.

Спотворення форми кривої напруги оцінюється через коефіцієнт несинусоїдальності THD. Стандарти встановлюють обмеження не більше 8 % для напруги 6–35 кВ та не більше 12 % для мереж 0,4 кВ. Часткові гармоніки мають свої межі: наприклад, 5-та гармоніка для мереж середньої напруги не повинна перевищувати 6 %, 7-ма - 5 %, 11-та і 13-та - 3–3,5 %. Такі значення визначаються з урахуванням типового спектра струмів випрямлячів і дозволяють уникнути перевантаження трансформаторів та конденсаторних батарей.[8]

Таким чином, система норм встановлює кількісні межі для всіх ключових параметрів якості електроенергії. Для промислових споживачів дотримання цих вимог є критично важливим, оскільки саме вони визначають можливість стабільної роботи тиристорних перетворювачів, синхронних та асинхронних двигунів, а також забезпечують коректність подальшого спектрального аналізу та оцінки впливу обладнання на мережу.

1.2. Джерела погіршення якості електроенергії в промислових електроенергетичних системах

1.2.1. Елементи енергопостачальної системи як джерела відхилень

У промислових електричних мережах відхилення показників якості електроенергії виникають не лише внаслідок роботи навантаження, але й через особливості самої системи живлення. Кожен елемент — від лінії електропередачі до трансформатора — вносить у режим певні спотворення, що стають помітними при роботі важкого обладнання.

Лінії електропередачі середньої напруги створюють зміни напруги через власні активні та реактивні опори. У довгих ділянках характерним є падіння напруги, що посилюється під час одночасного навантаження декількох приводів. У режимах пуску або реверсу двигунів навіть відносно невелика довжина лінії може призвести до короточасних просідань, які знижують стійкість роботи електроприводів.

Трансформатори є ще одним елементом, що формує відхилення напруги. Їхній внутрішній опір і відсоток короткого замикання визначають, наскільки сильно змінюється напруга на стороні низької напруги під час коливань струмів. Для потужних промислових агрегатів характерні великі перехідні струми, тому трансформатор може створювати відчутні зміни рівня напруги навіть у нормальних режимах роботи. Коефіцієнт короткого замикання трансформатора визначає, як швидко система реагує на зміну навантаження, і саме він часто є причиною локальних відхилень напруги при роботі реверсивних випрямлячів.

Важливе значення мають також комутаційні апарати, шини та контактні з'єднання. Підвищений перехідний опір або асиметрія у підключенні фаз призводять до появи локальних гармонічних складових та несиметрії напруги. Такі ефекти найбільш помітні під час навантажувальних циклів,

коли струми змінюються у широкому діапазоні й навіть невеликий додатковий опір створює суттєве спотворення режиму.

У промислових умовах ці фактори проявляються комплексно: лінія створює падіння напруги, трансформатор підсилює динамічні просідання, а комутаційне обладнання додає асиметрію та імпульсні спотворення. У результаті система живлення стає чутливою до будь-яких змін навантаження, що визначає необхідність детального спектрального аналізу та подальшої фільтрації гармонік.

1.2.2. Нелінійні навантаження та перетворювальна техніка

У промислових електричних мережах найбільший внесок у погіршення показників якості роблять нелінійні навантаження. На відміну від лінійних споживачів, які формують струм, пропорційний напрузі, нелінійні прилади спотворюють форму кривої струму через зміну власного опору протягом періоду. Саме така поведінка призводить до появи вищих гармонік, комутаційних провалів та імпульсних складових у напрузі.[9]

Найбільш характерними джерелами нелінійності є тиристорні перетворювачі, що застосовуються для керування швидкістю та моментом великих електроприводів. У реверсивних схемах, де керування здійснюється зміною кута відкриття тиристорів, форма струму залежить не тільки від навантаження, а й від моменту комутації силових вентилів. Збільшення кута керування α призводить до різкого зростання рівнів 5-ї, 7-ї та вищих непарних гармонік, що створює характерний спектр струмів такого обладнання.[19]

Частотні перетворювачі, імпульсні джерела живлення, системи електропічного нагріву та зварювальні апарати також формують спектри струмів, далекі від синусоїдальних. Високочастотні імпульсні режими

створюють стрімкі фронти струму, які відображаються у мережі у вигляді короткочасних перенапруг та різко виражених гармонічних складових. Коли таких споживачів у мережі працює одночасно кілька, їхні спектри накладаються, утворюючи складну картину спотворень.

Особливу роль відіграє групова робота перетворювачів у промислових лініях. Кожен окремий випрямляч генерує гармоніки з передбачуваними частотами, але сумарний спектр залежить від того, чи працюють агрегати синхронно або в різних режимах. Колективний вплив кількох тиристорних приводів здатний перевищувати нормативні рівні гармонік навіть тоді, коли кожен окремий споживач не виходить за межі стандарту.

Ця сукупність ефектів робить нелінійні навантаження головною причиною необхідності гармонічного аналізу. Без визначення повного спектра спотворень неможливо адекватно оцінити стан мережі, а також спроектувати компенсаційні фільтри, які повинні враховувати не тільки окремі гармоніки, а й взаємодію різних груп приводів. [9]

1.3. Вплив погіршення показників якості електроенергії на обладнання та технологічні процеси

1.3.1. Додаткові втрати, нагрівання та старіння ізоляції електрообладнання

Погіршення показників якості електроенергії в промислових мережах неминуче призводить до зростання теплових навантажень на електрообладнання. Будь-які спотворення напруги чи струму створюють додаткові втрати, які не враховуються в номінальних режимах і з часом стають причиною прискореного старіння ізоляційних матеріалів. [9]

Вищі гармоніки струму викликають збільшення активних втрат у обмотках трансформаторів та двигунів. Оскільки гармонічні складові мають більшу частоту, ніж основна, їхня дія пропорційно збільшує втрати у сталі, а також

інтенсивність вихрових струмів. Для трансформаторів це означає додаткове нагрівання осердя, що часто перевищує номінальні теплові можливості конструкції й змушує обладнання працювати ближче до граничних температур.[5]

Двигуни, особливо великої потужності, реагують на викривлення струму збільшенням втрат у міді та додатковими пульсаціями електромагнітного моменту. Гармонічні складові створюють магнітні поля, що не беруть участі у корисному перетворенні енергії, але викликають нерівномірний розподіл потоків і підвищений нагрів обмоток. У важких приводах прокатного обладнання такі явища проявляються особливо помітно, оскільки режими з різкими змінами моменту підсилюють вплив гармонічних складових.

Ізоляція електричних машин і трансформаторів чутлива до тривалого нагріву. Навіть невелике підвищення температури скорочує її ресурс у геометричній прогресії, оскільки теплове старіння пришвидшує деградацію діелектричних властивостей матеріалів. Якщо гармонічні струми перевищують допустимі норми, обмотки можуть працювати в умовах, близьких до перевантаження, навіть коли основна компонента струму знаходиться в нормі.

Особливо небезпечним є поєднання гармонічних спотворень із локальною асиметрією фаз, що створює концентровані теплові зони. Такі умови збільшують ризик міжвиткових замикань, зниження електричного опору ізоляції та аварійного виходу обладнання з ладу. Для промислових підприємств це означає не тільки додаткові втрати енергії, але й простої технологічних ліній, що безпосередньо впливають на виробничу ефективність.

1.3.2. Порушення роботи систем керування та реверсивних електроприводів

Погіршення показників якості електроенергії суттєво впливає на роботу систем керування, особливо тих, що використовують силову електроніку для регулювання швидкості та моменту електроприводів. У промислових механізмах, де процеси часто залежать від точного керування кутом відкриття тиристорів або стабільності інверторних режимів, навіть незначні спотворення напруги здатні порушити нормальний алгоритм роботи.

Реверсивні тиристорні випрямлячі особливо чутливі до гармонічних складових. Під час комутації силових вентилів система орієнтується на миттєві значення напруги та фазові співвідношення. Якщо форма напруги зазнає викривлень, момент відкриття тиристорів зміщується, що призводить до неправильного формування випрямленої напруги, збільшення струмових пульсацій і нестійкості у зоні переходу між прямим і зворотним режимами. У реверсивних режимах це здатне викликати короточасні зриви моменту та неузгодженість роботи приводів.

Системи автоматичного керування, що працюють на основі вимірювання фазної та лінійної напруги, також реагують на спотворення. Наявність вищих гармонік змінює сигнал на вході вимірювальних модулів, що призводить до помилок у регуляторах струму та швидкості. У результаті електропривод змінює вихідні параметри швидше або повільніше, ніж це передбачено алгоритмами керування, що порушує технологічну плавність процесу.

У обладнанні, яке працює з великими інерційними масами, такі збої мають кумулятивний ефект. Навіть невеликі збурення у формуванні моменту призводять до коливань швидкості, а в окремих випадках — до виникнення автоколивань системи. Для прокатного обладнання це критично, оскільки від стабільності приводу залежить геометрія та рівномірність обробки матеріалу.

Додатковим наслідком є порушення роботи захисних і блокувальних схем. Гармонічні складові можуть спричинити хибні спрацювання апаратів захисту або, навпаки, затримати виявлення аварійного режиму. Це підвищує ризик теплового перевантаження, міжфазних замикань або механічних пошкоджень у приводних механізмах.

Таким чином, будь-яке погіршення характеристик електроживлення викликає нестабільність роботи реверсивних електроприводів і систем автоматичного керування, що безпосередньо впливає на якість та безперервність технологічного процесу.

1.4 Предмет дослідження.

Предметом дослідження є процеси спотворення напруги та струму в трифазній лінії 6 кВ, які виникають під час роботи трьох секцій електроприводів прокатного стану: чорнової, проміжної та чистової. У кожній секції встановлено групу двигунів постійного струму, що живляться через індивідуальні трансформатори 6/0,38 кВ та тиристорні керовані випрямлячі реверсивного типу. Робота таких випрямлячів супроводжується появою вищих гармонік та відхиленням напруги й струму від синусоїдальної форми, що безпосередньо впливає на якість електроенергії на шині 6 кВ.

У межах дослідження виконується розрахунок гармонічних складових і ступеня несинусоїдальності для кожної секції окремо та для системи в цілому. Це дозволяє оцінити, як накладання гармонік від різних випрямлячів змінює режим роботи мережі та які саме спотворення є критичними. На основі отриманих результатів проводиться розрахунок параметрів фільтрів, та їх застосування для зменшення рівнів гармонік і покращення показників якості електроенергії у системі електропостачання прокатного стану.

Опис схеми

Згідно з умовами роботи ми маємо наступну схему.

Повна схема наявна у додатку [А]

Для більш наочної демонстрації схема була розбита на 3 частини згідно секцій двигунів прокатного стану.



Рис 1.1 секція чорнової обробки

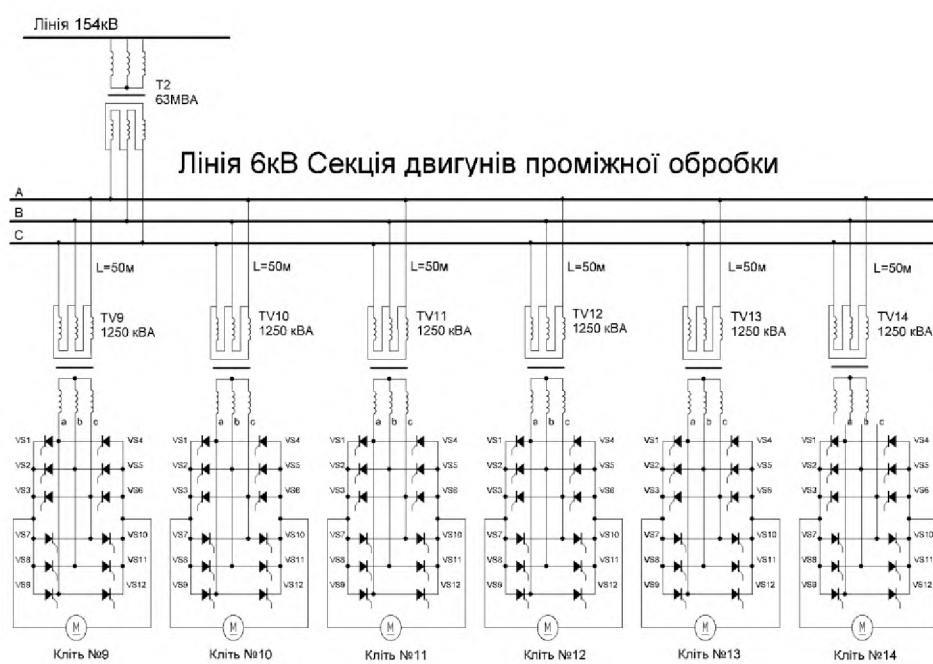


Рис 1.2 секція проміжної обробки

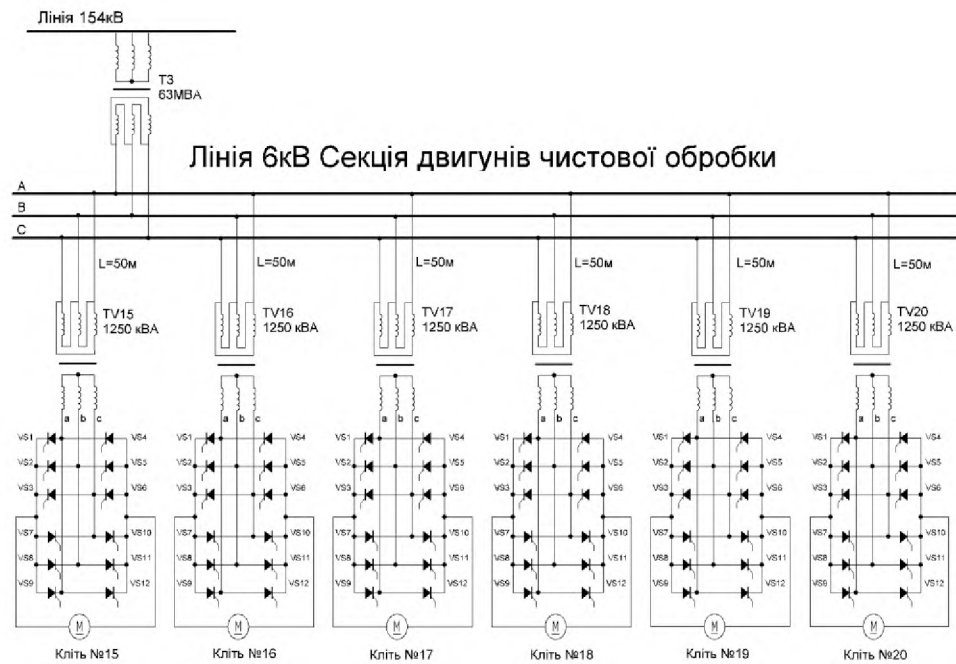


Рис 1.3 секція чистової обробки

На схемах (Рис. 1.1, Рис. 1.2, Рис. 1.3) показано три секції електроприводів прокатного стану: чорнової, проміжної та чистової обробки відповідно. Усі секції живляться від своєї трифазної секції шин 6 кВ, яка своєю чергою отримує напругу від понижувального трансформатора, підключеного до мережі 154 кВ. Шина 6 кВ є головною розподільчою лінією, від якої живляться всі приводи секції.

У секції чорнової обробки встановлено вісім приводів, у проміжній – шість, у чистовій – ще шість. Кожен привід має власний трансформатор 6/0,38 кВ та керований тиристорний випрямляч реверсивного типу, виконаний за 12-пульсовою мостовою схемою. Така схема забезпечує регулювання випрямленої напруги та можливість реверсу двигуна постійного струму.

Тиристорні випрямлячі є нелінійними навантаженнями, тому струм у лінії 6 кВ має спотворену форму та містить вищі гармоніки. Для даної схеми основними є 5-та, 7-ма, 11-та та 13-та гармоніки струму й напруги, які виникають у процесі випрямлення 12-пульсовою мостовою схемою. Усі приводи підключені паралельно по групах, тому гармонічні складові від

різних приводів у групі накладаються одна на одну й формують загальне спотворення струму та напруги на шинах 6 кВ.

У результаті вся система з двадцяти приводів створює комплексне нелінійне навантаження на мережу. Це призводить до помітної несинусоїдальності та відхилень напруги, що потребує розрахунку спектра гармонік і подальшої розробки фільтрів для покращення показників якості електроенергії.

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ГАРМОНІК ТА ФІЛЬТРІВ

2.1 Методика визначення гармонік й коефіцієнта несинусоїдальності

2.1.1. Теоретичні основи гармонічного аналізу (ряди Фур'є, визначення n-ї гармоніки).

У теорії електричних кіл гармонічний аналіз є фундаментальним математичним апаратом, що дозволяє подати періодичні, але несинусоїдальні сигнали у вигляді сукупності синусоїдальних компонент різної частоти.

Такий підхід ґрунтується на положенні, згідно з яким будь-яка періодична функція може бути точно представлена у формі ряду Фур'є. Це твердження є ключовим для опису електричних процесів у мережах, де присутні нелінійні перетворювачі, оскільки забезпечує можливість перейти від часової форми сигналу до його частотного спектра, який більш інформативно відображає характер спотворень.

Розклад Фур'є подається у вигляді:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t))$$

де коефіцієнти a_n та b_n визначають внесок кожної гармоніки й обчислюються інтегрально на інтервалі одного періоду. Для електротехнічних задач частіше застосовують діюче значення n-ї гармонічної складової, яке визначається як

$$U_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

Таке представлення зручне тим, що дозволяє безпосередньо працювати з енергетичними характеристиками сигналу, оскільки діючі значення гармонік підсумовуються за квадратичним законом.

У випадку трифазних випрямлячів і керованих перетворювачів гармонічний склад струму має особливу структуру. Для ідеального шестипульсного перетворювача характерні гармоніки визначаються співвідношенням

$$h = 6k \pm 1, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

тобто найбільш вираженими є гармоніки п'ятого, сьомого, одинадцятого та тринадцятого порядків. Амплітуда таких компонент у першому наближенні описується формулою

$$I_h = \frac{I_1}{h}$$

що добре узгоджується з практичними результатами для випрямлячів з рівномірним струмом навантаження. Надалі саме ці гармоніки визначають основне навантаження на фільтро-компенсуючі пристрої.

Ознакою, що забезпечує можливість окремого аналізу впливу кожної гармонічної компоненти, є ортогональність синусоїдальних функцій. Це означає, що середнє значення добутку гармонік різного порядку на інтервалі періоду дорівнює нулю. Завдяки цьому діюче значення сигналу у несинусоїдальному режимі визначається сумою квадратів діючих значень основної та всіх вищих гармонік:

$$U_{\text{ef}} = \sqrt{U_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}$$

Ця властивість лягає в основу визначення інтегральних показників спотворення та дозволяє перейти від складної часової форми сигналу до компактної й формалізованої спектральної характеристики.

Таким чином, розклад у ряд Фур'є, ортогональність гармонічних складових та енергетично-квадратичний характер їх сумування формують фундамент гармонічного аналізу, що використовується у математичному описі процесів у мережах з нелінійними навантаженнями. Ці основи дозволяють переходити до кількісної оцінки рівнів гармонік, визначення коефіцієнтів спотворення та подальшої розробки фільтрів вищих гармонік, що будуть розглянуті в наступних підпунктах розділу.

2.1.2 Показники несинусоїдальності напруги та струму

Оцінювання рівня спотворення електричних величин у мережах з нелінійними навантаженнями ґрунтується на системі показників, які дозволяють кількісно визначити ступінь відхилення реального сигналу від ідеальної синусоїди. У промислових електроприводах, де працюють керовані випрямлячі, інвертори та інші перетворювальні пристрої, ці показники мають вирішальне значення для оцінки технічного стану мережі та визначення потреби у фільтрації гармонік. Несинусоїдальність є характерним явищем для систем живлення прокатних станів, адже струм навантаження в таких установках формується тиристорними перетворювачами, принцип роботи яких спричиняє появу вищих гармонічних складових у спектрі струму. [5]

Основним локальним показником є коефіцієнт окремої гармоніки, який визначають як відношення діючого значення гармонічної складової до значення основної складової сигналу. Для напруги та струму це має вигляд

$$k_{U_n} = \frac{U_n}{U_1}$$

$$k_{I_n} = \frac{I_n}{I_1}$$

Такі коефіцієнти дозволяють виділити найбільш суттєві гармонічні складові, які формують основне навантаження на елементи мережі. У випадку

трифазних керованих випрямлячів найбільші значення мають гармоніки 5-го, 7-го, 11-го та 13-го порядків. Їх присутність обумовлена структурою випрямляча та фазовим керуванням, а величини гармонік зменшуються обернено пропорційно до їх порядку.

У практиці електроенергетики для загальної оцінки спотворення застосовують коефіцієнт несинусоїдальності (або коефіцієнт сумарних гармонічних спотворень), який показує відносну енергію гармонік порівняно з основною складовою. Для напруги та струму його визначають як

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1}$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

Інтерпретаційно цей показник відображає, наскільки фактичний сигнал «віддалений» від чистої синусоїди. Чим більше гармонік із суттєвими амплітудами присутні у спектрі, тим вищим буде THD, що, у свою чергу, свідчить про погіршення якості електроенергії та можливі додаткові втрати в обладнанні.

Важливо також враховувати, що наявність гармонік впливає на повне діюче значення сигналу. Воно визначається шляхом квадратичного підсумовування основної складової та всіх гармонічних компонент:

$$U_{\text{ef}} = \sqrt{U_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}$$

Зростання ефективного значення напруги та струму через гармоніки призводить до збільшення теплових втрат у кабелях, трансформаторах і обладнанні, що може перевищувати їх номінальні допустимі величини навіть у випадку, коли основна складова сигналу залишається в межах норми.

2.2 Методика розрахунку фільтрів вищих гармонік

У цьому підрозділі розглядається теоретична методика розрахунку пасивних фільтрів вищих гармонік для системи електропостачання з керованими тиристорними перетворювачами. Завданням фільтрації є не тільки зменшення вмісту гармонік у напрузі на шинах 6 кВ, але й підвищення коефіцієнта потужності внаслідок компенсації реактивної складової. [3,23]

Несинусоїдальний режим у даній мережі виникає через роботу 6-пульсних випрямлячів, струм яких має виражену східчасту форму. Такий струм розкладається в ряд Фур'є і представляється у вигляді суми основної гармоніки та набору вищих гармонік з частотами $5f_1, 7f_1, 11f_1, 13f_1$ тощо. Кожна з цих гармонік проходить через опір мережі й створює у відповідній точці власну гармонічну складову напруги. У результаті реальна напруга на шинах відрізняється від ідеальної синусоїди, а коефіцієнт несинусоїдальності напруги та струму може перевищувати допустимі нормативами значення. [24]

Першим кроком є кількісна оцінка вихідного режиму. За відомими сумарними активною та повною потужностями групи перетворювачів визначається початковий коефіцієнт потужності мережі

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_{\Sigma}}{S_{\Sigma}}$$

$$\varphi_1 = \arccos(\cos \varphi_1)$$

Невелике значення цього показника для тиристорних перетворювачів пояснюється значним зсувом між першою гармонікою струму та напруги. Надалі задається бажане значення коефіцієнта потужності $\cos \varphi_2$, як правило близьке до 0,95, яке приймається як цільовий показник якості режиму після встановлення фільтрів.

На основі класичної векторної діаграми активної та реактивної потужності визначається необхідна реактивна потужність фільтрокомпенсуючої установки. Для цього використовують залежність між кутом зсуву фаз і тангенсом цього кута. Необхідну потужність компенсації можна виразити через сумарну активну потужність навантаження [4]

$$Q_k = P_{\Sigma}(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

де φ_1 та φ_2 - кути, що відповідають початковому і заданому коефіцієнтам потужності. Отримане значення характеризує, яку частину реактивної потужності повинен взяти на себе комплекс пасивних фільтрів та, за потреби, додаткових конденсаторних батарей.

Далі аналізується спектр струму в точці приєднання. Для кожної з основних гармонік струму I_5, I_7, I_{11}, I_{13} отриманих розрахунком або моделюванням, обчислюється їхній вклад у загальне спотворення. На основі квадратів діючих значень обчислюється відносна частка кожної гармоніки; це дозволяє пропорційно розподілити загальну потужність компенсації між окремими фільтрами. Таким чином найбільші за амплітудою гармоніки отримують більшу потужність фільтрації, що підвищує загальну ефективність установки.

Кожний фільтр виконується у вигляді трифазного LC-контур, приєднаного паралельно до шин 6 кВ. Конденсатори одночасно виконують роль джерела реактивної потужності основної частоти, а індуктивний дросель разом з ними формує резонансний контур на вибраній гармоніці. На основній частоті 50 Гц реактивна потужність трифазної ємнісної гілки пов'язана з її ємнісним опором співвідношенням

$$Q_{cv} = \frac{U_L^2}{X_{C1v}}$$

де U_L - лінійна напруга шин, Q_{cv} - реактивна потужність, віднесена до фільтра гармоніки v . Звідси визначається еквівалентний ємнісний опір на основній частоті, а потім – необхідна ємність конденсаторів

$$C_v = \frac{1}{\omega_1 X_{C1v}}$$

Таким чином задається конденсаторна частина фільтра, яка забезпечує потрібну частку компенсації реактивної потужності.

Для того, щоб гілка працювала саме як фільтр певної гармоніки, індуктивність дроселя підбирається з умови резонансу на частоті $v f_1$. На цій частоті індуктивний та ємнісний опори мають бути рівними за величиною й протилежними за знаком, що забезпечує різке зменшення повного опору гілки для струму відповідної гармоніки. З урахуванням того, що індуктивний опір пропорційний частоті, а ємнісний обернено пропорційний їй, умова резонансу приводиться до простого зв'язку між ємнісним опором на основній частоті та індуктивним опором реактора. Це дозволяє отримати індуктивність

$$L_v = \frac{X_{C1v}}{v^2 \omega_1}$$

тобто всі параметри LC-контурів визначаються безпосередньо з реактивної потужності, яка виділена цій гармоніці.

Реальний фільтр повинен мати обмежену добротність, щоб уникнути надмірних резонансних струмів і забезпечити стійку роботу при зміні параметрів мережі. Для цього в розрахункову схему вводиться активний опір, величина якого підбирається за заданою добротністю q_v . Добротність визначається як відношення індуктивного опору до активного на частоті гармоніки. У промислових установках зазвичай приймають значення порядку 20–40; у роботі використано $q_v \approx 30$, що є компромісом між глибиною фільтрації і рівнем струмів у самому фільтрі.

Наступний етап пов'язаний з оцінкою впливу фільтра на напругу гармонік у точці приєднання. Система електропостачання представлена еквівалентним комплексним опором лінії та трансформатора, який для кожної гармоніки масштабують з урахуванням частоти. Паралельне приєднання LC-фільтра змінює загальний опір у вузлі: на резонансній частоті модуль опору гілки стає малим, тому частка струму відповідної гармоніки переважно замикається через фільтр, а не через мережу. Еквівалентний опір «мережа—фільтр» для гармоніки v описується паралельним з'єднанням опорів, проте на рівні якісного аналізу достатньо відзначити, що додавання низькоомної гілки призводить до зменшення падіння напруги від гармонічних струмів на опорі мережі.

Як джерело гармонік розглядається сукупність тиристорних випрямлячів, для яких відомі діючі значення гармонічних струмів I_v . До встановлення фільтра напруга відповідних гармонік визначається добутком цих струмів на опір мережі. Після підключення фільтра цей опір замінюється на еквівалентний опір паралельного з'єднання, який на частотах налаштування суттєво менший. У результаті амплітуди напруг гармонік зменшуються, а коефіцієнт несинусоїдальності напруги падає до значень, які відповідають вимогам стандартів.

У сумі така методика дозволяє, спираючись на відомі потужності навантаження та спектр струму, послідовно визначити необхідну реактивну потужність компенсації, розподілити її між окремими гармоніками, розрахувати параметри LC-фільтрів та оцінити їх вплив на рівень гармонічних спотворень у шині 6 кВ. Пасивні фільтри, побудовані за цим принципом, виконують подвійну функцію: покращують форму напруги та струму в мережі й водночас забезпечують підвищення коефіцієнта потужності до заданого рівня.

2.3 Розрахунок гармонійного складу електроенергетичних систем

Початковою задачею буде опис елементів схеми та аналіз початкових даних.

Схема являє собою три ввідних трансформатори з лінії 154 кВ які живлять три секції шин 6 кВ . кожна секція шин живить двигуни по групах чорнової чистової та проміжної обробки. Ці групи мають різну кількість двигунів, групи проміжної та чистової обробки містять по шість двигунів тоді як група чорнової вісім. Розрахунок буде проводитись саме для груп двигунів (чорнова проміжна чистова) а Також важливим зауваженням буде те що кожен двигун має окремий трансформатор потужністю 1250 кВА що досить не звично та також вплине на розрахунки. Довжина лінії складає 50 м. Усі двигуни живляться від керованих тиристорних реверсивних випрямлячів з мостовою схемою.

Далі розглянемо таблицю з даними.(таб 2.1)

№ кліті	Група	Профіль 6,5 мм			Профіль 6,0 мм			Профіль 5,5 мм		
		Ud,B	Id,A	α , ел.гр.	Ud,B	Id,A	α , ел.гр.	Ud,B	Id,A	α , ел.гр.
1	Чорнова	250	270	70	400	70	58	250	100	70
2		250	250	70	300	160	66	240	250	71
3		260	250	69	300	400	66	230	500	72
4		250	400	70	350	300	62	230	400	70
5		250	650	70	300	550	66	250	650	70
6		210	600	73	280	550	67	200	600	74
7		240	600	71	250	500	70	230	550	70
8		250	750	70	300	650	66	250	650	70
9	Проміжна	200	1100	74	230	900	72	180	950	76
10		200	800	74	120	650	80	220	650	73
11		250	1000	70	300	850	66	250	970	70
12		300	400	66	380	370	59	300	400	66
13		390	500	58	470	420	51	360	650	61
14		390	550	58	500	450	48	400	400	57
15	Чистова	400	900	57	480	650	50	400	850	57
16		400	1100	57	420	850	56	400	900	57
17		400	800	57	450	600	53	400	700	57
18		480	600	50	500	300	48	480	550	50
19		450	400	53	490	250	49	500	300	48
20		500	500	48	500	400	48	500	500	48

Таблиця 2.1 дані до розрахунків

Важливим моментом у роботі буде те, що усі приклади розрахунків будуть демонструватися на чорновій групі 6.5 мм на першому двигуні. Проте спільні результати будуть надані у таблицях для усіх двигунів по групах та режимах.

Для початку розрахуємо активну реактивну та повну потужність за вхідними даними використовуючи наступні формули:

Основна регулювальна характеристика мосту

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha \quad (2.1)$$

Де $\cos \alpha_1 \approx 0.34$

$$U_{d0(1)} = \frac{U_{d1}}{\cos \alpha_1} = \frac{250}{0.34} = 730.95 \quad (2.2)$$

Щоб визначити необхідну напругу трансформатора

$$U_{d0} = 1.35 U_L \quad (2.3)$$

$$U_{L1} = \frac{U_{d0}}{1.35} = \frac{730.95}{1.35} = 541.45 \quad (2.4)$$

Щоб обчислити активну потужність схеми

$$P_d = U_d I_d \quad (2.5)$$

$$P_d = 250 \cdot 270 = 67500 \text{ Вт} \quad (2.6)$$

Для повного коефіцієнта потужності

$$\chi = \nu \cos \alpha \quad (2.7)$$

Де $\nu \approx 0.955$ Коефіцієнт спотворення 6-пульсного випрямляча

$$\chi_1 = 0.955 \cdot 0.34 = 0.33 \quad (2.8)$$

Для визначення повної потужності мережі

$$S = \frac{P_d}{\chi} \quad (2.9)$$

$$S_1 = \frac{67500}{0.33} = 206656.33 \text{ ВА} \quad (2.10)$$

Реактивна потужність

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.11)$$

$$Q_1 = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{206656.33^2 - 67500^2} = 195321.76 \text{ ВАР} \quad (2.12)$$

Результат вносимо до таблиці №2.2

№ кліті	Група	Профіль 6,5 мм			Профіль 6,0 мм			Профіль 5,5 мм		
		S ВА	P Вт	Q ВАР	S ВА	P Вт	Q ВАР	S ВА	P Вт	Q ВАР
1	Чорнова	206656.3	67500	195321.8	55328	28000	47719.9	76539.4	25000	72341.4
2		191348.5	62500	180853.5	123573.3	48000	113869.9	192977.2	60000	183412.6
3		189924.4	65000	178455.3	308933.2	120000	284674.8	389683.6	115000	372328.2
4		306157.5	100000	289365.6	234194.5	105000	209337.2	281664.9	92000	266216.3
5		497506	162500	470219	424783.1	165000	391427.8	497506	162500	470219
6		451265.2	126000	433317.7	412704.6	154000	382895.7	455868.7	120000	439791.2
7		463145.2	144000	440190.3	382696.9	125000	361707	387289.3	126500	366047.4
8		574045.4	187500	542560.4	502016.4	195000	462596.5	497506	162500	470219
9	Проміжна	835759.3	220000	806283.9	701430.4	207000	670190.8	740146.3	171000	720121.9
10		607825	160000	586388.3	470349.8	78000	463837.2	512150.2	143000	491781.3
11		765393.8	250000	723413.9	656483	255000	604933.9	742432	242500	701711.5
12		308933.2	120000	284674.8	285852.9	140600	248884.6	308933.2	120000	284674.8
13		385320	195000	332334.9	328452	197400	262514.7	505407	234000	447973.5
14		423852	214500	365568.4	352101.8	225000	270833.3	307615.2	160000	262730.2
15	Чистова	692134.3	360000	591142.9	508257.4	312000	401225.1	653682.4	340000	558301.6
16		845941.9	440000	722507.9	668502.7	357000	565196.4	692134.3	360000	591142.9
17		615230.5	320000	525460.3	469783.1	270000	384442.6	538326.7	280000	459777.8
18		469160.7	288000	370361.7	234734.5	150000	180555.5	430064	264000	339498.2
19		313188.7	180000	256295.1	195519.4	122500	152386.3	234734.5	150000	180555.5
20		391224.2	250000	300925.9	312979.4	200000	240740.7	391224.2	250000	300925.9

Таб. 2.2 Результат розрахунків потужностей

Наступною задачею стане розкладання струмів та напруг на гармоніки за основою рядів Фур'є для подальших розрахунків коефіцієнта несинусоїдальності.

Важливим уточненням буде те що демонстрація розрахунку буде проводитись для двигуна №1. Результати загальних розрахунків будуть представлені у таблицях №4,5,6

Як відомо з умов ми маємо реверсний мостовий перетворювач це означає що для 6-пульсного моста присутні тільки **непарні гармоніки, не кратні 3:**

$$h = 1, 5, 7, 11, 13,$$

$$I_h = \frac{2I_d}{\pi h} \left| \sin \left(h \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\mu}{2} \right) \right) \right|, \quad (2.13)$$

І як результат перетворення формул отримуємо такий вираз для знаходження струму відповідної гармоніки

$$I_h = \frac{2I_d}{\pi h} \left| \sin \left(\frac{\pi h}{3} \right) \right|, h = 1, 5, 7, 11, 13, \quad (2.14)$$

Для гармоніки №1 $h=1$

$$I_1 = \frac{2I_d}{\pi h} \left| \sin \left(\frac{\pi h}{3} \right) \right| = \frac{2 \cdot 270}{3.14 \cdot 1} \left| \sin \left(\frac{3.14 \cdot 1}{3} \right) \right| = 148.86 \text{ A} \quad (15)$$

Для гармоніки №5 $h=5$ та продовжуємо так до 13-ї гармоніки

$$I_5 = \frac{2 \cdot 270}{3.14 \cdot 5} \left| \sin \left(\frac{3.14 \cdot 5}{3} \right) \right| = 29.77 \text{ A} \quad (2.16)$$

Наступним етапом переведення цих гармонік на сторону 6 кВ для цього ми визначаємо коефіцієнт трансформації

$$k_T = \frac{U_{BH}}{U_{HH}} = \frac{6000}{380} = 15.79 \quad (2.17)$$

$$I_{h,6\text{кВ}} = \frac{I_{h,0.4\text{кВ}}}{k_T} \quad (2.18)$$

$$I_{1,6\text{кВ}} = \frac{I_{1,0.4\text{кВ}}}{k_T} = \frac{148.86}{15.79} = 9.43 \text{ A} \quad (2.19)$$

Так само для інших гармонік.

$$I_{5,6\text{кВ}} = \frac{I_{5,0.4\text{кВ}}}{k_T} = \frac{29.79}{15.79} = 1.89 \text{ A} \quad (2.20)$$

Також для перевірки правильності розкладання у ряди Фур'є

$$\frac{I_{1,6кВ}}{I_{5,6кВ}} = \frac{9.43}{1.89} = 0,2 \quad (2.21)$$

Це співвідношення гарно демонструє розкладання у ряди оскільки $\frac{1}{5} = 0,2$

Результат вносимо до таблиць:

Тип	Двигун №	I_1 6.5 мм	I_5 6.5 мм	I_7 6.5 мм	I_{11} 6.5 мм	I_{13} 6.5 мм
Чорнова	1	9.43	1.89	1.35	0.86	0.73
	2	8.73	1.75	1.25	0.79	0.67
	3	8.73	1.75	1.25	0.79	0.67
	4	13.97	2.79	2	1.27	1.07
	5	22.7	4.54	3.24	2.06	1.75
	6	20.95	4.19	2.99	1.9	1.61
	7	20.95	4.19	2.99	1.9	1.61
	8	26.19	5.24	3.74	2.38	2.01
Проміжна	9	38.41	7.68	5.49	3.49	2.95
	10	27.93	5.59	3.99	2.54	2.15
	11	34.92	6.98	4.99	3.17	2.69
	12	13.97	2.79	2	1.27	1.07
	13	17.46	3.49	2.49	1.59	1.34
	14	19.2	3.84	2.74	1.75	1.48
Чистова	15	31.43	6.29	4.49	2.86	2.42
	16	38.41	7.68	5.49	3.49	2.95
	17	27.93	5.59	3.99	2.54	2.15
	18	20.95	4.19	2.99	1.9	1.61
	19	13.97	2.79	2	1.27	1.07
	20	17.46	3.49	2.49	1.59	1.34

Таблиця 2.3 струм гармонік для режиму 6.5 мм

Тип	Двигун №	I_1 6.0мм	I_5 6.0 мм	I_7 6.0 мм	I_{11} 6.0 мм	I_{13} 6.0 мм
Чорнова	1	2.44	0.49	0.35	0.22	0.19
	2	5.59	1.12	0.8	0.51	0.43
	3	13.97	2.79	2	1.27	1.07
	4	10.48	2.1	1.5	0.95	0.81
	5	19.2	3.84	2.74	1.75	1.48
	6	19.2	3.84	2.74	1.75	1.48
	7	17.46	3.49	2.49	1.59	1.34
	8	22.7	4.54	3.24	2.06	1.75
Проміжна	9	31.43	6.29	4.49	2.86	2.42
	10	22.7	4.54	3.24	2.06	1.75
	11	29.68	5.94	4.24	2.7	2.28
	12	12.92	2.58	1.85	1.17	0.99
	13	14.67	2.93	2.1	1.33	1.13
	14	15.71	3.14	2.24	1.43	1.21
Чистова	15	22.7	4.54	3.24	2.06	1.75
	16	29.68	5.94	4.24	2.7	2.28
	17	20.95	4.19	2.99	1.9	1.61
	18	10.48	2.1	1.5	0.95	0.81
	19	8.73	1.75	1.25	0.79	0.67
	20	13.97	2.79	2	1.27	1.07

Таблиця 2.4 струм гармонік для режиму 6.0 мм

Тип	Двигун №	I_1 5.5 мм	I_5 5.5 мм	I_7 5.5 мм	I_{11} 5.5 мм	I_{13} 5.5 мм
Чорнова	1	3.49	0.7	0.5	0.32	0.27
	2	8.73	1.75	1.25	0.79	0.67
	3	17.46	3.49	2.49	1.59	1.34
	4	13.97	2.79	2	1.27	1.07
	5	22.7	4.54	3.24	2.06	1.75
	6	20.95	4.19	2.99	1.9	1.61
	7	19.2	3.84	2.74	1.75	1.48
	8	22.7	4.54	3.24	2.06	1.75
Проміжна	9	33.17	6.63	4.74	3.02	2.55
	10	22.7	4.54	3.24	2.06	1.75
	11	33.87	6.77	4.84	3.08	2.61
	12	13.97	2.79	2	1.27	1.07
	13	22.7	4.54	3.24	2.06	1.75
	14	13.97	2.79	2	1.27	1.07
Чистова	15	29.68	5.94	4.24	2.7	2.28
	16	31.43	6.29	4.49	2.86	2.42
	17	24.44	4.89	3.49	2.22	1.88
	18	19.2	3.84	2.74	1.75	1.48
	19	10.48	2.1	1.5	0.95	0.81
	20	17.46	3.49	2.49	1.59	1.34

Таблиця 2.5 струм гармонік для режиму 5.5 мм

Наступним кроком буде пошук опорів мережі для визначення гармонік напруги на лінії 6 кВ

Потужність трансформатора згідно з умовами $S_N = 1250 \text{ кВА}$

Згідно зі схемою та умов задачі базисний опір (на рівні 6 кВ):

$$Z_b = \frac{U_{BH}^2}{S_N} = \frac{6000^2}{1250 \cdot 10^3} = 28.8 \text{ Ом} \quad (2.22)$$

Напруга КЗ трансформатора з довідника $u_{кз} = 4.5\%$ тоді:

$$X_T = \frac{u_{кз}}{100} \cdot Z_b = \frac{4.5}{100} \cdot 28.8 = 1.3 \text{ Ом} \quad (2.23)$$

Опір лінії:

$$X_c = x_0 l_{км} = 0.08 \cdot 0.05 = 0.004 \text{ Ом} \quad (2.24)$$

$$R_c = r_c X_c = 0.265 \cdot 0.004 = 0.00106 \text{ Ом} \quad (2.25)$$

Тоді сумарний опір системи згідно з гармонікою h

$$Z_{ch} = R_c + h(X_c + X_T) \quad (2.26)$$

Для першої гармоніки

$$Z_{c1} = 0.00106 + 1(0.004 + 1.3) = 1.31 \quad (2.27)$$

Для п'ятої гармоніки

$$Z_{c5} = 0.01 + 5(0.004 + 1.3) = 6.51 \quad (2.28)$$

Оскільки ми маємо не один двигун для розрахунку треба враховувати сумарний струм гармоніки відповідного номеру за усіма двигунами у групі.

Оскільки перша гармоніка напруги майже не має викривлень її напруга близька до номінального значення

$$U_1 = 6000 \text{ В} \quad (2.29)$$

Тоді гармонічна напруга $h=5,7,11,13$:

$$U_h = I_{\Sigma h, 6 \text{ кВ}} \cdot Z_{ch} \quad (2.30)$$

Де $I_{\Sigma h, 6 \text{ кВ}}$ сумарний струм по гармоніці h усіх двигунів групи (чорнова проміжна чистова)

$$I_{\Sigma 5, 6 \text{ кВ}} = I_{5.1 \text{ 6кВ}} + \dots + I_{5.8 \text{ 6кВ}} = 131.64 \quad (2.31)$$

$$U_5 = 26.33 \cdot 9.11 = 171.38 \text{ В} \quad (2.32)$$

І так само для інших гармонік та вносимо значення до таблиць:

Тип	U_5 6.5 мм	U_7 6.5 мм	U_{11} 6.5 мм	U_{13} 6.5 мм
Чорнова	171.16	171.15	171.14	171.13
Проміжна а	197.49	197.48	197.47	197.47
Чистова а	195.22	195.21	195.20	195.20

Таблиця 2.6 струм гармонік для режиму 6.5 мм

Тип	U_5 6.0 мм	U_7 6.0 мм	U_{11} 6.0 мм	U_{13} 6.0 мм
Чорнова	144.37	144.37	144.36	144.35
Проміжна	165.26	165.25	165.24	165.24
Чистова	138.47	138.46	138.46	138.45

Таблиця 2.7 струм гармонік для режиму 6.0 мм

Тип	U_5 5.5 мм	U_7 5.5 мм	U_{11} 5.5 мм	U_{13} 5.5 мм
Чорнова	167.98	167.97	167.97	167.96
Проміжна	182.51	182.50	182.49	182.49
Чистова	172.52	172.51	172.51	172.50

Таблиця 2.8 струм гармонік для режиму 5.5 мм

Далі розрахуємо коефіцієнт несинусоїдальності для напруги.

Для однієї гармоніки:

$$K_{U(h)} = \frac{U_h}{U_n} \cdot 100\% \quad (2.33)$$

Та повний коефіцієнт

$$k_{НС,U} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_n} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_5^2 + U_7^2 + U_{11}^2 + U_{13}^2}}{U_n} \cdot 100\% = 6\% \quad (2.34)$$

Та вносимо ці значення до таблиці 2.9

Тип	6.5 мм	6.0 мм	5.5 мм
Чорнова	5.71%	4.82%	5.61%
Проміжна	6.59%	5.51%	6.09%
Чистова	6.51%	4.62%	5.76%

Таблиця 2.9 коефіцієнти несинусоїдальності для різних режимів роботи на лінії 6 кВ

Та відобразимо це графічно

Для цього нам знадобиться:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.35)$$

$$t = 0, \frac{T}{200} \cdot 3T \quad (2.36)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.37)$$

Для графічного відображення будуть використані діючі та амплітудні значення.

Для отримання амплітудного значення напруги ми використовуємо попередньо розраховане діюче та множимо його на $\sqrt{2}$

$$U_{1A} = U_1 \cdot \sqrt{2} \quad (2.38)$$

$$U_{1A} = 6000 \cdot \sqrt{2} = 8485.38 \text{ В} \quad (2.39)$$

$$U_{5A} = U_5 \cdot \sqrt{2} = 171.48 \cdot \sqrt{2} = 242.51 \text{ В} \quad (2.40)$$

Для струму амплітудні значення так само множаться на $\sqrt{2}$

$$I_{1A} = I_{\Sigma 1,6\text{кВ}} \cdot \sqrt{2} = 186.17 \quad (2.41)$$

$$I_{5A} = I_{\Sigma 5,6\text{кВ}} \cdot \sqrt{2} = 186.17 \quad (2.42)$$

Згрупуємо гармоніки струму та напруги та будуємо графік

$$U_{\text{гр}} = U_{1A} \cdot \sin(\omega t) + U_{5A} \cdot \sin(5\omega t) + U_{7A} \cdot \sin(7\omega t) + U_{11A} \cdot \sin(11\omega t) + U_{13A} \cdot \sin(13\omega t) \quad (2.43)$$

$$I_{\text{гр}} = I_{1A} \cdot \sin(\omega t) + I_{5A} \cdot \sin(5\omega t) + I_{7A} \cdot \sin(7\omega t) + I_{11A} \cdot \sin(11\omega t) + I_{13A} \cdot \sin(13\omega t) \quad (2.44)$$

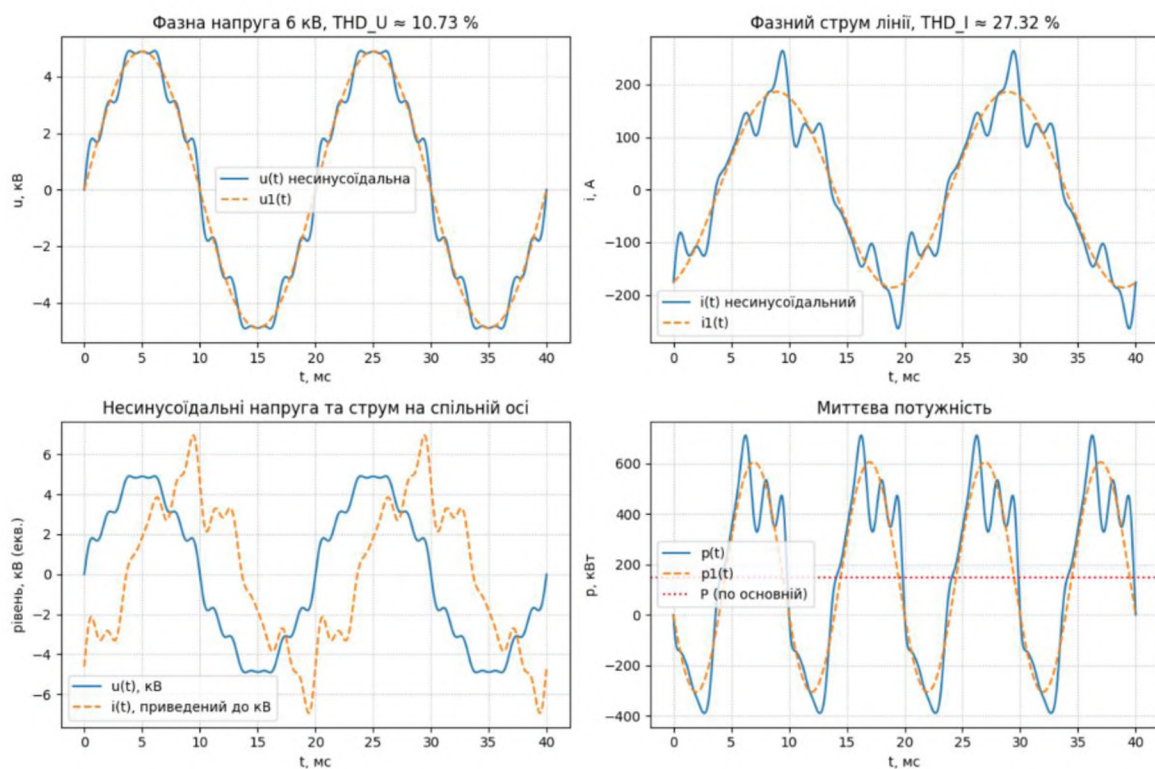


Рис. 2.1 Графік фазної напруги струму та миттєвої потужності для двигунів чорнової групи при роботі на 6.5мм

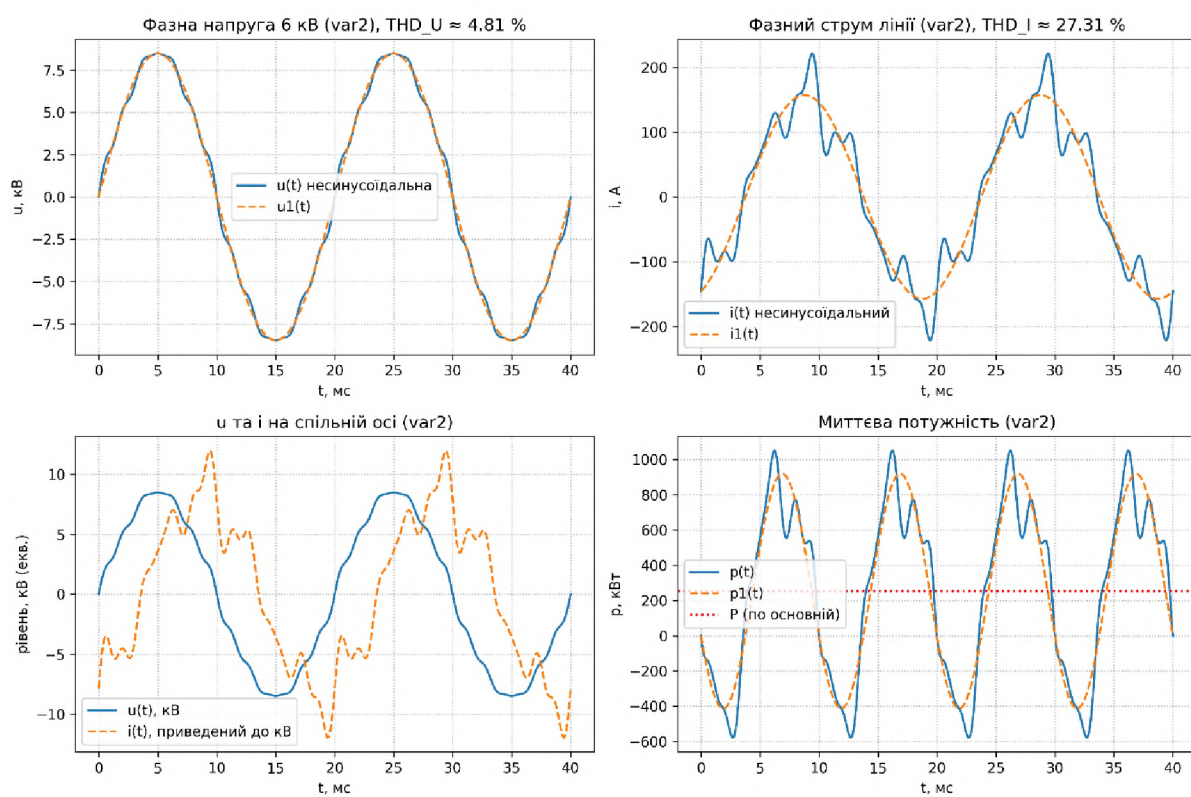


Рис. 2.2 Графік фазної напруги струму та миттєвої потужності для двигунів чорнової обробки режиму 6.0 мм

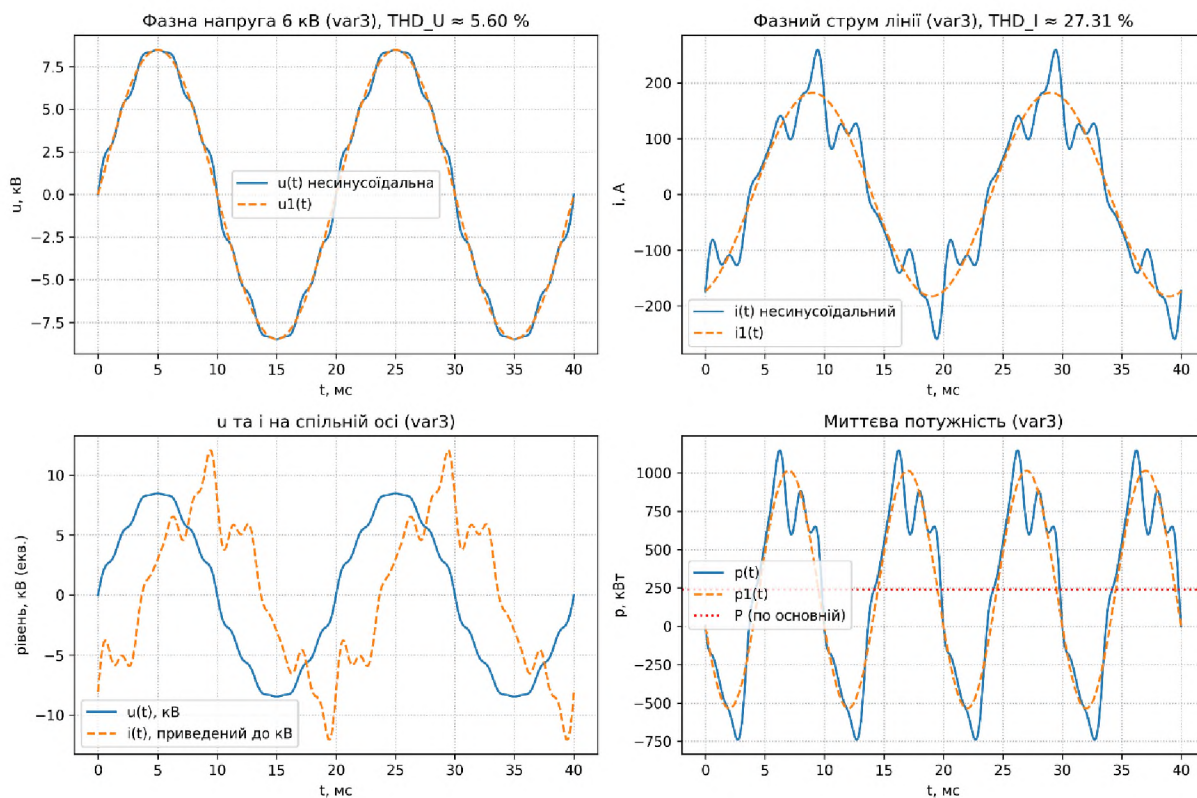


Рис. 2.3 Графік фазної напруги струму та миттєвої потужності для двигунів чорнової групи при роботі на 5.5 мм

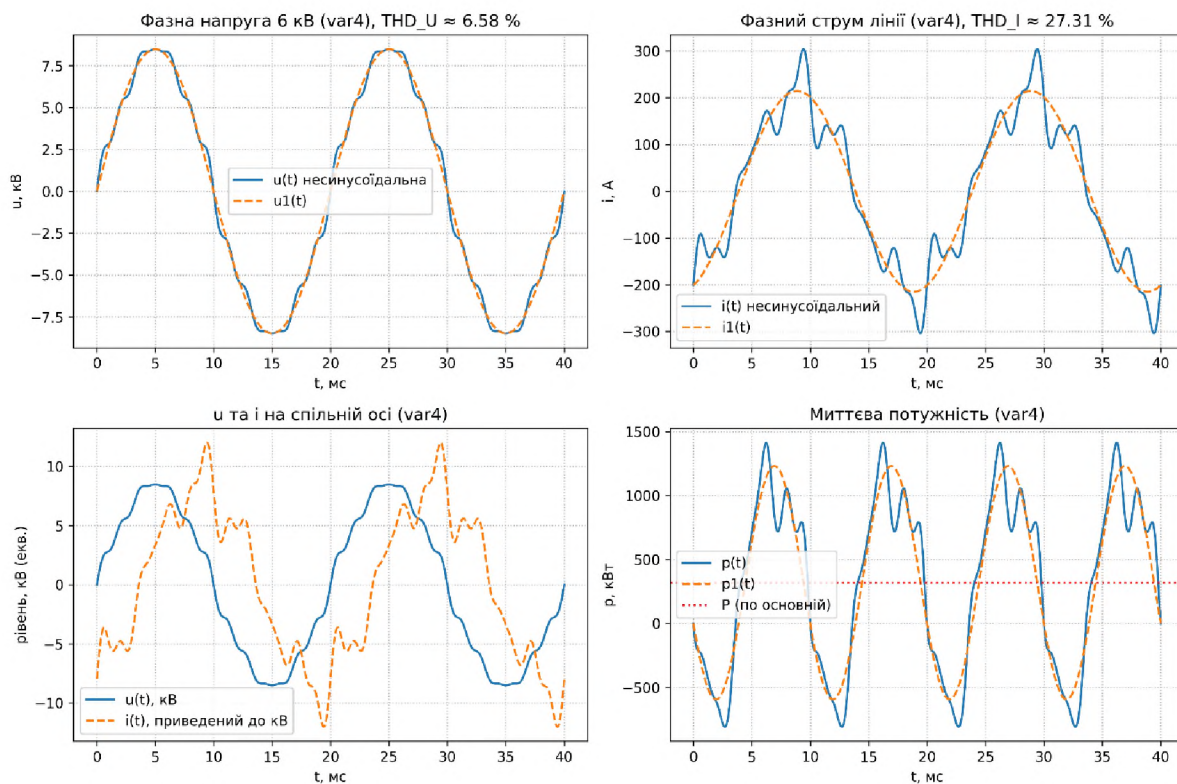


Рис. 2.4 Графік фазної напруги струму та миттєвої потужності для двигунів проміжної групи при роботі на 6.5 мм

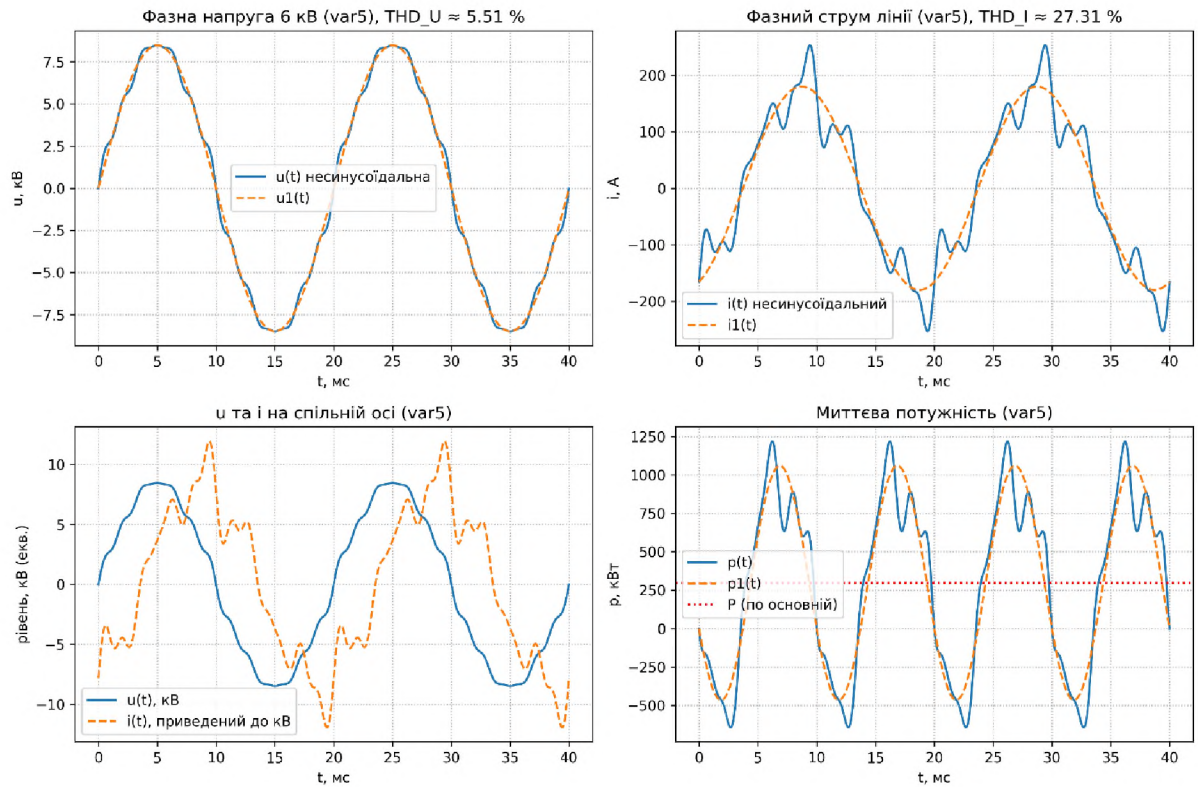


Рис. 2.5 Графік фазної напруги струму та миттєвої потужності для двигунів проміжної групи при роботі на 6.0 мм

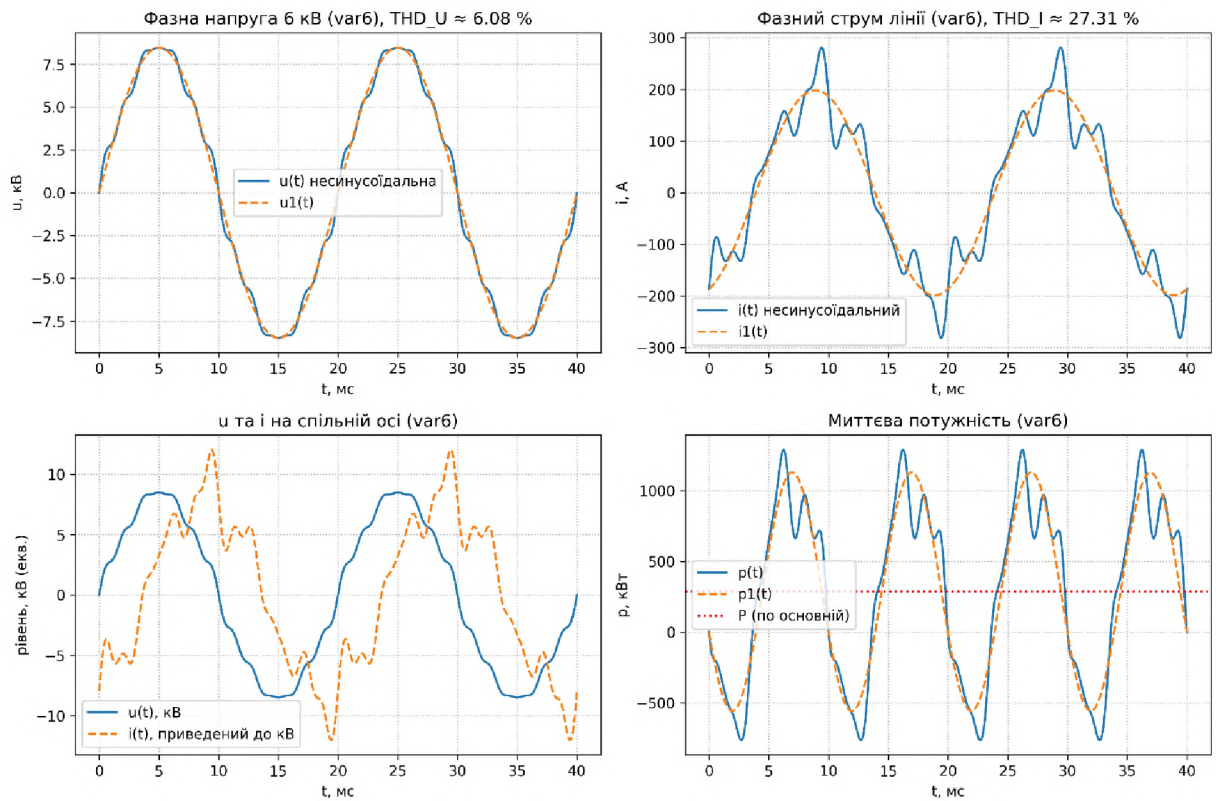


Рис. 2.6 Графік фазної напруги струму та миттєвої потужності для двигунів проміжної групи при роботі на 5.5 мм

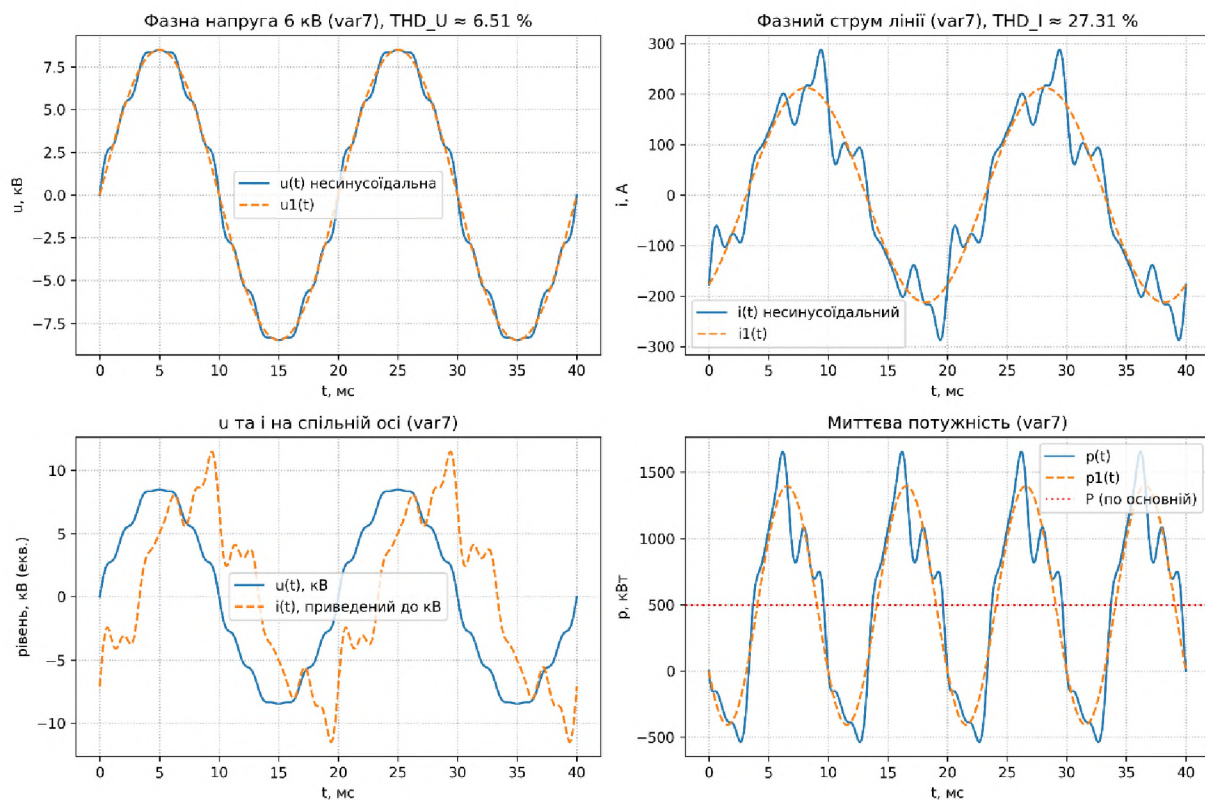


Рис. 2.7 Графік фазної напруги струму та миттєвої потужності для двигунів чистової групи при роботі на 6.5 мм

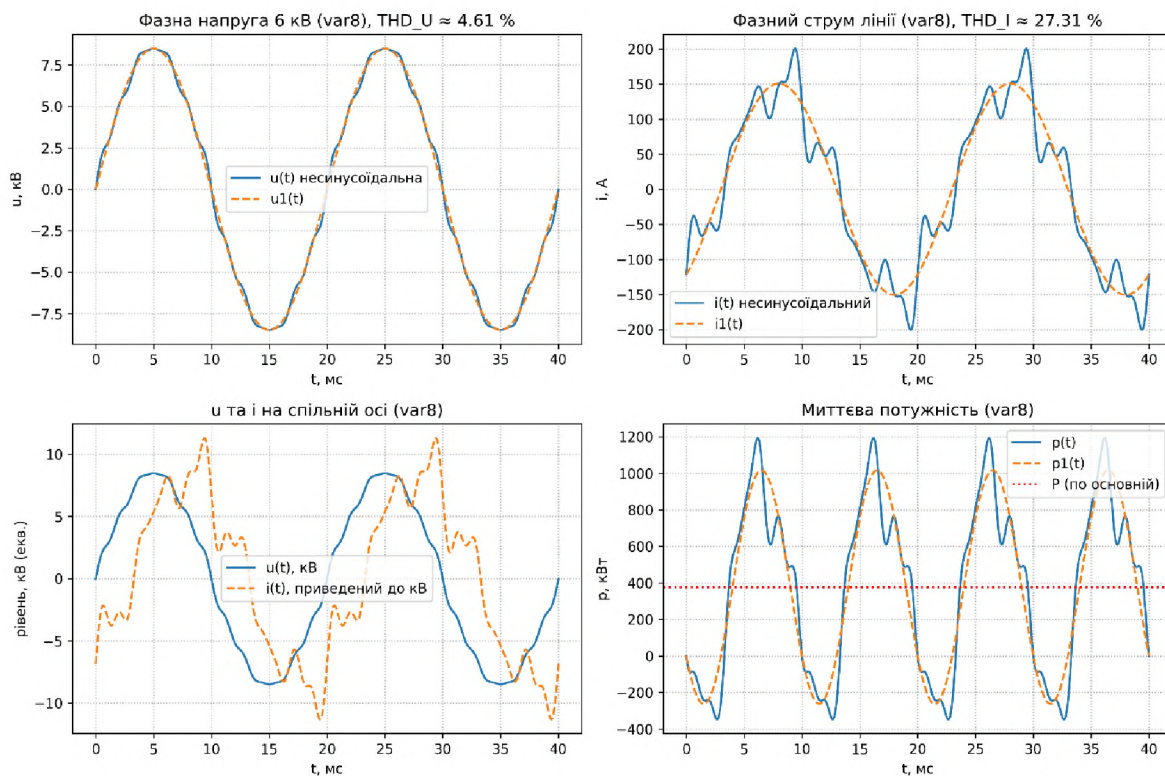


Рис. 2.8 Графік фазної напруги струму та миттєвої потужності для двигунів чистової групи при роботі на 6.0 мм

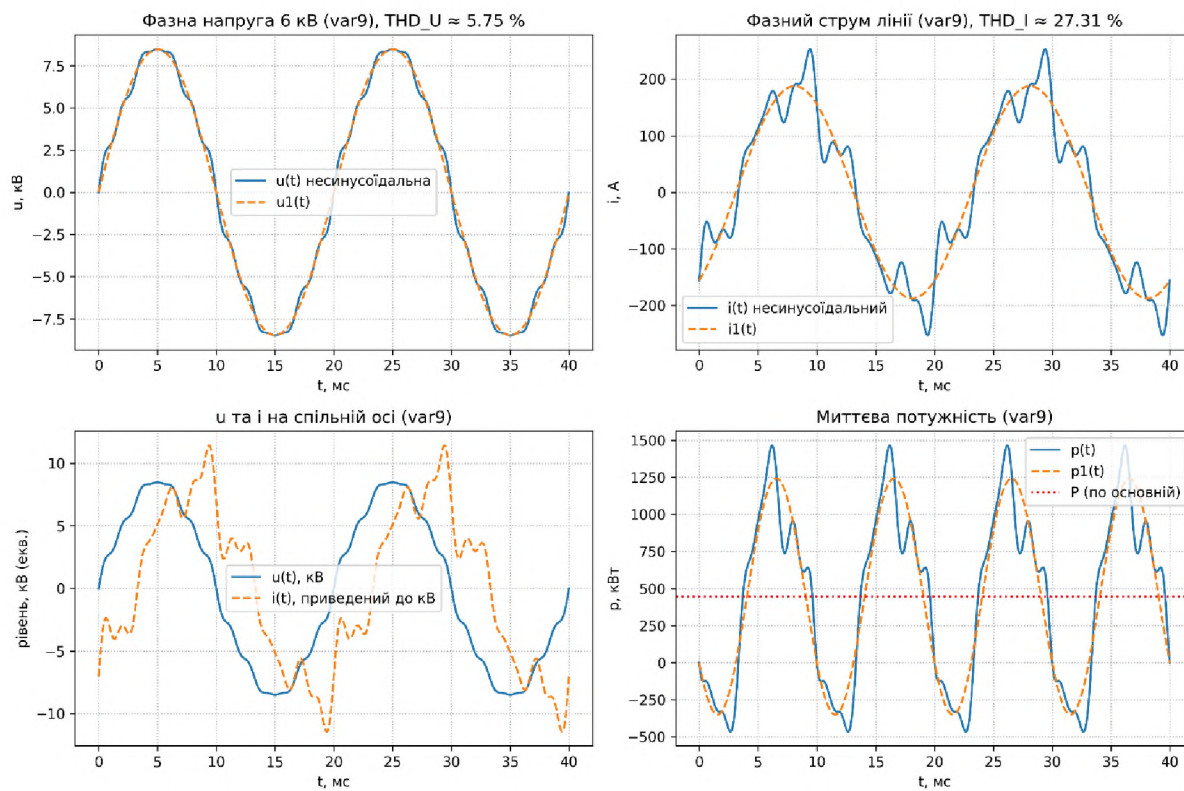


Рис. 2.9 Графік фазної напруги струму та миттєвої потужності для двигунів чистової групи при роботі на 5.5 мм

2.4 Розрахунок фільтрів вищих гармонік

Як і у попередніх розрахунках демонстрацію буде виконано на гармоніках $v=1$ або $v=5$, та лише для групи чорнової обробки з режимом 6.5 мм результат за розрахунками буде внесений до відповідних таблиць у розділі.

Коефіцієнт потужності до компенсації.

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_{\Sigma}}{S_{\Sigma}} \quad (2.45)$$

$$\cos \varphi_{1.1} = \frac{P_{\Sigma 1}}{S_{\Sigma 1}} = 0.32 \quad (2.46)$$

Кут зсуву фаз до компенсації.

$$\varphi_1 = \arccos(\cos \varphi_1) = 71.48^\circ \quad (2.47)$$

Тангенс кута зсуву фаз до компенсації.

$$\tan \varphi_1 = \frac{Q_{\Sigma}}{P_{\Sigma}} = 2.98 \quad (2.48)$$

Заданий (цільовий) коефіцієнт потужності після компенсації.

$$\cos \varphi_2 = 0.95 \quad (2.49)$$

Кут зсуву фаз після компенсації.

$$\varphi_2 = \arccos(\cos \varphi_2) = 18.19^\circ \quad (2.50)$$

Тангенс кута зсуву фаз після компенсації.

$$\tan \varphi_2 = \tan(\varphi_2) = 0.33 \quad (2.51)$$

Потужність фільтро-компенсуючої установки.

$P_{\Sigma} = \sum P$ двигунів чорнової обробки режиму 6.5 мм

$$Q_k = P_{\Sigma} \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = 1159.5 \cdot 10^3 \cdot (2.98 - 0.33) = 2.43 \text{ МВар} \quad (2.50)$$

Залишкова реактивна потужність після компенсації.

$$Q_{\text{зал}} = P_{\Sigma} \tan \varphi_2 = 1159.5 \cdot 10^3 \cdot 0.33 = 0.3 \text{ МВар} \quad (2.52)$$

Сумарний «енергетичний вклад» гармонік струму.

$$\sum I_v^2 = I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 \approx 2585.11 \text{ А} \quad (2.53)$$

Відносна частка кожної гармоніки.

$$p_v = \frac{I_v^2}{\sum I_v^2} \quad (2.54)$$

$$p_5 = \frac{I_5^2}{\sum I_5^2} = 0.39 \quad p_7 = \frac{I_7^2}{\sum I_7^2} = 0.2798 \quad (2.55)$$

$$p_{11} = \frac{I_{11}^2}{\sum I_{11}^2} = 0.18 \quad p_{13} = \frac{I_{13}^2}{\sum I_{13}^2} = 0.15 \quad (2.56)$$

Реактивна потужність фільтра для окремої гармоніки.

$$Q_{cv} = p_v Q_k \quad (2.57)$$

$$Q_{c5} = p_5 Q_k = 0.39 \cdot 2.43 \cdot 10^6 = 0.952 \text{ МВар} \quad (2.58)$$

Реактивна потужність фільтра зв'язана з ємнісним опором за формулою:

$$Q_{cv} = \frac{U_L^2}{X_{C1v}} \quad (2.59)$$

Тоді ємнісний опір фільтра на основній частоті.

$$X_{C15} = \frac{U_L^2}{Q_{c5}} = \frac{6000^2}{0.952 \cdot 10^6} = 37.99 \text{ Ом} \quad (2.60)$$

Кутова частота основної гармоніки.

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad (2.61)$$

Ємність фільтра для гармоніки v .

$$C_v = \frac{1}{\omega_1 X_{C1v}} \quad (2.62)$$

$$C_5 = \frac{1}{\omega_1 X_{C15}} = \frac{1}{314.16 \cdot 37.99} \approx 84 \text{ мкФ} \quad (2.63)$$

Індуктивний опір фільтра на частоті гармоніки ν .

$$X_{L\nu} = \nu X_{L1\nu} = 1.52 \cdot 5 = 7.6 \quad (2.64)$$

Ємнісний опір фільтра на частоті гармоніки ν .

$$X_{C\nu} = \frac{X_{C1\nu}}{\nu^2} = \frac{37.99}{5^2} = 1.52 \quad (2.65)$$

Умова резонансу фільтра на частоті гармоніки ν .

$$\nu X_{L1\nu} - \frac{X_{C1\nu}}{\nu} = 0 \quad (2.66)$$

Індуктивність реактора фільтра.

$$L_\nu = \frac{X_{L1\nu}}{\omega_1} = \frac{X_{C1\nu}}{\nu^2 \omega_1} = \frac{1.52 \cdot 1}{1^2 \cdot 314.16} = 4.83 \text{ мГн} \quad (2.67)$$

Добротність фільтра за індуктивною гілкою.

$$q_\nu = \frac{X_{L\nu}}{R_\nu} \quad (2.68)$$

приймаємо добротність $q_\nu = 30$

Активний опір фільтра за заданою добротністю.

$$R_\nu = \frac{X_{L\nu}}{q_\nu} = \frac{\nu X_{L1\nu}}{q_\nu} = \frac{5 \cdot 7.6}{30} = 0.25 \quad (2.69)$$

Еквівалентний опір фільтра за гармонікою ν

$$Z_{f,\nu} = R_\nu + \left(\omega_1 \cdot \nu \cdot L_\nu - \frac{1}{\omega_1 \cdot \nu \cdot C_\nu} \right) \quad (2.70)$$

$$Z_{f,1} = 0.25 + (314.16 \cdot 5 \cdot 4.83 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{314.16 \cdot 5 \cdot 84 \cdot 10^{-6}}) = 0.25 \quad (2.71)$$

Еквівалентний опір «мережа || фільтр» на гармоніці ν .

$$Z_{\text{екв},\nu} = \left(\frac{1}{Z_{\text{мер},\nu}} + \frac{1}{Z_{f,\nu}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{6.51} + \frac{1}{0.25} \right)^{-1} = 0.24 \quad (2.72)$$

Розраховуємо усі опори для інших режимів та вносимо до таблиці.

група	гармоніка	C_ν мкФ	L_ν мГн	R_ν Ом	$Z_{f,\nu}$ Ом
Чорнова	5	83	4.8	0.253	0.24
	7	60	3.4	0.252	0.25
	11	38	2.2	0.249	0.25
	13	32	1.9	0.254	0.25
Проміжна	5	83	4.8	0.253	0,25
	7	60	3.4	0.252	0,25
	11	38	2.2	0.25	0,25
	13	32	1.9	0.253	0,25
Чистова	5	83	4.8	0.254	0,25
	7	60	3.4	0.253	0,25
	11	38	2.2	0.251	0,25
	13	32	1.9	0.253	0,25

Таб. 2.10 RLC та Z_f фільтра для режиму роботи 6.5 мм

група	гармоніка	C_v мкФ	L_v мГн	R_v Ом	$Z_{f,v}$ Ом
Чорнова	5	67	6	0.31	0.3
	7	48	4.3	0.31	0.3
	11	30	2.7	0.31	0.31
	13	26	2.3	0.31	0.31
Проміжна	5	76	5.3	0.28	0,28
	7	54	3.8	0.28	0,28
	11	34	2.4	0.28	0,28
	13	29	2	0.28	0,29
Чистова	5	50	8	0.42	0,42
	7	36	5.7	0.42	0,42
	11	23	3.6	0.42	0,42
	13	19	3.1	0.42	0,42

Таб. 2.11 RLC та Z_f фільтра для режиму роботи 6.0 мм

група	гармоніка	C_v мкФ	L_v мГн	R_v Ом	$Z_{f,v}$ Ом
Чорнова	5	81	5	0.26	0.25
	7	58	3.5	0.26	0.25
	11	37	2.3	0.26	0.26
	13	31	1.9	0.26	0.26
Проміжна	5	89	4.5	0.24	0,23
	7	63	3.2	0.24	0,23
	11	40	2.1	0.24	0,23
	13	34	1.7	0.24	0,23
Чистова	5	65	6.2	0.32	0,32
	7	47	4.4	0.32	0,32
	11	30	2.8	0.32	0,32
	13	25	2.4	0.32	0,32

Таб. 2.12 RLC та Z_f фільтра для режиму роботи 5.5 мм

І як результат при встановленні фільтра графік напруги матиме наступний вигляд

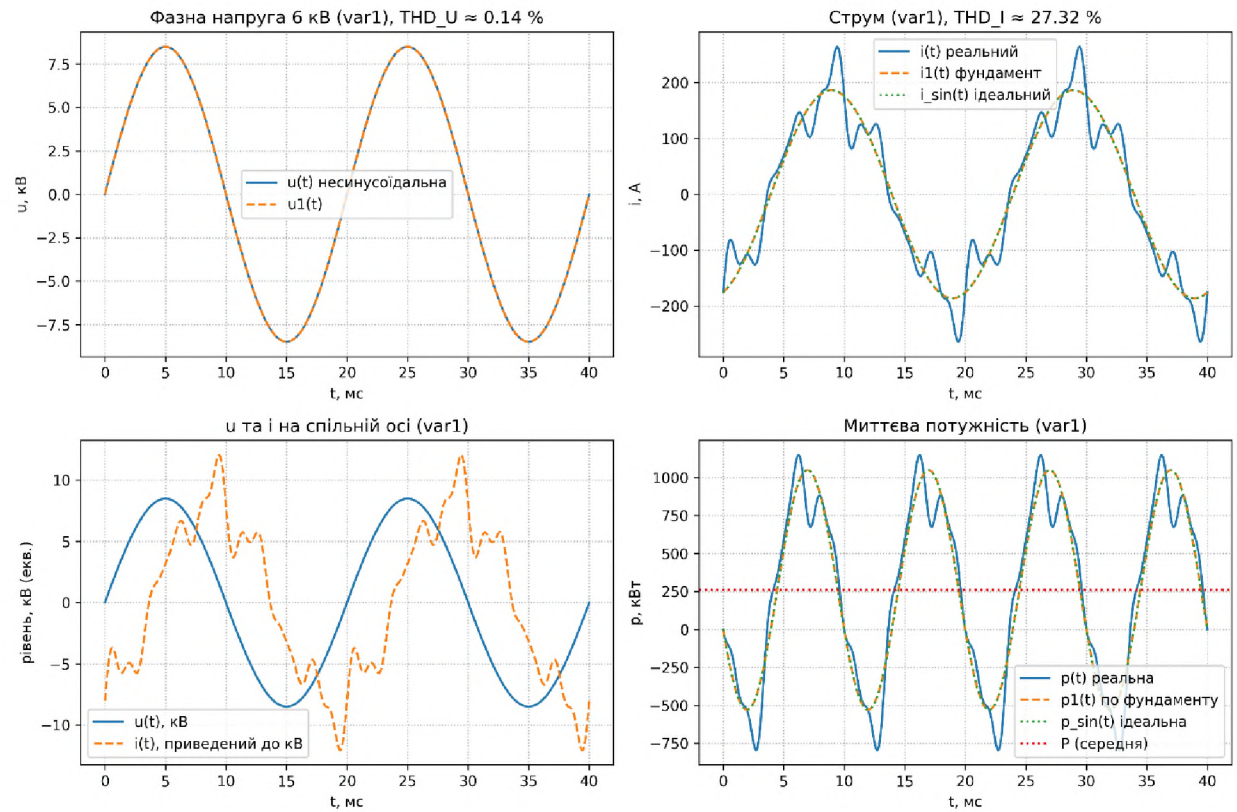


Рис. 2.10 Графіки після встановлення фільтра

Оскільки графіки напруги в усіх випадках «ідеальні» графік демонструється один. А результати обчислень несинусоїдальності показані у таблиці 2.12-14

Група	THD U %
Чорнова	0.21 %
Проміжна	0.17%
Чистова	0,16%

Таблиця 2.13 несинусоїдальність напруги після встановлення фільтра для режиму 6.5 мм

Група	THD U %
Чорнова	0.15 %
Проміжна	0.15%
Чистова	0,19%

Таблиця 2.14 несинусоїдальність напруги після встановлення фільтра для режиму 6.0 мм

Група	THD U %
Чорнова	0.14 %
Проміжна	0.14%
Чистова	0,18%

Таблиця 2.15 несинусоїдальність напруги після встановлення фільтра для режиму 5.5 мм

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ФІЛЬТРІВ

3.1 Розробка та дослідження моделі системи електропостачання з фільтром гармонік

3.1.1. Вибір середовища для моделювання.

Для дослідження впливу реверсивних тиристорних перетворювачів і двигунів постійного струму на якість електроенергії обрано середовище **Matlab/Simulink** із пакетом **Simscape Electrical / Specialized Power Systems**, що забезпечує можливість моделювання електромагнітних процесів у трифазних системах та напівпровідникових перетворювачах. Таке середовище дозволяє одночасно враховувати неідеальність мережі 6 кВ, параметри трансформаторів, режими керування випрямлячами та динаміку електричних машин постійного струму. [29. 30]

Оскільки метою є визначення рівня спотворень напруги та струму, розрахунок гармонічного складу, $\cos\varphi$ та зміни активних і реактивних потоків потужності, модель реалізується у **повному електромагнітному режимі**. Такий підхід забезпечує відтворення миттєвих значень напруги та струму та дозволяє застосувати FFT-аналіз для визначення показників якості електроенергії на шині 6 кВ.

Для коректного відображення роботи випрямлячів вибирається **continuous-solver** типу *ode23tb* або *ode15s* з малим кроком інтегрування (порядку 5–10 мкс). Це необхідно через наявність швидкоплинних процесів — комутації тиристорів, пульсацій струму та можливих режимів реверсу. У разі використання дискретного режиму моделювання крок дискретизації теж задається малим, щоб точність розрахунку гармонік відповідала вимогам дослідження.

Усі параметри моделі приводяться до **номінальної частоти 50 Гц**, а напруга джерела 6 кВ задається або як ідеальне трифазне джерело із серійними R–L елементами, або як Thevenin-еквівалент мережі з урахуванням її потужності короткого замикання. Такий спосіб дозволяє коректно відобразити зміни напруги на шині живлення при підключенні груп нелінійних навантажень.

Усі вимірювання напруги, струмів, миттєвої потужності, коефіцієнтів спотворення і спектру гармонік організовуються через блок **Powergui**, що слугує базовим елементом для аналізу електромагнітних режимів у Simulink. Саме він забезпечує доступ до інструментів FFT-аналізу, налаштування типу розв'язувача та керування режимами симуляції.

3.1.2. Опис структурної моделі електропривода з реверсивним тиристорним перетворювачем та дослідження

Після процесу моделювання ми отримали наступну схему для нашої системи

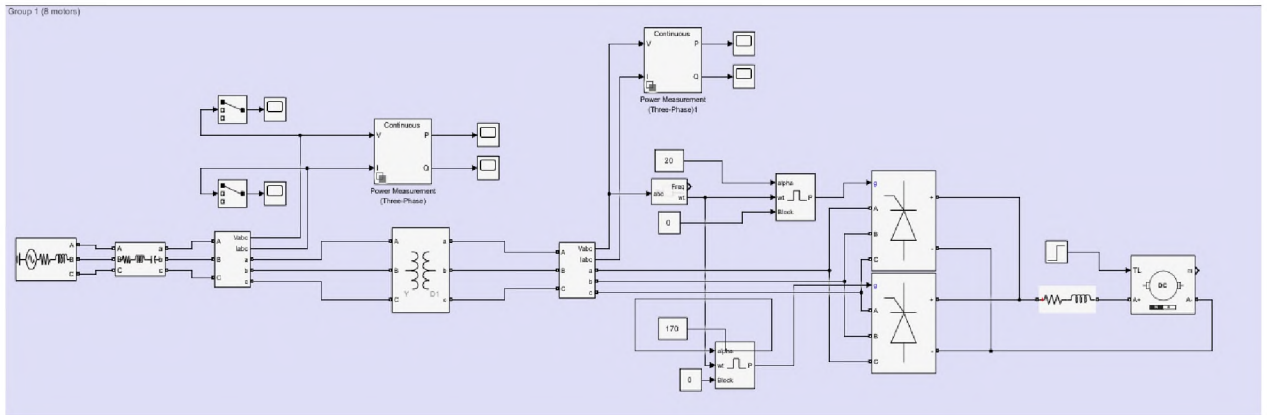


Рис. 3.1 Загальний вигляд мережі для одного двигуна

Далі опис використаних компонентів та структури з обґрунтуванням для них:

У моделі використовується ідеальне трифазне джерело напруги, послідовно з яким включено активний та реактивний опори. Така конфігурація еквівалентна внутрішньому опору реальної системи електропостачання та дозволяє відтворити зміни напруги на шині живлення під час роботи нелінійних перетворювачів. Серійні R–L елементи вводять у модель необхідну жорсткість мережі та забезпечують коректне формування миттєвих струмів і спадів напруги при імпульсних комутаціях тиристорів.

Вихідна трифазна напруга подається на вимірювальний блок, який фіксує миттєві значення фазних напруг і струмів. Отриманий сигнал напруги використовується для живлення системи фазового автопідлаштування частоти (PLL), що синхронізує модель із фазою мережі. PLL генерує сигнал кутової координати ωt , необхідний для формування моментів відкривання тиристорів. Таким чином, увесь подальший процес керування перетворювачем прив'язується до реальної фази мережі, що забезпечує коректну роботу випрямляча в усіх режимах, включно з реверсом.

Після ділянки лінії встановлено силовий трансформатор 6/0,4 кВ, який понижує напругу до рівня живлення тиристорного перетворювача. Модель трансформатора враховує опір та реактивність обмоток, що дозволяє адекватно відтворити перехідні процеси намагнічування та зміну напруги під дією нелінійного навантаження.

Далі розташовано два тиристорні мостові перетворювачі, реалізовані на базі Universal Bridge. Один із них працює у «прямому» напрямі, інший — у «зворотному». Обидва мости отримують власні керуючі імпульси, сформовані блоками Pulse Generator (Thyristor, 6-pulse). Кожен генератор отримує на вхід сигнал firing-angle α та кутову координату з PLL. Для прямого режиму встановлюється малий кут α , що забезпечує подачу додатної випрямленої напруги, тоді як для зворотного моста задається кут близький до 170° що фактично блокує його роботу. При реверсі ці кути змінюють ролями — активується другий міст, а перший переходить у режим блокування.

Обидва мостові перетворювачі мають спільну шину постійного струму, сформовану шляхом паралельного з'єднання їхніх виходів. Для забезпечення сталого та неперервного струму в колі якоря між мостами та двигуном встановлено послідовну R–L ланку, яка виконує роль згладжувального дроселя. Цей елемент критично важливий для коректної роботи реверсивної схеми: він запобігає імпульсним коротким замиканням при перемиканні мостів, обмежує пульсації випрямленого струму та забезпечує плавність електромагнітного моменту двигуна.

У якості навантаження використовується модель двигуна постійного струму з незалежним збудженням. Двигун живиться від випрямленої напруги, а на його вал подається зовнішній момент навантаження. Це дозволяє оцінити вплив різних режимів керування тиристорними мостами на механічні характеристики привода, зміну струму якоря, перехідні процеси та сталу швидкість обертання.

У декількох точках схеми реалізовані вимірювальні підсистеми для обчислення активної й реактивної потужності, а також струмів і напруг у вузлових точках перетворювального комплексу. Це дає змогу аналізувати вплив тиристорного навантаження на напругу живлення трансформатора та оцінювати показники якості електроенергії при різних значеннях кута керування.

Далі для зпрошення структура з двигуном та перетворювачем буде зібрана до субсистеми з відповідними компонентами

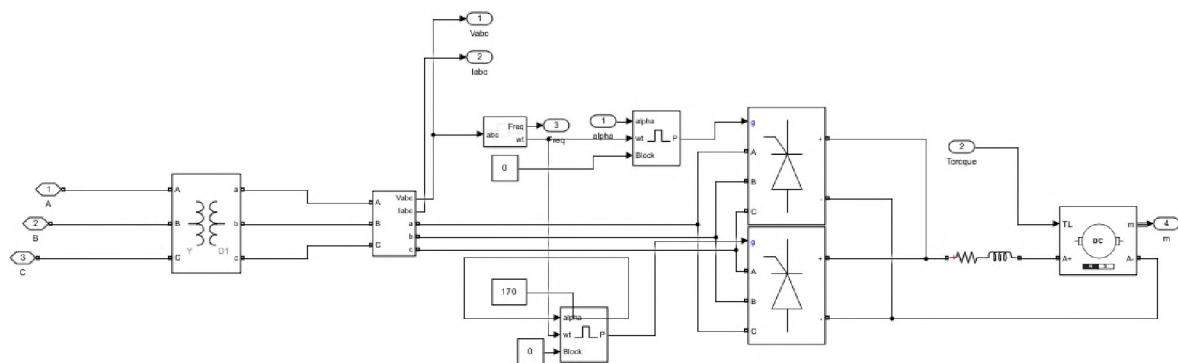


Рис. 3.2 структура субсистеми з середини

Ці субсистеми матимуть свої входи та виходи для вимірювань

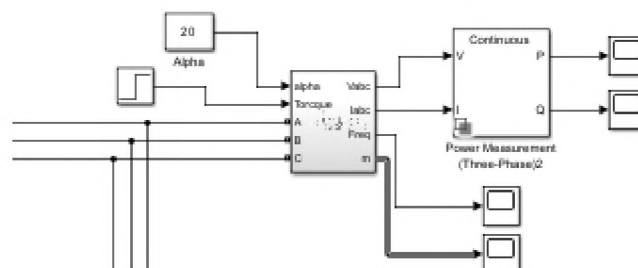


Рис. 3.3 зовнішній вигляд субсистеми з двигуном

Далі проводимо виміри параметрів напруги та струму на лінії 6 кВ

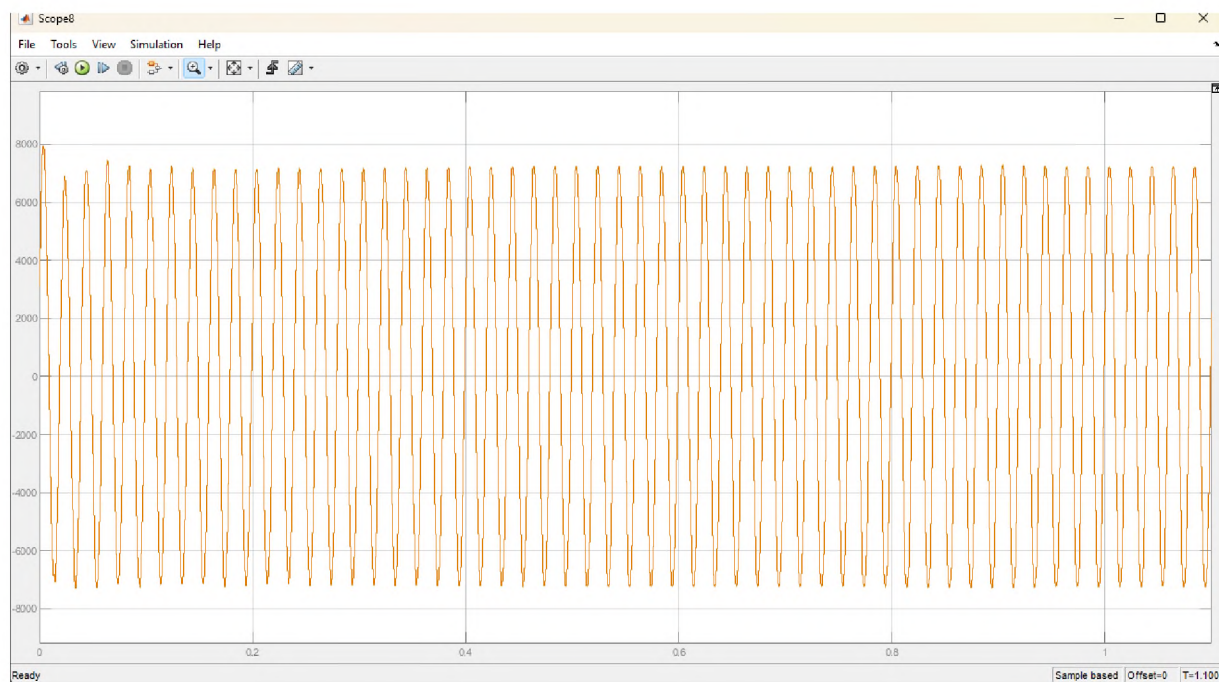


Рис. 3.4 Графік напруги лінії 6 кВ моделі

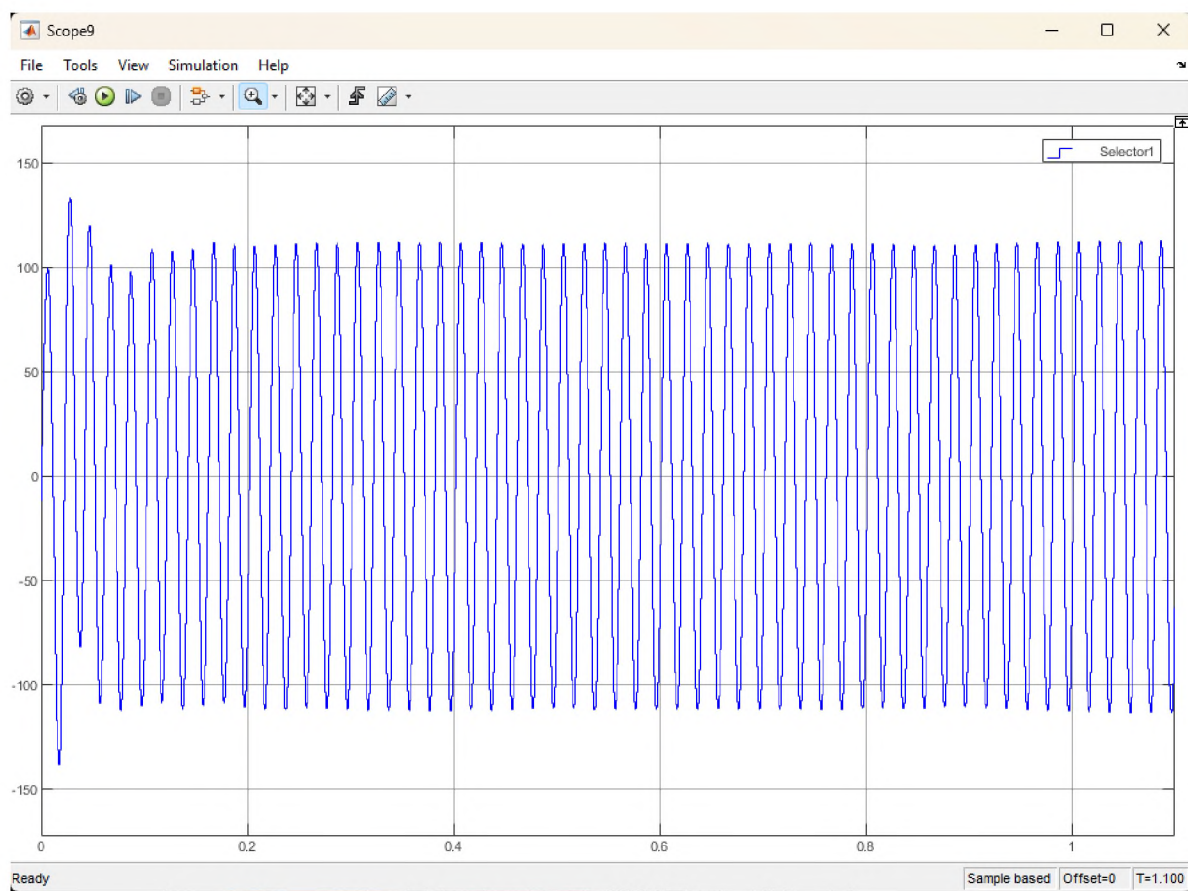


Рис. 3.5 Графік струму лінії 6 кВ моделі

На зображеннях вже видно деякі відхилення від синусоїдальної форми як результат роботи двигунів та керованих тиристорних випрямлячів.

Також можемо побачити струм на якорях двигунів з першого по восьмий. Як ми бачимо (Рис. 3.7) струм на початку має нестабільну форму оскільки на початку йдуть перехідні процеси.

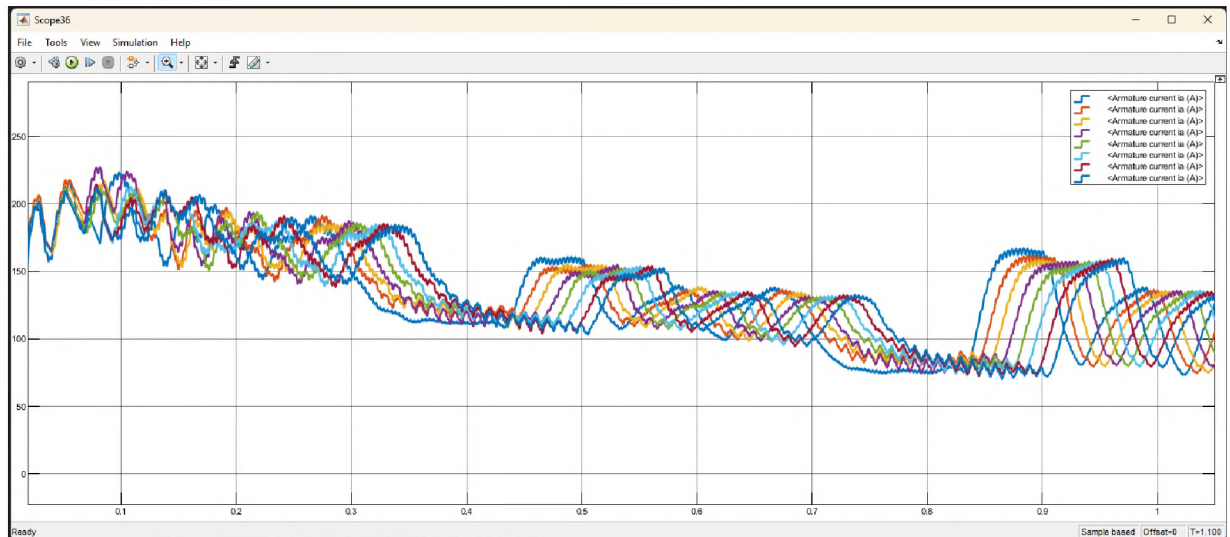


Рис. 3.6 Струм якорів двигунів №1-8

Також струм має виражені хвилі (Рис. 3.8.)

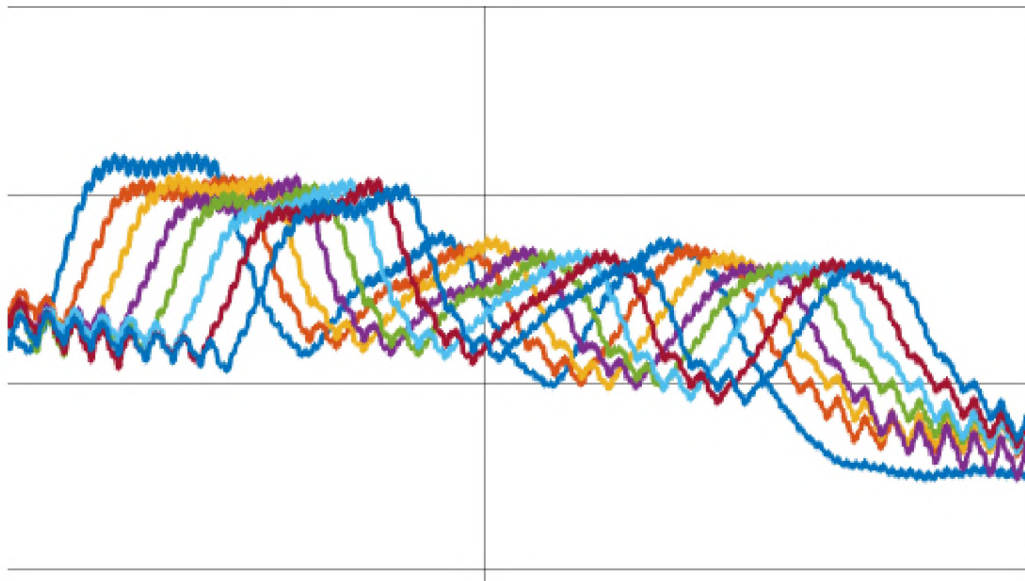


Рис. 3.7 Форма струму при режимах прокатки

Така форма з трьох різних хвиль виникає при прокачуванні на різних етапах процесу. Перша при потраплянні заготовки у кліть друга при самому проході заготовки та третя при виході заготовки з кліті.

Далі проводимо вимір відхилень на лінії 6 кВ

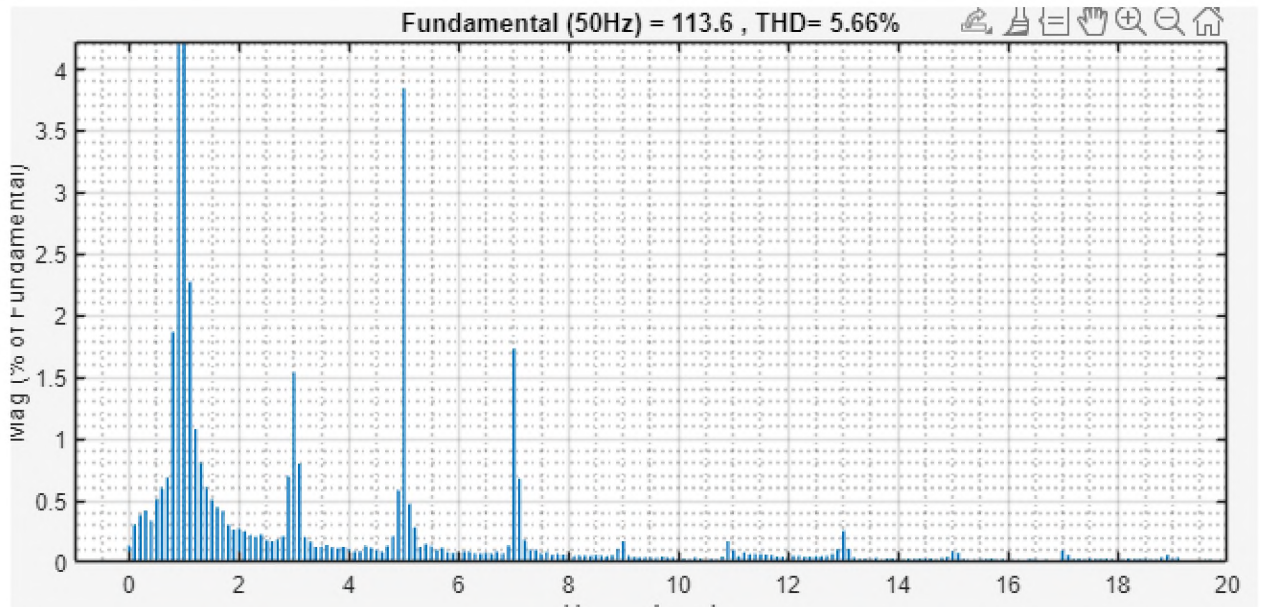


Рис. 3.8 Несинусоїдальність струму згідно з моделлю

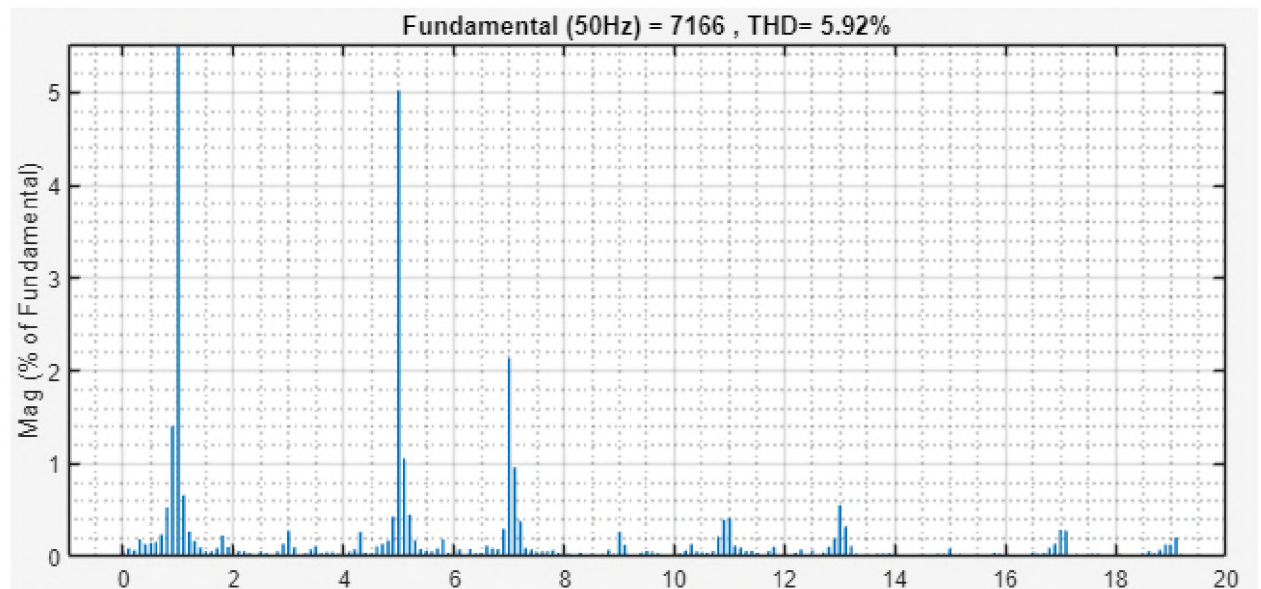


Рис. 3.9 Несинусоїдальність напруги згідно з моделлю

Результат має деякі відхилення від розрахунку оскільки модель більш ідеалізована та отримані значення є середніми даними декількох досліджень для часового проміжку від 0.3 до 1 с включення впливу перехідних процесів

Також можна побачити вплив саме тих гармонік які типові для заданих випрямлячів (5-та 7-та 11-та 13-та)

Частота, Гц	Позначення	Вплив, %
250	h5	5,02%
350	h7	2,14%
550	h11	0.41%
650	h13	0.56%

Таблиця 3.1 вплив гармонік згідно з моделлю

Далі додамо фільтри з попередньо розрахованими значеннями.

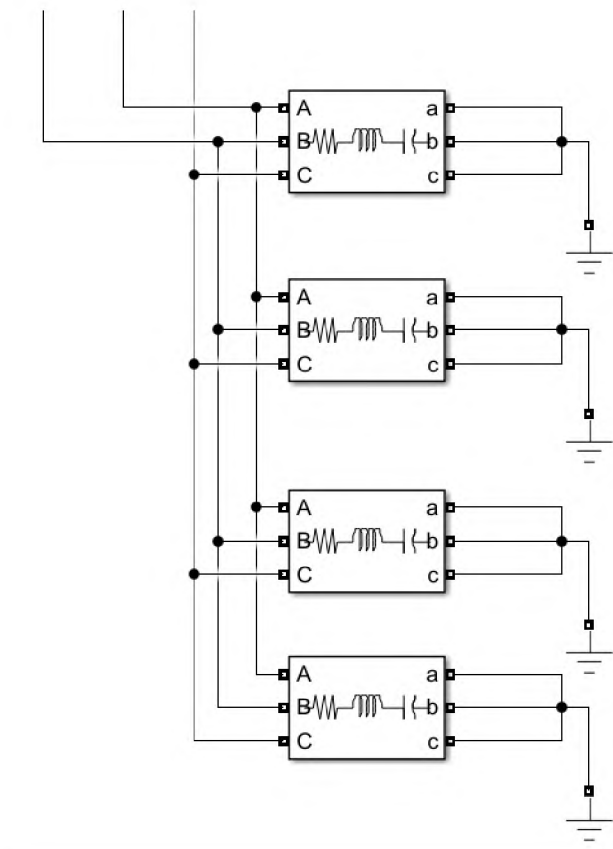


Рис 3.10 група фільтрів для гармонік

Та як результат отримуємо наступні результати при роботі з фільтрами

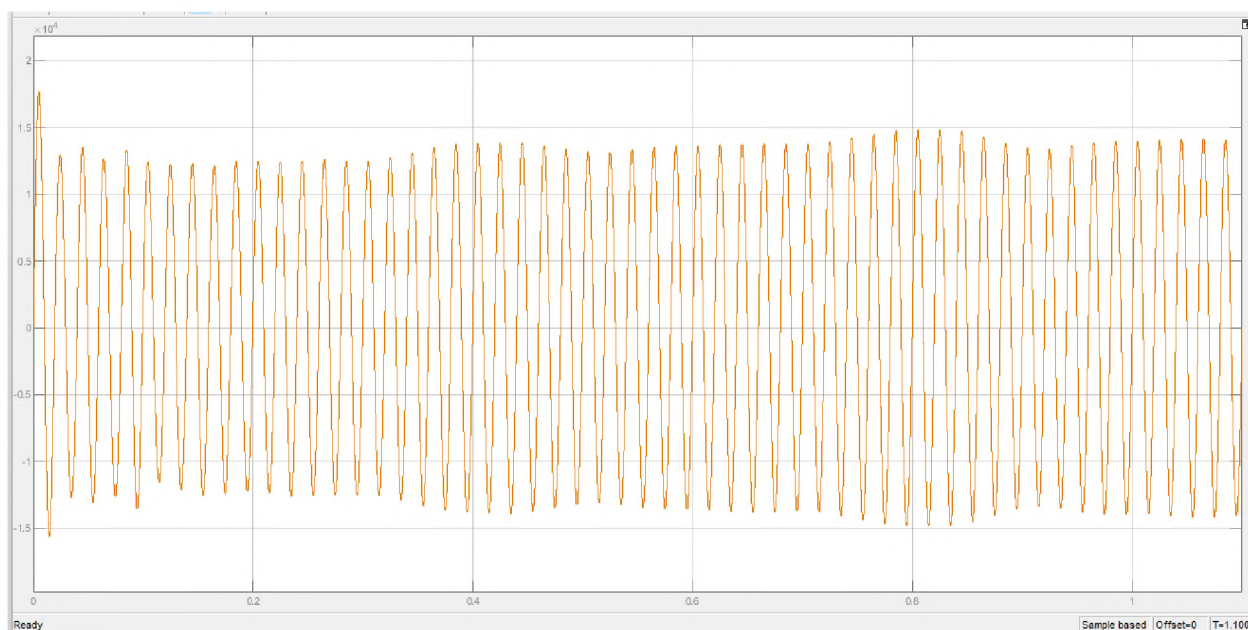


Рис 3.11 форма напруги при роботі фільтра

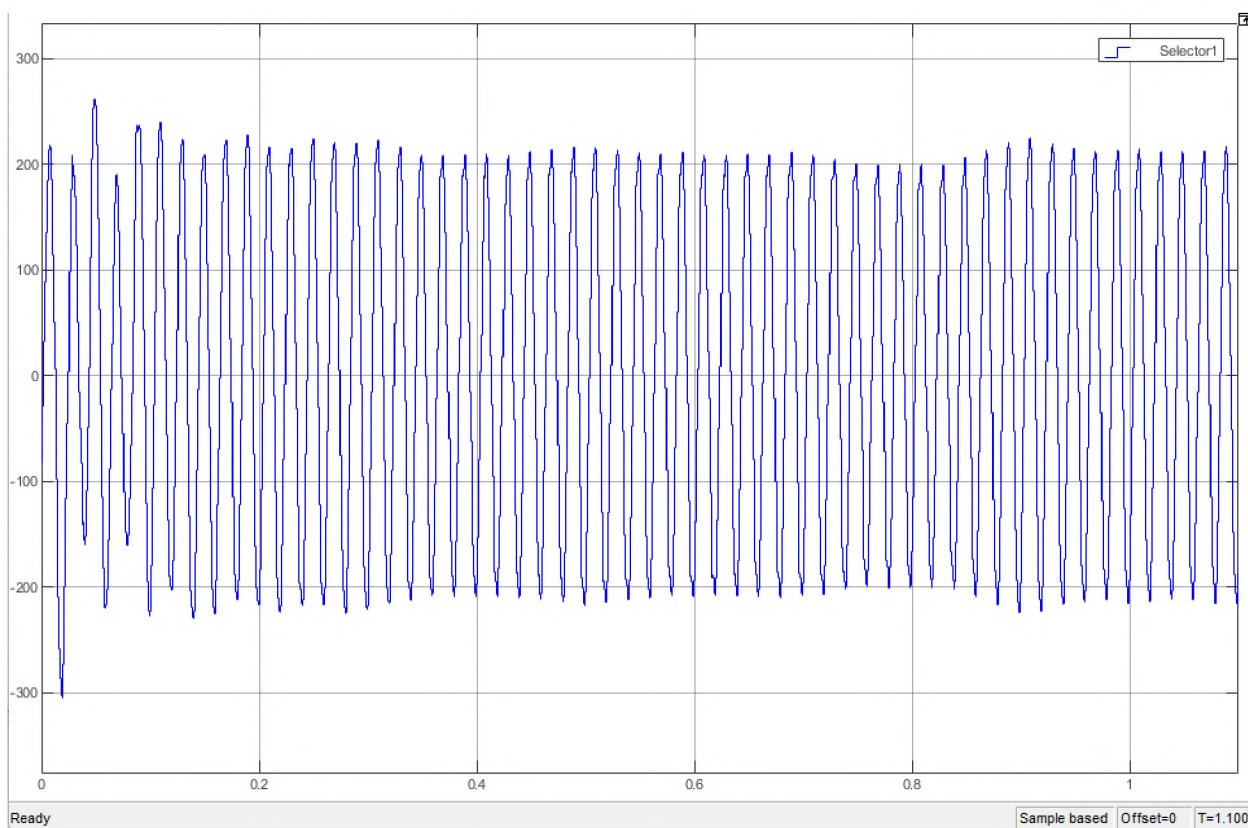


Рис 3.12 форма струму при роботі фільтра до фільтра

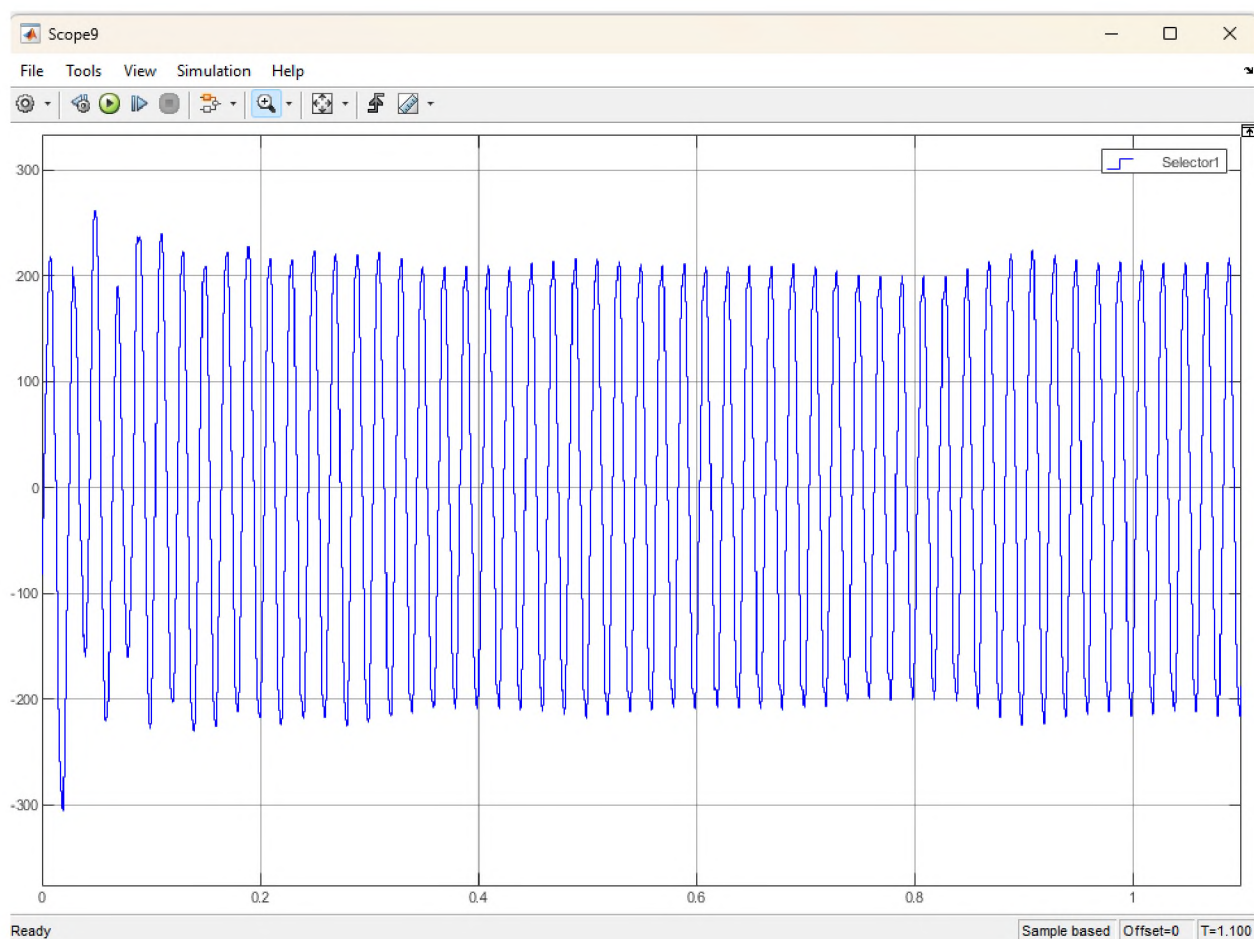


Рис 3.13 форма струму при роботі фільтра після фільтра

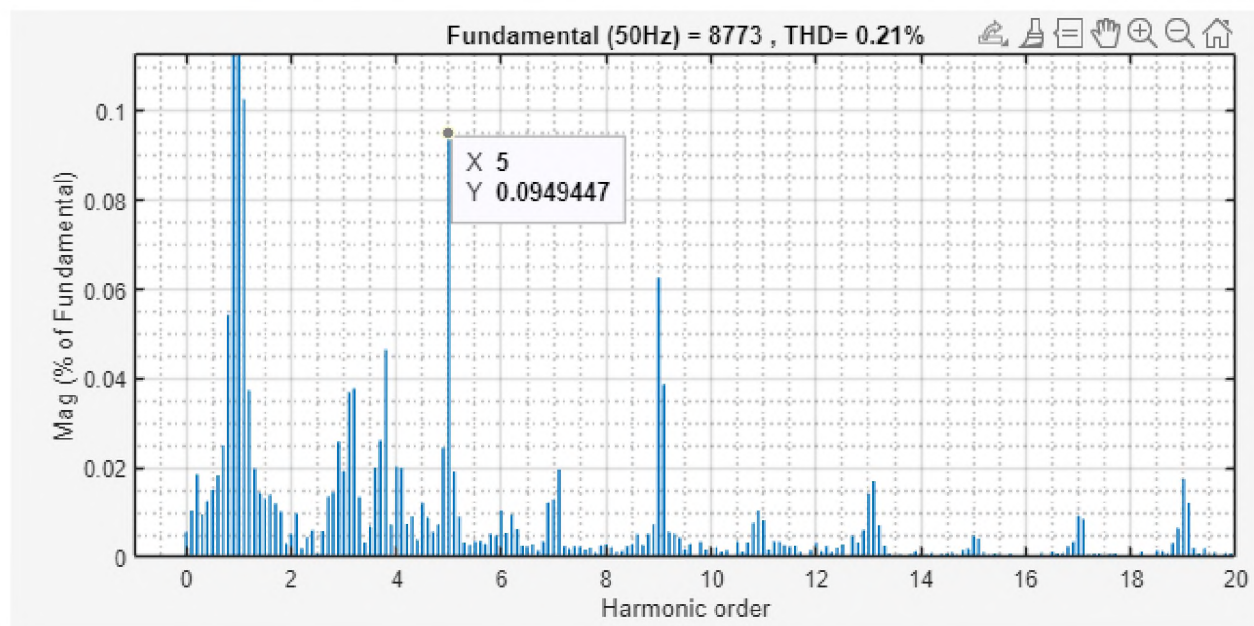


Рис 3.14 Несинусоїдальність напруги при роботі фільтра

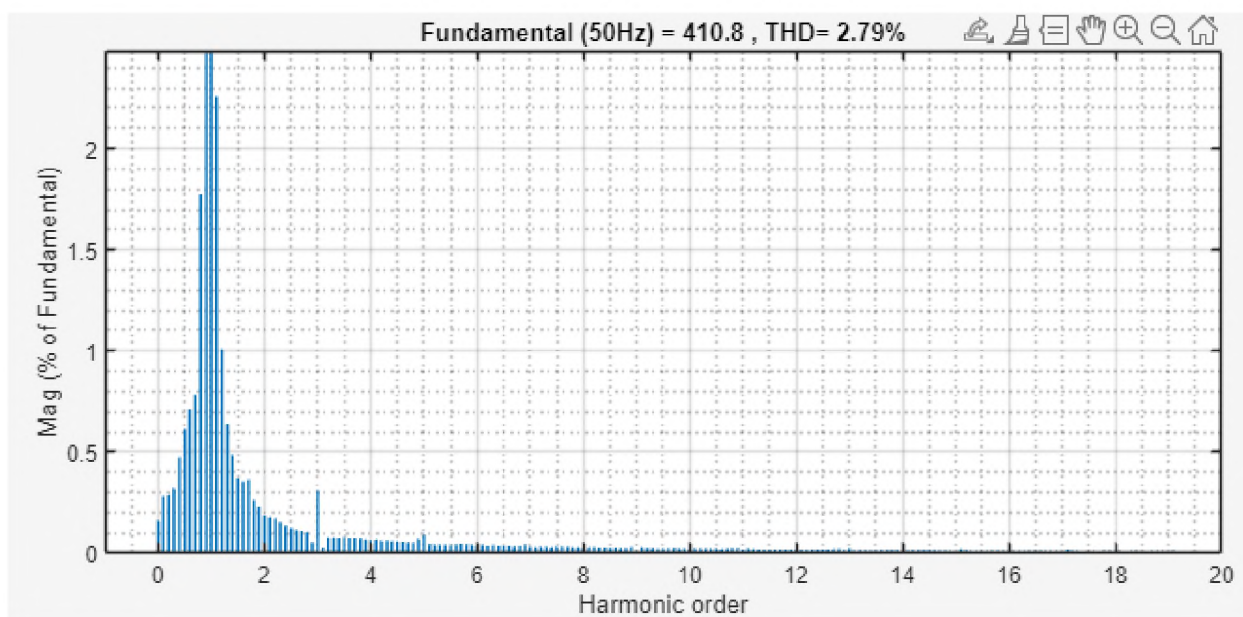


Рис 3.15 Несинусоїдальність струму при роботі фільтра

Форма струму до та після фільтру показана за для демонстрації гасіння гармонік струму оскільки після фільтру вони знову з'являються при вимірюванні.

3.2 Аналіз результатів дослідження роботи фільтрів

Згідно з результатами розрахунків та моделювання фільтрів у програмному забезпеченні Matlab/Simulink, Проведемо аналіз ефективності роботи фільтрів.

Проаналізуємо вимір відхилень на лінії 6 кВ

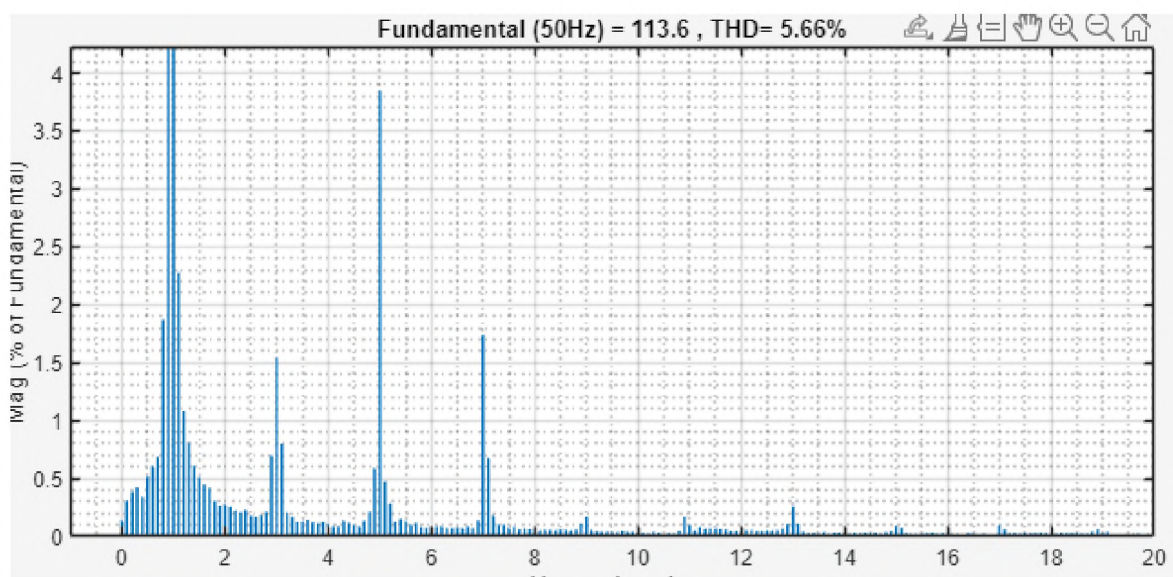


Рис. 3.16 Несинусоїдальність струму згідно з моделлю

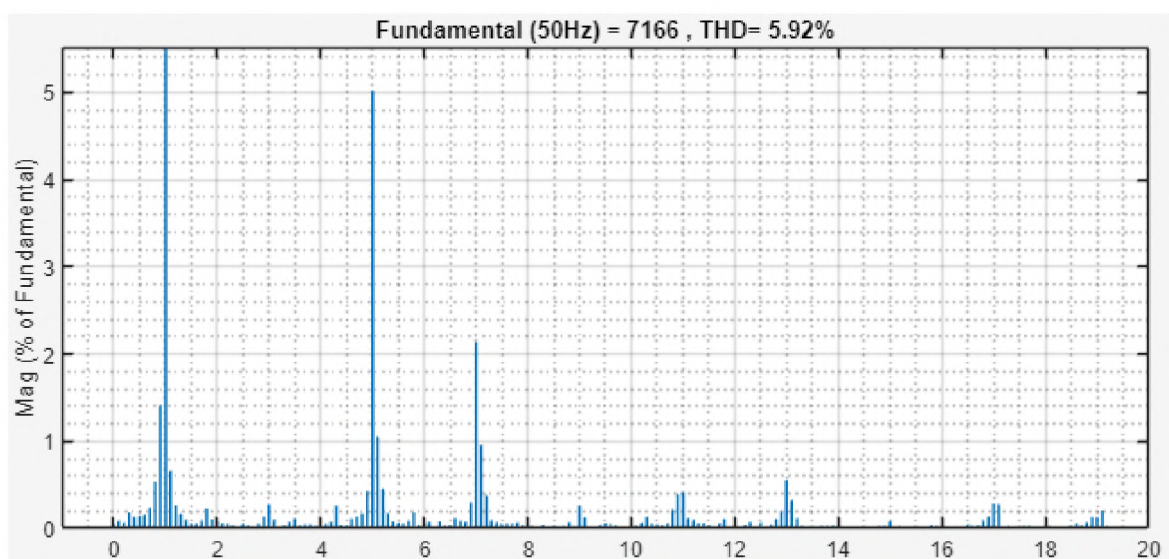


Рис. 3.27 Несинусоїдальність напруги згідно з моделлю

Як можемо бачити відхилення від синусоїди до встановлення фільтра складає 5.66% та 5.92% по струму на напрузі відповідно. Ці значення доволі схожі на розрахункові та майже відповідають стандартам щодо відхилення.

Далі встановимо фільтри та подивимось як саме це вплине на показники відхилень.

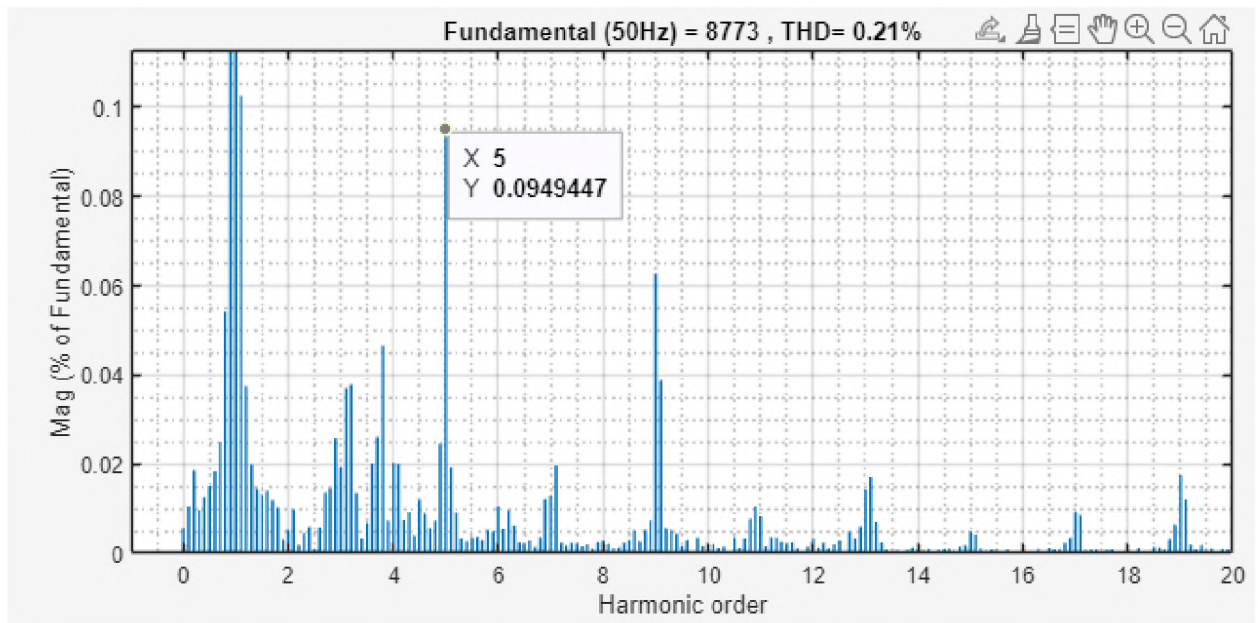


Рис. 3.18 Несинусоїдальність напруги згідно з моделлю з фільтром

Як можемо побачити на зображенні фільтри дуже суттєво поліпшують ситуацію з несинусоїдальністю напруги на лінії 6 кВ. Що прямо демонструє правильність розрахунків у попередніх розділах.

Проте у роботі фільтра є один нюанс. Струмові гармоніки все ще можуть бути помічені якщо ми будемо звертати увагу на лінію від фільтра до трансформатора та випрямляча. Оскільки струм випрямляча рваний то і результати вимірювань будуть або такі ж як були або навіть гірші що і демонструє наше вимірювання (Рис. 3.8).

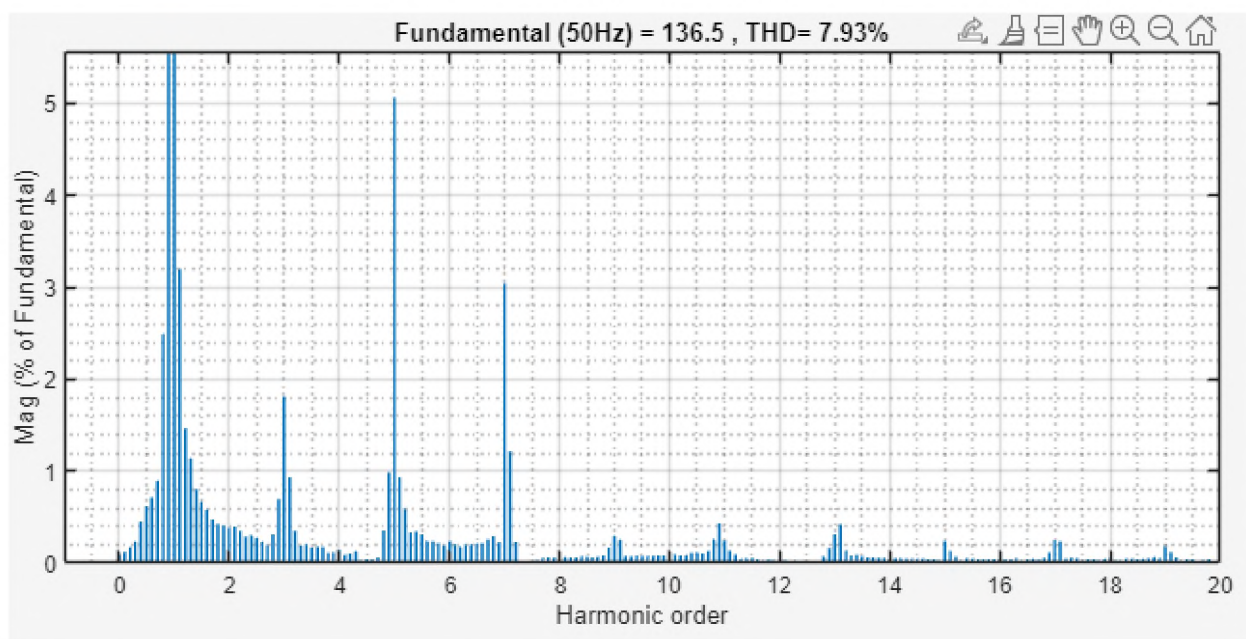


Рис. 3.19 Несинусоїдальність струму згідно з моделлю з фільтром у напрямку випрямлячів.

Проте це не значить що фільтр не виконав свою роботу. Щоб це перевірити можна виміряти несинусоїдальність струму у напрямку самої мережі тобто до фільтра (Рис. 3.8)

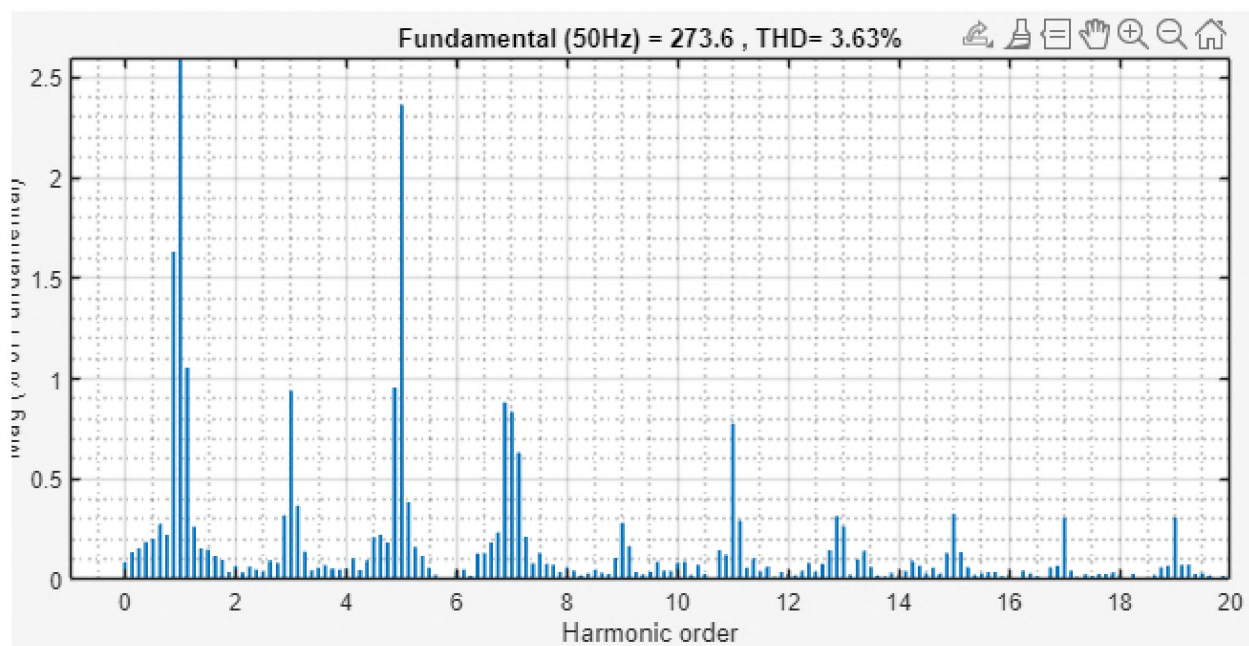


Рис. 3.20 Несинусоїдальність струму згідно з моделлю з фільтром у напрямку від джерела до фільтра.

Як можемо побачити у напрямку від джерела до фільтра гармоніки на які ми націлені мають менший ефект оскільки фільтри спрацювали хоч і не так ефективно.

Таким чином, отримана картина є фізично обґрунтованою: фільтри гармонік забезпечують необхідне поліпшення якості напруги та зменшення гармонічних складових струму мережі, проте струм у напрямку у сам випрямляч залишається несинусоїдальним через принцип його роботи. Це обов'язково слід враховувати при аналізі результатів моделювання оскільки вибір точки вимірювання параметрів є дуже важливим у цій схемі.

А також результат роботи фільтра можна побачити порівнюючи струми якоря двигунів до та після фільтрації.

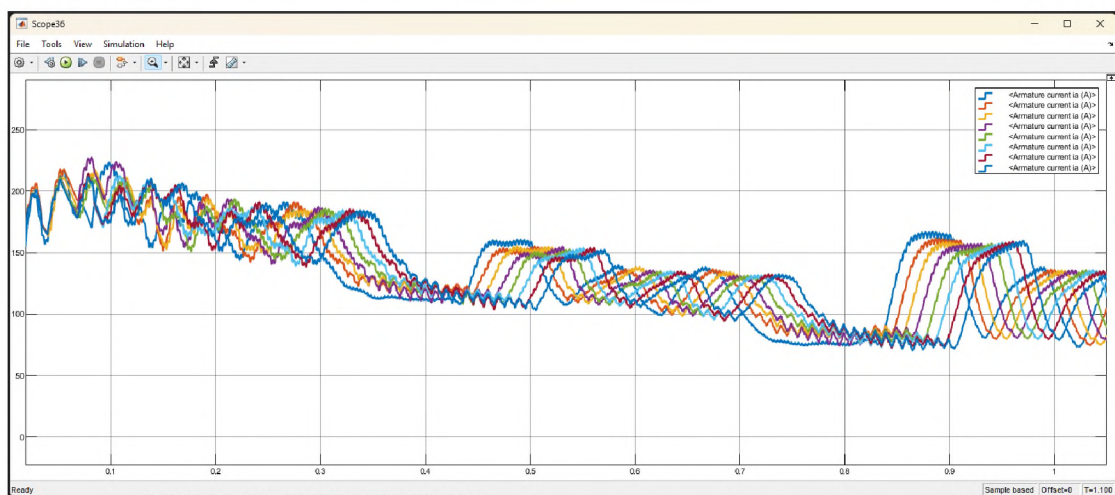


Рис. 3.21 Струм якорів двигунів №1-8 до фільтрації

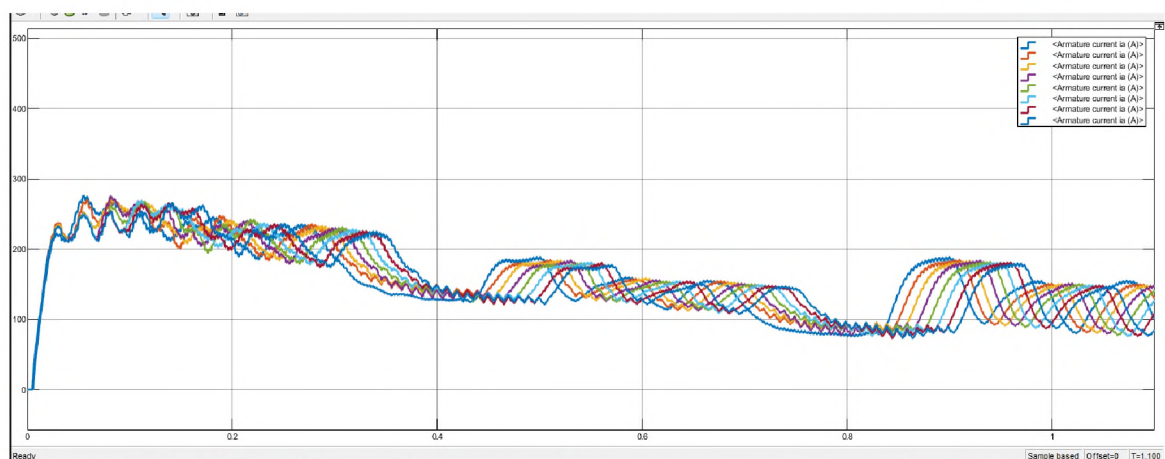


Рис. 3.22 Струм якорів двигунів №1-8 після фільтрації

Як ми бачимо після фільтрації струми на якорі виглядають більш плавними та рівними. Пульсації зменшились навіть початок роботи став плавнішим.

Загалом можна проаналізувавши отримані результати сказати:

1. Робота двигунів прокату стала плавнішою
2. Основні гармонічні складові по напрузі зменшені майже до нуля
3. Струмові гармонічні складові самої мережі були зменшені до допустимих значень.

ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі досліджено проблему погіршення якості електричної енергії в промислових системах електропостачання, зумовлену застосуванням потужних напівпровідникових перетворювачів. Показано, що в мережі 6 кВ під час живлення електроприводів прокатного стану спотворення проявляються у вигляді несинусоїдальності струму та напруги, зниження коефіцієнта потужності й появи вищих гармонік, що призводить до додаткових втрат і ускладнює режим роботи електрообладнання.

У першому розділі уточнено зміст поняття якості електроенергії для промислових електросистем і виділено ключові показники, що визначають стабільність роботи споживачів: рівень напруги, частота, симетрія фаз і форма кривої. Обґрунтовано, що в умовах нелінійних навантажень визначальним стає гармонічний склад, оскільки він формує додаткові активні втрати й нагрів трансформаторів, кабельних ліній та електричних машин, прискорює старіння ізоляції та підвищує ризик відмов. Встановлено, що до погіршення якості електроенергії призводять як елементи енергопостачальної системи (лінії, трансформатори, комутаційні апарати), які формують падіння напруги та асиметрії при зміні навантаження, так і нелінійні споживачі — тиристорні перетворювачі, що генерують характерний спектр гармонік. Окремо підкреслено, що для реверсивних електроприводів спотворення форми напруги здатні порушувати коректність комутації вентилів і

стабільність регулювання, тому питання обмеження гармонік є практично значущим.

У другому розділі сформовано математичну базу гармонічного аналізу на основі рядів Фур'є та показано, що для мостових тиристорних перетворювачів характерними є непарні гармоніки, не кратні трьом (1, 5, 7, 11, 13). Для кількісної оцінки спотворень використано показники окремих гармонік та інтегральний коефіцієнт сумарних гармонічних спотворень THD. На підставі вихідних режимних даних (U_d , I_d , α) виконано розрахунок активної, реактивної та повної потужностей для всіх 20 приводів у трьох технологічних режимах прокатки (профілі 6,5; 6,0; 5,5 мм). На прикладі двигуна №1 (чорнова група, 6,5 мм) отримано $P_d = 67,5$ кВт, $S \approx 206,7$ кВА, $Q \approx 195,3$ кВАр, а повний коефіцієнт потужності є низьким (порядку 0,33), що підтвердило потребу компенсації реактивної складової.

Визначено гармонічні складові струму випрямлячів і виконано приведення на сторону 6 кВ через коефіцієнт трансформації $k_T = 6000/380 = 15,79$. Сформовані таблиці гармонічних струмів для всіх двигунів показали, що сумарний вплив у секціях (8+6+6) створює помітні спотворення струму в точці приєднання, тоді як напруга на шині 6 кВ спотворюється меншою мірою через відносну «жорсткість» мережі. Таким чином, основним первинним фактором гармонічного впливу є саме несинусоїдальні струми перетворювачів, а гармонічні напруги на 6 кВ є похідним результатом протікання цих струмів через еквівалентний опір системи електропостачання.

На основі параметрів мережі, приведених до рівня 6 кВ, побудовано еквівалентні опори на гармоніках з урахуванням трансформатора та лінії ($Z_b = 28,8$ Ом, $X_T \approx 1,3$ Ом, $X_l \approx 0,004$ Ом). На цій основі розраховано гармонічні напруги на шинах 6 кВ та визначено коефіцієнти несинусоїдальності напруги для всіх груп і режимів. До фільтрації THD напруги становив: для чорнової групи 4,82–5,71%, для проміжної 5,51–6,59%, для чистової 4,62–6,51% (залежно від режиму прокатки), що кількісно

підтвердило наявність проблеми якості електроенергії саме на рівні 6 кВ і необхідність застосування компенсуючих пристроїв.

Розраховано параметри фільтро-компенсуючої установки з цільовим коефіцієнтом потужності $\cos\varphi_2 = 0,95$. Для чорнової групи у режимі 6,5 мм визначено початковий $\cos\varphi_1 \approx 0,32$ та необхідну компенсацію реактивної потужності $Q_k \approx 2,43$ МВАр із залишковою реактивною потужністю близько 0,3 МВАр. Компенсацію розподілено між фільтрами 5-ї, 7-ї, 11-ї та 13-ї гармонік пропорційно енергетичному внеску гармонічних струмів (найбільша частка — для 5-ї та 7-ї). За методикою резонансного налаштування визначено параметри гілок (C, L), а активні опори підібрано за добротністю $q \approx 30$. Отримані еквівалентні опори налаштованих фільтрів на гармоніках знаходяться на рівні порядку 0,23–0,42 Ом (залежно від режиму), що забезпечує «відведення» гармонічних струмів у фільтр та зменшення гармонічних напруг у вузлі 6 кВ.

Після встановлення розрахованих фільтрів отримано різке зниження THD напруги на шинах 6 кВ до 0,148–0,207%: для чорнової групи 0,148–0,207%, для проміжної 0,148–0,169%, для чистової 0,167–0,193% (залежно від режиму прокатки 6,5/6,0/5,5 мм). Таким чином, рівень несинусоїдальності напруги зменшено приблизно у 23–45 разів порівняно з початковими значеннями 4,62–6,59%, що підтверджує правильність вибору цільових гармонік і працездатність прийнятої методики розрахунку параметрів RLC-гілок.

У третьому розділі виконано перехід від аналітичних розрахунків до їх перевірки на електромагнітній моделі в Matlab/Simulink (Simscape Electrical / Specialized Power Systems). Обране середовище та режим моделювання в електромагнітній постановці (з малим кроком інтегрування) забезпечили аналіз миттєвих значень напруги, струму і потужності, а також застосування FFT-аналізу через Powergui для оцінювання спектра гармонік на шині 6 кВ. Побудована структурна модель реверсивного привода відтворила комутаційні спотворення, пульсації випрямленого струму, вплив мережевого

еквівалента (R–L) та трансформатора 6/0,4 кВ. За FFT-аналізом у спектрі чітко проявляються типові гармоніки 5-го, 7-го, 11-го та 13-го порядків, а також показано характер струмів якорів у процесі прокатки: початкові перехідні процеси та подальша «трихвильова» форма, що відповідає етапам входу заготовки в кліть, проходу та виходу. Після підключення фільтрів форма напруги на шині 6 кВ суттєво наближається до синусоїдальної, що узгоджується з розрахунковими значеннями THD.

У ході роботи встановлено, що при аналізі струмів у системі з тиристорними випрямлячами необхідно коректно обирати точку вимірювання. Несинусоїдальність струму на ділянках, безпосередньо пов'язаних із випрямлячем, є конструктивною властивістю перетворювача та не може бути повністю усунена пасивною фільтрацією. Водночас фільтри забезпечують зменшення протікання гармонічних складових у напрямку мережі та стабілізацію режиму на шині 6 кВ, що є головною метою заходів з підвищення показників якості електроенергії в даній задачі. Додатковим підтвердженням ефективності фільтрації є зменшення пульсацій струмів якоря та більш плавний характер перехідних процесів у моделі після підключення фільтрів.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що запропонований підхід поєднує аналітичний розрахунок (визначення потужностей, гармонічного складу, опорів мережі та параметрів фільтрів) із верифікацією у Matlab/Simulink. Розроблена методика може бути використана для подальшого проектування фільтро-компенсуючих пристроїв у промислових мережах середньої напруги з груповими нелінійними навантаженнями та забезпечує ефективне зниження гармонічного впливу на систему електропостачання. Отримані результати дозволяють зробити підсумковий висновок, що застосування розрахованих фільтрів є ефективним заходом підвищення якості електричної енергії в мережі 6 кВ прокатного стану за рахунок суттєвого зменшення несинусоїдальності напруги та покращення режимних показників системи.

ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

1. ДСТУ EN 50160:2023 (EN 50160:2022, IDT). Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2024. – 20 с. (Національний стандарт України; набув чинності з 01.03.2024).
2. Сокол Є. І., Гапон Д. А., Гриб О. Г. та ін. Цифровий облік електричної енергії з урахуванням показників якості та визначенням відповідальності за погіршення: монографія. – Харків: ФОП Бровін О. В., 2021. – 330 с. (ISBN 978-617-8009-47-2).
3. Бурлака В. В., Поднебенна С. К., Гулаков С. В. Сучасні силові активні фільтри та імпульсні джерела живлення з корекцією коефіцієнта потужності: монографія. – Маріуполь: ПДТУ, 2015. – 196 с.
4. Кучанський В. В., Малахатка Д. О. Заходи та технічні засоби підвищення ефективності роботи магістральних електричних мереж: монографія. – Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2021. – 120 с.
5. Лежнюк П. Д., Добровольська Л. М., Кулик В. В. Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем: [монографія] / за ред. П. Д. Лежнюка. – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. – 328 с.
6. Мілих В. І., Павленко Т. П. Електропостачання промислових підприємств: підручник. – Харків: ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
7. Козлов С. С. Підвищення ефективності експлуатації об'єктів електричних мереж за рахунок використання Smart Grid: дис... канд. техн. наук : 05.14.02. – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 180 с.
8. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Рудевич Н. В. Автоматизовані системи обліку і якості електроенергії у системах електропостачання // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХП», 2021. – № 2(3). – С. 54–58.

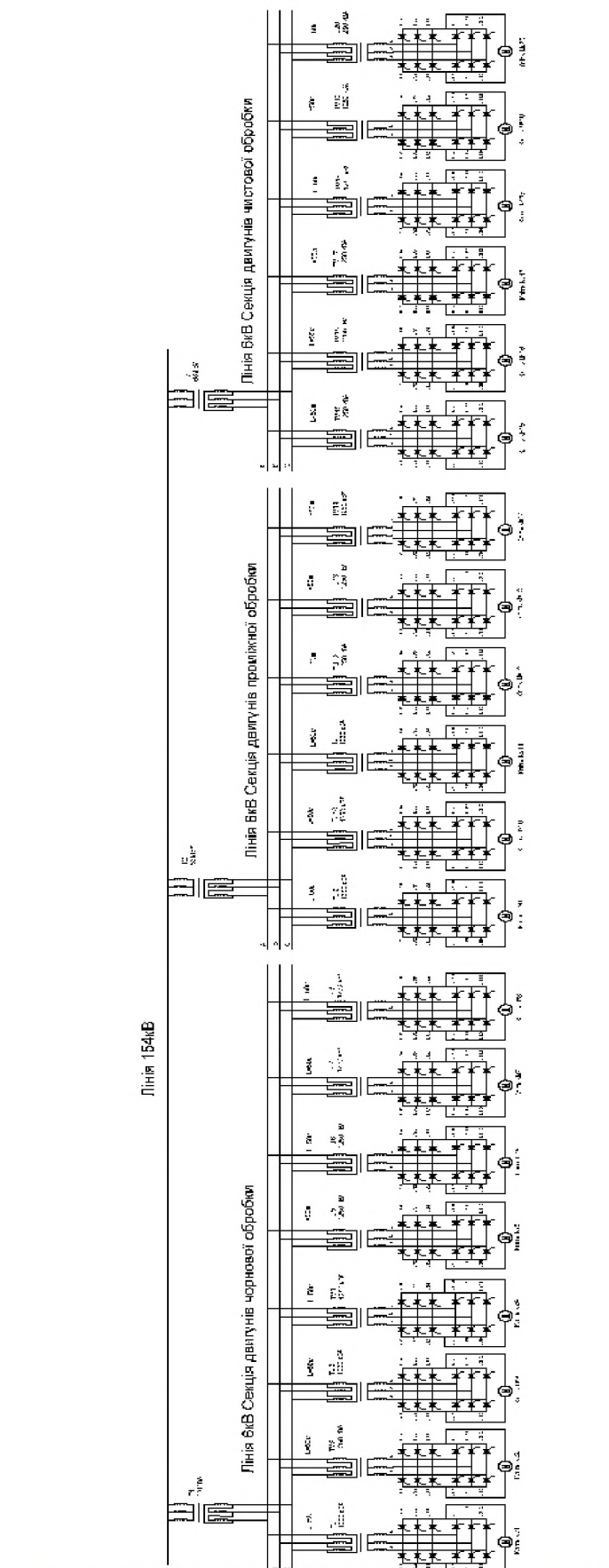
9. Гапон Д. А., Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Зуєв А. О., Донецька Т. С.
Облік електроенергії при низькій її якості // Вісник НТУ «ХПІ». Серія:
Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ»,
2021. – № 2(3). – С. 49–53.
10. Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Швець С. В. та ін. Якість електричної
енергії як функція зв'язаного енергоспоживання міських енергомереж
// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. –
Харків: НТУ «ХПІ», 2022. – № 2. – С. 60–65.
11. Жаркін А. Ф., Палачов С. О. Критерії оцінювання якості
електроенергії, що виробляється об'єктами розосередженої генерації //
Технічна електродинаміка. – 2018. – № 2. – С. 63–65. DOI:
10.15407/techned2018.02.063.
12. IEEE Std 519-2022. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power
Systems (revision of IEEE 519-2014). – New York, NY: IEEE, 2022. – 100
р.
13. Singh B., Chandra A., Al-Haddad K. Power Quality: Problems and
Mitigation Techniques. – Chichester: John Wiley & Sons, 2015. – 600 p.
14. Fuchs E. F., Masoum M. A. S. Power Quality in Power Systems and
Electrical Machines. 2nd ed. – Amsterdam: Academic Press (Elsevier),
2015. – 1123 p.
15. Dugan R. C., McGranaghan M. F., Santoso S., Beaty H. W. Electrical Power
Systems Quality. 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2012. – 528 p.
16. Farzin H., Monadi M., Fotuhi-Firuzabad M., Savaghebi M. A reliability
model for overcurrent relays considering harmonic-related malfunctions //
International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2021. – Vol.
131. – Art. 107093. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107093.
17. Shen Z., Zheng Z., Fu Y., Yin Z. Analysis of the influence of harmonics on
energy efficiency of typical equipment in distribution network // Journal of
Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2495, No. 1. – P. 012026 (6 p.).
DOI: 10.1088/1742-6596/2495/1/012026.

18. Guest E., Jensen K. H., Rasmussen T. W. Mitigation of harmonic voltage amplification in offshore wind power plants by wind turbines with embedded active filters // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. – 2020. – Vol. 11, No. 2. – P. 785–794. DOI: 10.1109/TSTE.2019.2906797.
19. Berisha N. Power quality analysis – case study for induction motor and 110 kV/35 kV substation // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2023. – № 1. – S. 122–126. DOI: 10.15199/48.2023.01.25.
20. Condemaita B., Ruiz M. Harmonic mitigation and energy savings in 13.2 kV distribution feeders via P–Q-based shunt active filters and luminaire retrofit // *Energies*. – 2025. – Vol. 18, No. 21. – Art. 5582 (18 p.). DOI: 10.3390/en18215582.
21. Stanko P., Regula M., Otcenasova A. Impact of power quality degradation on energy consumption and temperature rise of office devices // *Electrical Engineering*. – 2025. – Vol. 107. – P. 13387–13400. DOI: 10.1007/s00202-025-03214-4.
22. Siostrzonek T., Wójcik J., Dutka M., Siostrzonek W. Impact of power quality on the efficiency of the mining process // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, No. 22. – Art. 5675 (15 p.). DOI: 10.3390/en17225675.
23. Жаркін А. Ф., Новський В. О., Палачов С. О. Технічне регулювання якості напруги в електромережах із джерелами розосередженої генерації // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – № 3. – С. 55–57.
24. Жаркін А. Ф., Палачов С. О., Блінов І. В. Впровадження сучасних стандартів з вимірювання показників якості електричної енергії в умовах розвитку енергетики // *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. – 2023. – Вип. 65. – 15 с.
25. IEEE Std 1159-2019. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality (revision of IEEE 1159-2009). – Piscataway, NJ: IEEE, 2019. – 88 p.

26. IEEE Std 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. – New York: IEEE, 2010. – 50 p.
27. ДСТУ EN 61000-3-2:2014 (EN 61000-3-2:2014, IDT). Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Норми на гармоніки струму, створювані обладнанням із номінальним входним струмом ≤ 16 А. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 28 с.
28. ДСТУ EN 61000-3-12:2014 (EN 61000-3-12:2011, IDT). Електромагнітна сумісність. Частина 3-12. Норми на гармоніки струму, створювані обладнанням із номінальним струмом > 16 А та ≤ 75 А. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 24 с.
29. Monti A., Benigni A. *Modeling and Simulation of Complex Power Systems*. – Stevenage : The Institution of Engineering and Technology, 2022. – 322 p. – ISBN 978-1-78561-404-0. [Електронний ресурс].
[digital-library.theiet.org+1](https://digital-library.theiet.org/)
30. Hossain E. *MATLAB and Simulink Crash Course for Engineers* : textbook. – Cham : Springer, 2022. – 657 p. – DOI: 10.1007/978-3-030-89762-8. – ISBN 978-3-030-89762-8. [Електронний ресурс].
[link.springer.com+1](https://link.springer.com/)

ДОДАТОК А

ПОВНА СХЕМА ЖИВЛЕННЯ ПРОКАТНОГО СТАНУ



ДОДАТОК Б

ОСТАТОЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ СХЕМИ З SIMULINK

