

Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Дослідження методів і технічних засобів
покращення якості електроенергії в системах
електропостачання”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-23Мз
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____Вадим БРУЄВ
« ____ » _____2024 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Василь ЗІНЗУРА
« ____ » _____2024 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет центр заочної та дистанційної освіти

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«___» _____ 2024 р.

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

Бруєва Вадима Вікторовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження методів і технічних засобів покращення якості електроенергії в системах електропостачання

Research of methods and technical means for improving the quality of electricity in power supply systems

2. Керівник роботи (проекту) Зінзура Василь Васильович, канд. техн. наук., доц.

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.12.2024 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою наукового дослідження виступає комплексне вивчення інноваційних підходів і технологічних рішень для мінімізації показників несинусоїдальності електричної напруги в електромережах промислових об'єктів. Завдання роботи: 1. Здійснити комплексну діагностику та системний аналіз передумов погіршення електроенергетичних параметрів у мережах промислового призначення, 2. Провести ґрунтовне дослідження сучасних методологічних підходів та критеріїв вибору технологічних рішень для редукації рівнів несинусоїдальності електричної напруги, включаючи порівняльний аналіз існуючих технічних засобів корекції. 3. Реалізувати комплексне комп'ютерне моделювання експлуатаційних режимів електропостачальних систем з впровадженням інноваційних технічних механізмів мінімізації спотворень напруги, здійснивши верифікацію отриманих результатів.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>4.10.2024</i>	
2	<i>Сучасний стан питання якості електроенергії в розподільних електричних мережах</i>	<i>12.10.2024</i>	
3	<i>Дослідження роботи фільтро-компенсуючих пристроїв в системах електропостачання</i>	<i>21.10.2024</i>	
4	<i>Комп'ютерне моделювання системи електропостачання з активними фільтрами</i>	<i>12.11. 2024</i>	
5	<i>Охорона праці</i>	<i>18.11. 2024</i>	
6	<i>Висновки</i>	<i>23.11. 2024</i>	
7	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>25.11. 2024</i>	
8	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>29.11. 2024</i>	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2024 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2024 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Бруєв В. В. Дослідження методів і технічних засобів покращення якості електроенергії в системах електропостачання.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2024 р.

Метою наукового дослідження виступає комплексне вивчення інноваційних підходів і технологічних рішень для мінімізації показників несинусоїдальності електричної напруги в електромережах промислових об'єктів.

Аналіз спотворень напруги в електромережі підприємства продемонстрував ефективність впровадження фільтро-компенсуючого обладнання для досягнення допустимих показників несинусоїдальності та зменшення навантаження на конденсаторні батареї від гармонічних складових струму.

Симуляція режимів функціонування промислової електромережі з нелінійними спотвореннями підтвердила ефективність фільтро-компенсуючих установок для підвищення енергетичної якості. Верифікація отриманих даних продемонструвала високу точність створеної математичної моделі, оскільки її результати корелюють з традиційними методами оцінювання несинусоїдальності напруги.

Ключові слова: вищі гармоніки, фільтро-компенсуючі пристрої, активні фільтри, якість електричної енергії

THE SUMMARY

Bruiev V. V. Research of methods and technical means for improving the quality of electricity in power supply systems.

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2024

The purpose of the scientific research is a comprehensive study of innovative approaches and technological solutions to minimize the indicators of non-sinusoidality of electric voltage in the power grids of industrial facilities.

Analysis of voltage distortions in the power grid of the enterprise demonstrated the effectiveness of the implementation of filter-compensating equipment to achieve permissible indicators of non-sinusoidality and reduce the load on capacitor banks from harmonic current components.

Simulation of the operating modes of an industrial power grid with nonlinear distortions confirmed the effectiveness of filter-compensating installations for improving energy quality. Verification of the obtained data demonstrated the high accuracy of the created mathematical model, since its results correlate with traditional methods of assessing voltage non-sinusoidality.

Keywords: higher harmonics, filter-compensating devices, active filters, quality of electric energy

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ	12
1.1 Показники якості електроенергії, що описують несинусоїдальність напруги.....	12
1.2 Вимірювання рівнів несинусоїдальності напруги	15
1.3 Джерела появи вищих гармонік в системах електропостачання	23
Висновки до розділу	32
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ФІЛЬТРО-КОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	34
2.1 Методика розрахунку рівнів несинусоїдальності напруги та виборур ФКП.....	34
2.2 Комп'ютерне моделювання режимів СЕПП з джерелами вищих гармонік та ФКП	44
2.3 Централізована компенсація несинусоїдальності напруги.....	58
Висновки до розділу	78
РОЗДІЛ 3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З АКТИВНИМИ ФІЛЬТРАМИ	79
3.1 Загальні відомості про будову та принцип дії активного фільтру.....	79
3.2 Комп'ютерне моделювання системи електропостачання з активним фільтром	81
Висновки до розділу	94
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	95
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	100

ВСТУП

Динамічне збільшення інсталюваної потужності нелінійних та асиметричних навантажень у промисловому секторі спричинило суттєве загострення проблематики електричної якості в розподільних мережах. Спектр електромагнітних перешкод, генерованих подібними споживачами, справляє деструктивний вплив на електротехнічне обладнання, комплекси релейного захисту, автоматизованого управління та інші складові електроенергетичної інфраструктури.

У багатьох технологічних процесах такі електромагнітні збурення викликають низку негативних наслідків: зниження експлуатаційної надійності електропостачання, підвищення технологічних втрат електроенергії, погіршення параметрів виробничого циклу та якості кінцевої продукції. Зокрема, нелінійні навантаження спричиняють вищі гармоніки, які призводять до додаткового нагрівання електрообладнання та скорочення його ресурсу.

Окрім технічних аспектів, ця проблематика має значущі економічні імплікації, оскільки пов'язана з непрямыми втратами виробничих потужностей та необхідністю модернізації електроенергетичної інфраструктури. Відтак, дослідження та розв'язання питань забезпечення належної якості електроенергії набувають стратегічного значення для сталого функціонування промислових систем.

Наведені обставини переконливо демонструють актуальність та практичну значущість комплексного вивчення проблематики електричної якості в сучасних системах електропостачання.

Основний зміст проблеми якості електроенергії в системах електропостачання можна структурувати за наступними ключовими напрямками:

1. Діагностичний аналіз електромагнітної сумісності:
 - комплексне оцінювання джерел електромагнітних перешкод;

- дослідження впливу низькочастотних електромагнітних збурень на різні категорії електроспоживачів;

- ідентифікація потенційних ризиків та механізмів негативного впливу.

2. Прогнозування та моделювання електромагнітних завад:

- кількісне визначення рівнів електромагнітних перешкод від нелінійних навантажень;

- математичне моделювання поширення електромагнітних збурень у вузлах електричних мереж;

- встановлення кореляційних залежностей між параметрами навантаження та інтенсивністю завад.

3. Превентивні та компенсаційні заходи:

- розроблення методів мінімізації електромагнітних перешкод;

- впровадження технічних рішень для приведення рівнів завад до нормативних показників;

- створення адаптивних систем моніторингу та корекції електромагнітної обстановки.

Реалізація цих напрямків дозволить забезпечити підвищення надійності та ефективності функціонування систем електропостачання.

Поглиблений аналіз якості електроенергії передбачає розгляд наступних взаємопов'язаних аспектів:

1. Розрахунковий аспект – математичне моделювання електромагнітних процесів; кількісна оцінка показників якості електроенергії; прогнозування впливу нелінійних навантажень.

2. Нормативний аспект – встановлення стандартизованих вимог до електроенергії; розроблення методик контролю та оцінювання параметрів; регламентація допустимих меж електромагнітних збурень.

3. Економічний аспект – визначення прямих та непрямих втрат від низької якості електроенергії; оцінювання економічної ефективності впровадження технічних рішень; розрахунок збитків від пошкодження електроустаткування.

4. Технічний аспект: ідентифікація джерел електромагнітних перешкод; розроблення технічних заходів мінімізації негативного впливу; вибір оптимальних технічних засобів корекції якості електроенергії.

При виборі технічних засобів покращення електроенергії необхідно враховувати індивідуальну конфігурацію електропостачальної системи, що потребує проведення глибоких спеціалізованих досліджень.

Таким чином, дослідження методів та технічних засобів зниження рівнів несинусоїдальності напруги в системах електропостачання набуває дедалі більшої актуальності в контексті сучасного електроенергетичного комплексу.

Мета і задачі роботи. Метою наукового дослідження виступає комплексне вивчення інноваційних підходів і технологічних рішень для мінімізації показників несинусоїдальності електричної напруги в електромережах промислових об'єктів.

Для досягнення визначеної мети дослідження необхідно реалізувати наступні науково-практичні завдання:

1. Здійснити комплексну діагностику та системний аналіз передумов погіршення електроенергетичних параметрів у мережах промислового призначення, визначивши ключові фактори впливу на якість електричної енергії.

2. Провести ґрунтовне дослідження сучасних методологічних підходів та критеріїв вибору технологічних рішень для редукції рівнів несинусоїдальності електричної напруги, включаючи порівняльний аналіз існуючих технічних засобів корекції.

3. Реалізувати комплексне комп'ютерне моделювання експлуатаційних режимів електропостачальних систем з впровадженням інноваційних технічних механізмів мінімізації спотворень напруги, здійснивши верифікацію отриманих результатів.

Об'єкт дослідження – електроенергетичні процеси та явища погіршення параметрів електричної енергії в складних системах електропостачання промислового комплексу.

Предмет дослідження – динаміка та механізми нарощення рівнів несинусоїдальності напруги в системах електропостачання.

Методи дослідження. Методологія дослідження базується на комплексному застосуванні сучасних наукових підходів та інструментальних засобів: комп'ютерне моделювання (імітаційне математичне моделювання електроенергетичних процесів; діагностика поведінки електричних систем у варіативних режимах; віртуальна симуляція електричних навантажень), числові методи (статистичний аналіз даних; розрахунково-аналітичні методики обробки інформації; алгоритми оптимізації параметрів електричних мереж), теорія електричних кіл (дослідження електродинамічних характеристик; аналіз перетворення електричних сигналів).

Основні наукові результати:

1. Проаналізовано та виокремлено провідні фактори, що призводять до викривлення синусоїдальної конфігурації електричної напруги в електропостачальних мережах. Серед таких причин можна виділити нелінійні навантаження, асиметрію фаз, наявність вищих гармонік та резонансні явища в електричних колах.

2. Доведено ефективність впровадження фільтрокомпенсаційних та активних фільтрів для оптимізації параметрів електричної напруги у вузлових точках системи електропостачання. Такі технічні рішення дозволяють суттєво покращити якість електроенергії, зменшити технічні втрати та підвищити надійність електричних мереж.

Основні практичні результати:

Ось перефразований і доповнений текст:

- розроблено комп'ютерну модель електричної системи, що враховує специфіку генерації вищих гармонік тиристорними перетворювачами

частоти. Модель надає можливість глибокого кількісного дослідження рівнів гармонічних спотворень в електричних мережах та їхнього впливу на якість електроенергії.

- створено імітаційну модель електропостачальної системи з інтегрованими фільтрокомпенсуючими пристроями та активними фільтрами. Це дослідницький інструмент, який дає змогу комплексно аналізувати експлуатаційні режими та параметри функціонування електричних мереж, оцінювати ефективність запропонованих технічних рішень.

Загальна характеристика наукової роботи. Кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 102 сторінок. Основна частина викладена на 93 сторінках друкованого тексту, містить 69 рисунків та 16 таблиць. Список використаних джерел містить 21 джерело та викладений на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

У контексті сучасних систем електропостачання проблематика електричної енергії набуває критичного значення. Комплексне вивчення якості електропостачання передбачає наступні ключові напрямки дослідження:

- Поглиблений аналіз методологічних підходів до нормування показників електричної якості;
- Вдосконалення інструментарію для точного обчислення та вимірювання параметрів електроенергетичних характеристик;
- Ідентифікація та систематизація факторів, що спричиняють деградацію електропостачання.

Варто зазначити, що дослідження якості електроенергії включає також вивчення впливу технічних параметрів електричних мереж, аналіз впливу нелінійних навантажень, оцінку електромагнітної сумісності обладнання та моніторинг відхилень від встановлених стандартів. Перший розділ наукової праці присвячений комплексному розв'язанню означених дослідницьких завдань, що має важливе теоретичне та практичне значення для підвищення ефективності електроенергетичних систем.

1.1 Показники якості електроенергії, що описують несинусоїдальність напруги

Нормативне регулювання якості електроенергії є фундаментальним аспектом електротехнічних досліджень. Система показників якості електроенергії (ПЯЕ) охоплює комплекс кількісних параметрів, що характеризують:

- динамічні зміни напруги (швидкі коливання та повільні відхилення);
- симетричність електричного струму;
- особливості форми електричної хвилі;
- стабільність частотних характеристик;

Принципи формування ПЯЕ базуються на низці важливих техніко-економічних передумов:

1. Енергетична інтерпретація показників:

- ПЯЕ відображають потужність спотворення електричної кривої;
- ступінь негативного впливу на обладнання пропорційний значенням показників.

2. Економічна обґрунтованість:

- гранично допустимі значення встановлюються на основі техніко-економічних розрахунків;
- враховуються витрати на впровадження та експлуатацію електроенергетичних систем.

3. Статистична достовірність:

- нормування відбувається протягом певного часового інтервалу;
- забезпечується статистична ймовірність отриманих результатів;
- використовуються методи математичної статистики для верифікації даних.

Додатково варто зазначити, що сучасні підходи до нормування ПЯЕ включають впровадження міжнародних стандартів, зокрема IEEE та ІЕС, які уніфікують вимоги до якості електроенергії в різних галузях промисловості.

Система показників якості електроенергії (ПЯЕ) має широке практичне застосування у проектуванні електроенергетичних систем. Її ключові переваги полягають у:

1. Метрологічному забезпеченні:

- можливість здійснення контролю якості електроенергії;
- використання простих та економічно доцільних вимірювальних пристроїв.

2. Технічні можливості:

- реалізація засобів нормалізації електроенергетичних параметрів;
- впровадження ефективних методів діагностики та корекції електричних мереж.

Додатково система ПЯЕ дозволяє:

- прогнозувати потенційні ризики погіршення якості електропостачання
- оптимізувати режими роботи електроустаткування
- мінімізувати технологічні втрати в електричних мережах
- підвищувати енергоефективність виробничих процесів

Сучасні підходи до реалізації системи ПЯЕ передбачають застосування інтелектуальних систем моніторингу, що забезпечують автоматизований контроль та миттєву діагностику стану електромереж.

Основним нормативним документом, що регулює параметри електроенергії в українських електричних мережах, є стандарт ДСТУ EN 50160-2014. Цей документ визначає ключові показники оцінки спотворення синусоїдальності форми напруги:

1. Кількісні характеристики несинусоїдальності:

- коефіцієнт n -ї вищої гармоніки;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги.

Додаткові аспекти стандарту включають:

- встановлення допустимих меж гармонічних спотворень;
- методологію вимірювання та оцінки електричних параметрів;
- вимоги до точності реєстрації показників.

Важливо зазначити, що гармонічні спотворення можуть суттєво впливати на:

- ефективність роботи електроустаткування;
- терміни експлуатації електричних мереж;
- якість електропостачання споживачів.

Стандарт ДСТУ EN 50160-2014 гармонізований з європейськими нормами та забезпечує уніфіковану методику оцінки електроенергетичних параметрів.

Значення K_U визначається за формулою:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_{ном}} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Значення коефіцієнту n -ї гармоніки напруги розраховується за формулою:

$$K_{U(v)} = \frac{U_v}{U_1} \cdot 100 \quad (1.2)$$

1.2. Вимірювання рівнів несинусоїдальності напруги

Для визначення параметрів вищих гармонійних складових електричної напруги науковці та інженери застосовують інструментальні методики дослідження. Ці методики ґрунтуються на використанні спеціалізованого вимірювального обладнання, зокрема приладів-аналізаторів, що дозволяють точно ідентифікувати характеристики електричних коливань.

У разі браку професійного устаткування фахівці можуть здійснювати аналіз рівнів спотворення синусоїдальної форми напруги через практичний гармонічний аналіз осцилограм. Додатково для таких досліджень використовують математичні перетворення Фур'є, які надають можливість розкласти складну електричну хвилю на окремі гармонічні компоненти.

Важливо зазначити, що гармонічний аналіз дає змогу оцінити якість електроенергії, виявити джерела несинусоїдальності та передбачити потенційні негативні впливи на електричне обладнання.

Практичний гармонічний аналіз осцилограм напруги передбачає заміну інтегралів у формулах визначення коефіцієнтів ряду Фур'є на кінцеві суми. Це дозволяє спростити математичні розрахунки та зробити їх більш зручними для практичного використання.

Основні етапи методики включають:

1. Дискретизацію досліджуваної осцилограми напруги.
2. Чисельне інтегрування за допомогою наближених методів.
3. Розрахунок амплітуд та фаз гармонічних складових.

Такий підхід особливо корисний при аналізі електричних сигналів з нелінійними спотвореннями в електричних мережах та при діагностиці параметрів електроустаткування.

Метод надає можливість кількісно оцінити рівень несинусоїдальності напруги та визначити вплив вищих гармонік на якість електроенергії:

$$\left. \begin{aligned} U_{vp} &= \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m u(t_i) \sin v\theta_i \\ U_{va} &= \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m u(t_i) \cos v\theta_i \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Під час практичного гармонічного аналізу осцилограм напруги вибір кількості інтервалів здійснюється з урахуванням числа вищих гармонік, амплітуди яких необхідно визначити. Цей методологічний підхід дозволяє забезпечити максимальну точність та репрезентативність результатів дослідження.

Для вимірювання параметрів вищих гармонік напруги використовуються спеціалізовані вимірювальні прилади, підключення яких

відбувається за спеціально розробленими схемами. Типові схеми підключення передбачають:

- безпосереднє приєднання до електричних ланцюгів;
- використання додаткових перетворювачів та вимірювальних трансформаторів;
- забезпечення електричної та гальванічної розв'язки.

Важливою умовою проведення вимірювань є дотримання метрологічних вимог та забезпечення електробезпеки під час підключення вимірювальної апаратури (рис. 1).

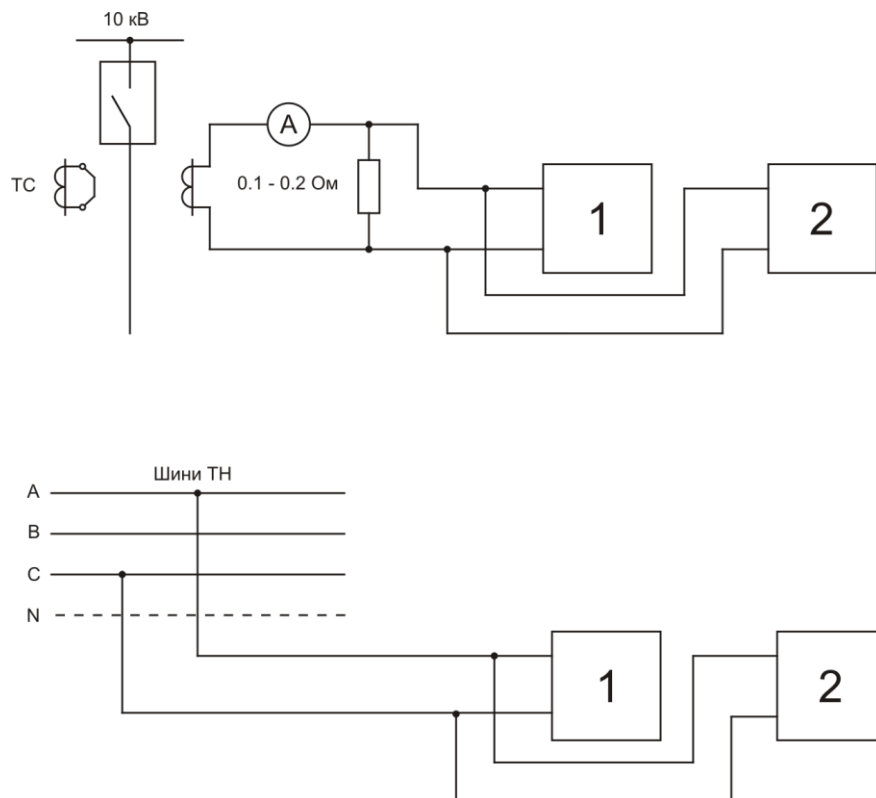


Рис. 1.1. Схема приєднання приладів для визначення вищих гармонік струму (напруги)

Безтрансформаторна схема показана на рис. 1.2.

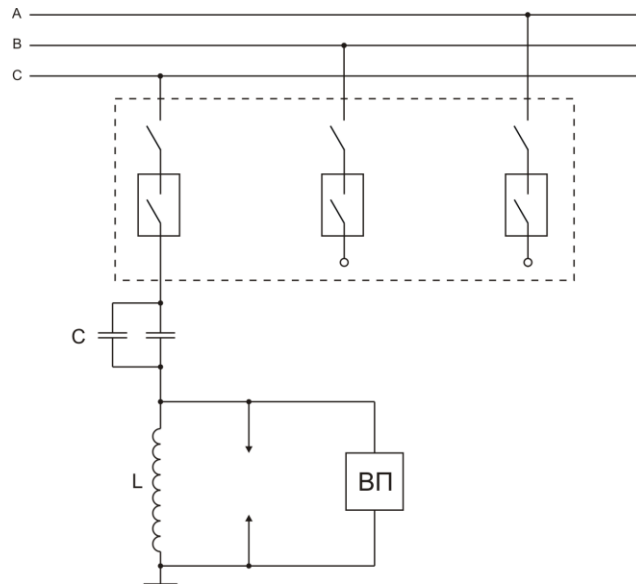


Рис. 1.2. Безтрансформаторна схема приєднання приладів для визначення вищих гармонік струму (напруги)

Коефіцієнт передачі пристрою визначається за формулою:

$$k_{mv} = \frac{X_C - v^2 X_L}{v^2 (X_C - X_L)} \quad (1.4)$$

У сучасному світі виробники пропонують широкий асортимент високотехнологічних приладів для вимірювання параметрів вищих гармонік у електричних мережах. Внаслідок цього класичний практичний гармонічний аналіз осцилограм наразі застосовується досить обмежено.

Останніми роками значного поширення набули цифрові вимірювальні прилади, призначені для проведення спектрального аналізу електричних параметрів напруги та струму. Такі інструменти дозволяють:

- здійснювати високоточні вимірювання
- миттєво обробляти отримані результати
- зберігати та архівувати виміряні дані
- проводити детальний аналіз спектральних характеристик

Типова структурна схема сучасного приладу, який реалізує алгоритм розрахунку квадратурних складових вищих гармонік напруги, передбачає використання спеціалізованих електронних компонентів та мікропроцесорної техніки наведена на рис. 1.3.

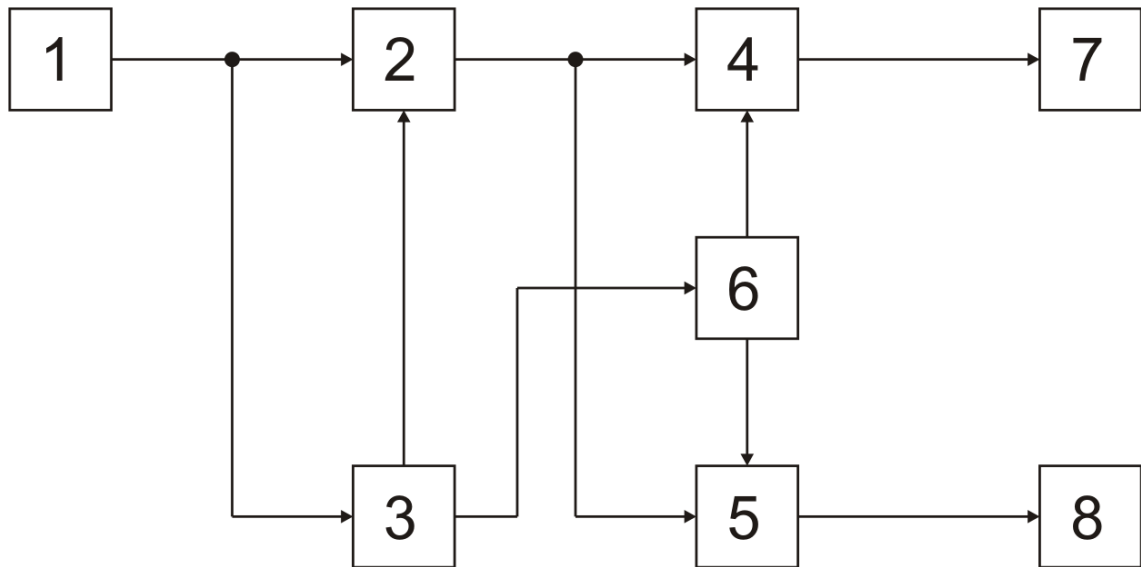


Рис. 1.3. Схема приладу для визначення вищих гармонік напруги

Алгоритм швидкого перетворення Фур'є (FFT) є потужним математичним інструментом, що дозволяє суттєво оптимізувати процес гармонічного аналізу. Особливо ефективним цей метод стає при значній кількості інтервалів розбиття досліджуваної кривої.

Перевагами FFT є:

- радикальне скорочення часу обчислень;
- можливість паралельної обробки даних;
- висока точність результатів.

Алгоритм набув широкого впровадження не лише в спеціалізованих апаратних приладах, але й у професійних програмних пакетах для проведення спектрального та гармонічного аналізу осцилограм напруги.

Сучасні реалізації FFT дозволяють опрацьовувати складні електричні сигнали з високою швидкістю та мінімальними похибками вимірювань.

У процесі розробки сучасних аналізаторів спектру широко застосовується метод послідовного аналізу. Його принципова особливість полягає в переміщенні досліджуваного спектру вздовж частотної шкали щодо фіксованої (резонансної) частоти.

Механізм реалізації методу передбачає:

- перемноження кривої напруги або струму з синусоїдальним сигналом;
- динамічну зміну частоти допоміжного синусоїдального сигналу;
- поступове переміщення спектру відносно опорної частоти.

Такий підхід дозволяє підвищити точність спектрального аналізу, здійснювати детальне дослідження електричних сигналів та виявляти тонкі особливості спектральної структури

Метод є ефективним інструментом для глибокого аналізу електричних сигналів у різних частотних діапазонах.

Для миттєвих значень u_n і u_c :

$$u_n = \sum_{v=1}^m U_{vm} \cos(\omega t + \psi_v) \quad (1.5)$$

$$u_c = U_{cm} \sin \Omega t \quad (1.6)$$

добуток матиме вигляд

$$u_n u_c = 0,5 U_{cm} \sum_{v=1}^m U_{vm} \left\{ \sin[(\Omega - \omega)t + \psi_v] + \sin[(\Omega + \omega)t + \psi_v] \right\}, \quad (1.7)$$

Під час налаштування спектрального аналізу визначення меж вимірювання частоти здійснюється за спеціальним алгоритмом. Основний принцип полягає у виборі таких меж, за яких одна з бічних частот результуючого спектру проходить через частоту встановлених фільтрів.

Цей методологічний підхід дозволяє забезпечити максимальну точність спектрального аналізу; оптимізувати процес фільтрації сигналів; мінімізувати похибки вимірювання.

Такий метод є принципово важливим для забезпечення високої інформативності та достовірності спектрального аналізу електричних сигналів.

Аналізатори гармонік є спеціалізованими вимірювальними пристроями, призначеними для визначення діючих значень вищих гармонік напруги в електричних мережах.

Принцип функціонування таких приладів базується на гетеродинному методі, який має наступні ключові особливості:

- перетворення вхідного сигналу шляхом змішування з опорним (гетеродинним) сигналом;
- перенесення спектру досліджуваної частоти на нижчу проміжну частоту;
- можливість селективного виділення та вимірювання окремих гармонічних складових.

Структурна схема аналізатора вищих гармонік напруги (рис. 1.4) передбачає використання спеціальних електронних блоків для перетворення, фільтрації та вимірювання параметрів електричного сигналу.

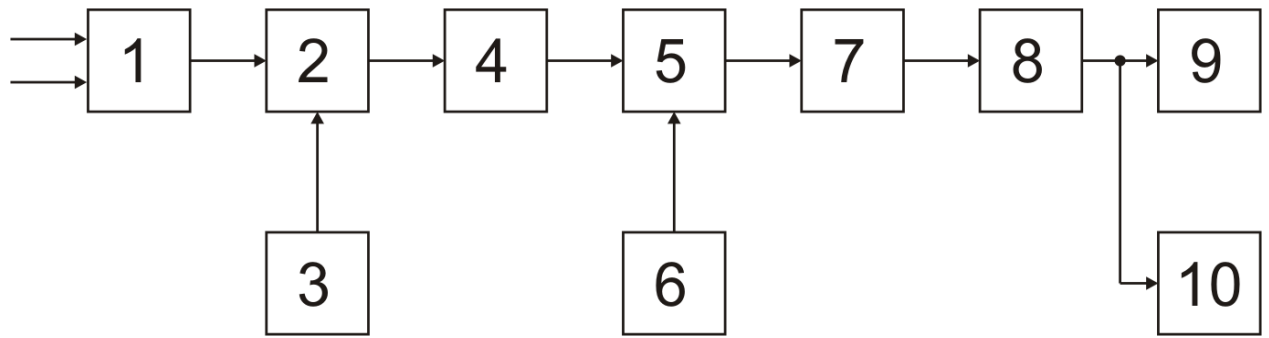


Рис. 1.4. Структурна схема аналізатора вищих гармонік

Цей метод забезпечує високу точність та інформативність аналізу спектральних характеристик електричної напруги.

На рис. 1.4:

- 1 – це вхідний пристрій;
- 2 та 5 – заміщувачі;
- 3 та 6 – гетеродини;
- 4 та 8 – підсилювачі проміжної частоти сигналу;
- 7 – ФНЧ;
- 9 – вольтметр;
- 10 – реєструючий пристрій.

На сучасному етапі розвитку електротехніки значного поширення набули комплексні технічні засоби вимірювання показників якості електроенергії (ПЯЕ).

Такі інтегровані системи дозволяють:

- здійснювати багатопараметричний моніторинг електричних мереж;
- проводити комплексну діагностику параметрів електроенергії;
- реєструвати та аналізувати широкий спектр електричних характеристик;
- забезпечувати високоточні вимірювання в реальному часі.

Основними перевагами комплексних засобів є висока інформативність, можливість централізованого контролю, здатність до накопичення та архівації даних, інтеграція з сучасними інформаційними системами

Застосування таких технічних комплексів є важливим для забезпечення надійності та ефективності електроенергетичних систем.

1.3 Джерела появи вищих гармонік в системах електропостачання

Генерація вищих гармонік у системах електропостачання підприємств (СЕПП) пов'язана з наявністю нелінійних електроспоживачів, які порушують класичну синусоїдальну характеристику електричного струму. Під час проходження через електричні елементи такі навантаження викликають викривлення амплітудних показників, що призводить до формування несиметричної кривої електричної напруги.

У сучасних виробничих середовищах значного поширення набули електронні перетворювачі частоти, котрі становлять джерело потенційних спотворень електричної мережі. Зокрема, трифазні напівпровідникові перетворювачі з мостовою схемою підключення спричиняють найбільш суттєві викривлення електричних параметрів.

Додаткові джерела гармонійних спотворень включають:

- Напівпровідникові перетворювачі
- Імпульсні блоки живлення
- Електродвигуни з частотним керуванням
- Зварювальне обладнання
- Офісну техніку з імпульсними джерелами живлення

Такі навантаження спричиняють появу небажаних гармонійних складових, які можуть негативно впливати на якість електроенергії та справність електроустаткування.

Ось розширений та деталізований текст про амплітудний спектр струмів у керованих вентильних перетворювачах:

Амплітудний спектр струмів у шести- та дванадцятипульсних керованих вентильних перетворювачах має складну гармонійну структуру, яка залежить від схеми підключення та параметрів комутації.

У шестипульсному тиристорному перетворювачі характерними особливостями гармонійного складу є:

- наявність непарних гармонійних складових 5, 7, 11, 13 порядків;
- суттєве зменшення амплітуди базових гармонік;
- нерівномірний розподіл спектральних компонент.

Дванадцятипульсні перетворювачі мають покращені спектральні характеристики:

- зменшення амплітуд 5 та 7 гармонік
- зниження рівня гармонійних спотворень порівняно з шестипульсними схемами

Комп'ютерне моделювання, зокрема з використанням середовища Simulink, дозволяє деталізовано досліджувати особливості формування амплітудного спектру струмів у таких перетворювачах.

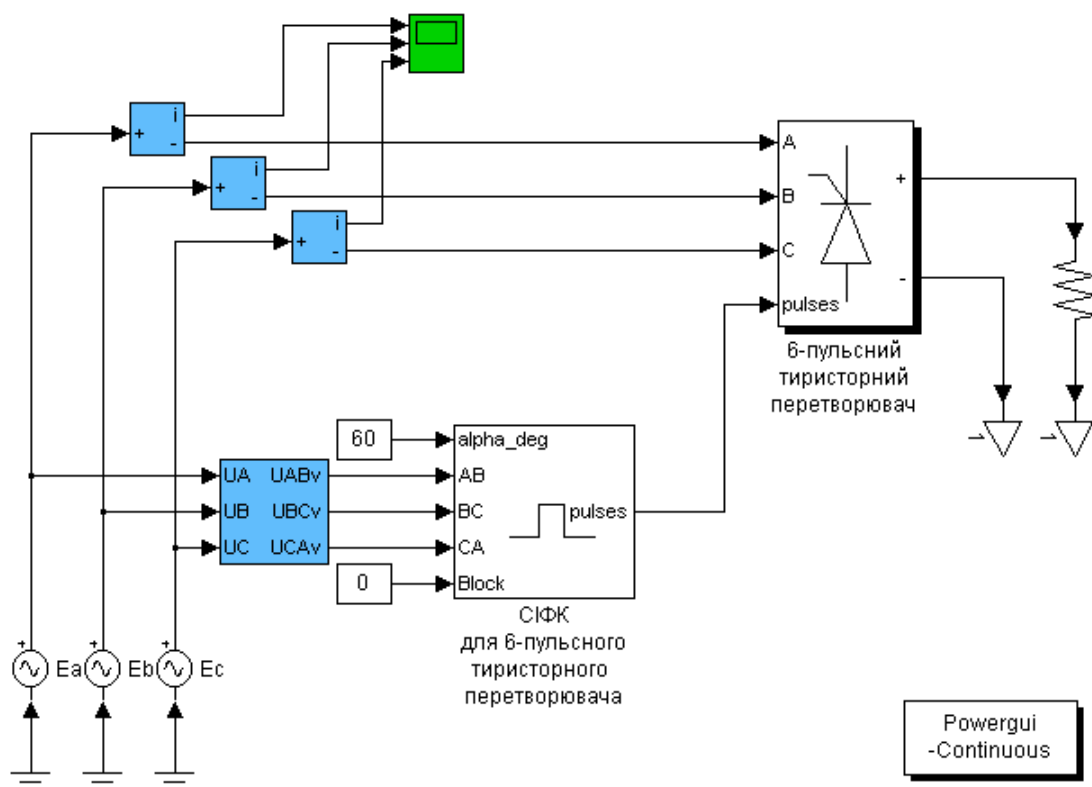


Рис. 1.5. Модель шестипульсного тиристорного перетворювача

Осцилограми струму ВП, показані на рис. 1.6, 1.7, 1.8.

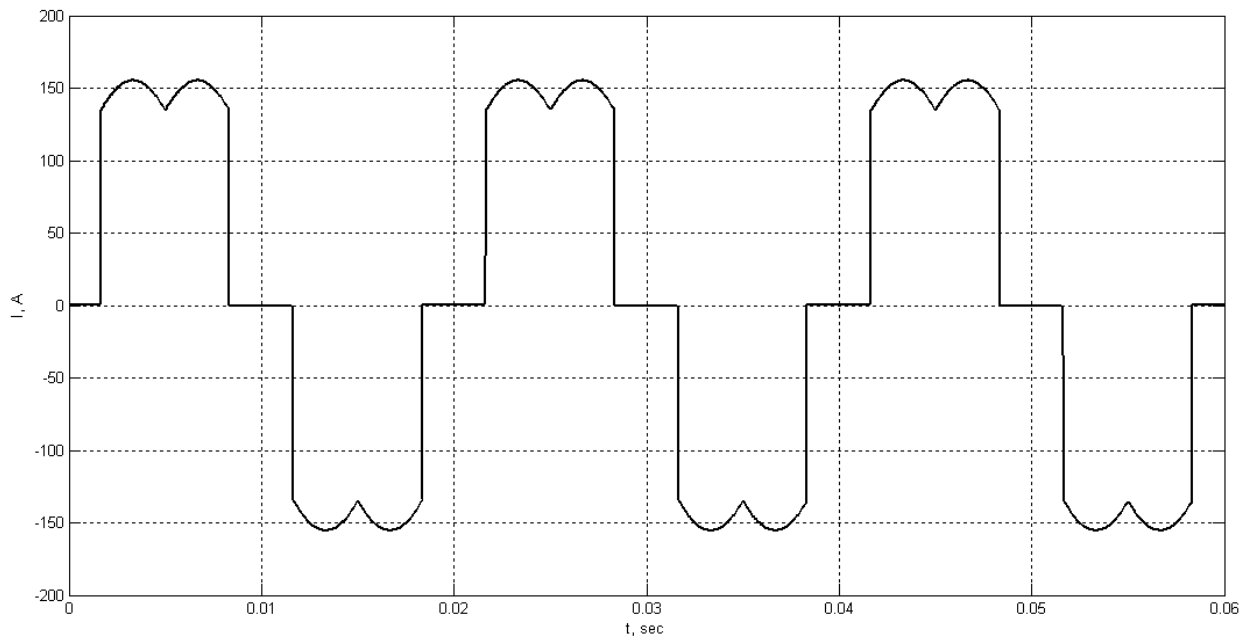


Рис. 1.6. Осцилограма струму 6-пульсного ВП (кут $\alpha = 0^\circ$)

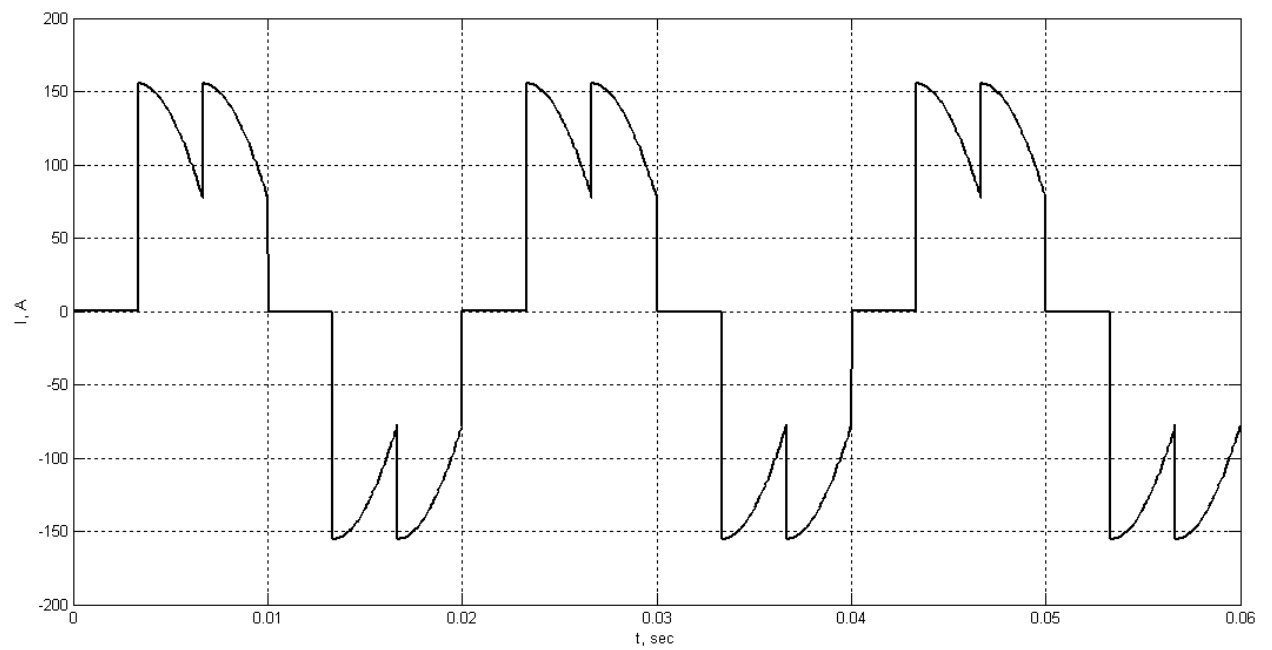


Рис. 1.7. Осцилограма струму 6-пульсного ВП (кут $\alpha = 30^\circ$)

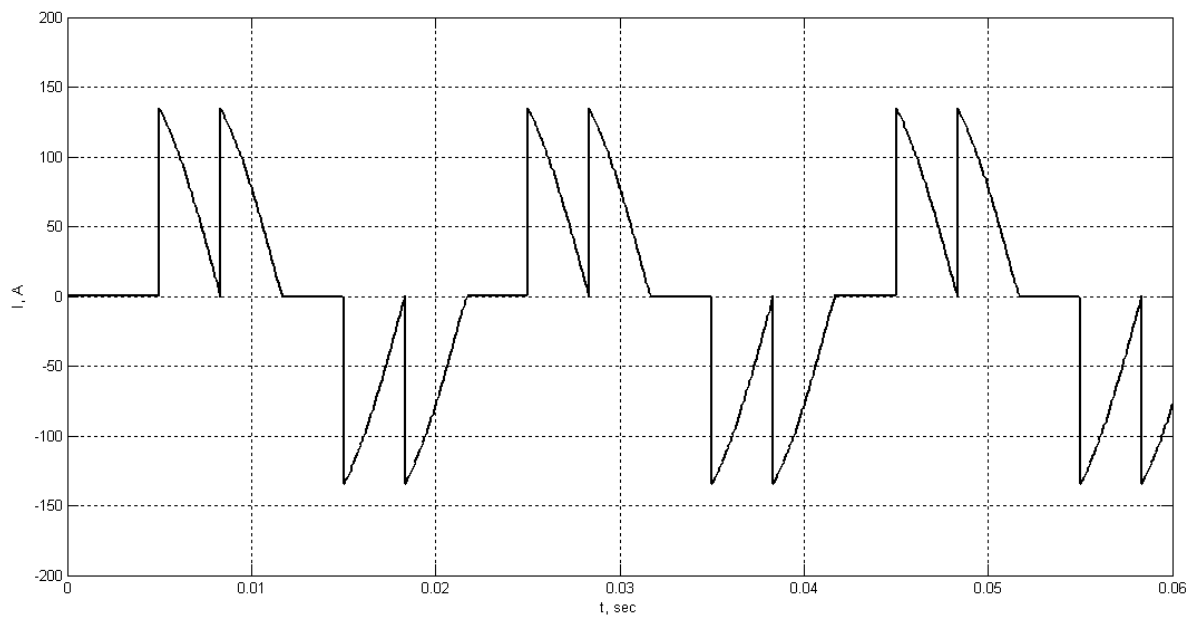


Рис. 1.8. Осцилограма струму 6-пульсного ВП (кут $\alpha = 60^\circ$)

Графіки залежностей вищих гармонік струму від α показані на рис. 1.9.

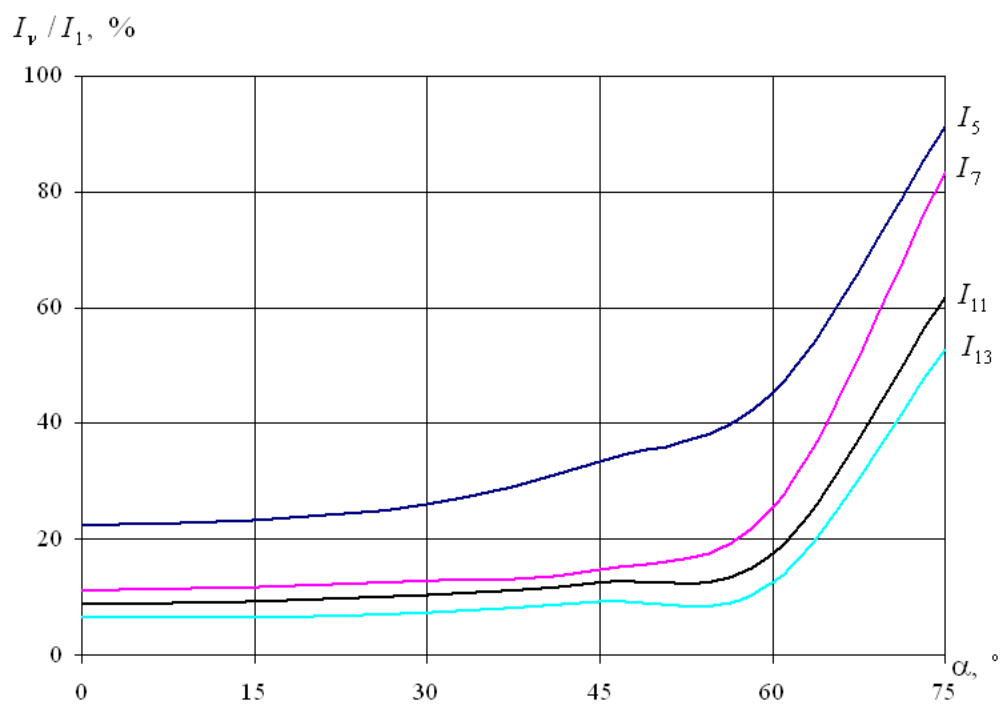


Рис. 1.9. Графіки гармонік струму 6-пульсного ВП від кута α

З результатів моделювання можна побачити, що при значенні кута $\alpha > 60^\circ$ має місце суттєве збільшення рівнів вищих гармонік.

Комп'ютерне імітаційне моделювання схеми ВП з 12-пульсним ВП (рис. 1.10) проводилось аналогічним чином. Результати наведені на рис. 1.11, 1.12, 1.13, 1.14.

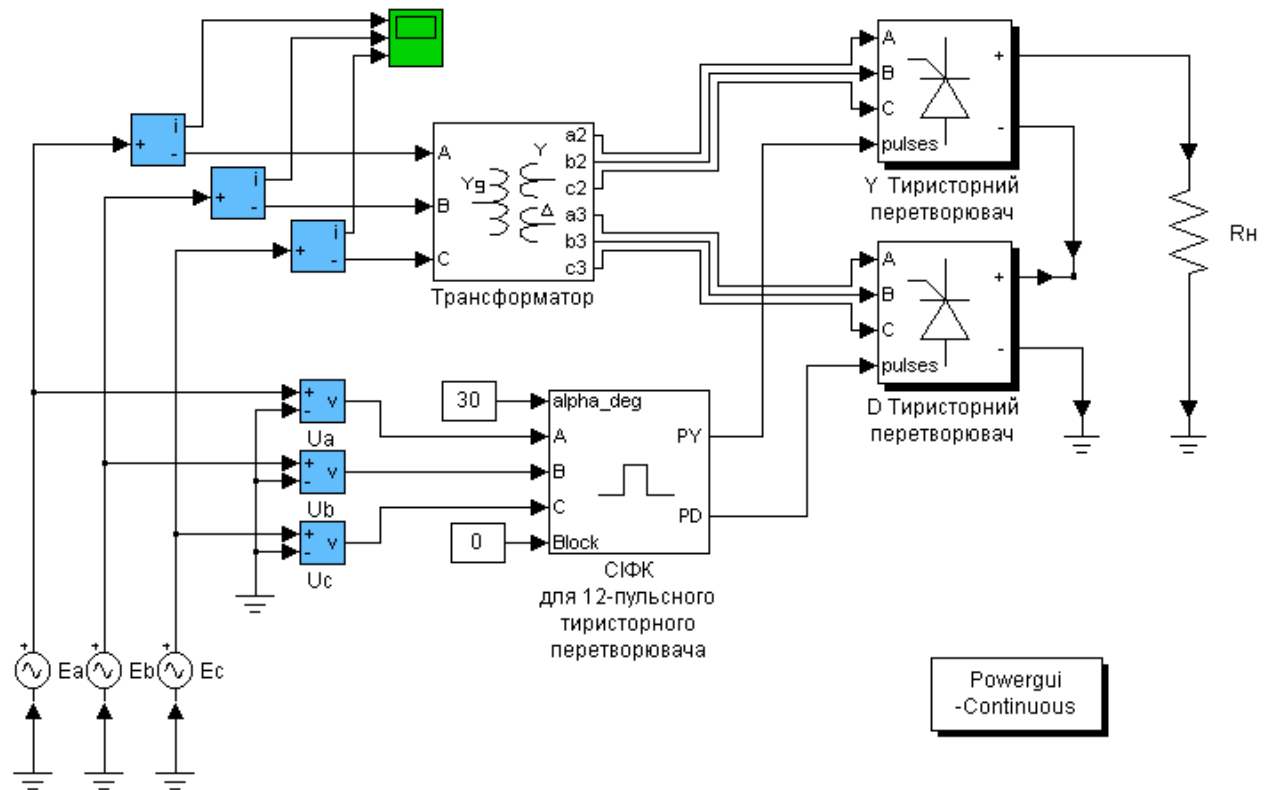


Рис. 1.10. Модель 12-пульсного перетворювача

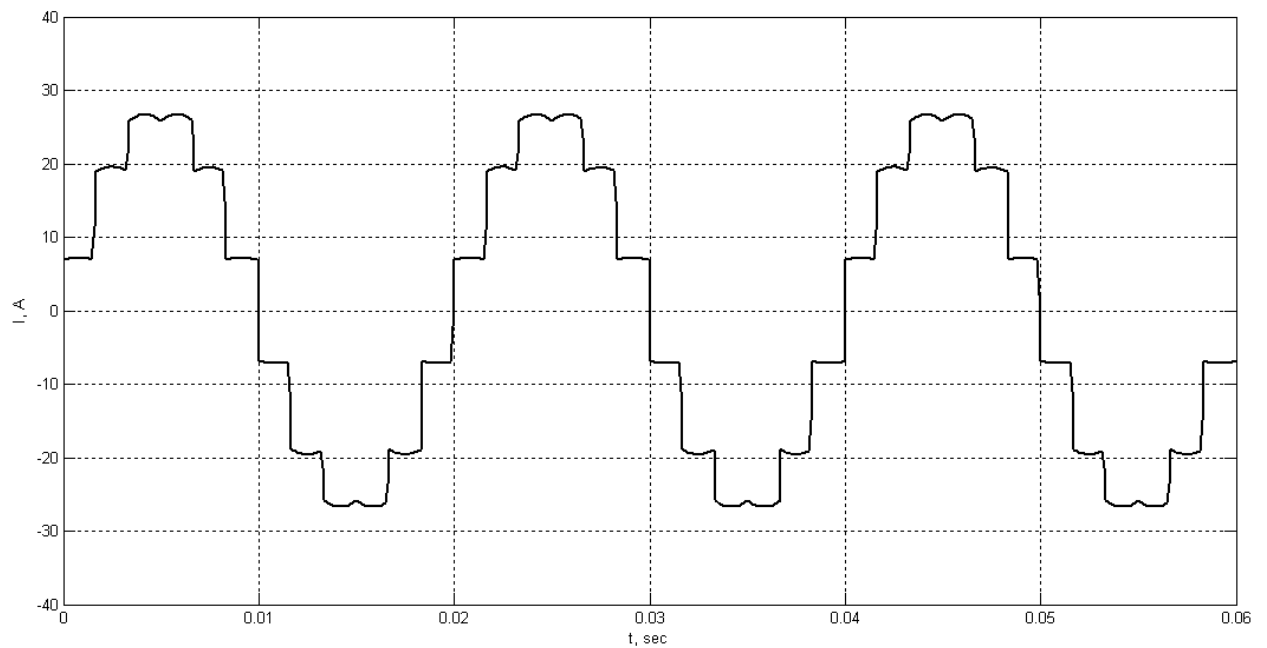


Рис.1.11. Графік струму 12-пульсного ВП (кут $\alpha = 0^\circ$)

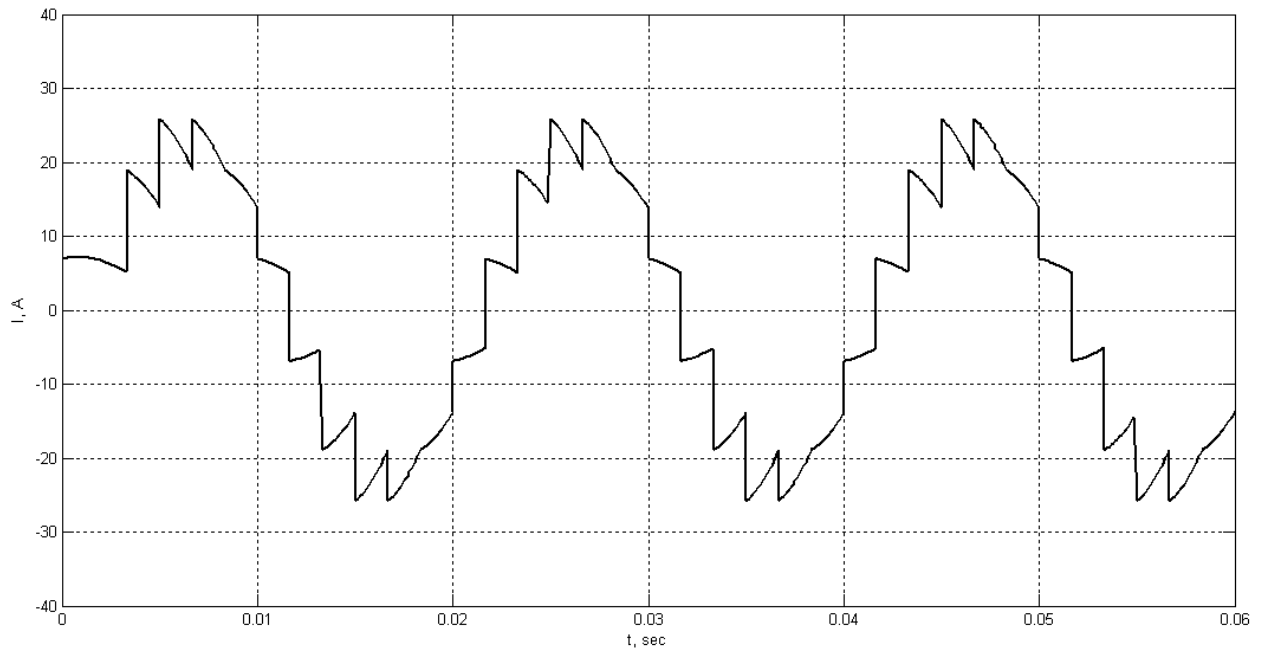


Рис.1.12. Графік струму 12-пульсного ВП (кут $\alpha = 30^\circ$)

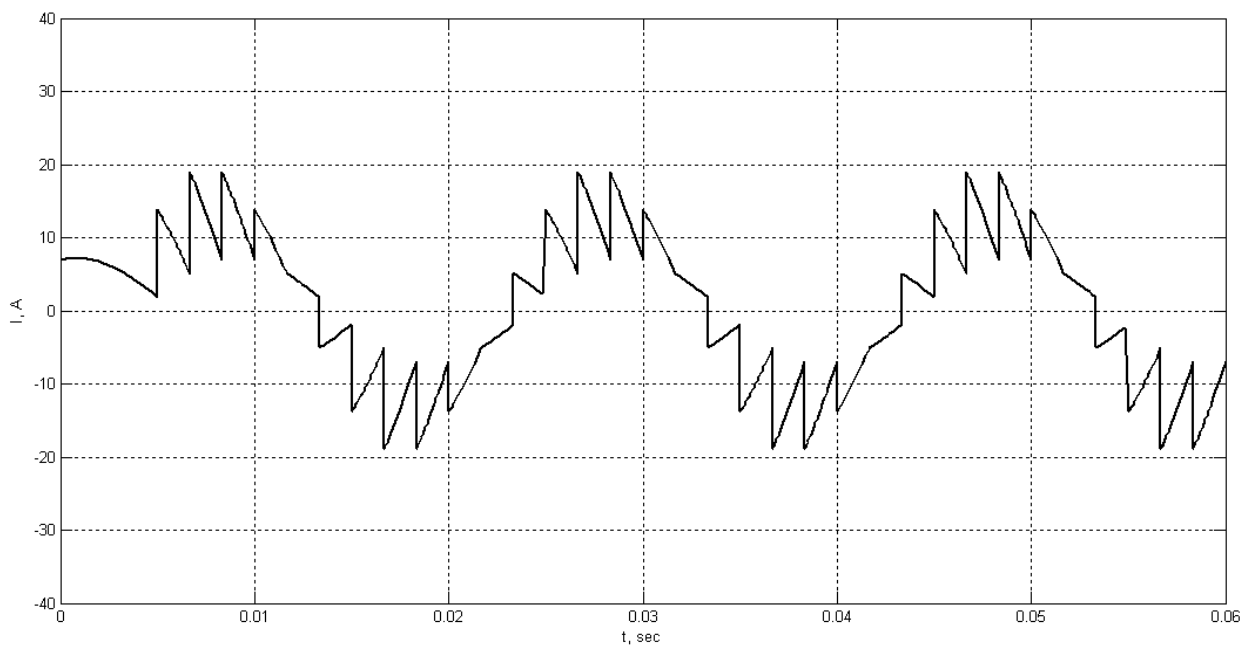


Рис.1.13. Графік струму 12-пульсного ВП (кут $\alpha = 60^\circ$)

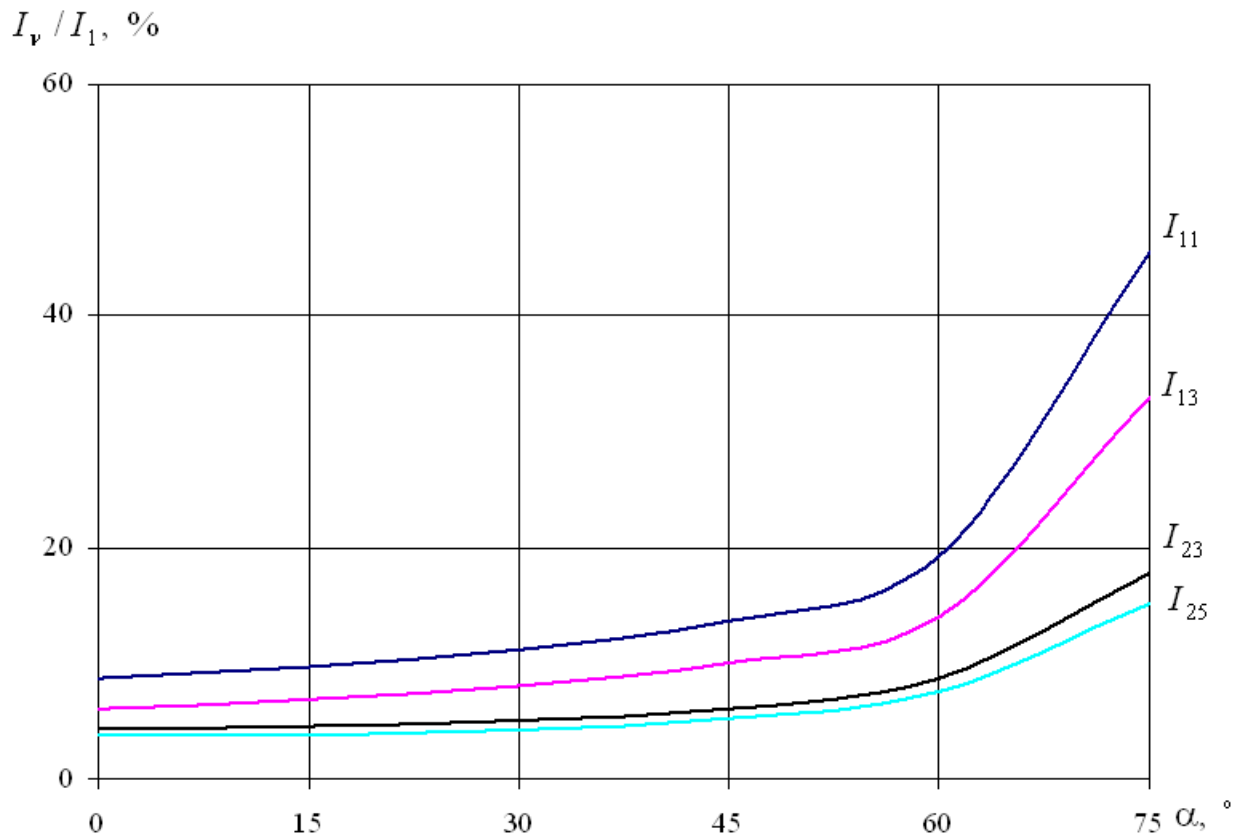


Рис. 1.14. Графіки гармонік струму 12-пульсного ВП від кута α

Ось розширений та деталізований огляд джерел вищих гармонік напруги в системах електропостачання:

Інші джерела генерації вищих гармонік включають:

1. Дугові вакуумні та сталеплавильні печі:

- генерують значні гармонійні спотворення внаслідок нелінійності електричної дуги;

- спричиняють появу широкого спектру вищих гармонік у мережі.

2. Установки електродугового зварювання:

- викликають нестабільні електричні режими;

- продукують гармоніки 3, 5 та 7 порядків;

- залежать від типу зварювального обладнання та режимів роботи.

3. Газорозрядні лампи:

- створюють нелінійне навантаження на електричну мережу;

- генерують непарні гармонійні складові;

- особливо характерно для люмінесцентних та світлодіодних джерел світла.

4. Побутові напівпровідникові прилади:

- імпульсні блоки живлення;
- зарядні пристрої;
- електронні трансформатори;
- комп'ютерна та офісна техніка.

5. Силові трансформатори:

- є джерелом гармонік внаслідок явища магнітного насичення;
- викликають спотворення форми струму намагнічування;

Кожне з цих джерел по-різному впливає на гармонійний склад електричної мережі, формуючи специфічний спектр вищих гармонік.

В системах електропостачання електродугові агрегати викликають суттєві електричні флуктуації. Порівняно з перетворювачами потужності співмірного діапазону, дугові плавильні установки спотворюють електричний сигнал приблизно в 3-4 рази менше інтенсивно.

Електромагнітна асиметрія між фазами зумовлює підвищення рівнів третинних гармонік. Випрямляючий ефект електричної дуги призводить до появи постійної струмової компоненти, що додатково збільшує частку вищих гармонічних складових у сумарному струмі печі.

Додаткові особливості електродугових печей включають:

- генерацію інтергармонік - проміжних частотних коливань;
- значний вплив на якість електроенергії внаслідок нелінійності процесів;
- потребу спеціальних систем компенсації та фільтрації електричних збурень.

Важливо враховувати ці технологічні особливості при проектуванні електричних мереж та систем електропостачання металургійних підприємств.

Електродугові вакуумні металургійні печі зазвичай живляться від багатопульсних випрямних перетворювачів. Контроль електричних навантажень у таких агрегатах здійснюється за допомогою спеціальних насичених дроселів. Характеристики електричного струму в мережі подібні до показників випрямлячів електроприводів з мостовою схемою комутації.

Специфіка роботи вакуумних дугових печей пов'язана з використанням електричної дуги для плавлення металів у вакуумному середовищі. Це дозволяє досягати високої чистоти металу та мінімізувати окиснювальні процеси. Рівень вищих гармонік струму в таких установках може сягати значних показників, що впливає на якість електроенергії та вимагає застосування спеціальних систем фільтрації та компенсації.

Технічні особливості включають:

- використання потужних випрямлячів для створення стабільного електричного живлення;
- застосування складних систем керування електричними параметрами;
- забезпечення високої точності регулювання температурних режимів.

У сучасній промисловості набули значного поширення зварювальні агрегати з напівпровідниковим електричним живленням. Типова схема підключення таких установок передбачає використання трифазного мостового перетворювача з некерованими тиристорними вентилями.

Результати детального дослідження електричних характеристик виявили суттєві особливості струмової поведінки зварювальних випрямлячів. Зокрема, в спектрі струму присутні нестабільні непарні вищі гармоніки, передусім п'ята та сьома. Найцікавішою особливістю є те, що навіть незначні зміни режиму горіння електричної дуги спричиняють суттєві коливання амплітуд цих гармонійних складових.

Такі характеристики мають важливе значення для забезпечення стабільності та ефективності зварювальних технологічних процесів.

Аналізовані електроспоживачі зазвичай мають мінімальний вплив на викривлення синусоїдальної форми електричної напруги. З огляду на цю

обставину, подальше дослідження зосередиться виключно на потужних частотних перетворювачах як основних джерелах вищих гармонік.

Висновки до розділу

1. Характеристика якості електричної енергії ґрунтується на енергетичному підході до оцінки несинусоїдальності напруги. Інтенсивність негативного впливу гармонічних спотворень на електротехнічне обладнання безпосередньо корелює з кількісними параметрами електроенергетичних показників. Важливо підкреслити, що максимально припустимі значення показників якості електроенергії формуються на основі техніко-економічного обґрунтування, яке враховує як технологічні обмеження, так і економічну доцільність впровадження заходів з покращення електропостачання.

2. Визначення рівня вищих гармонік у електричних мережах здійснюється переважно інструментальними методами з використанням спеціалізованої вимірювальної техніки. Сучасні аналізатори якості електроенергії дозволяють проводити високоточну діагностику параметрів несинусоїдальності.

3. За відсутності спеціалізованого обладнання можливе проведення практичного гармонічного аналізу шляхом детального вивчення осцилограм електричної напруги. Такий підхід передбачає використання математичних перетворень Фур'є для ідентифікації та кількісної оцінки гармонічних складових. Сучасні комп'ютерні технології дозволяють суттєво спростити процедуру аналізу, забезпечуючи високу точність та інформативність досліджень електричних мереж.

3. Сучасні електроенергетичні системи характеризуються наявністю потужних напівпровідникових перетворювачів, які є домінантними джерелами вищих гармонік. Зокрема, визначальними генераторами гармонічних спотворень виступають керовані вентильні випрямлячі з

широотно-імпульсною модуляцією, перетворювачі частоти з нелінійними характеристиками, потужні напівпровідникові перетворювальні комплекси. Серед основних причин генерації вищих гармонік – нелінійні режими перетворення електричної енергії, які супроводжуються стрибкоподібними змінами струму та напруги.

Вирішення проблеми потребує комплексного підходу з впровадженням сучасних фільтрокомпенсаційних технологій та схемних рішень.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ФІЛЬТРО-КОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

2.1. Методика розрахунку рівнів несинусоїдальності напруги та виборур ФКП

Здійснимо аналіз показників несинусоїдальності електричної напруги в електроенергетичній системі з використанням практичного методологічного підходу. Основне завдання полягає у комплексному дослідженні рівнів вищих гармонічних складових у різних вузлових точках електричної мережі за різноманітних експлуатаційних режимів.

Методика передбачає детальне вивчення характеристик електромагнітних коливань, що виникають внаслідок нелінійних навантажень, таких як перетворювачі, електродвигуни, зварювальне обладнання тощо. У разі встановлення факту перевищення регламентованих нормативними документами значень показників якості електричної енергії, що характеризують ступінь спотворення синусоїдальної форми кривої, виникає необхідність проєктування та впровадження фільтрокомпенсувальних пристроїв (ФКП).

Графічна ілюстрація досліджуваної електропостачальної системи представлена розрахунковою схемою на рис. 2.1, яка демонструє топологію мережі, місця підключення споживачів та потенційні джерела гармонічних спотворень.

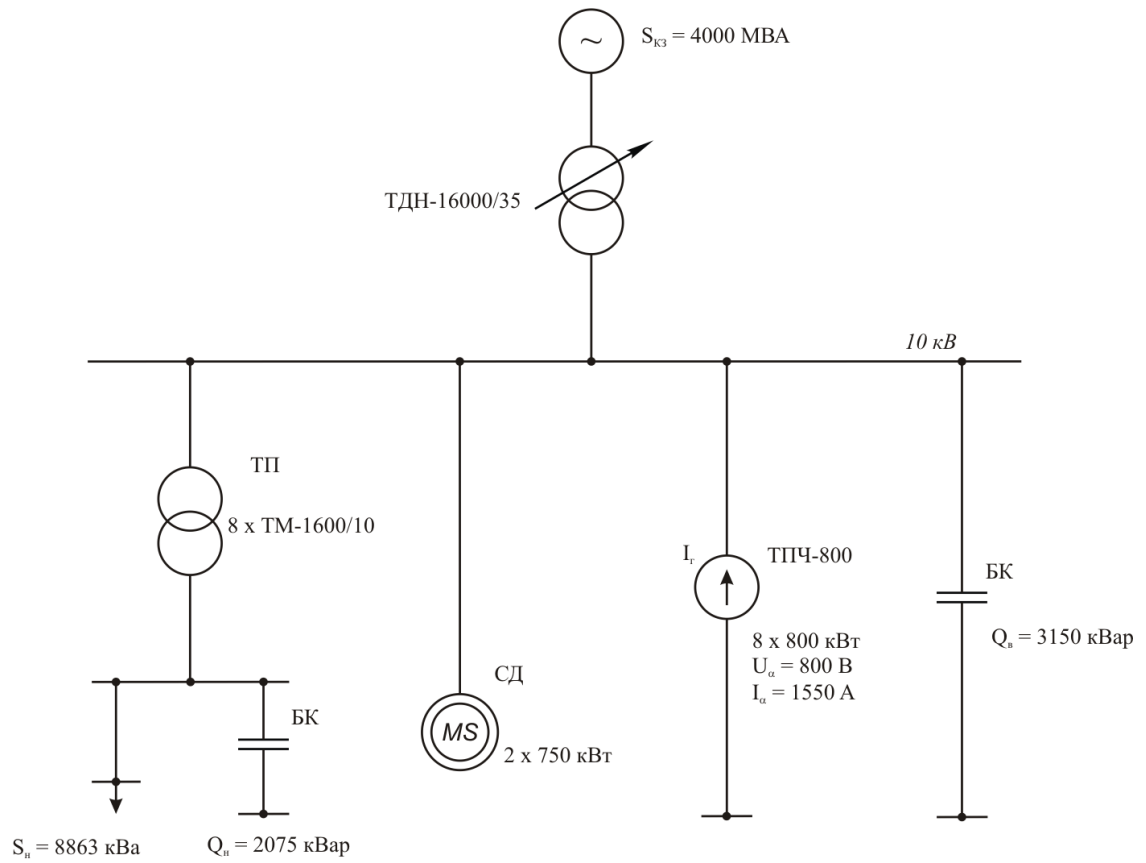


Рис. 2.1. Схема системи електропостачання

Схема заміщення мережі наведена на рис. 2.2

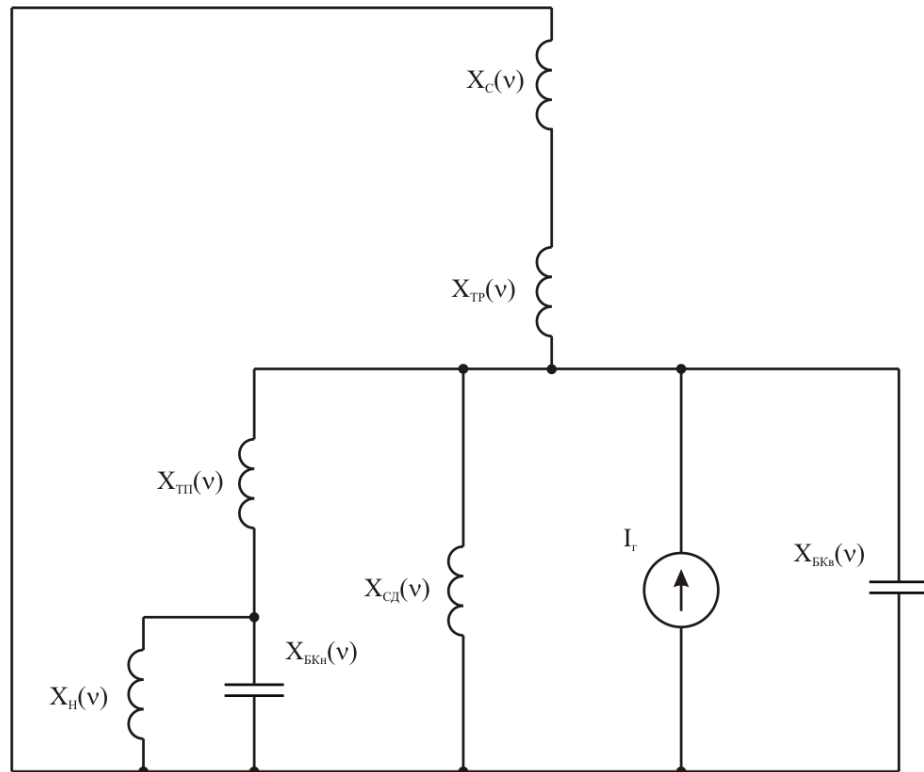


Рис. 2.2. Схема заміщення мережі

Так як в даній системі електропостачання наявні ТПЧ, то необхідно враховувати 5, 7, 11 і 13 вищі гармоніки.

Здійснимо розрахунок параметрів схеми заміщення.

Опір енергосистеми:

$$x_C(\nu) = \frac{U_H^2}{S_{кз}} \nu = \frac{10^2}{4000} \nu = 0,025 \nu$$

Опір силового трансформатора ГЗП:

$$x_T(\nu) = \frac{4}{S_{н.тр}} \nu = \frac{4}{16} \nu = 0,25 \nu$$

Опір синхронного двигуна:

$$x_{сд}(\nu) = \frac{17}{S_{\Sigma сд}} \nu = \frac{17}{1,5} \nu = 11,3 \nu$$

$$S_{\Sigma сд} = S_{н.сд} n_{сд} = 0,75 \cdot 2 = 1,5 \text{ МВА}$$

Опір трансформаторних підстанцій:

$$x_{ТП}(\nu) = \frac{34}{S_{\Sigma ТП}} \nu = \frac{34}{12,8} \nu = 2,66 \nu$$

$$S_{\Sigma ТП} = S_{н.ТП} n_{ТП} = 1,6 \cdot 8 = 12,8 \text{ МВА}$$

Опір електронавантаження:

$$x_H(v) = \frac{34}{S_H} v = \frac{34}{8,863} v = 3,84v$$

Опір батарей конденсаторів 0,4 кВ:

$$x_{БК.н}(v) = \frac{U_H^2}{Q_{БК.н}} \cdot \frac{1}{v} = \frac{10^2}{2,075} \cdot \frac{1}{v} = \frac{48,2}{v}$$

Опір батарей конденсаторів 10 кВ:

$$x_{БК.в}(v) = \frac{U_H^2}{Q_{БК.в}} \cdot \frac{1}{v} = \frac{10^2}{3,150} \cdot \frac{1}{v} = \frac{31,7}{v}$$

Еквівалентний опір енергосистеми та силового трансформатора ГЗП:

$$x_{e1}(v) = x_C(v) + x_T(v) = 0,025v + 0,25v = 0,275v$$

Еквівалентний опір енергосистеми, силового трансформатора та синхронного двигуна:

$$x_{екв}(v) = \frac{1}{\frac{1}{x_{e1}(v)} + \frac{1}{x_{сд}(v)}} = \frac{1}{\frac{1}{0,275v} + \frac{1}{11,3v}} = 0,268v$$

Схема заміщення мережі після спрощень показана на рис. 2.3.

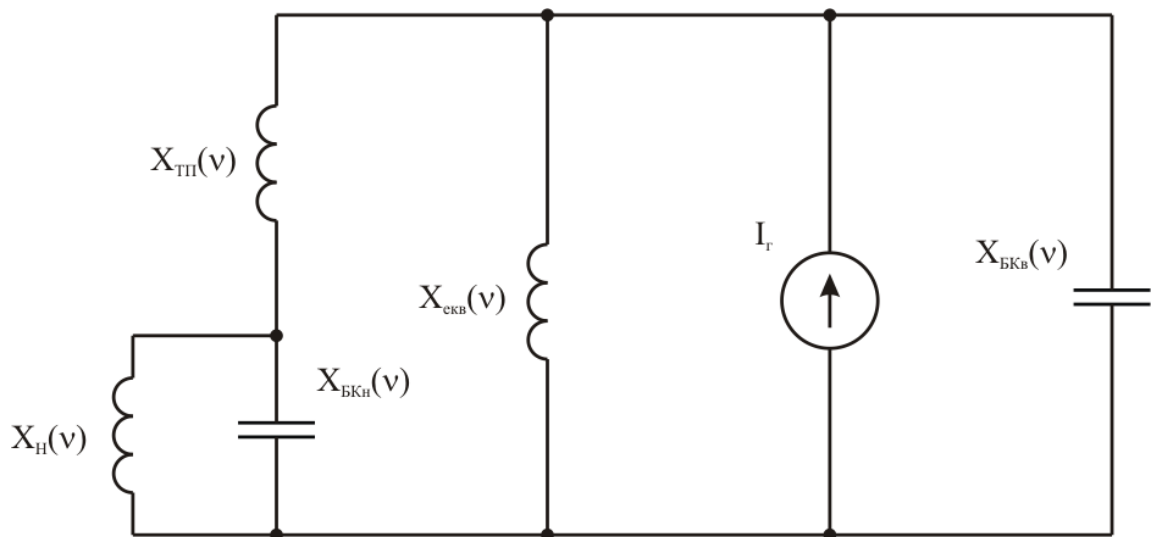


Рис. 2.3. Схема заміщення після проведення спрощень

Номінальний струм батареї конденсаторів 10 кВ:

$$I_{БКВ} = \frac{Q_{БКВ}}{\sqrt{3}U_H} \cdot 10^3 = \frac{3,150}{\sqrt{3} \cdot 10} \cdot 10^3 = 275 \text{ A}$$

Номінальний струм батареї конденсаторів 0,4 кВ:

$$I_{БКН} = \frac{Q_{БКН}}{\sqrt{3}U_H} \cdot 10^3 = \frac{2,075}{\sqrt{3} \cdot 10} \cdot 10^3 = 120 \text{ A}$$

Номінальний струм ТПЧ:

$$I_{ТПЧН} = n_{ТПЧ} \frac{0,9U_\alpha I_\alpha}{\sqrt{3}U_H \cos\varphi} \cdot 10^{-3} = 4 \cdot \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 1550}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,8} \cdot 10^{-3} = 322 \text{ A}$$

Значення струмів вищих гармонік групи ТПЧ:

$$I_{\Sigma ТПЧ(v)} = n_{ТПЧ} \frac{I_{ТПЧН}}{1,11(v \pm 1)} = 4 \cdot \frac{80,4}{1,11(v \pm 1)} = \frac{322}{1,11(v \pm 1)} \text{ A}$$

Коефіцієнт кратності для батареї напругою 10 кВ:

$$k_B(\nu) = \frac{x_{\text{ТП}}(\nu) + \frac{x_{\text{БКН}}(\nu)x_{\text{Н}}(\nu)}{x_{\text{БКН}}(\nu) - x_{\text{Н}}(\nu)}}{\frac{x_{\text{БКВ}}(\nu)x_{\text{ЕКВ}}(\nu)}{x_{\text{БКВ}}(\nu) - x_{\text{ЕКВ}}(\nu)} + x_{\text{ТП}}(\nu) + \frac{x_{\text{БКН}}(\nu)x_{\text{Н}}(\nu)}{x_{\text{БКН}}(\nu) - x_{\text{Н}}(\nu)}} \cdot \frac{x_{\text{ЕКВ}}(\nu)}{x_{\text{ЕКВ}}(\nu) - x_{\text{БКВ}}(\nu)}$$

Коефіцієнт кратності для батареї напругою 0,4 кВ:

$$k_H(\nu) = \frac{\frac{x_{\text{БКВ}}(\nu)x_{\text{ЕКВ}}(\nu)}{x_{\text{БКВ}}(\nu) - x_{\text{ЕКВ}}(\nu)}}{\frac{x_{\text{БКВ}}(\nu)x_{\text{ЕКВ}}(\nu)}{x_{\text{БКВ}}(\nu) - x_{\text{ЕКВ}}(\nu)} + x_{\text{ТП}}(\nu) + \frac{x_{\text{БКН}}(\nu)x_{\text{Н}}(\nu)}{x_{\text{БКН}}(\nu) - x_{\text{Н}}(\nu)}} \cdot \frac{x_{\text{Н}}(\nu)}{x_{\text{Н}}(\nu) - x_{\text{БКН}}(\nu)}$$

Результати розрахунків деяких параметрів наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Розрахунок параметрів схеми заміщення

Параметр	№ гармоніки			
	5	7	11	13
Струм ТПЧ	48,353	48,359	29,01	20,728
$k_B(\nu)$	-0,362	-0,524	-10,429	4,549
$k_H(\nu)$	-0,777	0,346	1,387	-0,387
$I_{\text{БКВ}}$	-17,991	-25,493	-302,991	94,004
$I_{\text{БКН}}$	-37,895	16,605	39,904	-8,091

Еквівалентний струм батареї конденсаторів 10 кВ:

$$I_{\text{ЕКВ}} = \sqrt{\sum_{\nu=1}^{13} I_{\text{БКВ}}(\nu)^2} = \sqrt{275^2 + (-18,0)^2 + (-25,5)^2 + (-303,0)^2 + 94,0^2} = 421 \text{ A}$$

Еквівалентний струм БСК 0,4 кВ:

$$I_{\text{еБКн}} = \sqrt{\sum_{v=1}^{13} I_{\text{БКн}}(v)^2} = \sqrt{120^2 + (-37,9)^2 + 16,6^2 + 39,9^2 + (-8,1)^2} = 133 \text{ A}$$

Коефіцієнт перевантаження батареї напругою 10 кВ:

$$k_{\text{п.БКв}} = \frac{I_{\text{еБКв}}}{I_{\text{БКв}}} = \frac{421}{275} = 1,53 > 1,3$$

Коефіцієнт перевантаження батареї напругою 0,4 кВ:

$$k_{\text{п.БКн}} = \frac{I_{\text{еБКн}}}{I_{\text{БКн}}} = \frac{133}{120} = 1,11 < 1,3$$

Коефіцієнт несинусоїдальності розраховується для мінімального та максимального режимів.

1. Мінімальний режим (БСК вимкнені, рис. 2.4).

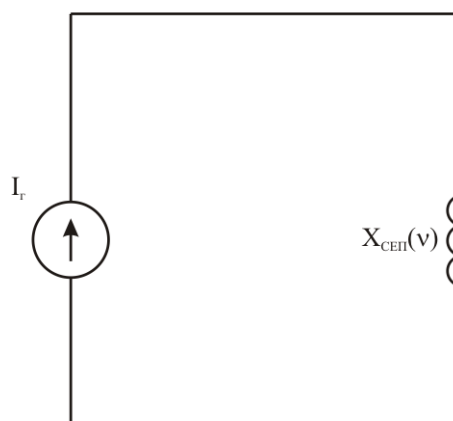


Рис. 2.4. Схема заміщення для мінімального режиму

Еквівалентний опір:

$$x_{\text{сеп}}(\nu) = \frac{1}{\frac{1}{x_{\text{III}}(\nu) + x_{\text{H}}(\nu)} + \frac{1}{x_{\text{екв}}(\nu)} + \frac{1}{x_{\text{сд}}(\nu)}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{2,66\nu + 3,84\nu} + \frac{1}{0,268\nu} + \frac{1}{11,3\nu}} = 0,252\nu$$

Напряга вищих гармонік розраховується за формулою:

$$U_{\text{ш}}(\nu) = I_{\Sigma\text{ТПЧ}}(\nu) x_{\text{сеп}}(\nu)$$

Результати розрахунку показані в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Результати розрахунку еквівалентного опору та напруги вищих гармонік

Параметр	№ гармоніки			
	5	7	5	13
$x_{\text{сеп}}(\nu) = 0,25\nu$	1,266	1,766	2,771	3,283
$U_{\text{ш}}(\nu)$	60,927	85,293	80,427	67,883

Коеф. несинусоїдальності на шинах напругою 10 кВ:

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=5}^{13} U_{\text{ш}}(\nu)^2}}{U_{\text{H}}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{60,92^2 + 85,29^2 + 80,42^2 + 67,88^2}}{10 \cdot 10^3} \cdot 100 = 1,49 \%$$

2. Максимальний режим (БСК увімкнені). Напряга на шинах 10 кВ визначається за формулою

$$U_{\text{ш}}(\nu) = I_{\text{БКВ}}(\nu) x_{\text{БКВ}}(\nu)$$

Результати розрахунків опору БСК та напруги вищих гармонік на шинах 10 кВ приведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Результати розрахунків опору БСК та напруги вищих гармонік на шинах 10 кВ

Величина	Номер гармоніки			
	$\nu = 5$	$\nu = 7$	$\nu = 11$	$\nu = 13$
$x_{\text{БКВ}}(\nu)$	6,350	4,539	2,885	2,449
$U_{\text{ш}}(\nu)$	-113,991	-114,992	-873,195	229,008

Коеф. несинусоїдальності на шинах напругою 10 кВ:

$$k_{\text{U.В}} = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=5}^{13} U_{\text{ш}}(\nu)^2}}{U_{\text{H}}} \cdot 100 =$$

$$= \frac{\sqrt{(-114,0)^2 + (-115,0)^2 + (-873,2)^2 + 229,0^2}}{10 \cdot 10^3} \cdot 100 = 9,17 \% > 5\%$$

Як видно, в максимальному режимі коеф. Несинусоїдальності перевищує допустиме значення.

Окрім цього спостерігається струмове перевантаження БСК напругою 10 кВ:

$$k_{\text{п.БКВ}} = 1,42 > 1,3$$

Для виправлення даної ситуації необхідно застосувати ФКП. Результати розрахунку параметрів ФКП наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Розрахунок параметрів ФКП

№ з/п	Формула для розрахунку	Номер гармоніки			
		5	7	11	13
1.	U_{κ}	6600	6600	6600	6600
2.	$Q_o = \sqrt{3} \cdot 1.3 U_{\kappa} I_{BK\epsilon}(\nu)$	1088,71	1088,71	653,21	466,61
3.	$Q_o \geq S_{\kappa} k_{pv}$	900,00	900,00	500,00	500,00
4.	Q_{π}	1350,00	1350,00	750,00	600,00
5.	$k_p = \frac{Q_{\pi}}{S_{\kappa}}$	0,0067	0,0067	0,0039	0,0030
6.	$a_p = \frac{\nu^2}{\nu^2 - 1}$	1,041	1,022	1,011	1,011
7.	$k_u = \frac{U_{\text{ш}}}{\sqrt{3} U_{\text{н.бк}}}$	0,871	0,871	0,871	0,871
8.	$a_p k_u \leq 1$	0,911	0,891	0,882	0,8801
9.	$n_v = \frac{a}{k_1 k_p \nu^2}$	-0,120	-0,062	-0,111	-0,099
10.	$k_{1v} = \frac{1}{1 + \nu}$	1,050	1,031	1,041	1,045
11.	$Q_{\pi}' = \frac{3 U_{\text{н.бк}} I_{\nu} k_{1v}}{1,6 - (a_p k_u)^2}$	1301,91	1226,91	725,81	517,96
12.	$Q_{\text{внд}} = Q_{\pi} a_p k_u$	1229,51	1204,71	660,75	527,56
13.	Q_{Σ}	3622,51			
14.	$x_{cv} = \frac{U_{\text{н.бк}}^2 \cdot 10^3}{Q_{\pi}}$	96,81	96,81	174,22	217,81
15.	$x_p = \frac{x_{cv}}{\nu^2}$	3,871	1,982	1,441	1,292
16.	X_p	3,852	1,951	1,452	1,301
17.	$I_p \geq \frac{Q_{\pi}}{\sqrt{3} U_{\text{ш}}}$	77,952	77,951	43,302	34,641
18.	$I_{\text{н.р.}}$	630,1	630,1	630,1	630,1
24.	$U_{\text{спв}} = n_v U_v$	0,0141	0,0072	0,0961	0,0232

До встановлення приймаємо такі реактори і БСК:

- ФКП 5 гармоніки: РБ-10-630-3,85, УКЛ57-6,6-1350;
- ФКП 7 гармоніки: РБ-10-630-1,95, УКЛ57-6,6-750;

- ФКП 11 гармоніки: РБ-10-630-1,45, УКЛ57-6,6-750;
- ФКП 13 гармоніки РБ-10-630-1,30, УКЛ57-6,6-600;

Коефіцієнт несинусоїдальності після встановлення ФКП:

$$k_U = \sqrt{\sum_{v=5}^{13} U_{\text{ш}}(v)^2} = \sqrt{0,014^2 + 0,007^2 + 0,096^2 + 0,023^2} = 0,1 \%$$

Як видно, встановлення ФКП дозволило знизити значення коефіцієнту несинусоїдальності до нормально допустимого рівня.

2.2 Комп'ютерне моделювання режимів СЕПП з джерелами вищих гармонік та ФКП

Комплексне дослідження характеристик електричної мережі, що містить генератори вищих гармонік та компенсаційне обладнання, здійснювалося за допомогою віртуального моделювання у середовищі MATLAB/Simulink. Цей потужний програмний комплекс було обрано завдяки його широким можливостям у сфері імітаційного моделювання електротехнічних систем.

Варто зазначити, що MATLAB/Simulink забезпечує:

- високоточний розрахунок гармонічного складу струмів та напруг
- можливість аналізу перехідних процесів у часовій області
- візуалізацію результатів у вигляді осцилограм та спектрограм
- моделювання як усталених, так і динамічних режимів роботи.

Дане програмне забезпечення дозволяє створювати детальні моделі силових перетворювачів, активних та пасивних фільтрів, а також враховувати параметри реальних елементів електромережі, включаючи їх нелінійні характеристики та взаємний вплив.

Результати моделювання наведено нижче

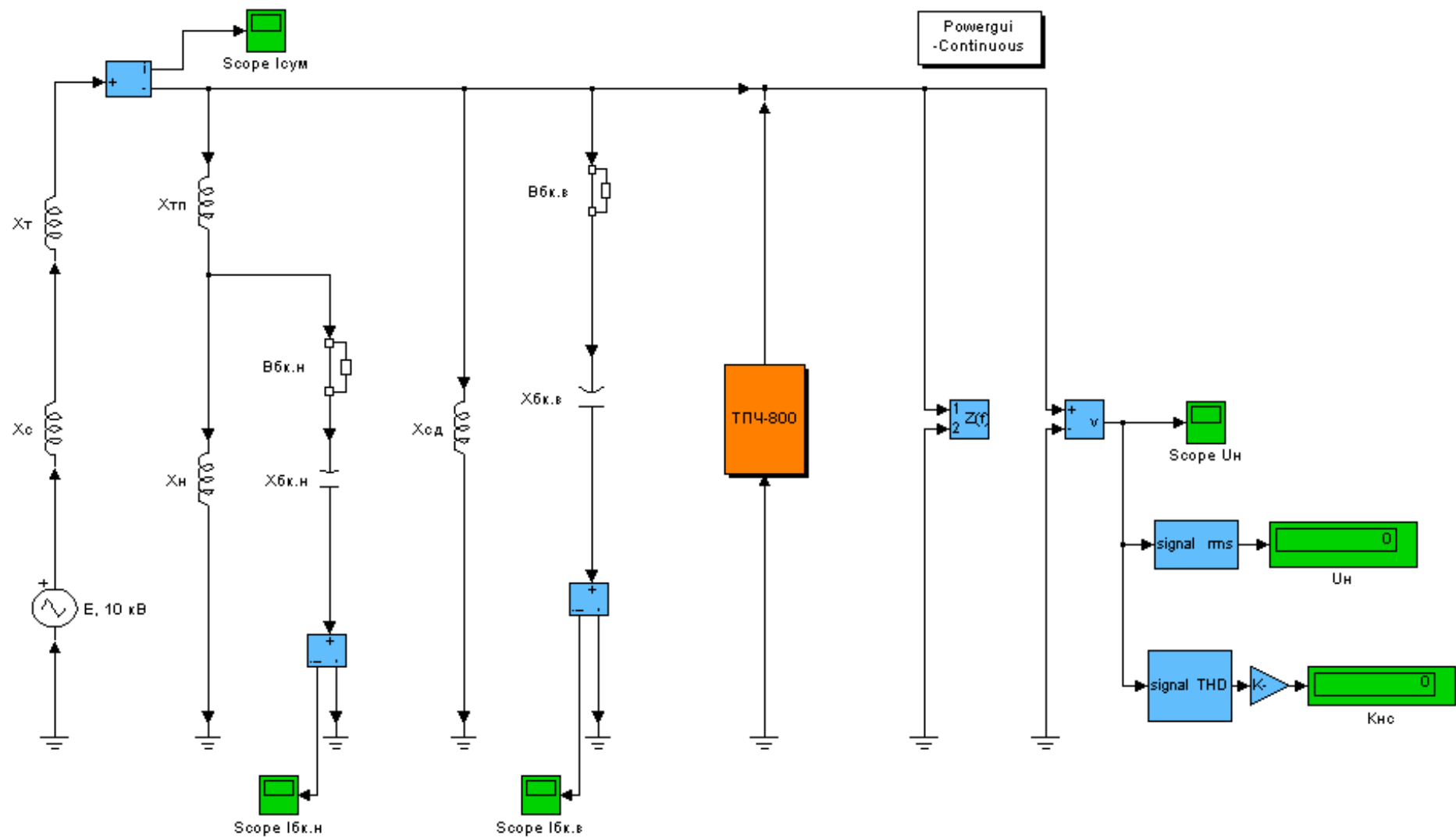


Рис. 2.5. Комп' ютерна модель системи електропостачання (без ФКП)

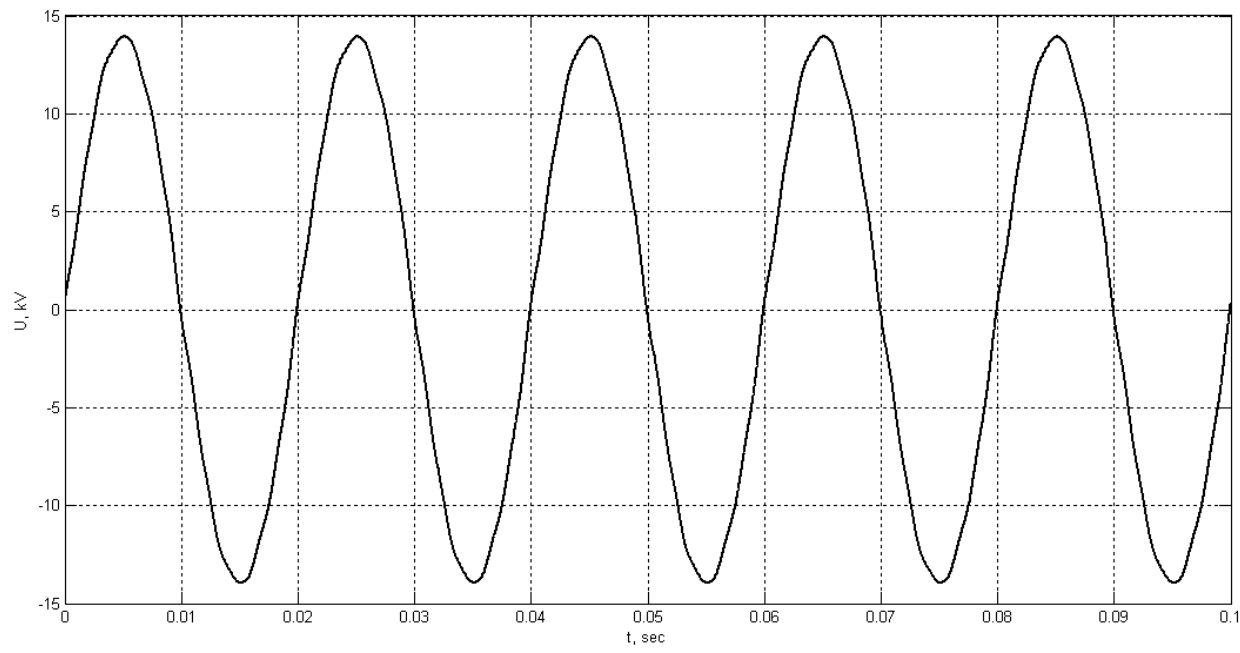


Рис 2.6. Графік напруги (шини 10 кВ) (без ФКП, мін. режим)

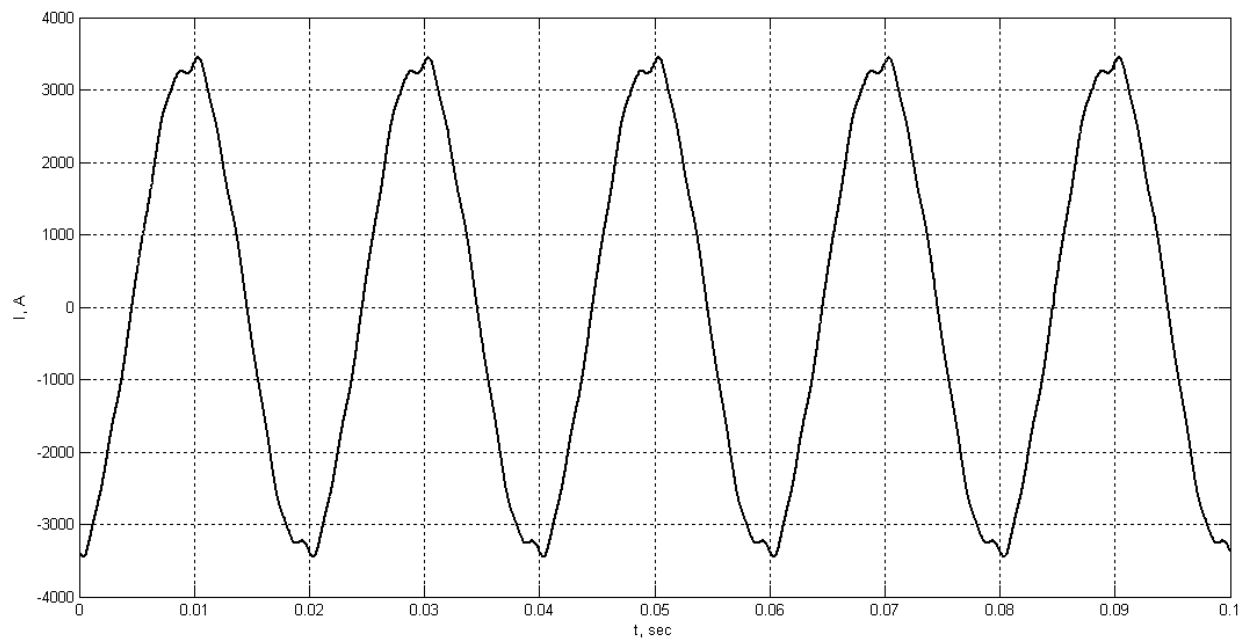


Рис 2.7. Графік сумарного струму (без ФКП, мін. режим)

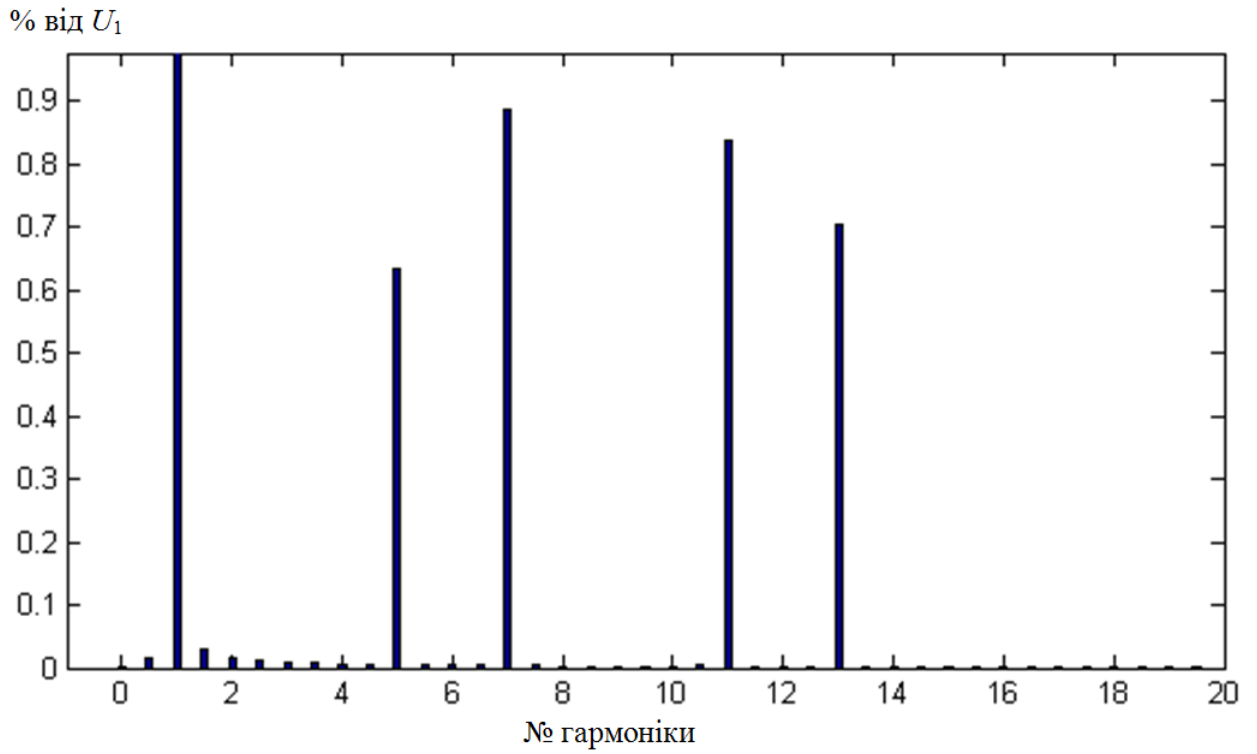


Рис. 2.8. Спектральний аналіз напруги
(без ФКП, мін. режим)

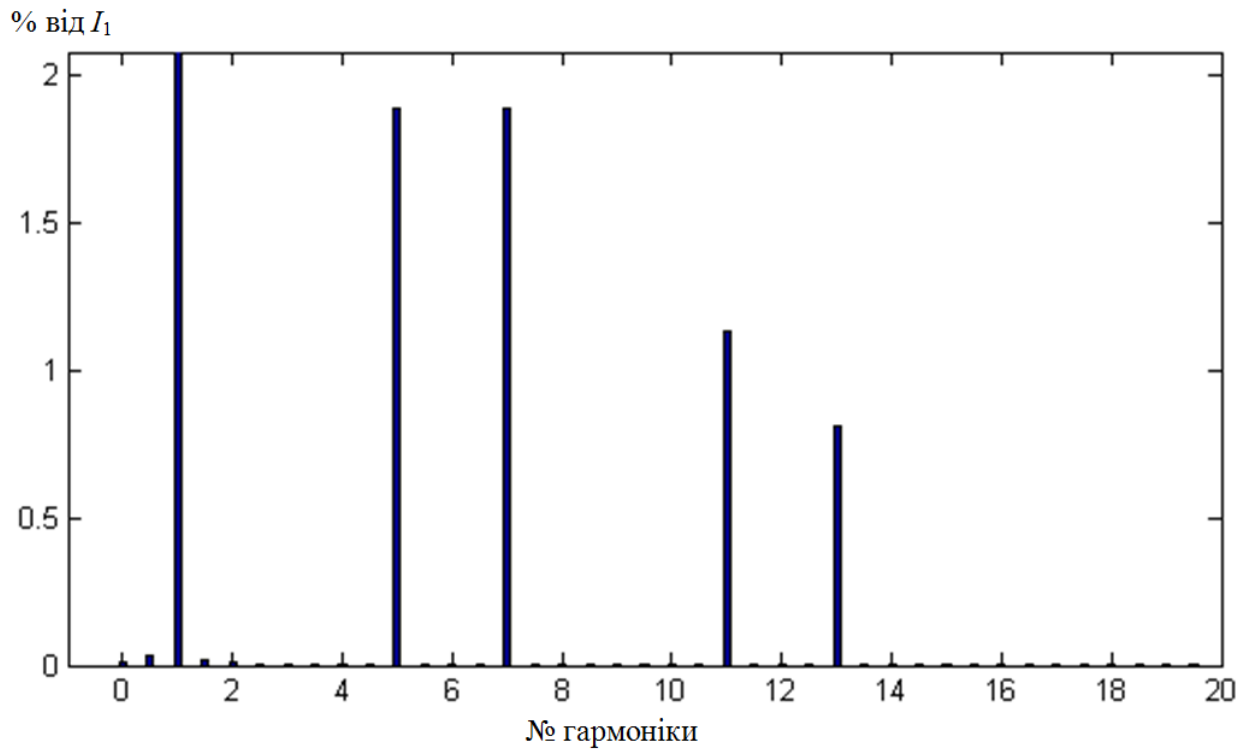


Рис. 2.9. Спектральний аналіз струму
(без ФКП, мін. режим)

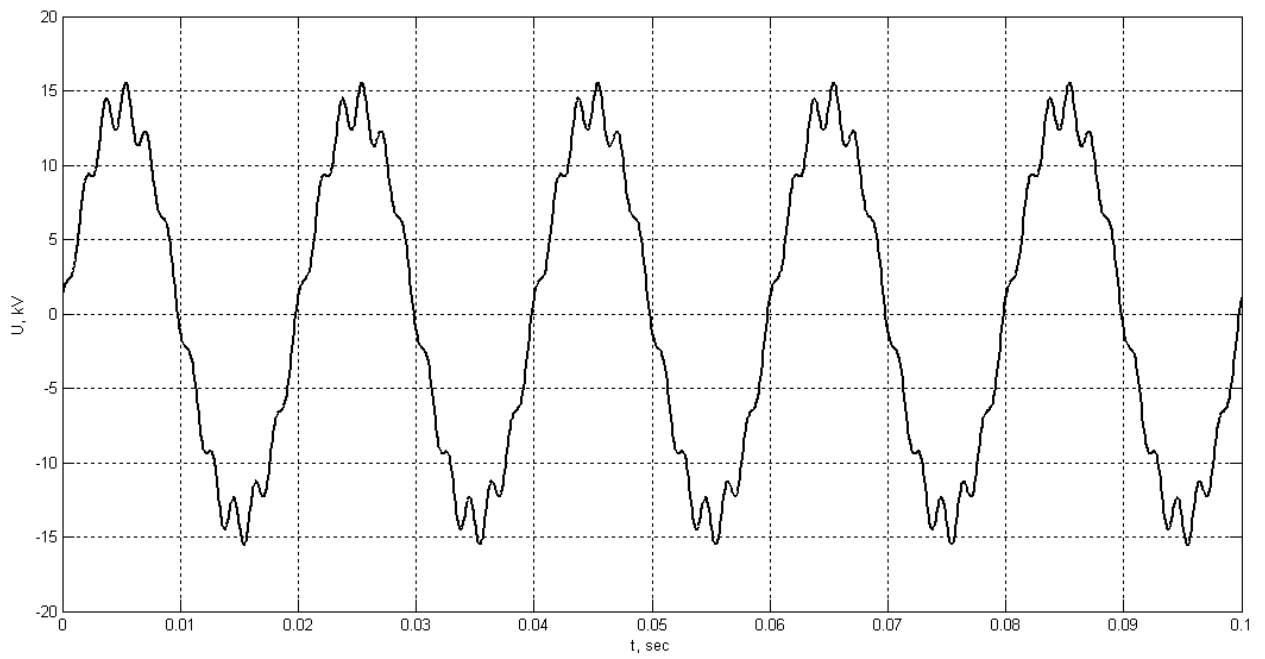


Рис 2.10. Графік напруги (шини 10 кВ) (без ФКП, макс. режим)

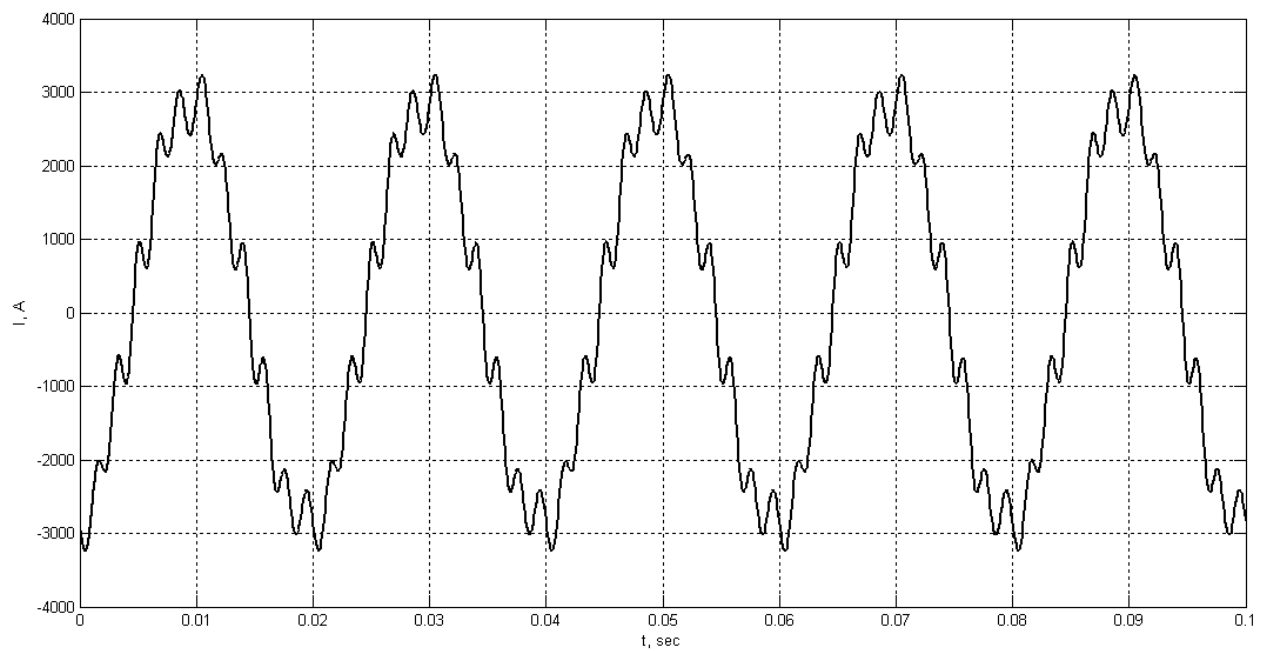


Рис 2.11. Графік загального струму (без ФКП, макс. режим)

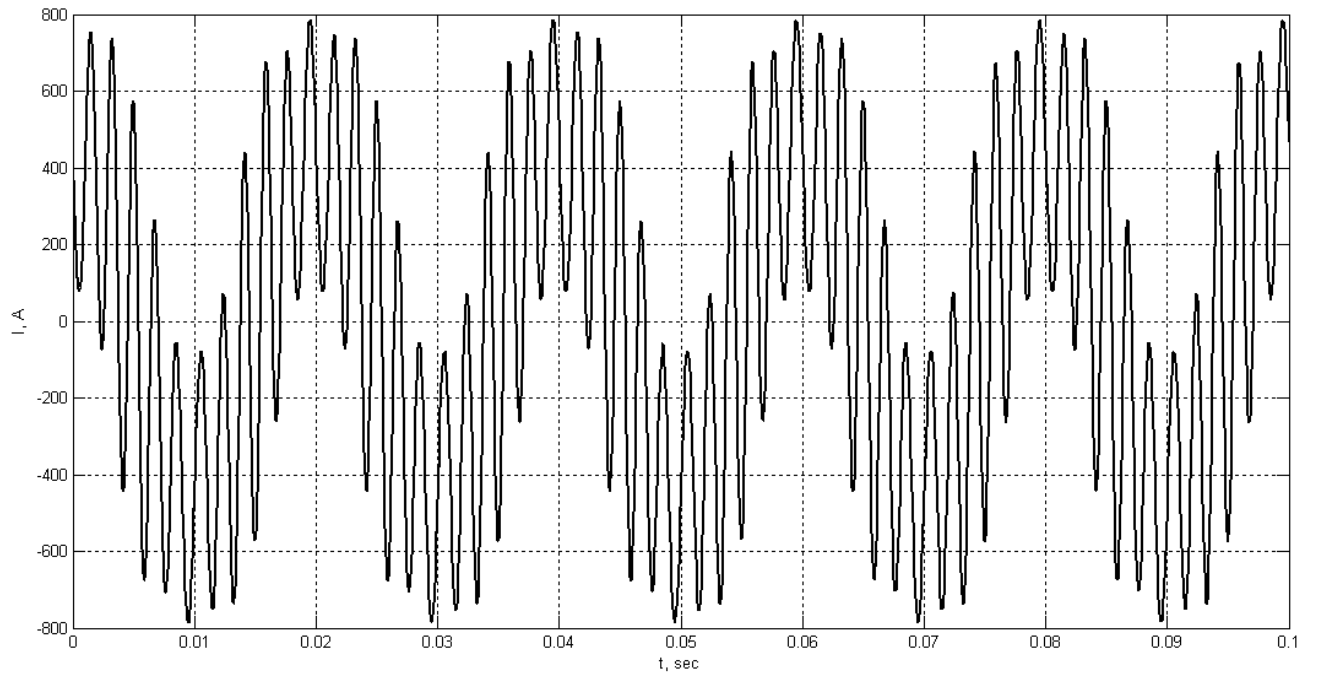


Рис 2.12. Графік струму батареї конденсаторів 10 кВ (без ФКП, макс. режим)

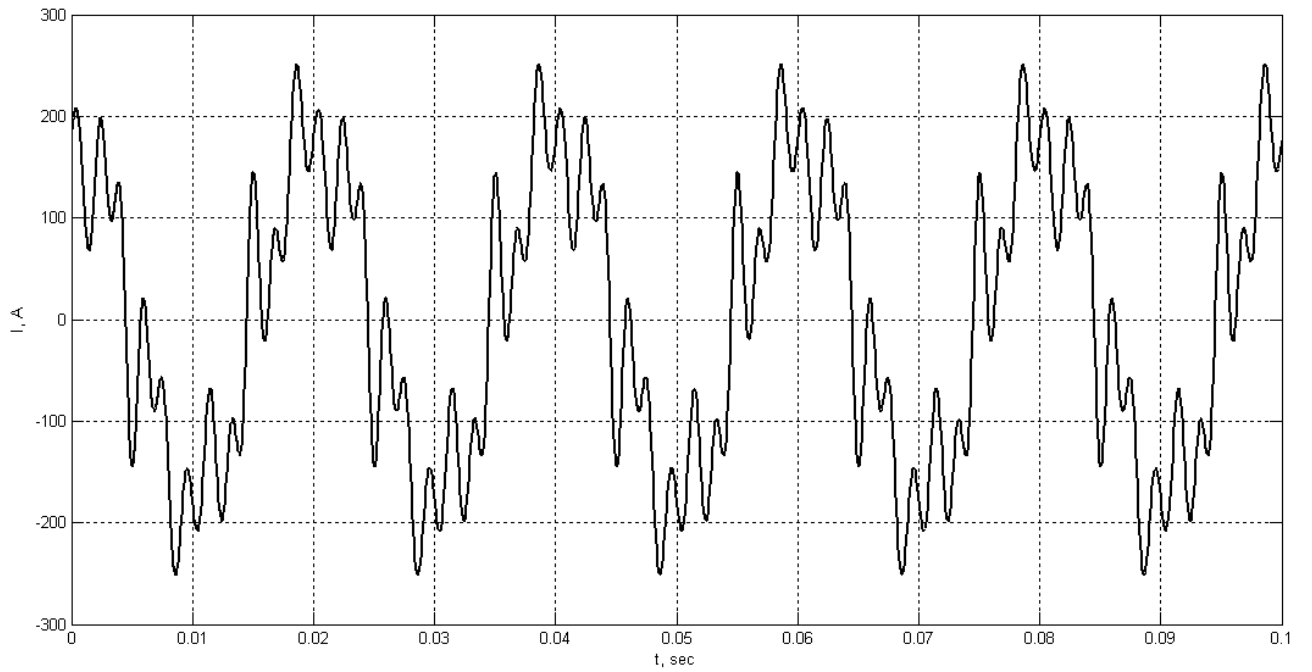


Рис 2.13. Графік струму батареї конденсаторів 0,4 кВ (без ФКП, макс. режим)

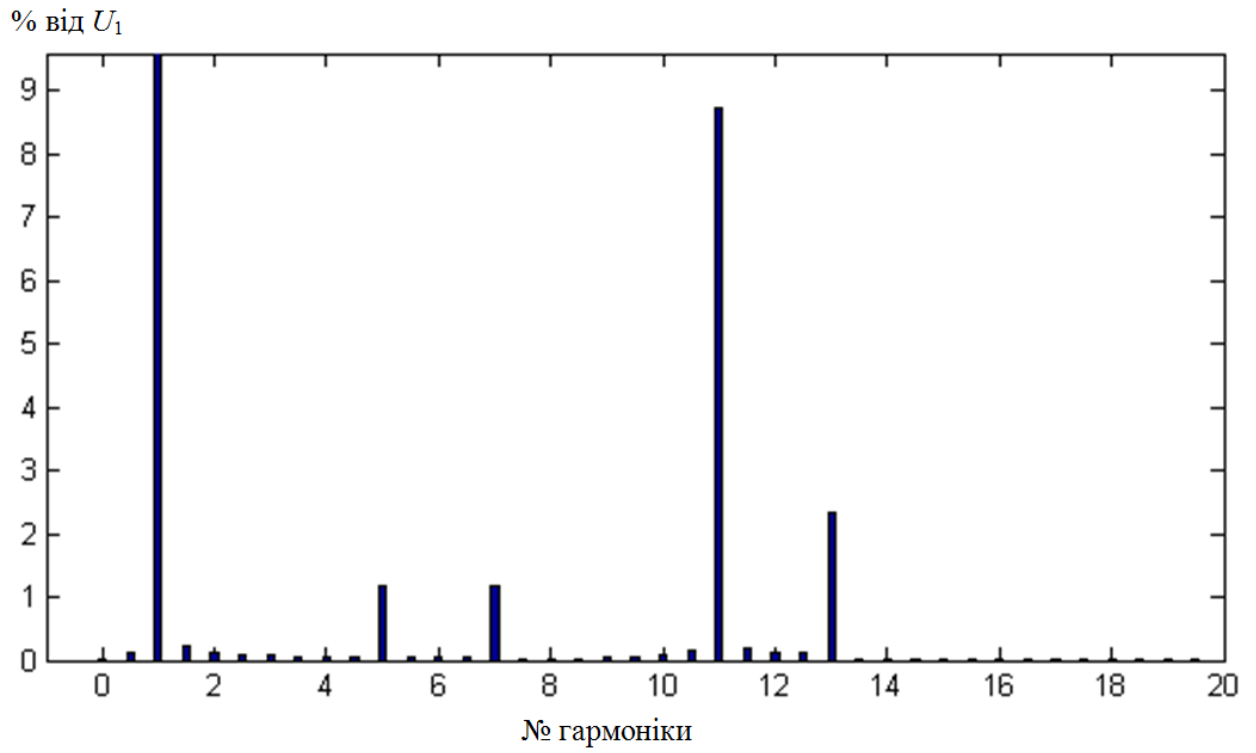


Рис. 2.14. Спектральний аналіз напруги
(без ФКП, макс. режим)

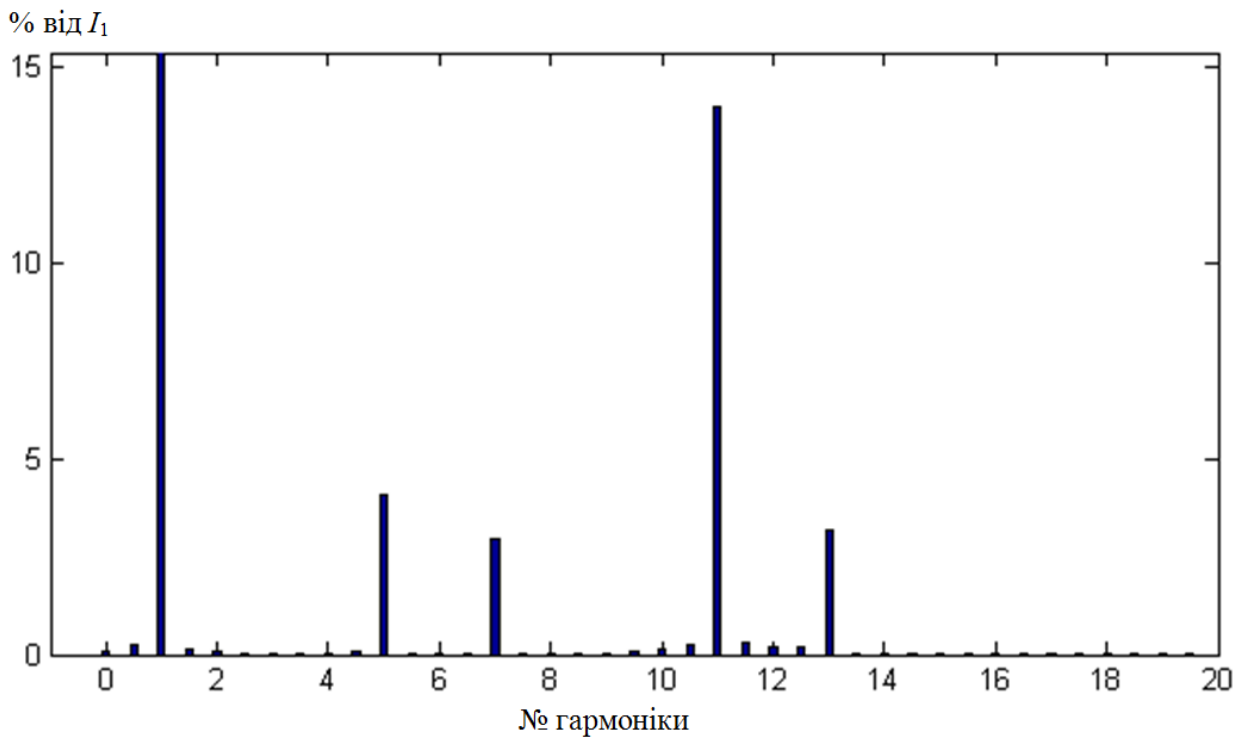


Рис. 2.15. . Спектральний аналіз струму
(без ФКП, макс. режим)

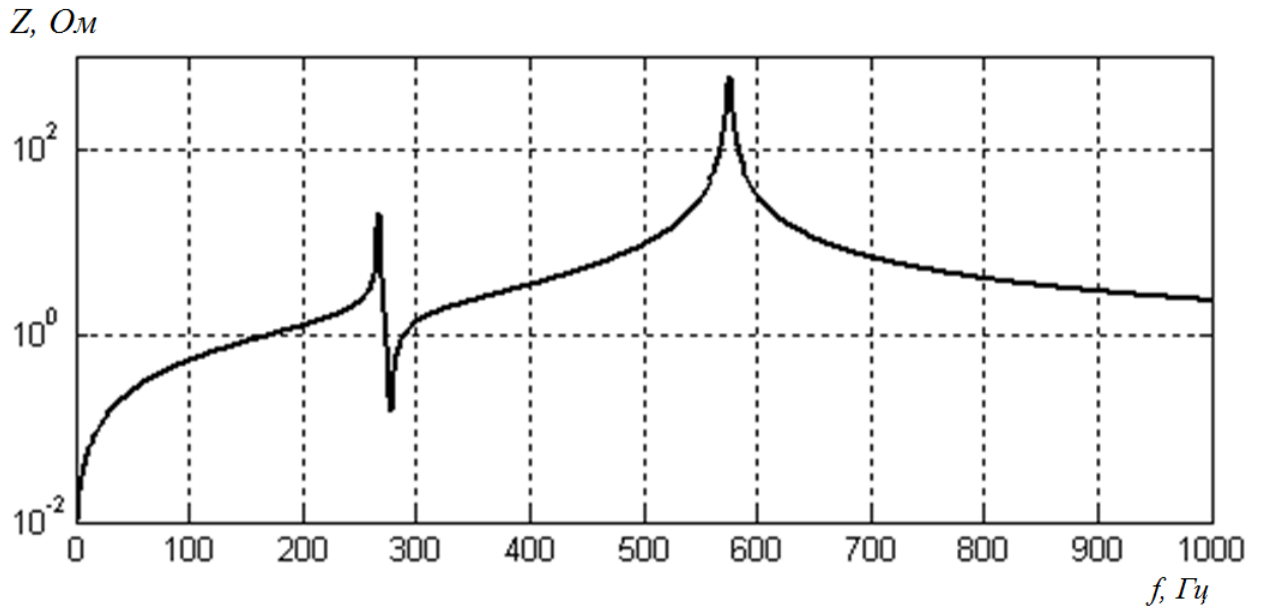


Рис. 2.16. Амплітудно-частотна характеристика опору системи електропостачання (без ФКП, макс. режим)

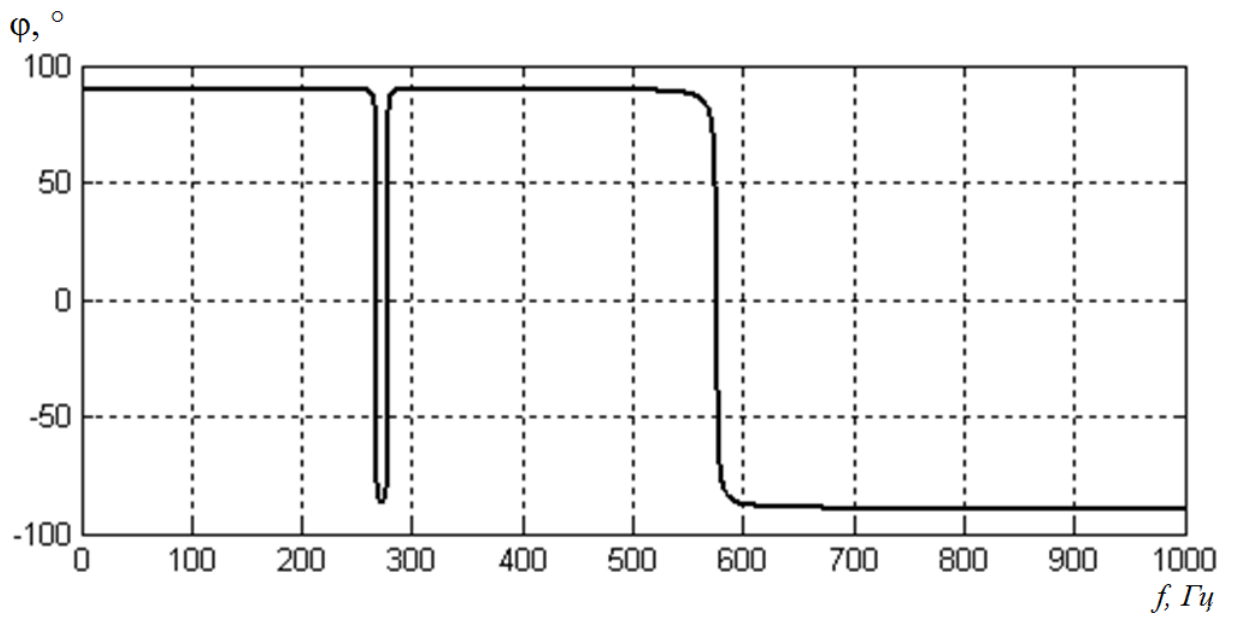


Рис. 2.17. Фазо-частотна характеристика опору системи електропостачання (без ФКП, макс. режим)

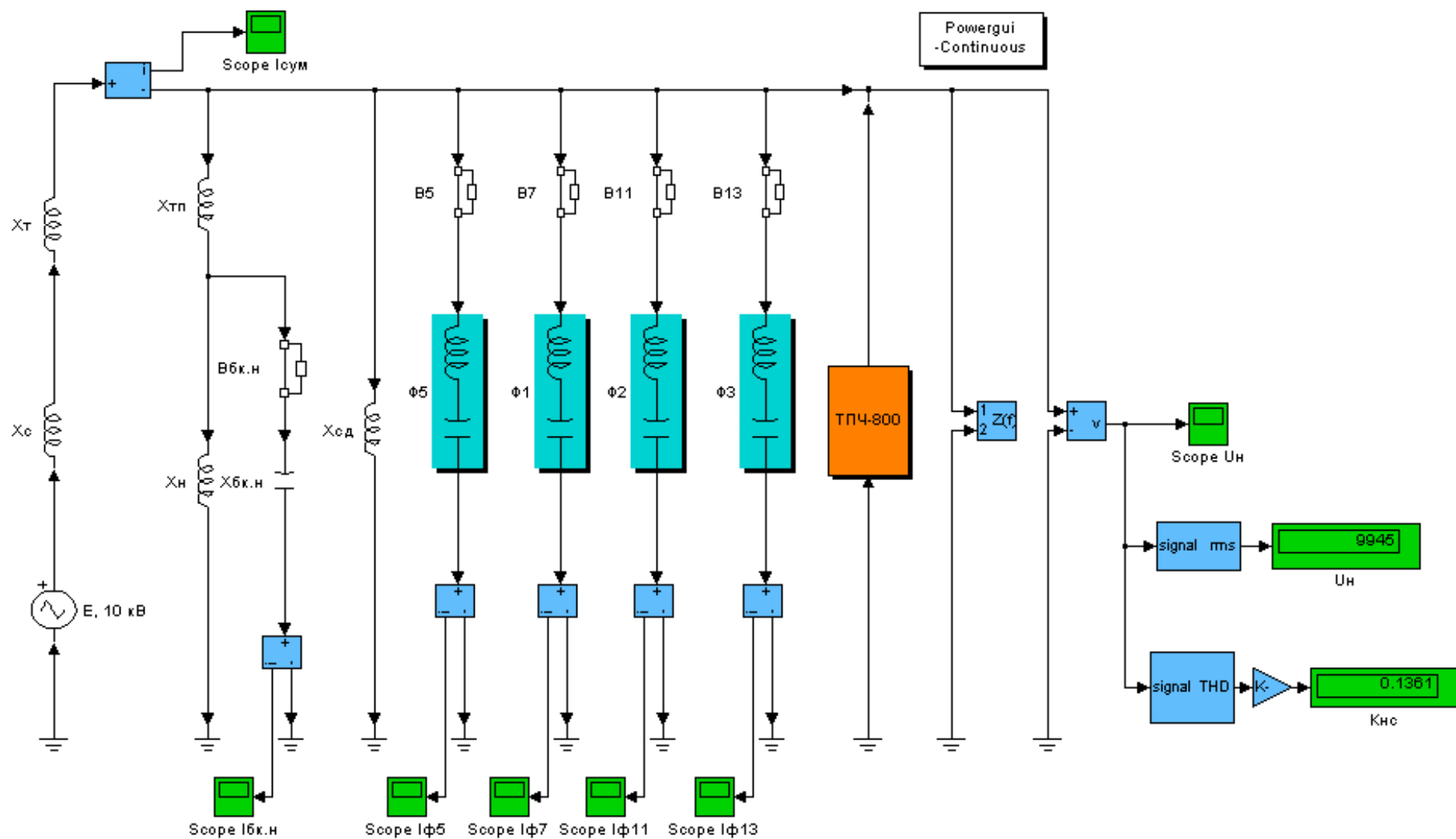


Рис. 2.18. Комп’ ютерна модель системи електропостачання (з ФКП)

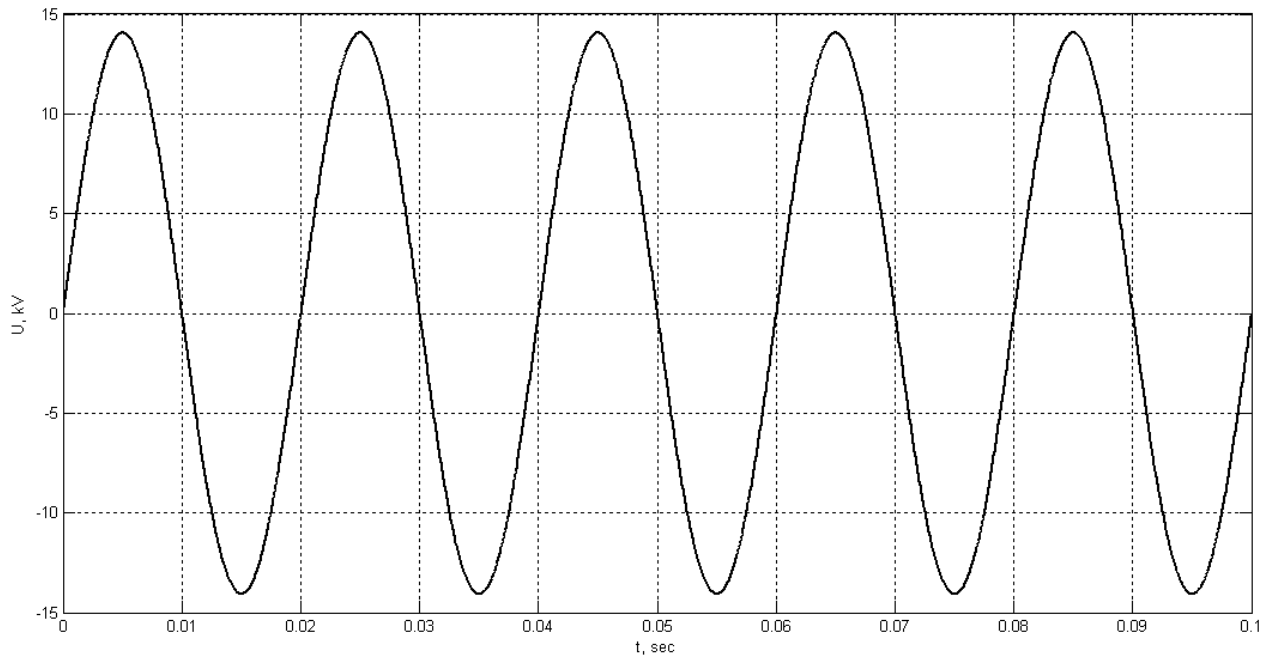


Рис. 2.19. Графік напруги (шини 10 кВ) (за наявності ФКП)

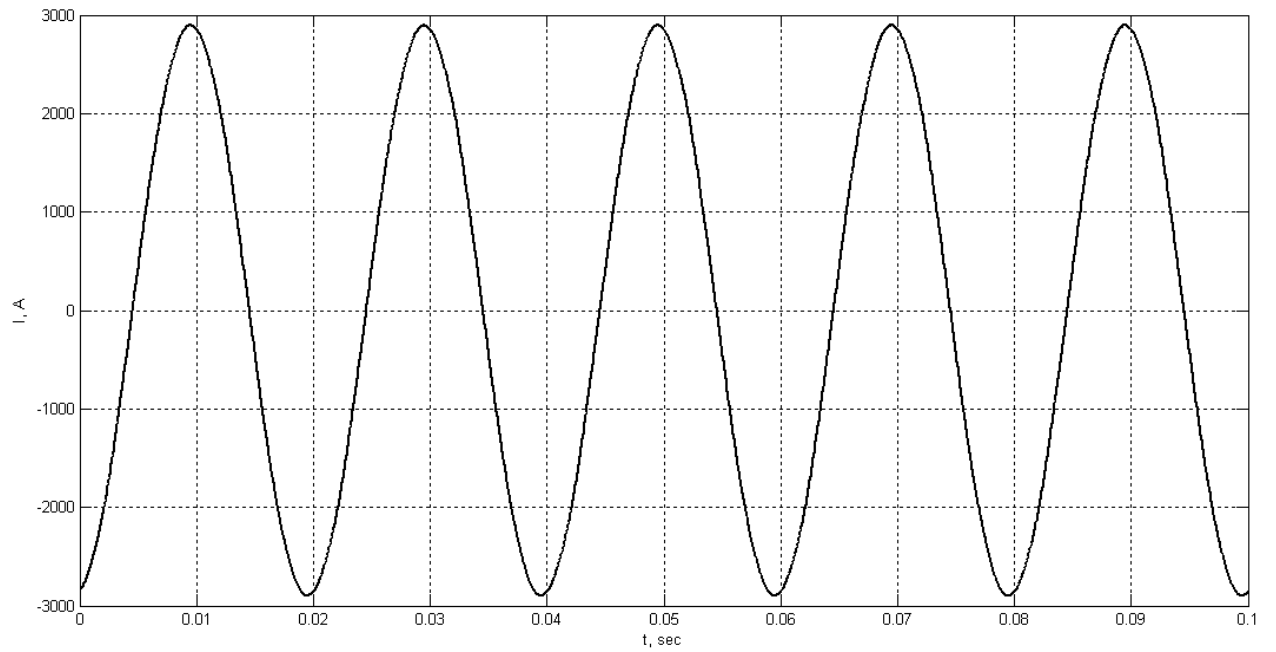


Рис. 2.20. Графік сумарного струму (за наявності ФКП)

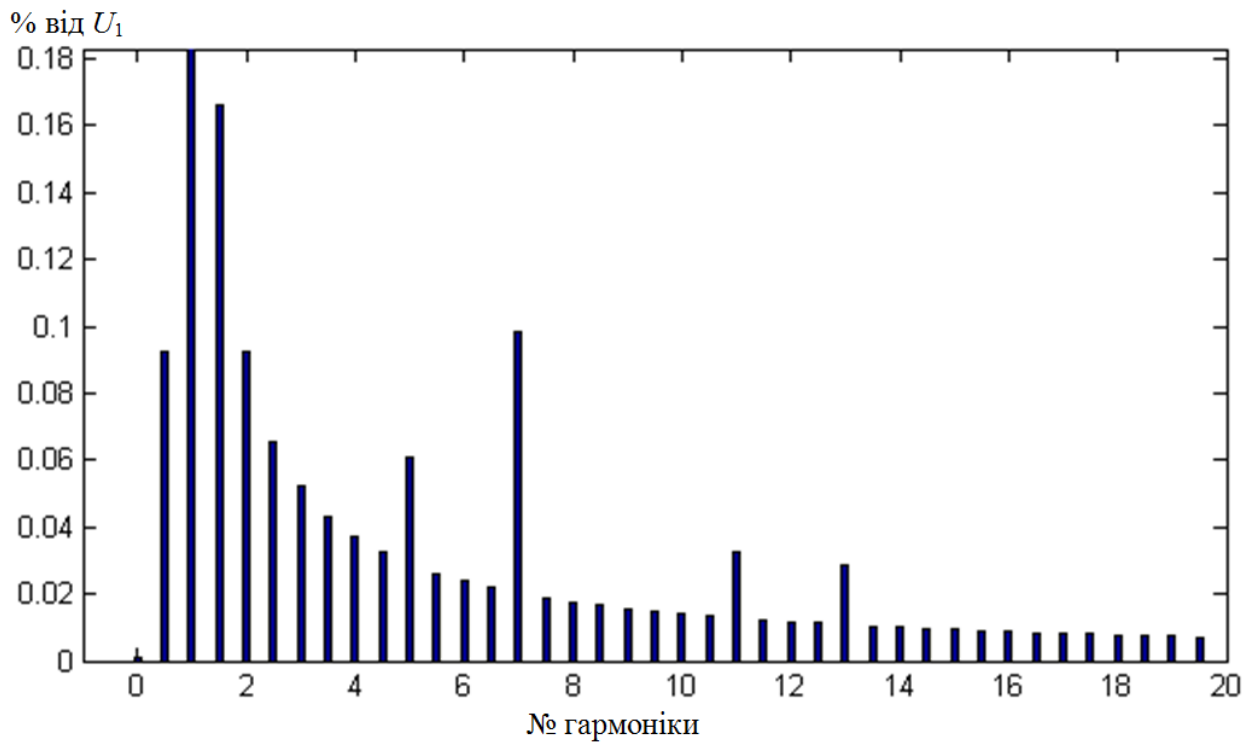


Рис. 2.21. Спектральний аналіз напруги (за наявності ФКП)

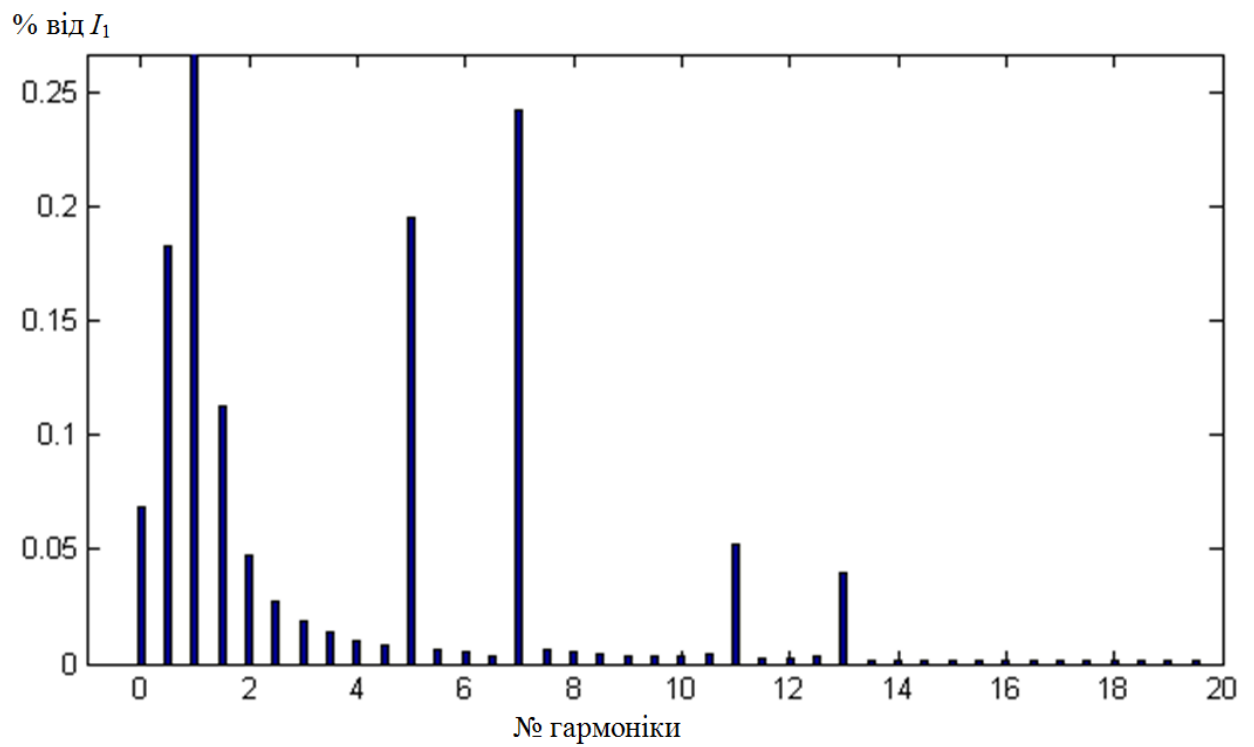


Рис. 2.22. Спектральний аналіз струму (за наявності ФКП)

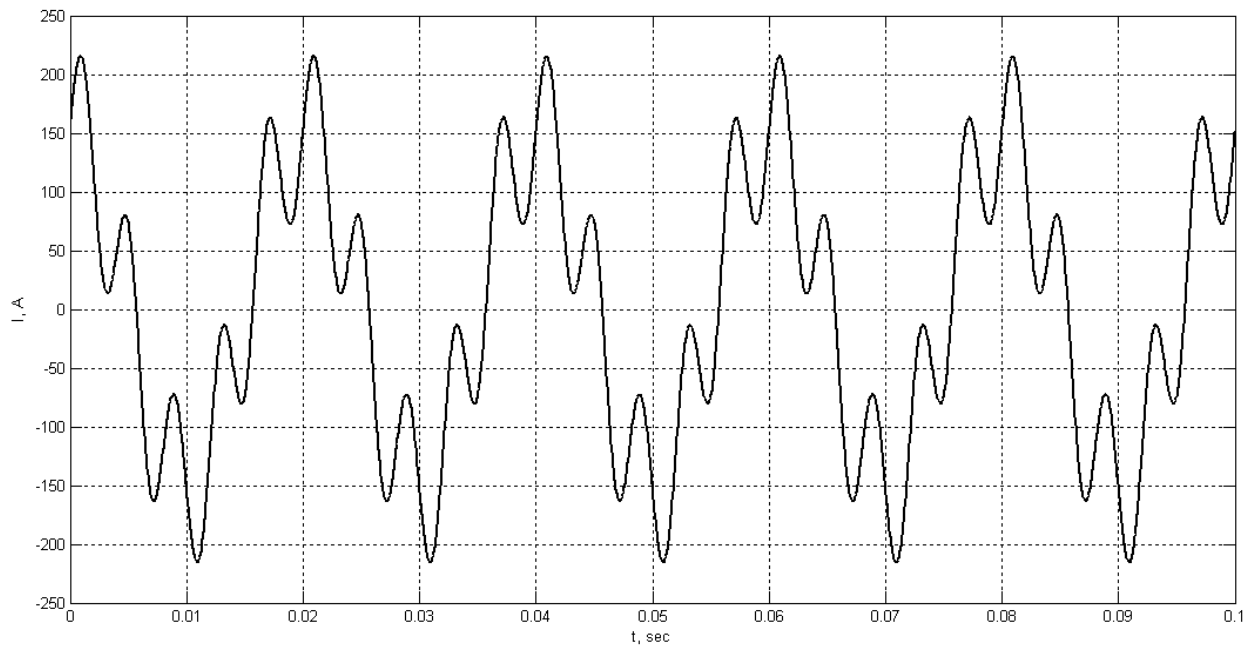


Рис. 2.23. Графік струму фільтру п'ятої гармоніки

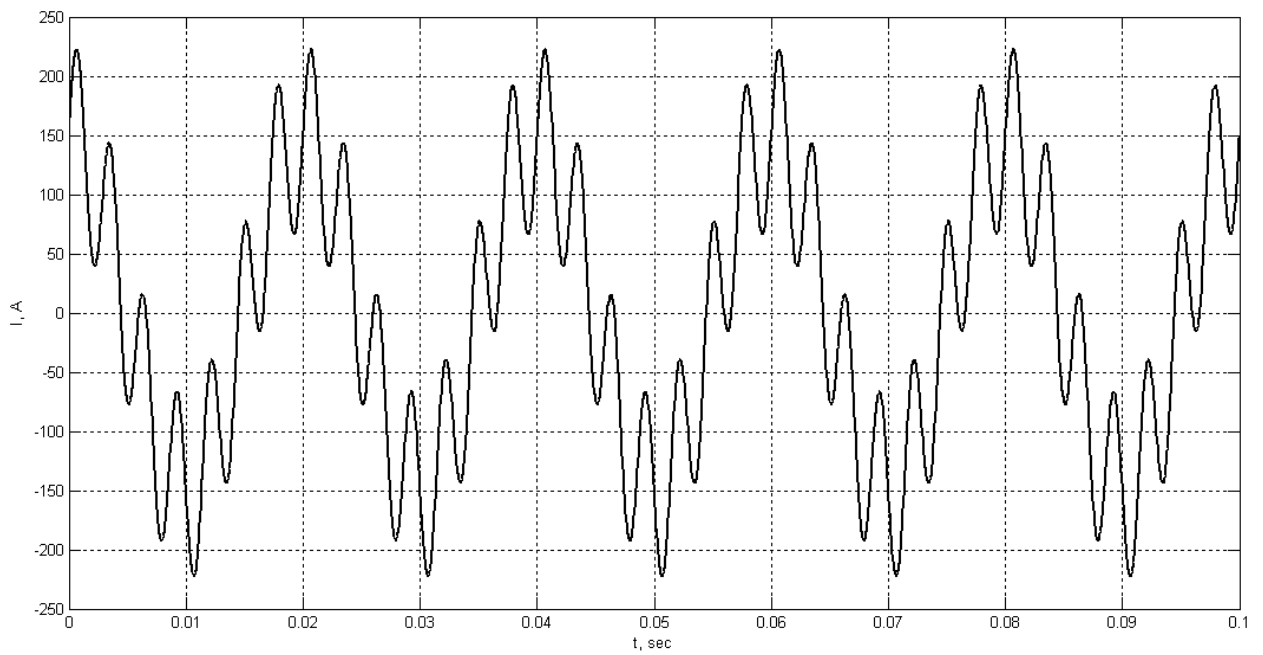


Рис. 2.24. Графік струму фільтру сьомої гармоніки

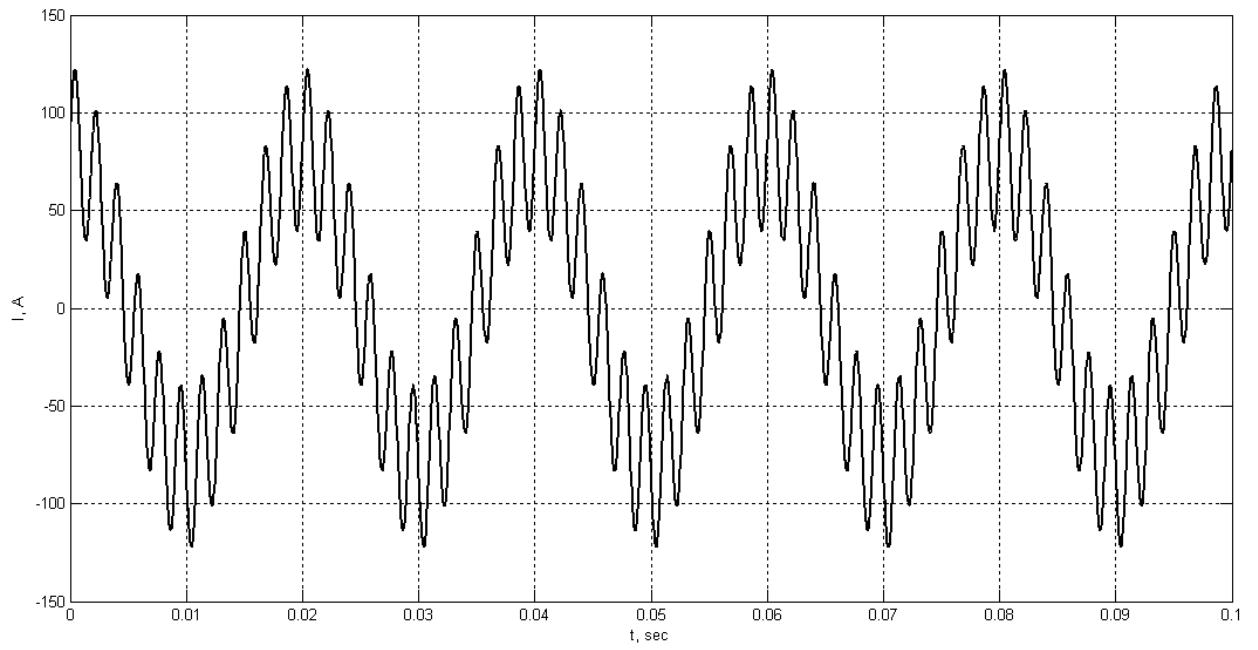


Рис. 2.25. Графік струму фільтру одинадцятої гармоніки

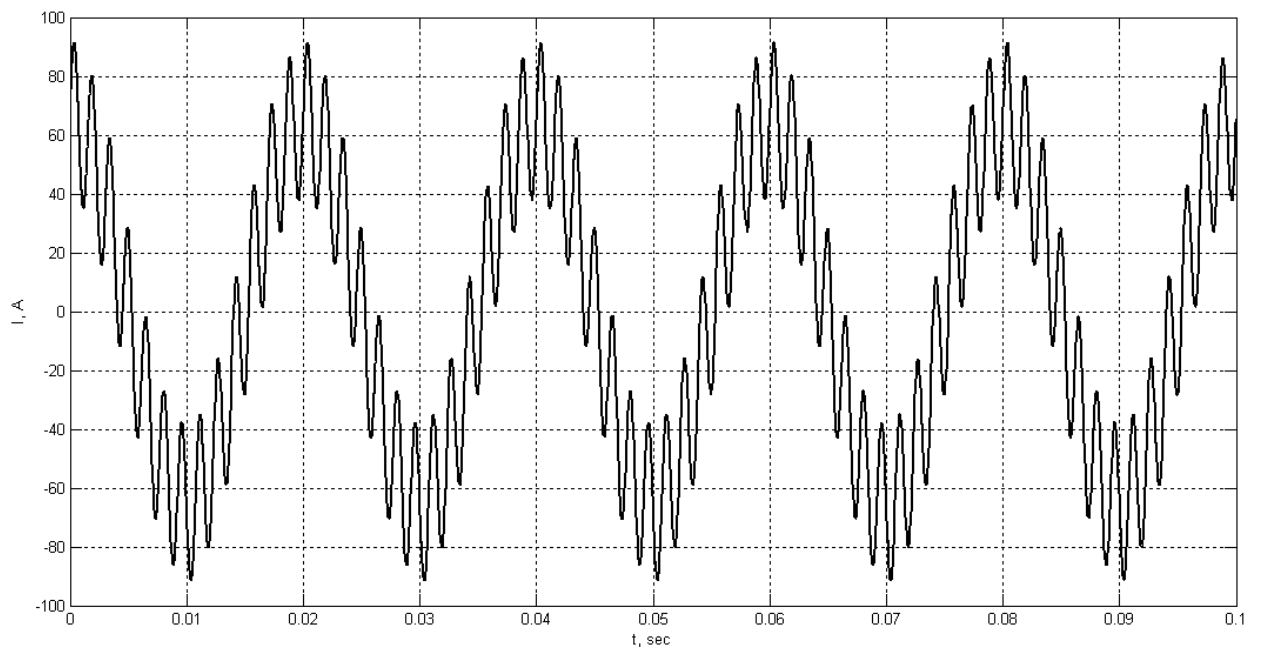


Рис. 2.26. Графік струму фільтру тринадцятої гармоніки

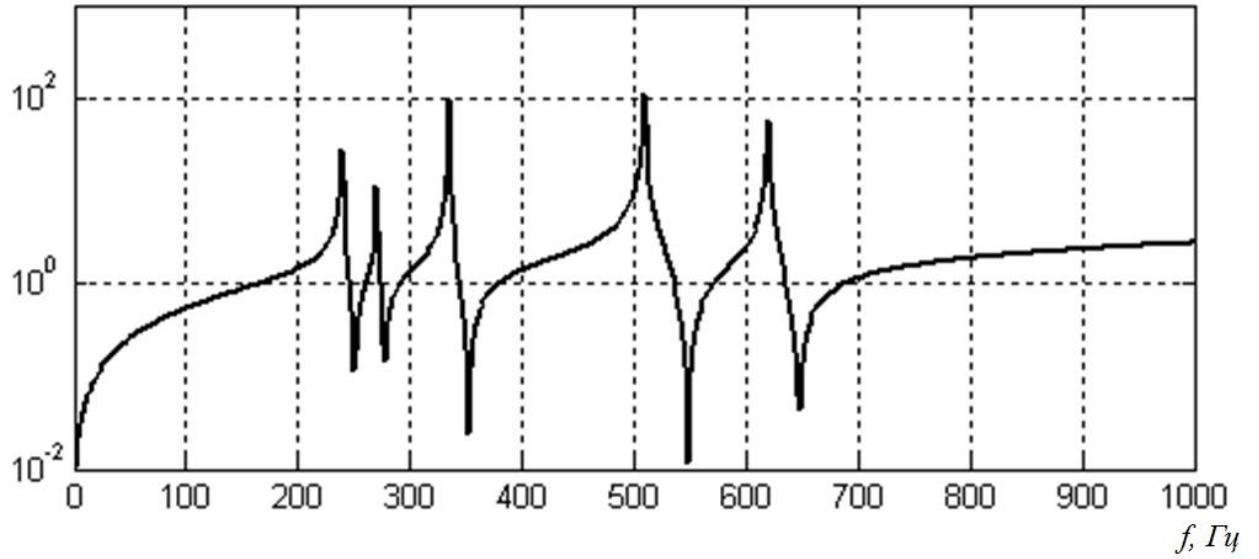
$Z, \text{ Ом}$


Рис. 2.27. Амплітудно-частотна характеристика опору системи електропостачання (з ФКП)

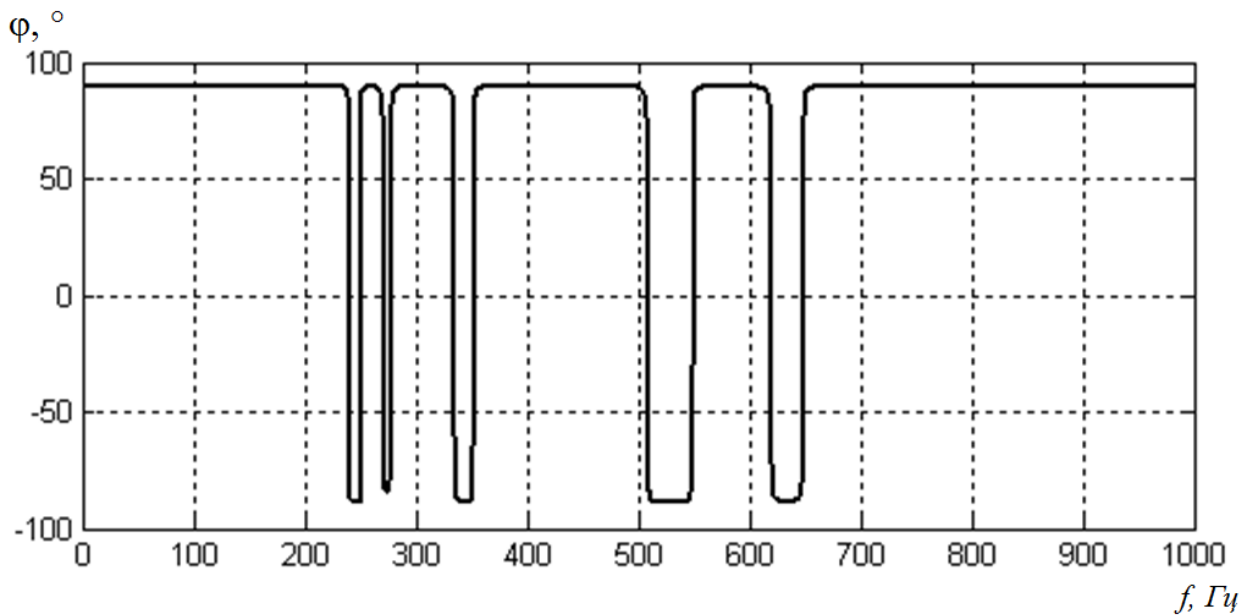


Рис. 2.28. Фазо-частотна характеристика опору системи електропостачання (з ФКП)

Результати моделювання (табл. 2.5) з високою точністю співпали з розрахунками, що були здійснені в п. 2.1. збіглися з розрахунками, проведеними в п. 2.1. роботи (табл. 2.5).

Таблиця 2.5. Порівняння результатів комп'ютерного моделювання та розрахунку

<i>Параметр</i>	<i>Комп. моделювання</i>		<i>Розрахункові дані</i>	
	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
$k_U, \%$	1,88	9,20	1,50	9,17
$k_{пВ}$	-	1,61	-	1,52
$k_{пН}$	-	1,17	-	1,12

Дані, наведені в табл. 2.5 свідчать про адекватність створеної комп'ютерної моделі, і про достовірність результатів моделювання.

2.3 Централізована компенсація несинусоїдальності напруги

Застосування фільтро-компенсуючого обладнання біля точок підключення нелінійних споживачів стало поширеним методом боротьби з гармонічними спотвореннями. Проте для складних електричних мереж, що характеризуються наявністю множинних джерел гармонічних складових, таке технічне рішення часто демонструє недостатню економічну ефективність.

Це пояснюється кількома факторами:

- необхідністю встановлення окремих фільтрів для кожного потужного нелінійного навантаження
- значними капітальними витратами на придбання та монтаж обладнання

- додатковими експлуатаційними витратами на технічне обслуговування
- можливістю виникнення резонансних явищ при взаємодії кількох фільтрів
- складністю оптимального налаштування параметрів фільтрів у динамічних режимах роботи

Альтернативним підходом може бути централізована фільтрація на підстанціях живлення або застосування активних фільтро-компенсуючих пристроїв з адаптивними алгоритмами керування. Такі рішення дозволяють оптимізувати витрати та підвищити ефективність придушення гармонічних складових у розгалужених системах електропостачання.

Важливо також враховувати, що вибір оптимальної стратегії фільтрації повинен базуватися на комплексному техніко-економічному аналізі, який враховує специфіку конкретної електричної мережі, характер навантажень та вимоги до якості електроенергії.

Впровадження централізованого підходу до корекції гармонічних спотворень у системах електропостачання промислових підприємств (СЕПП) часто демонструє вищу техніко-економічну ефективність. Основний принцип такої стратегії базується на стратегічному розташуванні фільтро-компенсуючих пристроїв (ФКП) у ключових вузлах електричної мережі, що забезпечує комплексне покращення якості напруги по всій системі.

Переваги централізованого підходу включають: зменшення загальної встановленої потужності фільтруючого обладнання; оптимізацію капітальних витрат на реалізацію системи фільтрації; можливість гнучкого керування режимами фільтрації; зниження ризиків виникнення небажаних резонансних явищ.

Розглянемо розв'язання задачі централізованої корекції вищих гармонік для СЕП, схема якої наведена на рис. 2.29.

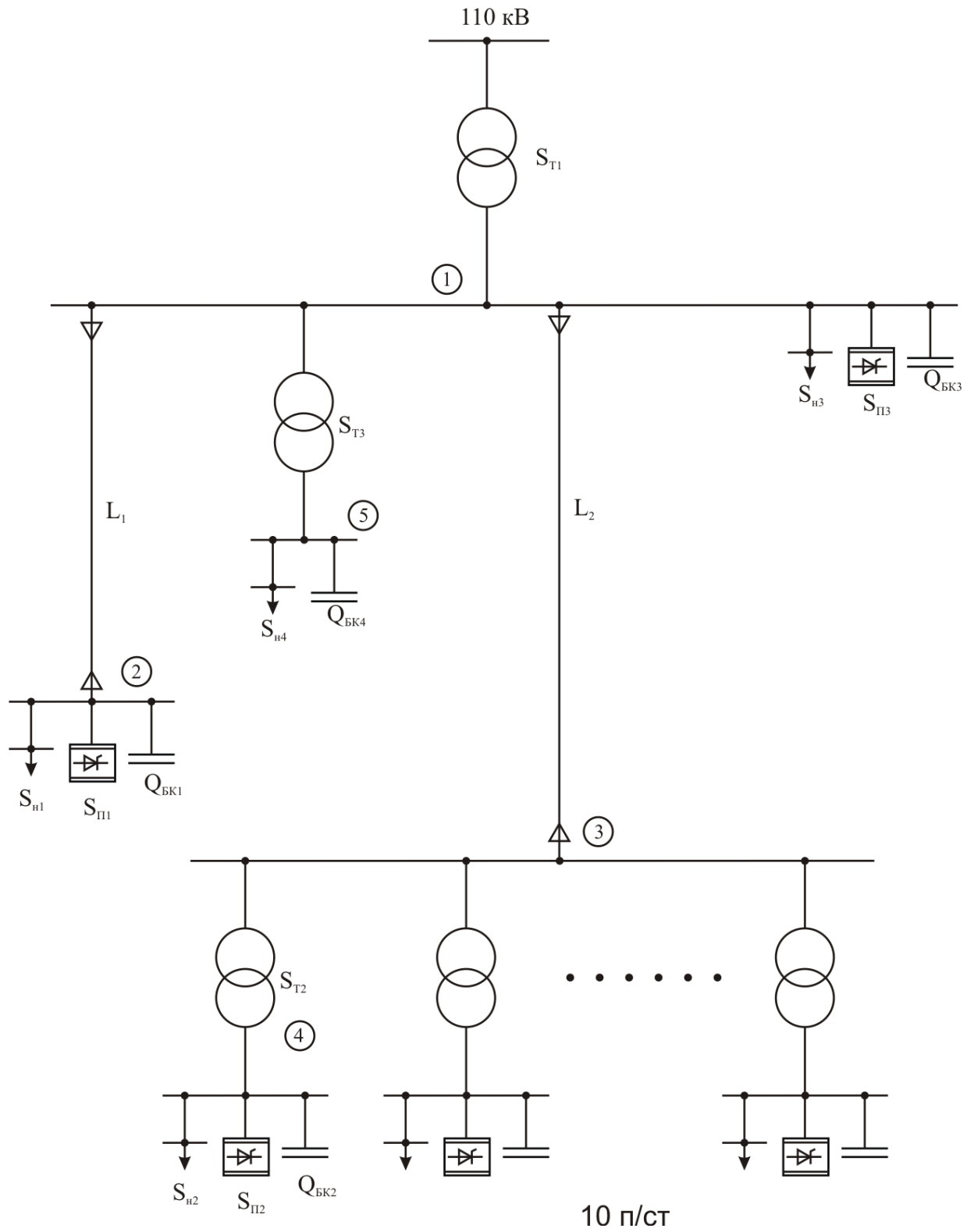


Рис. 2.29. Схема системи електропостачання для здійснення розрахунку централізованої корекції вищих гармонік

На рис. 2.30 наведена схема заміщення мережі.

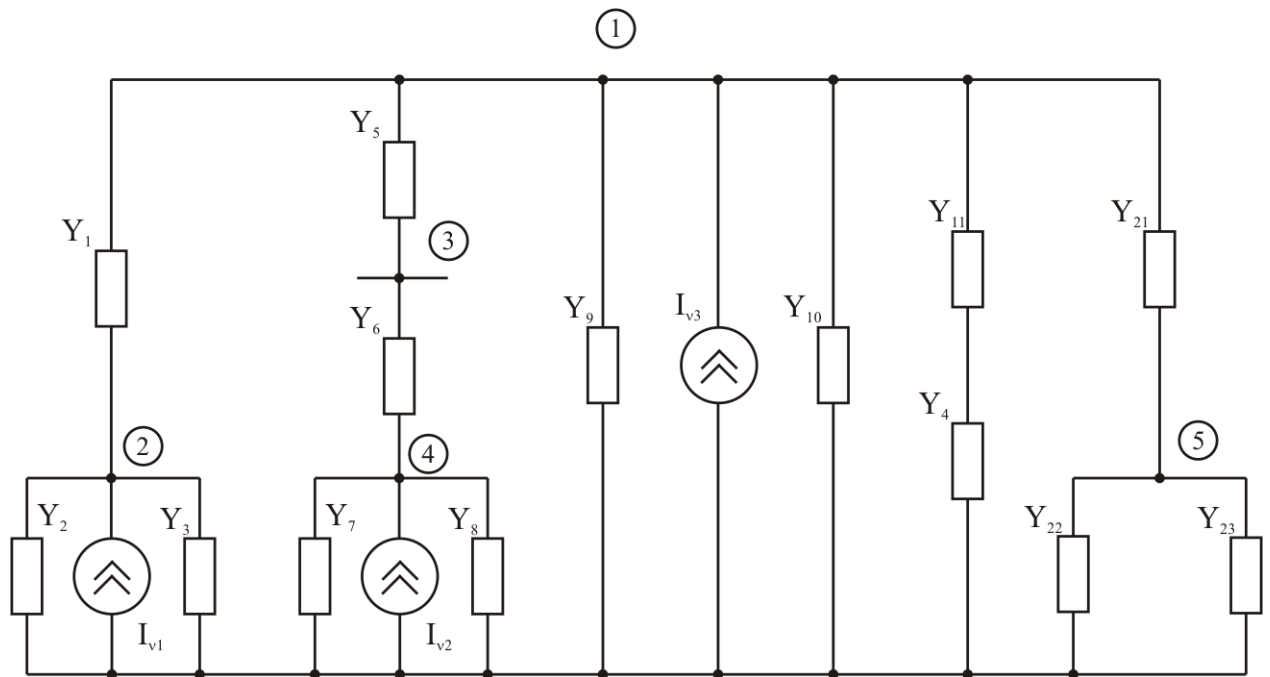


Рис. 2.30. Схема заміщення мережі

Прийmemo $S_{\delta} = 100 \text{ MVA}$ та проведемо визначення параметрів схеми заміщення.

Провідність системи:

$$\underline{Y}_4(\nu) = \frac{S_k}{jS_{\delta}\nu} = \frac{2000}{j100\nu} = -j\frac{20}{\nu}$$

де

$$\nu = [5 \quad 7 \quad 11 \quad 13 \quad 17 \quad 19 \quad 23 \quad 25]$$

Провідність трансформатора T1:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_6(\nu) &= \frac{1}{\sqrt{\nu} \cdot \frac{\Delta P_{kT1} \cdot S_{\delta}}{S_{номT1}^2} + j \cdot \nu \cdot \frac{u_{k,\%T1} \cdot S_{\delta}}{S_{номT1}}} = \frac{1}{\sqrt{\nu} \frac{250 \cdot 10^5}{63000^2} + j \cdot \nu \cdot \frac{12 \cdot 100 \cdot 10}{63000^2}} = \\ &= \frac{1}{6.3 \cdot 10^{-3} \sqrt{\nu} + j0.191\nu} \end{aligned}$$

Провідність трансформатора Т2:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_6(\nu) &= \frac{n_{T2}}{\sqrt{\nu} \cdot \frac{\Delta P_{KT2} \cdot S_{\delta}}{S_{номT2}^2} + j \cdot \nu \frac{u_{K,\%T2} \cdot S_{\delta}}{S_{номT2}}} = \frac{10}{\sqrt{\nu} \frac{10 \cdot 10^5}{2500^2} + j \cdot \nu \cdot \frac{10 \cdot 100 \cdot 10}{2500^2}} = \\ &= \frac{10}{0.16\sqrt{\nu} + j4\nu} \end{aligned}$$

Провідність трансформатора Т3:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{21}(\nu) &= \frac{1}{\sqrt{\nu} \cdot \frac{\Delta P_{KT2} \cdot S_{\delta}}{S_{номT2}^2} + j \cdot \nu \frac{u_{K,\%T2} \cdot S_{\delta}}{S_{номT2}}} = \frac{1}{\sqrt{\nu} \frac{10 \cdot 10^5}{2500^2} + j \cdot \nu \cdot \frac{10 \cdot 100 \cdot 10}{2500^2}} = \\ &= \frac{1}{0.16\sqrt{\nu} + j4\nu} \end{aligned}$$

Провідність БСК № 1:

$$\underline{Y}_3(\nu) = j \frac{Q_{БК1}}{S_{\delta}} \nu = j \frac{8}{100} \nu = j8 \cdot 10^{-2} \nu$$

Провідність БСК № 2:

$$\underline{Y}_8(\nu) = j \frac{n_{БК2} Q_{БК2}}{S_{\delta}} \nu = j \frac{10 \cdot 1}{100} \nu = j8 \cdot 10^{-2} \nu$$

Провідність БСК № 2:

$$\underline{Y}_{10}(\nu) = j \frac{Q_{БК3}}{S_{\delta}} \nu = j \frac{15}{100} \nu = j0.15 \nu$$

Провідність БСК № 2:

$$\underline{Y}_{23}(\nu) = j \frac{Q_{БК4}}{S_{\delta}} \nu = j \frac{1}{100} \nu = j 10^{-2} \nu$$

Провідність КЛ № 1:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_1(\nu) &= \frac{1}{(r_0 \sqrt{\nu} + x_0 \cdot \nu \cdot j) \cdot \frac{l_1}{n_{кл}} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{ном}^2}} = \frac{1}{(0.028 \sqrt{\nu} + j 0.075 \nu) \cdot \frac{2}{4} \cdot \frac{10^2}{10^2}} = \\ &= \frac{1}{14 \cdot 10^{-2} \sqrt{\nu} + j 3.75 \cdot 10^{-2} \nu} \end{aligned}$$

Провідність КЛ № 2:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_5(\nu) &= \frac{1}{(r_0 \sqrt{\nu} + x_0 \cdot \nu \cdot j) \cdot l_2 \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{ном}^2}} = \frac{1}{(0.028 \sqrt{\nu} + j 0.075 \nu) \cdot 4.8 \cdot \frac{10^2}{10^2}} = \\ &= \frac{1}{0.134 \sqrt{\nu} + j 0.36 \nu} \end{aligned}$$

Провідність навантаження Н1:

$$\underline{Y}_2(\nu) = \frac{S_{H1} \cdot \cos \varphi_{H1}}{S_{\delta} \sqrt{\nu}} - j \frac{S_{H1} \sin \varphi_{H1}}{S_{\delta} \cdot \nu} = \frac{15 \cdot 0.8}{100 \sqrt{\nu}} - j \frac{15 \cdot 0.6}{100 \nu} = \frac{0.12}{\sqrt{\nu}} - j \frac{9 \cdot 10^{-2}}{\nu}$$

Провідність навантаження Н2:

$$\begin{aligned}\underline{Y}_7(\nu) &= n_{H2} \left(\frac{S_{H2} \cdot \cos \varphi_{H2}}{S_\delta \sqrt{\nu}} - j \frac{S_{H2} \sin \varphi_{H2}}{S_\delta \cdot \nu} \right) = 10 \cdot \left(\frac{1.3 \cdot 0.8}{100 \sqrt{\nu}} - j \frac{1.3 \cdot 0.6}{100 \nu} \right) = \\ &= \frac{0.104}{\sqrt{\nu}} - j \frac{7.8 \cdot 10^{-2}}{\nu}\end{aligned}$$

Провідність навантаження Н3:

$$\underline{Y}_9(\nu) = \frac{S_{H3} \cdot \cos \varphi_{H3}}{S_\delta \sqrt{\nu}} - j \frac{S_{H3} \sin \varphi_{H3}}{S_\delta \cdot \nu} = \frac{25 \cdot 0.8}{100 \sqrt{\nu}} - j \frac{25 \cdot 0.6}{100 \nu} = \frac{0.2}{\sqrt{\nu}} - j \frac{0.15}{\nu}$$

Провідність навантаження Н4:

$$\underline{Y}_{22}(\nu) = \frac{S_{H4} \cdot \cos \varphi_{H4}}{S_\delta \sqrt{\nu}} - j \frac{S_{H4} \sin \varphi_{H4}}{S_\delta \cdot \nu} = \frac{2 \cdot 0.8}{100 \sqrt{\nu}} - j \frac{2 \cdot 0.6}{100 \nu} = \frac{1.6 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{\nu}} - j \frac{1.2 \cdot 10^{-2}}{\nu}$$

Еквівалентна провідність $\underline{Y}_{12}$:

$$\begin{aligned}\underline{Y}_{12}(\nu) &= \frac{1}{\frac{1}{\underline{Y}_4(\nu)} + \frac{1}{\underline{Y}_{11}(\nu)}} = \frac{1}{\frac{1}{-j20} + \frac{1}{\frac{1}{6.3 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\nu} + j \cdot \nu \cdot 0.191}}} = \\ &= \frac{1}{6.2 \cdot 10^{-3} \sqrt{\nu} + j0.241\nu}\end{aligned}$$

Розрахунок елементів матриці провідностей

Власна провідність вузлів схеми визначається згідно виразів:

$$\underline{G}_{11}(\nu) = \underline{Y}_1(\nu) + \underline{Y}_5(\nu) + \underline{Y}_9(\nu) + \underline{Y}_{10}(\nu) + \underline{Y}_{12}(\nu) + \underline{Y}_{21}(\nu)$$

$$\underline{G}_{22}(\nu) = \underline{Y}_1(\nu) + \underline{Y}_2(\nu) + \underline{Y}_3(\nu)$$

$$\underline{G}_{33}(\nu) = \underline{Y}_5(\nu) + \underline{Y}_6(\nu)$$

$$\underline{G}_{44}(\nu) = \underline{Y}_6(\nu) + \underline{Y}_7(\nu) + \underline{Y}_8(\nu)$$

$$\underline{G}_{55}(\nu) = \underline{Y}_{21}(\nu) + \underline{Y}_{22}(\nu) + \underline{Y}_{23}(\nu)$$

Взаємна провідність вузлів схеми визначається згідно виразів:

$$\underline{G}_{12}(\nu) = \underline{G}_{21}(\nu) = -\underline{Y}_1(\nu) = -\frac{1}{14 \cdot 10^{-2} \sqrt{\nu} + j 3.75 \cdot 10^{-2} \nu}$$

$$\underline{G}_{13}(\nu) = \underline{G}_{31}(\nu) = -\underline{Y}_5(\nu) = -\frac{1}{0.134 \sqrt{\nu} + j 0.36 \nu}$$

$$\underline{G}_{14}(\nu) = \underline{G}_{41}(\nu) = 0$$

$$\underline{G}_{15}(\nu) = \underline{G}_{51}(\nu) = -\underline{Y}_{21}(\nu) = -\frac{1}{0.16 \sqrt{\nu} + j 4 \nu}$$

$$\underline{G}_{23}(\nu) = \underline{G}_{32}(\nu) = 0$$

$$\underline{G}_{24}(\nu) = \underline{G}_{42}(\nu) = 0$$

$$\underline{G}_{25}(\nu) = \underline{G}_{52}(\nu) = 0$$

$$\underline{G}_{34}(\nu) = \underline{G}_{43}(\nu) = -\underline{Y}_6(\nu) = -\frac{10}{0.16 \sqrt{\nu} + j 4 \nu}$$

$$\underline{G}_{35}(\nu) = \underline{G}_{53}(\nu) = 0$$

$$\underline{G}_{45}(\nu) = \underline{G}_{54}(\nu) = 0$$

Розрахунок параметрів матриці джерел струму

Вузол № 1:

$$J_{11}(\nu) = \begin{cases} \frac{S_{\pi, \Pi 3}}{S_{\delta} \nu} (\cos(\varphi_{\pi 3} \nu) + j \sin(\varphi_{\pi 3} \nu)), & \nu = 11 \vee \nu = 13 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ 0, & \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{5}{100\nu} (\cos(30^\circ \cdot \nu) + j \sin(30^\circ \cdot \nu)), & \nu = 11 \vee \nu = 13 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ 0, & \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{5 \cdot 10^{-2}}{\nu} (\cos(30^\circ \cdot \nu) + j \sin(30^\circ \cdot \nu)), & \nu = 11 \vee \nu = 13 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ 0, & \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \end{cases}$$

Вузол № 2:

$$J_{22}(\nu) = \begin{cases} \frac{S_{\pi, \Pi 1}}{S_{\delta} \nu} (\cos(\varphi_{\pi 1} \nu) + j \sin(\varphi_{\pi 1} \nu)), & \nu = 5 \vee \nu = 7 \vee \nu = 11 \vee \nu = 13 \\ & \nu = 17 \vee \nu = 19 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ 0, & \nu \neq 5 \vee \nu \neq 7 \vee \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \\ & \nu \neq 17 \vee \nu \neq 19 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{15}{100\nu} (\cos(10^\circ \cdot \nu) + j \sin(10^\circ \cdot \nu)), & \nu = 5 \vee \nu = 7 \vee \nu = 11 \vee \nu = 13 \\ & \nu = 17 \vee \nu = 19 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ 0, & \nu \neq 5 \vee \nu \neq 7 \vee \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \\ & \nu \neq 17 \vee \nu \neq 19 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{1.5 \cdot 10^{-2}}{\nu} (\cos(10^\circ \cdot \nu) + j \sin(10^\circ \cdot \nu)), & \nu = 5 \vee \nu = 7 \vee \nu = 11 \vee \nu = 13 \\ & \nu = 17 \vee \nu = 19 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ 0, & \nu \neq 5 \vee \nu \neq 7 \vee \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \\ & \nu \neq 17 \vee \nu \neq 19 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \end{cases}$$

Вузли № 3, ; 5:

$$\dot{J}_{33}(v) = \dot{J}_{55}(v) = 0$$

Вузол № 4:

$$\dot{J}_{44}(v) = \begin{cases} \frac{n_{П2} \cdot S_{н.П2}}{S_{\delta} v} (\cos(\varphi_{\delta П2} v) + j \sin(\varphi_{\delta П2} v)), & v = 5 \vee v = 7 \vee v = 11 \vee v = 13 \\ & v = 17 \vee v = 19 \vee v = 23 \vee v = 25 \\ & v \neq 5 \vee v \neq 7 \vee v \neq 11 \vee v \neq 13 \\ & v \neq 17 \vee v \neq 19 \vee v \neq 23 \vee v \neq 25 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{10 \cdot 0.2}{100v} (\cos(20^\circ \cdot v) + j \sin(20^\circ \cdot v)), & v = 5 \vee v = 7 \vee v = 11 \vee v = 13 \\ & v = 17 \vee v = 19 \vee v = 23 \vee v = 25 \\ & v \neq 5 \vee v \neq 7 \vee v \neq 11 \vee v \neq 13 \\ & v \neq 17 \vee v \neq 19 \vee v \neq 23 \vee v \neq 25 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{2 \cdot 10^{-2}}{v} (\cos(20^\circ \cdot v) + j \sin(20^\circ \cdot v)), & v = 5 \vee v = 7 \vee v = 11 \vee v = 13 \\ & v = 17 \vee v = 19 \vee v = 23 \vee v = 25 \\ & v \neq 5 \vee v \neq 7 \vee v \neq 11 \vee v \neq 13 \\ & v \neq 17 \vee v \neq 19 \vee v \neq 23 \vee v \neq 25 \end{cases}$$

Розв'язання системи рівнянь вузових напруг для схеми

В загальному вигляді система рівнянь вузових напруг може бути представлена наступним чином

$$\underline{G}(v) \cdot \dot{U}(v) = \dot{J}(v)$$

де $\underline{G}(v)$ – це матриця провідностей схеми:

$$\underline{G}(\nu) = \begin{bmatrix} \underline{G}_{11}(\nu) & \underline{G}_{12}(\nu) & \underline{G}_{13}(\nu) & \underline{G}_{14}(\nu) & \underline{G}_{15}(\nu) \\ \underline{G}_{21}(\nu) & \underline{G}_{22}(\nu) & \underline{G}_{23}(\nu) & \underline{G}_{24}(\nu) & \underline{G}_{25}(\nu) \\ \underline{G}_{31}(\nu) & \underline{G}_{32}(\nu) & \underline{G}_{33}(\nu) & \underline{G}_{34}(\nu) & \underline{G}_{35}(\nu) \\ \underline{G}_{41}(\nu) & \underline{G}_{42}(\nu) & \underline{G}_{43}(\nu) & \underline{G}_{44}(\nu) & \underline{G}_{45}(\nu) \\ \underline{G}_{51}(\nu) & \underline{G}_{52}(\nu) & \underline{G}_{53}(\nu) & \underline{G}_{54}(\nu) & \underline{G}_{55}(\nu) \end{bmatrix}$$

$\dot{U}(\nu)$ – це матриця вузлових напруг схеми:

$$\dot{U}(\nu) = \begin{bmatrix} \dot{U}_1(\nu) \\ \dot{U}_2(\nu) \\ \dot{U}_3(\nu) \\ \dot{U}_4(\nu) \\ \dot{U}_5(\nu) \end{bmatrix}$$

$\dot{J}(\nu)$ – це матриця вузлових струмів схеми:

$$\dot{J}(\nu) = \begin{bmatrix} \dot{J}_{11}(\nu) \\ \dot{J}_{22}(\nu) \\ \dot{J}_{33}(\nu) \\ \dot{J}_{44}(\nu) \\ \dot{J}_{55}(\nu) \end{bmatrix}$$

Для вирішення даної системи рівнянь скористаємось методом оберненої матриці згідно виразу:

$$\dot{U}(\nu) = \underline{G}(\nu)^{-1} \cdot \dot{J}(\nu)$$

В табл. 2.6 приведені результати розрахунку

Таблиця 2.6. Результати розрахунку вузлових напруг, k_U та $k_{\text{БСК}}$

Парам.	Номер вузла				
	1	2	3	4	5
U_5	0,04903	0,05505	0,01298	0,04703	0,29396
U_7	0,03202	0,03098	0,01303	0,00993	0,03501
U_{11}	0,00749	0,00295	0,00320	0,00245	0,00200
U_{13}	0,00655	0,00209	0,00275	0,00172	0,00119
U_{17}	0,00528	0,00220	0,00230	0,00101	0,00049
U_{19}	0,00589	0,00480	0,00266	0,00084	0,00042
U_{23}	0,01404	0,02698	0,00739	0,00015	0,00074
U_{25}	0,00599	0,01299	0,00323	0,00031	0,00022
$k_U, \%$	6,22998	7,03003	2,09003	4,80001	29,60002
$k_{\text{БСК}}$	1,12996	1,27000	-	1,03000	1,79004

Визначення k_U та $k_{\text{БСК}}$ k_U розраховується згідно виразу:

$$k_{U_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^8 \left| \dot{U}_i(v_j) \right|^2} \cdot 100\%$$

 $k_{\text{БСК}}$ розраховується згідно виразу:

$$k_{\pi i} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n \left| \dot{U}_i(v_j) \cdot \underline{Y}_{БК}(v_j) \right|^2 + I_{н.БК}^2}}{I_{н.БК}}$$

Номинальні струми БСК:

$$I_{н.БК1} = \frac{Q_{БК1}}{S_{\delta}} = \frac{8}{100} = 0,08$$

$$I_{н.БК2} = \frac{n_{БК2} Q_{БК2}}{S_{\delta}} = \frac{10 \cdot 1}{100} = 0,1$$

$$I_{н.БК3} = \frac{Q_{БК3}}{S_{\delta}} = \frac{15}{100} = 0,15$$

$$I_{н.БК4} = \frac{Q_{БК4}}{S_{\delta}} = \frac{1}{100} = 0,01$$

Розрахунок вузлових напруг, k_U і $k_{пБСК}$ показані в табл. 2.6.

Як можна побачити з табл. 2.6, $k_{пБСК}$ для вузла 5 перевищує межі допустимого значення (1,3). При цьому коеф. k_U у вузлах № 1, № 2 і № 5 значно більший за допустиме значення, яке складає 5 %. Тому в даній смстемі електропостачання потрібне встановлення ФКП.

З метою визначення місць приєднання ФКП до мережі перш за всенеобхідно визначити, в яких саме вузлах системи електропостачання при встановленні ФКП коефіцієнт несинусоїдальності потраплятиме в допустимі межі.

В табл. 2.7 зведено результати розрахунку коефіцієнту несинусоїдальності у вузлах системи електропостачання після встановлення ФКП

Таблиця 2.7. Результати розрахунку коефіцієнту несинусоїдальності напруги у вузлах системи електропостачання після встановлення ФКП

№ вузла	k_U , % для вузлів				
	1	2	3	4	5
1	1,732	3,453	1,244	1,824	0,098
2	1,885	3,012	1,296	1,745	0,485
3	7,100	8,046	0,884	7,011	33,651
4	7,632	8,362	3,972	0,130	40,160
5	8,215	9,332	2,328	8,053	0,097

Результати розрахунків показали, що найбільш доцільними є 2 варіанти

- ФКП розміщуються у вузлі № 1;
- ФКП розміщуються у вузлі № 2;

Розміщення ФКП у вузлі № 1 мережі

Струм 5-ї гармоніки ВП1:

$$I_{5ВП1} = \frac{S_{н.ВП1}}{\sqrt{3}U_{ном} \nu} = \frac{15}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 5} = 173,21 \text{ А}$$

Розраховані аналогічним струми вищих гармонік інших ВП показані в табл. 2.8.

Таблиця 2.8 . Результати визначення струмів вищих гармонік перетворювачів ВП1-ВП3

№	Струм ВП, А			
	ν = 5	ν = 7	ν = 11	ν = 13
ВП1	173,203	123,695	78,702	66,602
ВП2	23,101	16,502	10,499	8,902
ВП3	-	-	26,202	22,204

Струм 5-ї гармоніки ФКП:

$$I_{\varphi 5} = \frac{I_{ВП1}(5)}{\underline{G}_{22}(5)} \cdot \underline{Y}_1(5) + \frac{I_{ВП2}(5)}{\underline{G}_{44}(5)} \cdot \frac{\underline{Y}_6(5) \cdot \underline{Y}_5(5)}{\underline{Y}_6(5) + \underline{Y}_5(5)} = 245,7 \text{ А}$$

Попереднє значення потужності батареї ФКП 5-ї гармоніки:

$$Q_{\phi k 5} = 1,2 \cdot K_c \cdot I_{\varphi 5} \cdot U_{ном} = 1,2 \cdot 3 \cdot 245,7 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 8,845 \text{ Мвар}$$

Приймаємо

$$Q_{\delta\kappa 5} = 8,845 \text{ Мвар}$$

Тоді:

$$\underline{Y}_{\varphi 5}(\nu) = \frac{1}{j \frac{S_{\delta}}{Q_{\varphi 5}} \left(\frac{\nu}{\nu_{рез}^2} - \frac{1}{\nu} \right)} = \frac{1}{j \frac{100}{8,845} \left(\frac{\nu}{5,01^2} - \frac{1}{\nu} \right)} = \frac{1}{j 11,306 \left(\frac{\nu}{25,0001} - \frac{1}{\nu} \right)}$$

Вираз для визначення власної провідності першого вузла схеми з ФКП 5-ї гармоніки:

$$\underline{G}_{11}(\nu) = \underline{Y}_1(\nu) + \underline{Y}_5(\nu) + \underline{Y}_9(\nu) + \underline{Y}_{10}(\nu) + \underline{Y}_{12}(\nu) + \underline{Y}_{21}(\nu) + \underline{Y}_{\varphi 5}(\nu)$$

В табл. 2.9 показані результати попереднього розрахунку вузлових напруг та коеф. несинусоїдальності у випадку встановлення ФКП 5-ї гармоніки у вузлі № 1

Таблиця 2.9. Результати попереднього розрахунку вузлових напруг та коеф. несинусоїдальності у випадку встановлення ФКП 5-ї гармоніки у вузлі № 1

Парам.	№ вузла				
	1	2	3	4	5
U_5	0,00001	0,00606	0,00818	0,02000	0,00013
U_7	0,10999	0,11997	0,04000	0,04003	0,12004
U_{11}	0,00832	0,00419	0,00357	0,00251	0,00215
U_{13}	0,00694	0,00282	0,00297	0,00172	0,00122
U_{17}	0,00531	0,00183	0,00239	0,00102	0,00048
U_{19}	0,00585	0,00432	0,00271	0,00075	0,00042
U_{23}	0,01498	0,03005	0,00755	0,00024	0,00067
U_{25}	0,00644	0,01000	0,00338	0,00023	0,00026
$k_U, \%$	11,42003	13,19995	4,37002	4,00997	12,06998

Величина струму ФКП 5-ї гармоніки:

$$I'_{\tilde{\varphi}5} = \frac{S_{\tilde{\sigma}}}{\sqrt{3}U_H} \cdot \left| \sum_{j=1}^8 \dot{U}_1(v_j) \cdot \underline{Y}_{13}(v_j) \right| = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10} \cdot |0,073 - j0,041| = 0,4843 \text{ кА}$$

Потужність батареї конденсаторів ФКП 5-ї гармоніки:

$$Q'_{\tilde{\varphi}5} = 1,2 \cdot K_c \cdot I'_{\tilde{\varphi}5} \cdot U_{ном} = 1,2 \cdot 3 \cdot 0,4843 \cdot 10 = 17,43 \text{ Мвар}$$

Значення провідності ФКП 5-ї гармоніки:

$$\underline{Y}'_{\tilde{\varphi}5}(v) = \frac{1}{j \frac{S_{\tilde{\sigma}}}{Q'_{\tilde{\varphi}5}} \left(\frac{v}{v_{рез}^2} - \frac{1}{v} \right)} = \frac{1}{j \frac{100}{17,43} \left(\frac{v}{5,01^2} - \frac{1}{v} \right)} = \frac{1}{j5,737 \left(\frac{v}{25,0001} - \frac{1}{v} \right)}$$

Вираз для визначення власної провідності 1-го вузла схеми:

$$\underline{G}_{11}(v) = \underline{Y}_1(v) + \underline{Y}_5(v) + \underline{Y}_9(v) + \underline{Y}_{10}(v) + \underline{Y}_{12}(v) + \underline{Y}_{21}(v) + \underline{Y}'_{\tilde{\varphi}5}(v)$$

В табл. 2.10 зведено результати розрахунку для 1-го наближення

При здійсненні розрахунку струмів необхідно проводити коректування значення потужності $Q_{БКЗ}$ із врахуванням значення потужності ФКП та дефіциту реактивної потужності в системі електропостачання (в даній роботі розрахунок був обмежений другим наближенням).

Струм ФКП 5-ї гармоніки становить:

$$I_{\tilde{\varphi}5} = 0,498 \text{ кА}$$

Потужність батареї ФКП 5-ї гармоніки

$$Q_{\tilde{\varphi}5} = 17,93 \text{ Мвар}$$

Таблиця 2.10. Результати розрахунку вузлових напруг та коеф. несинусоїдальності у випадку встановлення ФКП 5-ї гармоніки у вузлі № 1 (1-ше наближення)

Парам.	№ вузла				
	1	2	1	4	1
U_5	0,00003	0,00614	0,00817	0,01704	0,00012
U_7	0,04404	0,05698	0,01598	0,01699	0,04701
U_{11}	0,00937	0,00580	0,00414	0,00256	0,00249
U_{13}	0,00737	0,00352	0,00319	0,00185	0,00124
U_{17}	0,00539	0,00141	0,00238	0,00100	0,00053
U_{19}	0,00577	0,00373	0,00271	0,00081	0,00047
U_{23}	0,01500	0,02503	0,00764	0,00024	0,00073
U_{25}	0,00686	0,01400	0,00363	0,00029	0,00030
$k_U, \%$	4,89004	6,51004	2,07003	2,45000	4,72002

k_{Π} батареї БСКЗ:

$$K_{нБКЗ} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n \left| U_1(v_j) \cdot Y_{10}(v_j) \right|^2 + I_{нБКЗ}^2}}{I_{нБКЗ}} = \frac{\sqrt{0,078^2 + 0,15^2}}{0,15} = 1,127 < 1,3$$

Аналогічно розраховуються k_{Π} і для батарей у другому, четвертому та п'ятому вузлах схеми (табл. 2.11)

Таблиця 2.11. Результати розрахунку вузлових напруг та коеф. несинусоїдальності у випадку встановлення ФКП 5-ї гармоніки у вузлі № 1 (2-ге наближення)

Парам.	№ вузла				
	1	2	1	4	1
U_5	0,00001	0,00608	0,00814	0,01702	0,00006
U_7	0,04101	0,05499	0,01503	0,01601	0,04398
U_{11}	0,00947	0,00588	0,00416	0,00257	0,00252
U_{13}	0,00741	0,00366	0,00318	0,00182	0,00128
U_{17}	0,00546	0,00134	0,00241	0,00094	0,00051
U_{19}	0,00577	0,00378	0,00273	0,00078	0,00046
U_{23}	0,01502	0,02501	0,00771	0,00032	0,00073
U_{25}	0,00687	0,01401	0,00366	0,00025	0,00027
$k_U, \%$	4,67001	6,25003	2,00005	2,39003	4,45999
$k_{\text{пБСК}}$	1,12997	1,27004	-	1,01001	1,05004

Спрум ФКП 5-ї гармоніки складає:

$$I_{\text{н.}\Phi 5} = \frac{Q_{\Phi 5}}{S_{\Phi}} = \frac{17,93}{100} = 0,179$$

$k_{\text{п}}$ для ФКП 5-ї гармоніки:

$$K_{\text{н}\Phi 5} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n \left| U_1(v_j) \cdot Y_{13}(v_j) \right|^2 + I_{\text{н.}\Phi 5}^2}}{I_{\text{н.}\Phi 5}} = \frac{\sqrt{0,063^2 + 0,179^2}}{0,179} = 1,06 < 1,3$$

Як показали розрахунки, $k_{\text{п}}$ для батарей конденсаторів не перевищує допустимих меж. Окрім цього забезпечується зниження величини k_U до допустимих значень в усіх вузлах мережі, окрім другого. В зв'язку з цим необхідно розглянути інші варіанти розміщення ФКП в першому вузлі.

Результати такого розрахунку приведені в табл. 2.12.

Таблиця 2.12. Результати визначення k_U та $Q_{нФКП}$ у вузлі № 1 мережі

Комбінація. ФКП	Значення $Q_{нФКП}$, Мвар				k_U , % для вузлів схеми				
	$Q_{ФКП5}$	$Q_{ФКП7}$	$Q_{ФКП11}$	$Q_{ФКП13}$	1	2	3	4	5
Без ФКП	—	—	—	—	6,280	7,030	2,090	4,800	29,60
5	17,930	—	—	—	4,670	6,250	2,000	2,390	4,560
5+7	6,480	4,520	—	—	2,170	3,140	1,360	1,830	0,300
5+7+11	7,060	5,990	14,600	—	2,460	4,560	1,530	1,820	0,250
5+7+11+13	7,000	5,850	6,490	10,840	1,910	2,760	1,300	1,820	0,110

При встановленні ФКП необхідно проводити уточнення потужності ФКП

Результати розрахунку $k_{п}$ та $Q_{нФКП}$ приведені в таблиці 2.13.

Таблиця 2.13. Результати визначення k_U при встановленні ФКП у вузлі № 1 мережі

Комбінація. ФКП	Значення $k_{п}$							
	№1	№2	№4	№5	ФКП5	ФКП7	ФКП11	ФКП13
Без ФКП	1,130	1,275	1,030	1,788	—	—	—	—
5	1,134	1,269	1,012	1,047	1,063	—	—	—
5+7	1,091	1,223	1,008	1,004	1,106	1,148	—	—
5+7+11	1,134	1,261	1,010	1,002	1,093	1,088	1,103	—
5+7+11+13	1,099	1,117	1,010	0,997	1,101	1,094	1,049	1,054

Встановлення ФКП у вузлі № 2 схеми

Розрахунок проводиться аналогічним чином. Результати наведені в табл. 2.15.

Таблиця 2.14. Результати визначення k_U та $Q_{\text{нФКП}}$ у вузлі № 2 мережі

Комбінація. ФКП	Значення $Q_{\text{нФКП}}$, Мвар				k_U , % для вузлів схеми				
	$Q_{\text{ФКП5}}$	$Q_{\text{ФКП7}}$	$Q_{\text{ФКП11}}$	$Q_{\text{ФКП13}}$	1	2	3	4	5
Без ФКП	5,143	—	—	—	6,959	7,193	2,834	2,642	5,143
5	5,812	4,448	—	—	2,001	3,085	1,305	1,747	5,812
5+7	5,811	4,551	2,400	—	1,812	1,153	1,250	1,740	5,811
5+7+11	5,699	4,451	2,040	3,523	1,600	3,147	1,194	1,742	5,699

Таблиця 2.15. Результати визначення k_U при встановленні ФКП у вузлі № 2

Комбінація. ФКП	Значення k_{π}							
	№1	№2	№4	№5	ФКП5	ФКП7	ФКП11	ФКП13
Без ФКП	1,183	1,324	1,013	1,118	1,243	—	—	—
5	1,082	1,233	1,015	0,995	1,117	1,105	—	—
5+7	1,068	1,259	1,010	0,998	1,118	1,107	1,077	—
5+7+11	1,060	1,269	1,010	0,998	1,125	1,107	1,102	1,097

Аналіз розрахунків

Аналіз отриманих результатів показав, що найбільш оптимальним варіантом є розміщення ФКП 5-ї та 7-ї гармонік в другому вузлі мережі загальною потужністю 10,3 Мвар (**Ф5-10-6000** та **Ф7-10-4800**).

В табл. 2.16 показані результати уточненого розрахунку

Таблиця 2.16. Результати уточненого розрахунку параметрів із врахуванням стандартних значень потужностей ФКП

Парам.	№ вузла				
	1	2	1	4	1
U_5	0,00073	0,00000	0,00820	0,01603	0,00459
U_7	0,00030	0,00003	0,00280	0,00558	0,00029
U_{11}	0,00871	0,00361	0,00368	0,00259	0,00233
U_{13}	0,00701	0,00227	0,00293	0,00181	0,00125
U_{17}	0,00499	0,00211	0,00217	0,00093	0,00048
U_{19}	0,00517	0,00427	0,00235	0,00081	0,00034
U_{23}	0,01304	0,02397	0,00646	0,00041	0,00062
U_{25}	0,00810	0,01802	0,00435	0,00023	0,00033
k_U , %	1,99998	3,07000	1,30001	1,74997	0,52995

Висновки до розділу

1. Аналіз спотворень форми напруги в електромережі продемонстрував ефективність впровадження фільтро-компенсуючого обладнання. Завдяки цьому технічному рішенню вдалося досягти суттєвого покращення якості електроенергії за двома ключовими параметрами: зменшився рівень гармонічних спотворень напруги та знизилось перевантаження батарей статичних конденсаторів (БСК) гармонічними складовими струму. Обидва показники тепер відповідають встановленим нормативним вимогам.

2. Верифікація ефективності фільтро-компенсуючих пристроїв була проведена за допомогою детального комп'ютерного моделювання електричної мережі в умовах несинусоїдальних режимів. Створена цифрова модель продемонструвала високу точність відтворення реальних процесів у системі електропостачання. Порівняльний аналіз показав практичну ідентичність результатів симуляції з даними, отриманими традиційними розрахунковими методами, що підтверджує надійність розробленого моделювання.

3. Дослідження централізованої фільтрації гармонічних складових виявило важливу особливість: для досягнення нормативних показників якості електроенергії у всій розгалуженій електромережі достатньо встановити фільтро-компенсуючі пристрої в одній оптимально обраній точці. Такий підхід забезпечує комплексне покращення якості напруги, при якому спостерігається зниження як коефіцієнта несинусоїдальності, так і рівня перевантаження конденсаторних батарей гармонічними струмами у всіх вузлових точках системи.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З АКТИВНИМИ ФІЛЬТРАМИ

3.1. Загальні відомості про будову та принцип дії активного фільтру

На рис. 3.1 показана схема, яка пояснює принцип дії активного фільтру.

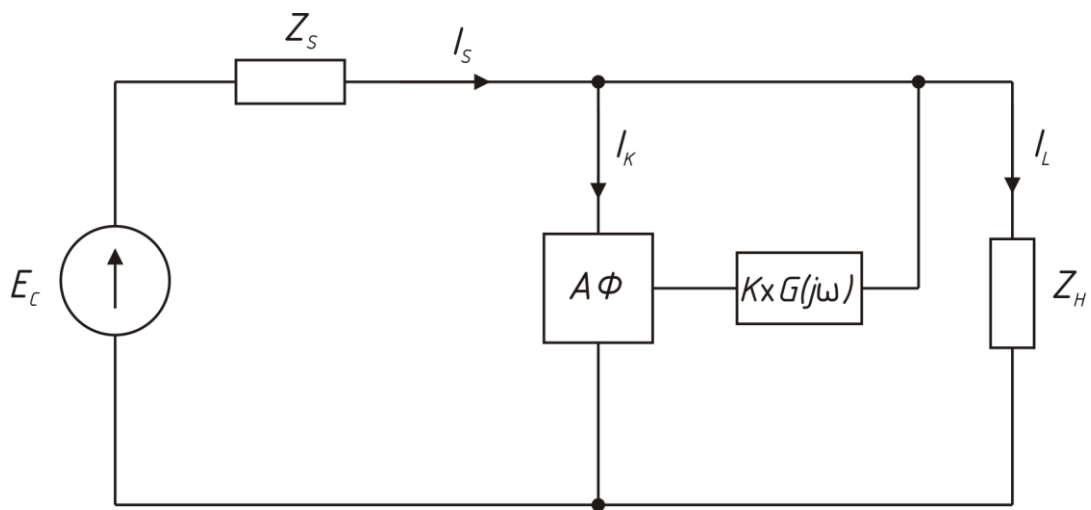


Рис. 3.1. Схема активного фільтру

Активний фільтр являє собою складний електронний пристрій, що функціонує як спеціалізоване джерело струму. Його основними компонентами є реактивна складова струму базової гармоніки та комплекс струмів вищого порядку. Система моніторингу, оснащена спеціальним датчиком, здійснює безперервне вимірювання струмового потоку через навантаження.

Отримані показники обробляються за допомогою цифрового аналізатора, який проводить спектральний аналіз для виявлення частотного складу струму. На основі цих обчислень спеціалізований генератор формує

компенсаційний струм, що подається в електромережу для нейтралізації небажаних спотворень.

Активні фільтри широко застосовуються в сучасній промисловій електроніці та системах електропостачання. Вони здатні компенсувати гармоніки до 50-го порядку. Сучасні активні фільтри використовують цифрові сигнальні процесори (DSP) для швидкої обробки даних. Ефективність фільтрації може досягати 97%. Активні фільтри також можуть виконувати функції стабілізації напруги та компенсації реактивної потужності. Застосування активних фільтрів дозволяє значно покращити якість електроенергії та зменшити втрати в електромережах. Вони особливо ефективні при роботі з нелінійними навантаженнями, такими як випрямлячі, частотні перетворювачі та світлодіодні системи освітлення

На рис. 3.2 наведена структурна схема активного фільтру на основі інвертора напруги.

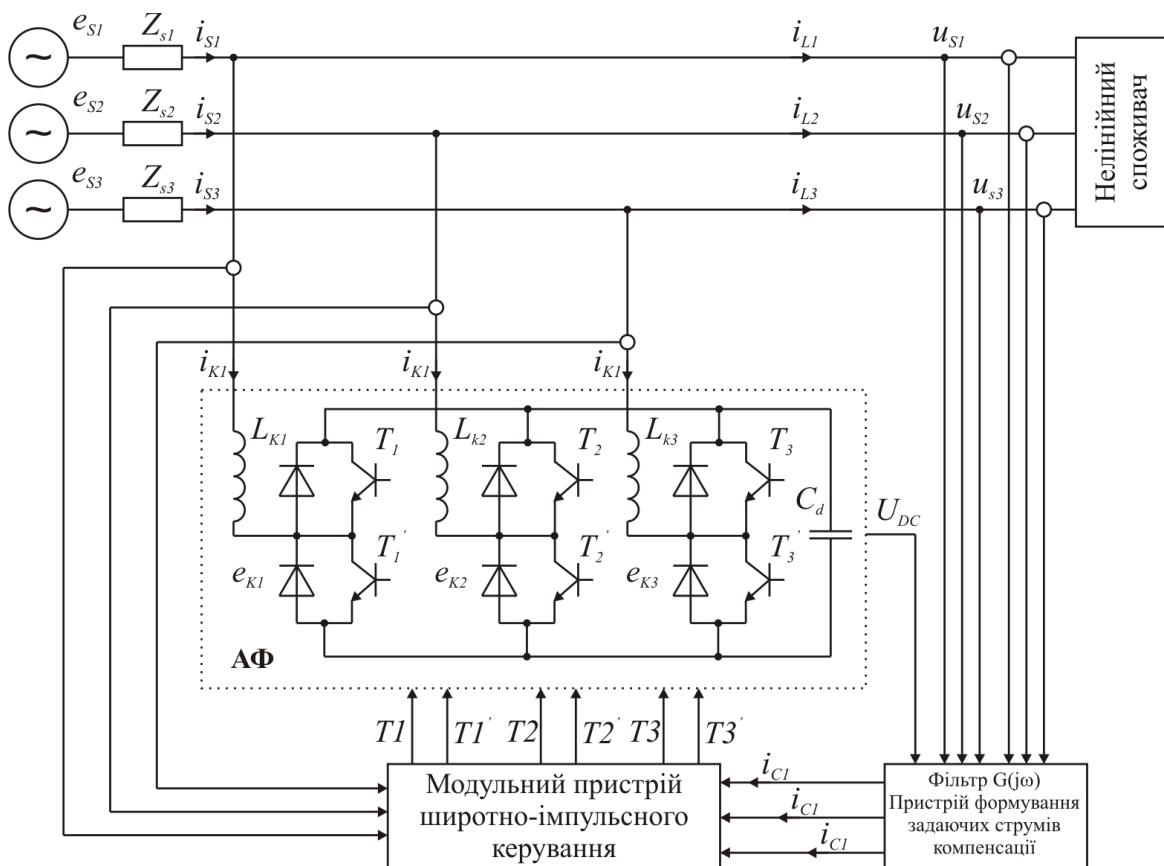


Рис. 3.2. Активний фільтр на основі інвертора напруги

На рис. 3.3 наведена принципова схема поздовжнього активного фільтру.

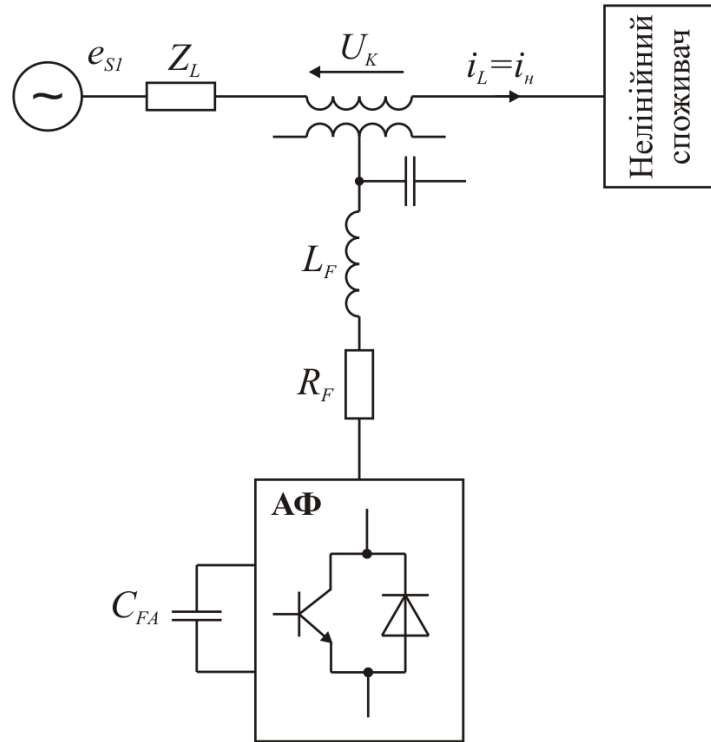


Рис. 3.3. Схема поздовжнього активного фільтру

3.2. Комп'ютерне моделювання системи електропостачання з активним фільтром

На рис. 3.4 наведена комп'ютерна модель системи електропостачання з потужним вентилювальним перетворювачем на активному фільтрі.

Модель паралельного активного фільтру представлена на рис. 3.5. Ця модель фільтру є спрощеною, проте з її допомогою можна отримати деякі якісні результати.

Результати моделювання приведені на рис. 3.6 – 3.13.

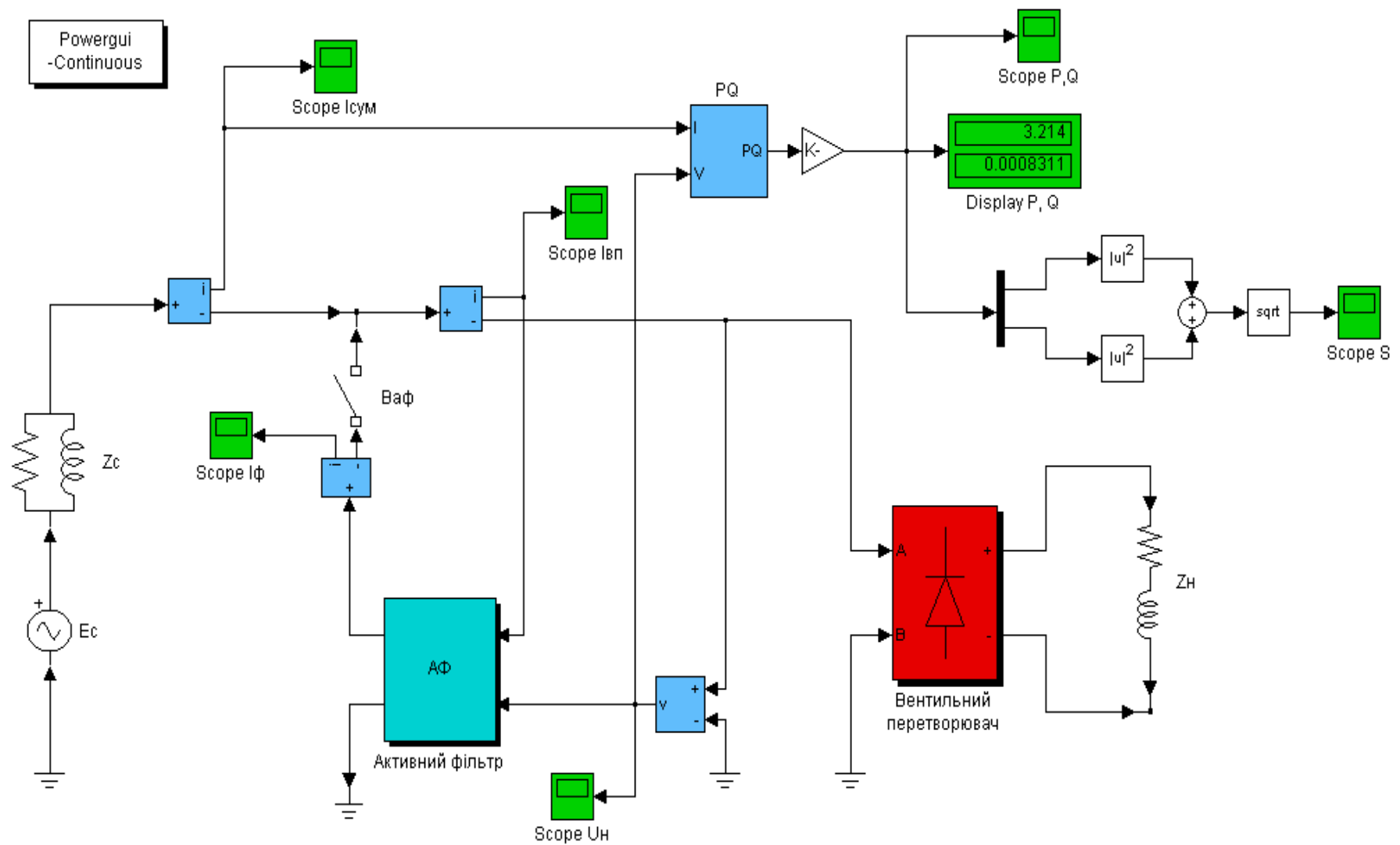


Рис. 3.4. Комп'ютерна модель системи електропостачання з ТПЧ-800 та активним фільтром

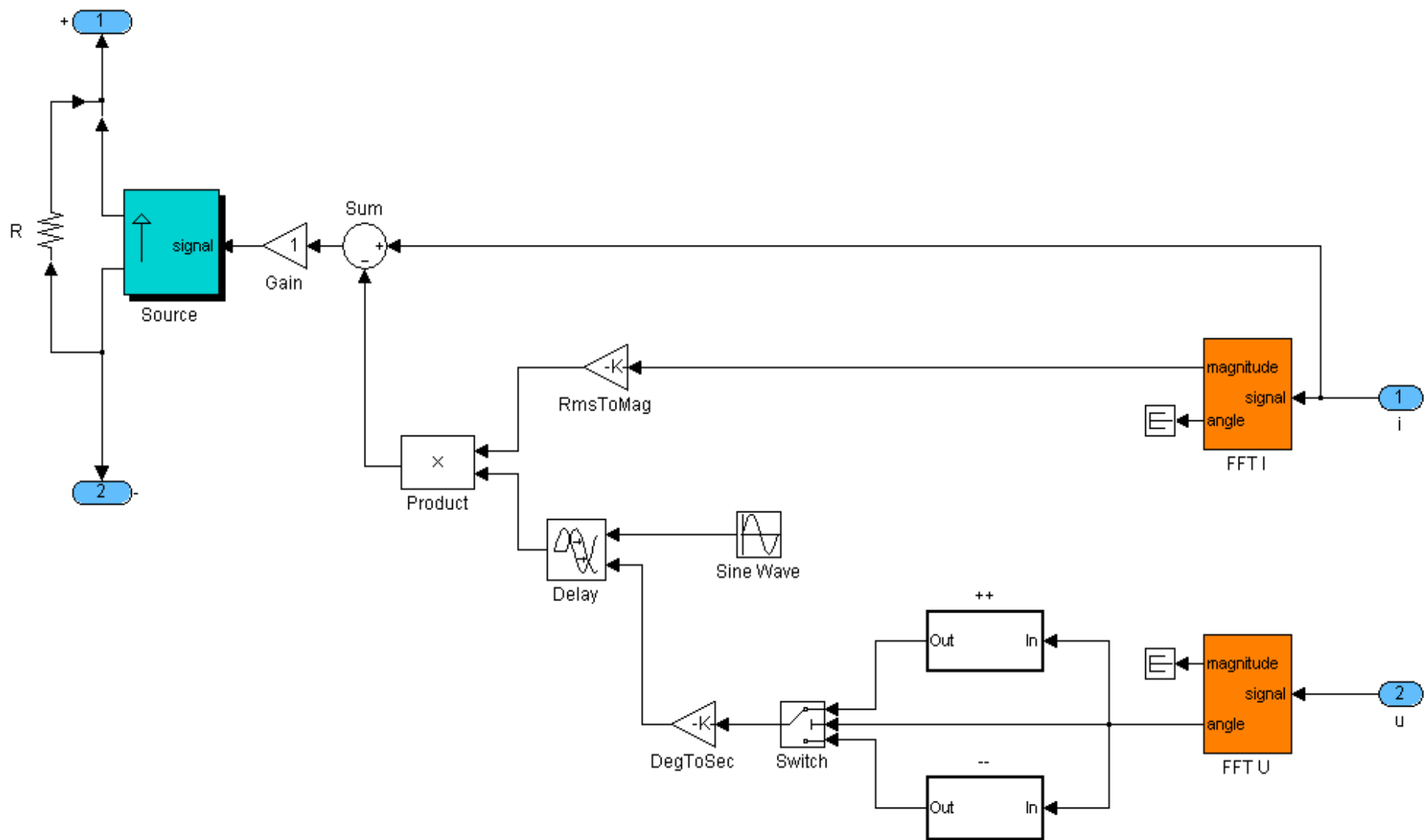


Рис. 3.5. Модель активного фільтру

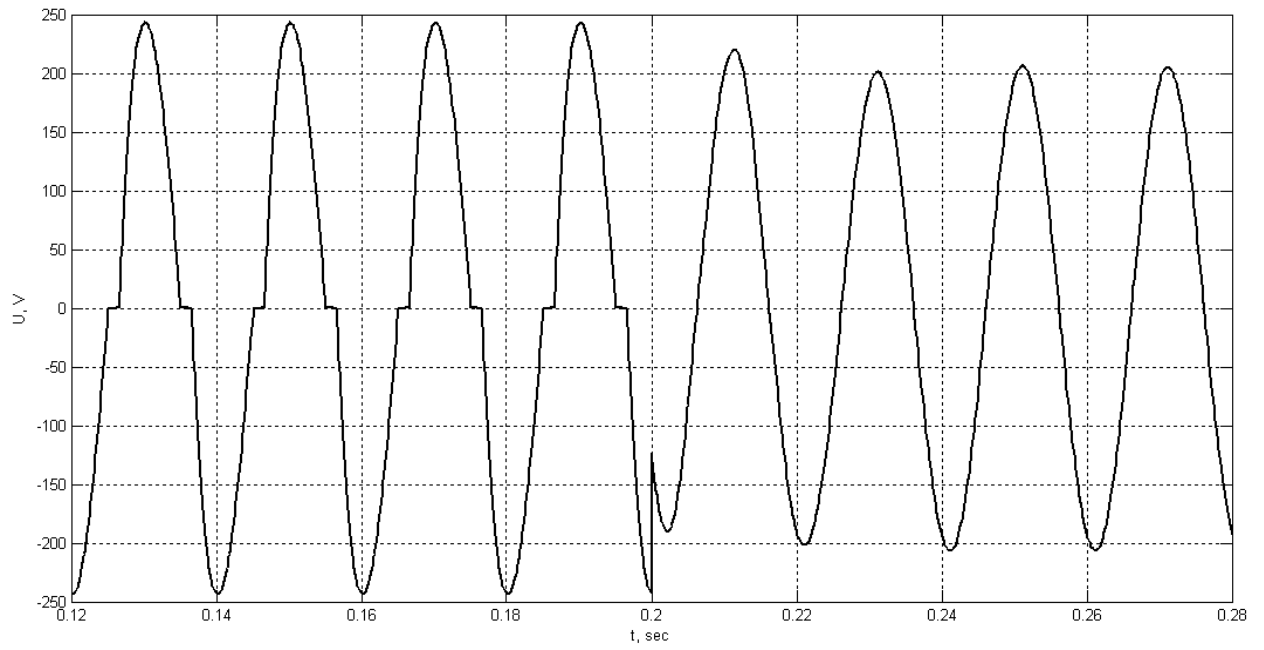


Рис. 3.6. Графік зміни напруги на шинах 10 кВ мережі

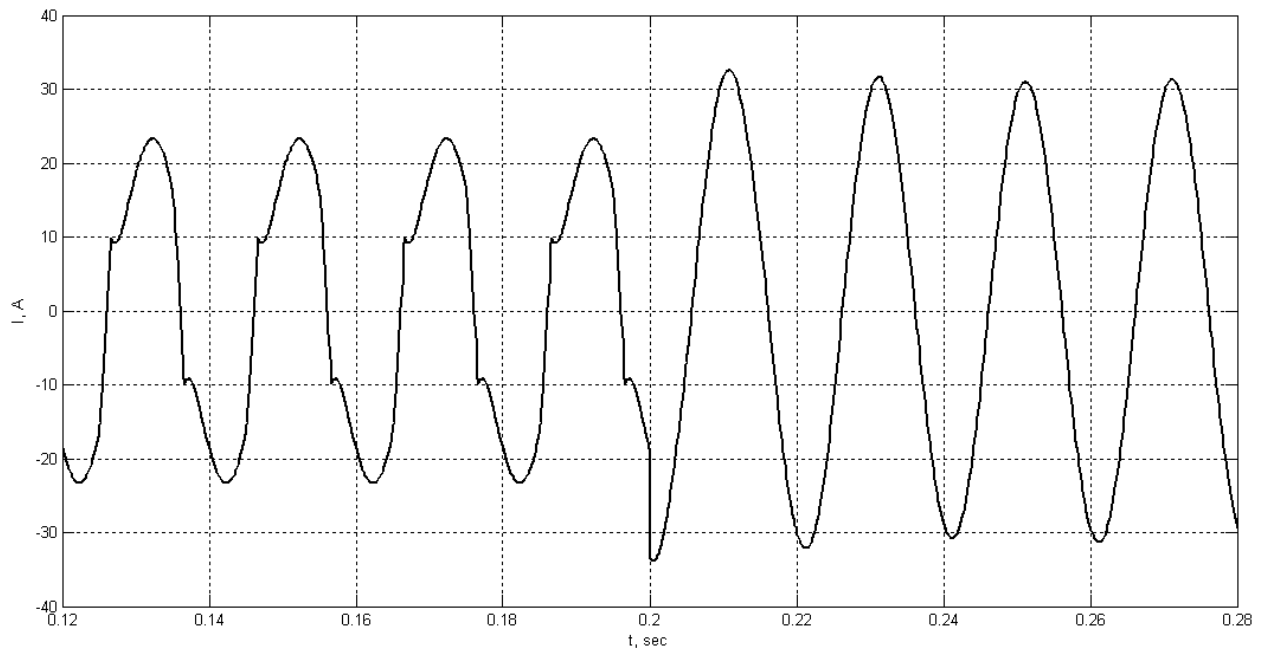


Рис. 3.7. Графік сумарного струму мережі

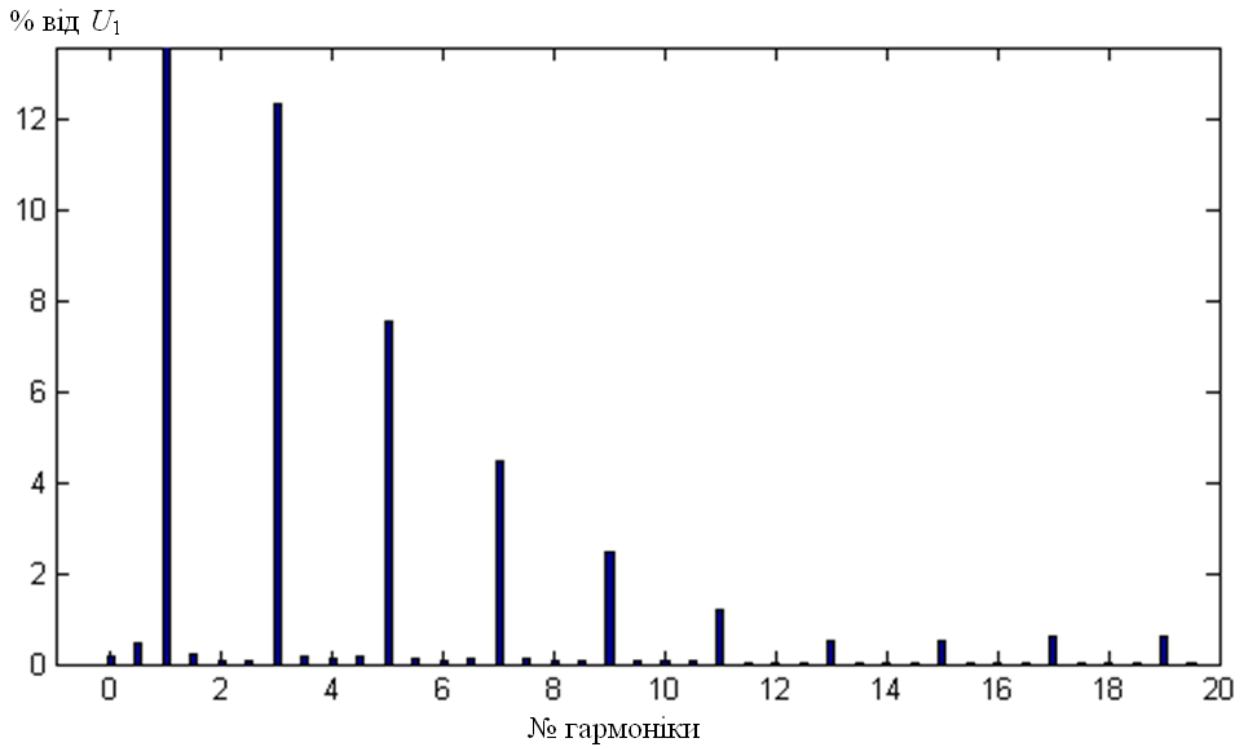


Рис. 3.8. Спектральний аналіз напруги при вимкненому активному фільтрі

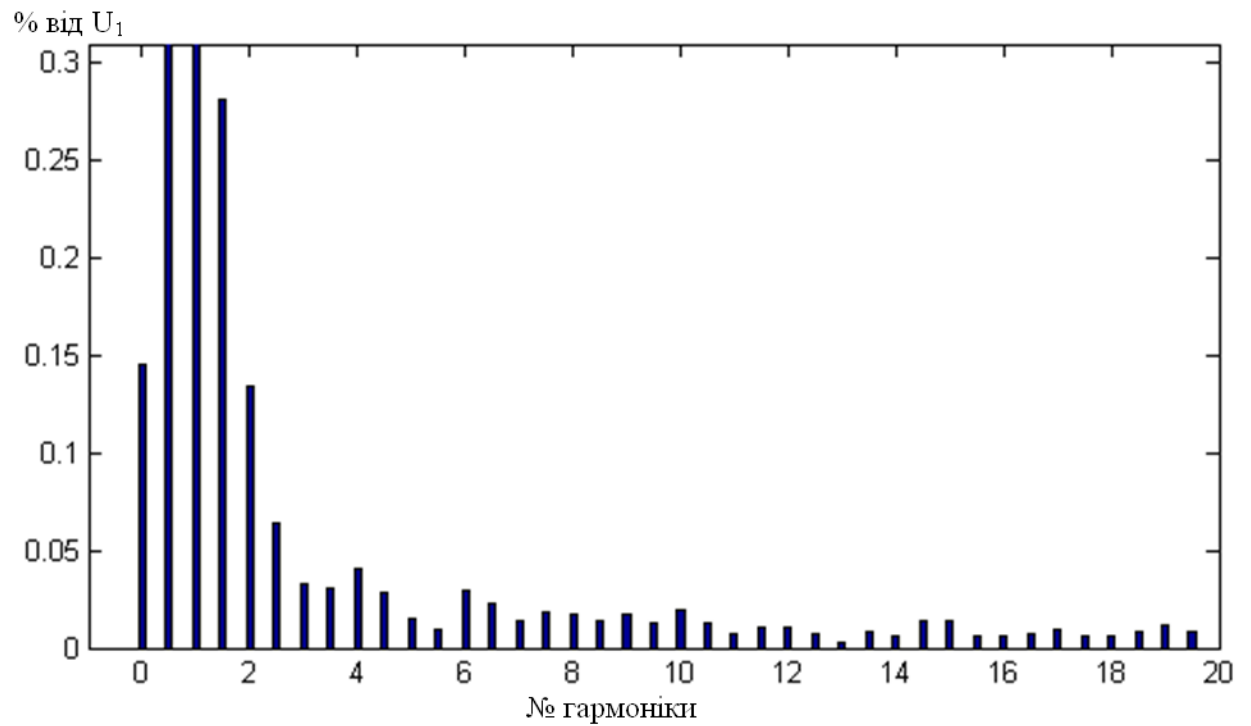


Рис. 3.9. Спектральний аналіз напруги при увімкненому активному фільтрі

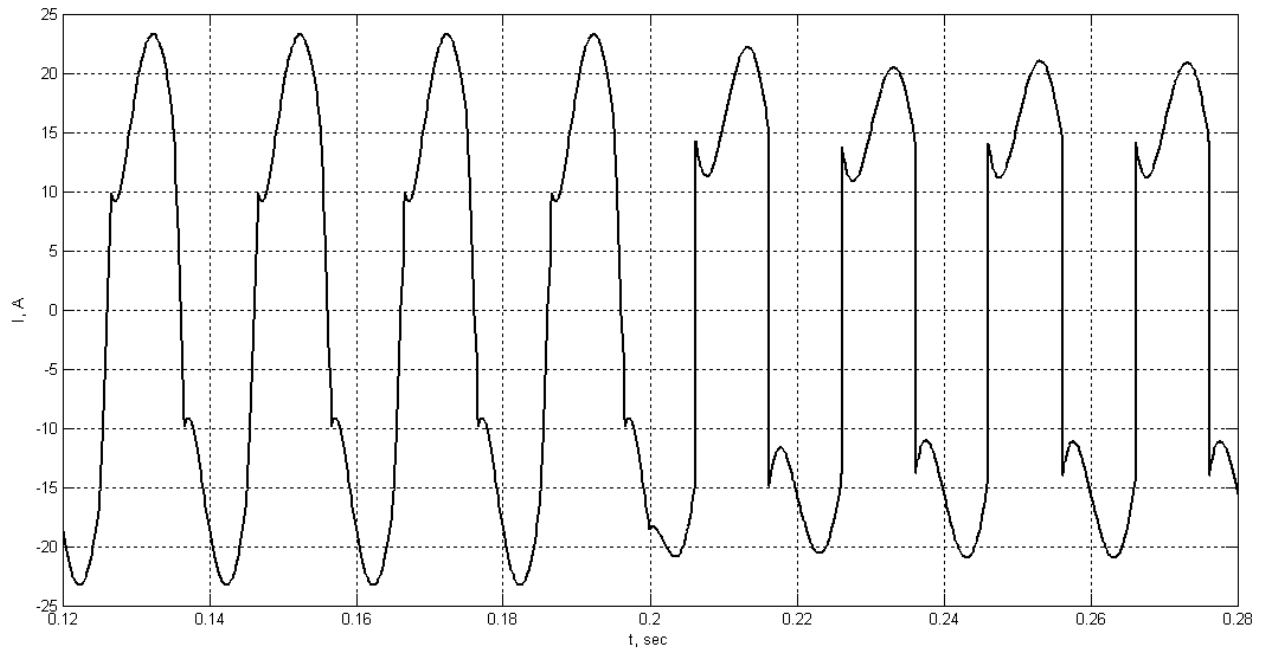


Рис. 3.10. Графік струму в колі ТПЧ-800

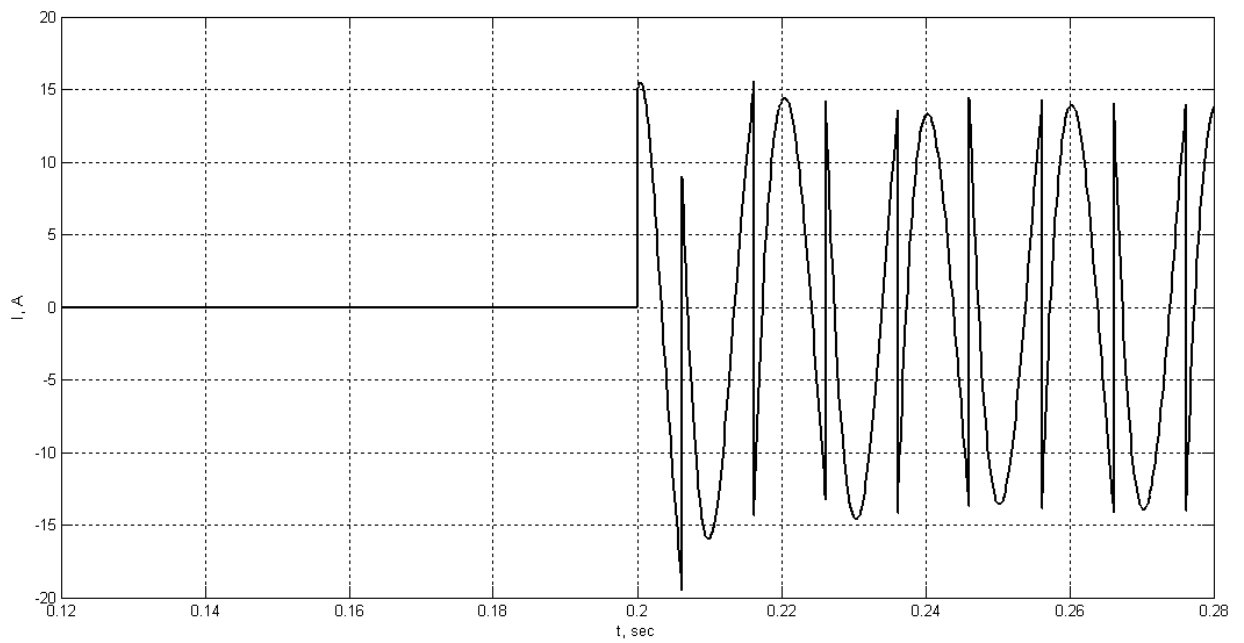


Рис. 3.11. Графік струму активного фільтру

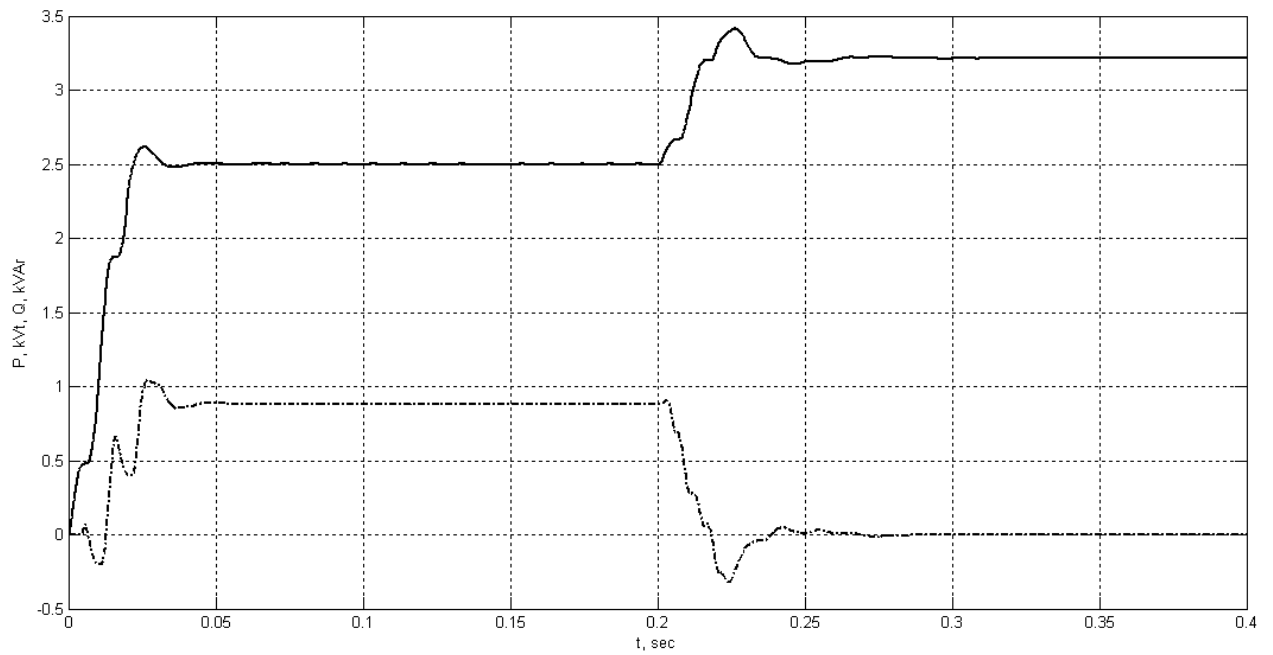


Рис. 3.12. Графік змінення споживаної активної і реактивної потужностей

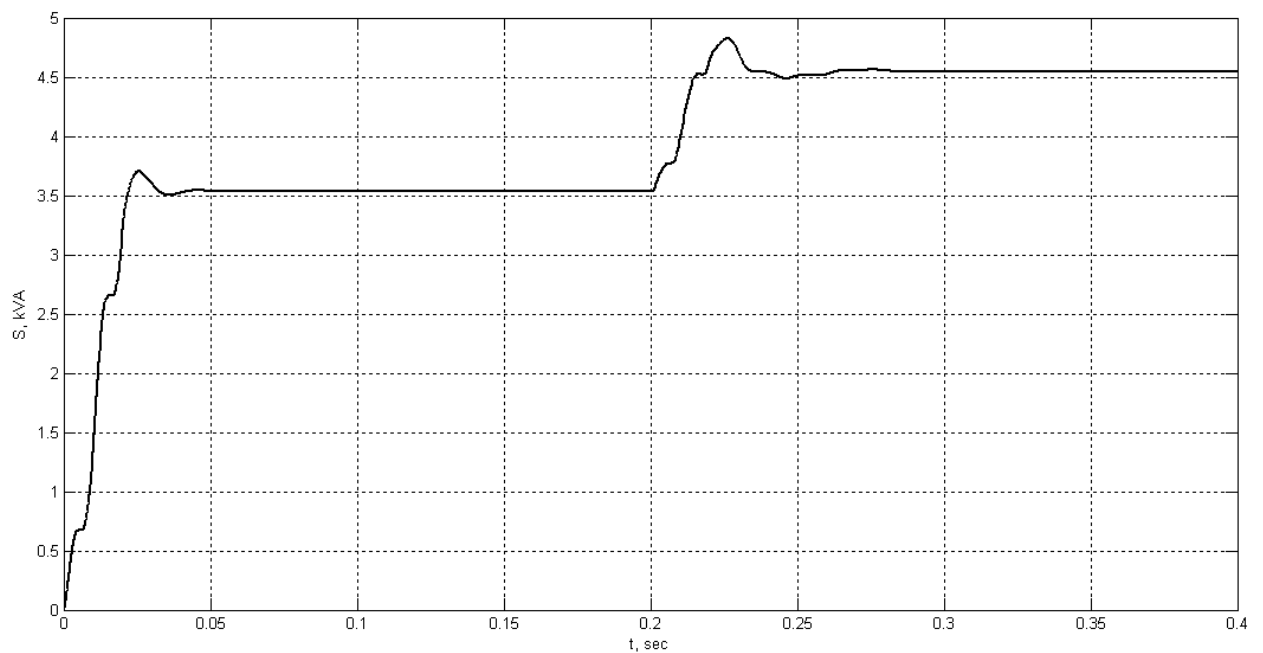


Рис. 3.13 Графік змінення споживаної повної потужності

Більш детальний аналіз режиму роботи мережі з активним фільтром було проведено з допомогою моделі, зображеної на рис. 3.14. До складу цієї моделі входять такі елементи:

Результати моделювання показані на рис. 3.15 – 3.24.

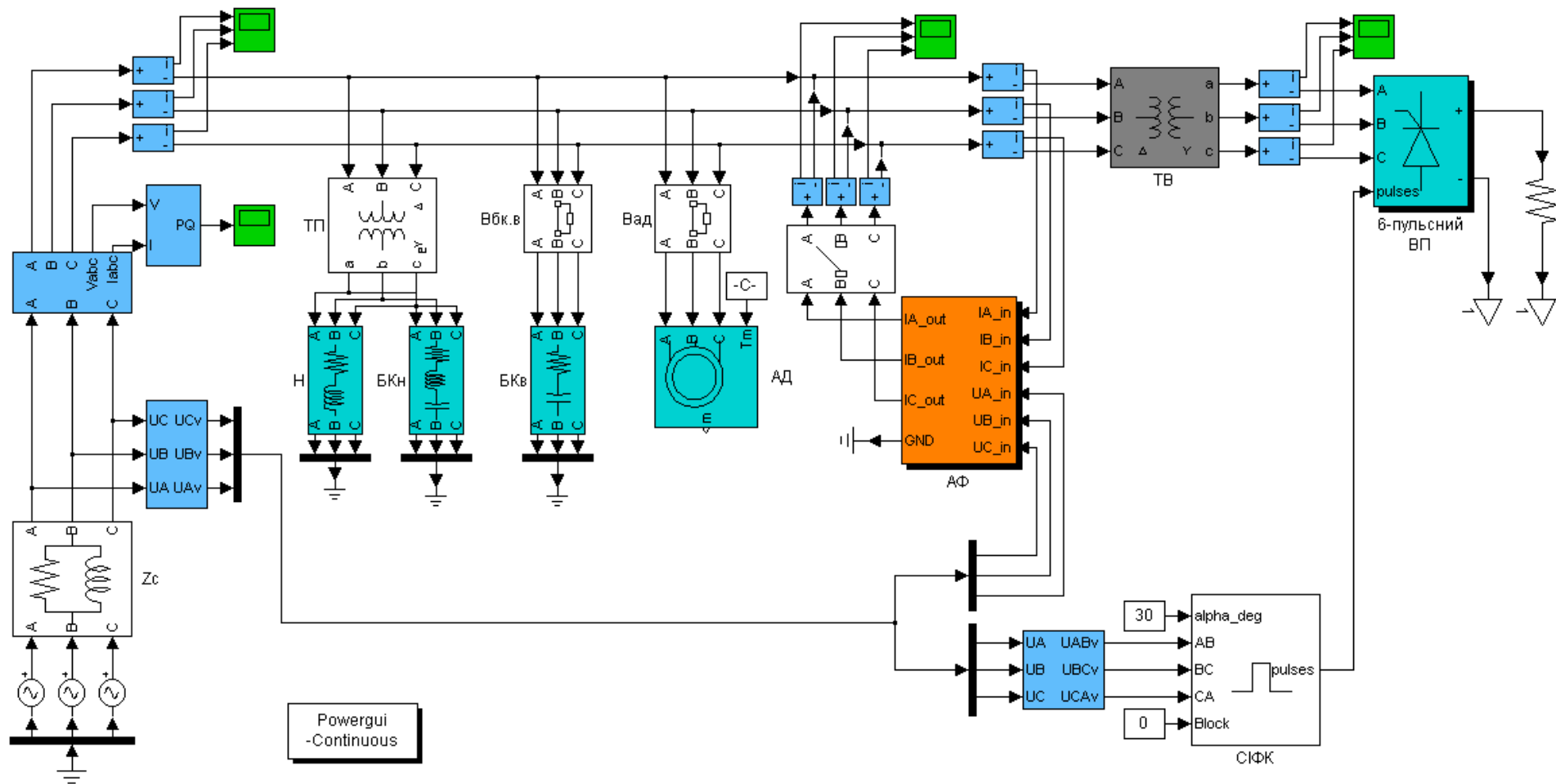


Рис. 3.14. Детальна комп'ютерна модель системи електропостачання з ТПЧ-800 та активним фільтром

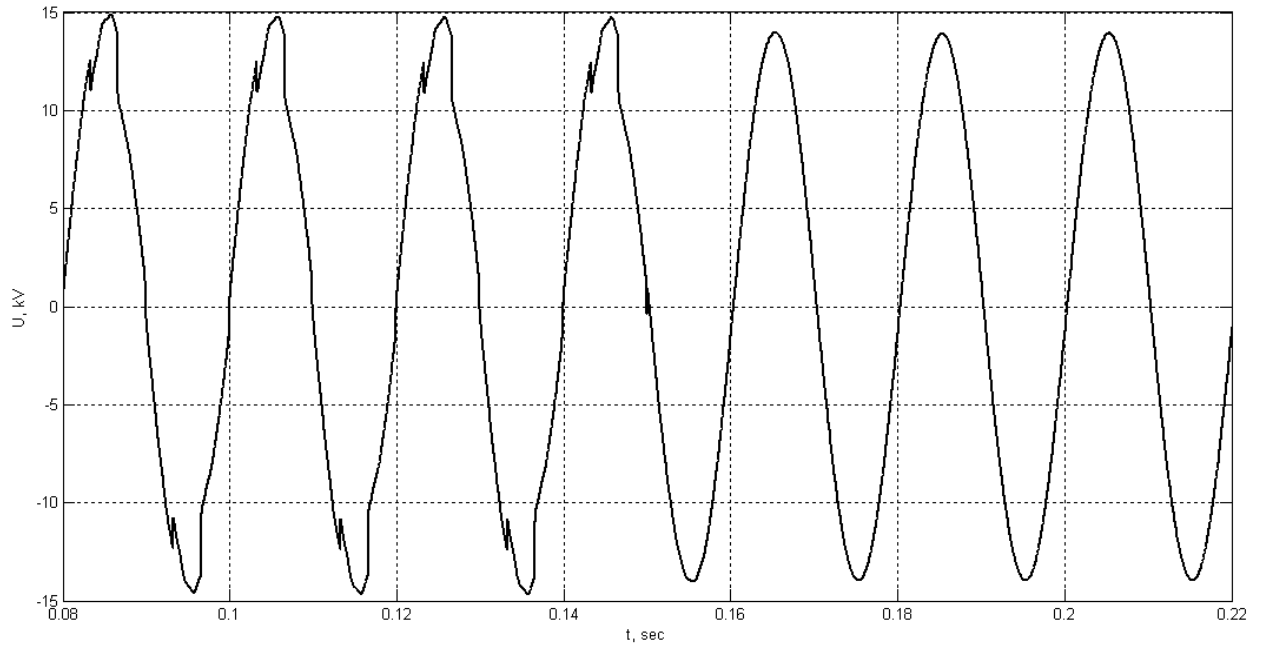


Рис. 3.15. Графік зміни напруги на шинах 10 кВ мережі

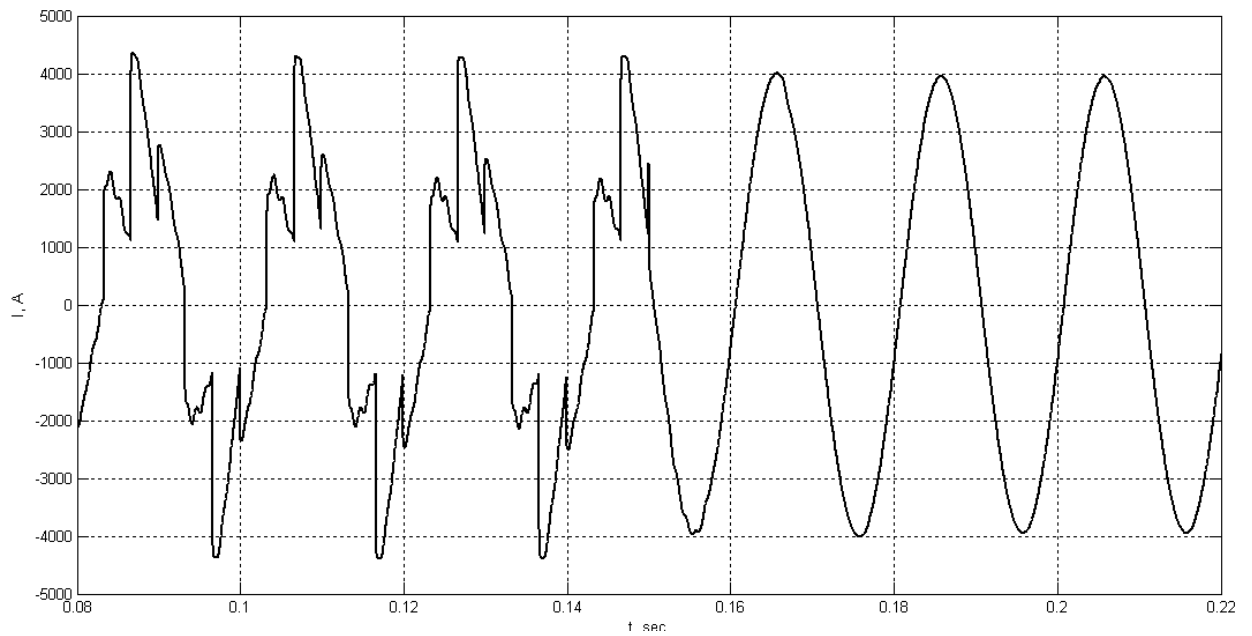


Рис. 3.16. Графік сумарного струму мережі

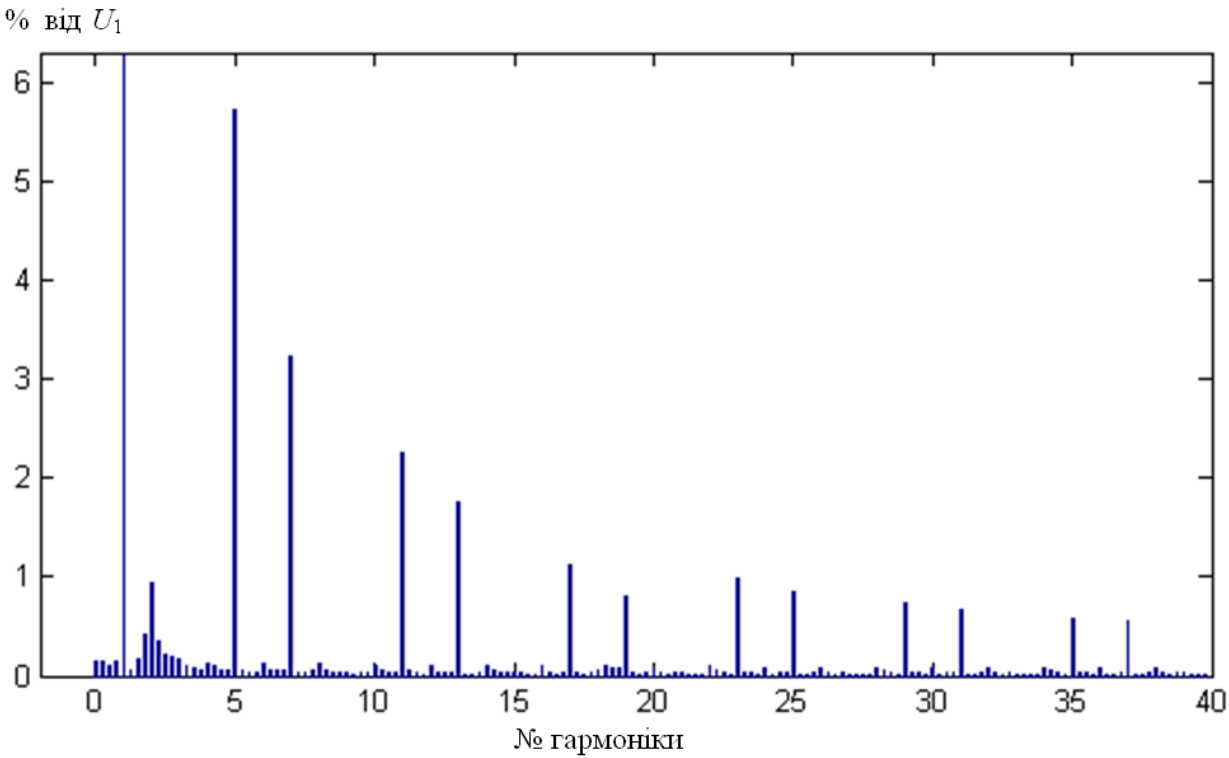


Рис. 3.17. Спектральний аналіз напруги при вимкненому активному фільтрі

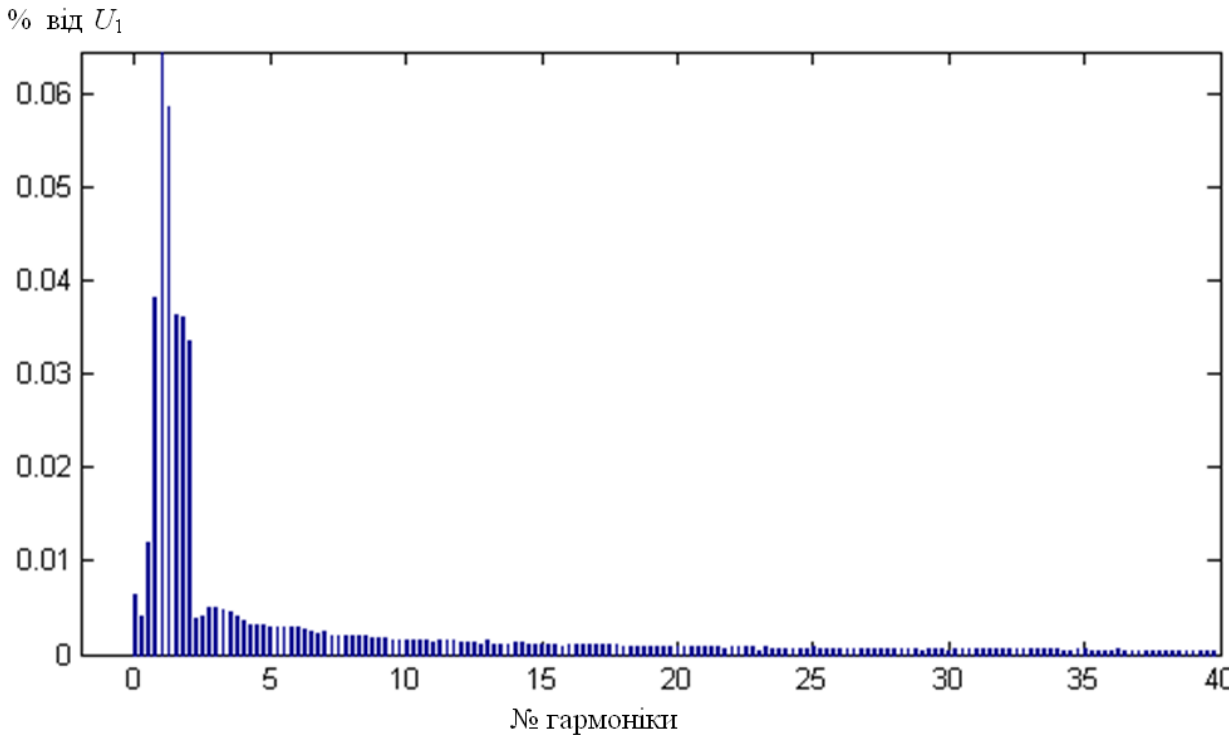


Рис. 3.18. Спектральний аналіз напруги при увімкненому активному фільтрі

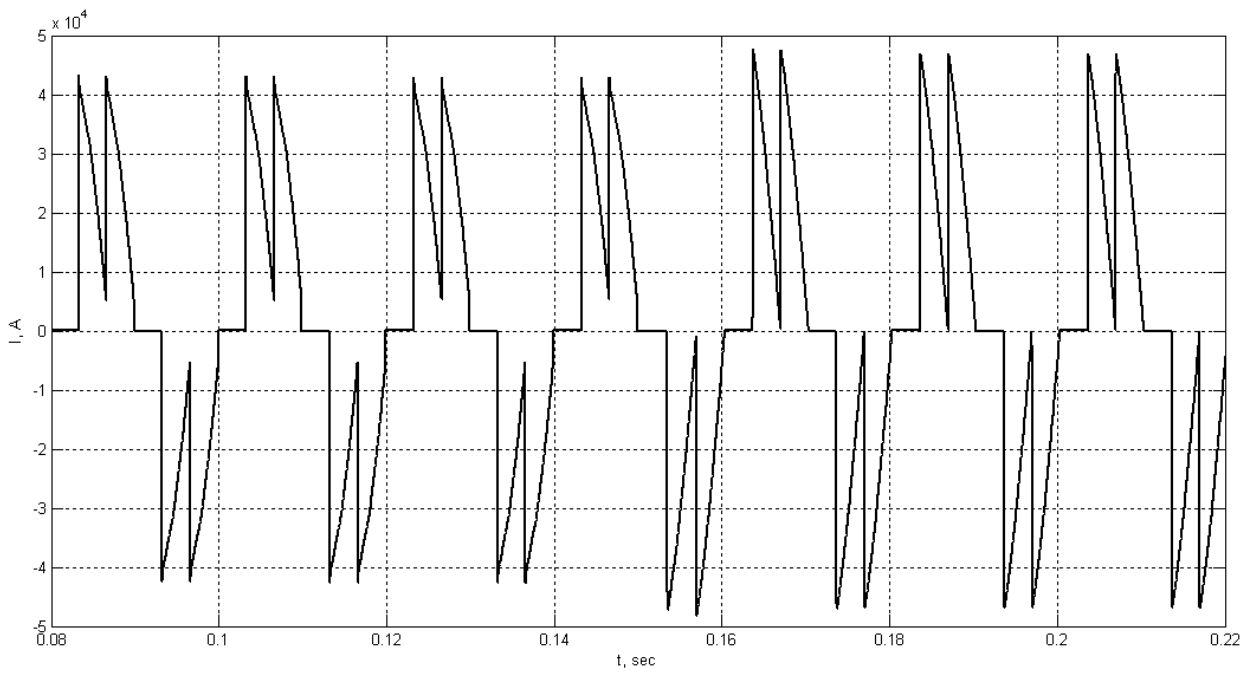


Рис. 3.19. Графік струму ТПЧ-800

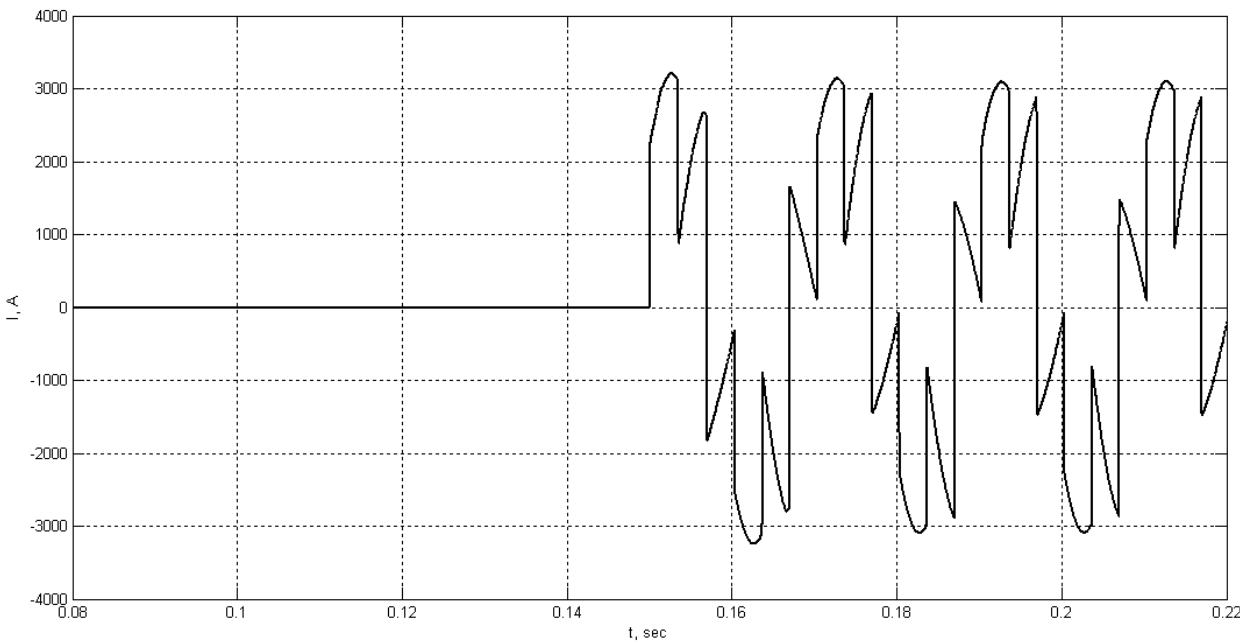


Рис. 3.20. Графік струму активного фільтру

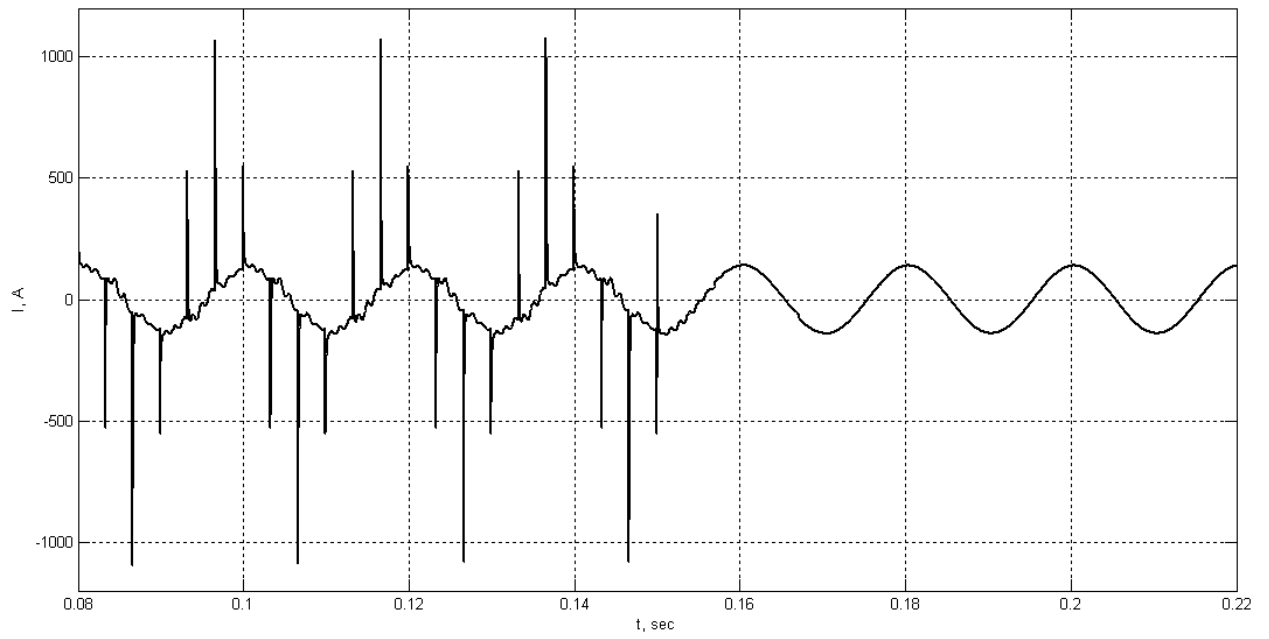


Рис. 3.21. Графік струму батареї конденсаторів напругою 10 кВ

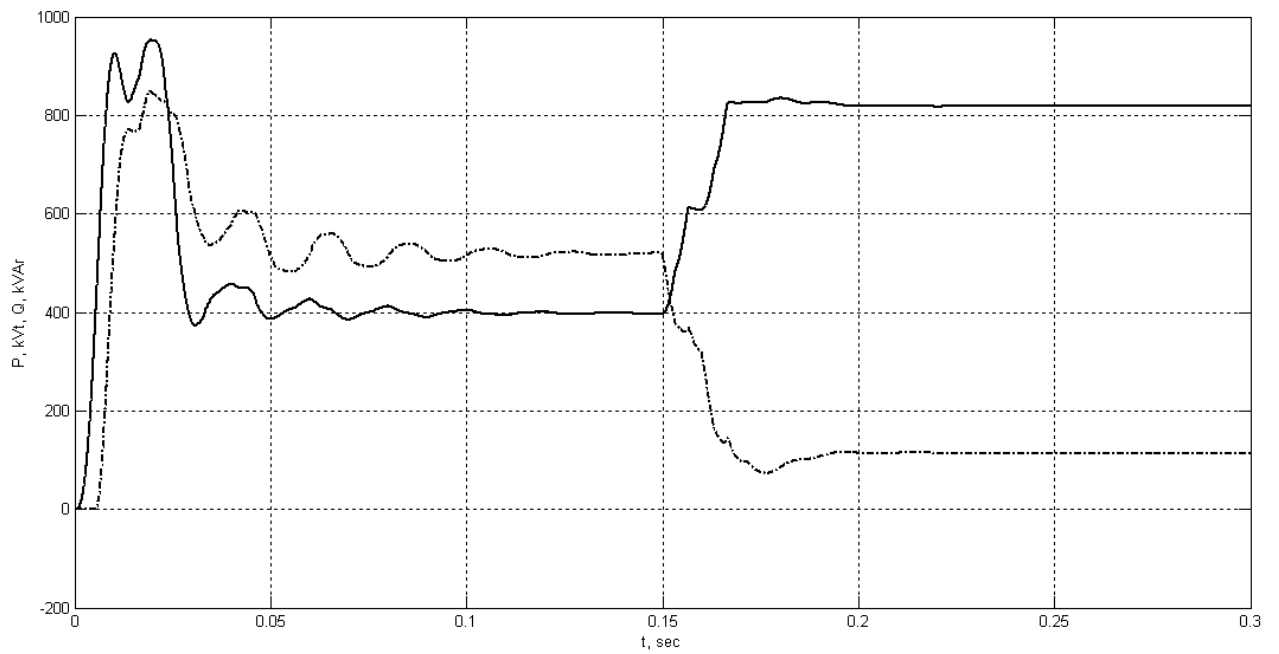


Рис. 3.22. Графік змінення споживаної активної та реактивної потужностей

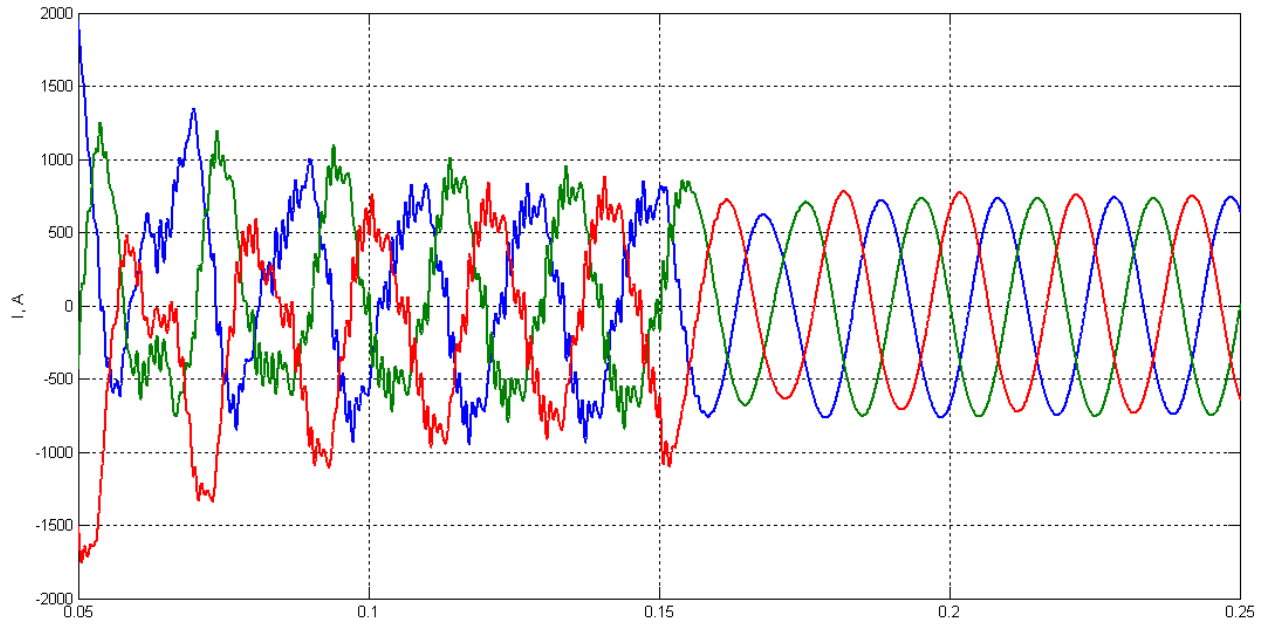


Рис. 3.23. Графік змінення струму статора АД

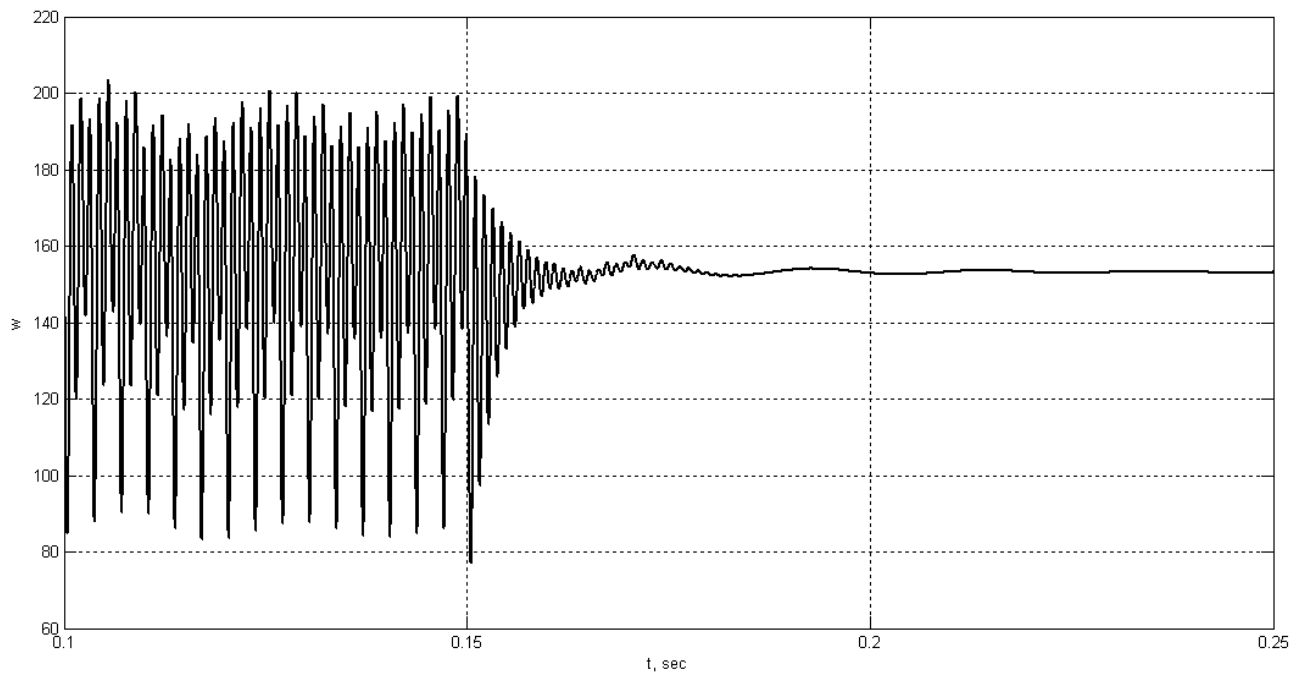


Рис. 3.24. Графік змінення швидкості обертання валу асинхронного двигуна

Висновки до розділу

1. Дослідження різних технічних рішень щодо побудови активних фільтрів виявило, що в теперішніх системах електропостачання промислових підприємств найчастіше застосовуються паралельні активні фільтри, реалізовані за схемою напівпровідникового інвертора напруги. Такі пристрої забезпечують ефективну фільтрацію вищих гармонік струму, компенсацію реактивної потужності та збалансування навантаження в трифазних мережах. Перевагами даної топології є висока швидкодія, можливість одночасної компенсації кількох параметрів якості електроенергії та гнучкість керування.

2. За допомогою комп'ютерного моделювання було створено віртуальні макети електропостачальної системи, що містить потужний тиристорний перетворювач частоти (ТПЧ-800) як джерело гармонічних спотворень. Імітаційне дослідження режимів функціонування мережі з активним фільтром дозволило виконати аналіз електромагнітних процесів при несинусоїдальних струмах та напругах. Математичне моделювання продемонструвало, що застосування активної фільтрації суттєво покращує якість електроенергії, значно зменшуючи амплітуди вищих гармонічних складових як у кривій струму, так і напруги.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

В даному розділі здійснено розрахунок параметрів блискавкозахисту і захисного заземлення обладнання.

Розрахунок охоплює визначення необхідних технічних заходів для забезпечення електричної безпеки та попередження можливих пошкоджень від атмосферних розрядів.

Результати розрахунку наведені нижче.

$$h_0 = 0,85h = 0,85 \cdot 25 = 21,25 \text{ м}$$

$$r_0 = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3}h)h = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 25) \cdot 25 = 26,25 \text{ м}$$

$$r_x = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3}h)(h - 1,2h_x) = (1,1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot 25)(25 - 1,2 \cdot 6) = 18,7 \text{ м}$$

$$h_m = h - h_0 = 25 - 21,25 = 3,75 \text{ м}$$

$$h_a = h - h_x = 25 - 6 = 19 \text{ м}$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{r_0}{h_0} = \operatorname{arctg} \frac{26,25}{21,25} = 51^\circ$$

$$\varphi = \arcsin \frac{B}{2r_x} = \arcsin \frac{100}{2 \cdot 18,7} = 69^\circ,$$

$$\cos \varphi = \cos(69^\circ) = 0,35$$

$$A = 2r_x \cos \varphi = 2 \cdot 18,7 \cdot 0,35 = 13,09 \text{ м}$$

$$A \times B \times H = 13,09 \times 100 \times 6$$

$$\begin{aligned} N &= \left[(B + 6h_x)(A + 6h) - 7,7h_x^2 \right] n \cdot 10^{-6} = \\ &= \left[(100 + 6 \cdot 6)(13,9 + 6 \cdot 6) - 7,7 \cdot 6^2 \right] \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 3,81 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

На рис. 4.1 показано ескіз зони захисту одинарного стрижневого блискавковідводу

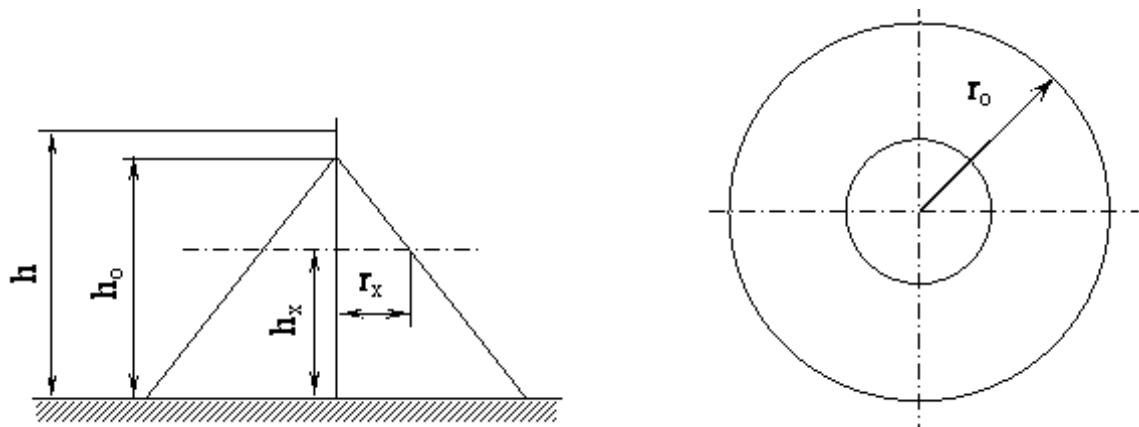


Рис. 4.1 Ескіз зони захисту одинарного стрижневого блискавковідводу

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Характеристика якості електричної енергії ґрунтується на енергетичному підході до оцінки несинусоїдальності напруги. Інтенсивність негативного впливу гармонічних спотворень на електротехнічне обладнання безпосередньо корелює з кількісними параметрами електроенергетичних показників. Важливо підкреслити, що максимально припустимі значення показників якості електроенергії формуються на основі техніко-економічного обґрунтування, яке враховує як технологічні обмеження, так і економічну доцільність впровадження заходів з покращення електропостачання.

2. Визначення рівня вищих гармонік у електричних мережах здійснюється переважно інструментальними методами з використанням спеціалізованої вимірювальної техніки. Сучасні аналізатори якості електроенергії дозволяють проводити високоточну діагностику параметрів несинусоїдальності.

3. За відсутності спеціалізованого обладнання можливе проведення практичного гармонічного аналізу шляхом детального вивчення осцилограм електричної напруги. Такий підхід передбачає використання математичних перетворень Фур'є для ідентифікації та кількісної оцінки гармонічних складових. Сучасні комп'ютерні технології дозволяють суттєво спростити процедуру аналізу, забезпечуючи високу точність та інформативність досліджень електричних мереж.

4. Сучасні електроенергетичні системи характеризуються наявністю потужних напівпровідникових перетворювачів, які є домінантними джерелами вищих гармонік. Зокрема, визначальними генераторами гармонічних спотворень виступають керовані вентильні випрямлячі з широтно-імпульсною модуляцією, перетворювачі частоти з нелінійними характеристиками, потужні напівпровідникові перетворювальні комплекси. Серед основних причин генерації вищих гармонік – нелінійні режими

перетворення електричної енергії, які супроводжуються стрибкоподібними змінами струму та напруги.

5. Аналіз спотворень форми напруги в електромережі продемонстрував ефективність впровадження фільтро-компенсуючого обладнання. Завдяки цьому технічному рішенню вдалося досягти суттєвого покращення якості електроенергії за двома ключовими параметрами: зменшився рівень гармонічних спотворень напруги та знизилось перевантаження батарей статичних конденсаторів (БСК) гармонічними складовими струму. Обидва показники тепер відповідають встановленим нормативним вимогам.

6. Верифікація ефективності фільтро-компенсуючих пристроїв була проведена за допомогою детального комп'ютерного моделювання електричної мережі в умовах несинусоїдальних режимів. Створена цифрова модель продемонструвала високу точність відтворення реальних процесів у системі електропостачання. Порівняльний аналіз показав практичну ідентичність результатів симуляції з даними, отриманими традиційними розрахунковими методами, що підтверджує надійність розробленого моделювання.

7. Дослідження централізованої фільтрації гармонічних складових виявило важливу особливість: для досягнення нормативних показників якості електроенергії у всій розгалуженій електромережі достатньо встановити фільтро-компенсуючі пристрої в одній оптимально обраній точці. Такий підхід забезпечує комплексне покращення якості напруги, при якому спостерігається зниження як коефіцієнта несинусоїдальності, так і рівня перевантаження конденсаторних батарей гармонічними струмами у всіх вузлових точках системи.

8. Дослідження різних технічних рішень щодо побудови активних фільтрів виявило, що в теперішніх системах електропостачання промислових підприємств найчастіше застосовуються паралельні активні фільтри, реалізовані за схемою напівпровідникового інвертора напруги. Такі пристрої забезпечують ефективну фільтрацію вищих гармонік струму, компенсацію

реактивної потужності та збалансування навантаження в трифазних мережах. Перевагами даної топології є висока швидкодія, можливість одночасної компенсації кількох параметрів якості електроенергії та гнучкість керування.

9. За допомогою комп'ютерного моделювання було створено віртуальні макети електропостачальної системи, що містить потужний тиристорний перетворювач частоти (ТПЧ-800) як джерело гармонічних спотворень. Імітаційне дослідження режимів функціонування мережі з активним фільтром дозволило виконати аналіз електромагнітних процесів при несинусоїдальних струмах та напругах. Математичне моделювання продемонструвало, що застосування активної фільтрації суттєво покращує якість електроенергії, значно зменшуючи амплітуди вищих гармонічних складових як у кривій струму, так і напруги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
2. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.
3. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньо-професійними програмами «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент» / [П. Г. Плешков, Н. Ю. Гарасьова, А. І. Котиш] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2017 - 48 с.
4. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). [Чинний з 1.10.2014]. - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.
5. Правила улаштування електроустановок. – К.: Мінрегіонвугілля України, 2017. – 617 с.
6. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О. І. Соловей, В. П. Розен, П. Г. Плешков та ін.]; Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Черкаси: Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.

7. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання : Підручник / І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саєнко. – Д. : Національний гірничий університет, 2009. – 319 с. : іл.
8. Особливі режими електричних мереж : Навчальний посібник / Г.Г. Півняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська. – Д. : Національний гірничий університет, 2009. – 376 с.
9. 19. Electrical Power Systems Quality – Roger C. Dugan, Surya Santoso – 2-nd Edition, - 1998 – 389 p.
10. El-Habrouk, Mohamed, M. K. Darwish, and Poonam Mehta. "Active power filters: A review." *IEE Proceedings-Electric Power Applications* 147.5 (2000): 403-413.
11. Peng, Fang Zheng. "Application issues of active power filters." *IEEE Industry applications magazine* 4.5 (1998): 21-30.
12. Li, Dayi, et al. "A comprehensive review of improving power quality using active power filters." *Electric Power Systems Research* 199 (2021): 107389.
13. Green, Tim C., and J. H. Marks. "Control techniques for active power filters." *IEE Proceedings-Electric Power Applications* 152.2 (2005): 369-381.
14. Morán, Luis, Juan Dixon, and Miguel Torres. "Active power filters." *Power electronics handbook*. Butterworth-Heinemann, 2018. 1341-1379.
15. Jacob, Anju, et al. "A review of active power filters in power system applications." *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* 3.6 (2014): 10253-10261.
16. Torrey, David A., and Adel MAM Al-Zamel. "Single-phase active power filters for multiple nonlinear loads." *IEEE Transactions on Power electronics* 10.3 (1995): 263-272.
17. Salam, Zainal, Perng Cheng Tan, and Awang Jusoh. "Harmonics mitigation using active power filter: A technological review." *Elektrika Journal of Electrical Engineering* 8.2 (2006): 17-26.
18. Jou, H-L., J-C. Wu, and H-Y. Chu. "New single-phase active power filter." *IEE Proceedings-Electric Power Applications* 141.3 (1994): 129-134.

19. Saetieo, Suttichai, Rajesh Devaraj, and David A. Torrey. "The design and implementation of a three-phase active power filter based on sliding mode control." *IEEE transactions on Industry Applications* 31.5 (1995): 993-1000.

20. Singh, Ambrish Chandra, Kamal Al-Haddad, Bhim. "Computer-aided modeling and simulation of active power filters." *Electric Machines &Power Systems* 27.11 (1999): 1227-1241.

21. Verdelho, Pedro, and G. D. Marques. "An active power filter and unbalanced current compensator." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 44.3 (1997): 321-328.