

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  
“\_\_\_” \_\_\_\_\_2022 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої**  
**освіти**  
**на тему**  
**“Дослідження методів та технічних засобів**  
**зниження рівнів несинусоїдальності напруги в**  
**системах електропостачання промислових**  
**підприємств”**

Виконав здобувач вищої освіти  
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-21МЗ-1,4  
ОПП «Електротехнічні системи  
електроспоживання»  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
\_\_\_\_\_Олександр ГУРТОВИЙ  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_2022 р.  
Керівник роботи  
канд. техн. наук, доцент  
\_\_\_\_\_Василь ЗІНЗУРА  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_2022 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.

«    »                      2022 р.

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

Гуртового Олександра Леонідовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження методів та технічних засобів зниження рівнів несинусоїдальності напруги в системах електропостачання промислових підприємств

Research of methods and technical means of reducing non-sinusoidal voltage levels in power supply systems of industrial enterprises

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 01.12.2022 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є дослідження методів і технічних засобів зниження рівнів несинусоїдальності напруги в системах електропостачання промислових підприємств. Завдання роботи: 1. Провести аналіз причин зниження якості електричної енергії в СЕПП. 2. Провести дослідження методик вибору сучасних технічних засобів зниження рівнів несинусоїдальності напруги. 3. Провести комп'ютерне моделювання режимів роботи СЕПП з технічними засобами зниження рівнів несинусоїдальності напруги.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

| Розділ                                 | Консультант                       | Підпис, дата   |                  |
|----------------------------------------|-----------------------------------|----------------|------------------|
|                                        |                                   | Завдання видав | Завдання прийняв |
| <i>Науково-дослідна частина роботи</i> | <i>к.т.н., проф. Плєшков П.Г.</i> |                |                  |
| <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>                                                                                  | 4.10.22                       |          |
| 2     | <i>Проблема якості електроенергії в системах електропостачання</i>                            |                               |          |
| 3     | <i>Дослідження режимів роботи систем електропостачання з фільтро-компенсуючими пристроями</i> | 14.10.22                      |          |
| 4     | <i>Застосування активних фільтрів для зменшення рівнів вищих гармонік в СЕПП</i>              | 5.11.22                       |          |
| 5     | <i>Охорона праці</i>                                                                          | 5.11.22                       |          |
| 6     | <i>Висновки</i>                                                                               | 21.11.22                      |          |
| 7     | <i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>                                                    | 25.11.22                      |          |
| 8     | <i>Оформлення презентаційної частини КР</i>                                                   | 29.11.22                      |          |

Дата видачі завдання

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

Підпис керівника \_\_\_\_\_

Завдання прийнято до виконання

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

Підпис здобувача \_\_\_\_\_

## АНОТАЦІЯ

**Гуртовий О. Л. Дослідження методів та технічних засобів зниження рівнів несинусоїдальності напруги в системах електропостачання промислових підприємств.**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2022 р.

Метою роботи є дослідження методів і технічних засобів зниження рівнів несинусоїдальності напруги в системах електропостачання промислових підприємств.

Проведений розрахунок рівнів несинусоїдальності напруги в системі електропостачання промислового підприємства показав, що застосування фільтро-компенсуючих пристроїв дозволяє знизити значення коефіцієнту несинусоїдальності та коефіцієнту перевантаження батарей статичних конденсаторів струмами вищих гармонік до нормально допустимих рівнів.

Результати комп'ютерного моделювання несинусоїдальних режимів роботи системи електропостачання промислового підприємства з фільтро-компенсуючими пристроями засвідчили їх дієвість як засобу покращення якості електроенергії. Аналіз результатів моделювання засвідчив адекватність розробленої моделі, а результати, отримані шляхом її використання є достовірними і практично збігаються з результатами розрахунку рівнів несинусоїдальності напруги за загальноприйнятою методикою.

**Ключові слова:** вищі гармоніки напруги, фільтро-компенсуючі пристрої, якість електричної енергії

## THE SUMMARY

**Hurtovyi O. L. Research of methods and technical means of reducing non-sinusoidal voltage levels in power supply systems of industrial enterprises.**

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Electrical power consumption systems". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2022

The calculation of non-sinusoidal voltage levels in the power supply system of an industrial enterprise showed that the use of filter-compensating devices allows to reduce the value of the non-sinusoidal coefficient and the overload coefficient of static capacitor batteries with currents of higher harmonics to normally permissible levels.

The results of computer modeling of non-sinusoidal modes of operation of the power supply system of an industrial enterprise with filter-compensating devices proved their effectiveness as a means of improving the quality of electricity. The analysis of the simulation results proved the adequacy of the developed model, and the results obtained by using it are reliable and practically coincide with the results of calculating the levels of non-sinusoidal voltage according to the generally accepted methodology.

**Keywords:** higher voltage harmonics, filter-compensating devices, quality of electrical energy

## ЗМІСТ

|                                                                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,<br/>СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....</b>                                   | <b>7</b>   |
| <b>ВСТУП.....</b>                                                                                                     | <b>8</b>   |
| <b>РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ<br/>В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....</b>                                | <b>11</b>  |
| 1.1 Нормування ПЯЕ, що оцінюють рівень несинусоїдальності напруги .....                                               | 11         |
| 1.2 Вимірювання несинусоїдальності напруги в СЕПП .....                                                               | 13         |
| 1.3 Джерела вищих гармонік напруги в СЕПП.....                                                                        | 18         |
| Висновки до розділу .....                                                                                             | 27         |
| <b>РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ<br/>ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ФІЛЬТРО-КОМПЕНСУЮЧИМИ<br/>ПРИСТРОЯМИ .....</b> | <b>28</b>  |
| 2.1 Розрахунок рівнів несинусоїдальності напруги в СЕПП та вибір ФКП ...                                              | 28         |
| 2.2 Комп'ютерне моделювання режимів СЕПП з джерелами<br>вищих гармонік та ФКП .....                                   | 39         |
| 2.3 Централізована компенсація вищих гармонік .....                                                                   | 53         |
| Висновки до розділу .....                                                                                             | 74         |
| <b>РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ<br/>ЗМЕНШЕННЯ РІВНІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК В СЕПП.....</b>                   | <b>76</b>  |
| 3.1 Будова і принцип дії АФ.....                                                                                      | 76         |
| 3.2 Комп'ютерне моделювання режимів роботи СЕПП з АФ.....                                                             | 82         |
| Висновки до розділу .....                                                                                             | 96         |
| <b>РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ .....</b>                                                                                  | <b>97</b>  |
| <b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>                                                                                         | <b>100</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>                                                                               | <b>102</b> |

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

**ФКП** – фільтрокомпенсуючий пристрій

**СЕПП** – система електропостачання промислового підприємства;

**ТПЧ** – тиристорний перетворювач частоти

**ПЛ** – повітряна лінія електропередачі

**ЛЕП** – лінія електропередачі

**КЛ** – кабельна лінія

**ГФ** – гібридний фільтр

**АФ** – активний фільтр вищих гармонік

## ВСТУП

Зростання встановленої потужності нелінійних та несиметричних навантажень промислових підприємств призвело підвищення вимог до питання якості електроенергії в СЕПП. Викликані такими споживачами електромагнітні завади негативно впливають на електроустановки, системи релейного захисту, автоматики та ін.. В ряді випадків це викликає зниження надійності електропостачання та призводить до збільшення втрат електроенергії, погіршення якості виробленої продукції. Ці обставини обумовлюють актуальність та практичну значимість питання якості електроенергії в СЕПП.

Основний зміст проблеми якості електроенергії в СЕПП полягає в наступному:

- оцінювання електромагнітної сумісності джерел електромагнітних завад, оцінка впливу низькочастотних електромагнітних завад на електроспоживачів;
- оцінювання рівнів електромагнітних завад, які генеруються різними нелінійними навантаженнями та прогнозування їх значень у вузлах СЕПП;
- мінімізація рівнів електромагнітних завад до нормально допустимих рівнів.

Розглядаючи питання якості електроенергії, можна виділити такі її основні аспекти: розрахунковий, нормативний, економічний і технічний.

Для зниження негативного впливу нелінійних навантажень на якість електроенергії зазвичай застосовують спеціальні технічні засоби. Проте, вибір того чи іншого технічного засобу покращення якості електроенергії залежить від конфігурації СЕПП та наявних в ній електроустановок, і, як правило, вимагає проведення ґрунтовних досліджень з цього питання.

Зважаючи на вищесказане, задача дослідження методів та технічних засобів зниження рівнів несинусоїдальності напруги в СЕПП є досить актуальною.

**Мета і задачі роботи.** Метою роботи є дослідження методів і технічних засобів зниження рівнів несинусоїдальності напруги в системах електропостачання промислових підприємств.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити наступні задачі:

1. Провести аналіз причин зниження якості електричної енергії в СЕПП.
2. Провести дослідження методик вибору сучасних технічних засобів зниження рівнів несинусоїдальності напруги.
3. Провести комп'ютерне моделювання режимів роботи СЕПП з технічними засобами зниження рівнів несинусоїдальності напруги.

**Об'єктом дослідження** є явище погіршення якості електроенергії в СЕПП.

**Предмет дослідження** – процес збільшення значень рівнів несинусоїдальності напруги в СЕПП.

**Методи дослідження.** Вирішення поставлених в роботі задач відбувалося шляхом використання методів комп'ютерного моделювання, чисельних методів розв'язку задач, теорії електричних кіл.

**Основні наукові результати роботи:**

1. Визначено основні причини спотворення синусоїдальності форми кривої напруги в СЕПП.
2. Обґрунтовано доцільність застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв і активних фільтрів для здійснення корекції форми кривої напруги у вузлах СЕПП.

**Основні практичні результати:**

- розроблено комп'ютерну модель СЕПП з джерелами вищих гармонік, яка дозволяє здійснювати кількісний аналіз рівнів вищих гармонік, що генеруються тиристорними перетворювачами частоти

- створено комп'ютерну імітаційну модель СЕПП з ФКП та АФ, яка дозволяє проводити аналіз режимів її роботи.

**Загальна характеристика наукової роботи.** Кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 103 сторінки. Основна частина викладена на 94 сторінках друкованого тексту, містить 71 рисунок та 18 таблиць. Список використаних джерел містить 19 джерел та викладений на 2 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### ПРОБЛЕМА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

В сучасних СЕПП питання якості електроенергії постає досить гостро. Дослідження проблеми якості електроенергії повинне включати в себе:

- дослідження питання нормування ПЯЕ;
- дослідження методик розрахунку та вимірювання значень ПЯЕ;
- дослідження причин погіршення якості електроенергії.

Вирішенню описаних задач і присвячений перший розділ роботи.

#### **1.1 Нормування ПЯЕ, що оцінюють рівень несинусоїдальності напруги**

Нормування показників якості електроенергії (ПЯЕ) – це одне з головних питань проблеми якості електричної енергії. Систему ПЯЕ утворюють кількісні характеристики швидких (коливання) та повільних (відхилення) змін діючого значення напруги, його симетрії і форми, а також частоти. Принципи нормування ПЯЕ засновуються на техніко-економічних передумовах, а саме:

- ПЯЕ носять енергетичний зміст, тобто кількісно характеризують потужність спотворення кривої напруги. Ступінь негативного впливу потужності спотворення на обладнання пропорційна до значень ПЯЕ;
- гранично допустимі значення ПЯЕ вибираються із техніко-економічних розрахунків;
- для отримання достовірних значень нормування ПЯЕ відбувається протягом деякого періоду часу із заданою ймовірністю;

Система ПЯЕ, що базується на цих передумовах, може бути використана і в проектній практиці. Ця система дозволяє здійснити метрологічне забезпечення контролю якості електричною енергією шляхом

використання простих та недорогих приладів, та реалізувати технічні засоби нормалізації якості електроенергії.

Основним документом, що регламентує питання якості електроенергії в електричних мережах України є ДСТУ EN 50160-2014. В даному стандарті визначені наступні показники, що характеризують спотворення синусоїдальності форми кривої напруги (несинусоїдальності):

- коефіцієнт  $\nu$ -ї вищої гармоніки  $K_{U(\nu)}$ ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ .

Значення  $K_U$  визначається відношенням діючого значення вищих гармонічних складових напруги  $U_\nu$  до значення напруги основної гармоніки  $U_1$  (або до значення номінальної напруги  $U_{ном}$ ):

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

де  $U_\nu$  – діюче (середньоквадратичне) значення напруги  $\nu$ -ї гармонічної складової;

$n$  – номер останньої гармоніки, яка враховується.

Крім  $K_U$  ДСТУ EN 50160-2014 нормує значення коефіцієнту  $\nu$ -ї гармоніки напруги:

$$K_{U(\nu)} = \frac{U_\nu}{U_1} \cdot 100 \quad (1.2)$$

## 1.2. Вимірювання несинусоїдальності напруги в СЕПП

Для оцінки рівнів вищих гармонік напруги застосовується апаратний аналіз, що заснований на використанні спеціальних приладів-аналізаторів. У випадку відсутності спеціалізованих приладів аналіз рівнів несинусоїдальності напруги можливо проводити шляхом використання практичного гармонічного аналізу осцилограм напруги.

Практичний гармонічний аналіз осцилограм напруги базується на заміні визначених інтегралів в виразах для визначення коефіцієнтів ряду Фур'є на кінцеві суми:

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

де  $m$  – кількість інтервалів;

$u(t_i)$ ,  $\theta_i$  – ордината та кут, які відповідають  $i$ -му інтервалу.

Під час вибору кількості інтервалів керуються числом вищих гармонік, амплітуди яких потрібно визначити.

Для вимірювання вищих гармонік напруги спеціалізовані прилади приєднуються згідно схем, наведених на рис. 1.1.

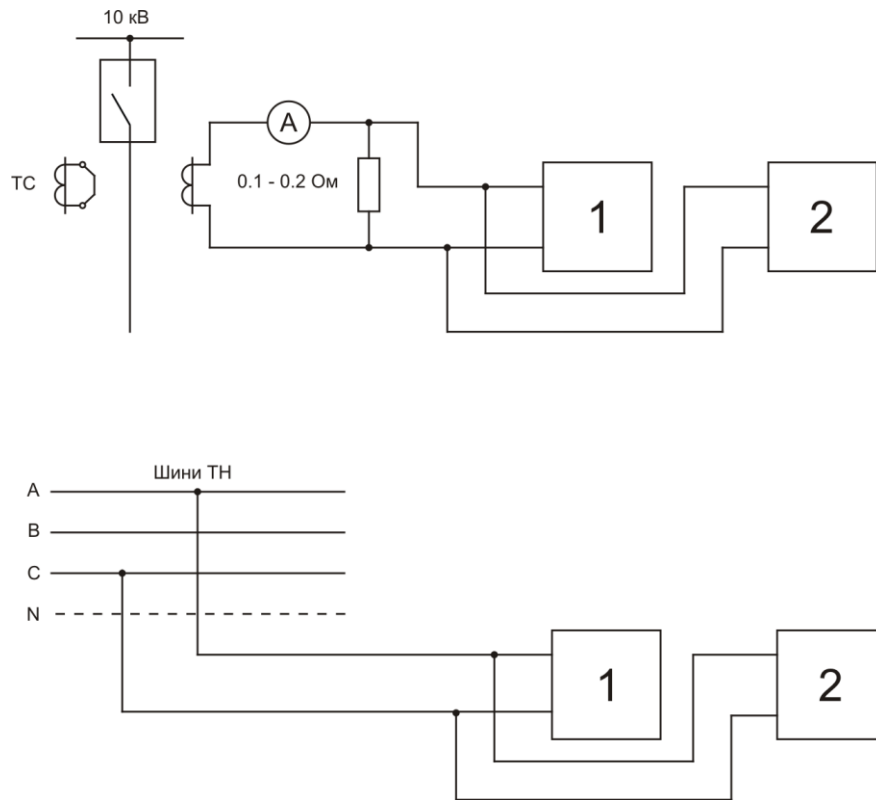


Рис. 1.1. Схеми приєднання приладів вимірювання вищих гармонік напруги

Безтрансформаторна схема вимірювання вищих гармонійних складових фазної напруги в СЕПП напругою 10 кВ приведена на рис. 1.2.

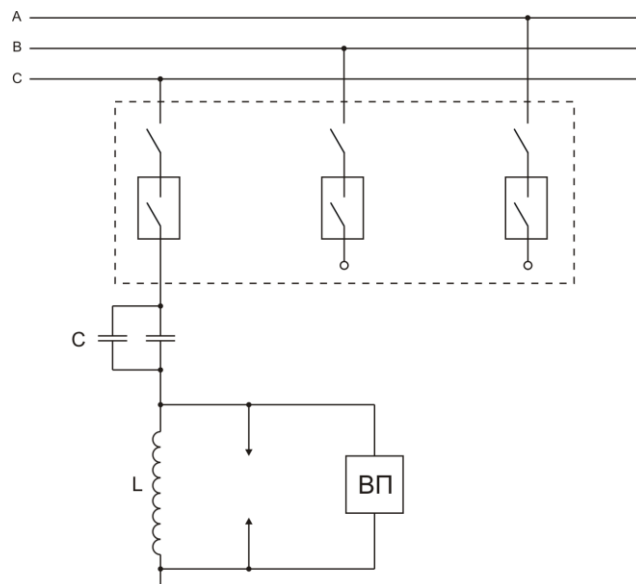


Рис. 1.2. Безтрансформаторна схема вимірювання вищих гармонік напруги в СЕПП напругою 10 кВ

В схемі на рис. 1.2 використовується магазин індуктивностей, який дає змогу регулювати індуктивність в діапазоні  $0,1 \dots 111$  мГн.

Коефіцієнт передачі пристрою

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

В теперішній час світовою промисловістю виробляється широкий асортимент приладів вимірювання рівнів вищих гармонік та розрахунку  $K_u$ . Тому описаний практичний гармонічний аналіз осцилограм застосовується досить рідко. В останній час набули розповсюдження цифрові прилади, що призначені для проведення спектрального аналізу напруги та струму. Структурна схема приладу, який реалізує алгоритм розрахунку квадратурних складових вищих гармонік напруги приведена на рис. 1.3.

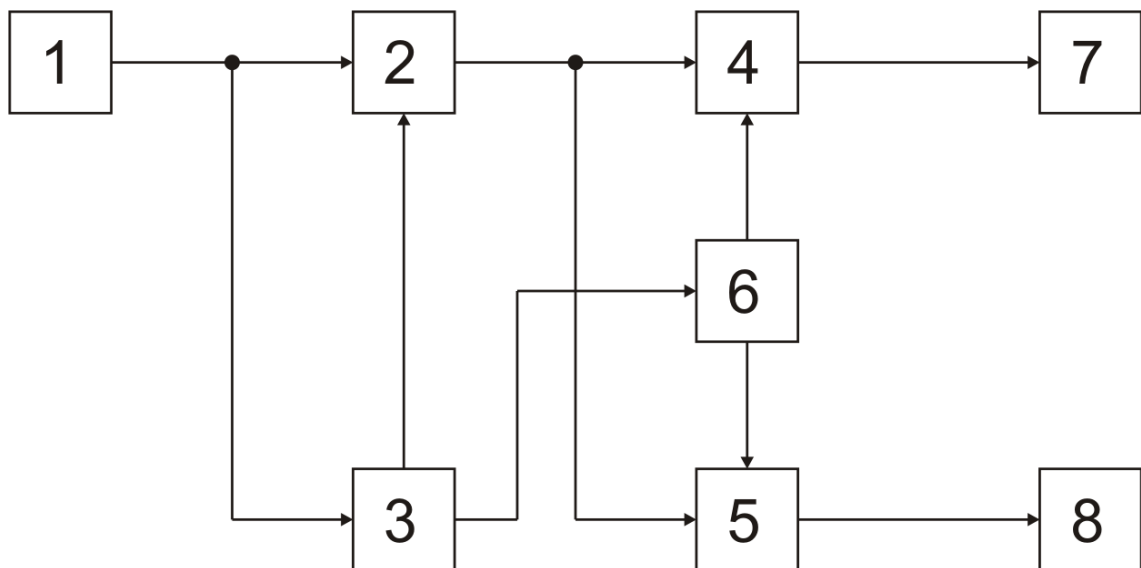


Рис. 1.3. Схема приладу для розрахунку квадратурних складових вищих гармонік напруги

Можливі також інші реалізації цифрових приладів, які призначені для визначення амплітуд вищих гармонік напруги.

Алгоритм швидкого перетворення Фур'є дозволяє суттєво зменшити час, що витрачається на гармонічний аналіз. Використання цього алгоритму доцільне у випадку великої кількості розбиттів кривої на інтервалі. Цей алгоритм знайшов широке розповсюдження не лише в апаратно реалізованих спеціалізованих приладах, але і в пакетах прикладних програм, призначених в тому числі і для проведення гармонічного аналізу осцилограм напруги.

При розробці аналізаторів спектру широко застосовується ідея послідовного аналізу, яка базується на переміщенні досліджуваного спектру, вздовж шкали частот відносно певної фіксованої (резонансної) частоти. Таке переміщення спектру досягається за рахунок перемноження кривої напруги або струму  $u_n$  на синусоїдальну напругу, в якій частота змінюється з плинном часу  $u_c$ .

У випадку, коли миттєві значення  $u_n$  і  $u_c$  мають вигляд

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

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

то їх добуток дорівнюватиме

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

і являє собою спектр аналізованого сигналу для кожної гармонічної складової у вигляді двох бічних частот, що симетричні у відношенні до несучої частоти  $\Omega$ .

Границі вимірювання частоти обираються таким чином, щоб одна з бічних частот результуючого спектру пройшла через частоту фільтрів.

Аналізатори гармонік використовуються для вимірювань діючих значень вищих гармонік напруги. Принцип дії аналізаторів гармонік базується на гетеродинному методі.

Структурна схема аналізатора вищих гармонік напруги показана на рис. 1. 4.

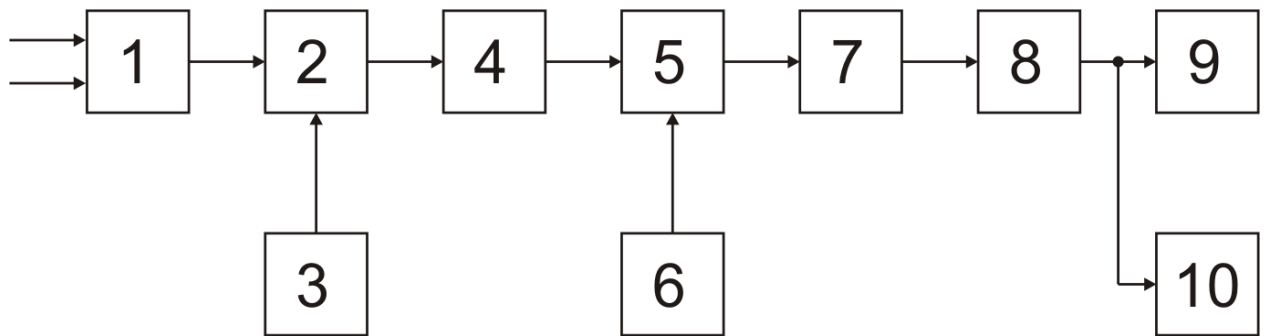


Рис. 1.4. Структурна схема аналізатора вищих гармонік

Схема, що зображена на рис. 1.4 складається з таких елементів:

- 1 – вхідний пристрій;
- 2, 5 – змішувачі;
- 3, 6 – гетеродини;
- 4, 8 – підсилювачі проміжної частоти;
- 7 – фільтр низької частоти;
- 9 – вольтметр;
- 10 – пристрій реєстрації.

Похибка вимірювання вищих гармонік гетеродинними аналізаторами не перевищує 710 % при  $\nu = 2...50$ .

В теперішній час отримали значне поширення комплексні технічні засоби вимірювання ПЯЕ.

### 1.3 Джерела вищих гармонік напруги в СЕПП

Причиною появи вищих гармонік напруги в СЕПП є нелінійні навантаження, що спотворюють синусоїдальність форми кривої струму. Струм, протікаючи елементами СЕПП спричиняє несинусоїдальні спади напруги в них. В результаті цього спотворюється форма кривої напруги.

На сучасних підприємствах широке розповсюдження отримали перетворювачі частоти, які являються однією із основних причин спотворення напруги. Найбільшого розповсюдження набули трьохфазні мостові вентильні перетворювачі.

Проведемо аналіз амплітудного спектру струму мостового перетворювача. Форма кривої його струму залежить від кута управління  $\alpha$ , (що визначається системою імпульсно-фазового керування) та кута комутації  $\gamma$ :

$$\gamma = \arccos(\cos \alpha - I_{d^*} X_{K^*}) \quad (1.8)$$

де  $I_{d^*}$  – відносне значення струму;

$X_{K^*}$  – відносне приведенне значення опору індуктивного контуру комутації.

Для некерованого перетворювача  $\alpha = 0$ ,  $\cos \alpha = 1$ .

Порядок вищих гармонік струму, що генеруються керованим випрямлячем визначається за формулою:

$$\nu = kp \pm 1 \quad (1.9)$$

де  $p$  – пульсність перетворювача;

$k \in \mathbb{N}$ ;

Для мостового перетворювача, з  $p = 6$ , значення  $v = 5; 7; 11; 13; 17; 19...$

Розглянемо більш детально амплітудний спектр струмів, які генеруються шести та дванадцятипульсними керованими вентилями перетворювачами.

На рис. 1.5 приведена комп'ютерна модель Simulink, що містить шестипульсний тиристорний перетворювач, який працює на активне електричне навантаження, а також системи імпульсно-фазного керування.

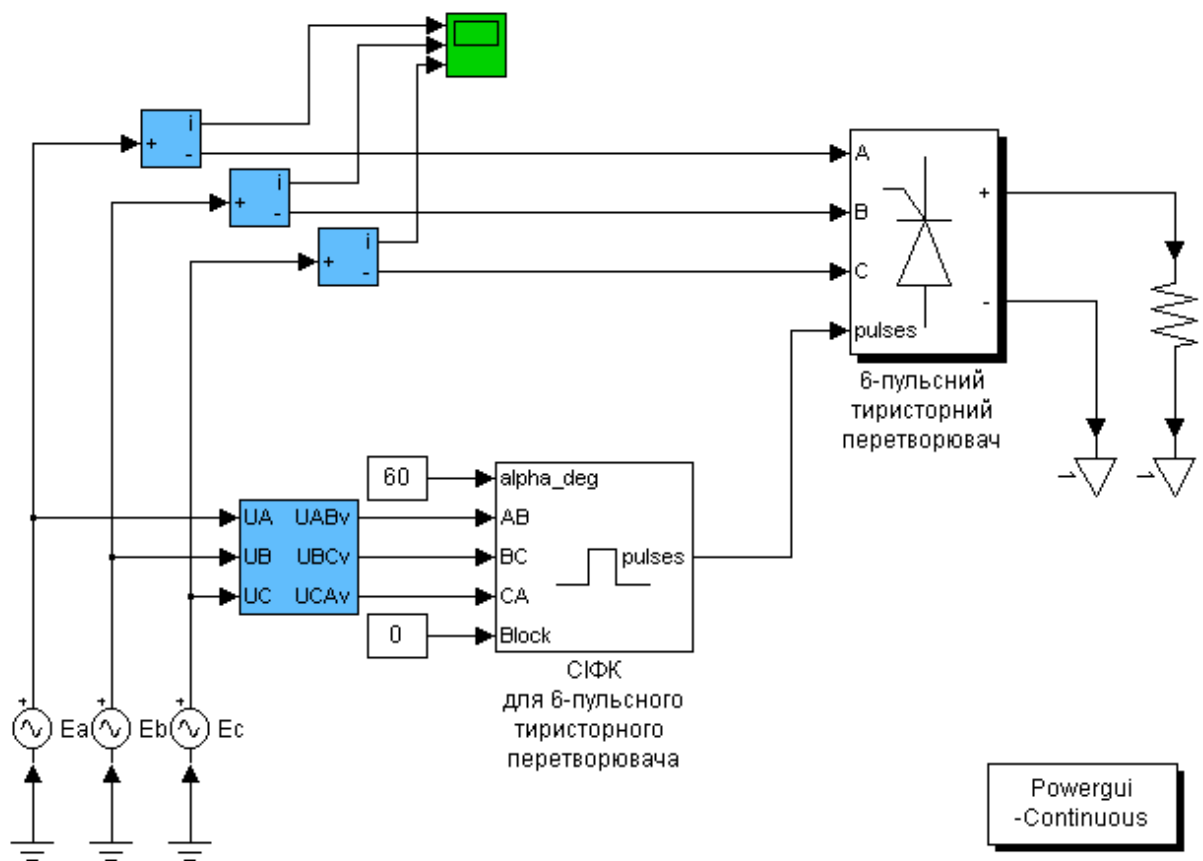


Рис. 1.5. Модель шестипульсного тиристорного перетворювача

Осцилограми струму, які отримані для різних значень кутів  $\alpha$  наведені на рис. 1.6 – 1.8.

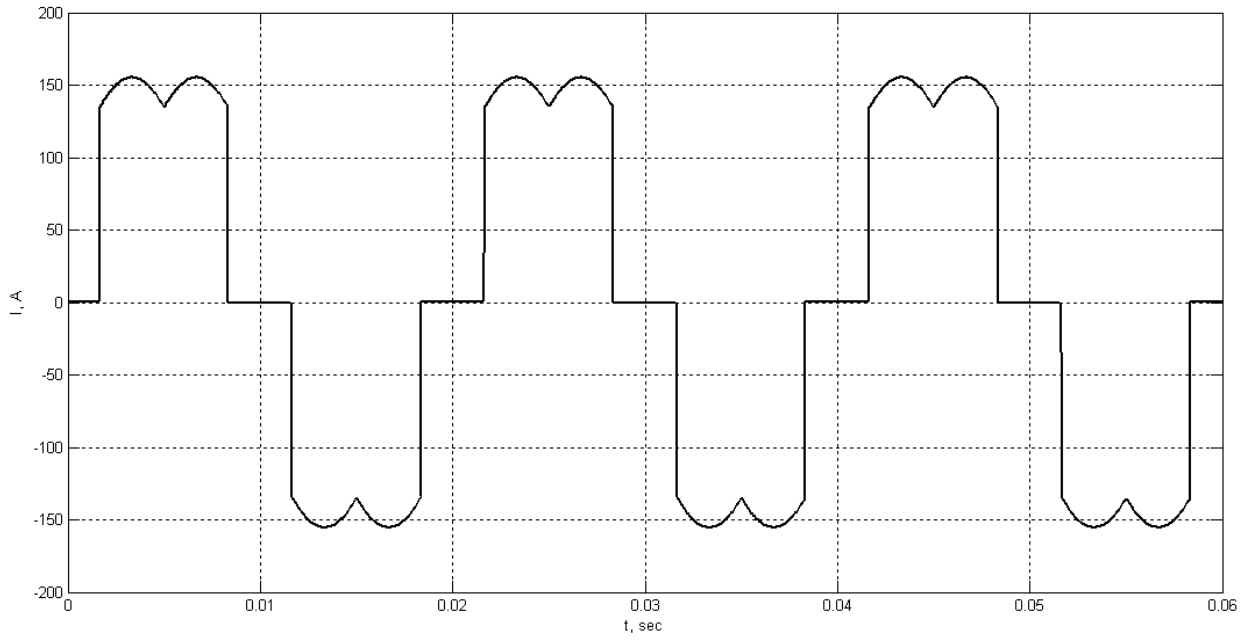


Рис. 1.6. Осциллограмма струму шестипульсного ВП ( $\alpha = 0^\circ$ )

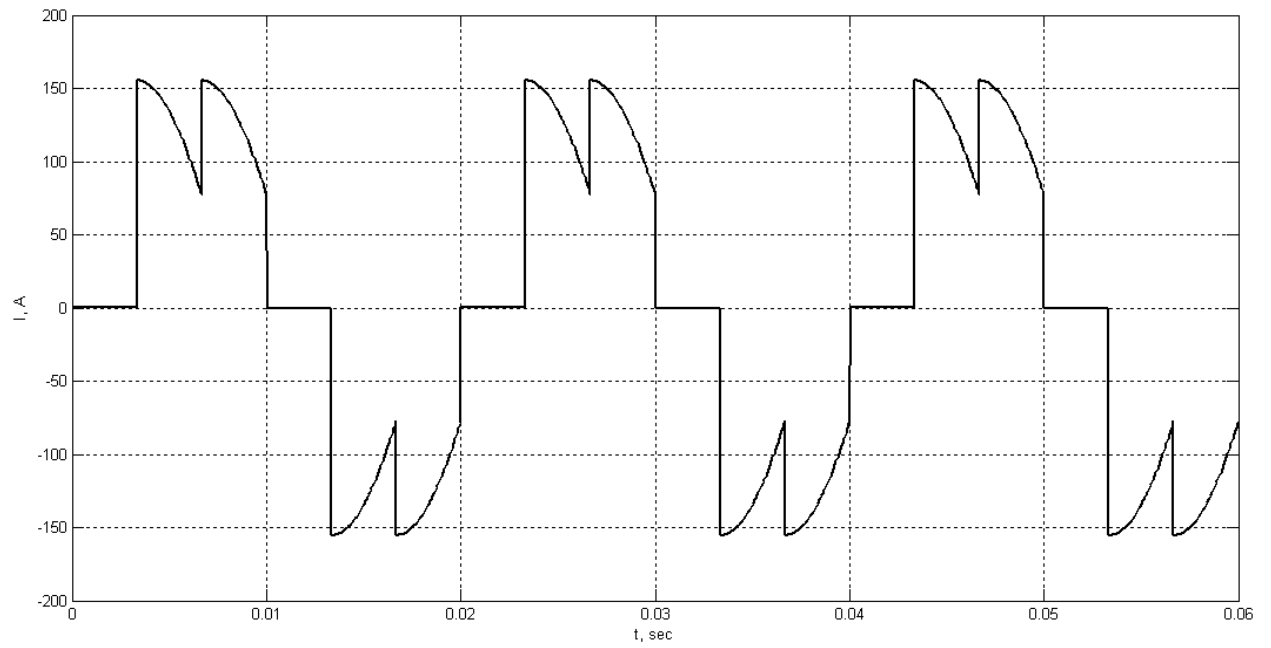


Рис. 1.7. Осциллограмма струму шестипульсного ВП ( $\alpha = 30^\circ$ )

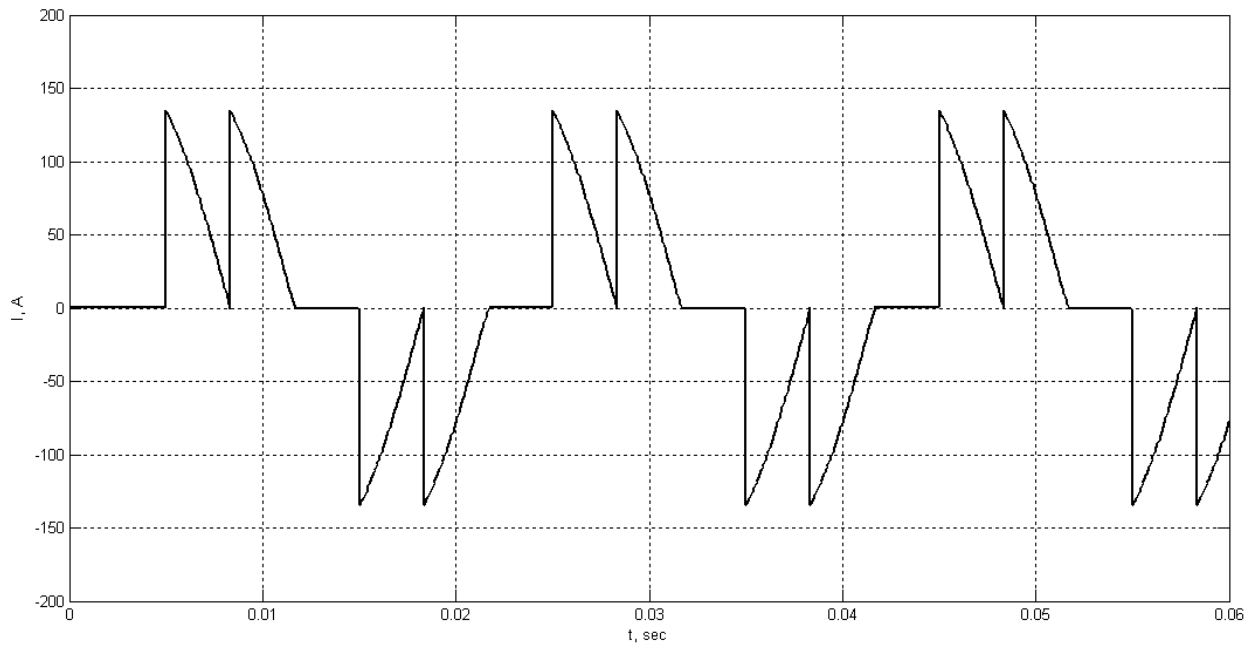


Рис. 1.8. Осцилограма струму шестипульсного ВП ( $\alpha = 60^\circ$ )

Результати спектрального аналізу струму ВП приведені в таблиці 1.2

Таблиця 1.2. Результати спектрального аналізу струму шестипульсного ВП

| $\alpha, ^\circ$ | Значення гармонік струму, % |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                  | № 5                         | № 7  | № 11 | № 13 | № 17 | № 19 | № 23 | № 25 |
| 0                | 22,6                        | 11,3 | 9,0  | 6,5  | 5,7  | 4,5  | 4,1  | 3,5  |
| 15               | 23,4                        | 11,7 | 9,4  | 6,7  | 5,8  | 4,7  | 4,2  | 3,6  |
| 30               | 26,2                        | 13,0 | 10,5 | 7,4  | 6,6  | 5,2  | 4,8  | 4,0  |
| 45               | 33,4                        | 14,9 | 12,6 | 9,4  | 7,3  | 7,0  | 5,8  | 4,9  |
| 60               | 45,4                        | 25,4 | 17,6 | 12,8 | 11,7 | 9,9  | 8,0  | 6,9  |
| 75               | 91,2                        | 83,2 | 61,8 | 52,8 | 41,5 | 36,8 | 32,2 | 29,3 |

Графіки залежностей вищих гармонік струму від  $\alpha$  показані на рис. 1.9.

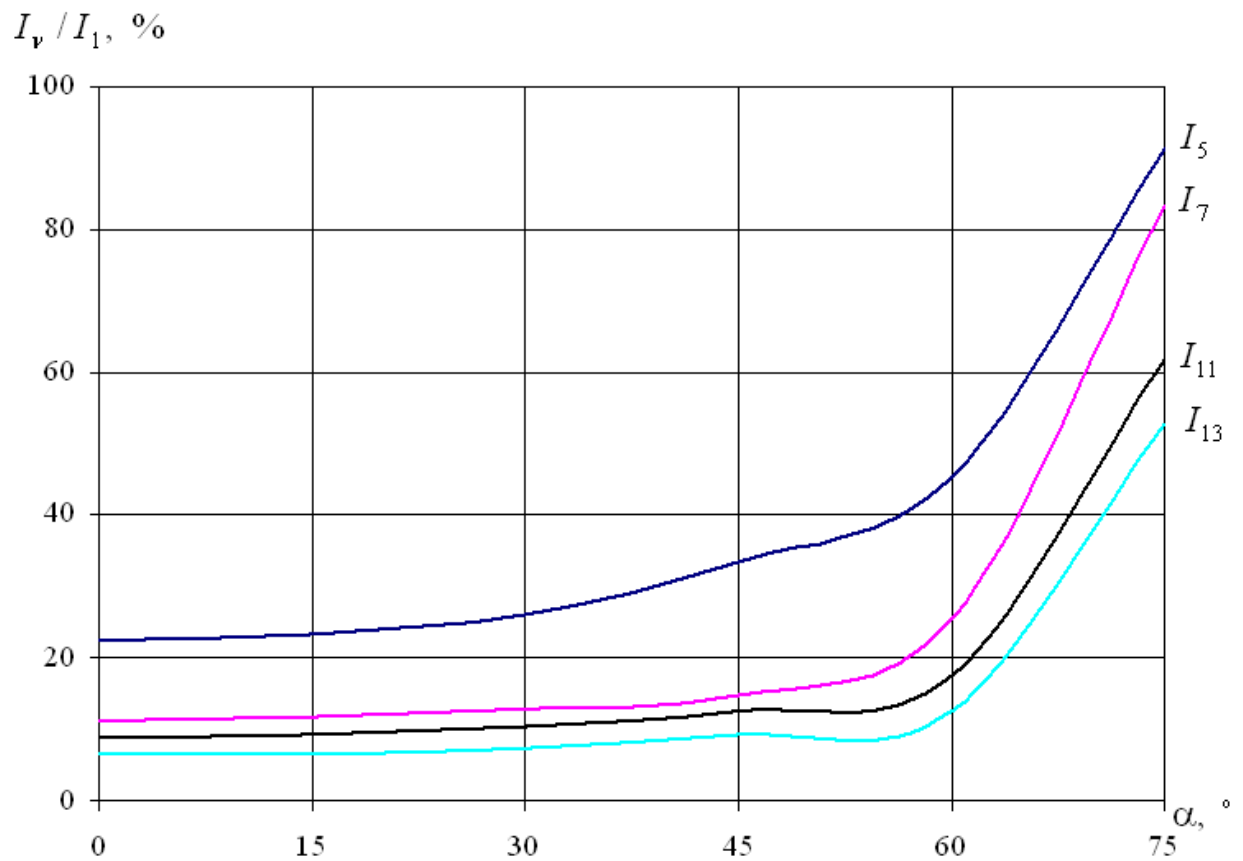


Рис. 1.9. Графіки залежності вищих гармонік струму  
шестипульсного ВП від  $\alpha$

Проаналізувавши графіки на рис. 1.9, можна побачити, що спостерігається суттєве зростання рівнів вищих гармонік струму при  $\alpha > 60^\circ$

Комп'ютерне моделювання схеми ВП з дванадцятипульсним випрямлячем (рис. 1.10) здійснювалось аналогічним чином. Результати комп'ютерного моделювання наведені на рис. 1.11 – 1.14 і в табл. 1.3.

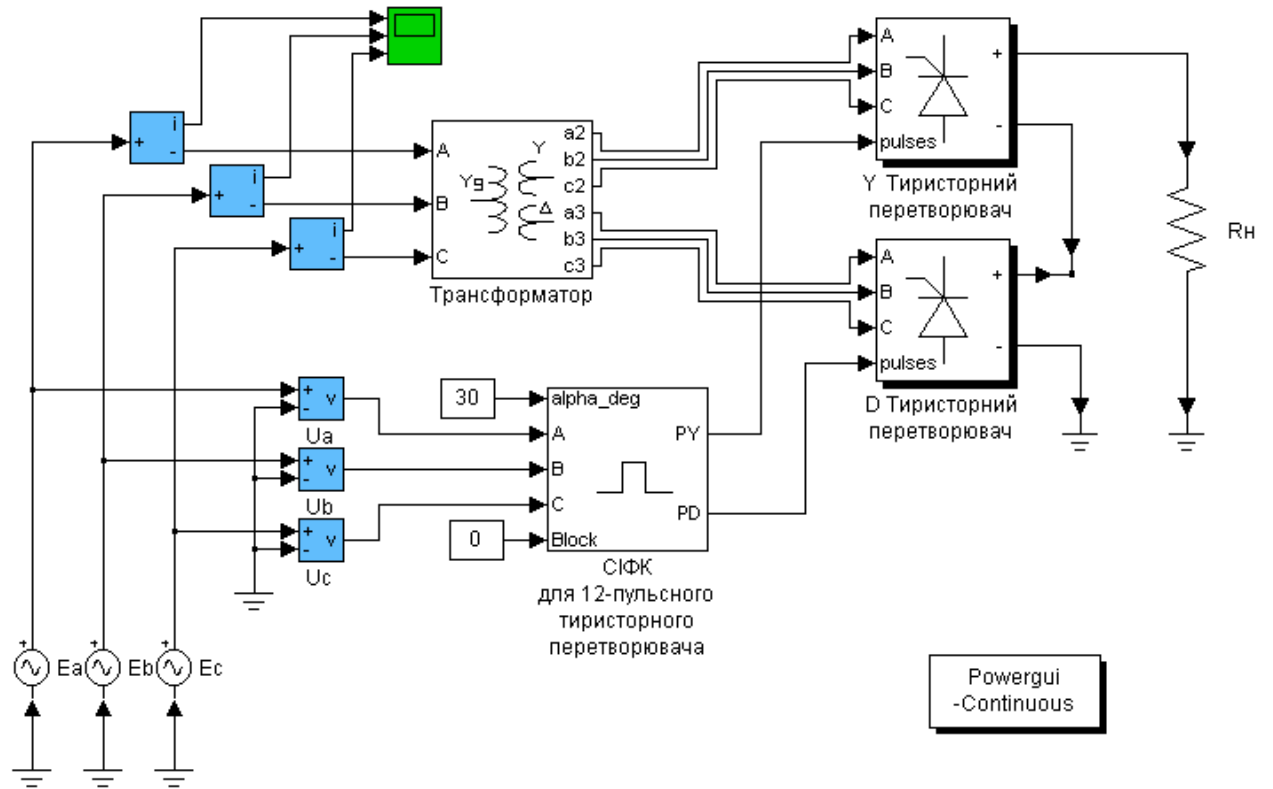


Рис. 1.10. Комп'ютерна модель дванадцятипульсного тиристорного перетворювача

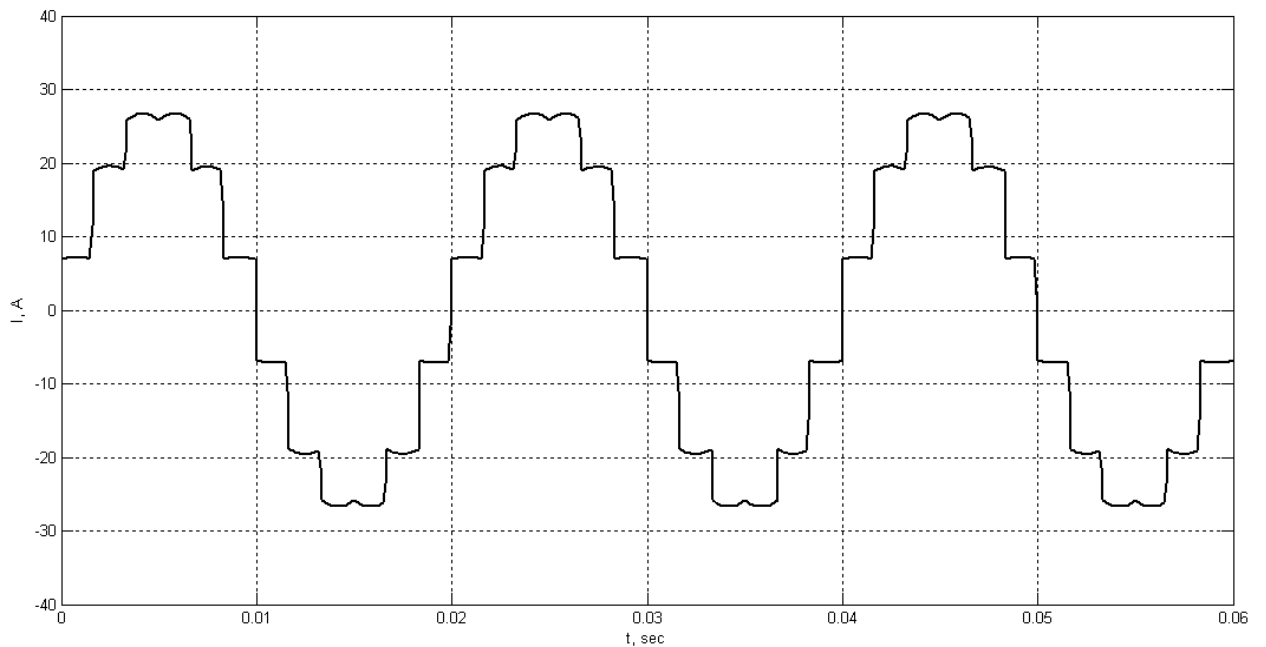


Рис.1.11. Осцилограма струму дванадцятипульсного ВП ( $\alpha = 0^\circ$ )

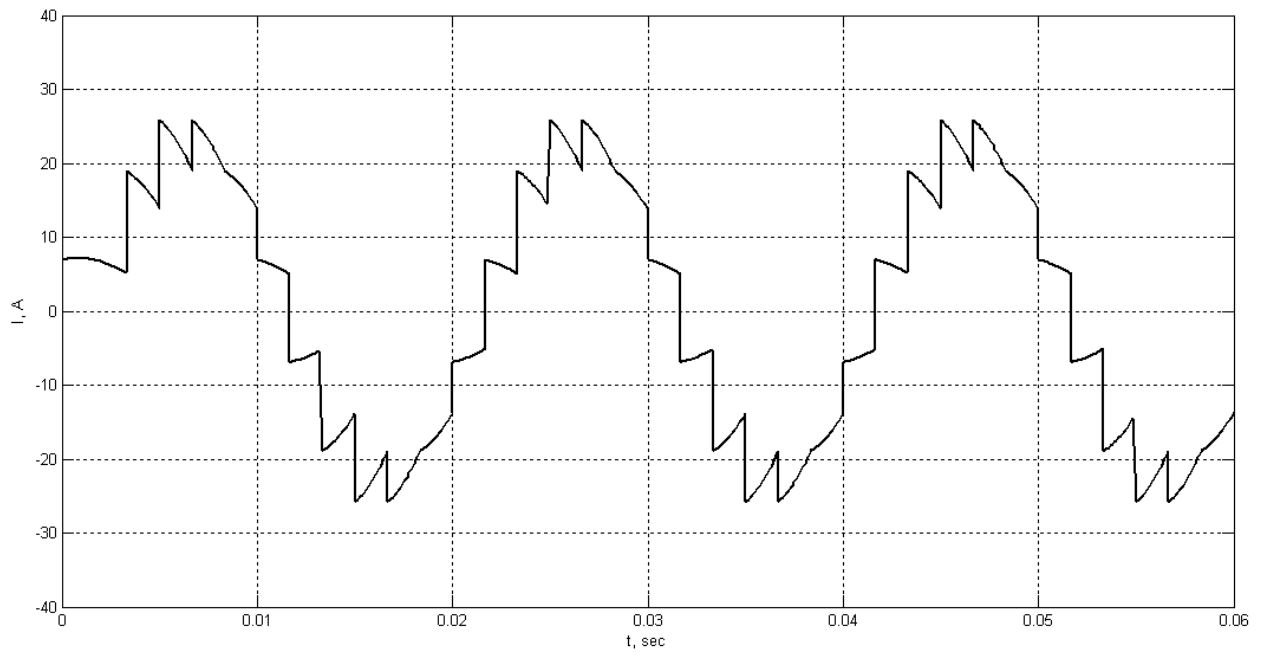


Рис.1.12. Осцилограмма струму дванадцятипульсного ВП ( $\alpha = 30^\circ$ )

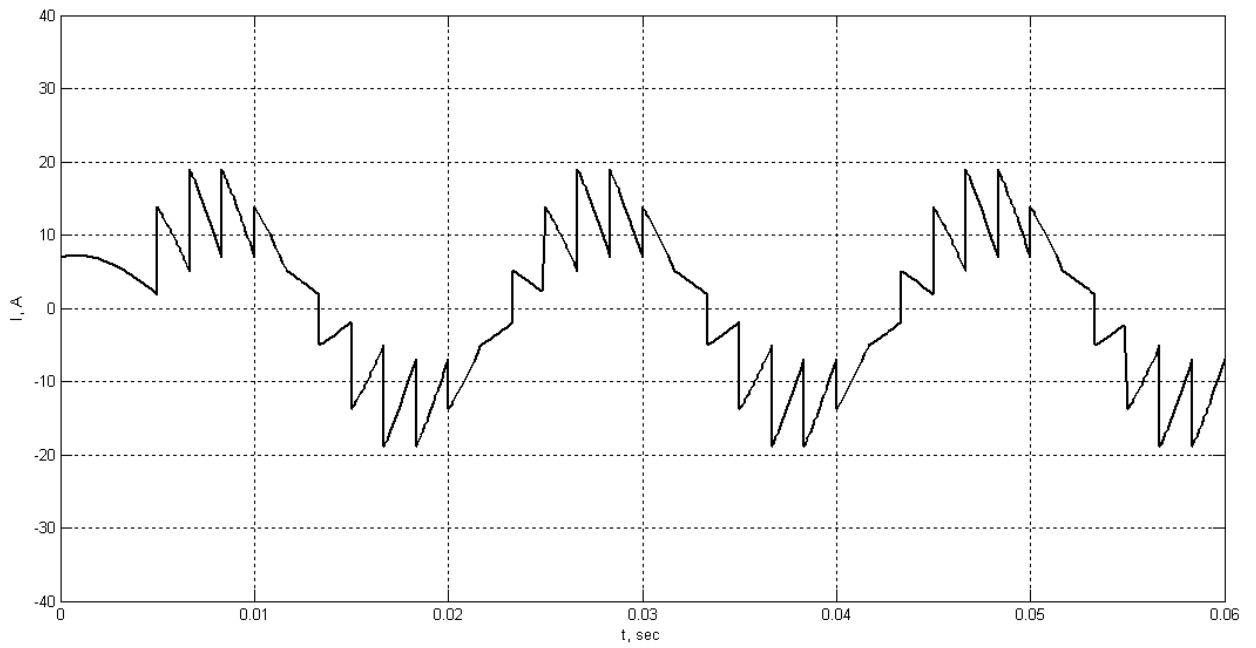


Рис.1.13. Осцилограмма струму дванадцятипульсного ВП ( $\alpha = 60^\circ$ )

Таблиця 1.3. Результати спектрального аналізу струму дванадцятипульсного ВП

| $\alpha, ^\circ$ | Значення гармонік струму, % |      |      |      |      |      |
|------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|
|                  | № 11                        | № 13 | № 23 | № 25 | № 35 | № 37 |
| 0                | 8,8                         | 6,0  | 4,5  | 3,7  | 2,6  | 2,2  |
| 15               | 9,8                         | 7,0  | 4,6  | 3,9  | 2,9  | 2,5  |
| 30               | 11,1                        | 8,0  | 5,1  | 4,3  | 3,3  | 3,0  |
| 45               | 13,7                        | 10,0 | 6,2  | 5,3  | 4,1  | 3,6  |
| 60               | 19,3                        | 14,0 | 8,7  | 7,6  | 5,6  | 5,2  |
| 75               | 45,5                        | 33,0 | 17,8 | 15,2 | 13,5 | 12,0 |

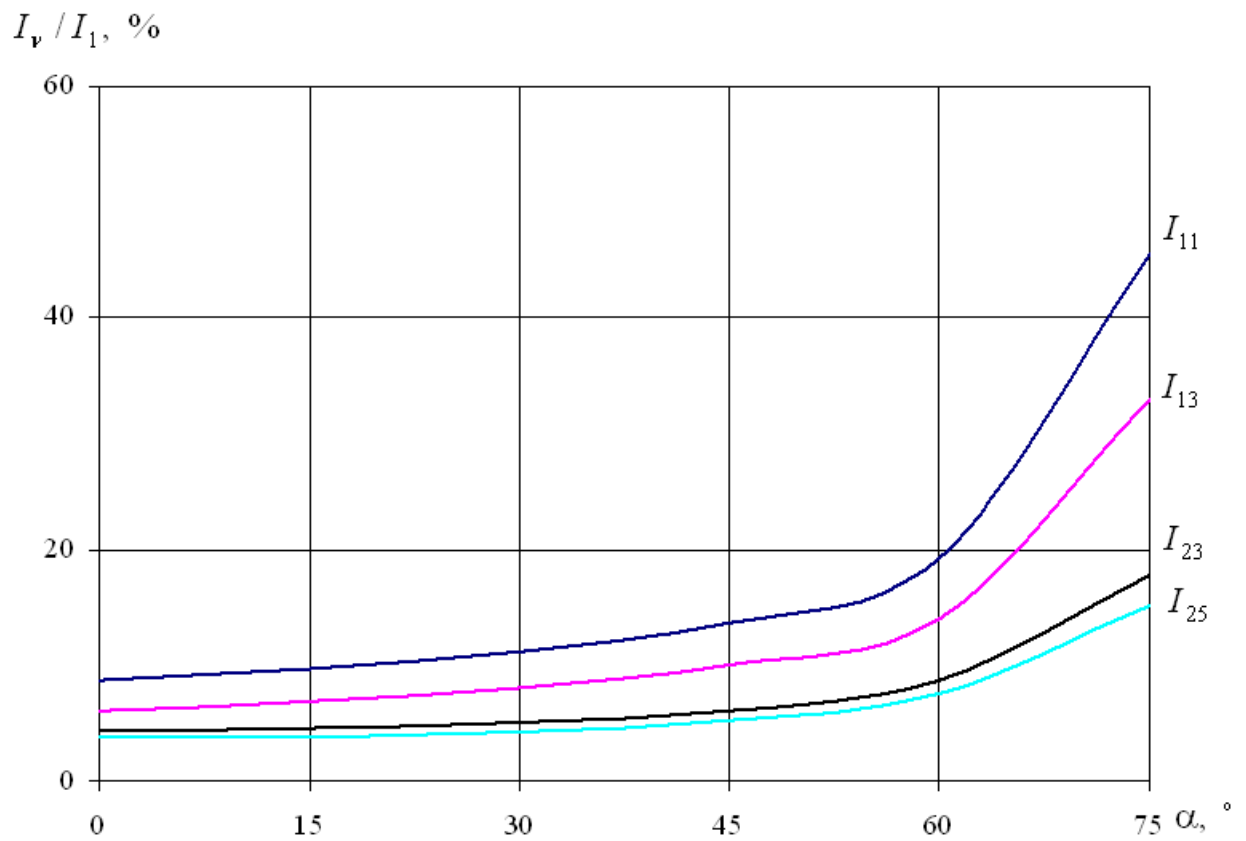


Рис. 1.14. Графіки залежності вищих гармонік струму дванадцятипульсного ВП від  $\alpha$

До інших джерел вищих гармонік напруги в СЕПП належать:

- дугові вакуумні печі;
- дугові сталеплавильні печі;
- установки електродугового зварювання;
- газорозрядні лампи;
- побутові напівпровідникові прилади.
- силові трансформатори;

В СЕПП дугові сталеплавильні печі перш за все спричиняють коливання напруги в електричній мережі мережі. В порівнянні з перетворювачами частоти співвимірної потужності, дугові печі спотворюють форму кривої напруги приблизно 3-4 рази менше.

Наявність магнітної несиметрії між фазами електричної мережі спричиняє зростання рівнів гармонік гармонік, кратних 3. Випрямляюча дія дуги причиною наявності постійної складової струму, що збільшує частку вищих гармонік в загальному струмі печі. Слід відмітити, що ДСП також є джерелом інтергармонік.

Дугові вакуумні печі, як правило, одержують живляться від шестипульсних вентильних перетворювачів. Регулювання рівнів струму навантаження в цих печах відбувається з допомогою дроселів насичення. Крива струму в мережі отримується подібною до кривої струму мостових вентильних перетворювачів електроприводів. Рівень вищих гармонік струму від дугової вакуумної печі є досить значним ( $I_2 \approx 8 \%$ ,  $I_3 \approx 6 \%$ ).

В промисловості широке розповсюдження отримали зварювальні установки, що живляться від напівпровідникових випрямлячів. Зварювальні випрямлячі, як правило, приєднуються згідно трьохфазної мостової схеми з використанням некерованих напівпровідникових вентилів тиристорів.

Проведений аналіз показав, що в струмах зварювальних випрямлячів наявні непарні вищі гармоніки. Рівні 5, 7 вищих гармонік струму є нестабільними: незначні зміни режиму горіння дуги призводять до значних змін значень 5, 7 гармонік струму.

Проте, зазначені електроспоживачі, як правило, вносять несуттєвий вклад в спотворення синусоїдальності напруги. В зв'язку з цим надалі в роботі в якості джерел вищих гармонік будуть розглядатись лише потужні частотні перетворювачі напруги.

### **Висновки до розділу**

1. В основу ПЯЕ, що кількісно визначають рівень несинусоїдальності напруг покладено енергетичний зміст. Ступінь негативного впливу потужності спотворення на обладнання пропорційна до значень ПЯЕ. Слід зазначити, що гранично допустимі значення ПЯЕ вибираються із техніко-економічних розрахунків.

2. Для оцінки рівнів вищих гармонік напруги здебільшого застосовується апаратурний аналіз, який заснований на використанні спеціальних приладів-аналізаторів. У випадку відсутності спеціалізованих приладів аналіз рівнів несинусоїдальності напруги можливо проводити шляхом використання практичного гармонічного аналізу осцилограм напруги.

3. Одними з найпоширеніших в сучасних СЕПП джерел вищих гармонік є потужні керовані вентильні випрямлячі та потужні перетворювачі частоти напруги.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ФІЛЬТРО-КОМПЕНСУЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ

#### 2.1. Розрахунок рівнів несинусоїдальності напруги в СЕПП та вибір ФКП

Проведемо розрахунок рівнів несинусоїдальності напруги в СЕПП на конкретному прикладі. Задача полягає у визначенні рівнів вищих гармонік напруги у вузлах СЕПП для різних режимів роботи мережі. У випадку перевищення допустимих значень ПЯЕ, що нормують несинусоїдальність напруги, здійснити розрахунок з вибору ФКП. На рис. 2.1 наведена розрахункова схема СЕПП.

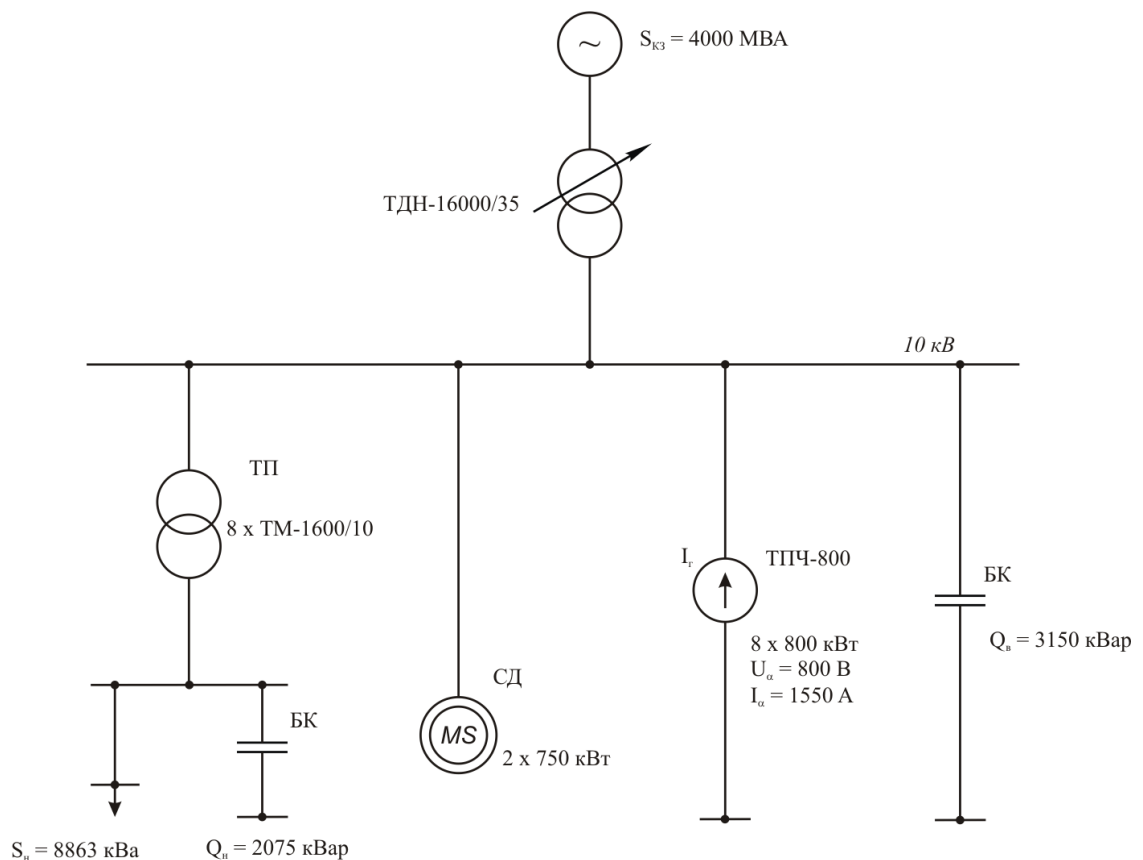


Рис.2.1. Розрахункова схема СЕПП

Вихідні дані до розрахунку:

- потужність к.з. на шинах 110 кВ СЕПП:  $S_k = 4000$  МВА;
- номінальна потужність трансформатора ГЗП:  $S_{н.Т} = 16$  МВА;
- номінальна напруга шин НН трансформатора ГЗП:  $U_n = 10$  кВ;
- кількість СД:  $n_{СД} = 2$  шт.;
- номінальна потужність СД:  $S_{н.СД} = 0,75$  МВА;
- кількість цехових ТП:  $n_{ТП} = 8$  шт.;
- номінальна потужність ТП:  $S_{н.ТП} = 1,6$  МВА;
- навантаження ТП:  $S_H = 8,863$  МВА;
- номінальна потужність БСК 0,4 кВ:  $Q_{БК.н} = 2,075$  Мвар;
- номінальна потужність БСК 10 кВ:  $Q_{БК.в} = 3,150$  Мвар;
- кількість ТПЧ-800:  $n_{ТПЧ} = 8$  шт.;
- номінальна напруга ТПЧ-800:  $U_{н.ТПЧ} = 0,8$  кВ;
- струм ТПЧ-800:  $I_{н.ТПЧ} = 1,550$  кА;
- коефіцієнт потужності ТПЧ-800:  $\cos \varphi = 0,8$ .

Схема заміщення СЕПП для розрахунку напруг вищих гармонік наведена на рис. 2.2.

Так як дана СЕПП містить ТПЧ, то в розрахунку необхідно враховувати 5, 7, 11 та 13 гармоніки.

Проведемо розрахунок параметрів схеми заміщення СЕПП.

Опір системи:

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

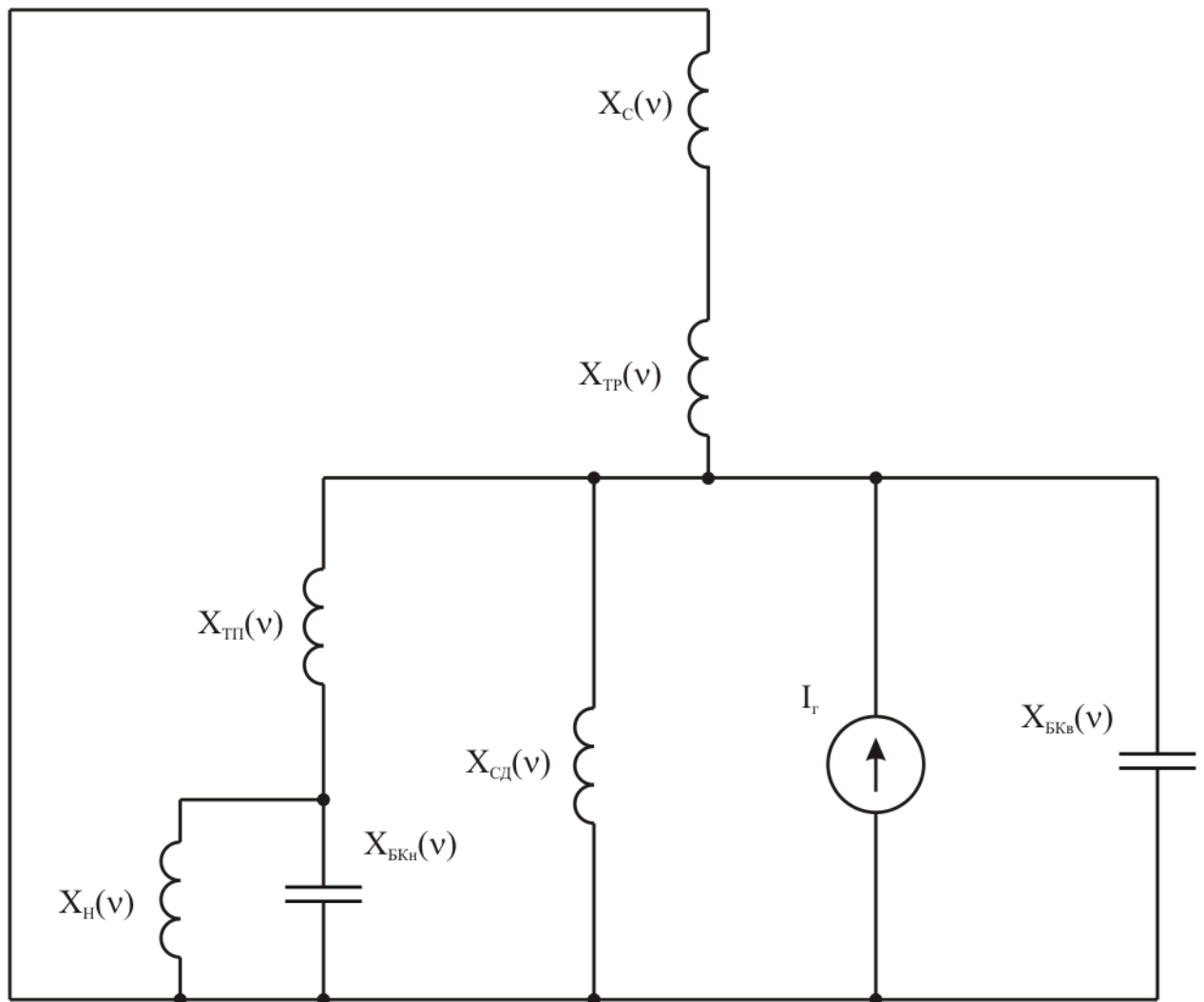


Рис. 2.2. Схема заміщення СЕПП

Опір трансформатора ГЗП:

$$x_T(v) = \frac{4}{S_{H.тр}} v = \frac{4}{16} v = 0.25 v$$

Опір СД:

$$x_{CD}(v) = \frac{17}{S_{\Sigma CD}} v = \frac{17}{1.5} v = 11.3 v$$

де  $S_{\Sigma \text{СД}}$  – сумарна потужність СД:

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

Опір цехових ТП:

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

де  $S_{\Sigma \text{ТП}}$  – сумарна потужність ТП:

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

Опір електричного навантаження:

$$x_{\text{Н}}(\text{v}) = \frac{34}{S_{\text{н}}} \text{v} = \frac{34}{8,863} \text{v} = 3,84 \text{v}$$

Приведений опір БСК 0,4 кВ:

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

Опір БСК 10 кВ:

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

Сумарний опір системи та трансформатора ГЗП:

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

Еквівалентний опір системи, трансформатора ГЗП та СД:

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

Схема заміщення СЕПП після деяких спрощень наведена на рис. 2.3.

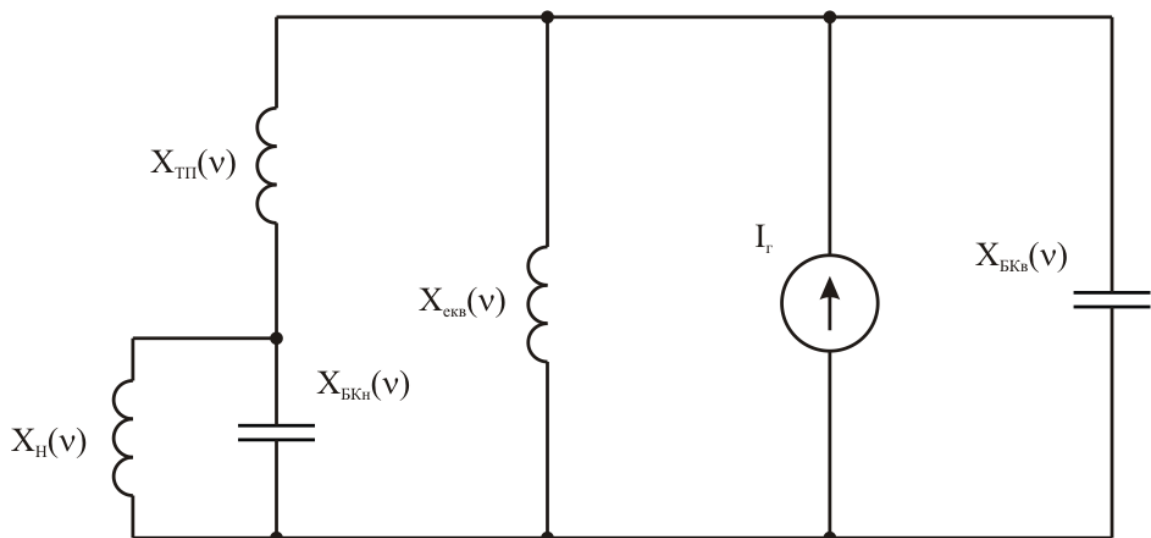


Рис. 2.3. Спрощена схема заміщення СЕПП

Номінальний струм БСК 10 кВ:

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

Приведений номінальний струм БСК 0,4 кВ:

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

Номінальний струм ТПЧ-800:

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

Струми вищих гармонік групи ТПЧ-800:

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

Для  $\nu = 5, 13$  береться знак "+", для  $\nu = 7, 11$  – знак "-".

Коефіцієнт кратності БСК 10 кВ:

$$k_{\text{B}}(\nu) = \frac{x_{\text{ТП}}(\nu) + \frac{x_{\text{БКН}}(\nu)x_{\text{H}}(\nu)}{x_{\text{БКН}}(\nu) - x_{\text{H}}(\nu)}}{\frac{x_{\text{БКВ}}(\nu)x_{\text{екВ}}(\nu)}{x_{\text{БКВ}}(\nu) - x_{\text{екВ}}(\nu)} + x_{\text{ТП}}(\nu) + \frac{x_{\text{БКН}}(\nu)x_{\text{H}}(\nu)}{x_{\text{БКН}}(\nu) - x_{\text{H}}(\nu)}} \cdot \frac{x_{\text{екВ}}(\nu)}{x_{\text{екВ}}(\nu) - x_{\text{БКВ}}(\nu)}$$

Коефіцієнт кратності для БСК 0,4 кВ:

$$k_{\text{H}}(\nu) = \frac{\frac{x_{\text{БКВ}}(\nu)x_{\text{екВ}}(\nu)}{x_{\text{БКВ}}(\nu) - x_{\text{екВ}}(\nu)}}{\frac{x_{\text{БКВ}}(\nu)x_{\text{екВ}}(\nu)}{x_{\text{БКВ}}(\nu) - x_{\text{екВ}}(\nu)} + x_{\text{ТП}}(\nu) + \frac{x_{\text{БКН}}(\nu)x_{\text{H}}(\nu)}{x_{\text{БКН}}(\nu) - x_{\text{H}}(\nu)}} \cdot \frac{x_{\text{H}}(\nu)}{x_{\text{H}}(\nu) - x_{\text{БКН}}(\nu)}$$

Розрахунок значень  $I_{\Sigma\text{ТПЧ}}$ ,  $k_B(\nu)$ ,  $k_H(\nu)$ ,  $I_{\text{БКВ}}(\nu)$  та  $I_{\text{БКН}}(\nu)$  приведений в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Розрахунок значень  $I_{\Sigma\text{ТПЧ}}$ ,  $k_B(\nu)$ ,  $k_H(\nu)$ ,  $I_{\text{БКВ}}(\nu)$  та  $I_{\text{БКН}}(\nu)$

| Величина                                                                                    | Номер гармоніки |           |            |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------|------------|------------|
|                                                                                             | $\nu = 5$       | $\nu = 7$ | $\nu = 11$ | $\nu = 13$ |
| Струм ТПЧ-800                                                                               | 48,350          | 48,350    | 29,010     | 20,720     |
| Коеф. кратності струму $k_B(\nu)$                                                           | -0,370          | -0,530    | -10,430    | 4,540      |
| Коеф. кратності струму $k_H(\nu)$                                                           | -0,780          | 0,340     | 1,380      | -0,390     |
| Струм $\nu$ -ї гармоніки БСК 10 кВ<br>$I_{\text{БКВ}} = k_B(\nu)I_{\Sigma\text{ТПЧ}}(\nu)$  | -18,000         | -25,500   | -303,000   | 94,000     |
| Струм $\nu$ -ї гармоніки БСК 0,4 кВ<br>$I_{\text{БКН}} = k_H(\nu)I_{\Sigma\text{ТПЧ}}(\nu)$ | -37,900         | 16,600    | 39,900     | -8,100     |

Еквівалентний струм БСК 10 кВ:

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

Еквівалентний струм БСК 0,4 кВ:

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

Коефіцієнт перевантаження БСК 10 кВ:

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

Коефіцієнт перевантаження БСК 0,4 кВ:

$$k_{п.БКН} = \frac{I_{эБКН}}{I_{БКН}} = \frac{133}{120} = 1,11 < 1,3$$

Розрахунок коефіцієнту несинусоїдальності напруги для випадків увімкнених БСК (максимальний режим) та вимкнених БСК (мінімальний режим) наведено нижче.

1. БСК вимкнені (мінімальний режим). На рис. 2.4 наведена схема заміщення СЕПП після проведення деяких спрощень.

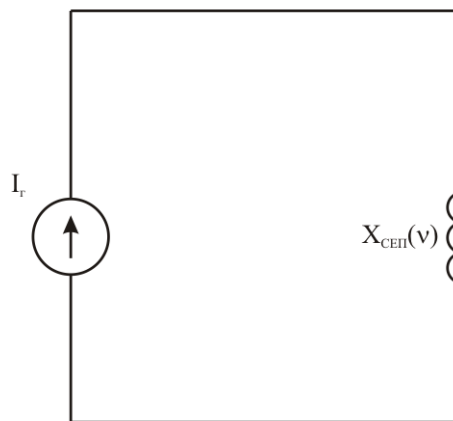


Рис. 2.4. Спрощена схема заміщення СЕПП

Еквівалентний опір СЕПП:

$$\begin{aligned} x_{СЕП}(\nu) &= \frac{1}{\frac{1}{x_{III}(\nu) + x_H(\nu)} + \frac{1}{x_{ЕКВ}(\nu)} + \frac{1}{x_{CD}(\nu)}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{2,66\nu + 3,84\nu} + \frac{1}{0,268\nu} + \frac{1}{11,3\nu}} = 0,252\nu \end{aligned}$$

Напруга вищих гармонік на стороні 10 кВ:

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

Результати розрахунку значень  $x_{\text{СЕП}}(\nu)$ ,  $U_{\text{ш}}(\nu)$  приведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Результати розрахунку  $x_{\text{СЕП}}(\nu)$ ,  $U_{\text{ш}}(\nu)$

| Величина                                                                                      | Номер гармоніки |           |            |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------|------------|------------|
|                                                                                               | $\nu = 5$       | $\nu = 7$ | $\nu = 11$ | $\nu = 13$ |
| Опір СЕПП $x_{\text{СЕП}}(\nu) = 0.252\nu$                                                    | 1,260           | 1,760     | 2,770      | 3,280      |
| Напруга на шинах 10 кВ<br>$U_{\text{ш}}(\nu) = I_{\Sigma\text{ТПЧ}}(\nu) x_{\text{СЕП}}(\nu)$ | 60,920          | 85,290    | 80,420     | 67,880     |

$k_U$  на шинах 10 кВ СЕПП в мінімальному режимі СЕПП:

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

2. БСК увімкнені (максимальний режим). Напруги вищих гармонік на шинах 10 кВ:

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

Результати розрахунку  $x_{\text{БКВ}}(\nu)$  та  $U_{\text{ш}}(\nu)$  наведені в табл. 2.3

Таблиця 2.3. Результати розрахунку  $x_{\text{БКВ}}(\nu)$  та  $U_{\text{ш}}(\nu)$

| Величина                    | Номер гармоніки |           |            |            |
|-----------------------------|-----------------|-----------|------------|------------|
|                             | $\nu = 5$       | $\nu = 7$ | $\nu = 11$ | $\nu = 13$ |
| Опір БСК 10 кВ              | 6,340           | 4,530     | 2,880      | 2,440      |
| Напруга на шинах 10 кВ СЕПП | -114,000        | -115,000  | -873,200   | 229,000    |

$k_U$  на шинах 10 кВ СЕПП в максимальному режимі СЕПП:

$$k_{U.в} = \frac{\sqrt{\sum_{v=5}^{13} U_{ш}(v)^2}}{U_H} \cdot 100 =$$

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

В максимальному режимі СЕПП  $k_U$  шинах 10 кВ перевищує нормально допустиме значення:

$$k_U = 9,17 \% > 5 \%$$

Окрім цього спостерігається недопустиме перевантаження струмами вищих гармонік БСК 10 кВ:

$$k_{п.БКв} = 1,42 > 1,3$$

Для зниження рівнів  $k_U$  та  $k_{п.БКв}$  в максимальному режимі роботи СЕПП потрібно встановити ФКП.

Розрахунок параметрів ФКП проводився згідно методики, описаної в [27]. Результати розрахунку наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4.Результати розрахунку параметрів ФКП

| №<br>з/п | Розрахункова формула                                               | Номер гармоніки |           |            |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------|------------|------------|
|          |                                                                    | $\nu = 5$       | $\nu = 7$ | $\nu = 11$ | $\nu = 13$ |
| 1.       | $U_H, B$                                                           | 6600            | 6600      | 6600       | 6600       |
| 2.       | $Q_o = \sqrt{3} \cdot 1.3 U_H I_{ЕК\epsilon}(\nu)$                 | 1088,70         | 1088,70   | 653,2      | 466,6      |
| 3.       | $Q_o \geq S_K k_{pv}$                                              | 900,0           | 900,0     | 500,0      | 500,0      |
| 4.       | $Q_{\pi}$                                                          | 1350,0          | 1350,0    | 750,0      | 600,0      |
| 5.       | $k_p = \frac{Q_{\pi}}{S_K}$                                        | 0,0068          | 0,0068    | 0,0038     | 0,003      |
| 6.       | $a_p = \frac{\nu^2}{\nu^2 - 1}$                                    | 1,04            | 1,02      | 1,01       | 1,01       |
| 7.       | $k_u = \frac{U_{\text{ш}}}{\sqrt{3} U_{H.6K}}$                     | 0,87            | 0,87      | 0,87       | 0,87       |
| 8.       | $a_p k_u \leq 1$                                                   | 0,91            | 0,89      | 0,88       | 0,88       |
| 9.       | $n_v = \frac{a}{k_1 k_p \nu^2}$                                    | -0,12           | -0,061    | -0,11      | -0,099     |
| 10.      | $k_{1\nu} = \frac{1}{1 + \nu}$                                     | 1,048           | 1,03      | 1,04       | 1,044      |
| 11.      | $Q_{\pi}' = \frac{3 U_{H.6K} I_{\nu} k_{1\nu}}{1,6 - (a_p k_u)^2}$ | 1301,90         | 1226,90   | 725,80     | 517,95     |
| 12.      | $Q_{\text{вщ}} = Q_{\pi} a_p k_u$                                  | 1229,50         | 1204,70   | 660,74     | 527,55     |
| 13.      | $Q_{\Sigma}$                                                       | 3622,5          |           |            |            |
| 14.      | $x_{CV} = \frac{U_{H.6K}^2 \cdot 10^3}{Q_{\pi}}$                   | 96,80           | 96,80     | 174,24     | 217,8      |
| 15.      | $x_p = \frac{x_{CV}}{\nu^2}$                                       | 3,870           | 1,980     | 1,440      | 1,290      |
| 16.      | $X_p$                                                              | 3,850           | 1,950     | 1,450      | 1,300      |
| 17.      | $I_p \geq \frac{Q_{\pi}}{\sqrt{3} U_{\text{ш}}}$                   | 77,950          | 77,950    | 43,300     | 34,640     |
| 18.      | $I_{н.р.}$                                                         | 630,0           | 630,0     | 630,0      | 630,0      |
| 24.      | $U_{cpv} = n_v U_v$                                                | 0,0140          | 0,0070    | 0,0960     | 0,0230     |

До встановлення приймаємо такі реактори і БСК:

- ФКП для  $\nu = 5$ : реактор РБ-10-630-3,85, БСК УКЛ57-6,6-1350;
- ФКП для  $\nu = 5$ : реактор РБ-10-630-1,95, БСК УКЛ57-6,6-750;
- ФКП для  $\nu = 5$ : реактор РБ-10-630-1,45, БСК УКЛ57-6,6-750;

- ФКП для  $\nu = 5$ : реактор РБ-10-630-1,30, БСК УКЛ57-6,6-600;

$k_U$  на шинах 10 кВ після встановлення ФКП:

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

Отже, після встановлення ФКП  $k_U$  на шинах 10 кВ зменшився до нормально допустимого рівня.

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

Для проведення аналізу режимів СЕПП, з джерелами вищих гармонік та ФКП було проведено комп'ютерне моделювання в пакеті прикладних програм MATLAB/Simulink.

В якості розрахункової моделі було взято схему заміщення (рис. 2.2). Комп'ютерні моделі СЕПП з ФКП і без ФКП показані на рис. 2.5 і 2.18. В комп'ютерних моделях використовувались стандартні блоки із бібліотеки SimPowerSystems. Параметри цих взяті із результатів розрахунку параметрів елементів СЕПП (п. 2.1 роботи).

Осцилограми напруги на шинах 10 кВ СЕПП та струму для мінімального режиму показані на рис. 2.6 і 2.7. Результати спектрального аналізу приведені на рис. 2.8 і 2.9.

В максимальному режимі на шинах 10 кВ спостерігається понаднормове значення  $k_U = 9,199 \%$  та недопустиме значення  $k_{\text{н}} = 1,622 > 1,3$ . Осцилограми струмів БСК 10 кВ та 0,4 кВ показані на рис. 2.12 і 2.13. АЧХ і ФЧХ опору СЕПП в максимальному режимі показані на рис. 2.16, 2.17. Слід відмітити, що наявність БСК в СЕПП спричиняє наявність точки резонансу струмів (280 і 580 Гц). Результати комп'ютерного моделювання СЕПП з ФКП показані на рис. 2.19 – 2.28.

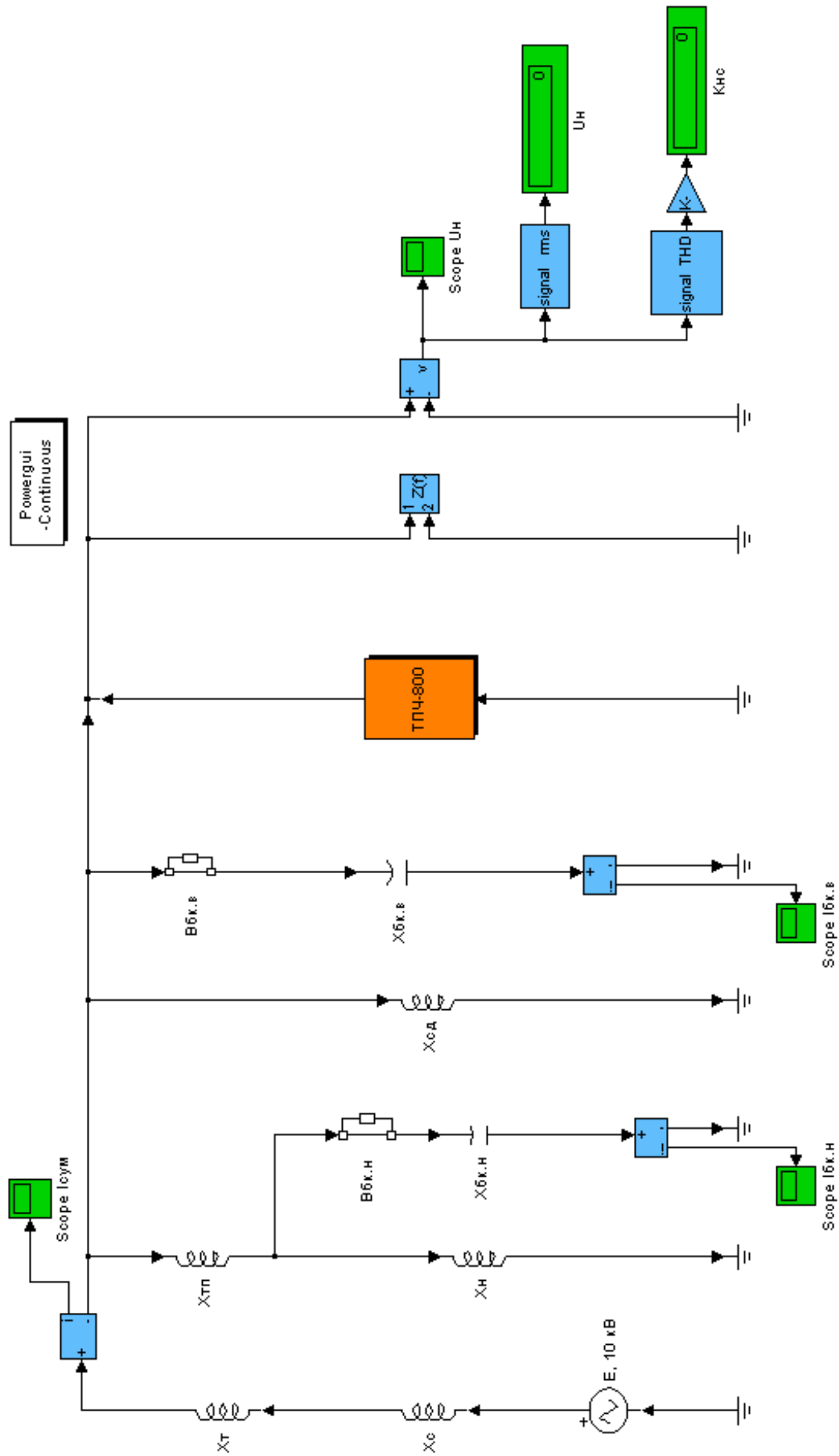


Рис. 2.5. Комп'ютерна СЕРП з джерелом вищих гармонік

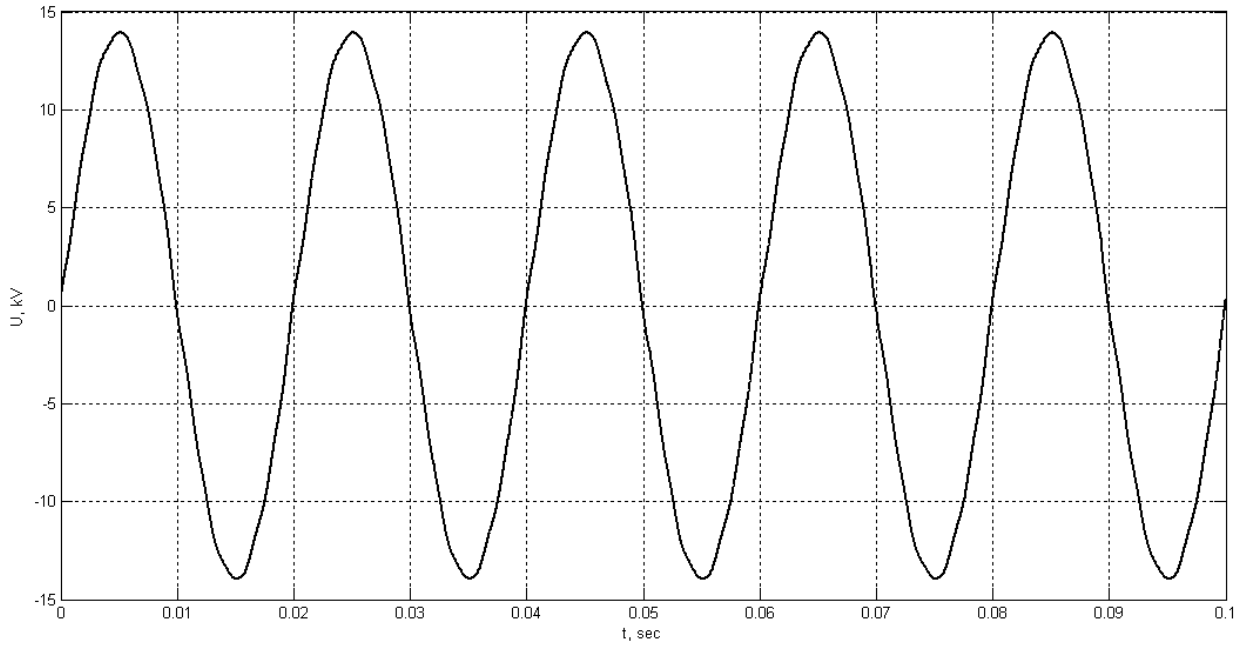


Рис 2.6. Графік напруги на шинах 10 кВ (без ФКП, мінімальний режим)

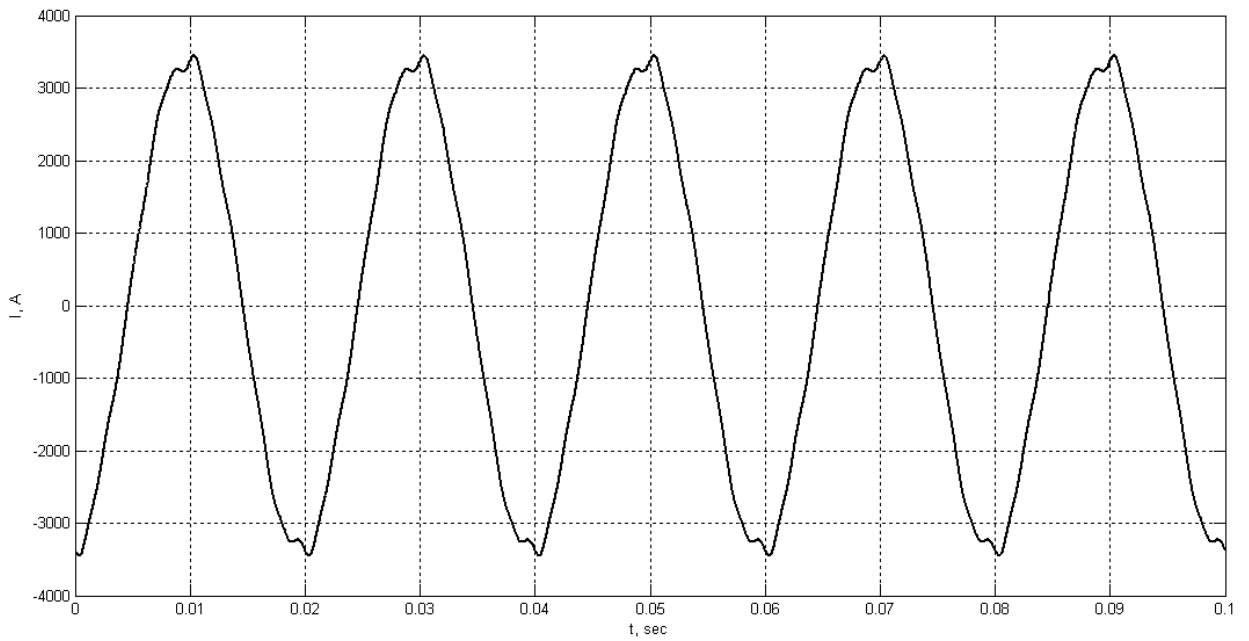


Рис 2.7. Графік загального струму (без ФКП, мінімальний режим)

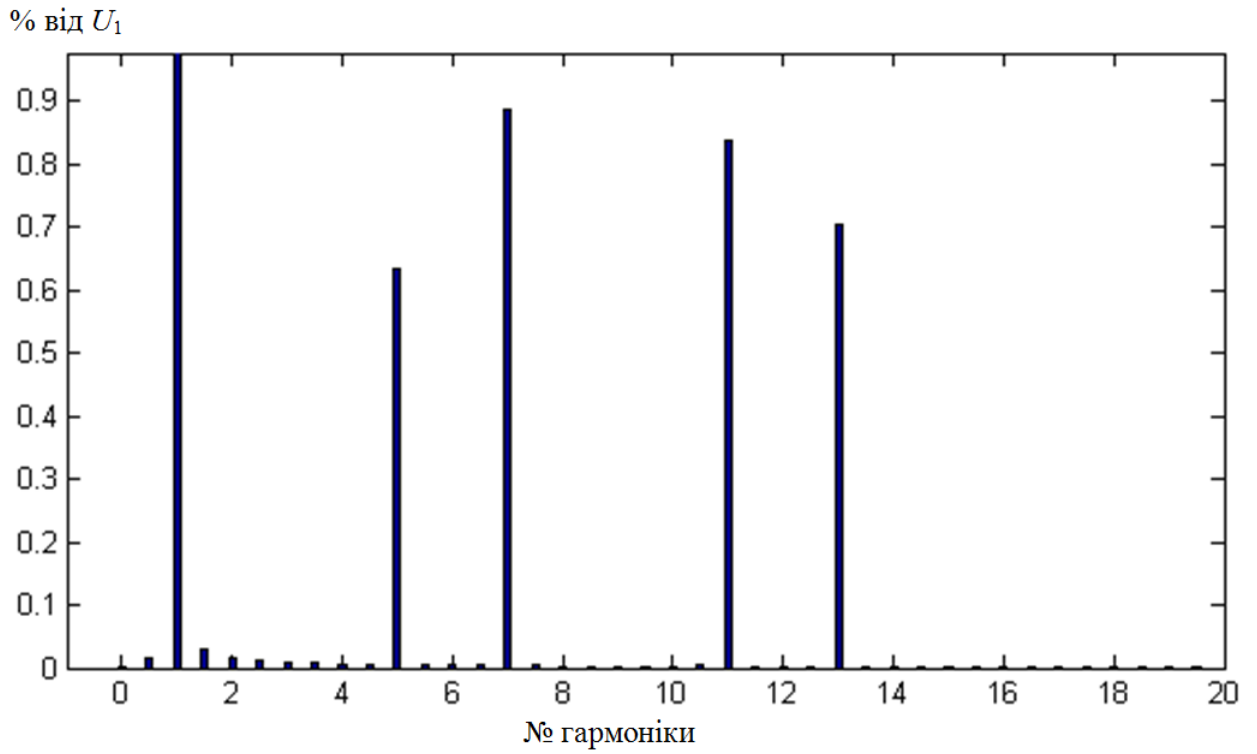


Рис. 2.8. Результати спектрального аналізу напруги  
(без ФКП, мінімальний режим)

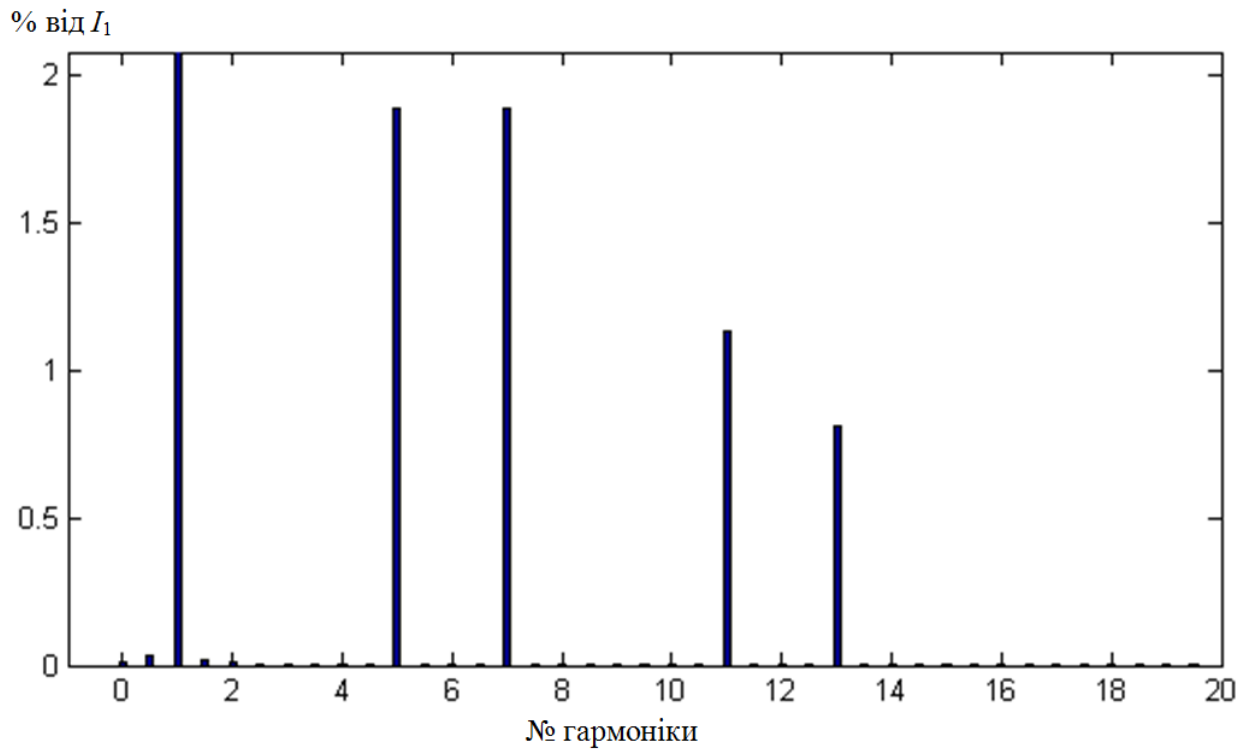


Рис. 2.9. Результати спектрального аналізу струму  
(без ФКП, мінімальний режим)

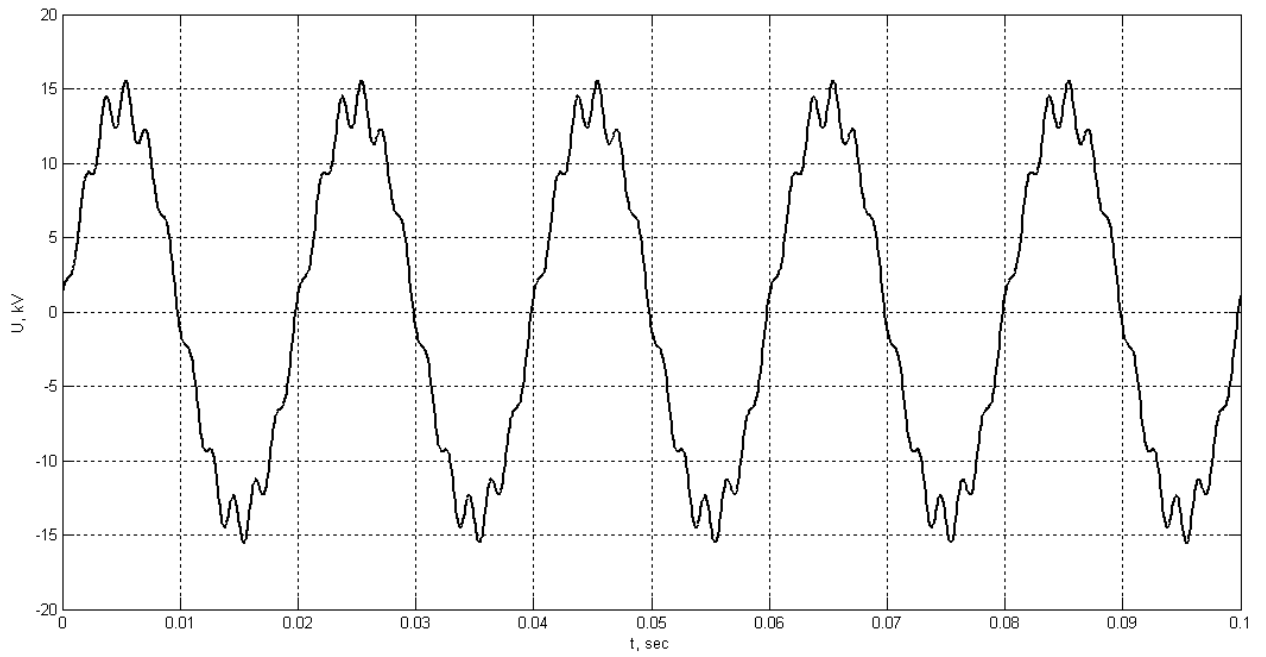


Рис 2.10. Графік напруги на шинах 10 кВ (без ФКП, максимальний режим)

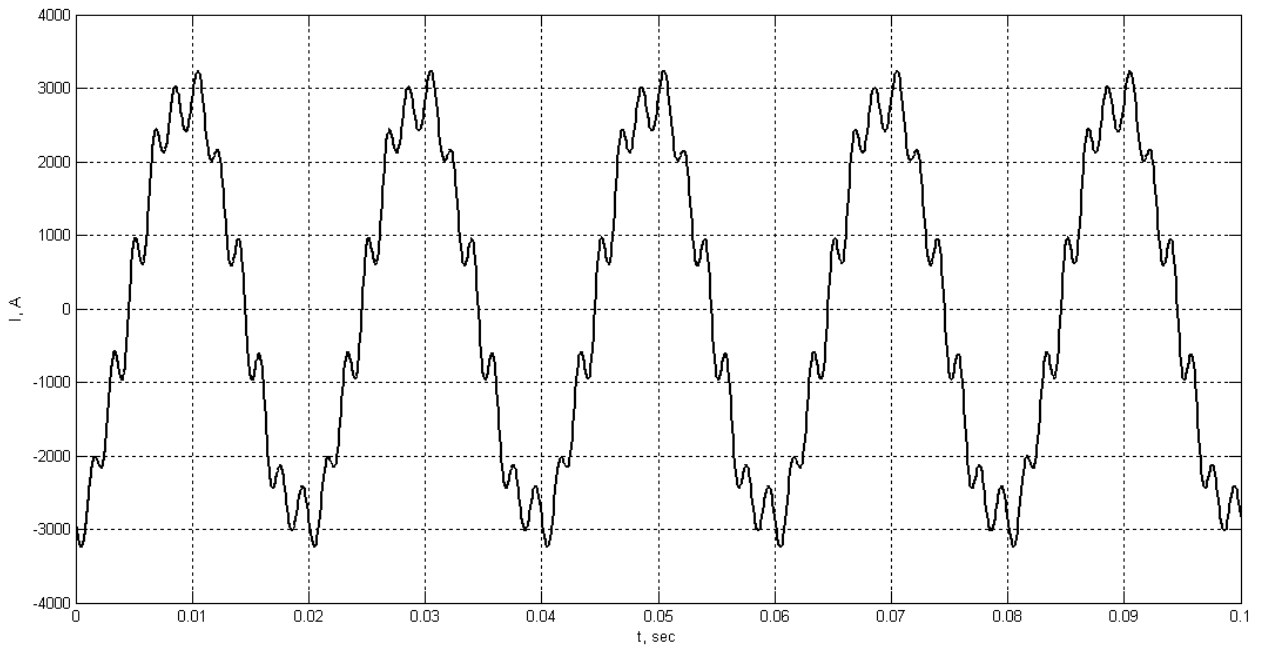


Рис 2.11. Графік загального струму (без ФКП, максимальний режим)

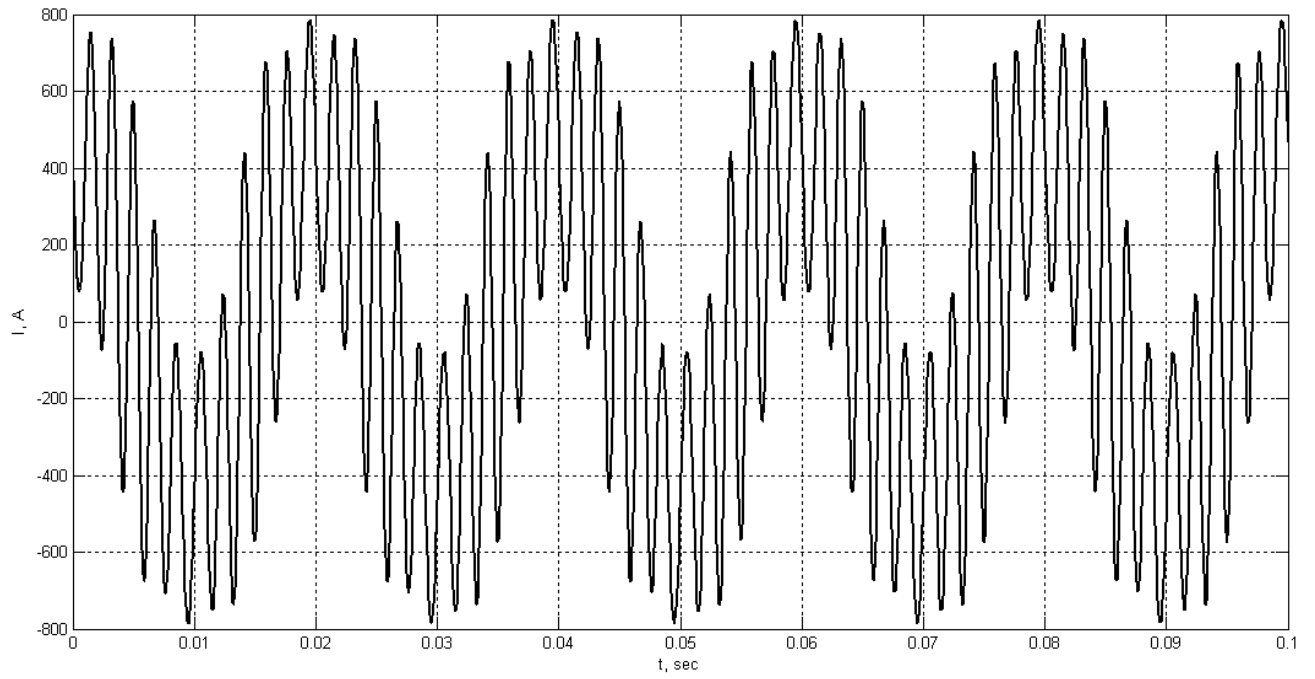


Рис 2.12. Графік струму в колі БСК 10 кВ (без ФКП, максимальний режим)

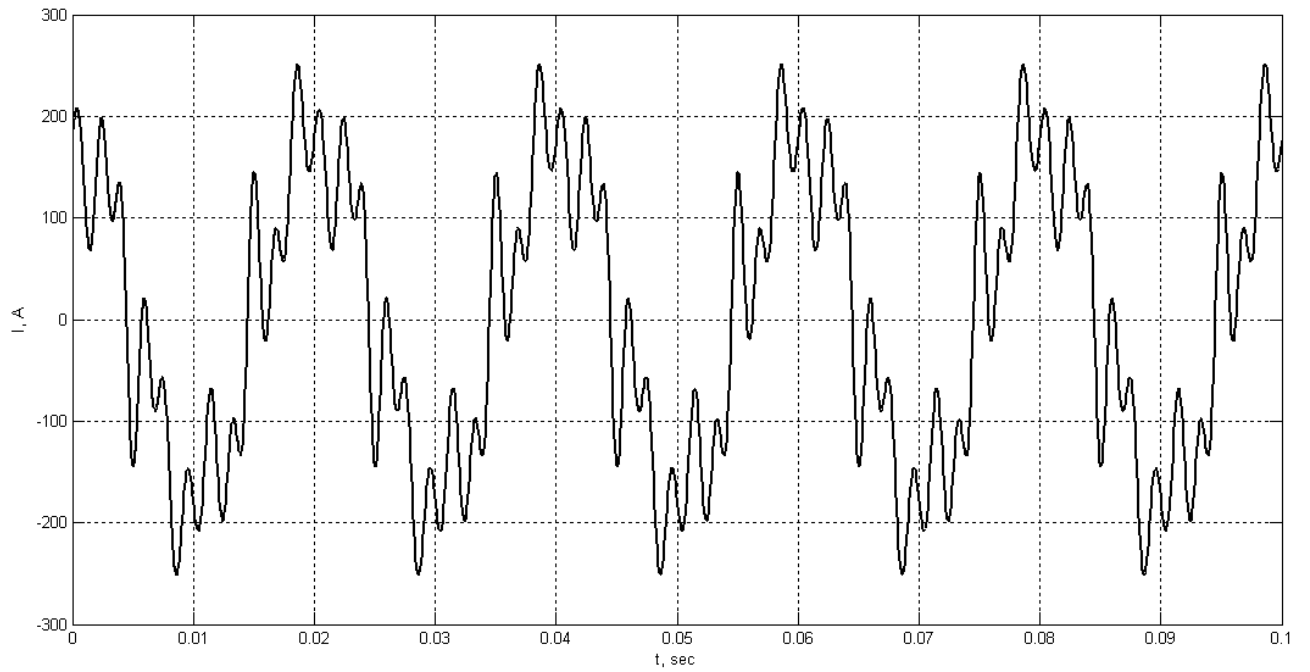


Рис 2.13. Графік струму в колі БСК 0,4 кВ (без ФКП, максимальний режим)

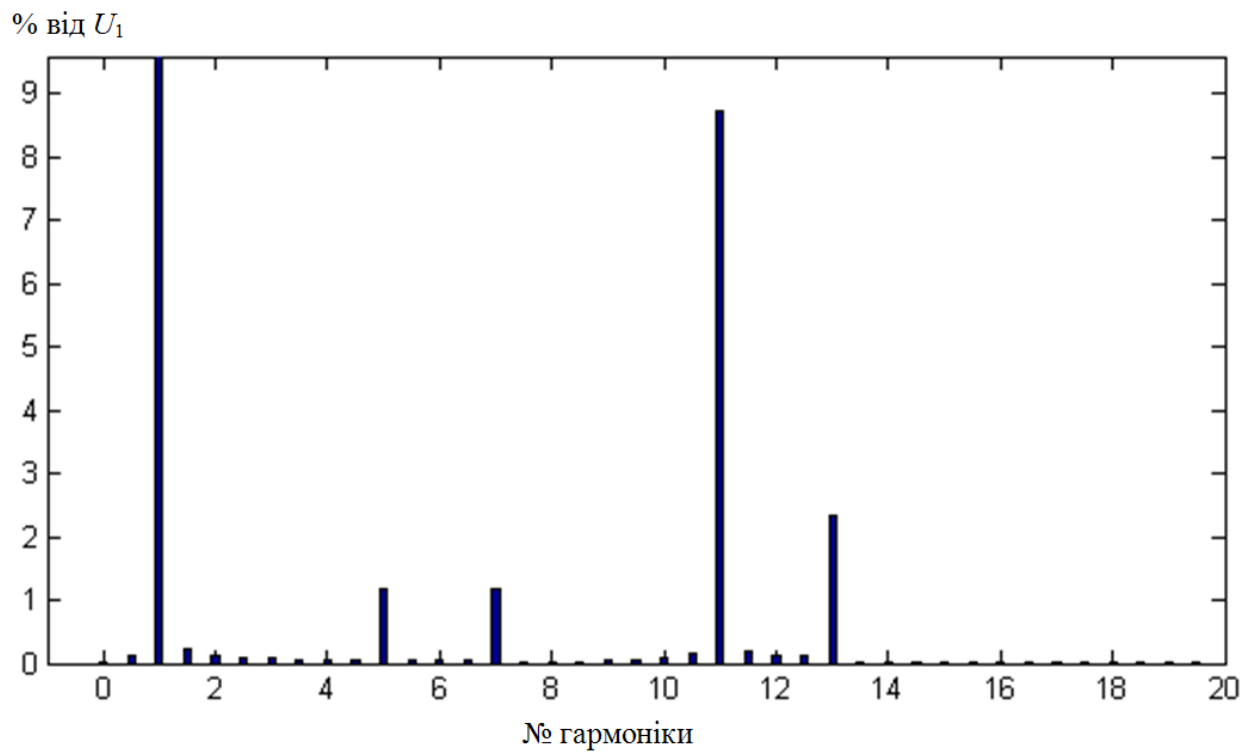


Рис. 2.14. Результати спектрального аналізу напруги  
(без ФКП, максимальний режим)

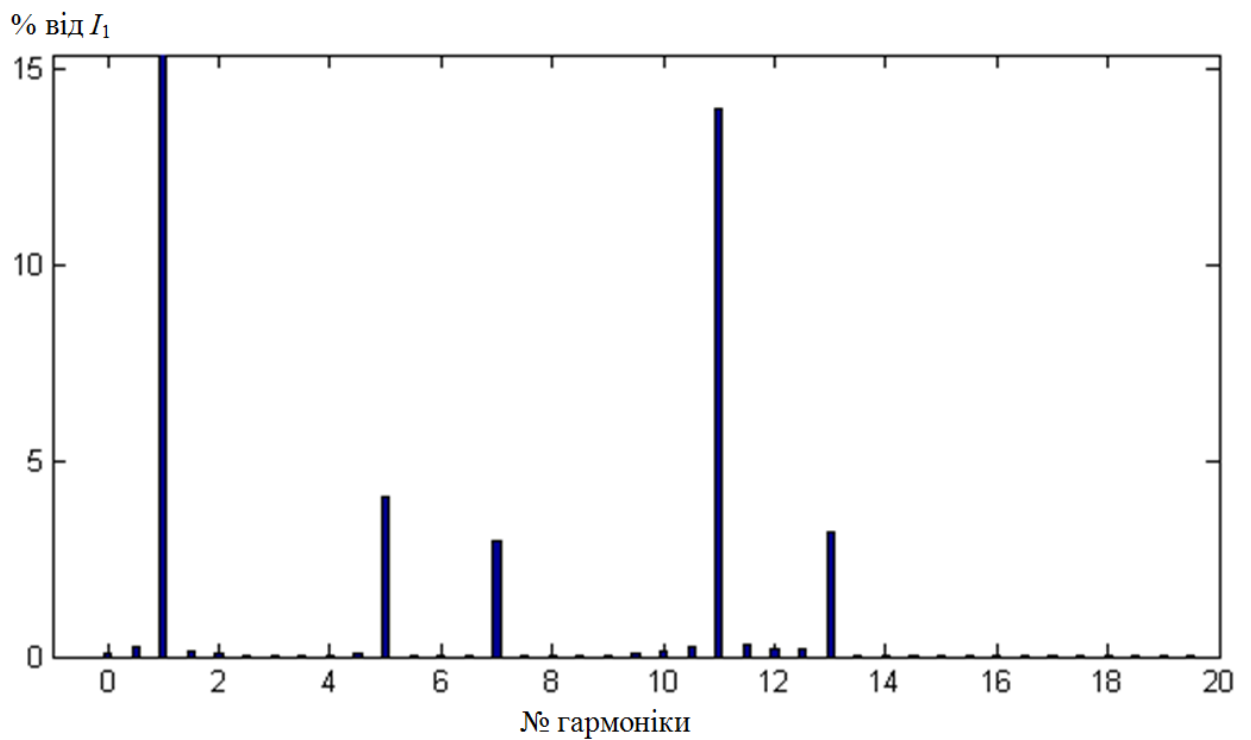


Рис. 2.15. Результати спектрального аналізу струму  
(без ФКП, максимальний режим)

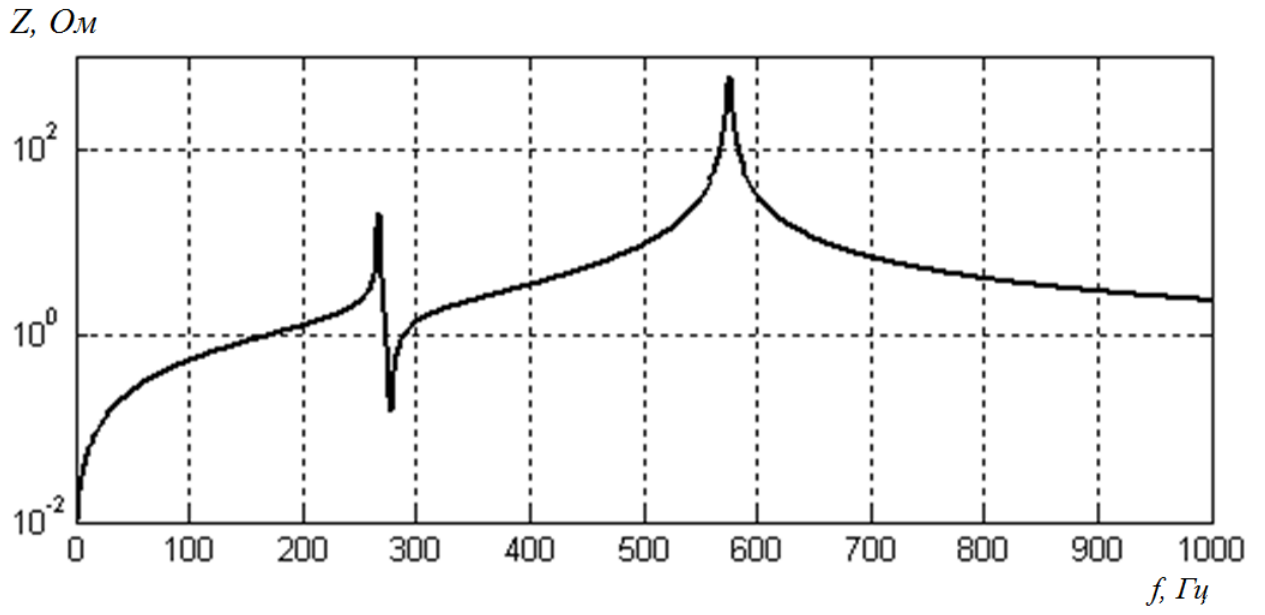


Рис. 2.16. АЧХ опоры СЕПП (без ФКП, максимальный режим)

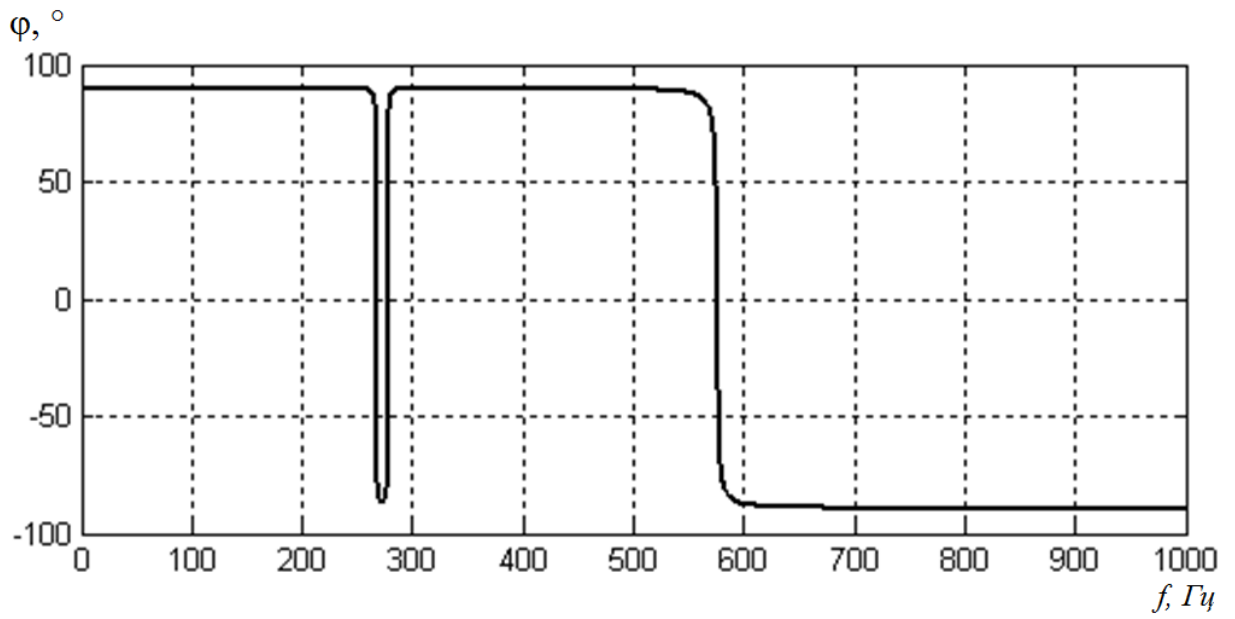


Рис. 2.17. ФЧХ опоры СЕПП (без ФКП, максимальный режим)

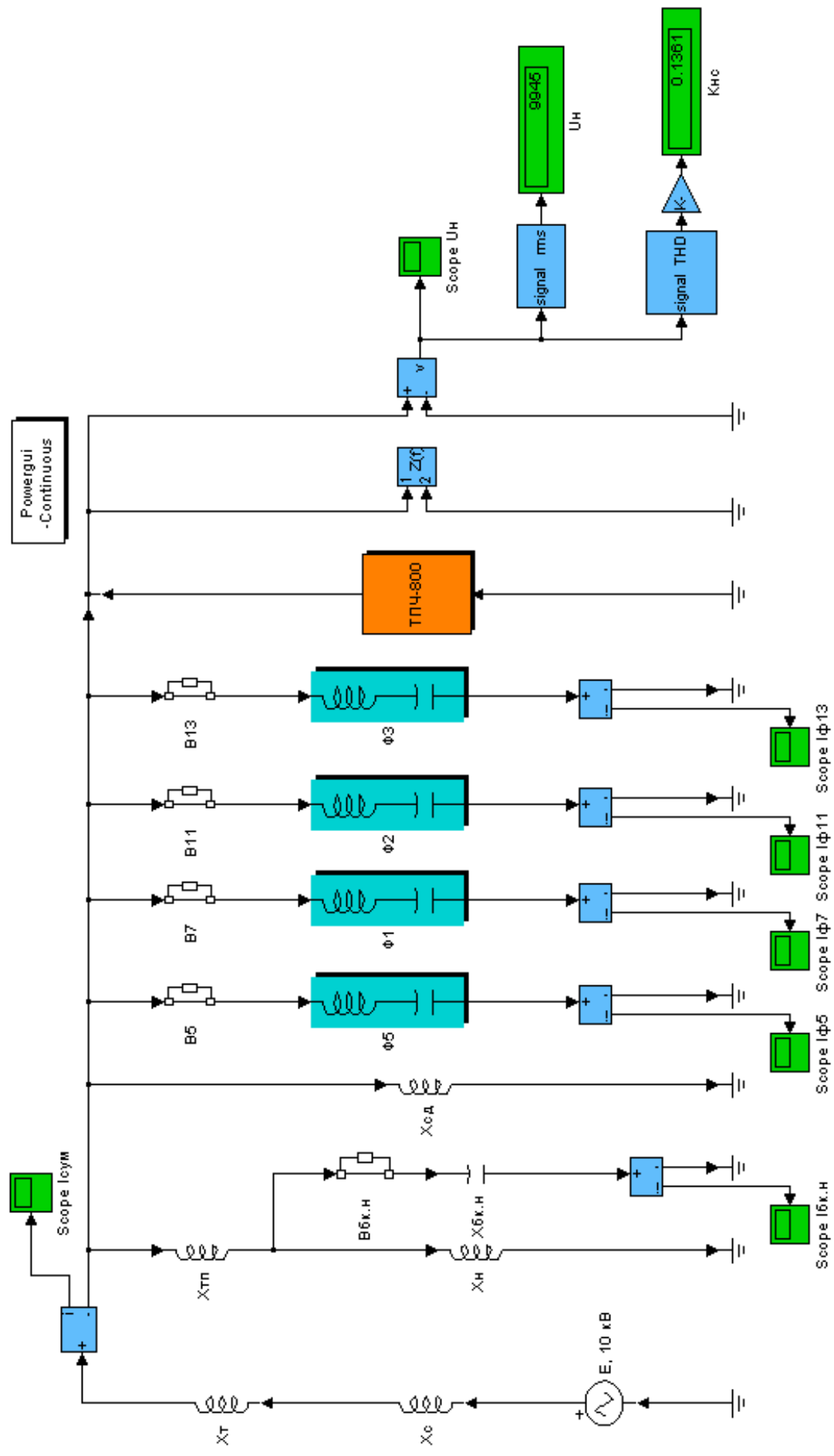


Рис. 2.18. Комп'ютерна СЕРП з джерелом вищих гармонік і ФКП

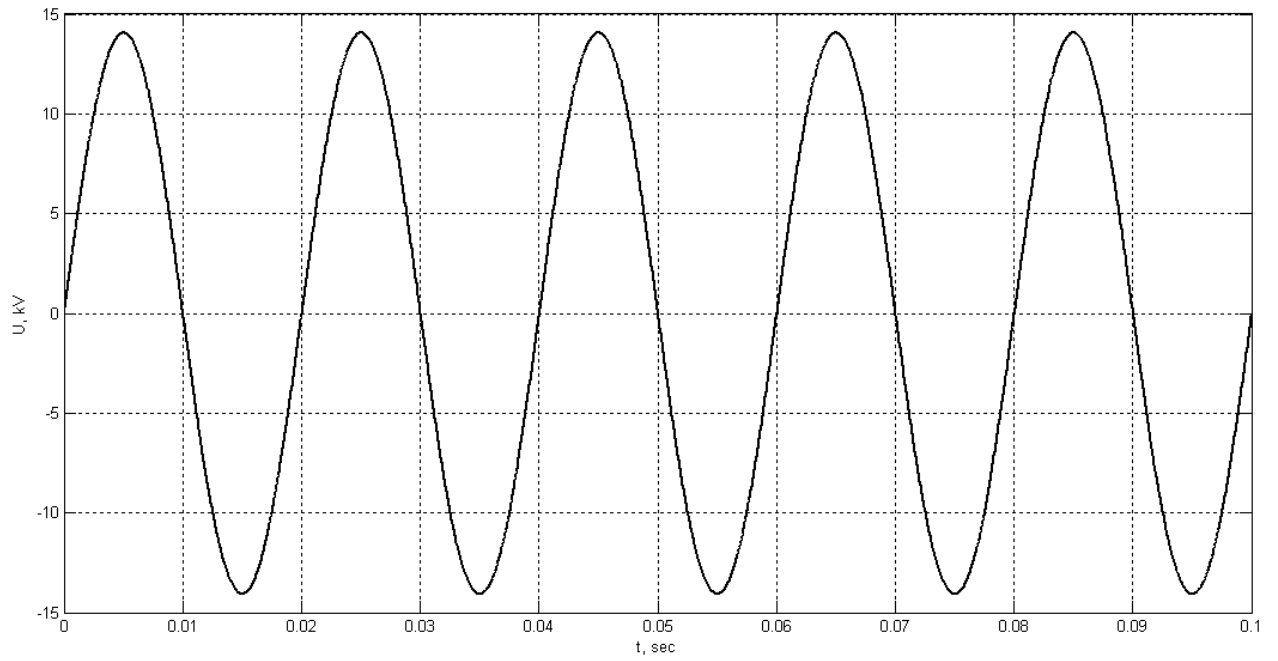


Рис. 2.19. Графік напруги на шинах 10 кВ (з ФКП)

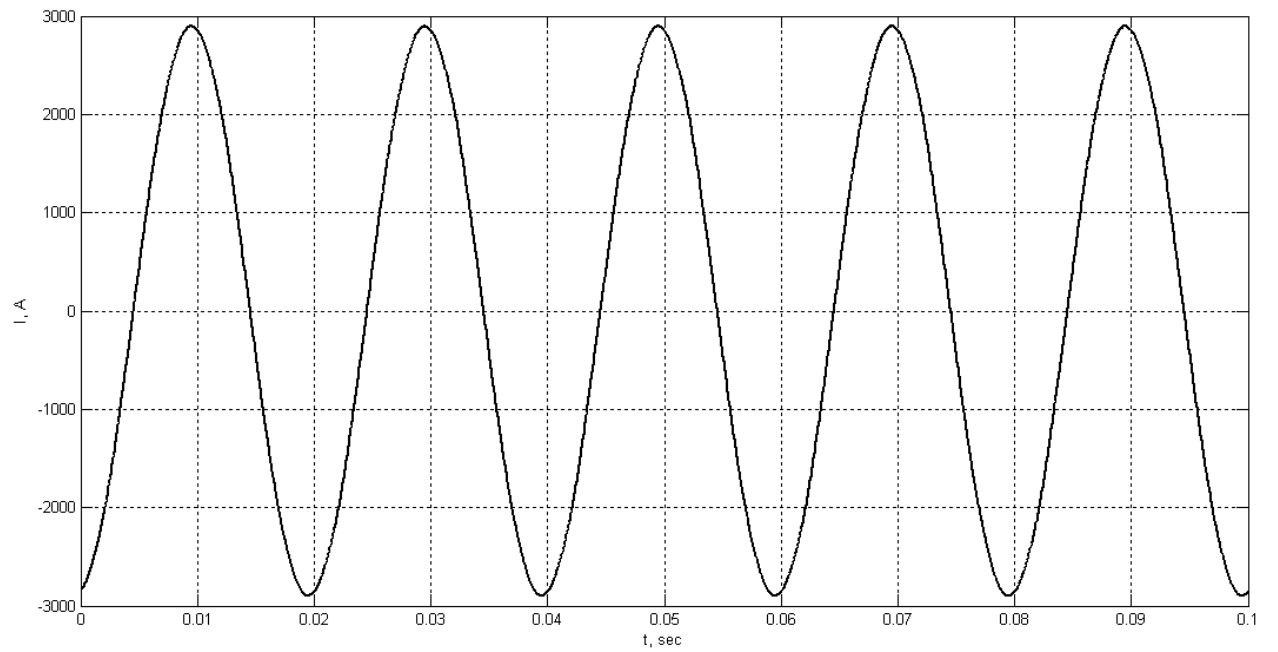


Рис. 2.20. Графік загального струму (з ФКП)

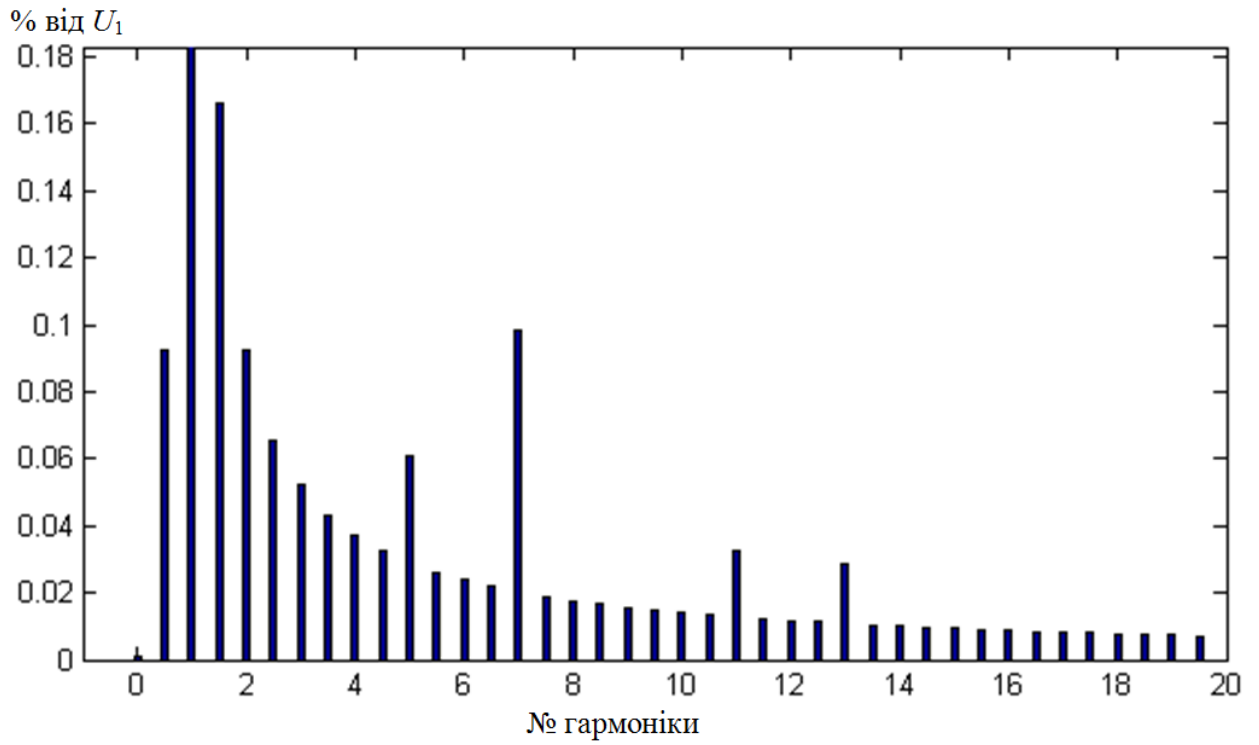


Рис. 2.21. Результати спектрального аналізу напруги (з ФКП)

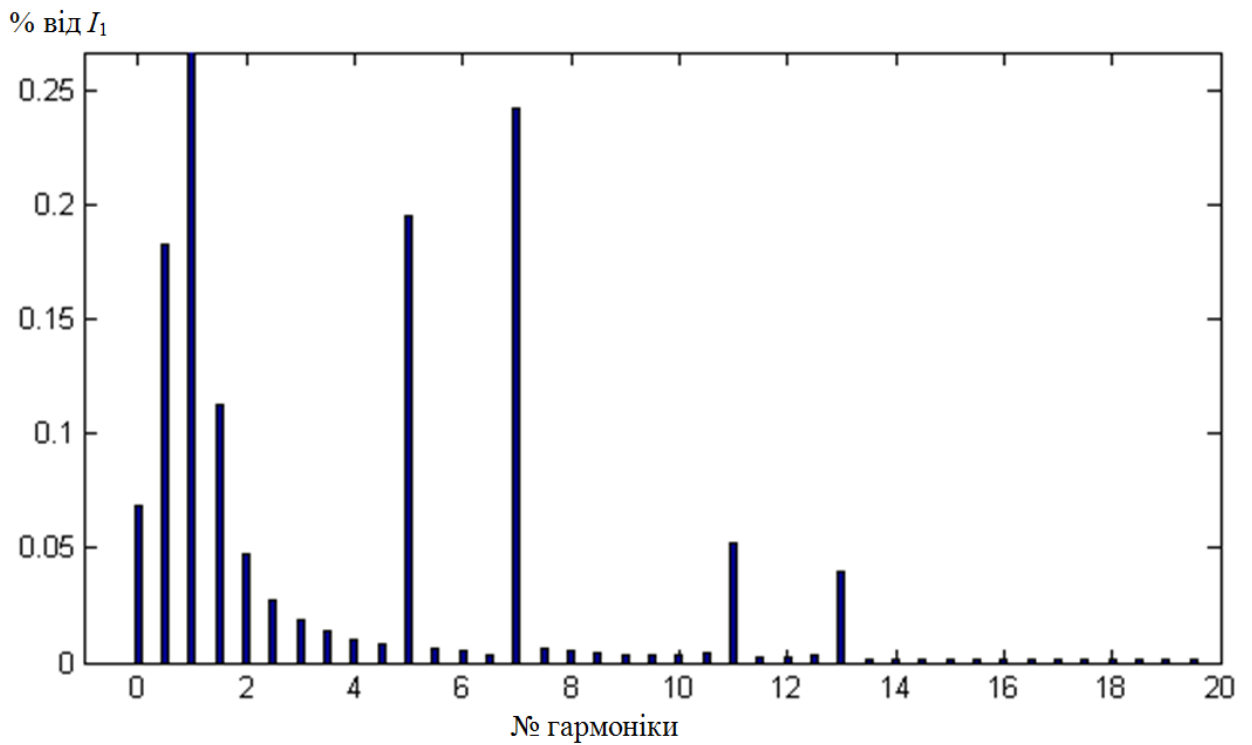


Рис. 2.22. Результати спектрального аналізу струму (з ФКП)

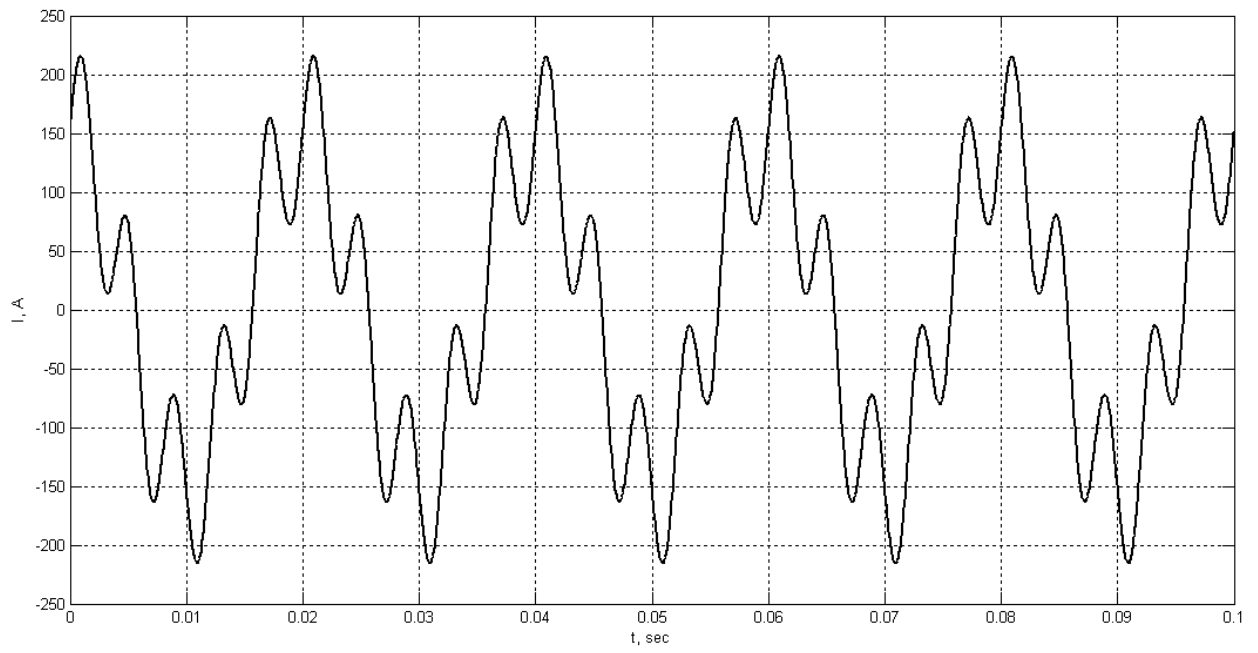


Рис. 2.23. Графік струму ФКП 5-ї гармоніки

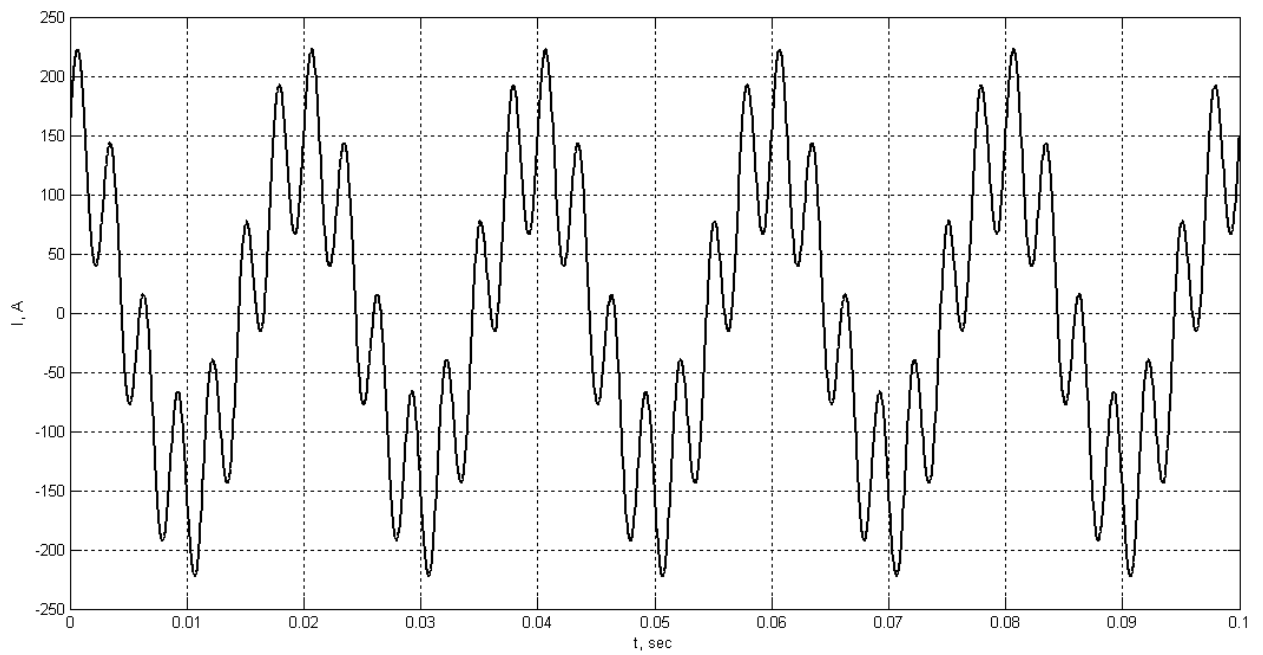


Рис. 2.24. Графік струму ФКП 7-ї гармоніки

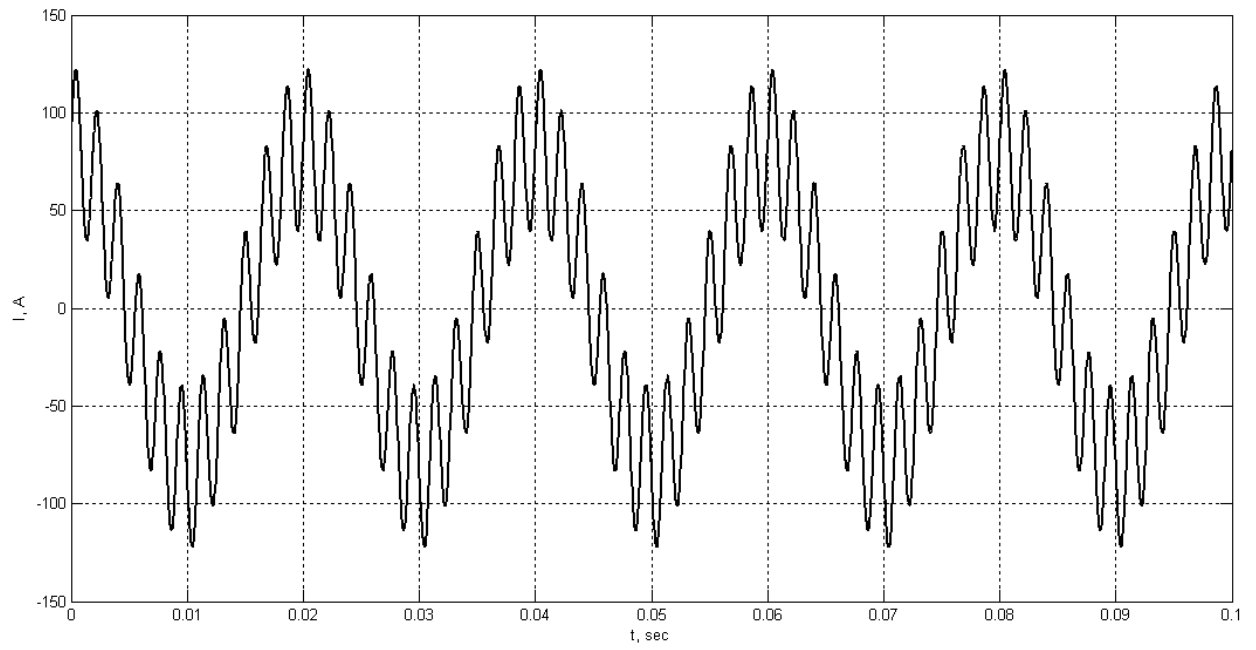


Рис. 2.25. Графік струму ФКП 11-ї гармоніки

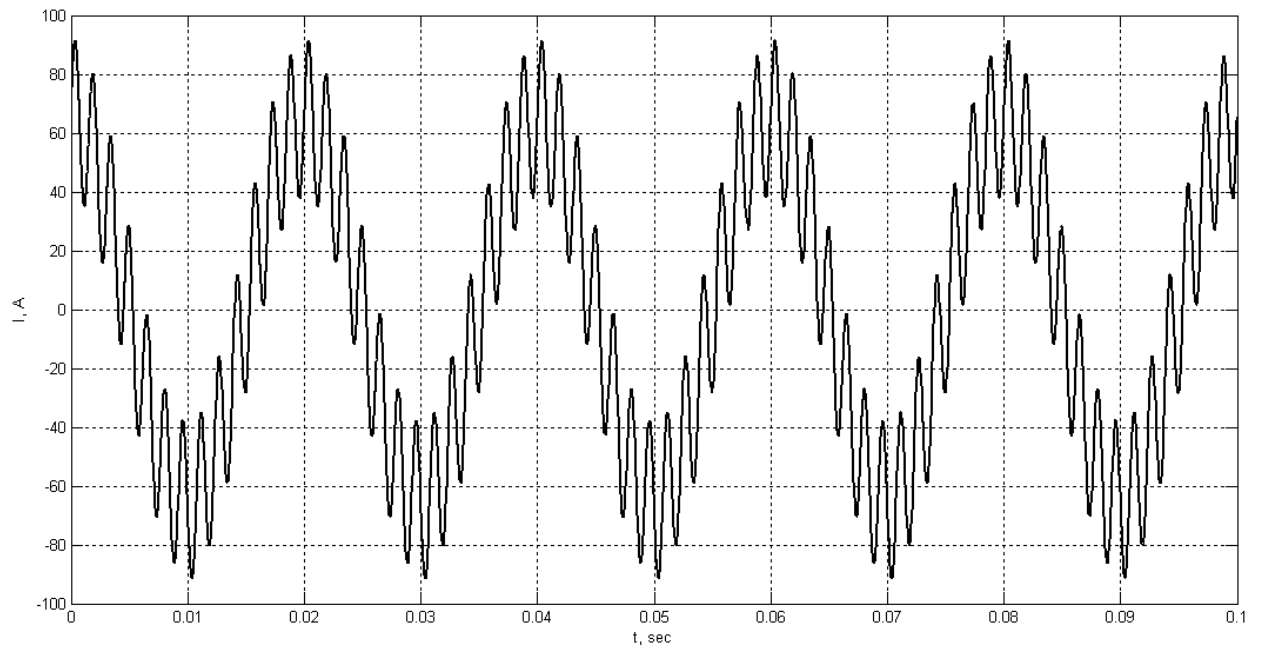


Рис. 2.26. Графік струму ФКП 13-ї гармоніки

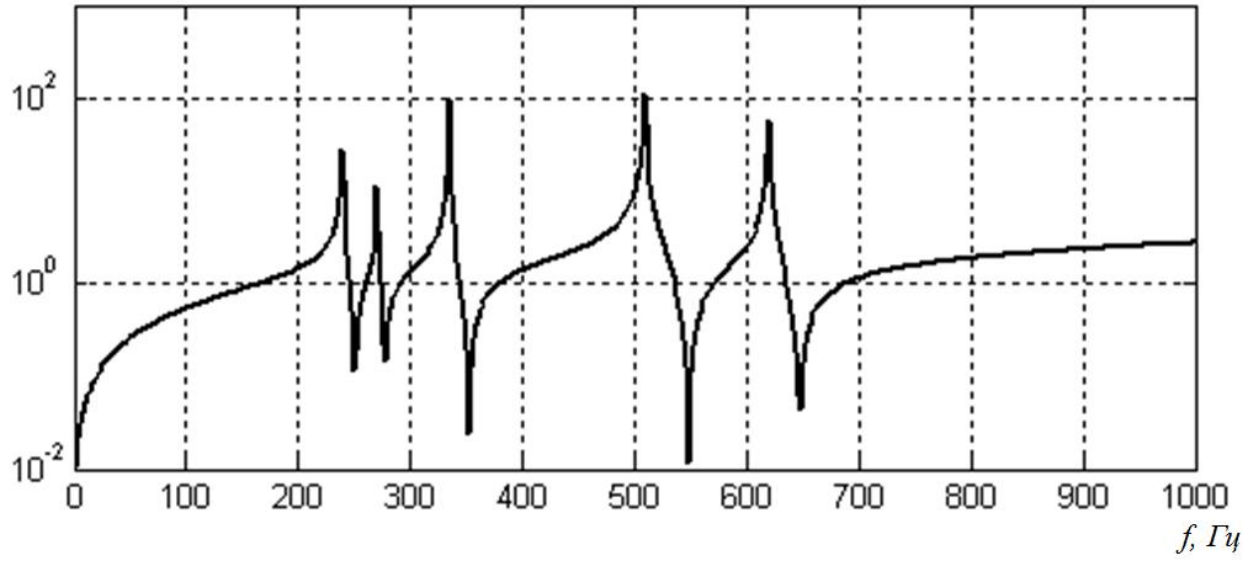
$Z, \text{ Ом}$ 


Рис. 2.27. АЧХ опоры СЕПП (з ФКП)

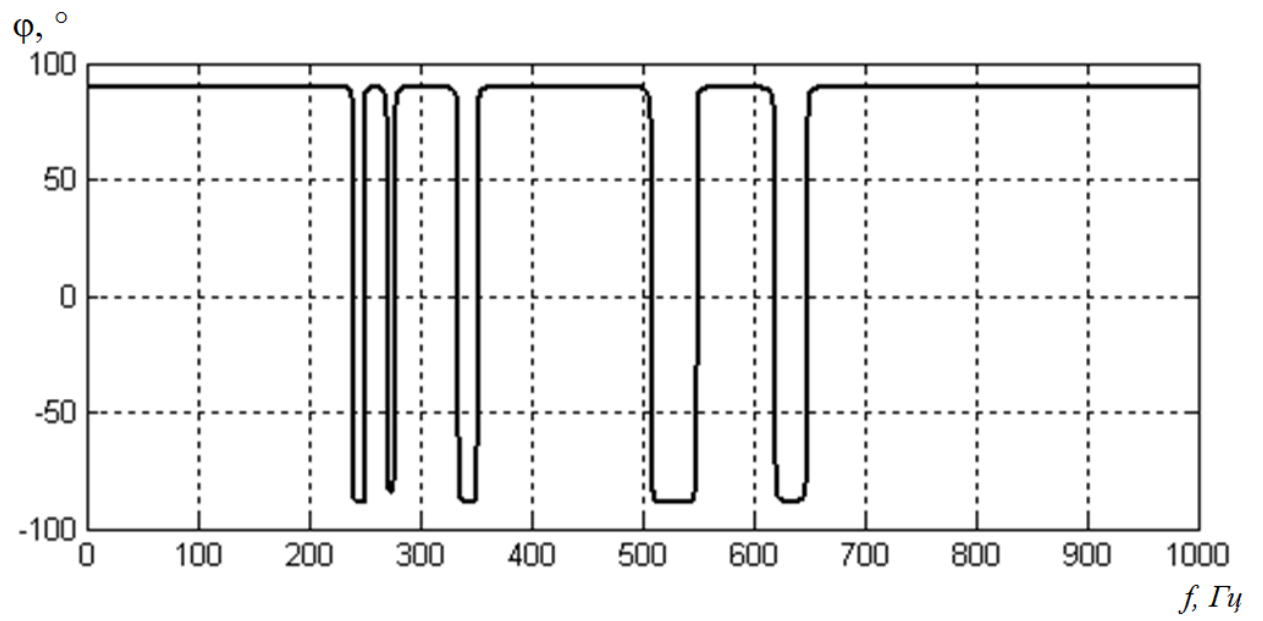


Рис. 2.28. АЧХ опоры СЕПП (з ФКП)

Результати моделювання практично 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>Моделювання</i>    |                        | <i>Розрахунок</i>     |                        |
|----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
|                      | <i>Мін.<br/>режим</i> | <i>Макс.<br/>режим</i> | <i>Мін.<br/>режим</i> | <i>Макс.<br/>режим</i> |
| Коефіцієнт $k_U$ , % | 1,890                 | 9,199                  | 1,490                 | 9,170                  |
| Коефіцієнт $k_{пВ}$  | -                     | 1,62                   | -                     | 1,53                   |
| Коефіцієнт $k_{пН}$  | -                     | 1,16                   | -                     | 1,11                   |

Це свідчить про адекватність розробленої моделі, а результати, отримані шляхом її використання є достовірними.

Аналіз результатів моделювання показав, що після встановлення ФКП, величина  $k_U$  входить до нормально допустимих меж.

### 2.3. Централізована компенсація вищих гармонік

Фільтрація вищих гармонік за рахунок підключення ФКП до вузлів мережі з нелінійними навантаженнями набула широкого розповсюдження. Але в розгалужених СЕПП з кількома джерелами вищих гармонік це рішення може виявитися неприйнятним з точки зору економічних показників.

Централізована корекція несинусоїдальних режимів СЕПП може виявитися більш доцільною. Ідея централізованої компенсації вищих гармонік полягає в розміщенні одного або декількох ФКП в одному з вузлів СЕПП, що забезпечить зниження рівня несинусоїдальності напруги до у всіх вузлах мережі.

Розглянемо вирішення задачі централізованої компенсації вищих гармонік напруги для конкретного варіанту СЕПП, схема якої зображена на рис. 2.29.

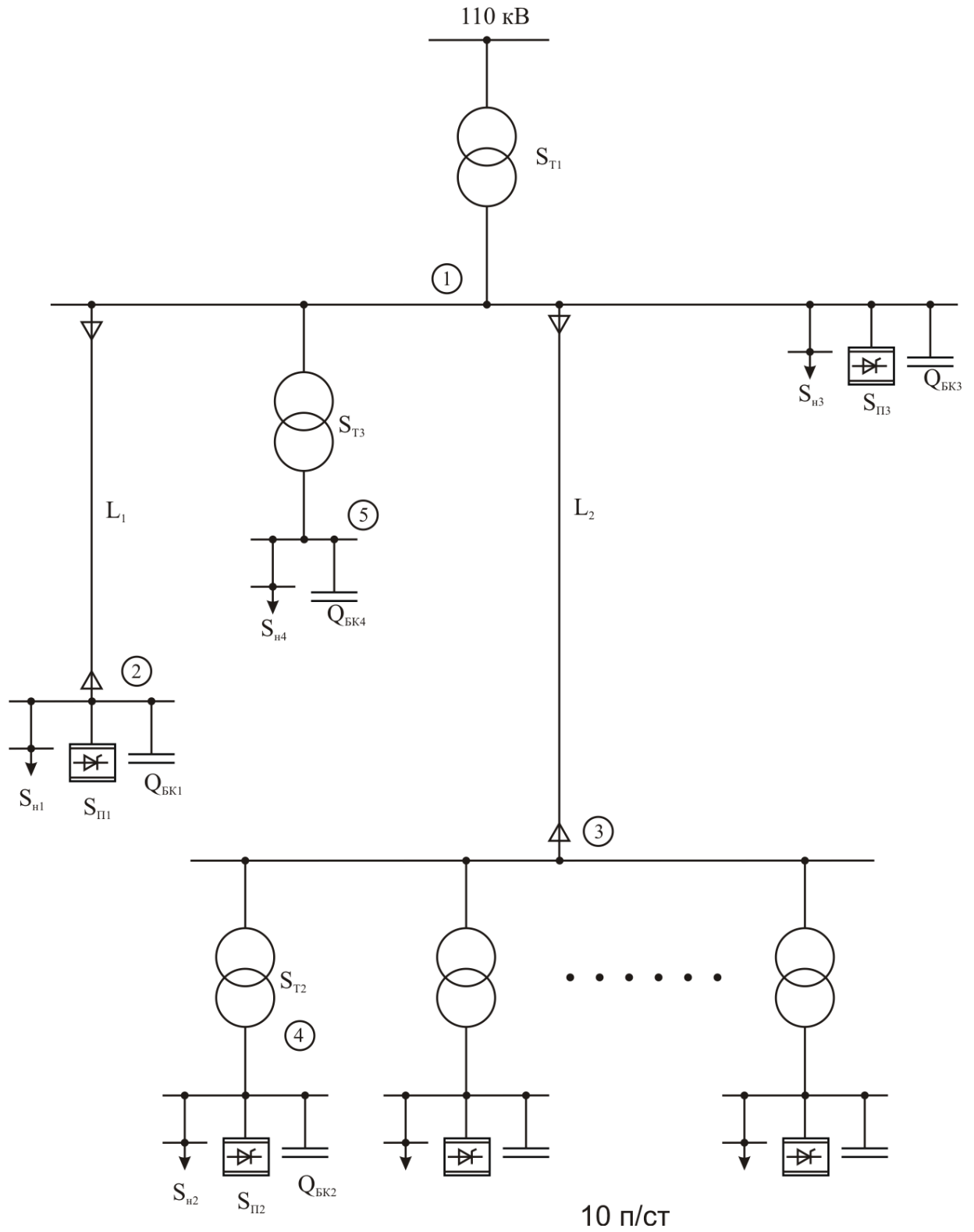


Рис. 2.29. Схема СЕПП для розрахунку централізованої компенсації вищих гармонік

Вихідні дані до розрахунку наведені нижче.

Система:  $U_H = 110 \text{ кВ}$ ;  $S_K = 2000 \text{ МВА}$ ;

Трансформатор ГЗП:  $S_{T1} = 63 \text{ МВА}$ ;  $U_\epsilon = 110 \text{ кВ}$ ;  $U_H = 10 \text{ кВ}$ ;

$u_{к,\%} = 12 \%$ ;  $\Delta P_K = 250 \text{ кВт}$

#### Вузол 1

КЛ1:  $l_1 = 2 \text{ км}$ ;  $n = 4 \text{ шт.}$ ;  $r_0 = 0.028 \text{ Ом/км}$ ;  $x_0 = 0.075 \text{ Ом/км}$ .

КЛ2:  $l_2 = 4.8 \text{ км}$ ;  $r_0 = 0.028 \text{ Ом/км}$ ;  $x_0 = 0.075 \text{ Ом/км}$ .

Т3:  $S_{T3} = 2500 \text{ кВА}$ ;  $u_{к,\%} = 10 \%$ ;  $\Delta P_K = 10 \text{ кВт}$ .

Н3:  $S_{H3} = 25 \text{ МВА}$ ;  $\cos \varphi_{H3} = 0.8$ ;

П3 (12-ти пульсний):  $S_{П3} = 5 \text{ МВА}$ ;  $\varphi_{П3} = 30^\circ$ ;

БСК3:  $Q_{БК3} = 15 \text{ Мвар}$ .

#### Вузол 2

Н1:  $S_{H1} = 15 \text{ МВА}$ ;  $\cos \varphi_{H3} = 0.8$ ;

П1 (6-ти пульсний):  $S_{П1} = 15 \text{ МВА}$ ;  $\varphi_{П1} = 10^\circ$ ;

БСК3:  $Q_{БК1} = 8 \text{ Мвар}$

#### Вузол 3 (10 однакових ТП):

Т2:  $S_{T2} = 2500 \text{ кВА}$ ;  $u_{к,\%} = 10 \%$ ;  $\Delta P_K = 10 \text{ кВт}$ .

#### Вузол 4 (10 однакових Н, П та БСК)

Н2:  $S_{H2} = 1.3 \text{ МВА}$ ;  $\cos \varphi_{H3} = 0.8$ ;

П2 (6-ти пульсний):  $S_{П2} = 0.2 \text{ МВА}$ ;  $\varphi_{П2} = 20^\circ$ ;

БСК2:  $Q_{БК2} = 1 \text{ Мвар}$ .

#### Вузол 5

Н4:  $S_{H4} = 2 \text{ МВА}$ ;  $\cos \varphi_{H3} = 0.8$ ;

БСК4:  $Q_{БК4} = 1 \text{ Мвар}$

Для проведення розрахунку вищих гармонік напруг була складена схема заміщення СЕПП (рис. 2.30).

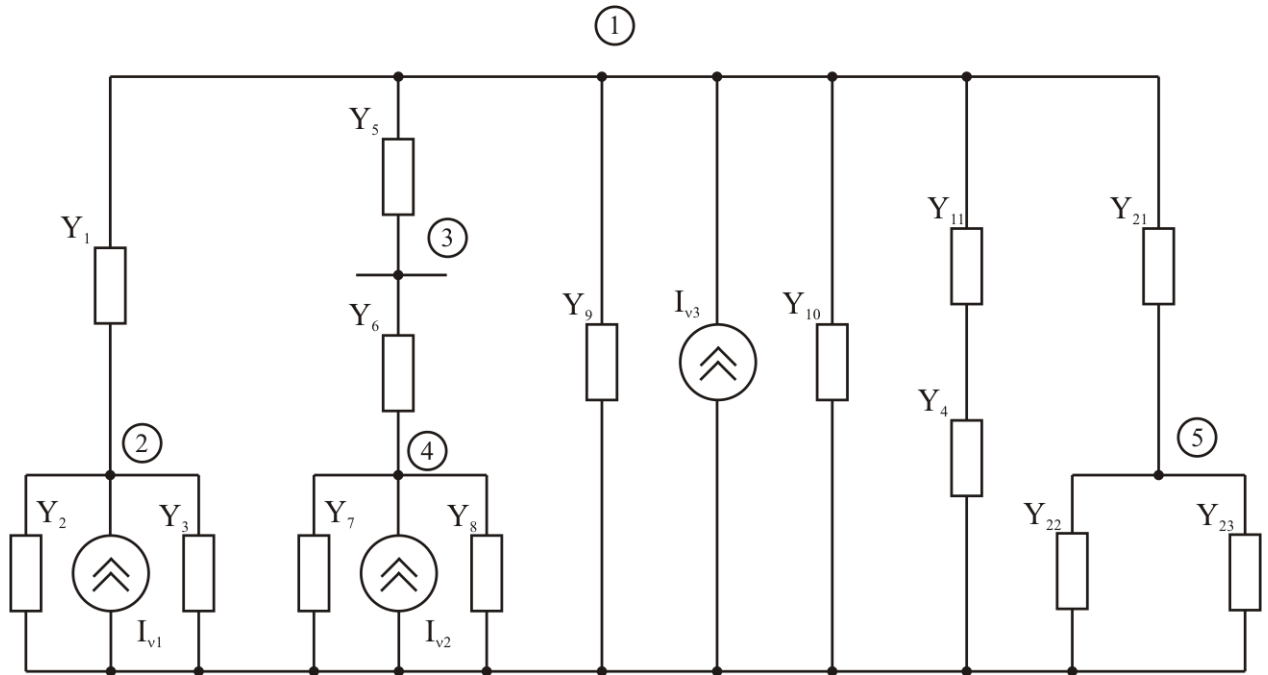


Рис. 2.30. Схема заміщення СЕПП

Розрахунок струмів вищих гармонік виконувався згідно з методу вузлових напруг, у в.о. та  $S_6 = 100 \text{ МВА}$ .

Розрахунок параметрів елементів схеми заміщення

Комплекс провідності системи:

$$\underline{Y}_4(\nu) = \frac{S_{\kappa}}{jS_6\nu} = \frac{2000}{j100\nu} = -j\frac{20}{\nu}$$

де

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

Комплекс провідності трансформатора Т1:

$$\underline{Y}_6(\nu) = \frac{1}{\sqrt{\nu} \cdot \frac{\Delta P_{\kappa T1} \cdot S_6}{S_{\text{ном}T1}^2} + j \cdot \nu \cdot \frac{u_{\kappa, \%T1} \cdot S_6}{S_{\text{ном}T1}}} = \frac{1}{\sqrt{\nu} \frac{250 \cdot 10^5}{63000^2} + j \cdot \nu \cdot \frac{12 \cdot 100 \cdot 10}{63000^2}} =$$

$$= \frac{1}{6.3 \cdot 10^{-3} \sqrt{\nu} + j0.191\nu}$$

Комплекс провідності трансформатора Т2:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_6(\nu) &= \frac{n_{T2}}{\sqrt{\nu} \cdot \frac{\Delta P_{KT2} \cdot S_6}{S_{номT2}^2} + j \cdot \nu \frac{u_{K,\%T2} \cdot S_6}{S_{номT2}}} = \frac{10}{\sqrt{\nu} \frac{10 \cdot 10^5}{2500^2} + j \cdot \nu \cdot \frac{10 \cdot 100 \cdot 10}{2500^2}} = \\ &= \frac{10}{0.16 \sqrt{\nu} + j4\nu} \end{aligned}$$

Комплекс провідності трансформатора Т3:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{21}(\nu) &= \frac{1}{\sqrt{\nu} \cdot \frac{\Delta P_{KT2} \cdot S_6}{S_{номT2}^2} + j \cdot \nu \frac{u_{K,\%T2} \cdot S_6}{S_{номT2}}} = \frac{1}{\sqrt{\nu} \frac{10 \cdot 10^5}{2500^2} + j \cdot \nu \cdot \frac{10 \cdot 100 \cdot 10}{2500^2}} = \\ &= \frac{1}{0.16 \sqrt{\nu} + j4\nu} \end{aligned}$$

Комплекс провідності БСК1:

$$\underline{Y}_3(\nu) = j \frac{Q_{БК1}}{S_6} \nu = j \frac{8}{100} \nu = j8 \cdot 10^{-2} \nu$$

Комплекс провідності БСК2:

$$\underline{Y}_8(\nu) = j \frac{n_{БК2} Q_{БК2}}{S_6} \nu = j \frac{10 \cdot 1}{100} \nu = j8 \cdot 10^{-2} \nu$$

Комплекс провідності БСК3:

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

Комплекс провідності БСК4:

$$\underline{Y}_{23}(\nu) = j \frac{Q_{БК4}}{S_{\delta}} \nu = j \frac{1}{100} \nu = j10^{-2}\nu$$

Комплекс провідності КЛ1:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_1(\nu) &= \frac{1}{(r_0 \sqrt{\nu} + x_0 \cdot \nu \cdot j) \cdot \frac{l_1}{n_{кл}} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{ном}^2}} = \frac{1}{(0.028 \sqrt{\nu} + j0.075\nu) \cdot \frac{2}{4} \cdot \frac{10^2}{10^2}} = \\ &= \frac{1}{14 \cdot 10^{-2} \sqrt{\nu} + j3.75 \cdot 10^{-2} \nu} \end{aligned}$$

Комплекс провідності КЛ2:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_5(\nu) &= \frac{1}{(r_0 \sqrt{\nu} + x_0 \cdot \nu \cdot j) \cdot l_2 \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{ном}^2}} = \frac{1}{(0.028 \sqrt{\nu} + j0.075\nu) \cdot 4.8 \cdot \frac{10^2}{10^2}} = \\ &= \frac{1}{0.134 \sqrt{\nu} + j0.36\nu} \end{aligned}$$

Комплекс провідності Н1:

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

Комплекс провідності Н2:

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

Комплекс провідності Н3:

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

Комплекс провідності Н4:

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

Еквівалентний опір  $\underline{Y}_{12}(\nu)$ :

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

*Розрахунок матриці провідностей*

Вирази для розрахунку комплексів власної провідності вузлів:

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

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

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

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

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

Результуючі вирази для розрахунку власної провідності вузлів виявились досить громіздкими і тому в роботі не приводяться.

Вирази для розрахунку комплексів взаємної провідності:

$$\underline{G}_{12}(\nu) = \underline{G}_{21}(\nu) = -\underline{Y}_1(\nu) = -\frac{1}{14 \cdot 10^{-2} \sqrt{\nu} + j3.75 \cdot 10^{-2} \nu}$$

$$\underline{G}_{13}(\nu) = \underline{G}_{31}(\nu) = -\underline{Y}_5(\nu) = -\frac{1}{0.134 \sqrt{\nu} + j0.36 \nu}$$

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

$$\underline{G}_{15}(\nu) = \underline{G}_{51}(\nu) = -\underline{Y}_{21}(\nu) = -\frac{1}{0.16 \sqrt{\nu} + j4 \nu}$$

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

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

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

$$\underline{G}_{34}(\nu) = \underline{G}_{43}(\nu) = -\underline{Y}_6(\nu) = -\frac{10}{0.16\sqrt{\nu} + j4\nu}$$

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

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

*Розрахунок матриці джерел струму для вузлів схеми*

Вузол 1:

$$\begin{aligned} J_{11}(\nu) &= \begin{cases} \frac{S_{\pi 3}}{S_6 \nu} (\cos(\varphi_{\pi 3} \nu) + j \sin(\varphi_{\pi 3} \nu)), & \nu = 11 \vee \nu = 13 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ 0, & \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \end{cases} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \begin{cases} \frac{5}{100\nu} (\cos(30^\circ \cdot \nu) + j \sin(30^\circ \cdot \nu)), & \nu = 11 \vee \nu = 13 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ 0, & \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \end{cases} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \begin{cases} \frac{5 \cdot 10^{-2}}{\nu} (\cos(30^\circ \cdot \nu) + j \sin(30^\circ \cdot \nu)), & \nu = 11 \vee \nu = 13 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ 0, & \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \end{cases} \end{aligned}$$

Вузол 2:

$$\begin{aligned} J_{22}(\nu) &= \begin{cases} \frac{S_{\pi 1}}{S_6 \nu} (\cos(\varphi_{\pi 1} \nu) + j \sin(\varphi_{\pi 1} \nu)), & \nu = 5 \vee \nu = 7 \vee \nu = 11 \vee \nu = 13 \\ & \nu = 17 \vee \nu = 19 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ 0, & \nu \neq 5 \vee \nu \neq 7 \vee \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \\ & \nu \neq 17 \vee \nu \neq 19 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \end{cases} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \begin{cases} \frac{15}{100\nu} (\cos(10^\circ \cdot \nu) + j \sin(10^\circ \cdot \nu)), & \nu = 5 \vee \nu = 7 \vee \nu = 11 \vee \nu = 13 \\ & \nu = 17 \vee \nu = 19 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ 0, & \nu \neq 5 \vee \nu \neq 7 \vee \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \\ & \nu \neq 17 \vee \nu \neq 19 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \end{cases} \Rightarrow \end{aligned}$$

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

Вузли 3, 5:

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

Вузол 4:

$$\dot{J}_{44}(\nu) = \begin{cases} \frac{n_{\Pi 2} \cdot S_{\kappa, \Pi 2}}{S_6 \nu} (\cos(\varphi_{6 \Pi 2} \nu) + j \sin(\varphi_{6 \Pi 2} \nu)), & \nu = 5 \vee \nu = 7 \vee \nu = 11 \vee \nu = 13 \\ & \nu = 17 \vee \nu = 19 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ & \nu \neq 5 \vee \nu \neq 7 \vee \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \\ & \nu \neq 17 \vee \nu \neq 19 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \\ 0, & \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{10 \cdot 0.2}{100 \nu} (\cos(20^\circ \cdot \nu) + j \sin(20^\circ \cdot \nu)), & \nu = 5 \vee \nu = 7 \vee \nu = 11 \vee \nu = 13 \\ & \nu = 17 \vee \nu = 19 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ & \nu \neq 5 \vee \nu \neq 7 \vee \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \\ & \nu \neq 17 \vee \nu \neq 19 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \\ 0, & \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{2 \cdot 10^{-2}}{\nu} (\cos(20^\circ \cdot \nu) + j \sin(20^\circ \cdot \nu)), & \nu = 5 \vee \nu = 7 \vee \nu = 11 \vee \nu = 13 \\ & \nu = 17 \vee \nu = 19 \vee \nu = 23 \vee \nu = 25 \\ & \nu \neq 5 \vee \nu \neq 7 \vee \nu \neq 11 \vee \nu \neq 13 \\ & \nu \neq 17 \vee \nu \neq 19 \vee \nu \neq 23 \vee \nu \neq 25 \\ 0, & \end{cases}$$

*Складання матриць вузлових струмів, провідностей і*

*розв'язання системи рівнянь вузлових напруг*

Загальний вигляд системи рівнянь вузлових напруг в матричній формі:

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

де  $\underline{G}(\nu)$  – матриця провідностей:

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

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

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

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

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

Ця система лінійною системою рівнянь, тому її розв'язок можливо знайти одним із методів розв'язання систем лінійних рівнянь.

Використаємо метод оберненої матриці:

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

Результати розрахунку значень вузлових напруг показані в табл. 2.6

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

| Параметр  | Вузол    |          |          |          |          |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|           | № 1      | № 2      | № 3      | № 4      | № 5      |
| $U_5$     | 4,90E-02 | 5,50E-02 | 1,30E-02 | 4,70E-02 | 2,94E-01 |
| $U_7$     | 3,20E-02 | 3,10E-02 | 1,30E-02 | 9,94E-03 | 3,50E-02 |
| $U_{11}$  | 7,50E-03 | 2,91E-03 | 3,21E-03 | 2,42E-03 | 1,97E-03 |
| $U_{13}$  | 6,57E-03 | 2,10E-03 | 2,77E-03 | 1,74E-03 | 1,15E-03 |
| $U_{17}$  | 5,28E-03 | 2,24E-03 | 2,31E-03 | 9,78E-04 | 5,02E-04 |
| $U_{19}$  | 5,85E-03 | 4,82E-03 | 2,71E-03 | 7,89E-04 | 4,37E-04 |
| $U_{23}$  | 1,40E-02 | 2,70E-02 | 7,42E-03 | 1,89E-04 | 7,02E-04 |
| $U_{25}$  | 6,02E-03 | 1,30E-02 | 3,21E-03 | 2,63E-04 | 2,51E-04 |
| $k_U, \%$ | 6,23E+00 | 7,03E+00 | 2,09E+00 | 4,80E+00 | 2,96E+01 |
| $k_{\Pi}$ | 1,13E+00 | 1,27E+00 | -        | 1,03E+00 | 1,79E+00 |

Розрахунок  $k_U$  у вузлах та  $k_{\Pi}$  БСК

$k_U$  у вузлах СЕПІ визначається за виразом:

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

$k_{\Pi}$  БСК у вузлах мережі визначаються за формулою:

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

Для розрахунку значень  $k_{\Pi}$  БСК потрібно провести розрахунок номінальних струмів БСК:

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

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

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

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

Результати розрахунку вузлових напруг,  $k_U$  та  $k_{\Pi}$  БСК наведені в табл. 2.6.

Як видно з табл. 2.6,  $k_{\Pi}$  БСК у вузлі 5 перевищує допустиме значення (1,3), а  $k_U$  у вузлах 1, 2 і 5 значно більший за нормально допустиме значення (5 %). Тому в СЕПП необхідне встановлення ФКП.

Для визначення місць встановлення ФКП потрібно визначити, в яких вузлах СЕПП при встановленні ФКП  $k_U$  знаходитиметься в нормально допустимих межах.

Результати розрахунку  $k_U$  у вузлах СЕПП після встановлення у кожному з вузлів фільтрів 5, 7, 11 та 13 гармонік приведені в табл. 2.7.

Таблиця 2.7. Результати розрахунку  $k_U$  у вузлах СЕПП після встановлення фільтрів

| № вузла з ФКП | $k_U, \%$ |      |      |      |       |
|---------------|-----------|------|------|------|-------|
|               | № 1       | № 2  | № 3  | № 4  | № 5   |
| 1             | 1,73      | 3,45 | 1,24 | 1,82 | 0,10  |
| 2             | 1,88      | 3,01 | 1,30 | 1,74 | 0,48  |
| 3             | 7,10      | 8,05 | 0,88 | 7,01 | 33,65 |
| 4             | 7,63      | 8,36 | 3,97 | 0,13 | 40,16 |
| 5             | 8,22      | 9,33 | 2,33 | 8,05 | 0,10  |

В результаті проведеного розрахунку несинусоїдальності напруг виявилось, що найбільш доцільними є два варіанти розміщення ФКП:

- на шинах СЕПП (вузол № 1);
- в кінці КЛ1 (вузол № 2).

*ФКП у вузлі № 1*

Струм 5 гармоніки ВП1:

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

Аналогічним чином розраховуються струми інших вищих гармонік ВП1, ВП2, ВП3. Результати розрахунку приведені в табл. 2.8.

Таблиця 2.8 . Результати розрахунку струмів вищих гармонік ВП1, ВП2, ВП3

| №<br>перетворювача | Струми ВГ перетворювачів, А |           |            |            |
|--------------------|-----------------------------|-----------|------------|------------|
|                    | $\nu = 5$                   | $\nu = 7$ | $\nu = 11$ | $\nu = 13$ |
| 1                  | 173,2                       | 123,7     | 78,7       | 66,6       |
| 2                  | 23,1                        | 16,5      | 10,5       | 8,9        |
| 3                  | -                           | -         | 26,2       | 22,2       |

Струм 5 гармоніки, що протікає через ФКП:

$$I_{\varphi 5} = \frac{I_{BП1}(5)}{\underline{G}_{22}(5)} \cdot \underline{Y}_1(5) + \frac{I_{BП2}(5)}{\underline{G}_{44}(5)} \cdot \frac{\underline{Y}_6(5) \cdot \underline{Y}_5(5)}{\underline{Y}_6(5) + \underline{Y}_5(5)} = 245,7 \text{ A}$$

Попередній значення потужності БСК фільтру 5 гармоніки:

$$Q_{бк5} = 1,2 \cdot K_c \cdot I_{\varphi 5} \cdot U_{ном} = 1,2 \cdot 3 \cdot 245,7 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 8,845 \text{ Мвар}$$

Приймаємо значення потужності БСК фільтру 5 гармоніки  $Q_{бк5} = 8,845 \text{ Мвар}$ .

Провідність ФКП 5 гармоніки:

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

Формула для розрахунку власної провідності вузла № 1 з фільтром 5 гармоніки:

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

Результати попереднього розрахунку значень вузлових напруг і  $k_U$  у вузлах СЕПП при встановленні фільтру 5 гармоніки в першому вузлі приведені в табл. 2.9.

Таблиця 2.9. Результати попереднього розрахунку значень вузлових напруг і  $k_U$  у вузлах СЕПП при встановленні фільтру 5 гармоніки у вузлі № 1

| Величина  | № вузла  |         |         |         |         |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|
|           | № 1      | № 2     | № 3     | № 4     | № 5     |
| $U_5$     | 2,830e-5 | 6,10e-3 | 8,17e-3 | 0,02    | 1,68e-4 |
| $U_7$     | 0,11     | 0,12    | 0,04    | 0,04    | 0,12    |
| $U_{11}$  | 8,35e-3  | 4,21e-3 | 3,60e-3 | 2,48e-3 | 2,19e-3 |
| $U_{13}$  | 6,96e-3  | 2,78e-3 | 2,96e-3 | 1,76e-3 | 1,21e-3 |
| $U_{17}$  | 5,34e-3  | 1,80e-3 | 2,34e-3 | 9,80e-4 | 5,08e-4 |
| $U_{19}$  | 5,82e-3  | 4,27e-3 | 2,69e-3 | 7,88e-4 | 4,34e-4 |
| $U_{23}$  | 0,0150   | 0,03    | 7,60e-3 | 2,37e-4 | 7,21e-4 |
| $U_{25}$  | 6,43e-3  | 0,01    | 3,42e-3 | 2,57e-4 | 2,68e-4 |
| $k_U, \%$ | 11,42    | 13,20   | 4,37    | 4,01    | 12,07   |

Проведемо оцінку мінімальної потужності ФКП 5-ї гармоніки.

Струм ФКП 5 гармоніки:

$$I'_{\varphi 5} = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_n} \cdot \left| \sum_{j=1}^8 \dot{U}_1(v_j) \cdot \underline{Y}_{13}(v_j) \right| = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10} \cdot |0,073 - j0,041| = 0,4843 \text{ кА}$$

Потужність БСК ФКП 5 гармоніки:

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

Провідність ФКП 5 гармоніки:

$$\underline{Y}'_{\varphi 5}(v) = \frac{1}{j \frac{S_6}{Q'_{\varphi 5}} \left( \frac{v}{v_{рез}^2} - \frac{1}{v} \right)} = \frac{1}{j \frac{100}{17,43} \left( \frac{v}{5,01^2} - \frac{1}{v} \right)} = \frac{1}{j5,737 \left( \frac{v}{25,0001} - \frac{1}{v} \right)}$$

Формула для розрахунку власної провідності першого вузла:

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

Результати розрахунку зведено в табл. 2.10.

Таблиця 2.10. Результати розрахунку значень вузових напруг і  $k_U$  у вузлах СЕПП при встановленні фільтру 5-ї гармоніки у вузлі № 1 (перше наближення)

| Параметр  | № вузла  |          |          |          |          |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|           | № 1      | № 2      | № 3      | № 4      | № 5      |
| $U_5$     | 1,44E-05 | 6,12E-03 | 8,18E-03 | 1,70E-02 | 8,55E-05 |
| $U_7$     | 4,40E-02 | 5,70E-02 | 1,60E-02 | 1,70E-02 | 4,70E-02 |
| $U_{11}$  | 9,40E-03 | 5,81E-03 | 4,10E-03 | 2,57E-03 | 2,47E-03 |
| $U_{13}$  | 7,39E-03 | 3,57E-03 | 3,17E-03 | 1,80E-03 | 1,29E-03 |
| $U_{17}$  | 5,41E-03 | 1,40E-03 | 2,38E-03 | 9,84E-04 | 5,15E-04 |
| $U_{19}$  | 5,79E-03 | 3,76E-03 | 2,68E-03 | 7,88E-04 | 4,32E-04 |
| $U_{23}$  | 1,50E-02 | 2,50E-02 | 7,67E-03 | 2,85E-04 | 7,30E-04 |
| $U_{25}$  | 6,89E-03 | 1,40E-02 | 3,66E-03 | 2,51E-04 | 2,88E-04 |
| $k_U, \%$ | 4,89E+00 | 6,51E+00 | 2,07E+00 | 2,45E+00 | 4,72E+00 |

При проведенні розрахунку струмів ВГ потрібно проводити корекцію значення  $Q_{БКЗ}$  з урахуванням потужності фільтра та величини дефіциту реактивної потужності в СЕПП (в роботі зазначений розрахунок був обмежений 2-м наближенням).

Струм через ФКП 5 гармоніки складає  $I_{\phi 5} = 0,498$  кА.

Потужність БСК ФКП 5 гармоніки дорівнює  $Q_{\phi 5} = 17,93$  Мвар.

Значення  $k_{\pi}$  Для БСКЗ:

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

Аналогічним чином розраховуються значення  $k_{\pi}$  і для БСК у вузлах № 2, №4 та № 5. Результати розрахунку значень вузлових напруг і  $k_U$  у вузлах СЕПП при встановленні фільтру 5-ї гармоніки у вузлі № 1 наведено в табл. 2.11.

Таблиця 2.11. Результати розрахунку значень вузлових напруг і  $k_U$  у вузлах СЕПП при встановленні фільтру 5-ї гармоніки в першому (друге наближення)

| Параметр  | № вузла  |          |          |          |          |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|           | № 1      | № 2      | № 3      | № 4      | № 5      |
| $U_5$     | 1,40E-05 | 6,12E-03 | 8.18e-3  | 1,70E-02 | 8,31E-05 |
| $U_7$     | 4,10E-02 | 5,50E-02 | 1,50E-02 | 1,60E-02 | 4,40E-02 |
| $U_{11}$  | 9,47E-03 | 5,92E-03 | 4,13E-03 | 2,58E-03 | 2,49E-03 |
| $U_{13}$  | 7,41E-03 | 3,62E-03 | 3,18E-03 | 1,80E-03 | 1,30E-03 |
| $U_{17}$  | 5,42E-03 | 1,37E-03 | 2,38E-03 | 9,84E-04 | 5,15E-04 |
| $U_{19}$  | 5,79E-03 | 3,73E-03 | 2,68E-03 | 7,88E-04 | 4,32E-04 |
| $U_{23}$  | 1,50E-02 | 2,50E-02 | 7,67E-03 | 2,88E-04 | 7,30E-04 |
| $U_{25}$  | 6,91E-03 | 1,40E-02 | 3,68E-03 | 2,50E-04 | 2,89E-04 |
| $k_U, \%$ | 4,67E+00 | 6,25E+00 | 2,00E+00 | 2,39E+00 | 4,46E+00 |
| $k_{\pi}$ | 1,13E+00 | 1,27E+00 | -        | 1,01E+00 | 1,05E+00 |

Номінальний струм ФКП 5 гармоніки:

$$I_{н.Ф5} = \frac{Q_{\Phi 5}}{S_{\Phi}} = \frac{17,93}{100} = 0,179$$

Значення  $k_{\Pi}$  для ФКП 5 гармоніки:

$$K_{n\Phi 5} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n \left| \dot{U}_1(v_j) \cdot \underline{Y}_{13}(v_j) \right|^2 + I_{n.\Phi 5}^2}}{I_{n.\Phi 5}} = \frac{\sqrt{0,063^2 + 0,179^2}}{0,179} = 1,06 < 1,3$$

Як видно із розрахунку, значення  $k_{\Pi}$  для БСК знаходяться в допустимих межах. Значення  $k_U$  у вузлах СЕПП несуттєво відрізняються від значень, одержаних в першому наближенні. Для розглянутого режиму СЕПП забезпечується зниження значення  $k_U$  до допустимого в усіх вузлах СЕПП, крім вузла № 2. Тому потрібно розглянути інші варіанти встановлення фільтрів у вузлі № 1.

Результати розрахунку  $k_U$  і потужності фільтрів для різних варіантів їх встановлення у вузлі № 1 приведені в табл. 2.12. (розрахунки обмежувалися 2-м наближенням).

Таблиця 2.12. Результати розрахунку  $k_U$  і  $Q_{\text{нФКП}}$  в першому вузлі СЕПП

| Сполуч.<br>ФКП                    | $Q_{\text{нФКП}}, \text{ Мвар}$ |              |               |               | Значення $k_U$ , % для вузлів |       |       |       |        |
|-----------------------------------|---------------------------------|--------------|---------------|---------------|-------------------------------|-------|-------|-------|--------|
|                                   | $Q_{\Phi 5}$                    | $Q_{\Phi 7}$ | $Q_{\Phi 11}$ | $Q_{\Phi 13}$ | № 1                           | № 2   | № 3   | № 4   | № 5    |
| Без ФКП                           | —                               | —            | —             | —             | 6,280                         | 7,030 | 2,090 | 4,800 | 29,600 |
| ФКП5                              | 17,930                          | —            | —             | —             | 4,670                         | 6,250 | 2,000 | 2,390 | 4,560  |
| ФКП5,<br>ФКП7                     | 6,480                           | 4,520        | —             | —             | 2,170                         | 3,140 | 1,360 | 1,830 | 0,300  |
| ФКП5,<br>ФКП7,<br>ФКП11           | 7,060                           | 5,990        | 14,600        | —             | 2,460                         | 4,560 | 1,530 | 1,820 | 0,250  |
| ФКП5,<br>ФКП7,<br>ФКП11,<br>ФКП13 | 7,000                           | 5,850        | 6,490         | 10,840        | 1,910                         | 2,760 | 1,300 | 1,820 | 0,110  |

При встановленні ФКП у вузлі потрібно проводити уточнення значення потужності ФКП, встановлених в цьому вузлі.

Результати розрахунку  $k_{\Pi}$  та  $Q_{\text{нФКП}}$  приведені в таблиці 2.13.

Таблиця 2.13. Результати розрахунку  $k_{\Pi}$  та  $Q_{\text{нФКП}}$  для різних варіантів  
установки ФКП у вузлі № 1

| Сполучення<br>ФКП                 | Значення $k_{\Pi}$ |      |      |      |      |      |       |       |
|-----------------------------------|--------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|                                   | №1                 | №2   | №4   | №5   | ФКП5 | ФКП7 | ФКП11 | ФКП13 |
| Без ФКП                           | 1,13               | 1,27 | 1,03 | 1,79 | –    | –    | –     | –     |
| ФКП5                              | 1,13               | 1,27 | 1,01 | 1,05 | 1,06 | –    | –     | –     |
| ФКП5,<br>ФКП7                     | 1,09               | 1,22 | 1,01 | 1,00 | 1,11 | 1,15 | –     | –     |
| ФКП5,<br>ФКП7,<br>ФКП11           | 1,13               | 1,26 | 1,01 | 1,00 | 1,09 | 1,09 | 1,10  | –     |
| ФКП5,<br>ФКП7,<br>ФКП11,<br>ФКП13 | 1,10               | 1,12 | 1,01 | 1,00 | 1,10 | 1,09 | 1,05  | 1,05  |

### ФКП у вузлі № 2

Порядок розрахунку значень напруг вищих гармонік у вузлах СЕПП, вибір  $Q_{\text{нФКП}}$ , розрахунок  $k_U$  та  $k_{\Pi}$  БСК при встановленні ФКП у вузлі № 2 аналогічний проведеному для вузла № 1. Результати розрахунку  $k_U$  та  $Q_{\text{нФКП}}$  для різних варіантів встановлення фільтрів у вузлі № 2 приведені в табл. 2.14.

Результати розрахунку  $k_{\Pi}$  показані в табл. 2.15.

Таблиця 2.14. Результати розрахунку  $k_U$  та  $Q_{\text{нФКП}}$  для різних варіантів  
установки ФКП у вузлі № 2

| Сполуч.<br>ФКП          | $Q_{\text{нФКП}}, \text{ Мвар}$ |              |               |               | Значення $k_U, \%$ для вузлів |       |       |       |       |
|-------------------------|---------------------------------|--------------|---------------|---------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                         | $Q_{\Phi 5}$                    | $Q_{\Phi 7}$ | $Q_{\Phi 11}$ | $Q_{\Phi 13}$ | № 1                           | № 2   | № 3   | № 4   | № 5   |
| Без ФКП                 | 5,140                           | –            | –             | –             | 6,960                         | 7,190 | 2,830 | 2,640 | 7,170 |
| ФКП5                    | 5,810                           | 4,450        | –             | –             | 2,000                         | 3,080 | 1,300 | 1,750 | 0,530 |
| ФКП5,<br>ФКП7           | 5,810                           | 4,550        | 2,400         | –             | 1,810                         | 1,150 | 1,250 | 1,740 | 0,490 |
| ФКП5,<br>ФКП7,<br>ФКП11 | 5,700                           | 4,450        | 2,040         | 3,520         | 1,600                         | 3,150 | 1,190 | 1,740 | 0,490 |

Таблиця 2.15. Результати розрахунку  $k_{\Pi}$  та  $Q_{\text{нФКП}}$  для різних варіантів установки ФКП у вузлі № 2

| Сполуч.<br>ФКП          | Значення $k_{\Pi}$ |      |      |      |      |      |       |       |
|-------------------------|--------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|                         | №1                 | №2   | №4   | №5   | ФКП5 | ФКП7 | ФКП11 | ФКП13 |
| Без ФКП                 | 1,18               | 1,32 | 1,01 | 1,12 | 1,24 | –    | –     | –     |
| ФКП5                    | 1,08               | 1,23 | 1,01 | 1,00 | 1,12 | 1,11 | –     | –     |
| ФКП5,<br>ФКП7           | 1,07               | 1,26 | 1,01 | 1,00 | 1,12 | 1,11 | 1,08  | –     |
| ФКП5,<br>ФКП7,<br>ФКП11 | 1,06               | 1,27 | 1,01 | 1,00 | 1,12 | 1,11 | 1,10  | 1,10  |

*Аналіз проведених розрахунків та вибір оптимального  
місця встановлення ФКП*

Як видно із результатів розрахунків нормального режиму СЕПП (табл. 2.6 – 2.9), бажаний результат можливо досягти при встановленні у вузлі № 1 таких ФКП:

- 5, 7 гармонік потужністю 11 Мвар;
- 5, 7, 11 гармонік потужністю 27,65 МВАр;
- 5, 7, 11 і 13 гармонік потужністю 30,18 МВАр.

Окрім цього спостерігається зниження  $k_U$  у вузлах СЕПП до допустимих значень при встановленні у вузлі № 2 таких ФКП:

- 5, 7 гармонік потужністю 10,26 Мвар;
- 5, 7, 11 гармонік потужністю 12,76 Мвар;
- 5, 7, 11 і 13 гармонік потужністю 15,71 Мвар.

У всіх перелічених випадках значення  $k_{\Pi}$  БСК та ФКП знаходяться в допустимих межах.

Таким чином, провівши аналіз результатів розрахунку можна зробити висновок, що оптимальним варіантом є встановлення ФКП 5 та ФКП 7 гармонік у вузлі № 2 СЕПП сумарною потужністю 10,26 Мвар. Зважаючи на це, у вузлі 2 СЕПП встановлюються ФКП таких стандартних номіналів:

ФКП 5 гармоніки: тип **Ф5-10-6000**,  $Q_{\phi 5} = 6$  Мвар,  $U_{\text{ном}} = 10$  кВ;

ФКП 7 гармоніки: тип **Ф7-10-4800**,  $Q_{\phi 5} = 4,8$  Мвар,  $U_{ном} = 10$  кВ.

Результати уточненого розрахунку із врахуванням стандартних значень потужності фільтрів гармонік наведені в табл. 2.16.

Таблиця 2.16. Результати уточненого розрахунку значень вузлових напруг та  $k_U$  у вузлах СЕПП

| Величина  | № вузла  |          |          |          |          |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|           | № 1      | № 2      | № 3      | № 4      | № 5      |
| $U_5$     | 7,66E-04 | 3,83E-05 | 8,18E-03 | 1,60E-02 | 4,56E-03 |
| $U_7$     | 2,93E-04 | 1,81E-05 | 2,80E-03 | 5,55E-03 | 3,15E-04 |
| $U_{11}$  | 8,67E-03 | 3,57E-03 | 3,72E-03 | 2,55E-03 | 2,28E-03 |
| $U_{13}$  | 6,98E-03 | 2,24E-03 | 2,95E-03 | 1,78E-03 | 1,22E-03 |
| $U_{17}$  | 4,98E-03 | 2,11E-03 | 2,17E-03 | 9,63E-04 | 4,74E-04 |
| $U_{19}$  | 5,19E-03 | 4,27E-03 | 2,37E-03 | 7,67E-04 | 3,87E-04 |
| $U_{23}$  | 1,30E-02 | 2,40E-02 | 6,50E-03 | 4,08E-04 | 6,23E-04 |
| $U_{25}$  | 8,10E-03 | 1,80E-02 | 4,30E-03 | 2,21E-04 | 3,38E-04 |
| $k_U$ , % | 2,000    | 3,070    | 1,300    | 1,750    | 0,530    |

$k_n$  БСК та ФКП в знаходяться в допустимих межах.

### Висновки до розділу

1. Проведений розрахунок рівнів несинусоїдальності напруги в СЕПП показав, що застосування ФКП дозволяє знизити значення коефіцієнту несинусоїдальності  $k_U$  та коефіцієнту перевантаження БСК струмами вищих гармонік до нормально допустимих рівнів.

2. Результати комп'ютерного моделювання несинусоїдальних режимів роботи СЕПП з ФКП засвідчили дієвість ФКП як засобу покращення якості електроенергії. Аналіз результатів моделювання засвідчив адекватність розробленої моделі, а результати, отримані шляхом її використання є

достовірними і практично збігаються з результатами розрахунку рівнів несинусоїдальності напруги за загальноприйнятою методикою.

3. Результати розрахунку варіанту централізованої компенсації вищих гармонік в СЕПП показали, що зниження рівнів коефіцієнту несинусоїдальності  $k_U$  та коефіцієнту перевантаження БСК струмами вищих гармонік в розгалуженій мережі можливо досягти встановленням ФКП лише в одному із вузлів мережі. При цьому значення  $k_U$  та  $k_n$  для інших вузлів мережі будуть знаходитись в нормально допустимих межах.

### РОЗДІЛ 3

## ЗАСТОСУВАННЯ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ РІВНІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК В СЕПП

### 3.1. Будова і принцип дії АФ

ФКП – це багатофункціональні пристрої, що набули широкого поширення в сучасних СЕПП. Однак масове їх використання дозволило виявити деякі недоліки:

- значна встановлена потужність;
- необхідність застосування ФКП декількох гармонік для досягнення допустимих рівнів несинусоїдальності напруги;

- чутливість ФКП до АЧХ вхідного опору мережі та ін.

Зазначені недоліки відсутні у активних фільтрів (АФ).

На рис. 3.1 наведена схема, що пояснює принцип дії АФ.

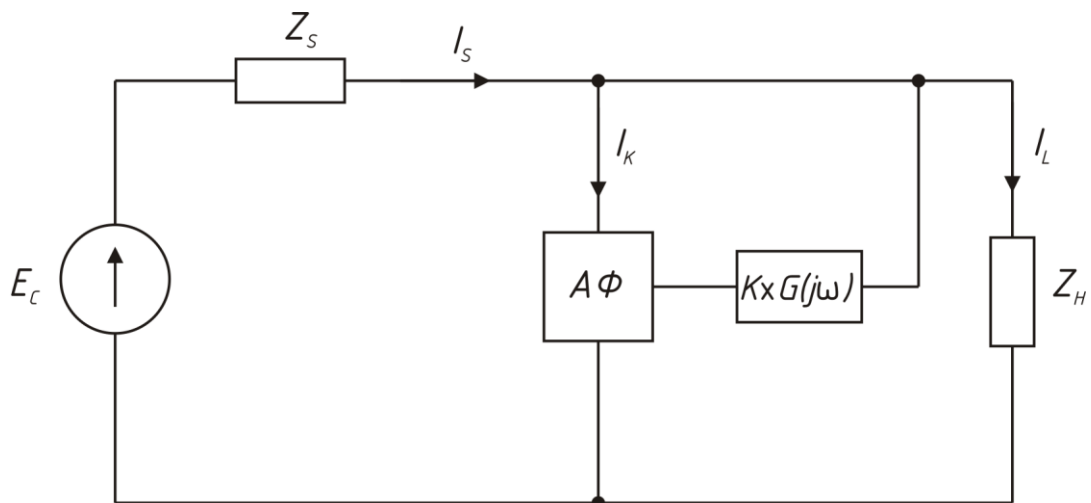


Рис. 3.1. Схема АФ

АФ – це джерело струму, який складається із реактивного струму першої гармоніки навантаження та струмів вищих гармонік. Струм, що протікає через навантаження, вимірюється датчиком струму. Отримані дані

аналізуються цифровим перетворювачем з метою визначення спектру гармонік струму. Ця інформація використовується генератором струму, який генерує в мережу струм такого гармонічного складу, який необхідний для компенсації спотворень н:

$$i_S = i_L + i_K \quad (3.1)$$

Методи ідентифікації струмів вищих гармонік та реактивної складової можна поділити на такі групи:

- векторні методи, що базуються на теорії миттєвої потужності;
- метод виділення першої гармоніки навантажувального струму;
- універсальний метод, який базується на розрахунку активної потужності, яка споживається електричним навантаженням, і активної складової зазначеного струму. За рахунок віднімання цієї складової із значення струму навантаження розраховуються реактивні складові 1-ї та вищих гармонік, які підлягають компенсації з допомогою АФ.

Універсальний метод найбільш простий для технічної реалізації. Проте в більшості випадків застосовуються пристрої керування, алгоритм роботи яких заснований на теорії миттєвої потужності.

На рис. 3.2 наведена структурна схема системи компенсації вищих гармонік струму та напруги з використанням паралельного АФ.

В якості АФ застосовується інвертор напруги, в коло якого увімкнені транзистори. В схемі АФ передбачене незалежне автоматичне керування кожним із цих транзисторів.

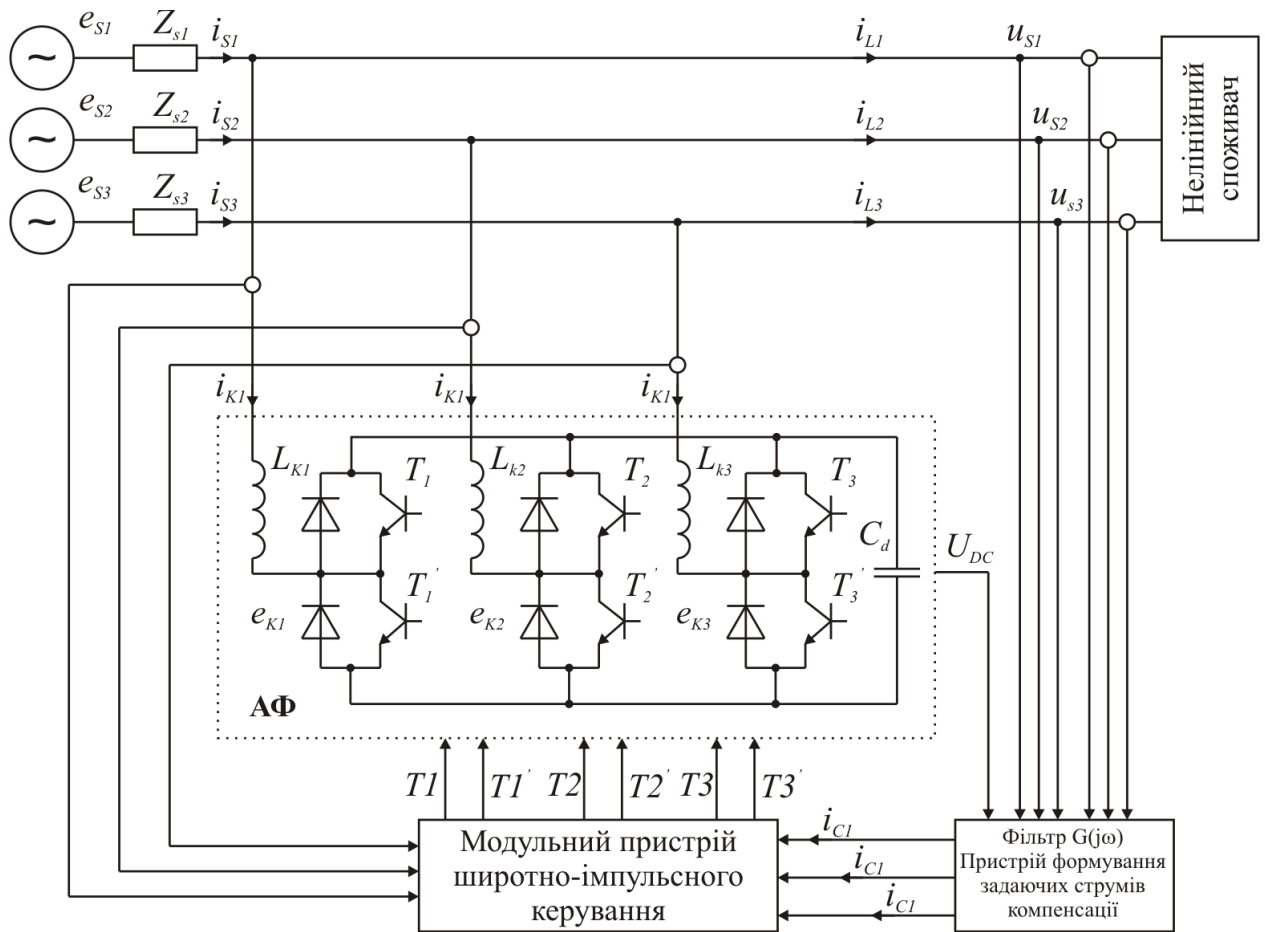


Рис. 3.2. Схема СЕПІ з паралельним АФ на основі інвертора напруги

В схемі АФ (рис. 3.2) , відбувається двосторонній обмін активною потужністю між мережею та інвертором таким способом, щоб середнє значення потужності дорівнювало. Такий підхід виключає необхідність застосування додаткового джерела потужності. Конденсатор  $C_d$  є накопичувачем електричної енергії та слугує для зменшення рівнів пульсацій активної потужності споживача електроенергії.

Такі АФ можуть бути використані в СЕПІ зі значною встановленою потужністю нелінійних електроприймачів.

Для компенсації реактивної потужності та зменшення рівнів вищих гармонік напруги та струму набули широкого розповсюдження повздовжні АФ. Амплітуда і фаза цих АФ можуть змінюватися згідно з наперед заданим законом. Керування таким АФ здійснюється із застосуванням метода ШІМ.

На рис. 3.3 показана принципова схема поздовжнього АФ.

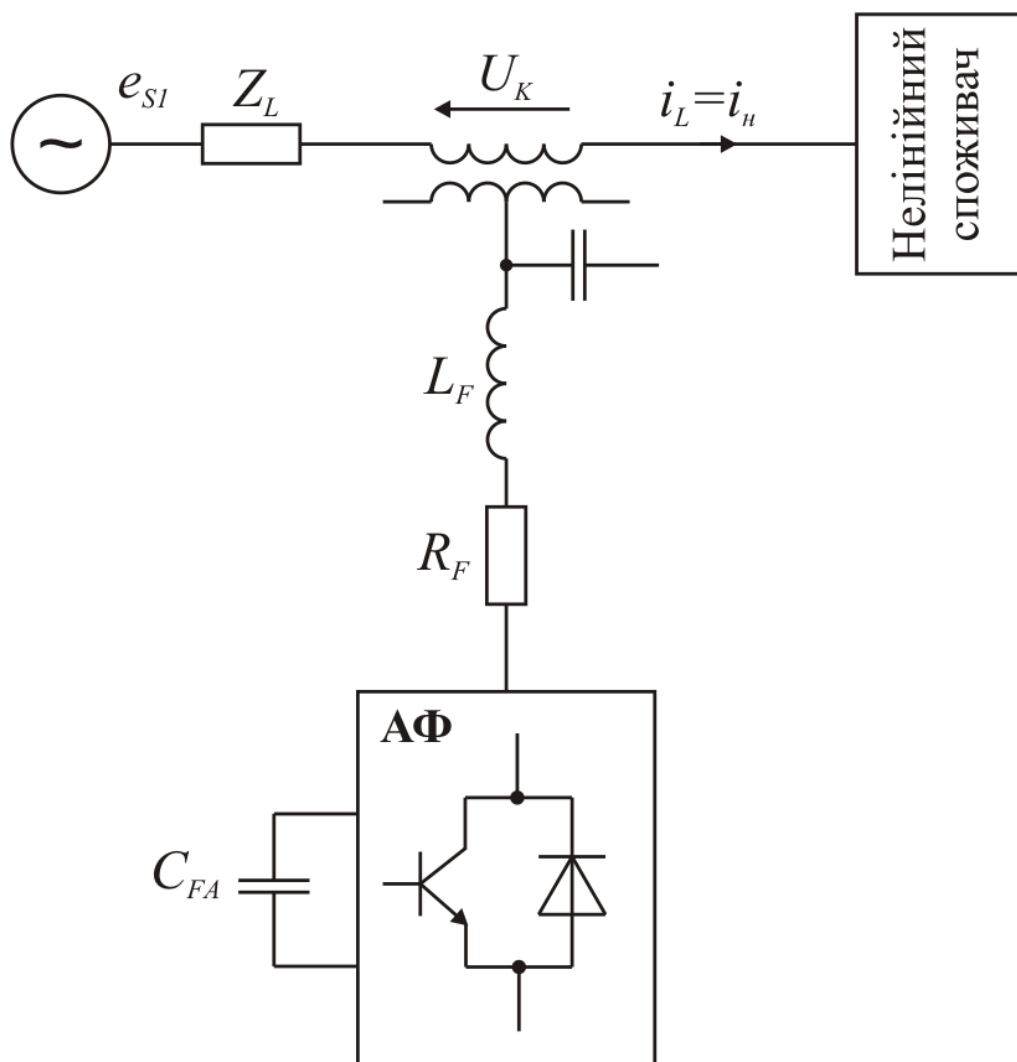


Рис. 3.3. Схема АФ поздовжнього ввімкнення

АФ можуть встановлюватись в різних точках СЕПП (рис. 3.4):

- в точці загального приєднання (т. А).
- часткова компенсація гармонік струмів (т. В)
- поблизу нелінійних навантажень (т. С).

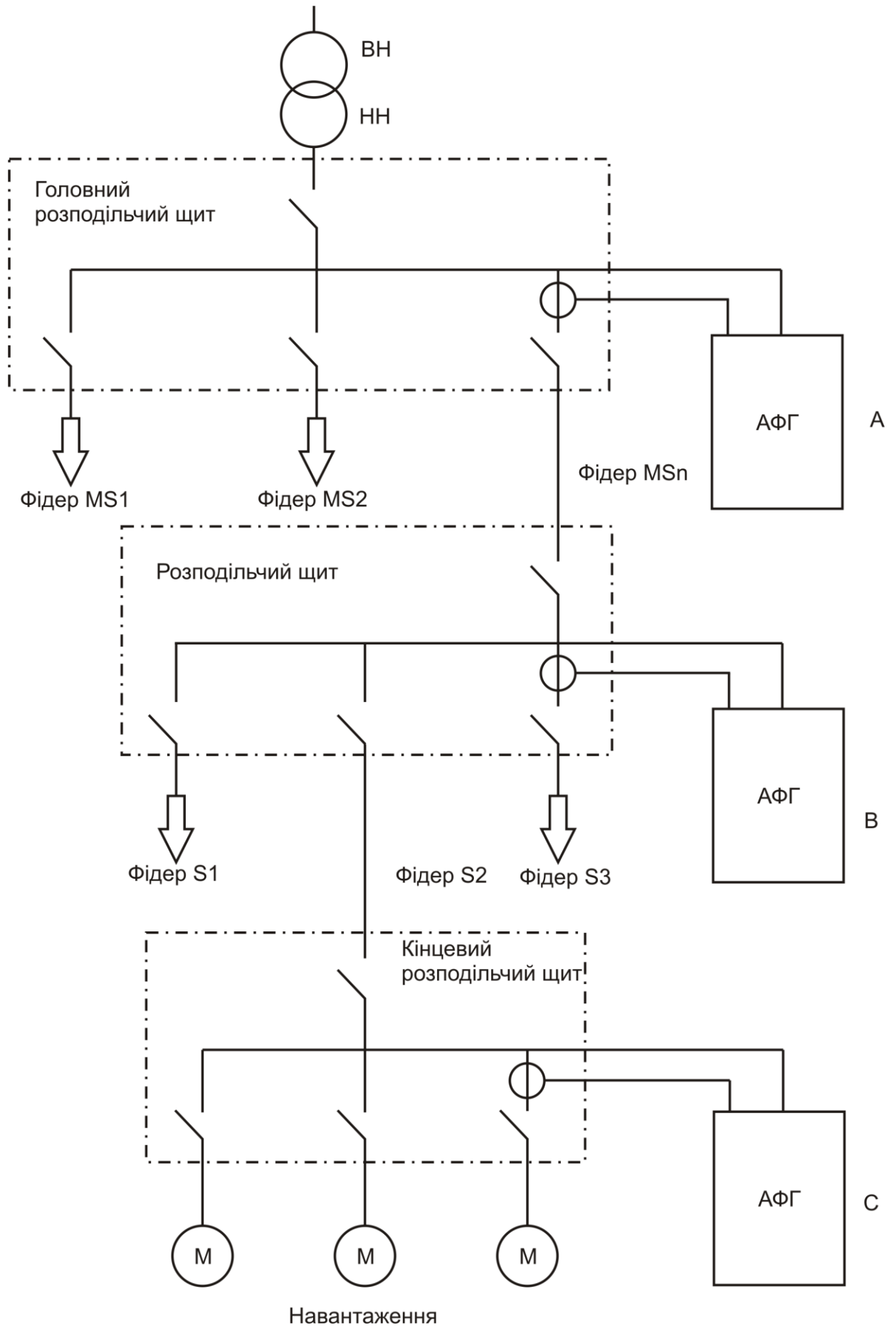


Рис. 3.4. Можливі варіанти приєднання АФ до СЕПП

В ідеальному випадку корекція гармонічних складових струму повинна проводитись в точці їх виникнення.

Для оптимізації процесу компенсації вищих гармонік можливе об'єднання декількох фільтрів в різних конфігураціях:

- паралельна конфігурація (рис. 3.5 а) ;
- каскадна конфігурація (рис. 3.5 б).

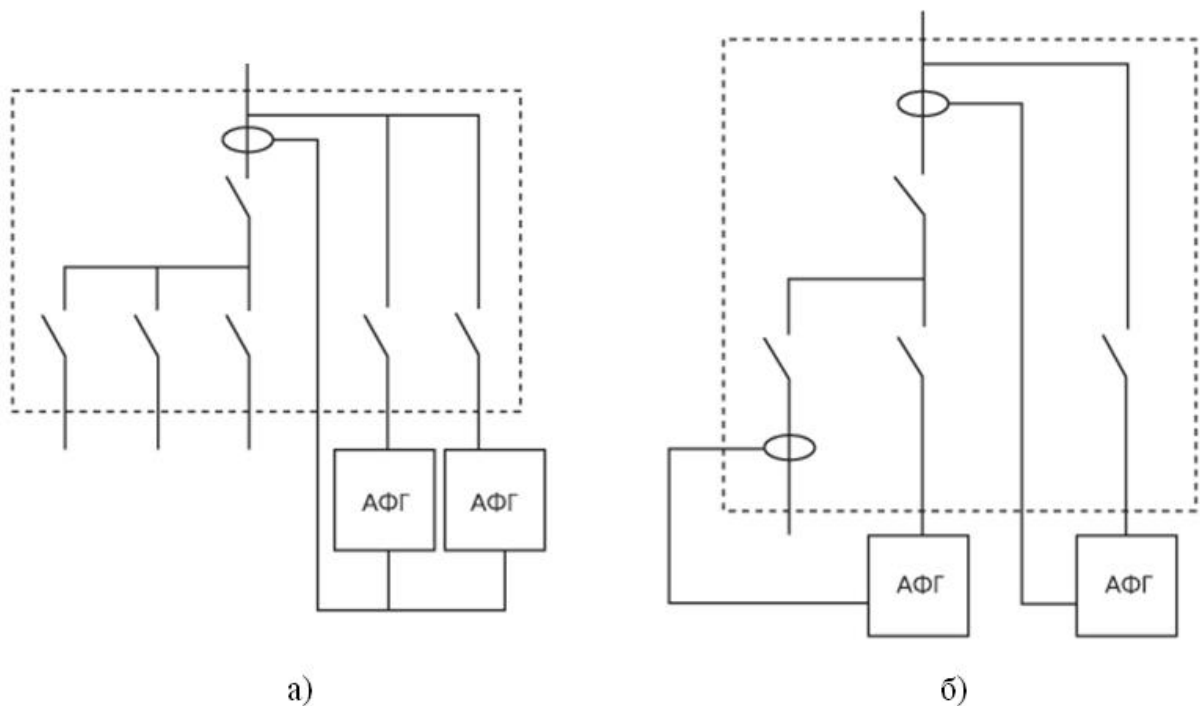


Рис. 3.5. Варіанти конфігурації АФ:  
а) паралельна; б) каскадна

До переваг паралельної конфігурації АФ відносяться наступні:

- розширена можливість корекції в певній точці СЕПП за рахунок приєднання до чотирьох однакових фільтрів;
- розширена можливість корекції вищих гармонік з урахуванням можливого збільшення кількості електроспоживачів;
- підвищений рівень надійності обумовлений використанням запасу значення номіналу АФ.

Переваги каскадної конфігурації полягають у наступному:

- розширення загальної компенсаційної здатності за рахунок використання однакових або різних АФ;
- можливість здійснення загальної компенсації вищих гармонік групи нелінійних електричних навантажень.

### **3.2. Комп'ютерне моделювання режимів роботи СЕПП з АФ**

На рис. 3.6 показана комп'ютерна модель СЕПП, до складу якої входить джерело вищих гармонік (вентильний перетворювач) та паралельний АФ.

Модель паралельного АФ представлена на рис. 3.7. Ця модель є спрощеною але з її допомогою можливо отримати певні якісні результати. В моделі АФ реалізовано універсальний метод визначення реактивної складової струму і вищих гармонік, який заснований на розрахунку активної складової струму, яка споживається електричним навантаженням.

Результати моделювання наведені на рис. 3.8 – 3.15.

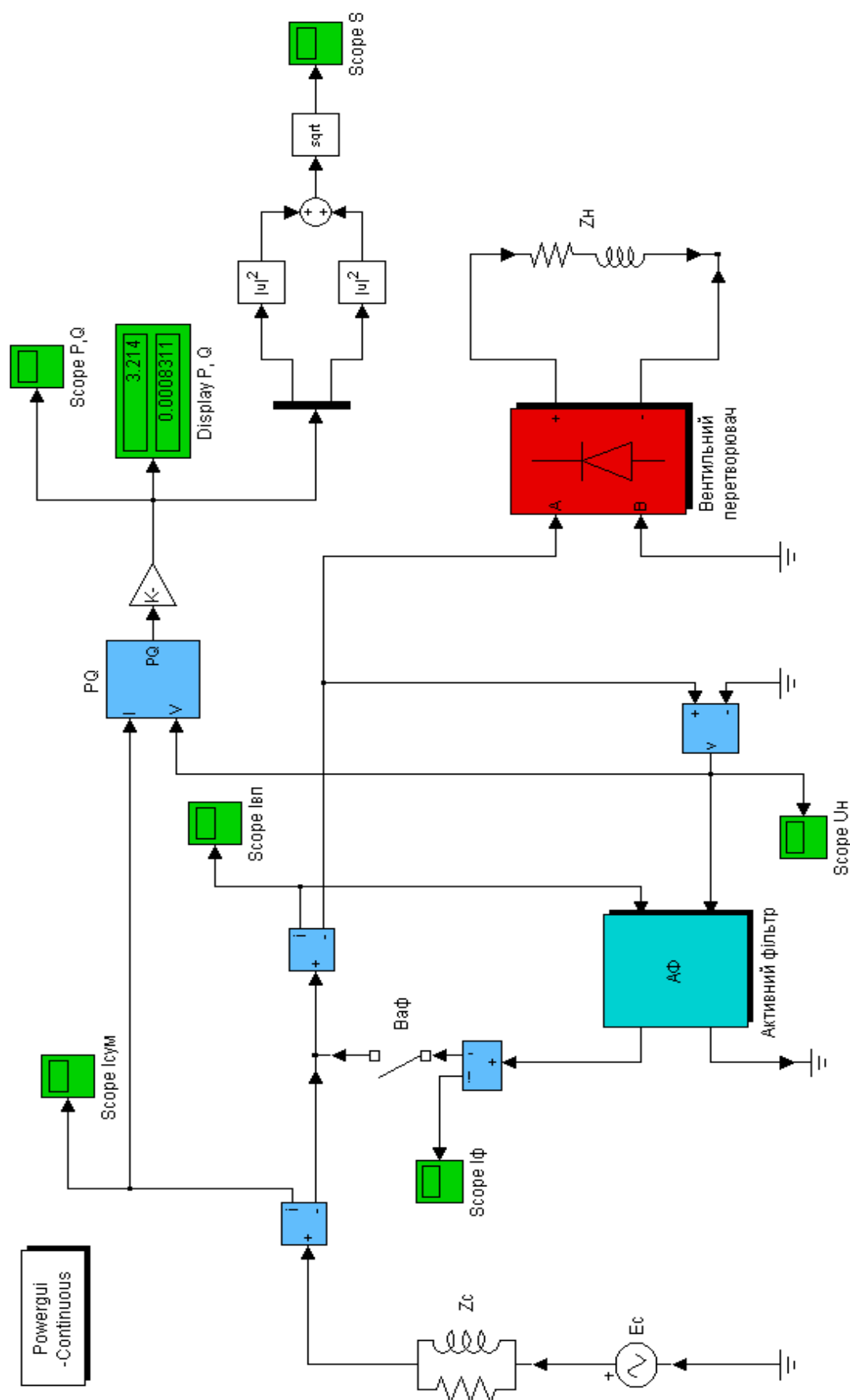


Рис. 3.6 Комп'ютерна модель СЕПП з джерелом вищих гармонік (ТПЧ-800) та АФ



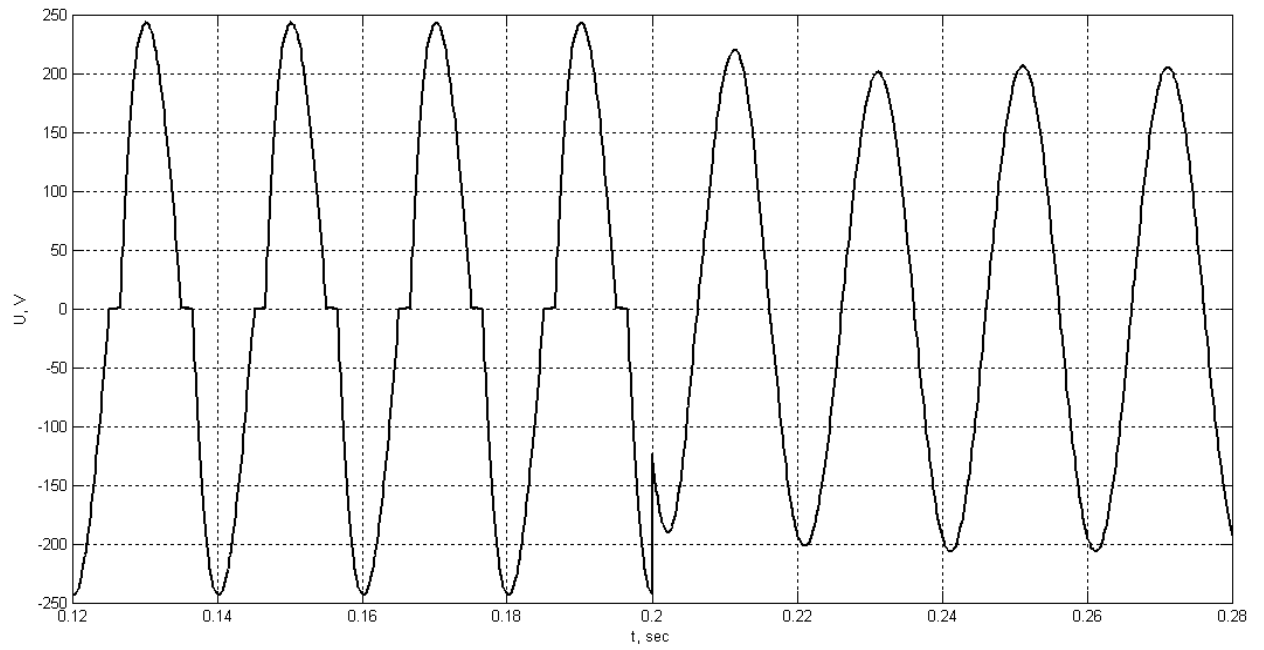


Рис. 3.8. Графік напруги на шинах 10 кВ СЕПП

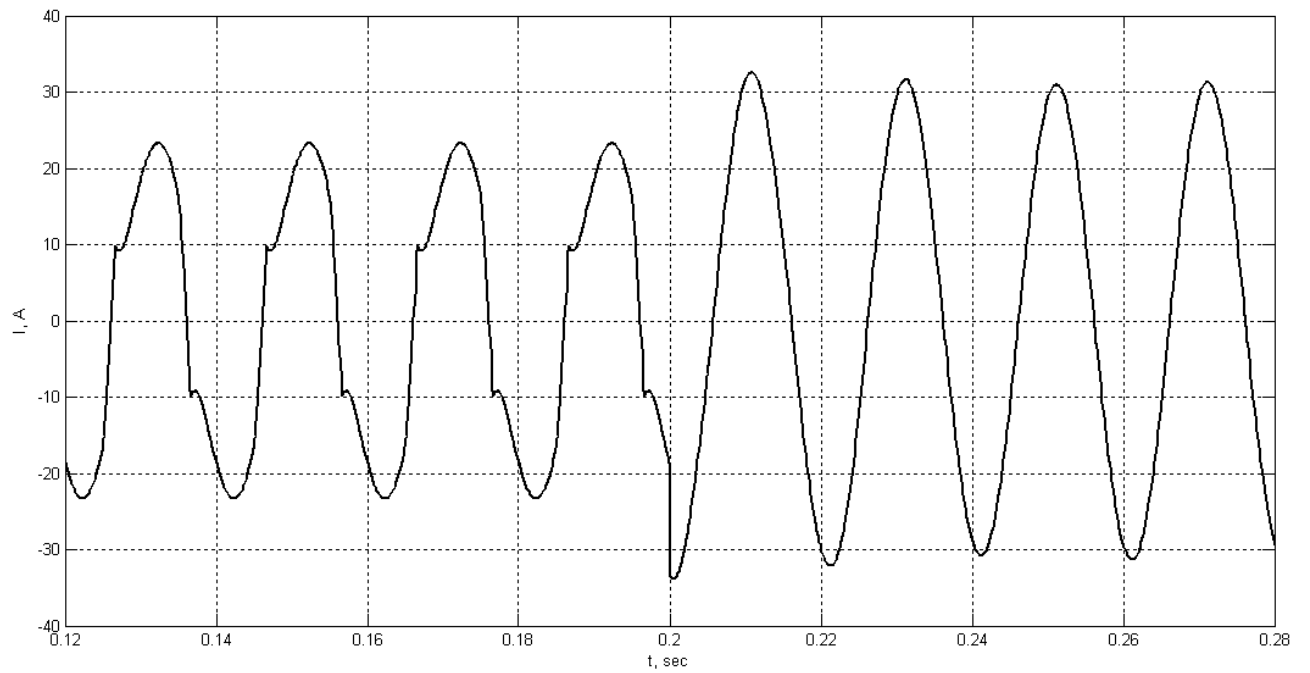


Рис. 3.9. Графік загального струму СЕПП

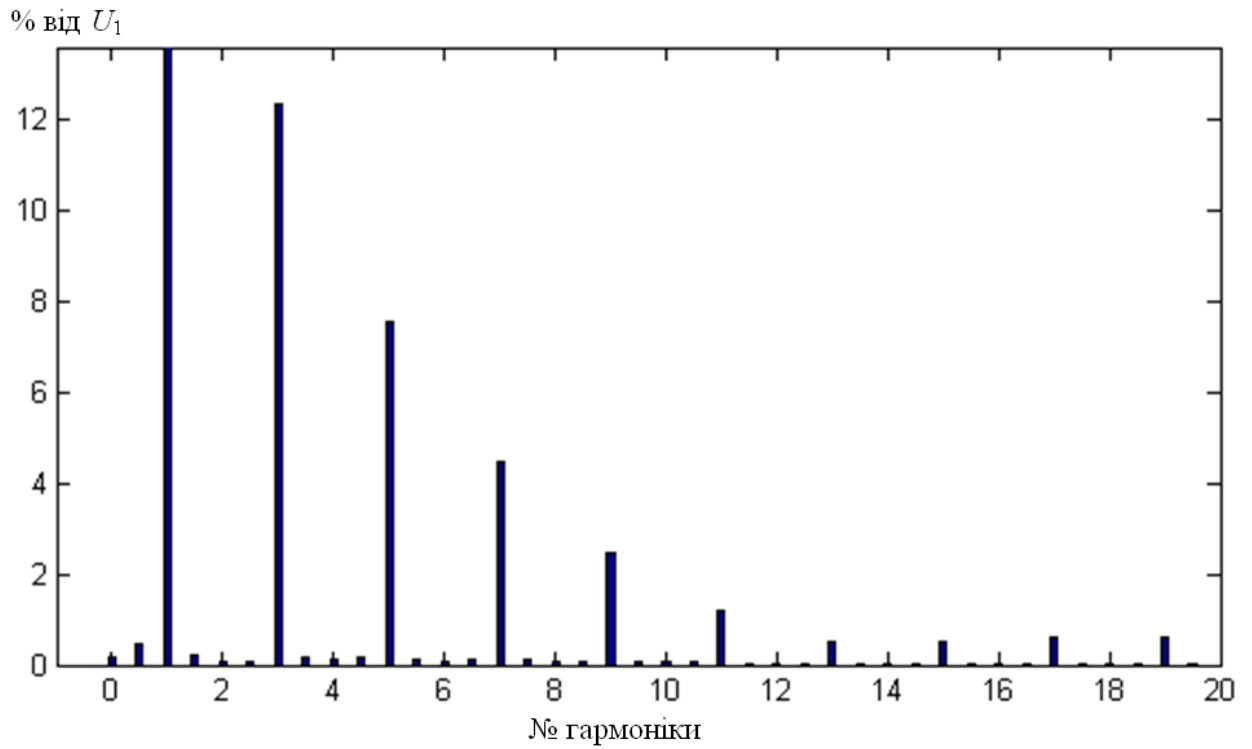


Рис. 3.10. Результати спектрального аналізу напруги при вимкненому АФ

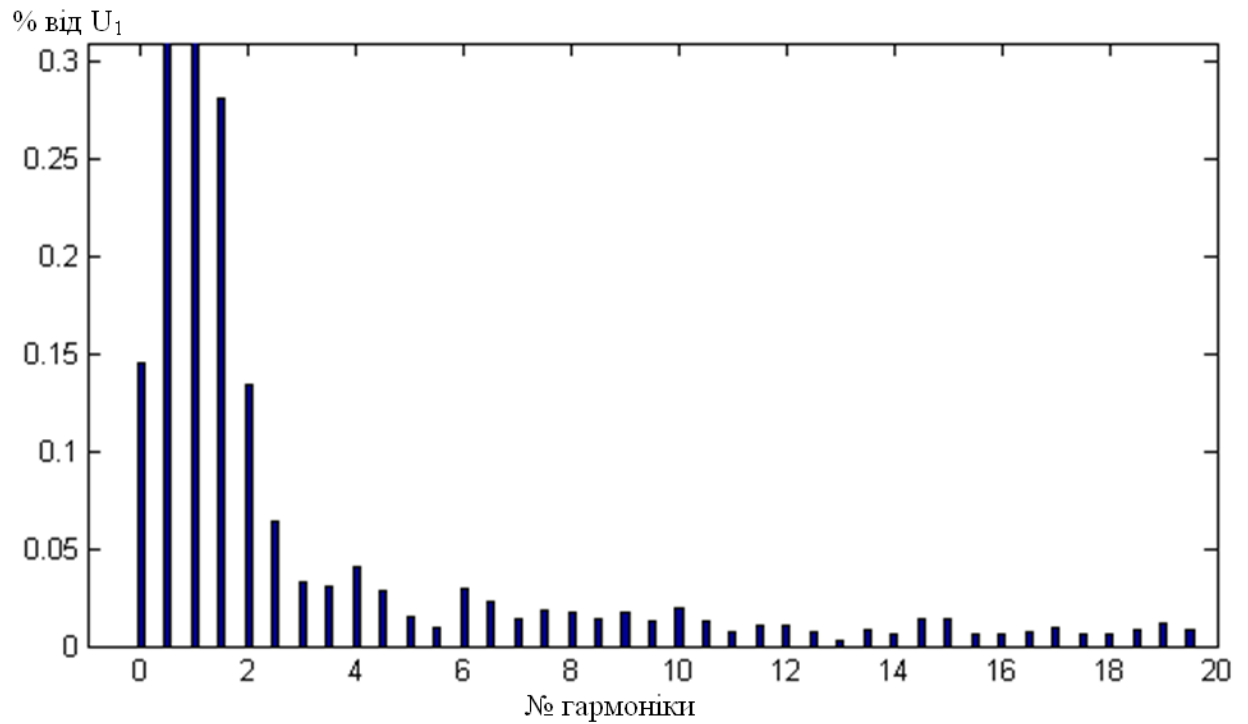


Рис. 3.11. Результати спектрального аналізу напруги при увімкненому АФ

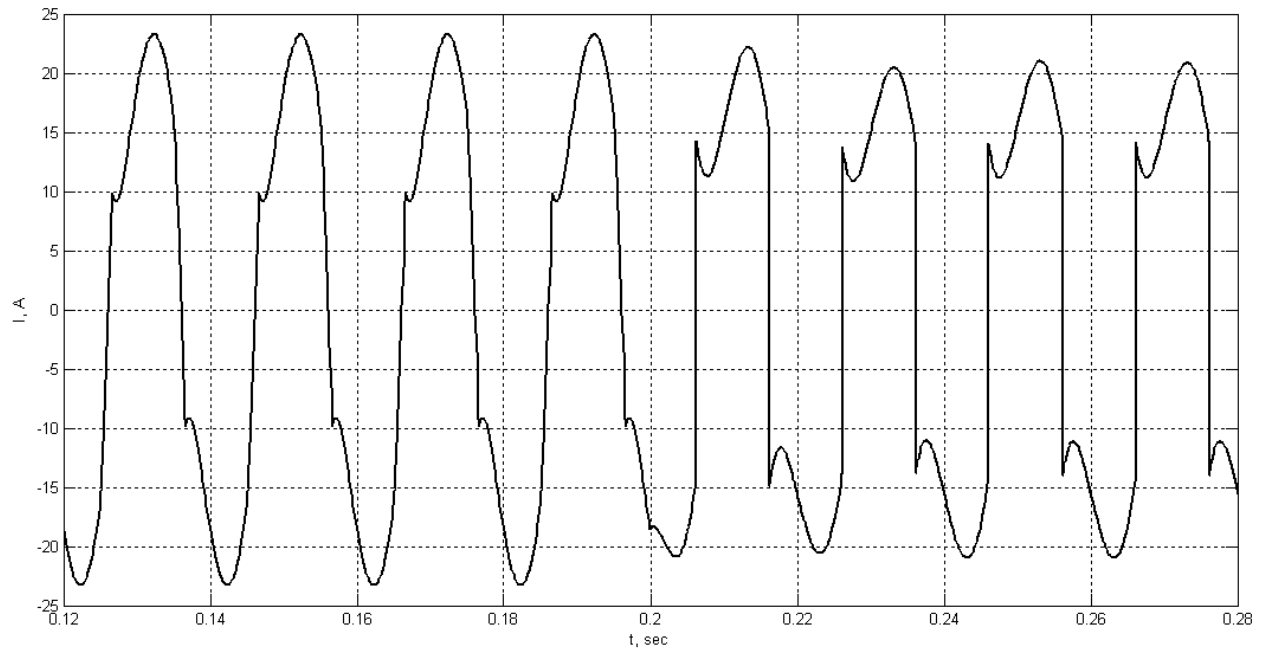


Рис. 3.12. Графік загального струму в колі ТПЧ-800

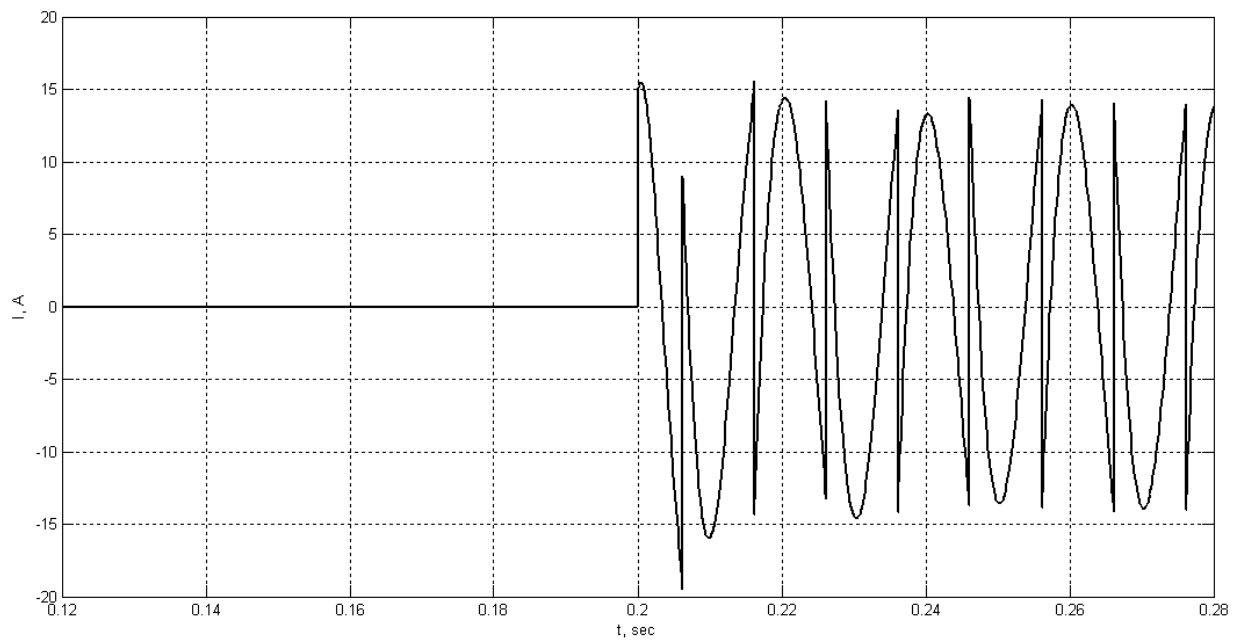


Рис. 3.13. Графік струму в колі АФ

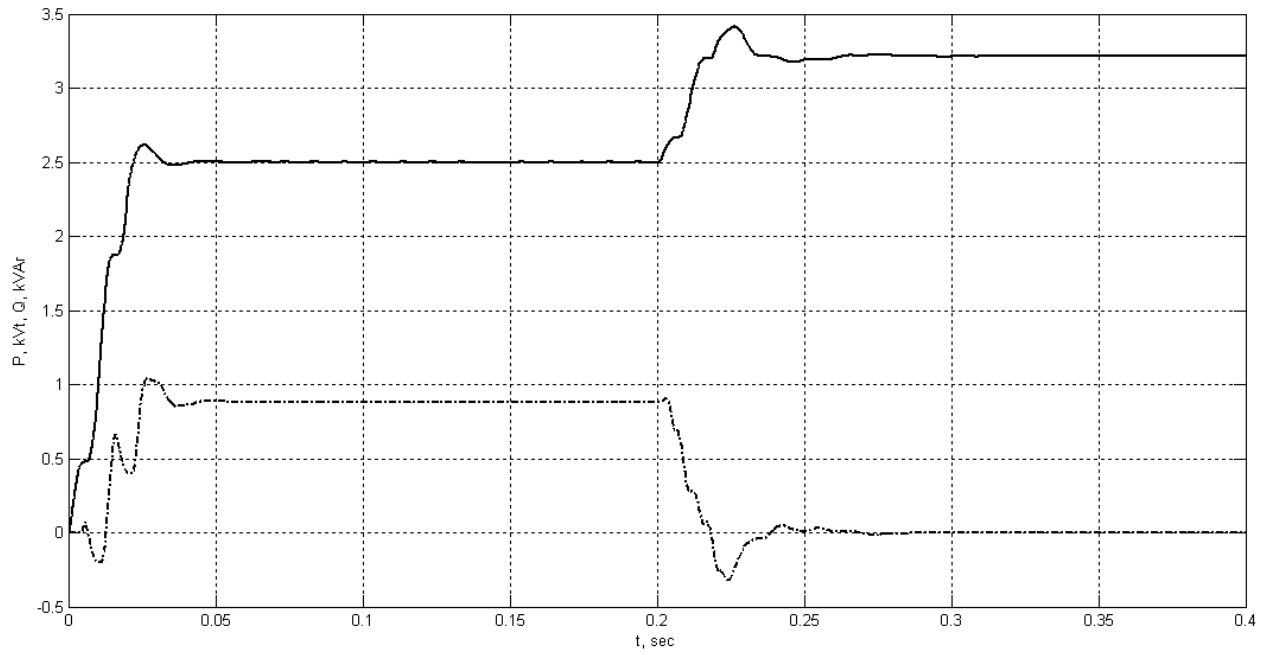


Рис. 3.14. Графік зміни активної та реактивної потужностей, що споживаються з СЕПП

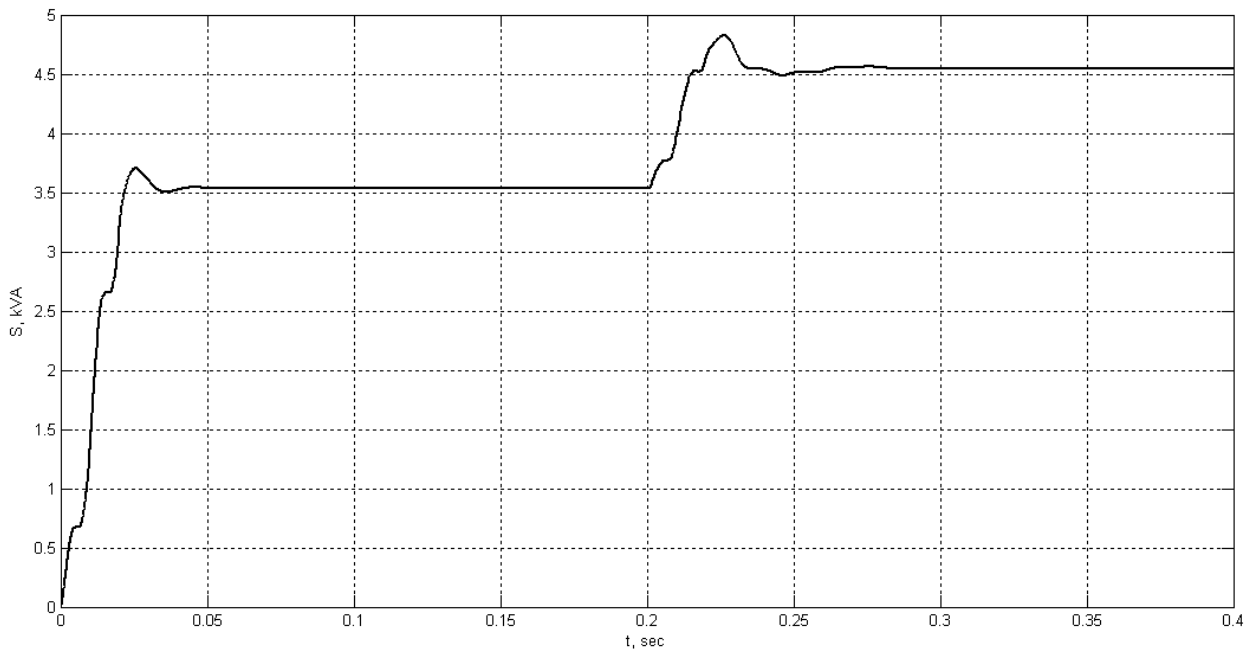


Рис. 3.15 Графік зміни повної потужності, що споживається з СЕП

Більш детально аналіз режиму роботи СЕПП з АФ дозволяє комп'ютерна модель, що показана на рис. 3.16. До складу цієї моделі входять такі елементи:

- гексапульсний керований випрямляч;
- паралельний АФ;
- ИП 10/0,4 кВ, з БСК та електричним навантаженням;
- БСК 10 кВ;
- високовольтний АД потужністю 750 кВт.

Дана модель, на відміну від попередньої, представлена у трьохфазному варіанті.

Ця модель дає змогу виявити не лише зниження рівнів вищих гармонік струму та напруги, але і наглядно проілюструвати негативний вплив струмів вищих гармонік СЕПП.

Результати комп'ютерного моделювання представлені на рис. 3.17 – 3.26.

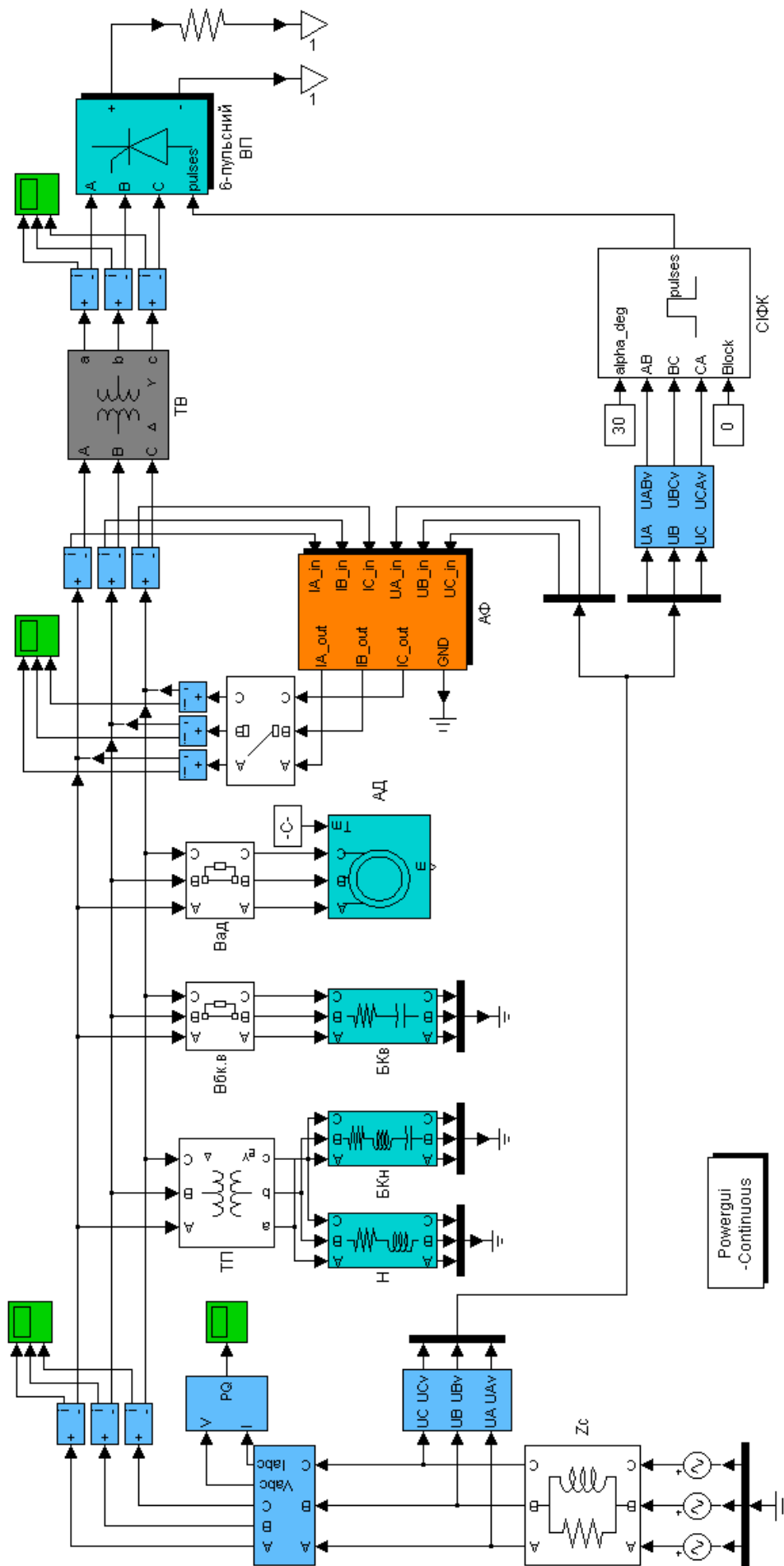


Рис. 3.16. Комп'ютерна модель СЕПП для дослідження роботи АФ

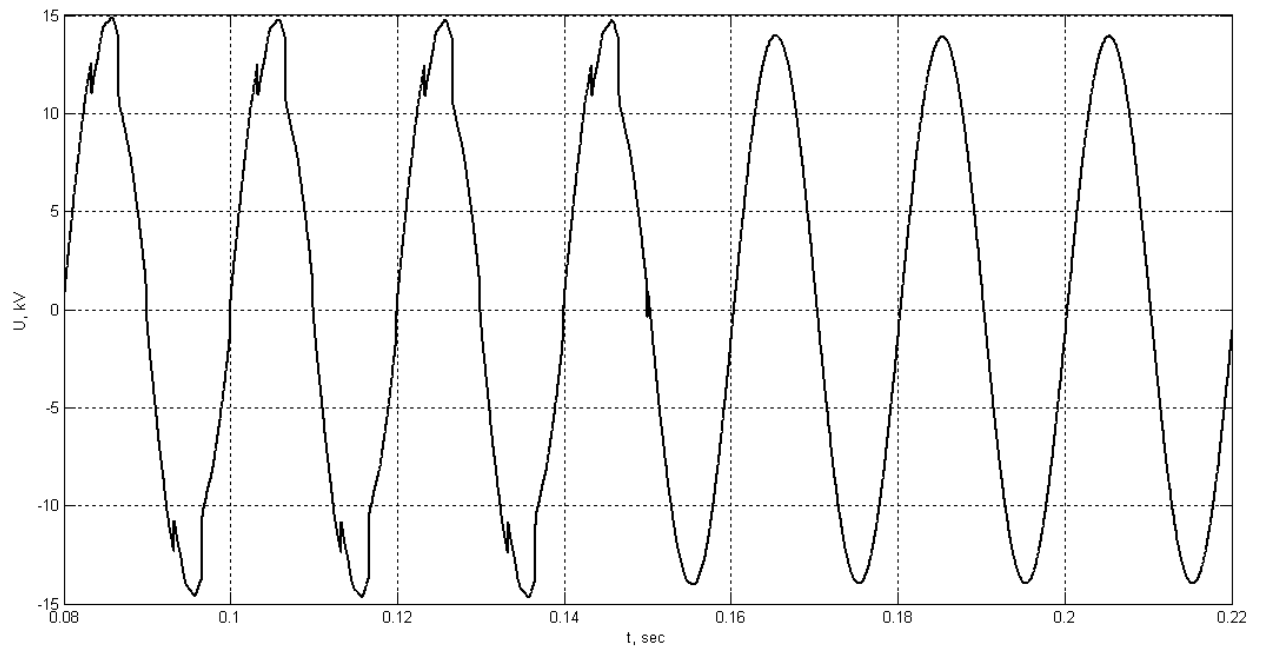


Рис. 3.17. Графік напруги на шинах 10 кВ СЕПП

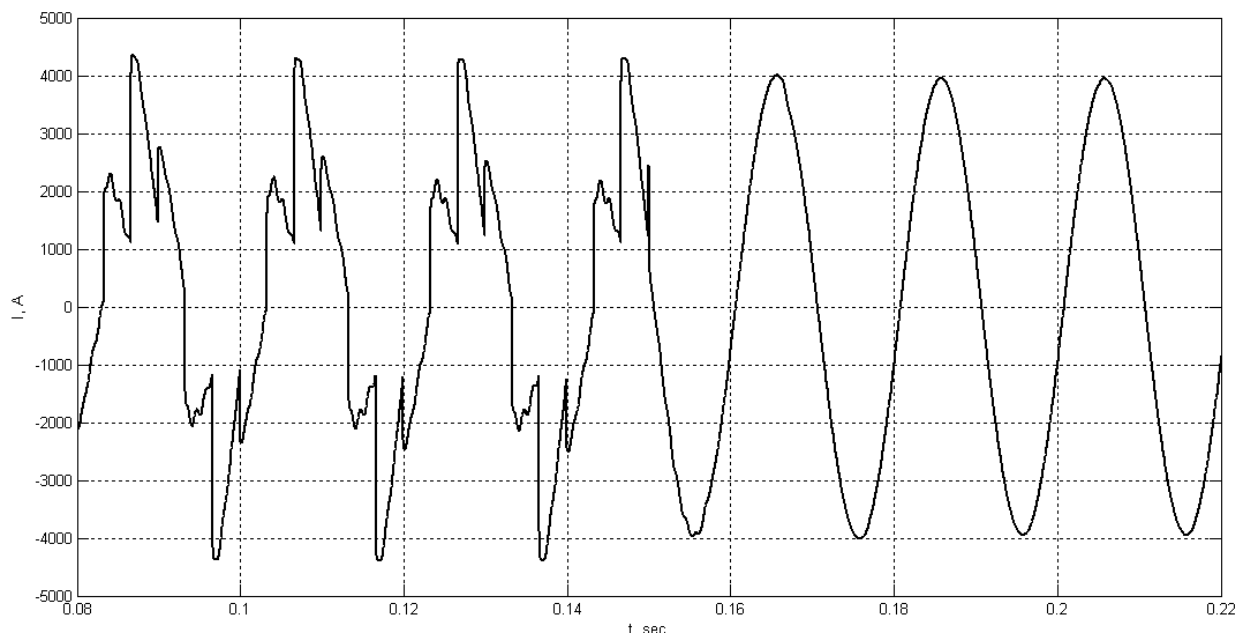


Рис. 3.18. Графік загального струму СЕПП

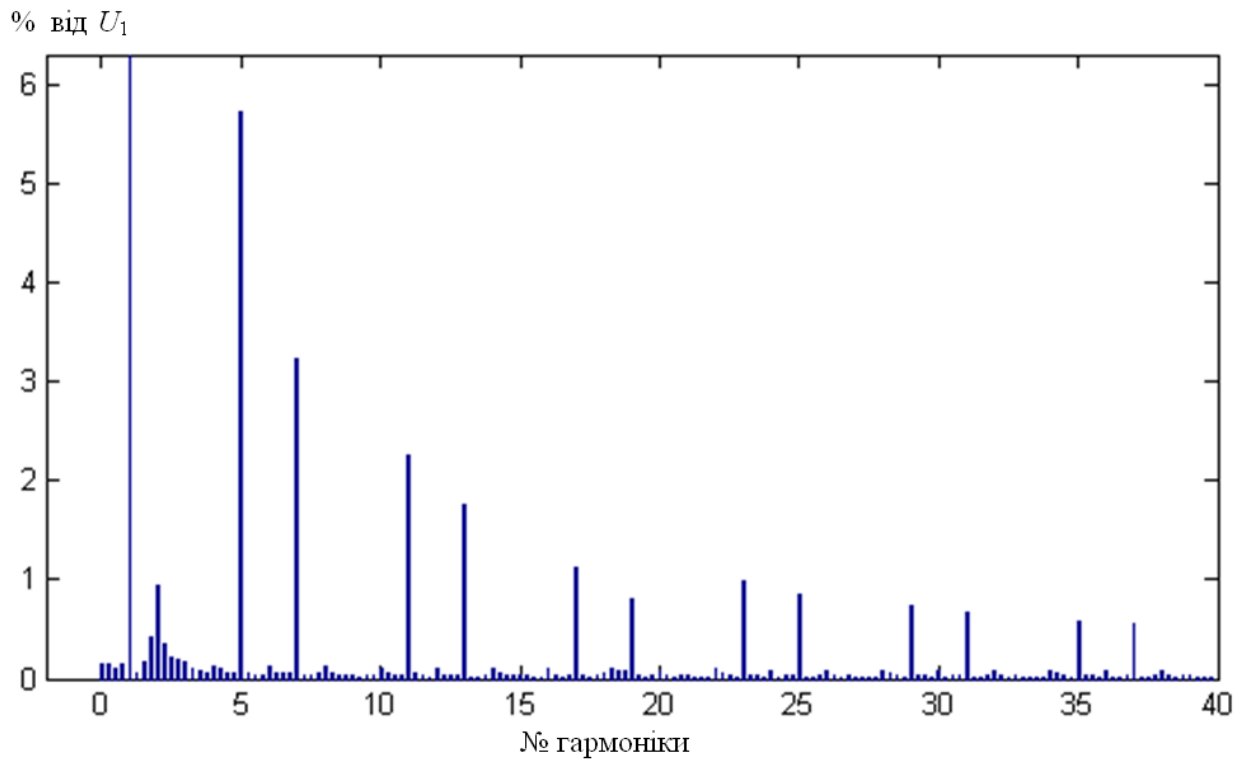


Рис. 3.19. Результати спектрального аналізу напруги при вимкненому АФ

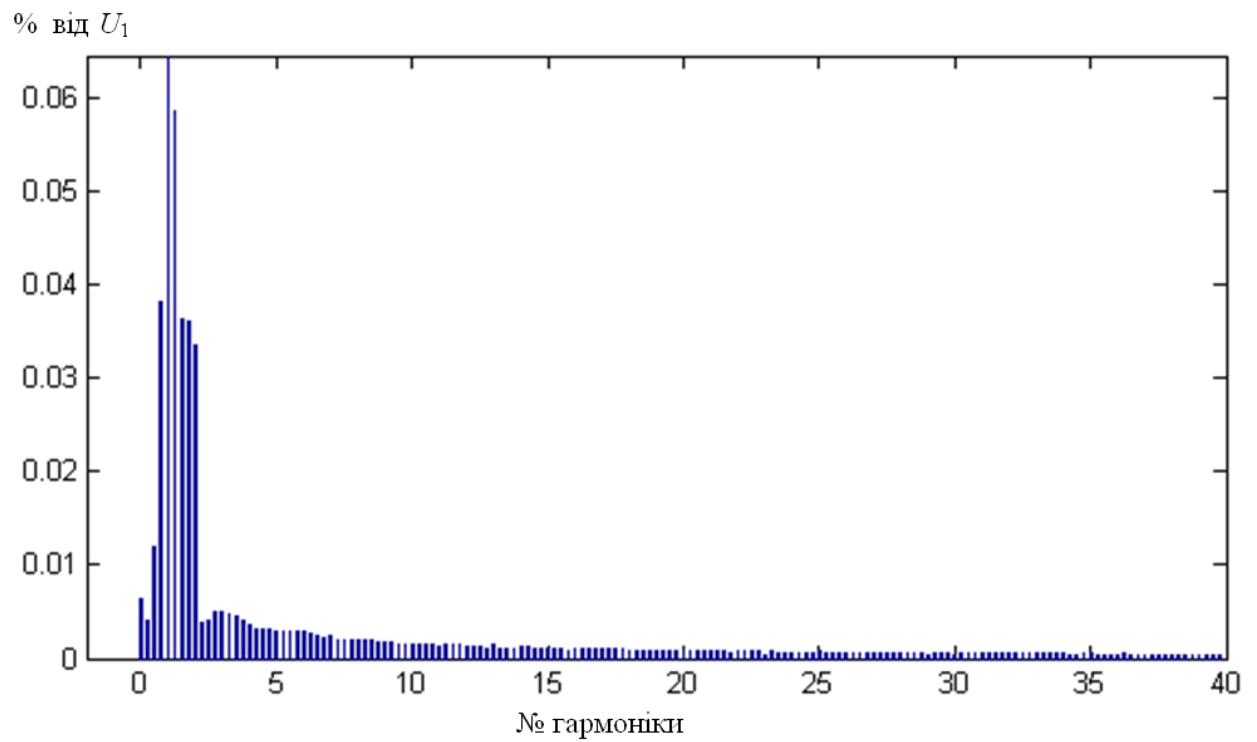


Рис. 3.20. Результати спектрального аналізу напруги при увімкненому АФ

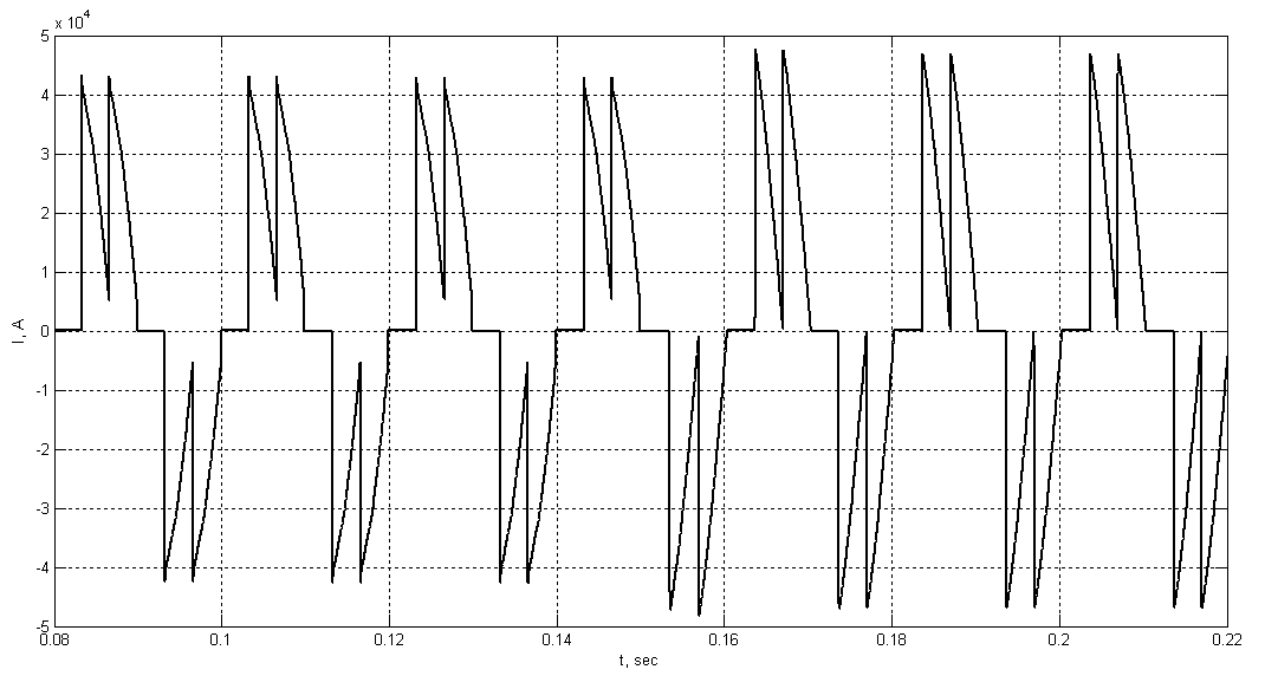


Рис. 3.21. Графік струму в колі ТПЧ-800

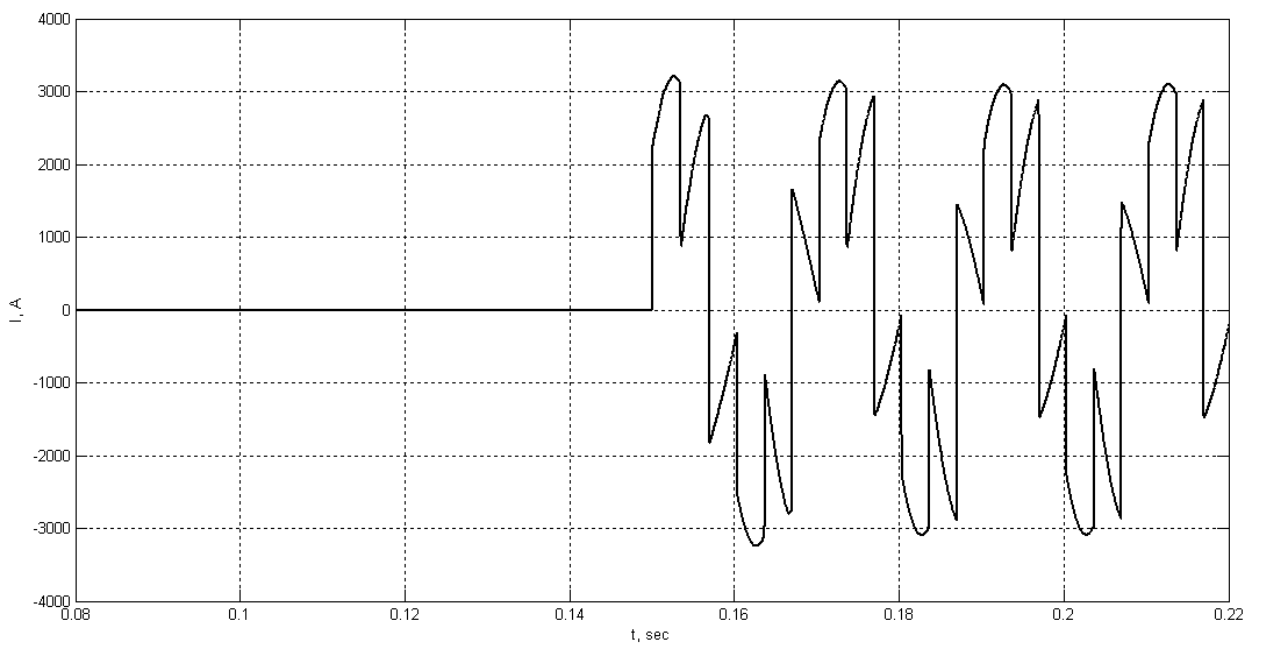


Рис. 3.22. Графік струму АФ

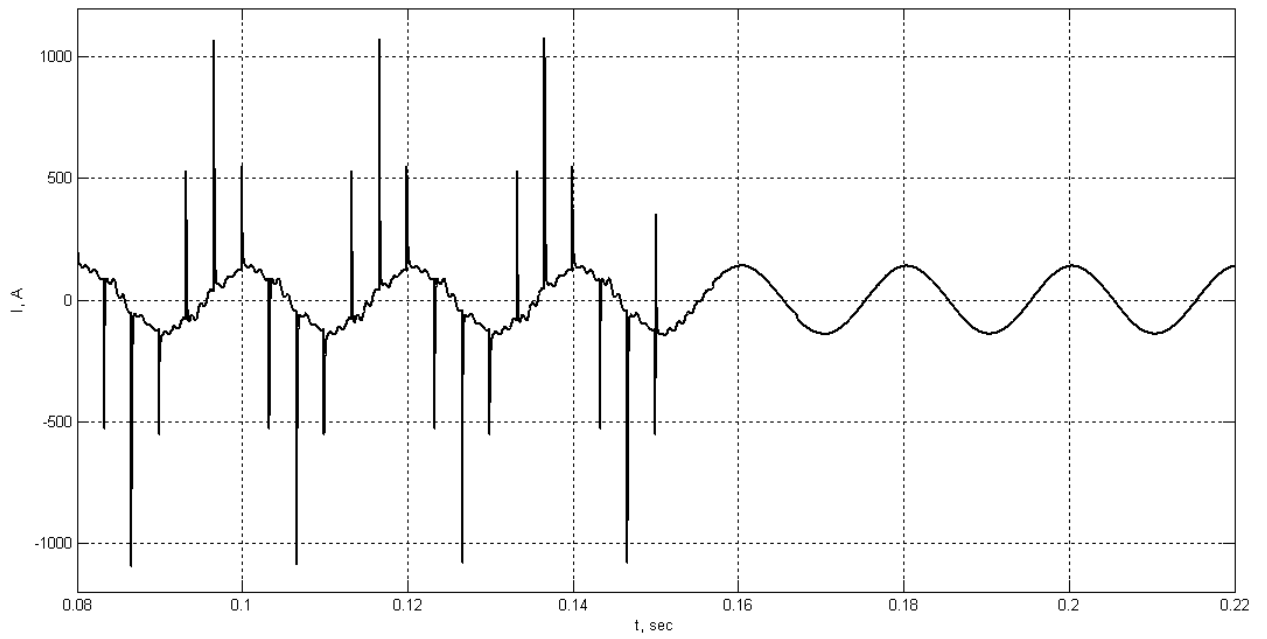


Рис. 3.23. Графік струму в колі БСК 10 кВ

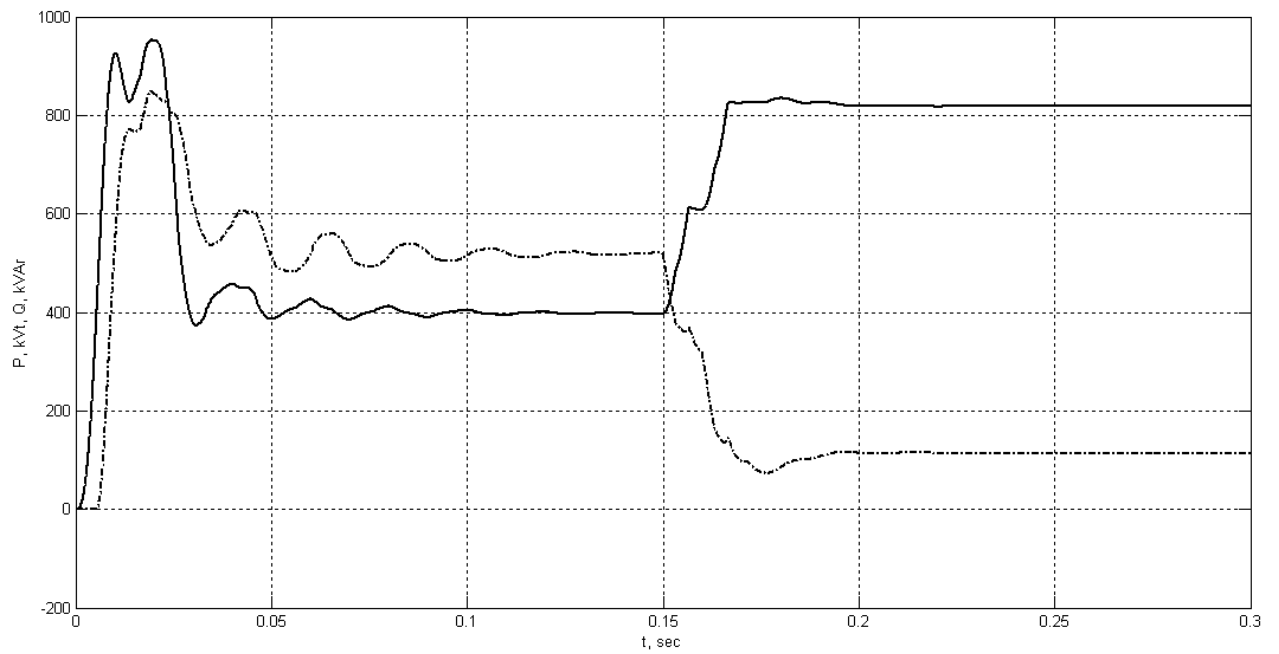


Рис. 3.24. Графік зміни активної і реактивної потужностей, що споживаються з СЕПП

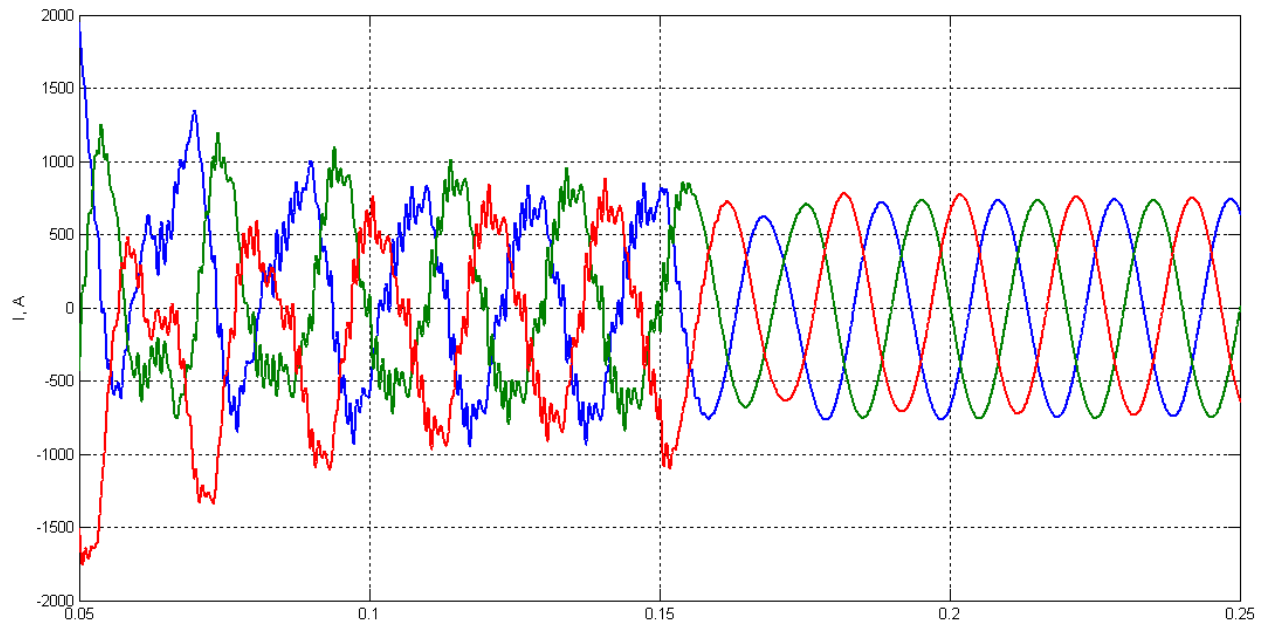


Рис. 3.25. Графік струму статора асинхронного двигуна

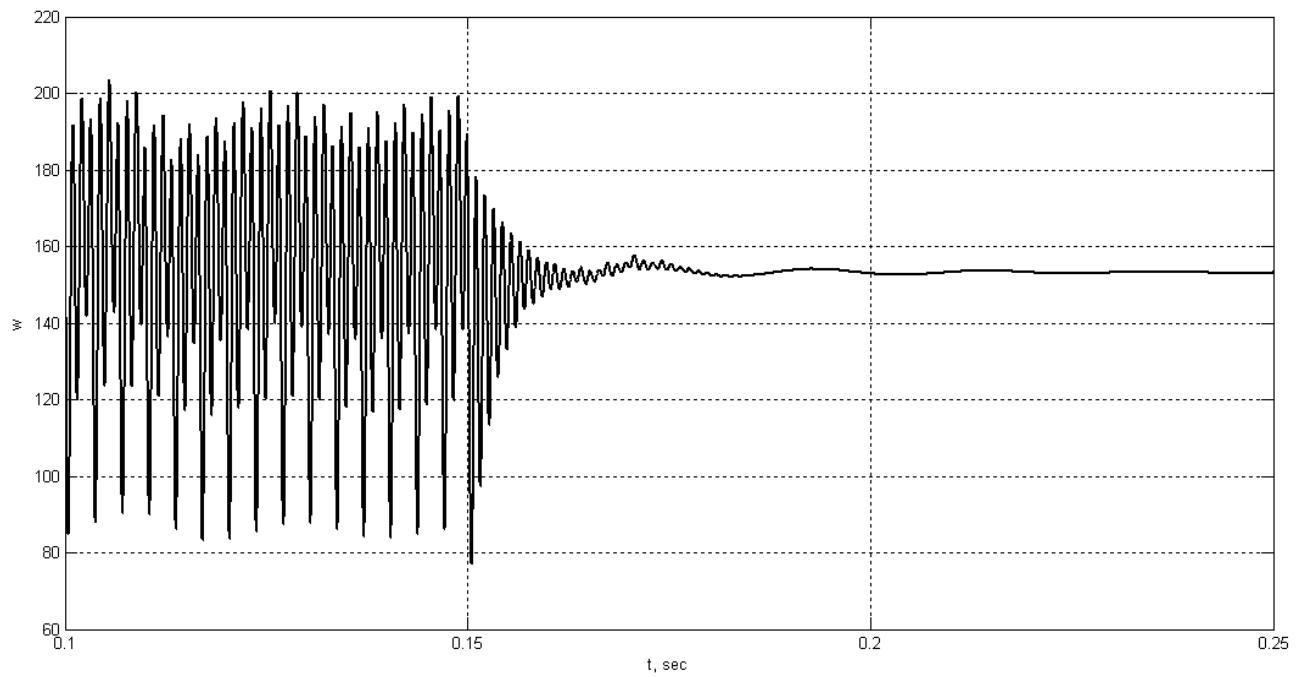


Рис. 3.26. Графік зміни швидкості обертання валу АД

## **Висновки до розділу**

1. Проведений аналіз варіантів конструктивного виконання АФ показав, що найбільшого розповсюдження в сучасних СЕПП набули паралельні АФ на основі інвертора напруги.

2. Розроблені комп'ютерні моделі СЕПП з джерелами вищих гармонік (ТПЧ-800) та АФ дали змогу провести кількісний та якісний аналіз несинусоїдальних режимів роботи СЕПП. Результати моделювання засвідчили високу ефективність АФ до зниження рівнів вищих гармонік струму та напруги.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ

Проведемо розрахунок захисного заземлення для наступного випадку.  
ТП 10/0,4 кВ, струм  $I_3 = 27$  А. Грунт – супсь. Кліматичний район – другий.

Значення  $R_3^H$ :

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

Розрахункове значення питомого опору ґрунту:

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

Електричний опір одинарного заземлювача:

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

Приймаються до встановлення електроди, які прокладені по контуру згідно плану.

Кількість заземлювачів:

$$n_o = \frac{R_o}{R_3^H \cdot \eta_t} = \frac{20,361}{4 \cdot 0,59} = 8,628 \approx 9 \text{ шт}$$

Довжина з'єднувальної смуги:

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

Електричний опір смуги:

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

Електричний опір вертикальних заземлювачів:

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

Прийнята до встановлення к-сть заземлювачів:

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

Перевірка значення електричного опору заземлювача:

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

Опір заземлювача не перевищує нормативного значення.

Схема заземлення наведена на рис. 4.1.

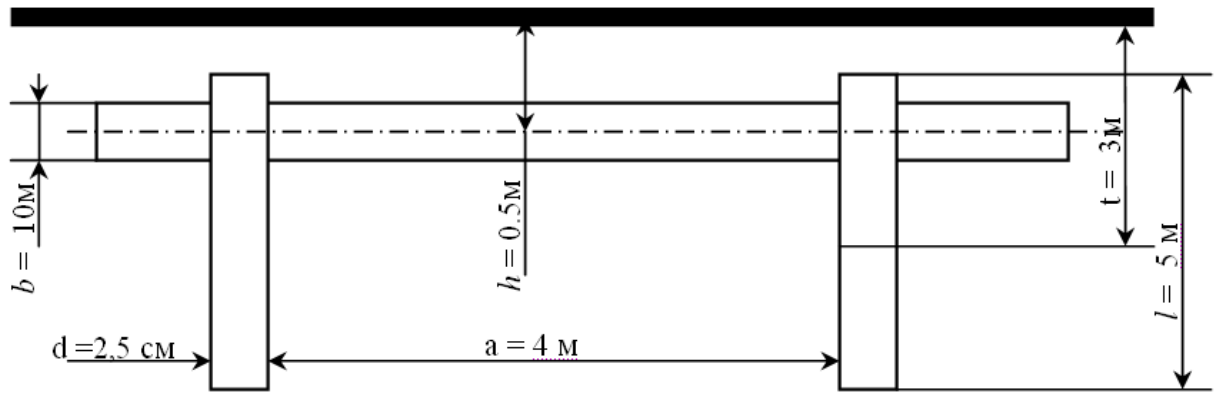


Рис. 4.1. Схема заземления

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведені в роботі дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. В основу ПЯЕ, що кількісно визначають рівень несинусоїдальності напруг покладено енергетичний зміст. Ступінь негативного впливу потужності спотворення на обладнання пропорційна до значень ПЯЕ. Слід зазначити, що гранично допустимі значення ПЯЕ вибираються із техніко-економічних розрахунків.

2. Для оцінки рівнів вищих гармонік напруги здебільшого застосовується апаратурний аналіз, який заснований на використанні спеціальних приладів-аналізаторів. У випадку відсутності спеціалізованих приладів аналіз рівнів несинусоїдальності напруги можливо проводити шляхом використання практичного гармонічного аналізу осцилограм напруги.

3. Одними з найпоширеніших в сучасних СЕПП джерел вищих гармонік є потужні керовані вентильні випрямлячі та потужні перетворювачі частоти напруги.

4. Проведений розрахунок рівнів несинусоїдальності напруги в СЕПП показав, що застосування ФКП дозволяє знизити значення коефіцієнту несинусоїдальності  $k_U$  та коефіцієнту перевантаження БСК струмами вищих гармонік до нормально допустимих рівнів.

5. Результати комп'ютерного моделювання несинусоїдальних режимів роботи СЕПП з ФКП засвідчили дієвість ФКП як засобу покращення якості електроенергії. Аналіз результатів моделювання засвідчив адекватність розробленої моделі, а результати, отримані шляхом її використання є достовірними і практично збігаються з результатами розрахунку рівнів несинусоїдальності напруги за загальноприйнятою методикою.

6. Результати розрахунку варіанту централізованої компенсації вищих гармонік в СЕПП показали, що зниження рівнів коефіцієнту

несинусоїдальності  $k_U$  та коефіцієнту перевантаження БСК струмами вищих гармонік в розгалуженій мережі можливо досягти встановленням ФКП лише в одному із вузлів мережі. При цьому значення  $k_U$  та  $k_{\Pi}$  для інших вузлів мережі будуть знаходитись в нормально допустимих межах.

7. Проведений аналіз варіантів конструктивного виконання АФ показав, що найбільшого розповсюдження в сучасних СЕПП набули паралельні АФ на основі інвертора напруги.

8. Розроблені комп'ютерні моделі СЕПП з джерелами вищих гармонік (ТПЧ-800) та АФ дали змогу провести кількісний та якісний аналіз несинусоїдальних режимів роботи СЕПП. Результати моделювання засвідчили високу ефективність АФ до зниження рівнів вищих гармонік струму та напруги.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання : Підручник / І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Сасенко. – Д. : Національний гірничий університет, 2009. – 319 с. : іл.
2. 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.
3. Жежеленко И.В. Показатели качества электрической энергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко -М: Энергоатомиздат. 1986.
4. В.С. Иванов, И.В. Соколов. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
5. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий / А.С. Овчаренко и др. – К.: Техніка, 1985 – 279 с.
6. ДСТУ EN 50160-2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності».
7. А.И. Чиженко. Обменные энергетические процессы в цепях вентильных полупроводниковых преобразователей – К.: Наукова думка, 2003 – 228 с.
8. Добрусин Л.А. Широкополосные фильтрокомпенсирующие устройства для тиристорных преобразователей //Электричество 1985 № 4
9. Л.А. Бессонов. Теоретические основы электротехники – 9-е изд. перераб. и доп.– М.: Высшая школа – 1996 г. – 528 с.
10. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей – М.: Радио и связь, 1982 – 285 с.
11. Зевеке Г.В. Основы теории цепей – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975 г.

12. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть станций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989 – 608 с.

13. Довідник з самостійної оцінки якості електроенергії. Вступ  
// Електротема

14. Довідник з якісного забезпечення електроенергією. Вступ  
// Електротема

15. Довідник з якісного забезпечення електроенергією. Гармоніки. Інтергармоніки // Електротема.

16. Лазарев. Г., Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных систем

17. Дьяконов В., Круглов В. Matlab. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002 – 228 с.

18. Дэбин Дж. Simulink 4. Секреты мастерства – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003 – 403 с.

19. Electrical Power Systems Quality – Roger C. Dugan, Surya Santoso – 2-nd Edition, - 1998 – 389 p.