

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД**  
**«ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І**  
**ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**САВЕНКО ОЛЬГА СЕРГІЇВНА**

УДК 621.316.727

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ**  
**ПОТУЖНОСТІ ТА МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ НИМИ**

05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»

(технічні науки)

Подається на здобуття наукового ступеню кандидата наук

Дисертація містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело О. С. Савенко

Науковий керівник  
**Поднебенна Світлана Костянтинівна**  
кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2021

## АНОТАЦІЯ

**Савенко О.С. Удосконалення пристроїв компенсації реактивної потужності та методів управління ними.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи» – Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, 2021.

Мета дисертаційної роботи – підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в електротехнічних комплексах та електричних мережах шляхом удосконалення гібридних компенсаторів реактивної потужності та методів керування ними.

Для досягнення поставленої мети необхідним було вирішення таких завдань:

- проаналізувати роботу гібридних компенсаторів реактивної потужності в електротехнічних комплексах електричних мереж;
- розробити способи покращення ефективності гібридних компенсаторів реактивної потужності за рахунок раціонального вибору параметрів пасивної частини;
- розробити системи керування гібридним компенсатором реактивної потужності при три- та чотирипровідному підключенні до мережі та за наявності несинусоїдності напруги живлення;
- розробити імітаційні моделі електротехнічних комплексів з гібридними компенсаторами реактивної потужності для дослідження електромагнітних процесів у динамічних режимах роботи;
- розробити експериментальний зразок гібридного компенсатора та перевірити ефективність його роботи в комплексі з реактивним навантаженням;

- оцінити ефективність розроблених пристроїв компенсації реактивної потужності та методів керування ними.

Для виконання роботи використано фундаментальні положення теорії електричних кіл, математичне, імітаційне та фізичне моделювання для розрахунків електромагнітних процесів, фізичний експеримент для експериментальної перевірки отриманих теоретичних результатів. Достовірність результатів підтверджується зіставленням результатів розрахунків відповідно до запропонованих методик, результатів імітаційного моделювання з використанням розроблених моделей та експериментальних досліджень, що проводились в лабораторних умовах.

У результаті дисертаційного дослідження вирішено важливе наукове завдання, яке полягає у удосконаленні існуючих пристроїв компенсації реактивної потужності та розробці нових методів управління ними.

Внаслідок проведення теоретичних та експериментальних досліджень отримані такі наукові та практичні результати.

Здійснено літературний огляд питань впливу реактивних складових струмів на електричну мережу та виконано співставний аналіз існуючих методів компенсації реактивної потужності. Виконано огляд існуючих шляхів і технічних рішень, які забезпечують компенсацію реактивних складових струмів навантаження. Проведений аналіз дав змогу виявити основні переваги та недоліки кожної з конфігурацій пристроїв компенсації реактивної потужності як пасивного, так і активного типів. Аргументована необхідність удосконалення існуючих пристроїв компенсації, зокрема використання гібридного компенсатора реактивної потужності, та розробки нових систем керування ними. На основі літературного огляду сформульовані цілі роботи.

Розроблені методики вибору параметрів пасивної частини гібридного компенсатора з метою мінімізації потужності автономного інвертора напруги активної частини та зменшення кількості ступенів батареї конденсаторів пасивної частини. Проаналізовані регульовальні характеристики, отримані

при реалізації традиційних підходів до розподілу ємностей ступенів батареї конденсаторів, та побудовані регульовальні характеристики для отриманих нових співвідношень. Показана можливість плавного регулювання величини реактивної потужності без розривів у регульовальній характеристиці, при цьому потужність активного компенсатора не перевищує 20% від потужності всього компенсатора в цілому.

Виконаний математичний опис роботи гібридного компенсатора, який включає в себе процеси, що протікають у електричній мережі, електричному навантаженні, що споживає несинусоїдні струми, та процеси у гібридному компенсаторі з системою керування. В математичному описі розраховуються струм завдання та струм компенсації. Перевірена можливість роботи запропонованої системи у режимі компенсації реактивної потужності та режимі додаткової компенсації неактивних складових струму мережі. Представлені результати математичного моделювання роботи запропонованої системи при чотирипровідному та трипровідному підключенні пристрою до мережі.

Запропоновані структури систем автоматичного керування, які дозволять формувати вихідний струм заданої форми. Системи управління представлені у трифазному та однофазному виконанні для чотирипровідного та трипровідного підключення.

Представлений спосіб стабілізації напруги ланки постійного струму, що дозволяє зменшити час перехідного процесу при стрибкоподібній зміні потужності навантаження до двох періодів напруги мережі і мінімізувати ємність конденсаторів ланки постійного струму активної частини компенсатора.

Проведено аналіз підходів до синтезу регулятора реактивного струму. Запропоновано використання модифікованого гістерезисного регулятора з постійною частотою перемикавання, що дозволяє забезпечити швидке формування заданого струму та автоматично обмежити його величину, при цьому забезпечивши мінімальний час регулювання. Запропонована

адаптивна система керування регулятором, яка перераховує величину індуктивності інтерфейсного фільтру у режимі реального часу, тим самим підтримуючи постійну середню частоту перемикання.

Розроблені імітаційні моделі для перевірки роботи запропонованої системи в умовах несиметричної напруги мережі. Використане перетворення Парка і Кларка у разі несиметрії напруги, що дозволяє формувати симетричну трифазну синусоїдну систему струмів, незалежно від спектру і несиметрії напруги мережі.

Досліджено трансформаторне підключення гібридного компенсатора реактивної потужності до мережі, в якому пасивна частина компенсатора представлена батареєю конденсаторів з поширеною схемою внутрішніх з'єднань «трикутник». Розроблено алгоритми керування при використанні одного трифазного або двох однофазних трансформаторів.

Представлені результати імітаційного моделювання для режимів компенсації реактивної потужності та додаткової компенсації неактивних складових струму мережі.

Для проведення експерименту на фізичній моделі розробленого компенсатора реактивної потужності розроблене технічне рішення експериментального пристрою, що складається з активної та пасивної частин компенсатора. Керування активною частиною компенсатора виконане на базі 32-бітного однокристального мікроконтролера з ядром Cortex-M3 STM32F103C8T6B. Силова частина автономного інвертора виконана за трифазною мостовою схемою транзисторами із зустрічно-паралельними діодами. Пасивна частина компенсатора складається з батареї конденсаторів з симісторним управлінням, які включені паралельно. У розділі наведені основні характеристики та принципові електричні схеми модулів.

Розраховані ємності ступенів батареї конденсаторів згідно з розробленими алгоритмами для запропонованого діапазону регулювання величини реактивної потужності.

В лабораторних умовах проведені експериментальні дослідження роботи розробленого зразка при підключенні нелінійних електричних навантажень реактивного характеру. Наведені осцилограми та спектри струмів навантаження, мережі та гібридного компенсатору, що підтверджують ефективність запропонованих підходів.

**Ключові слова:** реактивна потужність, електрична мережа, несиметрія, несинусоїдність, пасивні пристрої компенсації, СТАТКОМ, неактивні складові, вищі гармоніки, потужність обміну, коефіцієнт потужності, автономний інвертор напруги, тиристорне керування, регулятор, гістерезисне регулювання.

## ANNOTATION

**O. S. Savenko. Improvement of VAR compensation devices and their control methods. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.**

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences on the specialty 05.09.03 – Electrotechnical complex and systems. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 2021.

The thesis is devoted to the solution of an actual problem, namely, increasing the efficiency of VAR compensation in electrical complexes and electrical grids by improving hybrid VAR compensators and their control methods.

To achieve this goal it was necessary to solve the following tasks:

- to analyze the operation of hybrid VAR compensators in electrical complexes and electrical grids;
- to develop ways to improve the efficiency of hybrid VAR compensators due to the rational choice of the parameters of the passive part;
- to develop control systems for hybrid VAR compensator with three- and four-wire connection to the grid, and under conditions of non-sinusoidal supply voltage;
- to develop simulation models of electrical complexes with hybrid VAR compensators for the study of electromagnetic processes in dynamic operation modes;
- to develop an experimental sample of a hybrid VAR compensator and verification of the efficiency of its operation in combination with a nonlinear reactive load;
- to evaluate the effectiveness of the developed VAR compensation devices and their control methods.

Research is based on the fundamental provisions of the electric circuit theory; mathematical, simulation and physical modeling for electromagnetic processes' calculations, physical experiment for experimental verification of the obtained theoretical results were used. The reliability of the results is confirmed by

comparing the results of calculations in accordance with the proposed methods, the results of simulation using the developed models and experimental studies conducted in the laboratory.

As a result of the dissertation research, an important scientific problem was solved, that is to improve existing devices of VAR compensation and to develop new control methods for them.

As a result of theoretical and experimental research, the following scientific and practical results were obtained.

A literature review of the impact of current reactive components on the electrical grid and a comparative analysis of existing methods of VAR compensation have been done. A review of existing ways and technical solutions that provide compensation for reactive components of load currents has been done. The analysis made it possible to identify the main advantages and disadvantages of each of the VAR compensation devices' configurations of both passive and active types. The need to improve existing VAR compensation devices, in particular the use of a hybrid VAR compensator, and to develop new control systems has been argued. On the basis of the literature review the purposes of work are formulated.

Methods for calculating the parameters of the passive part of the hybrid VAR compensator have been developed in order to minimize the VSI installed power of the active part and reduce the number of capacitor bank's stages of the passive part. The control characteristics obtained in the implementation of traditional approaches to the calculating of capacitance stages of the capacitor bank are analyzed, and the control characteristics for the obtained new ratios are built. The possibility of smooth regulation of the reactive power value without gaps in the control characteristic is shown, while the power of the active part of hybrid VAR compensator does not exceed 20% of the power of the whole compensator.

The mathematical description of work of the hybrid VAR compensator has been done, which includes processes occurring in the electrical grid, electrical loads consuming non-sinusoidal currents, and processes in a hybrid compensator with a control system. The reference current and the compensation current are



calculated in the mathematical description. The possibility of operation of the proposed system in the mode of reactive power compensation and the mode of additional compensation of inactive components of the grid current is checked. The results of mathematical modeling of the proposed system with four-wire and three-wire connection of the device to the grid are presented.

The structures of automatic control systems are proposed, which will allow to generate the output current of a given shape. Control systems are presented in three-phase and single-phase execution for four-wire and three-wire connection of the device to the grid.

A method of stabilizing the DC link voltage is presented, which allows to reduce the transient process time with a sudden change in load power to two periods of mains voltage and to minimize the capacitance of the DC link capacitors of the active part of the hybrid VAR compensator.

The analysis of approaches to the synthesis of the reactive current regulator is carried out. The use of a modified hysteresis controller with a constant switching frequency is proposed, which allows to ensure the rapid formation of a given current and automatically limit its value, while ensuring a minimum control time. An adaptive controller control system is proposed, which calculates the value of the interface filter inductance in real time, thus maintaining a constant average switching frequency.

Simulation models have been developed to test the operation of the proposed system in conditions of asymmetric mains voltage. The Park and Clark transformation in the case of voltage asymmetry is used, which allows to form a symmetric three-phase sinusoidal current system, regardless of the spectrum and asymmetry of the network voltage.

The transformer connection of a hybrid VAR compensator to the grid, in which the passive part of the compensator is represented by a capacitor bank with a common scheme of internal connections "triangle", has been studied. Control algorithms have been developed using one three-phase or two single-phase transformers.

The results of simulation for VAR compensation modes and additional compensation of inactive grid current components are presented.

To conduct an experiment on the physical model of the developed hybrid VAR compensator, a technical solution of the experimental device consisting of active and passive parts of the compensator was developed. The control of the active part of the compensator is based on a 32-bit single-chip microcontroller with a Cortex-M3 STM32F103C8T6B core. The power part of the VSI is made according to the three-phase bridge circuit by transistors with counter-parallel diodes. The passive part of the compensator consists of capacitor banks with triac control, which are connected in parallel. The main characteristics and basic electrical diagrams of the modules are given.

The capacitances of the capacitor bank stages are calculated according to the developed algorithms for the proposed range of reactive power control.

In laboratory conditions experimental researches of work of the developed sample at connection of nonlinear reactive electric loadings are carried out. The oscillograms and harmonic spectrum of load currents, network currents and compensator currents are given, which confirm the efficiency of the proposed approaches.

**Key words:** reactive power, electrical grid, asymmetry, non-sinusoid, passive VAR compensation devices, STATCOM, inactive components, higher harmonics, power exchange, power factor, VSI, thyristor control, regulator, hysteresis.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Бурлака В.В., Гулаков С.В., Поднебенная С.К., **Савенко О.С.** Гибридный компенсатор реактивной мощности с плавным регулированием. Електротехніка та електроенергетика. 2014. № 2. С. 13-19. *(Здобувачем виконаний порівняльний аналіз існуючих пристроїв компенсації реактивної потужності, аргументований вибір гібридного компенсатора для подальшого дослідження, розроблені власні методики вибору ємностей пасивної частини компенсатора)*
2. Burlaka V.V., Gulakov S.V., Podnebennaya S.K., **Savenko O.S.** Hybrid VAR compensator with improved efficiency. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2014. Вип. 29. С. 174-180. *(Здобувачем розроблена система керування гібридним компенсатором реактивної потужності для безпосереднього та двухфазного трансформаторного підключення до мережі)*
3. Малинов В.Л., **Савенко О.С.** Источник питания установки индукционного нагрева. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2016. Вип. 33. С. 82-86. *(Здобувачем розроблена математична модель нелінійного навантаження)*
4. Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В., **Савенко О.С.** О возможностях управления параметрами качества электроэнергии со стороны электроприемников с активными выпрямителями. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2017. Вип. 34. С. 139-147. *(Здобувачем розроблена математична модель, що реалізовує алгоритм розрахунку реактивного струму)*
5. **Савенко О.С.**, Поднебенная С.К., Бурлака В.В. Имитационное моделирование работы гибридного компенсатора реактивной мощности. Електротехніка та електроенергетика. 2019. № 1. С. 61-70. *(Здобувачем розроблені імітаційні моделі, що дозволяють виконати перевірку*

*працездатності розроблених стратегій керування для симетричної та несиметричної напруги мережі)*

6. **Савенко О.С.**, Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В. Експериментальне дослідження роботи гібридного компенсатора реактивної потужності. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2020. № 2(50). С. 36-42. *(Здобувачем розроблений експериментальний зразок гібридного компенсатора реактивної потужності для перевірки роботи пристрою в лабораторних умовах)*

#### **Стаття у науковому виданні іншої держави:**

7. **Савенко О.С.**, Поднебенная С.К., Бурлака В.В. Имитационное моделирование работы гибридного компенсатора реактивной мощности с трансформаторным подключением к сети. Österreichisches Multiscience Journal. 2020. Vol.1, № 30. С. 46-53. *(Здобувачем розроблені системи керування роботою гібридного компенсатора реактивної потужності для двох варіантів трансформаторного підключення до мережі, проведено імітаційне моделювання в умовах симетричної та несиметричної напруги мережі)*

#### **Патенти на винахід:**

8. Пат. 112554 Україна, МПК G05A 1/70. Спосіб компенсації реактивної потужності / С.В. Гулаков, В.В. Бурлака, С.К. Поднебенна, **О.С. Савенко**. – № а201403912; заявл. 14.04.2014; опубл. 26.09.2016, Бюл. №18. *(Здобувачем розроблено методики вибору ємностей ступенів пасивної частини компенсатора реактивної потужності)*

#### **Матеріали та тези наукових доповідей:**

9. **Савенко О.С.**, Поднебенная С.К. Обзор методов компенсации реактивной мощности. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів «Енергетика, енергозбереження на

початку XXI століття». Маріуполь, 20 березня 2014 р. С. 18. *(Здобувачем виконаний детальний аналіз сучасних пристроїв компенсації реактивної потужності та аналіз можливостей впровадження нових схемних рішень для вирішення проблеми компенсації реактивної потужності)*

10. **Савенко О.С.**, Бурлака В.В., Гулаков С.В., Поднебенная С.К. Методы снижения влияния высших гармоник на батареи конденсаторов. Міжнар. науково-технічна конференція «Університетська наука – 2014». Маріуполь, 20-21 травня 2014 р. Т. 2. С. 7-8. *(Здобувачем виділені наслідки роботи батарей конденсаторів в умовах несинусоїдної напруги, проаналізовані основні методи боротьби з ними)*

11. **Савенко О.С.**, Бурлака В.В., Гулаков С.В., Поднебенная С.К. Компенсатор реактивной мощности с плавным регулированием. V Міжнародна науково-технічна конференція «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». Луцьк, 29 червня – 1 липня 2014 р. С. 32 - 34. *(Здобувачем виведені нові співвідношення для розрахунку ємностей ступенів батарей конденсаторів пасивної частини компенсатора)*

12. **Савенко О.С.**, Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В. К вопросу синтеза системы управления гибридным компенсатором реактивной мощности. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика». Маріуполь, 20-24 квітня 2015 р. С. 35. *(Здобувачем розроблена система керування гібридним компенсатором з забезпеченням «ізоляції» батареї конденсаторів від вищих гармонік)*

13. **Савенко О.С.**, Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В. Исследование свойств гибридных компенсаторов реактивной мощности. Міжнар. науково-технічна конференція «Університетська наука – 2015». Маріуполь, 19-20 травня 2015 р. Т. 2. С. 229-230. *(Здобувачем представлений варіант використання можливостей активної частини гібридного компенсатора для підвищення якості напруги у точці підключення)*

14. **Савенко О.С.,** Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В. Способ компенсации реактивной компоненты тока. XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика». Кременчук, 17-19 травня 2016. С. 225-227. *(Здобувачем розроблена математична модель роботи гібридного компенсатора реактивної потужності у комплексі з реактивним навантаженням)*

15. **Савенко О.С.,** Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В. Повышение энергоэффективности электрической сети при наличии несимметричных нагрузок. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика». Маріуполь, 11-12 травня 2016. С. 32. *(Здобувачем розроблений спосіб симетрування навантаження в обмеженому діапазоні потужностей засобами гібридного компенсатора реактивної потужності)*

16. **Савенко О.С.,** Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В. К вопросу повышения эффективности средств компенсации реактивной мощности. Міжнар. науково-технічна конференція «Університетська наука – 2016». Маріуполь, 19-20 травня 2016 р. Т. 1. С. 203. *(Здобувачем розроблена система керування гібридним компенсатором реактивної потужності для випадку використання трифазних батарей конденсаторів з внутрішньою схемою з'єднання «трикутник»)*

17. **Савенко О.С.,** Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В. Выбор критериев оптимизации работы статических компенсаторов в сетях с несимметричной нагрузкой. III Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика». Маріуполь, 11-12 травня 2017 р. С. 24. *(Здобувачем розроблені критерії оптимізації роботи гібридного компенсатора реактивної потужності за умови несиметричної напруги живлення)*

18. **Савенко О.С.**, Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В. Математическое моделирование работы гибридного компенсатора реактивной мощности в условиях несимметричной трехфазной сети. Міжнар. науково-технічна конференція «Університетська наука – 2017». Маріуполь, 18-19 травня 2017 р. Т. 1. С. 259-260. *(Здобувачем розроблена математична модель роботи гібридного компенсатора реактивної потужності в умовах несиметричної трифазної напруги живлення)*

19. **Савенко О.С.**, Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В. Оценка эффективности методов управления гибридным компенсатором реактивной мощности (ГКРМ). IV Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика». Маріуполь, 15-17 травня 2018. С. 33. *(Здобувачем розроблена математична модель роботи гібридного компенсатора реактивної потужності з можливістю симетрування напруги в точці підключення)*

20. **Савенко О.С.**, Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В. Иммитационное моделирование режимов работы ГКРМ в условиях несимметрии питающего напряжения. Міжнар. науково-технічна конференція «Університетська наука – 2018». Маріуполь, 23-24 травня 2018 р. Т. 1. С. 288-289. *(Здобувачем розроблена імітаційна модель роботи гібридного компенсатора реактивної потужності в умовах несиметричної трифазної напруги живлення)*

21. **Savenko O.S.**, Podnebennaya S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V. Control Strategy for Hybrid VAR Compensator. IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress (UKRSYW). 2018. Pp. 93-96. *(Здобувачем розроблені стратегії керування роботою гібридного компенсатора реактивної потужності, розроблені математичні моделі, що реалізують запропоновані стратегії)*

22. **Савенко О.С.**, Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В. Система управління гібридним компенсатором реактивної потужності.

Міжнар. науково-технічна конференція «Університетська наука – 2019». Маріуполь, 16-17 травня 2019 р. Т. 1. С. 251-252. *(Здобувачем розроблені системи керування роботою гібридного компенсатора реактивної потужності в умовах несиметрії та несинусоїдності напруги живлення)*

23. **Савенко О.С.**, Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В. Особливості розрахунку струму компенсатора реактивної потужності в умовах несинусоїдності та несиметрії напруги мережі. V Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика». Маріуполь, 19-21 листопада 2019 р. С. 46-47. *(Здобувачем розроблені алгоритми розрахунку струму завдання компенсатора в умовах несиметрії напруги живлення)*



## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....</b>	<b>19</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>21</b>
<b>РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ .....</b>	<b>28</b>
1.1 Визначення поняття реактивної потужності при несинусоїдних режимах .....	33
1.2 Обґрунтування необхідності впровадження компенсації реактивної потужності .....	38
1.3 Методи та пристрої компенсації реактивної потужності.....	40
Висновки до розділу 1.....	74
<b>РОЗДІЛ 2. ВДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМНИХ РІШЕНЬ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ГІБРИДНИМ КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....</b>	<b>76</b>
2.1 Розробка методики визначення ємності ступенів ГКРП за умови мінімізації вихідної напруги інвертора активної частини.....	76
2.2 Розробка алгоритмів керування роботою ГКРП при чотирипровідному підключенні до мережі.....	82
2.3 Розробка алгоритмів керування роботою ГКРП для трипровідного підключення.....	109
Висновки до розділу 2.....	120
<b>РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГІБРИДНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЗА УМОВИ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ .....</b>	<b>122</b>
3.1 Моделювання роботи ГКРП в умовах симетричної напруги живлення .	122
3.2 Моделювання роботи ГКРП в умовах несиметричної та несинусоїдної напруги живлення.....	137
3.3 Моделювання трансформаторного підключення гібридного компенсатора реактивної потужності до мережі.....	147

Висновки до розділу 3.....	166
<b>РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКУ</b>	
<b>ГІБРИДНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА</b>	
<b>ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО РОБОТИ .....</b>	<b>168</b>
4.1 Активна частина ГКРП .....	168
4.2 Пасивна частина ГКРП .....	173
4.3 Результати експериментального дослідження .....	180
Висновки до розділу 4.....	183
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>184</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>184</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>203</b>
<b>Додаток А. ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ НЕАКТИВНОЇ</b>	
<b>ПОТУЖНОСТІ ПРИ НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМАХ.....</b>	<b>203</b>
<b>Додаток Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ .....</b>	<b>215</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

DPLL – Digital phase-locked loop – дискретне фазове автопідлаштування частоти

DVR – Dynamic voltage restoration – динамічний пристрій відновлення напруги

FACTS – Flexible AC transmission system – гнучка система передачі змінного струму

IGBT – Insulated-gate bipolar transistor – біполярний транзистор з ізольованим затвором

IGCT – Integrated gate-commutated thyristors – тиристор з інтегрованим керуванням

IPFC – Interline power flow controller – міжлінійний регулятор потоків потужності

SSSC – Static synchronous series compensator – статичний компенсатор для поздовжньої компенсації

UPFC – Unified power flow controller – універсальний регулятор потоків потужності

UPQC – Unified power quality conditioner – уніфікований контролер якості електроенергії

АІН – автономний інвертор напруги

АІС – автономний інвертор струму

АК – активний компенсатор

АФ – активний фільтр

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

БК – батарея конденсаторів

ВГ – вищі гармоніки

ГКРП – гібридний компенсатор реактивної потужності

ЕРС – електрорушійна сила

ІФ – інтерфейсний фільтр

ККД – коефіцієнт корисної дії

КРП – компенсатор реактивної потужності

КТП – конденсатор з тиристорним перемиканням

ЛЕП – лінії електропередач

ЛПС – ланка постійного струму

ПІ – пропорційно-інтегральний

ПК – персональний комп'ютер

ПКРП – пристрій компенсації реактивної потужності

РП – реактивна потужність

РС – регулятор струму

РТК – реактор з тиристорним керуванням

САК – система автоматичного керування

СТАТКОМ – статичний компенсатор реактивної потужності

ФНЗП – фільтр напруги зворотної послідовності

ФНПП – фільтр напруги прямої послідовності

ФНЧ – фільтр низьких частот

ФСЗП – фільтр струму зворотної послідовності

ФСПП – фільтр струму прямої послідовності

ШІМ – шіроотно-імпульсний модулятор

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Наявність перетоків реактивної потужності є характерною особливістю систем електропостачання, так як споживачами реактивної потужності є більшість електроприймачів змінного струму: електроприймачі промислових підприємств, електрифікований залізничний транспорт, торгівельні та спортивні центри, тощо. Основними споживачами на промислових підприємствах є асинхронні двигуни, індукційні печі, вентильні перетворювачі, зварювальні агрегати. Доля реактивної потужності при завантаженні ліній електропередач в даний час оцінюється в діапазоні 20-80% від активної потужності.

Для підтримки нормального режиму роботи енергосистеми повинна забезпечуватися генерація реактивної потужності (РП), тому разом з резервом активної потужності в енергосистемі потрібен резерв і реактивної потужності. Згідно з літературними даними, генерована реактивна потужність складається з потужності, що виробляється на електростанціях (60% всієї реактивної потужності), реактивної потужності компенсуючих пристроїв, розміщених в електричній мережі та у споживачів (20%), 20% реактивної потужності припадає на ЛЕП.

Однак генерація РП з боку електростанцій призводить до насичення мережі реактивними складовими струмів, що негативно позначається на роботі енергосистеми: скорочення терміну служби обладнання, зростання втрат електроенергії, погіршення коефіцієнту потужності навантаження та ліній та зменшення пропускної здатності мережі в цілому. Це зумовлює переваги використання компенсаторів реактивної потужності, що встановлюються поруч з навантаженням.

Існує ряд пристроїв компенсації реактивної потужності. Залежно від виконання пристрою, його можна підключити послідовно в розрив електричного кола або паралельно навантаженню. У порівнянні з пасивними компенсуючими пристроями, найбільш ефективним в мережах 0,4 кВ в даний

час є застосування активних компенсаторів, за допомогою яких можна забезпечити плавність регулювання величини реактивної складової струму, при цьому не виконуючи генерацію струмів вищих гармонік до мережі.

Дослідженню проблем компенсації реактивної потужності та розробкою пристроїв для її здійснення займаються такі відомі фахівці у галузі електропостачання, як Демов О. Д., Новський В. О., Гриб О. Г., Шидловський А. К., Омельчук А. О., Малахатка Д. О., Шкрабець Ф. П., Ягуп В. Г., Гадай А.В., Яндульський О. С., Жаркін А. Ф., Грицюк Ю. В., Варецький Ю. Є., Тугай Ю. І., Босий Д. О., Федів Є. І., Жежеленко І.В., Саєнко Ю. Л., Рогальський Б. С., Скоробогатова В. І., Щербина Ю. В., Зорін В. В., Каялов Г. М., Солдаткіна Н. А., Маркович І. М., Кузнецов В. Г., Сегеда М. С., Банін Д. Б., Нанака О. М. та ін. Значна увага подібним питанням приділялась закордонними науковцями – Juan Dixon, Luis Morán, L. Wang, C.-S. Lam, M.-C. Wong, T. J. Miller, T. Tanaka, Chi-Jui Wu, G. W. Ott, Erxia Li, D. J. Adams, Fang Z. Peng, F. Ichikawa, L. Angquist, J. Samuelsson та ін. Ними визначені основні схемні рішення, розрахункові співвідношення для визначення параметрів пристроїв.

В той же час, використання нових топологій активних компенсаторів не завжди є економічно виправданим, а традиційні пасивні компенсуючі пристрої не відповідають вимогам щодо плавності управління величиною реактивної потужності або здатні погіршувати спектральний склад струму мережі.

Таким чином, враховуючи роль, яку в сучасних електричних мережах відіграють пристрої компенсації реактивної потужності, дослідження, спрямовані на підвищення коефіцієнту потужності складових мережі у розподільчих мережах, є пріоритетними. З огляду на вартість сучасних напівпровідникових силових ключів, практично важливими також є роботи, спрямовані на підвищення ефективності та зменшення собівартості. Тому актуальною задачею є реалізація та впровадження результатів таких досліджень в розподільчі системи електроживлення, що дозволить

підвищити ефективність та надійність енергосистеми, а також підвищити економічність її роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на основі програм держбюджетних науково-дослідних робіт ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» за темою «Розробка імпульсних перетворювачів з функціями підвищення енергоефективності розподільчих електричних мереж» (2017-2020 рр., номер держреєстрації 0117U003995).

**Мета та завдання дослідження.** Мета дисертаційного дослідження полягає у підвищенні ефективності компенсації реактивної потужності в електротехнічних комплексах та електричних мережах шляхом удосконалення гібридних компенсаторів реактивної потужності та методів керування ними. Досягнення поставленої мети передбачає вирішення такого комплексу завдань:

- проаналізувати роботу гібридних компенсаторів реактивної потужності в електротехнічних комплексах електричних мереж;
- розробити способи покращення ефективності гібридних компенсаторів реактивної потужності за рахунок раціонального вибору параметрів пасивної частини;
- розробити системи керування гібридним компенсатором реактивної потужності при три- та чотирипровідному підключенні до мережі та за наявності несинусоїдності напруги живлення;
- розробити імітаційні моделі електротехнічних комплексів з гібридними компенсаторами реактивної потужності для дослідження електромагнітних процесів у динамічних режимах роботи;
- розробити експериментальний зразок гібридного компенсатора та перевірити ефективність його роботи в комплексі з реактивним навантаженням;
- оцінити ефективність розроблених пристроїв компенсації реактивної потужності та методів керування ними.

*Об'єкт дослідження* – електромагнітні процеси в електротехнічному комплексі з гібридними компенсаторами реактивної потужності.

*Предмет дослідження* – взаємозв'язки, особливості та закономірності функціонування гібридних компенсаторів в електротехнічних комплексах; керування електромагнітними процесами в електротехнічному комплексі з гібридними компенсаторами реактивної потужності.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених в дисертації задач використовувались фундаментальні положення теорії електричних кіл, математичне, імітаційне та фізичне моделювання для розрахунків електромагнітних процесів, фізичний експеримент для експериментальної перевірки отриманих теоретичних результатів. Достовірність результатів підтверджується зіставленням результатів розрахунків відповідно до запропонованих методик, результатів імітаційного моделювання з використанням розроблених моделей та експериментальних досліджень. Для отримання даних з цифрових вимірювальних пристроїв використовувалося комп'ютерне програмне забезпечення від його виробників.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Набув подальшого розвитку метод забезпечення плавного регулювання реактивної потужності гібридного компенсатора, який складається з послідовно з'єднаних активної та пасивної частин, що полягає у встановленні ємності ступенів пасивної частини компенсатора у відповідності до отриманих закономірностей, та дозволяє мінімізувати питому потужність активної частини компенсатора.

2. Удосконалено систему керування активною частиною гібридного компенсатора реактивної потужності, яка забезпечує формування синусоїдного струму у конденсаторах пасивної частини компенсатора, що дозволяє усунути перенапругу на них та покращити надійність компенсатора.

3. Удосконалено спосіб підключення та керування гібридного компенсатора реактивної потужності, який полягає у тому, що активна частина підключається до мережі через трифазний (або три однофазні)



вольтододавальний трансформатор, а керування відбувається з урахуванням запізнювання у трансформаторі. Це дозволяє використати у такому гібридному компенсаторі реактивної потужності стандартні трививідні батареї конденсаторів з внутрішньою схемою з'єднання «трикутник».

4. Вперше запропоновано спосіб керування гібридним компенсатором реактивної потужності з трансформаторним підключенням до мережі, який полягає у формуванні активних струмів компенсації, що інжектуються у дві фази компенсатора за схемою відкритого трикутника. Це дозволяє покращити техніко-економічні показники гібридного компенсатора реактивної потужності за рахунок зменшення кількості однофазних вольтододавальних трансформаторів.

5. Удосконалено спосіб керування гібридним компенсатором реактивної потужності, який дозволяє забезпечити плавність регулювання реактивної потужності та інжектувати вищі гармоніки струму навантаження з від'ємним знаком у точці підключення компенсатора, що дає змогу компенсатору обмежено виконувати функції паралельного активного фільтру вищих гармонік.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у такому:

1. Розроблено систему керування гібридним компенсатором реактивної потужності, що складається з батареї конденсаторів з тиристорним перемиканням та інвертора, яка дозволяє забезпечити плавність регулювання реактивної потужності та зменшити питому потужність інвертора на рівні 20 % від загальної потужності компенсатора.

2. Розроблено систему керування гібридним компенсатором реактивної потужності, яка дозволяє забезпечити синусоїдний струм через батареї конденсаторів пасивної частини компенсатора при наявності несинусоїдності напруги мережі.

3. Розроблено імітаційні моделі гібридних компенсаторів реактивної потужності та зроблений математичний опис їх роботи, що дозволяє проводити аналіз роботи гібридних компенсаторів при чотири- або

трипровідному підключення до мережі, за наявності або відсутності несинусоїдності та несиметрії.

4. Розроблено гібридний компенсатор реактивної потужності, що дозволяє в якості батареї конденсаторів з тиристорним перемиканням використовувати стандартну трививідну батарею.

Промислове випробування розробки в умовах ТОВ «Магма» та ПрАТ «МК «Азовсталь» підтвердило її ефективність для промислового використання у внутрішньозаводських розподільчих мережах.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є самостійним науковим дослідженням. До дисертації увійшли наукові результати, отримані здобувачем особисто. Здобувачу належить вибір методик дослідження, аналіз та узагальнення експериментальних результатів досліджень. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, у роботі використано лише ті ідеї, положення і розрахунки, що є результатом особистої роботи здобувача.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: Міжнародній науково-технічній конференції «Університетська наука» (Маріуполь, 2014-2019 рр.); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених, фахівців, аспірантів «Енергетика, енергозбереження на початку ХХІ століття» (Маріуполь, 2014); Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (Луцьк, 2014); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених, спеціалістів, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (Маріуполь, 2015-2019 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (Кременчук, 2016); IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress (UKRSYW) (Київ, 2018).

**Публікації.** Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень викладені у 23 наукових працях, з яких 6 статей у наукових

фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 1 стаття у науковому виданні іншої держави, 1 патент України на винахід, 15 матеріалів та тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертацію викладено на 217 сторінках. Робота складається з анотацій, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Список використаних джерел налічує 130 найменувань.

## РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Широке поширення електрообладнання, функціонування якого потребує реактивної потужності для підтримки змінного магнітного поля, призвело до завантаження електричних мереж реактивними складовими струмів.

Джерелами реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств є: електричні мережі енергопостачальної організації; синхронні генератори, що встановлюються на електростанціях для вироблення активної потужності. Ці генератори здатні також виробляти і реактивну потужність. Реактивну потужність виробляють і синхронні електродвигуни в режимі перезбудження, а також спеціальні компенсуючі пристрої (батареї силових конденсаторів, фільтрокомпенсуючі установки і статичні компенсуючі пристрої, виконані на базі сучасних силових напівпровідникових приладів) [1-7].

Для нормальної роботи споживачів електричної енергії їм потрібна як активна, так і реактивна потужність. Основними споживачами реактивної потужності є: асинхронні електродвигуни (65-70%); трансформатори всіх ступенів трансформації (20-25%) і повітряні електричні мережі (10%) [8, 9] (рис. 1.1). Велику частку в загальному навантаженні енергосистем займають електроустановки з підвищеним споживанням реактивної потужності (наприклад, вентильні перетворювачі в електроприводі). Значні втрати реактивної потужності є в ЛЕП, однак зарядна потужність ліній частково компенсує ці втрати, а іноді, при недовантаженні ліній, ЛЕП стають джерелами реактивної потужності. Так, в середньому на 100 км ЛЕП 110 кВ генерується 3,5 МВАр, для ЛЕП 220 кВ – 14 МВАр, а для ЛЕП 500 кВ – 90 МВАр. Для двоколових ліній ці значення подвоюються [9].

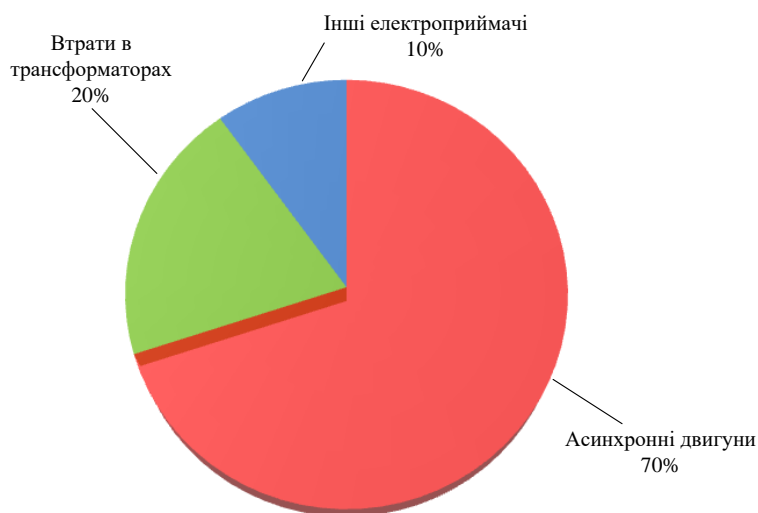


Рис. 1.1. Кругова діаграма розподілу споживання реактивної потужності між електроприймачами

Слід відзначити, що одним з найпотужніших споживачів реактивної потужності є підприємства чорної металургії. Номенклатура електроприймачів, встановлених в цехах металургійних підприємств, дуже різноманітна як за їх технологічним призначенням, так і за їх встановленою потужністю і режимами енергоспоживання. Великі електротехнічні комплекси чорної металургії характеризуються значною кількістю нелінійного навантаження з різкозмінним характером. Їх сумарна встановлена потужність в масштабах окремого підприємства досить значна і складає не менше половини всієї споживаної потужності.

До теперішнього часу на механізмах прокатного виробництва продовжують широко використовуватися регульовані електроприводи на основі електричних двигунів постійного струму, що живляться від первинної мережі змінного струму через керовані випрямлячі з фазовим регулюванням випрямленої напруги. Такі електроприводи в процесі регулювання їх швидкості, крім активної потужності, споживають з мережі реактивну потужність, що змінюється в широких межах.

Найбільш потужні електроприймачі металургійного виробництва – це електродугові печі, номінальна потужність яких може досягати 100 МВА.

Цикл плавки металу в таких печах передбачає наявність декількох технологічних стадій, на яких споживана з мережі активна і реактивна потужності різні. Загальна тривалість циклу плавки становить приблизно 270 хвилин. Зміни активних і реактивних навантажень печі відбуваються приблизно кожні 15...20 хвилин. Реактивні навантаження в процесі циклу плавки можуть досягати приблизно 55% від повних навантажень [10].

Наявність реактивної потужності у електричній мережі призводить до ряду наслідків [11-18]:

- зменшення пропускної здатності ліній за рахунок зростання реактивної складової струму, що призводить до необхідності збільшення перерізів проводів і кабелів. Іншим наслідком зниження пропускної здатності ліній є обмеження по підключенню нових електроприймачів та виводу обладнання у ремонт;
- зміна напруги на шинах навантажень і підстанцій розподільних мереж;
- зростання втрат потужності у всіх елементах системи електропостачання. В якості приклада на рис. 1.2 представлений загальний вигляд залежності величини втрат потужності у повітряних лініях та середньоквадратичного значення струму навантаження від величини реактивної потужності.

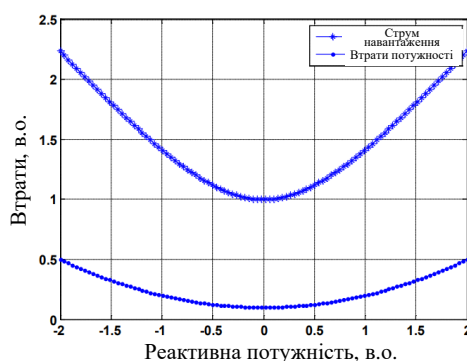


Рис. 1.2. Загальний вигляд залежності втрат потужності у повітряних лініях та середньоквадратичного значення струму навантаження від величини реактивної потужності [16]

Слід зазначити, що втрати потужності мають прямо пропорційну залежність від квадрату струму;

- зростання втрат напруги в трансформаторах і лініях;
- необхідність використання обладнання більшої номінальної потужності: реактивна потужність в лініях безпосередньо впливає на номінальну потужність встановленого обладнання і, отже, безпосередньо впливає на його розмір і вартість;
- зниження коефіцієнту потужності навантаження, за величиною якого можна судити, яка частина споживаної енергії корисно використовується для здійснення роботи (загальний вигляд залежності наведений на рис. 1.3);

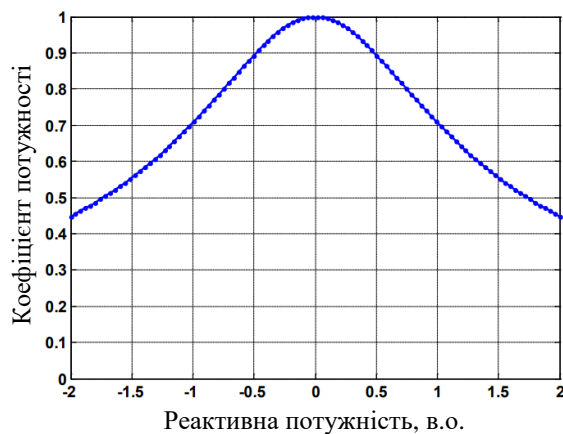


Рис. 1.3. Загальний вигляд залежності коефіцієнта потужності навантаження від величини реактивної потужності [16]

- зниження ККД трансформаторів, генераторів;
- зниження запасу статичної стійкості навантаження по напрузі;
- скорочення терміну служби обладнання;
- збільшення плати за споживану електроенергію.

Основні наслідки перевантаження електричної мережі реактивними складовими струмів зведені у діаграму, представлену на рис. 1.4 [11].



Рис. 1.4. Наслідки підвищеного споживання реактивної потужності

Для розрахунку реактивної потужності в умовах синусоїдних режимів використовуються традиційні широко відомі алгоритми. Але в сучасних електричних мережах постійно зростає кількість навантажень, що мають нелінійні вольт-амперні характеристики. В таких умовах використовувати відомі підходи до розрахунку параметрів мереж для синусоїдних режимів некоректно, тому необхідно спиратися на алгоритми і стандарти, що регламентують роботу електричних мереж в умовах несинусоїдності.



## 1.1 Визначення поняття реактивної потужності при несинусоїдних режимах

У загальному випадку для періодичних сигналів активна потужність визначається в такий спосіб [19]:

$$p(t) = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot u(t) dt, \quad (1.1)$$

де  $T$  – період,  $i(t)$  – миттєве значення струму,  $u(t)$  – миттєве значення напруги.

Якщо струм і напруга є періодичними функціями, період яких збігається, вони можуть бути представлені у вигляді ряду Фур'є, і в цьому випадку активна потужність дорівнює:

$$P = \sum_n U_n I_n \cos \phi_n, \quad (1.2)$$

де  $n$  – номер гармоніки, яка присутня в спектрі і струму, і напруги,  $U_n$  – середньоквадратичне значення напруги  $n$ -ної гармоніки,  $I_n$  – середньоквадратичне значення струму  $n$ -ної гармоніки,  $\phi_n$  – зсув фази між струмом і напругою  $n$ -ої гармоніки.

Якщо в спектрі напруги і струму присутня тільки перша гармоніка, вираз (1.2) приймає відомий вид:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \phi, \quad (1.3)$$

де  $U$  – середньоквадратичне значення напруги,  $I$  – середньоквадратичне значення струму.

Для синусоїдних струмів і напруг реактивна потужність (РП) визначається як:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \phi = \sqrt{S^2 - P^2} . \quad (1.4)$$

Повна потужність може бути визначена як:

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} . \quad (1.5)$$

При синусоїдних режимах реактивна потужність має наступні характеристики [20]:

- 1) реактивна потужність еквівалентна амплітуді пульсацій (peak-to-peak) миттєвої потужності в точці мережі;
- 2) реактивна потужність пропорційна різниці електричної енергії, що запасена в індуктивних елементах, і електричної енергії, що запасена в ємнісних елементах;
- 3) якщо реактивна потужність компенсується до нуля, коефіцієнт потужності дорівнює одиниці;
- 4) реактивна потужність може бути знайдена з трикутника потужностей  $S^2 = \sqrt{P^2 + Q^2}$  ;
- 5) сума всієї реактивної потужності у вузлі електричної мережі дорівнює нулю;
- 6) реактивна потужність визначається параметрами  $U, I, \phi$  ;
- 7) реактивна потужність приймається позитивною або негативною, в залежності від характеру навантаження: індуктивного або ємнісного;
- 8) реактивна потужність може бути скомпенсована до нуля індуктивними або ємнісними елементами;
- 9) падіння напруги в лініях електропередачі пропорційно реактивній потужності.

При несинусоїдних режимах, якщо струм і напруга є періодичними функціями, період яких збігається, повна потужність може бути знайдена як:

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_n U_n^2 \sum_n I_n^2}, \quad (1.6)$$

де  $n$  – номер гармоніки, яка присутня в спектрі і струму, і напруги,  $U_n$  – середньоквадратичне значення напруги  $n$ -ної гармоніки,  $I_n$  – середньоквадратичне значення струму  $n$ -ної гармоніки.

Для визначення реактивної потужності при несинусоїдних режимах на сьогоднішній день використовують кілька теорій. Найбільш відомими є: визначення по С. Budeanu [21]; визначення по S. Fryze [22]; визначення по N. L. Kusters і W. J. M. Moore [23]; визначення по W. Shepherd і P. Zakikhani [24]; визначення по D. Sharon [25]; визначення по L. S. Czarnecki [26, 27]; рішення робочої групи IEEE по гармонікам [28].

Для подальшого розгляду був прийнятий стандарт IEEE Standard 1459 (2000, 2010), бо саме він дає визначення для показників якості електричної енергії та потужності, які використовуються в приладах контролю і обліку.

Згідно зі стандартом [29] миттєва потужність визначається як:

$$p(t) = i(t) \cdot u(t) = p_a(t) + p_q(t), \quad (1.7)$$

де  $p_a(t) = U_0 \cdot I_0 + \sum_h U_h \cdot I_h \cdot \cos \phi_h \cdot (1 - \cos(2 \cdot h \cdot \omega \cdot t - 2 \cdot \alpha_h))$  – миттєва

активна потужність;

$$p_q(t) = - \sum_h U_h \cdot I_h \cdot \sin \phi_h \cdot \sin(2 \cdot h \cdot \omega \cdot t - 2 \cdot \alpha_h) + 2 \sum_n \sum_{\substack{m \\ m \neq n}} 2 U_m \cdot I_n \cdot \sin(m \cdot \omega \cdot t - \alpha_m) \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t - \beta_n) + \sqrt{2} \cdot U_0 \cdot \sum_h I_h \cdot \sin(h \omega t - \beta_h) + \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot \sum_h U_h \cdot \sin(h \omega t - \alpha_h) - \text{миттєва}$$

реактивна потужність;  $U_0$  – постійна складова напруги;  $I_0$  – постійна складова струму;  $U_h$  – напруга на частоті, що не дорівнює частоті першої гармоніки;  $I_h$  – струм на частоті, що не дорівнює частоті першої гармоніки;  $\phi_h = \beta_h - \alpha_h$  – зсув фаз між фазами напруги  $U_h$  та струму  $I_h$ .

Середнє значення миттєвої активної потужності знаходиться аналогічно (1.1):

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_T i(t) \cdot u(t) dt = P_1 + P_H = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1 + U_0 \cdot I_0 + \sum_{h>1} U_h \cdot I_h \cdot \cos \phi_h, \quad (1.8)$$

де  $U_1$  – середньоквадратичне значення напруги на частоті першої гармоніки,  $I_1$  – середньоквадратичне значення струму на частоті першої гармоніки.

Середнє значення реактивної потужності на частоті першої гармоніки знаходиться за виразом:

$$Q_1 = \frac{\omega}{T} \cdot \int_T i_1(t) \cdot \left( \int u_1(t) dt \right) dt = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \phi_1. \quad (1.9)$$

Повна потужність дорівнює:

$$S = \sqrt{(U_1 \cdot I_1)^2 + (U_H \cdot I_1)^2 + (U_1 \cdot I_H)^2 + (U_H \cdot I_H)^2}, \quad (1.10)$$

де  $U_H = \sqrt{\sum_{h \neq 1} U_h^2}$  – сума середньоквадратичних значень напруг на частотах, що не дорівнюють частоті першої гармоніки,  $I_H = \sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2}$  – сума середньоквадратичних значень струмів на частотах, що не дорівнюють частоті першої гармоніки.

Вираз (1.10) представляють в такий спосіб:

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_N^2}, \quad (1.11)$$

де  $S_1$  – т.зв. «фундаментальна» повна потужність,  $S_N$  – т.зв. «нефундаментальна» повна потужність.

«Нефундаментальна» повна потужність включає три складові:

$$S_N = \sqrt{D_I^2 + D_U^2 + D_H^2}, \quad (1.12)$$

де  $D_I = U_1 \cdot I_H$  – потужність спотворень струму,  $D_U = U_H \cdot I_1$  – потужність спотворень напруги,  $D_H = U_H \cdot I_H$  – потужність гармонійних спотворень.

При розрахунках несинусоїдних режимів приймають, що реактивна потужність передається тільки на першій гармоніці, а все, що передається на вищих гармоніках, вважається потужністю спотворень.

Стандартом IEEE 1459-2010 визначено поняття неактивної потужності  $N$ , яка розраховується як:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (1.13)$$

На рис. 1.5 представлена векторна діаграма активних, реактивних і повних потужностей.

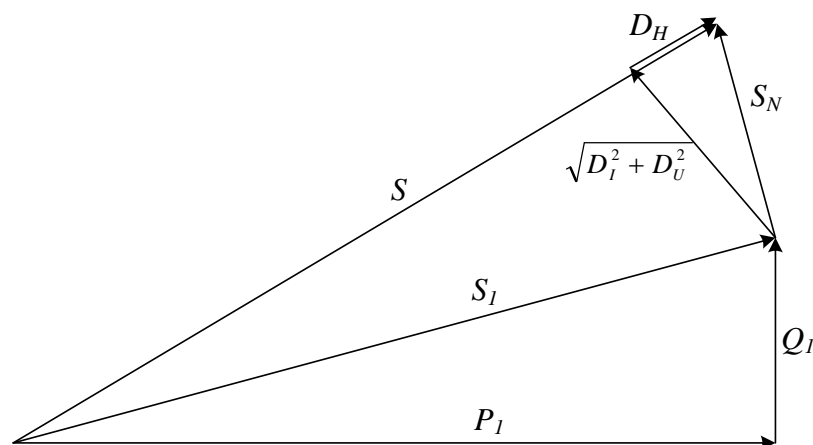


Рис. 1.5. Векторна діаграма потужностей

Крім традиційного трикутника потужностей, що враховує потужності, які передаються тільки по першій гармоніці  $S_1$ ,  $P_1$  та  $Q_1$ , побудований трикутник, що враховує потужності спотворень.

Коефіцієнт потужності визначається як:

$$PF = \frac{P}{S}. \quad (1.14)$$

Вводиться поняття «фундаментального» коефіцієнта потужності:

$$PF_1 = \frac{P_1}{S_1}. \quad (1.15)$$

Одним з недоліків стандарту є те, що він прямо не вказує, що нульова потужність являє собою неактивну потужність, однак це впливає з виразів (1.7), (1.13) непрямым методом [29].

## **1.2 Обґрунтування необхідності впровадження компенсації реактивної потужності**

Для забезпечення оптимального режиму роботи електричної мережі впроваджують компенсацію реактивної потужності (КРП), під якою розуміють цілеспрямований вплив на баланс реактивної потужності у вузлі електроенергетичної системи з метою регулювання напруги, а в розподільних мережах і з метою зниження втрат електроенергії. КРП здійснюється з використанням компенсуючих пристроїв. Для підтримки необхідних рівнів напруги в вузлах електричної мережі споживання реактивної потужності має забезпечуватися необхідною генерованою потужністю з урахуванням необхідного резерву. Генерована реактивна потужність складається з реактивної потужності, що виробляється генераторами електростанцій, і реактивної потужності компенсуючих пристроїв, розміщених в електричній мережі і в електроустановках споживачів електричної енергії.

Компенсація реактивної потужності особливо актуальна для промислових підприємств, основними електроприймачами яких є асинхронні двигуни, в результаті чого коефіцієнт потужності без вжиття заходів щодо компенсації становить 0,7-0,75. Тиристорні перетворювачі головних електроприводів працюють в глибоко зарегульованому режимі з низьким коефіцієнтом потужності ( $\cos\varphi \sim 0,3-0,4$ ). Це означає, що реактивна потужність, споживана перетворювачем на основній частоті, в 2-3 рази (і більше) перевищує активне навантаження [30].

Крім того, зі збільшенням протяжності електричних мереж і встановленої потужності приймачів істотно зросли втрати електроенергії при її транспортуванні. Значна частина цих втрат викликана перетіканнями реактивної потужності, що свідчить про низький ступінь її компенсації в місці споживання. Існуючі показники вітчизняних підприємств, 0,10-0,15 кВАр на один кВт встановленої потужності електростанцій [31], значно поступаються аналогічним показникам в промислово розвинених країнах, де ступінь компенсації перевищує 0,6 кВАр/кВт, а в окремих енергосистемах досягає 1 кВАр/кВт [30].

Компенсувати реактивну потужність необхідно на підприємствах, які використовують такі електроустановки [30]:

- 1) асинхронні двигуни – коефіцієнт потужності дорівнює 0,75;
- 2) асинхронні двигуни, завантажені на неповне навантаження – коефіцієнт потужності дорівнює 0,4;
- 3) трансформатори зварювальні – коефіцієнт потужності дорівнює 0,4;
- 4) компресори – коефіцієнт потужності дорівнює 0,7;
- 5) печі електродугові – коефіцієнт потужності дорівнює 0,6;
- 6) різні верстати – коефіцієнт потужності дорівнює 0,5;
- 7) випрямні електролізні установки – коефіцієнт потужності дорівнює 0,5;
- 8) водяні насоси – коефіцієнт потужності дорівнює 0,75.

Заходи по компенсації реактивної потужності на підприємстві дозволяють [30]:

- зменшити навантаження на трансформатори, збільшити термін їх служби;
- зменшити навантаження на дроти, кабелі, використовувати їх менший перетин;
- поліпшити якість електроенергії у електроприймачів (за рахунок зменшення спотворення форми напруги);
- зменшити навантаження на комутаційну апаратуру за рахунок зниження струмів в колах;
- уникнути штрафів за зниження якості електроенергії зниженим коефіцієнтом потужності;
- знизити витрати на електроенергію.

### 1.3 Методи та пристрої компенсації реактивної потужності

Пристрої компенсації реактивної потужності (ПКРП) можуть бути поздовжнього або поперечного типу [5-9, 32]. Пристрої поздовжньої компенсації встановлюються в розрив кола і змінюють реактивний опір мережі (рис. 1.6).

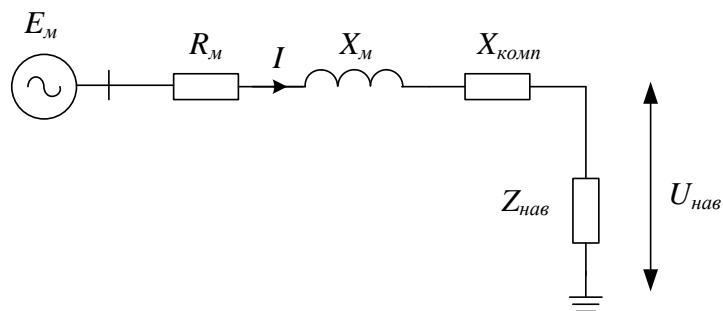


Рис. 1.6. Принципова схема включення пристрою поздовжньої компенсації



У разі, коли  $X_{\text{комп}}$  носить ємнісний характер, сумарний реактивний опір зменшується, як наслідок, зменшується падіння напруги і знижується величина реактивної потужності, що забирається з мережі. Таким чином, крім компенсації реактивної потужності можна виконувати регулювання напруги у точці підключення навантаження. Опис принципу поздовжньої компенсації проілюстрований за допомогою векторної діаграми роботи кола (рис. 1.7).

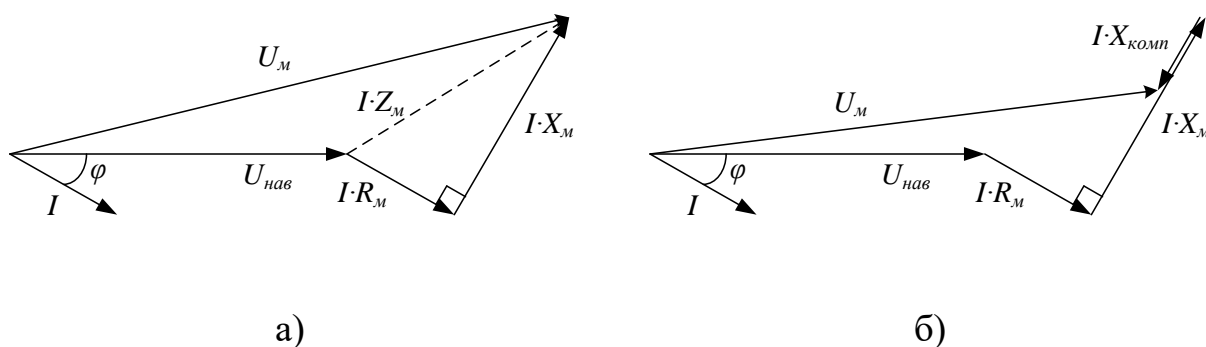


Рис. 1.7. Векторна діаграма: а) до підключення пристрою поздовжньої компенсації, б) після підключення пристрою поздовжньої компенсації

Однак використання пристроїв поздовжньої компенсації має ряд недоліків: необхідність установки ПКРП в розрив кола, встановлення додаткового обладнання для захисту компенсуючих пристроїв від струмів короткого замикання, з'являється можливість виникнення в електричній системі резонансних явищ – самозбудження, саморозгойдування і т.д. [13].

Пристрої для поперечної компенсації встановлюються паралельно навантаженню і змінюють його еквівалентний опір (рис. 1.8).

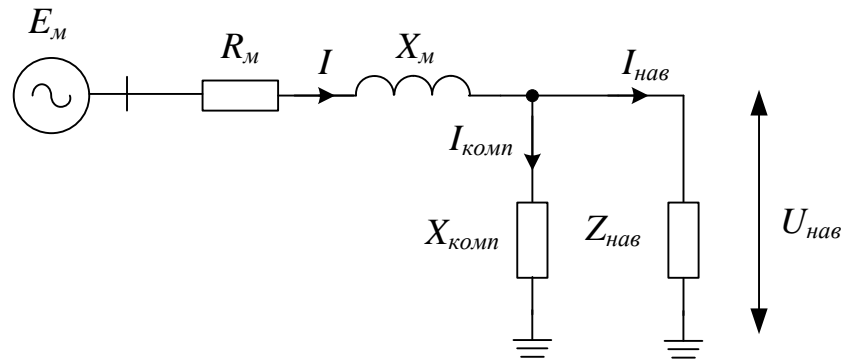


Рис. 1.8. Принципова схема включення пристрою поперечної компенсації

Принцип поперечної компенсації представлений за допомогою векторної діаграми (рис. 1.9).

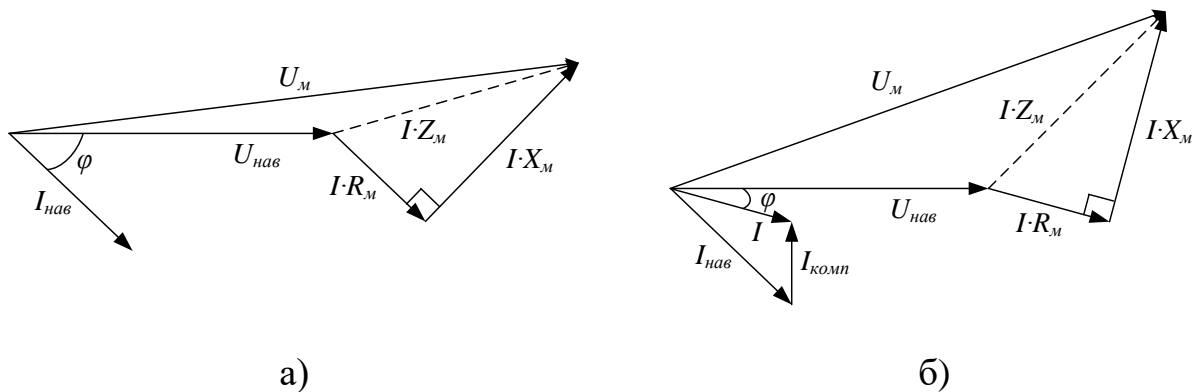


Рис. 1.9. Векторна діаграма: а) до підключення пристрою поперечної компенсації, б) після підключення пристрою поперечної компенсації

Так як за своєю природою реактивна потужність є енергією обміну, використання пристроїв поперечної компенсації дозволяє здійснювати цей обмін між ПКРП і навантаженням, таким чином, мережа не приймає участі в цьому процесі (рис. 1.10).

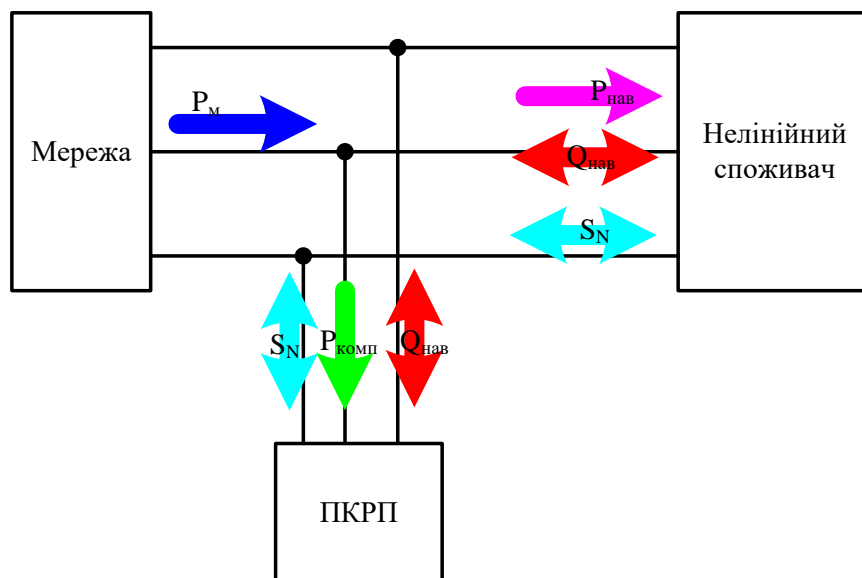


Рис. 1.10. Ілюстрація розподілу потоків активної, реактивної потужності і потужності спотворень

Як наслідок, зменшується струм мережі, падіння напруги і втрати потужності на опорах мережі, збільшується коефіцієнт потужності [13]. Зазначені переваги зумовили те, що переважна більшість ПКРП виконуються саме поперечного типу.

На рис. 1.11 представлена класифікація пристроїв компенсації реактивної потужності [3-6, 14-15].



Рис. 1.11. Класифікація пристроїв компенсації реактивної потужності

У даній роботі не розглядаються синхронні компенсатори, які представляють собою синхронний двигун полегшеної конструкції, призначений для роботи на холостому ході [33]. Цей метод компенсації широко використовувався раніше, але він вимагає достатньо великої кількості допоміжного обладнання, має низьку швидкість реагування на зміни навантаження та відрізняється більшими втратами активної потужності, ніж інші пристрої компенсації [34]. Тому останні десятиліття отримали розвиток компенсатори з використанням технологій силової електроніки [35].

Розглянемо докладніше пристрої для компенсації реактивної потужності.

### 1.3.1 Батареї конденсаторів

Батареї конденсаторів (БК) є традиційними пристроями для компенсації реактивної потужності. БК виконуються або фіксованої ємності, або з механічним перемиканням.

Для розрахунку реактивної потужності БК використовується наступний вираз [19]:

$$Q_c = \frac{U_c^2}{X_c} = U_c^2 \cdot \omega \cdot C, \quad (1.16)$$

де  $U_c$  – напруга, що прикладена до БК, В;  $\omega$  – кругова частота,  $\text{с}^{-1}$ ;  $C$  – ємність БК, мкФ.

Використання БК фіксованої ємності доцільно тільки в умовах навантажень з відносно незмінним графіком споживаної реактивної потужності. Наприклад, асинхронні електроприводи насосних агрегатів, які не потребують широкого діапазону регулювання продуктивності насосів. При змінній потужності приймача зміна величини навантаження викликає зміну реактивної потужності [36]. Таким чином, використання БК з незмінною встановленою ємністю може призвести до режимів недо- або перекомпенсації.

Зміну ємності батареї конденсаторів можна здійснювати за допомогою механічних комутаторів. Однак перемикання за допомогою контакторів не дозволяє домогтися плавності регулювання величини реактивної потужності і не має потрібної швидкодії і високої надійності. Крім того перехідні процеси, що виникають в момент перемикання, характеризуються підвищеними значеннями струмів, що призводить до виникнення перенапруг на БК, перегріву і, як наслідок, скорочення терміну служби пристрою [37-39].

### 1.3.2 Тиристорні компенсатори

Домогтися плавності регулювання можна шляхом використання тиристорно-керованих компенсаторів. До їх складу входять реактивні елементи і тиристори, за допомогою яких здійснюється керування величиною реактивної потужності. До зазначених пристроїв відносяться конденсатори з

тиристорним перемиканням (КТП) і реактори з тиристорним керуванням (РТК).

### 1.3.2.1 Конденсатори з тиристорним перемиканням

Пристрій КТП складається з конденсатора з тиристорним перемиканням і дроселя, який служить для обмеження швидкості зростання струму, що протікає через тиристори, і / або «розлаштування» БК для запобігання резонансів (рис. 1.12) [40].

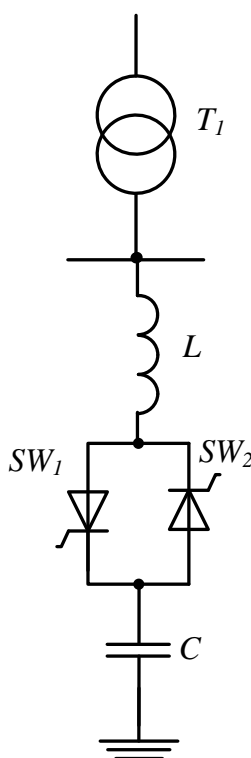


Рис. 1.12. Конфігурація схеми на базі пристрою КТП

Для забезпечення «м'якого» включення тиристорів перемикання проводиться в момент рівності напруги мережі і напруги на конденсаторі [36].

Пристрої на базі КТП характеризуються можливістю регулювання кроку перемикання, високою швидкістю і відсутністю генерації вищих гармонік в мережу, але при цьому процес компенсації не є безперервним.

Варто зазначити, що в реальних умовах роботи батареї конденсаторів часто працюють в умовах несинусоїдності мережі, в режимах резонансів з мережею та навантаженнями, що призводить до перенапруг на БК. Наприклад, при підключенні батареї конденсаторів до шин підстанції, що живлять дугові печі, при будь-якому значенні ємності батареї завжди знайдуться гармоніки з тим спектром частот, при яких утворюються резонансні контури струму (або близькі до нього) між ємністю батареї конденсаторів і індуктивністю мережі. Крім того, зміна навантажень, схеми комутації мережі, потужності короткого замикання мережі енергосистеми, які не завжди можна врахувати при проектуванні, також можуть привести до виникнення резонансних або близьких до них умов на частоті однієї з гармонік. Тому роботу батарей конденсаторів в мережах з можливістю виникнення несинусоїдної напруги необхідно розглядати з позицій взаємного впливу вищих гармонік мережі живлення і батареї конденсаторів. Так як зі збільшенням номера гармоніки ємнісний опір батареї конденсаторів зменшується, то це призводить до протікання через БК значних струмів гармонік, що резонують. Ці струми співмірні, а іноді і значно перевершують струм першої гармоніки. Перевантаження по струму на конденсаторах допускаються до 30% від їх номінальних значень, а на практиці за рахунок появи резонансних явищ перевантаження по струму можуть досягати 400-500% від струму першої гармоніки [41].

На рис. 1.13 представлені форми струму, що протікають через БК, при різко-змінних реактивних навантаженнях, що живляться струмами несинусоїдної форми. Форма кривої прикладеної напруги наведена на рис. 1.13. У якості приймача прийнятий частотний привод потужністю 20 кВт, у момент часу 0,06 сек. відбувається підключення активно-індуктивного несиметричного навантаження.

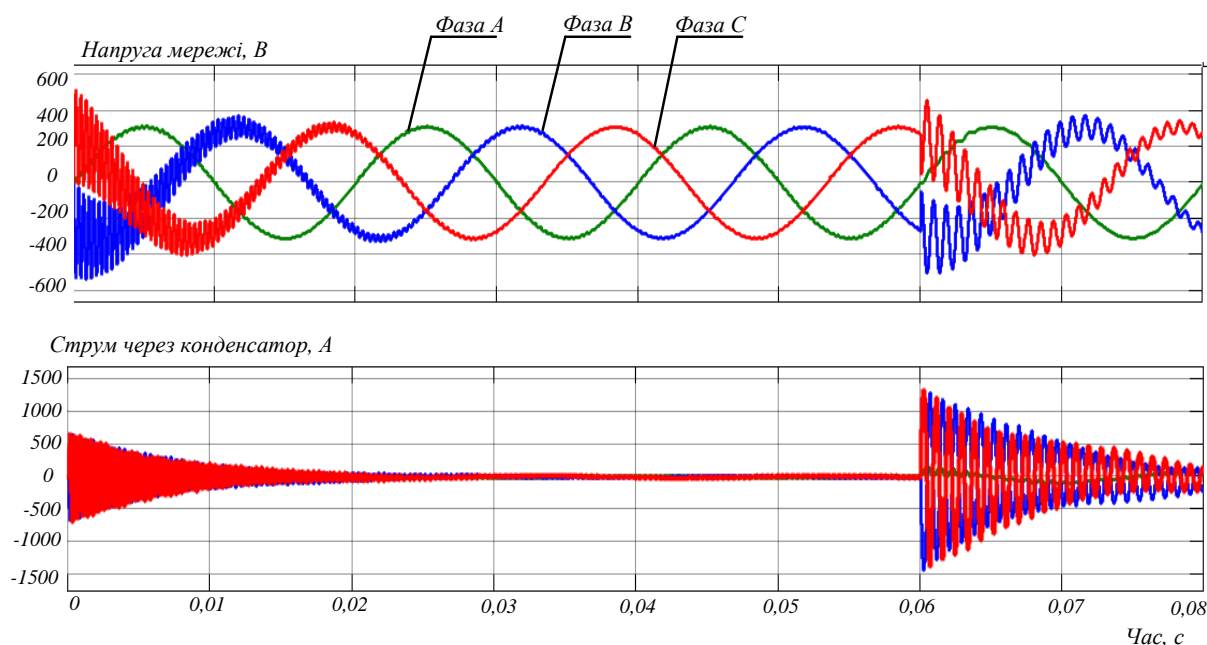


Рис. 1.13. Напруга та струм через БК в умовах несинусоїдності напруги живлення

На рис. 1.14 представлені форми струму, що протікають через БК ємністю 25 мкФ, при різко-змінних реактивних навантаженнях, що живляться несинусоїдними струмами [42]. Форма кривої напруги на БК також наведена на рис. 1.14. Рівень перенапруги складає близько 30% від номінальної напруги, при цьому амплітудне значення струму досягає 270% від струму, що протікає у разі синусоїдного режиму роботи.



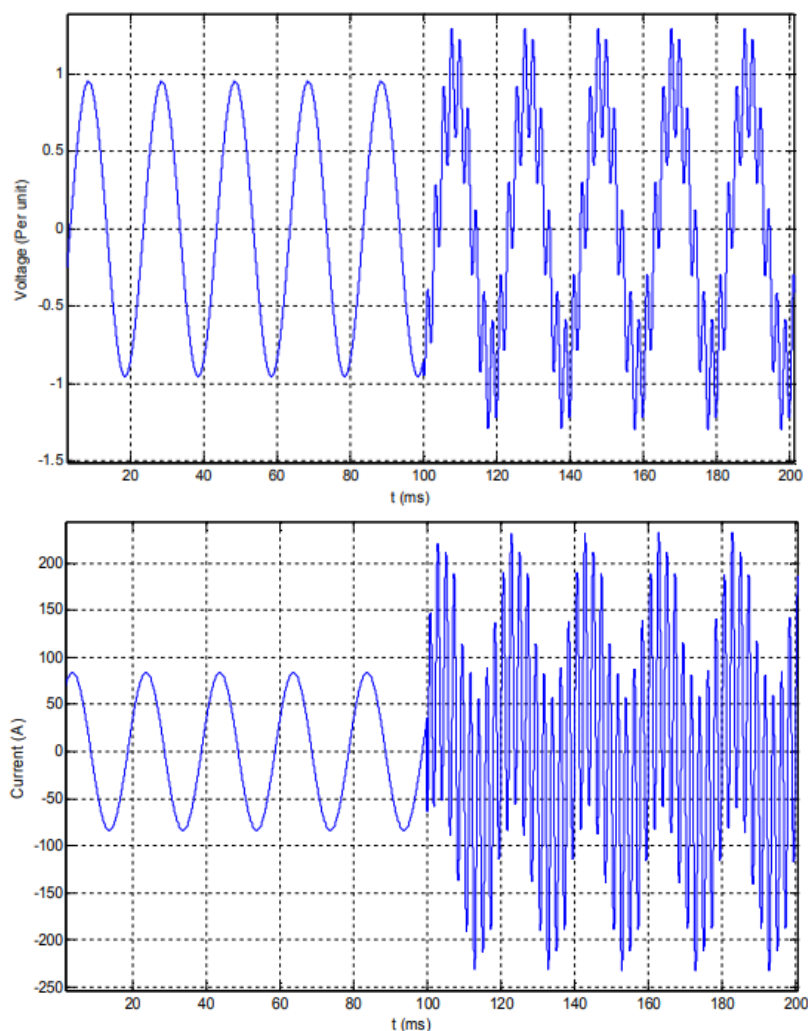


Рис. 1.14. Напруга та струм через БК в умовах несинусоїдності [42]

Одним з методів зниження цього впливу є використання «розлаштованих» батарей конденсаторів [43]. Послідовно з конденсатором підключається реактор. При цьому величина індуктивності реактора підбирається таким чином, щоб частота паралельного резонансу між конденсатором і реактором і мережею не дорівнювала частоті будь-якої з гармонік, присутніх в мережі. Однак в такій системі підвищується напруга на реакторі і доводиться використовувати конденсатори з великою номінальною напругою. Крім того, необхідно знати параметри мережі.

Недоліками КТП є: чутливість до струмів вищих гармонік; розширення діапазону регулювання призводить до появи вищих гармонік у спектрі струму та збільшення одиничної потужності джерела реактивної потужності,

що може призвести до виникнення резонансних явищ; наявність вищих гармонік у спектрі струму призводить до необхідності встановлення додаткових фільтрів, що супроводжується додатковими матеріальними затратами і зростанням втрат активної потужності в джерелах реактивної потужності [34].

### 1.3.2.2 Реактори з тиристорним керуванням

До складу пристрою РТК входять конденсатор фіксованої ємності і реактор з тиристорним керуванням (рис. 1.15) [44].

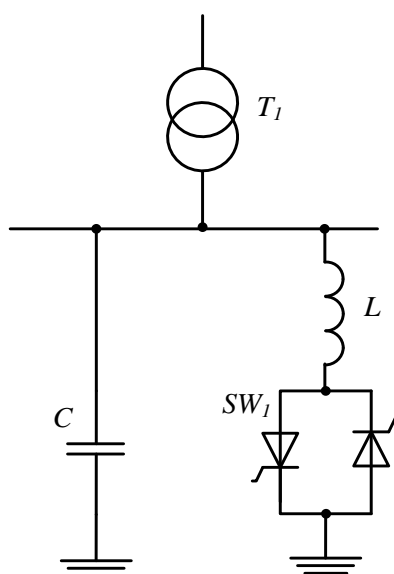


Рис. 1.15. Конфігурація схеми на базі РТК

Зміною кута відкриття тиристора можна регулювати струм, що протікає через дросель, що еквівалентно зміні індуктивності. Такі ПКРП дозволяють домогтися безперервності процесу керування, мають високу швидкодію і характеризуються практично повною відсутністю перехідних процесів, однак використання реактора значно погіршує масо-габаритні показники і економічну ефективність пристрою. Крім того без установки додаткових фільтрокомпенсуючих пристроїв відбувається генерація струмів вищих гармонік до мережі [45-47]. На рис. 1.16 зображена крива струму, що

протікає в реакторі при куті керування  $120^\circ$ . Коефіцієнт гармонік  $\text{THD}_I$  струму реактора дорівнює 38% [48].

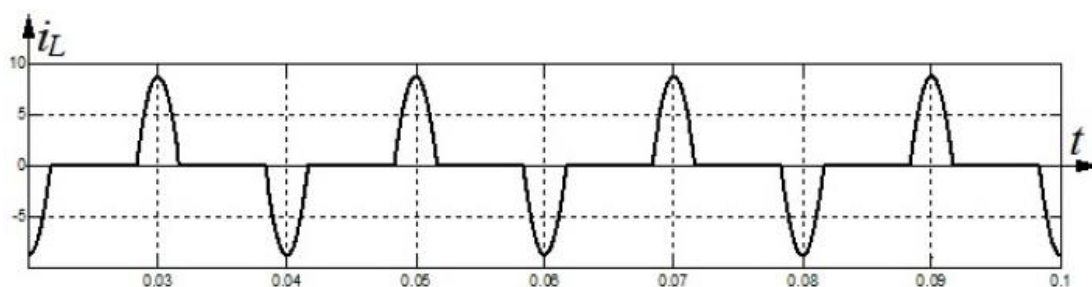


Рис. 1.16. Струм через реактор в пристрої РТК при куті керування  $120^\circ$

Серед інших недоліків слід зазначити, що так як реактор підключений безпосередньо на напругу мережі, при її зниженні потужність установки буде падати, а від джерела потужності потрібно збільшення реактивної потужності для того, щоб стабілізувати напругу [34].

### 1.3.2.3 Спільне використання конденсатора з тиристорним перемиканням та реактора з тиристорним керуванням

Шляхом спільного використання КТП і РТК (рис. 1.17) можна домогтися плавного регулювання реактивної потужності, відсутності перехідних процесів, низького рівня генерації гармонійних складових [49].

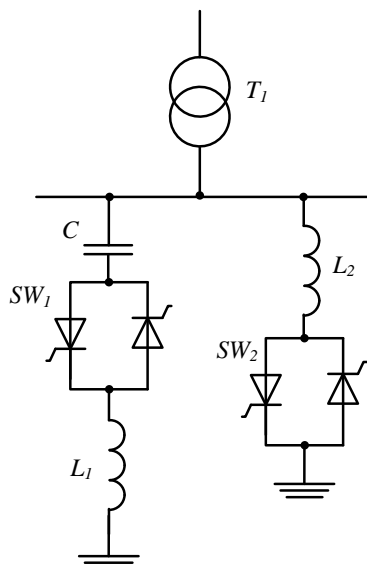


Рис. 1.17. Конфігурація схеми при спільному використанні КТП і РТК

Шляхом координації керування між реактором і БК зі ступінчастим перемиканням досягається безперервність керування. Однак основним недоліком комбінованого використання тиристорно-керованих пристроїв є висока вартість отриманої схеми і погіршення масо-габаритних показників за рахунок установки реактора.

Істотним недоліком використання БК як постійної, так і змінної ємності, є те, що вони схильні до впливу вищих гармонік. Поява вищих гармонійних складових призводить до перенапруги на конденсаторах, а перевищення допустимого струмового перевантаження (в середньому становить 130% від номінального струму) призводить до перегріву батарей. Це негативно позначається на термінах служби пристроїв [38, 50-52], показниках якості електроенергії та параметрах роботи інших споживачів. Крім того, при установці БК з'являється ймовірність виникнення резонансу з індуктивною складовою опору мережі.

### **1.3.3 Компенсатори з самокомутацією**

#### **1.3.3.1 Статичні компенсатори реактивної потужності**

Статичні компенсатори реактивної потужності (СТАТКОМ) встановлюється паралельно навантаженню і являють собою регульоване джерело струму [53].

Схема СТАТКОМа виконується на базі автономного інвертора струму (АІС) або інвертора напруги (АІН) з ланкою постійного струму (ЛПС) і фільтром модуляційних складових вихідного струму інвертора (інтерфейсного фільтра, ІФ).

На рис. 1.19 представлена схема СТАТКОМа, виконаного на базі інвертора струму.

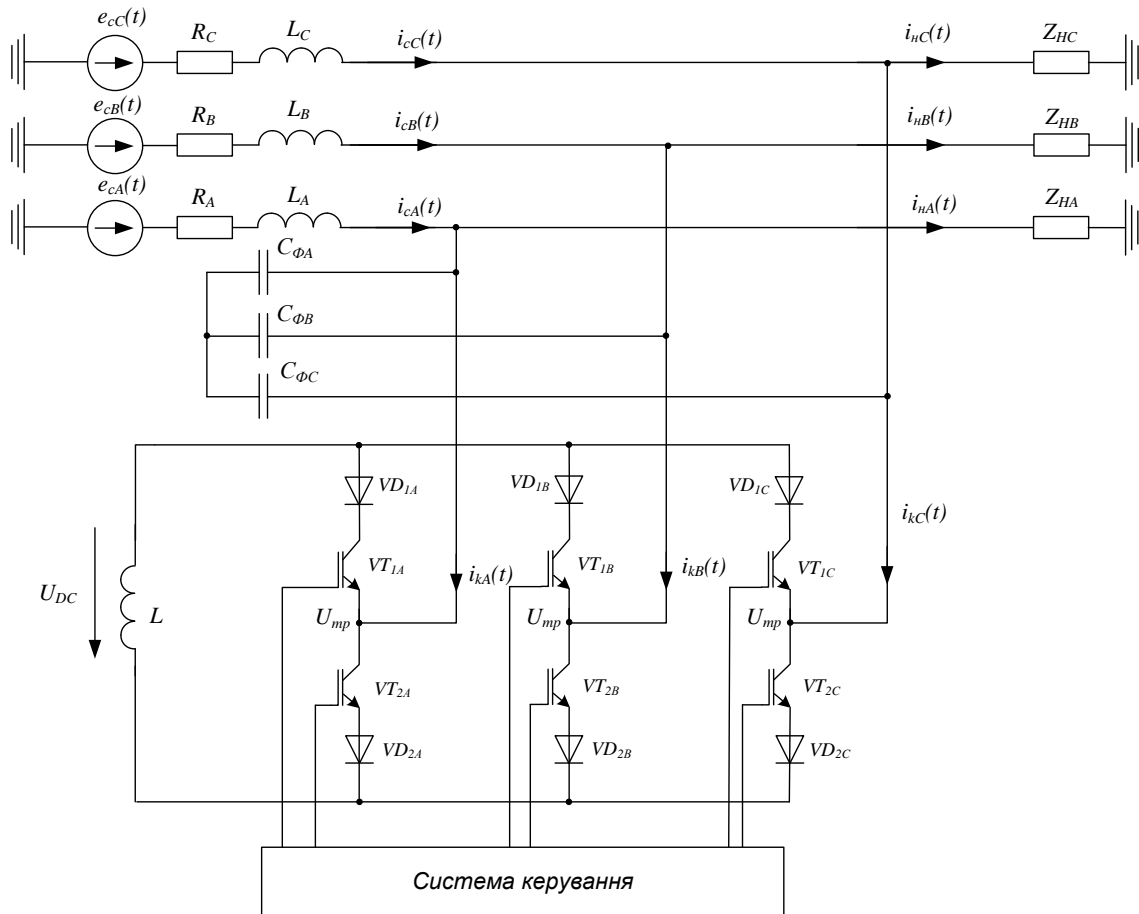


Рис. 1.19. Схема СТАТКОМа на базі автономного інвертора струму

У ланці постійного струму інвертора встановлений накопичувальний дросель  $L$ , а для фільтрації модуляційних складових вихідного струму інвертора – трифазний ємнісний фільтр  $C_{\Phi}$  [54]. Формування заданої форми реактивного струму з необхідною фазою, амплітудою і частотою здійснюється шляхом керування перемиканням транзисторних ключів  $VT_{1A,1B,1C} - VT_{2A,2B,2C}$ .

Основний недолік представленої схеми – великі габарити накопичувального дроселя, що зумовило обмежене використання статичних компенсаторів на базі інвертора струму.

На рис. 1.20 представлена схема СТАТКОМа на базі автономного інвертора напруги.

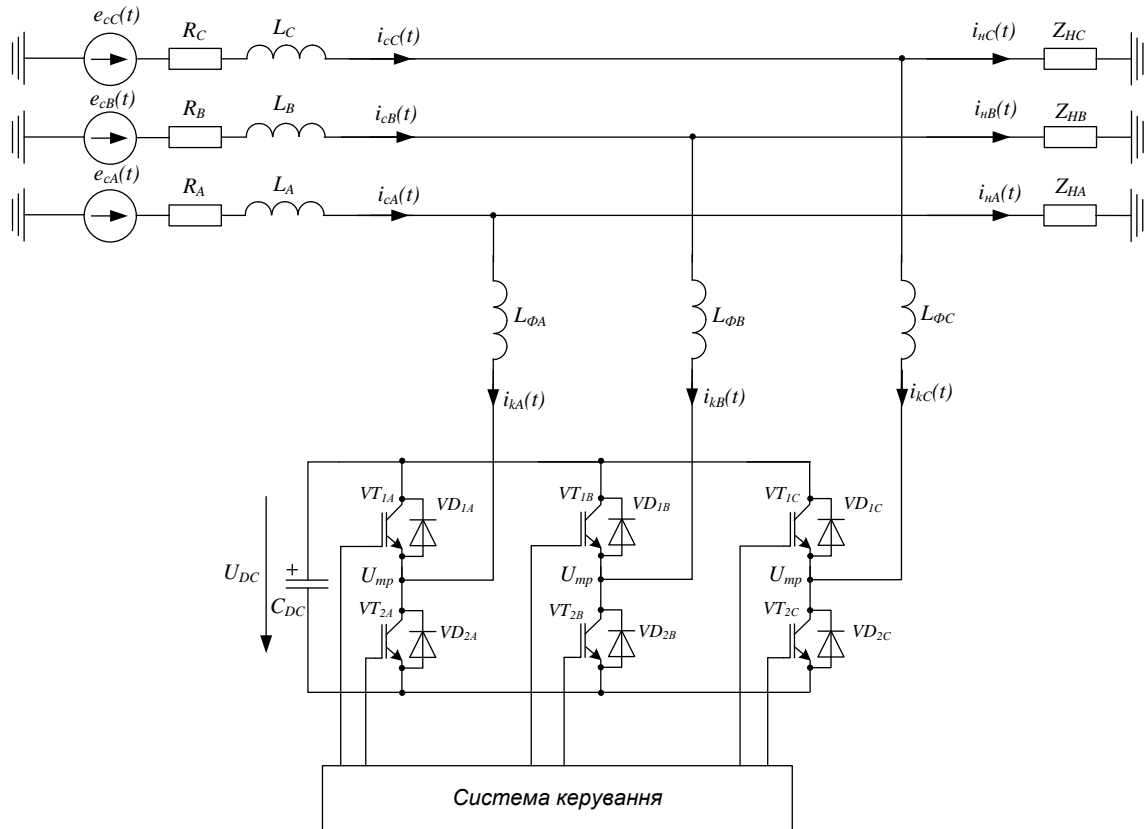


Рис. 1.20. Схема СТАТКОМа на базі автономного інвертора напруги

В цьому випадку інтерфейсний фільтр представлений індуктивністю  $L_{\phi}$ , а в ланці постійного струму встановлений накопичувальний конденсатор  $C_{DC}$ .

Принцип дії пристроїв типу СТАТКОМ заснований на можливості генерувати реактивну потужність як ємнісного, так і індуктивного характеру, що досягається шляхом керування фазою струму, що генерується інвертором. Якщо вихідний струм інвертора відстає на  $90^\circ$  від напруги живлення, отже, СТАТКОМ діє як індуктивність і споживає РП. У разі, коли струм випереджає напругу на  $90^\circ$ , СТАТКОМ діє як конденсатор і генерує РП в енергосистему [55].

При установці СТАТКОМа в чотирипровідних системах можливе або підключення нульового проводу в нульову точку конденсаторів в ланці постійного струму, або додається ще одне «плече» з транзисторними ключами.

Вибір підходу до розробки системи керування СТАТКОМом залежить від того, який саме параметр приймається в якості контрольованої величини. Найбільш прості варіанти системи керування, що вимагають мінімальної кількості вимірювальних пристроїв, засновані на вимірі або струму мережі, або струму навантаження [56].

Для роботи системи керування з контролем струму навантаження необхідні вимірювання величини струму навантаження, напруги джерела і напруги на накопичувальному конденсаторі в ланці постійного струму інвертора. Спрощена структурна схема наведена на рис. 1.21.

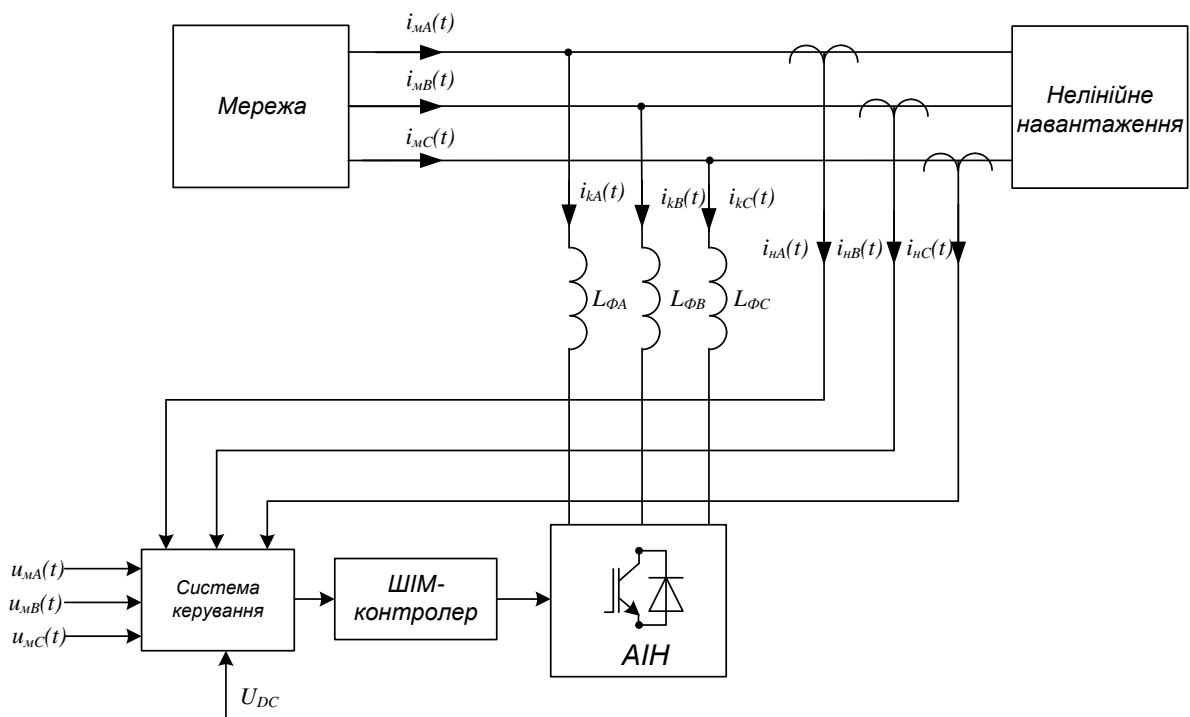


Рис. 1.21. СТАТКОМ з контролем струму навантаження

В цьому випадку виконується непряме регулювання струму мережі, який повинен мати ту ж форму, що і  $U_{\text{мережі}}$ , а його перша гармоніка повинна збігатися по фазі з  $U_{\text{мережі}}$ . Струм завдання дорівнює реактивній складовій першої гармоніки струму навантаження, яку взяли з протилежним знаком:

$$I_k = -\text{Im}(I_n). \quad (1.17)$$

Струм завдання формується шляхом подачі керуючих впливів з ШІМ-контролера на транзисторні ключі інвертора. СТАТКОМ не є споживачем активної потужності, але для забезпечення цього потрібно підтримувати постійну напругу в ланці постійного струму  $U_{DC}$ , що також виконується системою керування.

Використовувати систему керування, засновану на вимірі струму навантаження, раціонально тільки в разі роботи з невеликою кількістю навантажень. При підключенні до шин декількох нелінійних споживачів збільшується кількість встановлюваних вимірювальних приладів, що знижує економічну ефективність компенсатора і ускладнює систему керування в цілому. У цьому випадку доцільно виконувати контроль струму мережі.

На рис. 1.22 представлена схема СТАТКОМа з системою керування, робота якої заснована на контролі струму мережі. При реалізації системи керування такого типу потрібні виміри струму мережі, напруги джерела і напруги ланки постійного струму.

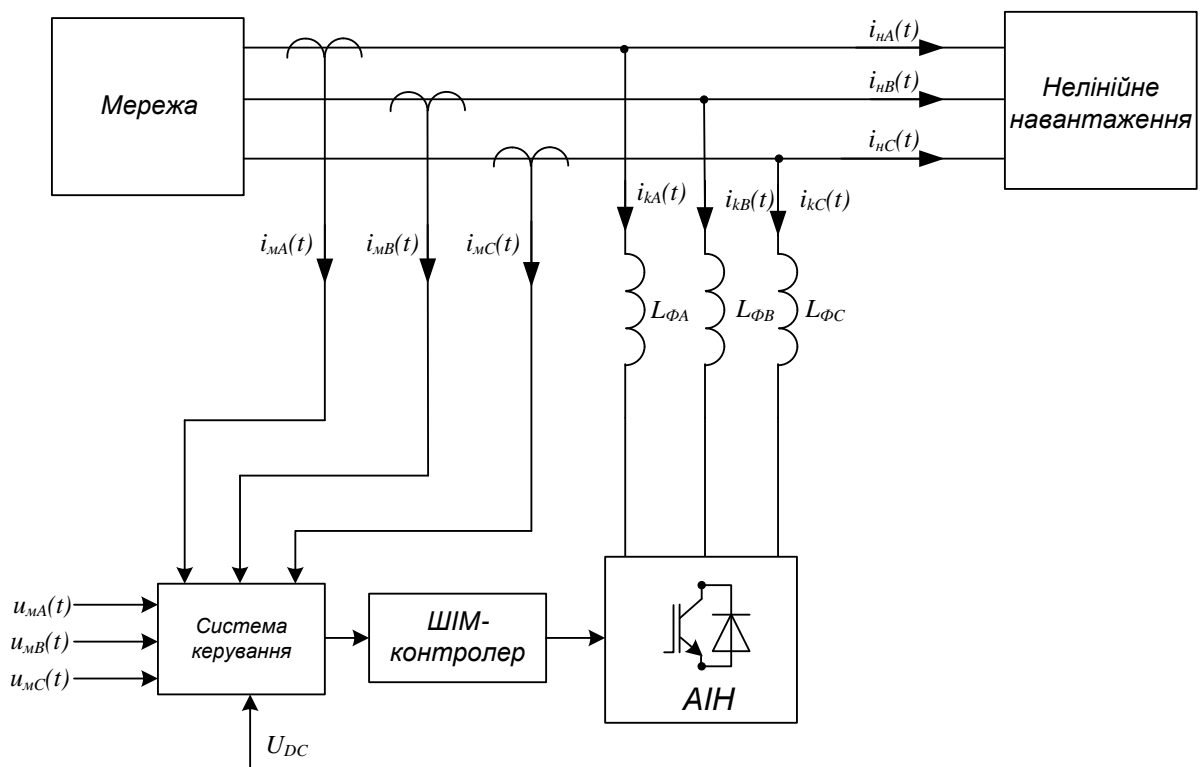


Рис. 1.22. СТАТКОМ з контролем струму мережі



Залежно від обраної стратегії керування СТАТКОМ буде діяти або як активний опір, або як джерело струму, струм якого містить тільки першу гармоніку.

Струм завдання для ШІМ-регулятора розраховується як різниця між бажаним струмом мережі, який на першій гармоніці не містить реактивну складову, і значеннями, отриманими з встановлених вимірювальних датчиків:

$$I_k = \text{Re}(I_{m1}) - I_m. \quad (1.18)$$

Для компенсації реактивної потужності можуть використовуватися й активні фільтри (АФ). Їх застосування дозволяє здійснювати не тільки компенсацію реактивної потужності, яка передається тільки на частоті першої гармоніки, а й потужності спотворень, переданої на частотах вищих гармонік. Схемна реалізація при цьому не відрізняється від схем СТАТКОМа, однак потрібне використання високочастотних компонентів, вимірювальних датчиків, які працюють в більш широкому частотному діапазоні, також змінюються вимоги до інтерфейсного фільтру [57].

Однією з основних переваг використання СТАТКОМів і активних фільтрів в якості компенсаторів реактивної потужності є істотне зменшення розміру за рахунок скорочення числа використовуваних пасивних елементів. Однак область їх застосування може бути обмежена у зв'язку з необхідністю використання високовольтих напівпровідникових елементів, що знижує економічну ефективність пристрою [36]. Застосування елементної бази більш низької напруги можливо при використанні багаторівневих компенсаторів.

На рис. 1.23 представлена схема компенсатора, виконаного на базі трирівневого інвертора напруги з нульовою точкою.

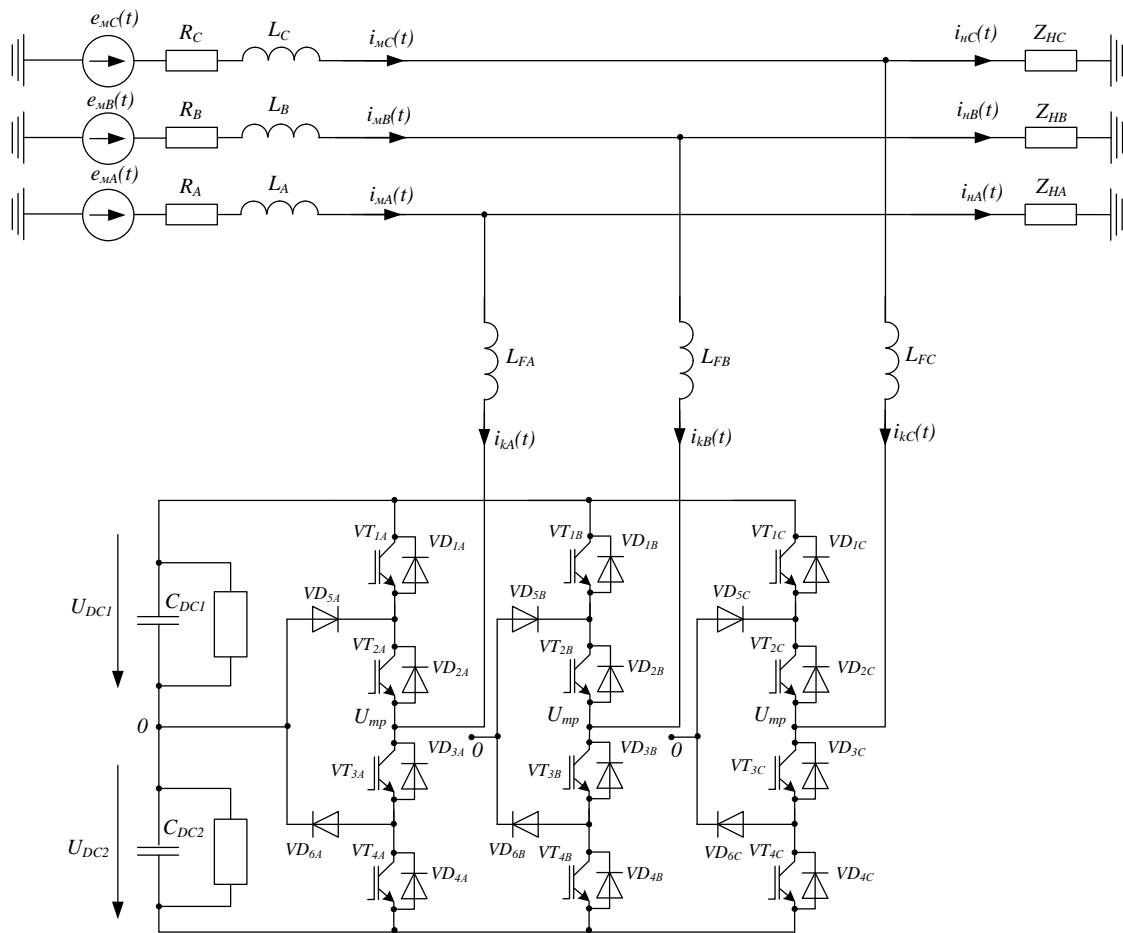


Рис. 1.23. Схема компенсатора РП на базі трирівневого інвертора з нульовою точкою

Представлений компенсатор складається з 12 транзисторних ключів, кожен з яких шунтується силовим діодом, включеним зустрічно-паралельно, і 6 гілок з діодами  $VD_{5A,5B,5C}$  та  $VD_{6A,6B,6C}$ , що з'єднують середню точку шини ланки постійного струму і середню точку кожної пари ключів. При цьому до кожного транзистору прикладено його робочу напругу, що приблизно дорівнює половині напруги ланки постійного струму, що дозволяє в два рази знизити номінальну напругу використовуваних напівпровідникових елементів.

Перевагами багаторівневої топології компенсаторів є зменшення рівня генерованих гармонійних складових, можливість використання елементної бази з меншою номінальною напругою і зниження частоти перемикання транзисторних ключів [58].

Основним недоліком використання СТАТКОМів та АФ є їх висока вартість, так як потужність таких компенсаторів може бути порівняна з потужністю навантаження [59]. На рис. 1.24 представлена діаграма порівняння вартості потужності, що генерується компенсаторами з тиристорним перемиканням (SVC), та потужності, генерованої СТАТКОМами (STATCOM).

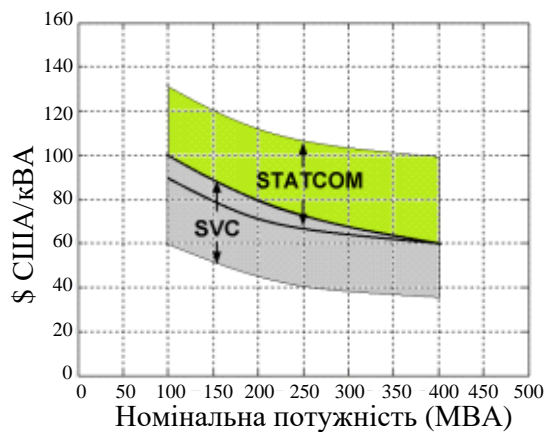


Рис. 1.24. Порівняння вартості потужності, генерованої статичними компенсаторами з тиристорним перемиканням та СТАТКОМами [60]

Питома вартість 1 кВАр РП, що генерується активними ПКРП, на порядок вище 1 кВАр РП, яка генерується пасивними ПКРП.

### 1.3.3.2 Статичні компенсатори для поздовжньої компенсації

Статичний компенсатор для поздовжньої компенсації (Static synchronous series compensator, SSSC) являє собою інвертор напруги, що підключається послідовно в мережу через трансформатор (рис. 1.25). Пристрої SSSC використовуються у розподільчих мережах.



При виникненні відхилень або коливань напруги DVR реагує шляхом введення трьох змінних напруг послідовно з напругою мережі. При цьому напруга кожної фази (амплітуда і фаза) регулюється окремо.

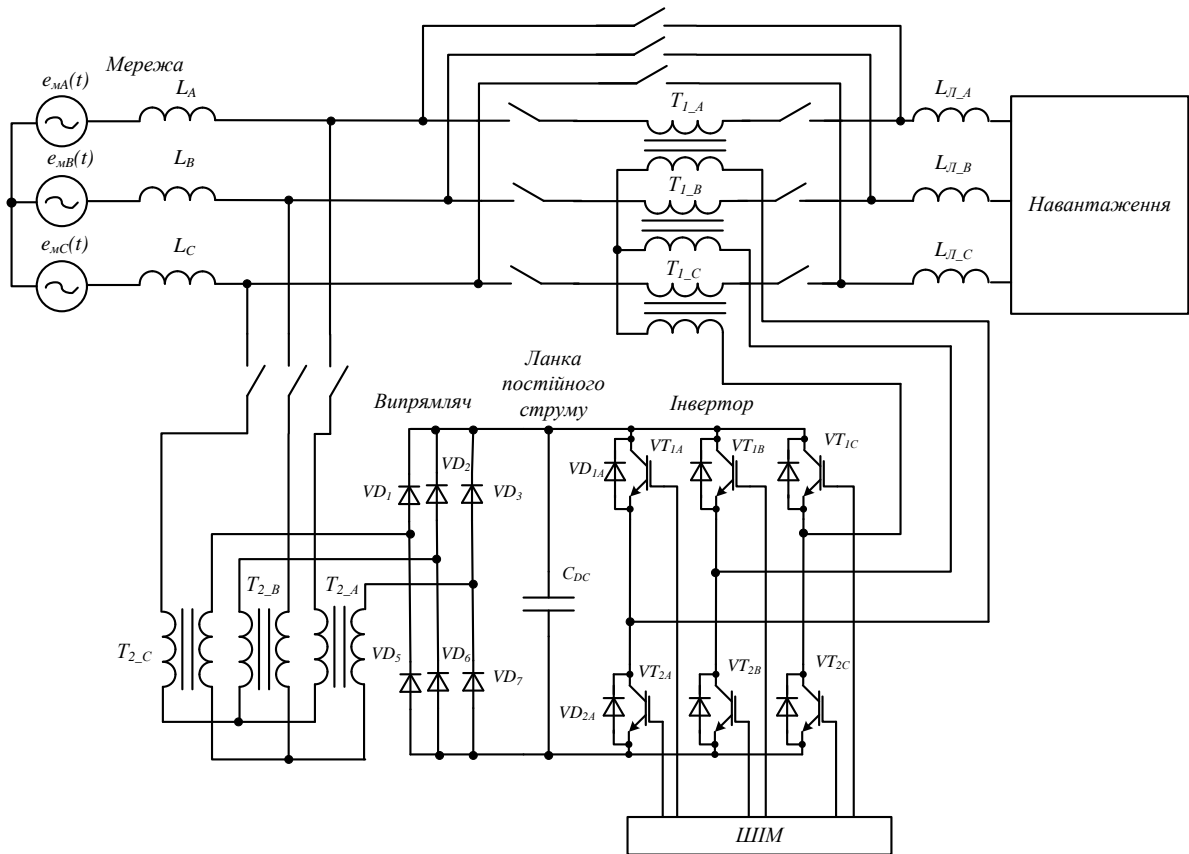


Рис. 1.26. Динамічний пристрій відновлення напруги (DVR)

Потужність (активна і реактивна), що необхідна для формування цих трьох напруг, відбирається від джерела постійного струму (рис. 1.26), яке представляє собою перетворювач напруги, що підключається до мережі через трансформатор або безпосередньо (в залежності від рівня напруги мережі).

Для забезпечення компенсації коливань напруги система керування DVR повинна мати високу швидкодію [36].

При нормальному режимі роботи енергосистеми, коли в напрузі навантаження відсутні провали і скачки, DVR працює в режимі очікування з мінімальними втратами потужності. Перетворювач напруги може бути реалізований з використанням IGCT тиристорів, що дає можливість мінімізувати втрати.

Статичний компенсатор для поздовжньої компенсації та динамічний пристрій відновлення напруги можуть бути інтегровані в один пристрій, що дозволить отримати систему, здатну контролювати потік потужності лінії електропередачі під час нормального режиму роботи енергосистеми і забезпечити динамічну компенсацію напруги і обмеження струму короткого замикання під час порушення нормального режиму роботи енергосистеми [36].

Проте варто відзначити, що на практиці часто встановлюють DVR з обмеженими можливостями з метою зниження витрат, що не дає можливості виконати повну компенсацію. Крім того, к недоліками варто віднести наявність падіння напруги на пристрої в режимі очікування [66] та завеликий час відгуку [67].

#### **1.3.3.4 Універсальні регулятори потоків потужності**

Універсальні регулятори потоків потужності (UPFC) (рис. 1.27) використовуються в розподільчих мережах високого рівня напруги та являють собою два перетворювача із загальною ланкою постійного струму, в якості якої виступає накопичувальний конденсатор. Один з перетворювачів підключений послідовно (через трансформатор), інший – паралельно (або безпосередньо, або також через трансформатор).

UPFC функціонує як ідеальний перетворювач змінного струму в змінний, в якому активна потужність може вільно перетікати в будь-якому напрямку між двома інверторами, при цьому кожен з них може незалежно від іншого генерувати або споживати реактивну потужність.

Послідовний перетворювач працює як статичний компенсатор для поздовжньої компенсації – вводить змінну напругу регульованої амплітуди і фази послідовно з напругою мережі.

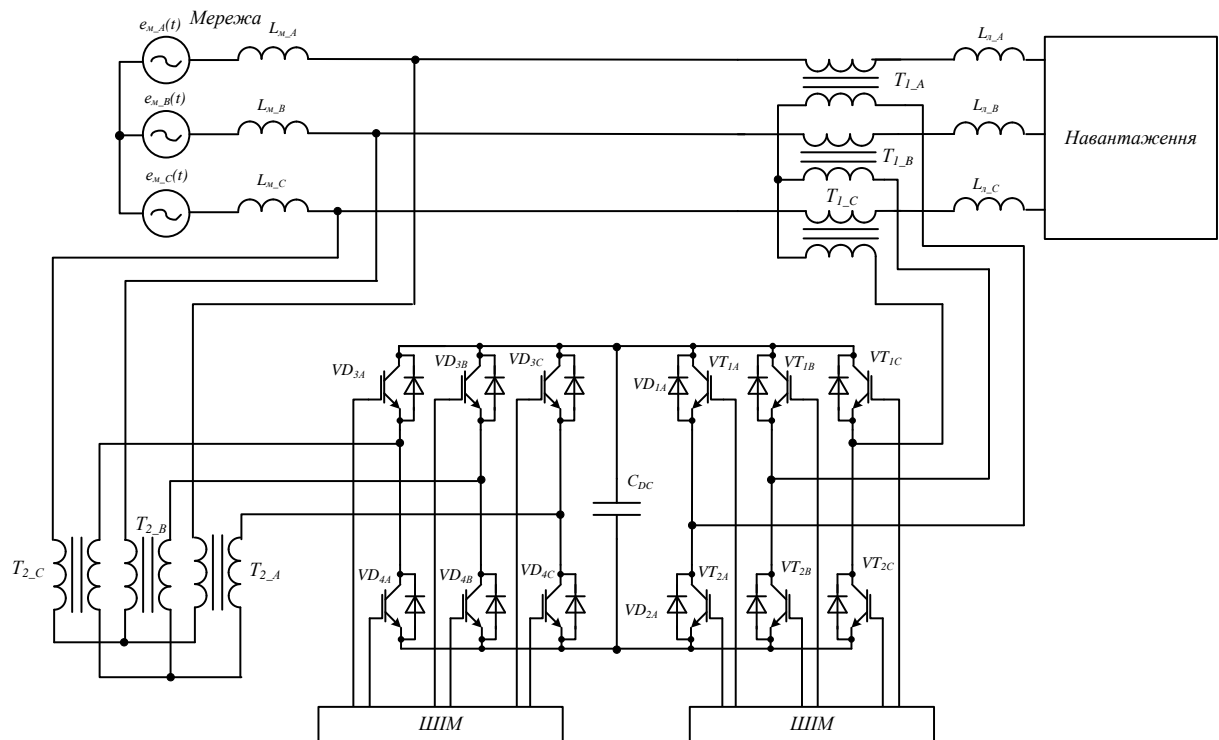


Рис. 1.27. Спрощена схема підключення універсального регулятора потоків потужності

Перетворювач, підключений паралельно, споживає активну потужність через ланку постійного струму від послідовного перетворювача або генерує її, передаючи послідовному перетворювачу через загальну ланку постійного струму. Крім того, він може здійснювати поперечну компенсацію реактивної потужності, незалежно від послідовного перетворювача, в той час як останній замикає на собі потік реактивної потужності від навантаження. Паралельний перетворювач може працювати, забезпечуючи необхідне значення коефіцієнта потужності (не обов'язково одиничне), незалежно від потоку реактивної потужності послідовного перетворювача, що означає, що через UPFC потоку реактивної потужності, на відміну від активної, немає [36].

UPFC, на відміну від інших пристроїв регулювання потоків потужності в лініях електропередач, зокрема, компенсації реактивної потужності, має можливість регулювання трьох величин: потоку активної потужності, реактивної потужності і можливість інжектування реактивного струму в мережу, що є його основною перевагою [68].

Якщо крім функцій регулювання потоків активної і реактивної потужності додати функцію компенсації потужності спотворень, тобто фільтрації вищих гармонік, то UPFC вже розглядається як універсальний регулятор якості електроенергії UPQC [69, 70], силова частина якого не відрізняється від наведеної на рис. 1.27.

Головним недоліком розглянутих UPFC є те, що для здійснення регулювання потоків потужності, кожна лінія передачі повинна бути обладнана власним незалежним UPFC [68]. Крім того, вартість самого UPFC та затрати на його установку та обслуговування є занадто високими [71].

### **1.3.3.5 Міжлінійні регулятори потоків потужності**

Запропонована структура, що отримала назву міжлінійного регулятора потоків потужності (IPFC), дозволяє здійснювати регулювання потоків потужності ліній електропередач з числом ліній більше 1 [72, 73].

Зазвичай, пристрої для поздовжньої компенсації реактивної потужності, такі як механічно комутовані конденсатори, конденсатори з тиристорним перемиканням або статичні компенсатори для поздовжньої компенсації, використовуються для збільшення переданої по лінії активної потужності. Однак пристрої для поздовжньої компенсації, по суті, тільки знижують реактивний опір лінії, відповідно, зменшуючи відношення  $X/R$ , знижуючи потік реактивної потужності, що протікає по лінії електропередачі, і, відповідно, зменшуючи втрати. У той же час міжлінійний регулятор потоків потужності, крім регулювання потоку реактивної потужності для кожної лінії індивідуально, дає можливість розподіляти передачу активної потужності між лініями, на яких встановлено такий регулятор. Таким чином, міжлінійний регулятор потоків потужності для ліній, на яких він встановлений, забезпечує:

- вирівнювання потоків активної і реактивної потужності між лініями;
- розподіл потужностей між лініями в залежності від їх завантаженості;



- компенсацію зниження напруги і регулювання споживаної реактивної потужності;
- підвищення ефективності всієї системи при динамічних збуреннях.

Для реалізації цього ланки постійного струму кожного інвертора напруги, що підключається послідовно в розтин відповідної лінії через трансформатор, з'єднуються паралельно (рис. 1.28). Перерозподіл потоків енергії здійснюється через загальну ланку постійного струму [36].

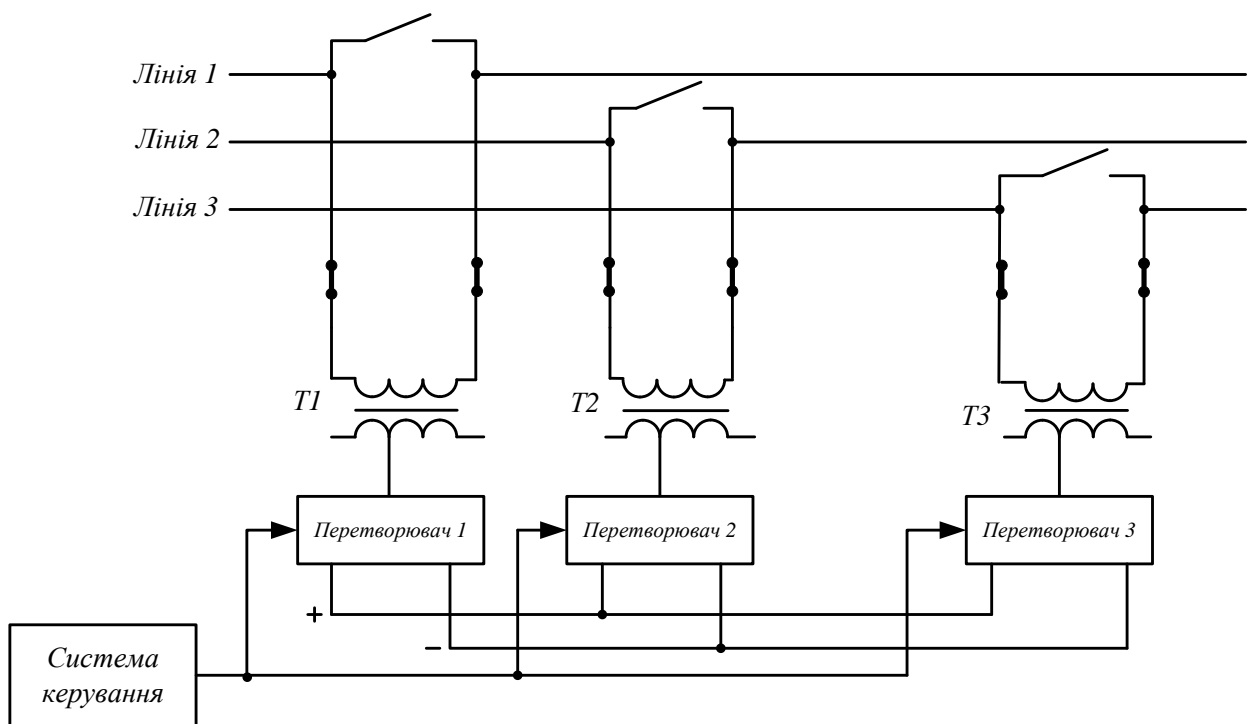


Рис. 1.28. Структурна схема міжлінійного регулятора потоків потужності

Основним недоліком компенсаторів з самокомутацією є їх висока собівартість: вартість транзисторних ключів може складати до 60-70% від вартості всього пристрою. Саме тому актуальним рішенням стала розробка пристроїв, які б поєднували переваги пасивних та активних компенсаторів, при цьому мінімізуючи потужність активної частини. Такими пристроями є гібридні компенсатори реактивної потужності (ГКРП) [74].

### 1.3.4 Гібридні компенсатори реактивної потужності

ГКРП складаються з пасивної частини, у якості якої використовуються реактори чи конденсатори з тиристорною комутацією, та активної частини. Пасивна частина компенсатора дозволяє виконувати поетапне регулювання величини реактивної потужності і дає можливість використовувати активну частину з меншими номінальними параметрами; активна частина забезпечує плавність регулювання, усуває можливість резонансу між БК і мережею і, при необхідності, виконує функцію фільтрації вищих гармонік, працюючи як вузькосмуговий фільтр, налаштований на частоту основної гармоніки [75].

На рис. 1.29 представлені варіанти конфігурації ГКРП.

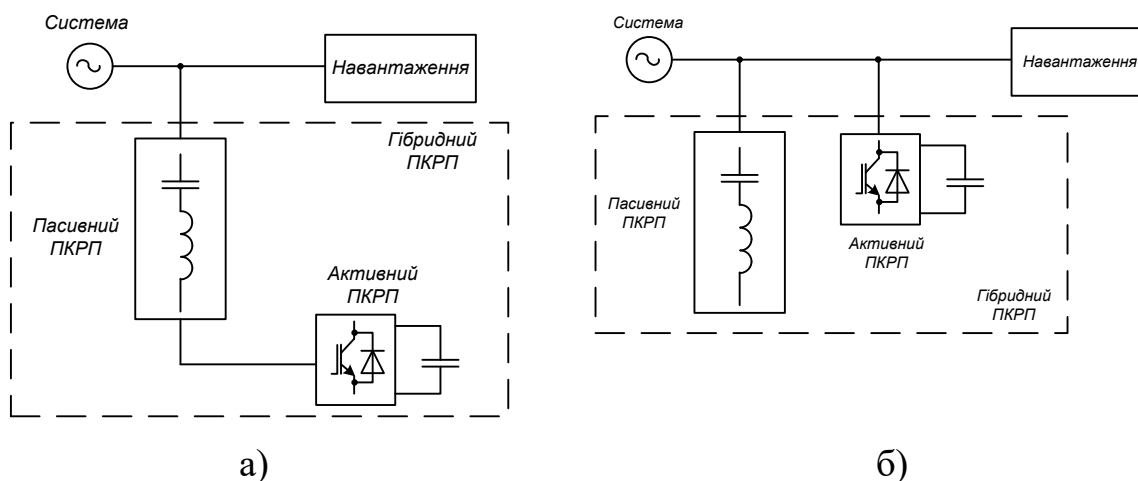


Рис. 1.29. Варіанти підключення гібридного активного компенсатора: а) послідовне з'єднання пасивного і активного компенсаторів; б) паралельне з'єднання пасивного і активного компенсаторів

Паралельне включення активного та пасивного компенсаторів дозволяє забезпечити роботу кожного з пристроїв незалежно одне від одного. Одним з варіантів подібного пристрою є паралельне з'єднання КТП, ємності ступенів якої пропорційні ступеням двійки, та активного компенсатора (рис. 1.30). Кожна з частин виконує свою задачу – пасивна забезпечує роботу мережі з максимальним значенням коефіцієнта потужності, а активна – корегує

спектральний склад струму мережі, забезпечуючи його синусоїдну форму [76].

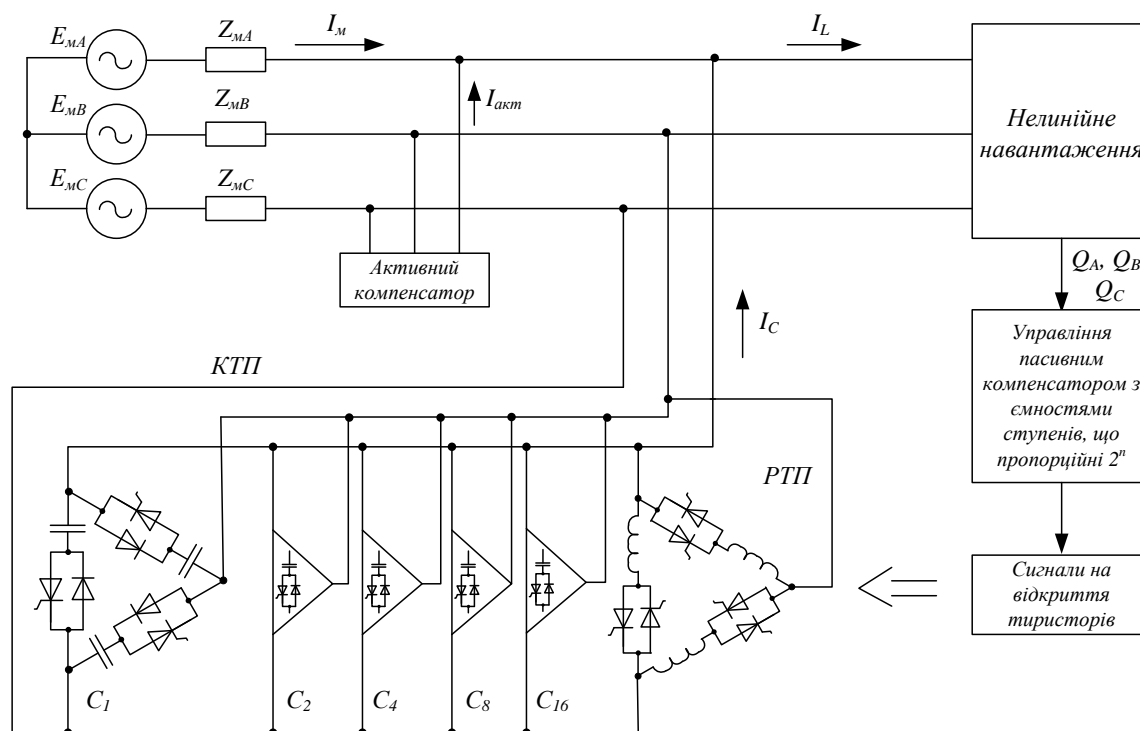


Рис. 1.30. Схема ГКРП з паралельним з'єднанням КПТ та активного компенсатора

Використання цієї топології ГКРП дозволяє суттєво зменшити рівень струмів, що протікають через активний компенсатор, забезпечити компенсацію значної частини реактивної потужності, але рівень встановленої напруги активної частини залишається високим, що потребує дорогої багаторівневої структури АФ [77].

Ще одним використовуваним варіантом є паралельне з'єднання пасивного LC-фільтру, що зазвичай налаштований на частоту п'ятої та сьомої гармонік, та багаторівневого інвертора (рис. 1.31) [78, 79]. Пасивний фільтр служить контуром з низьким опором для проходження струмів вищих гармонік та частково допомагає скоректувати коефіцієнт потужності. Через те, що більша частина струму компенсації проходить через пасивний фільтр, встановлена потужність активної частини може бути зменшена [78]. Але в

запропонованих схемах при широкому діапазоні змінення реактивної складової струму навантаження спостерігаються значні втрати потужності [80].

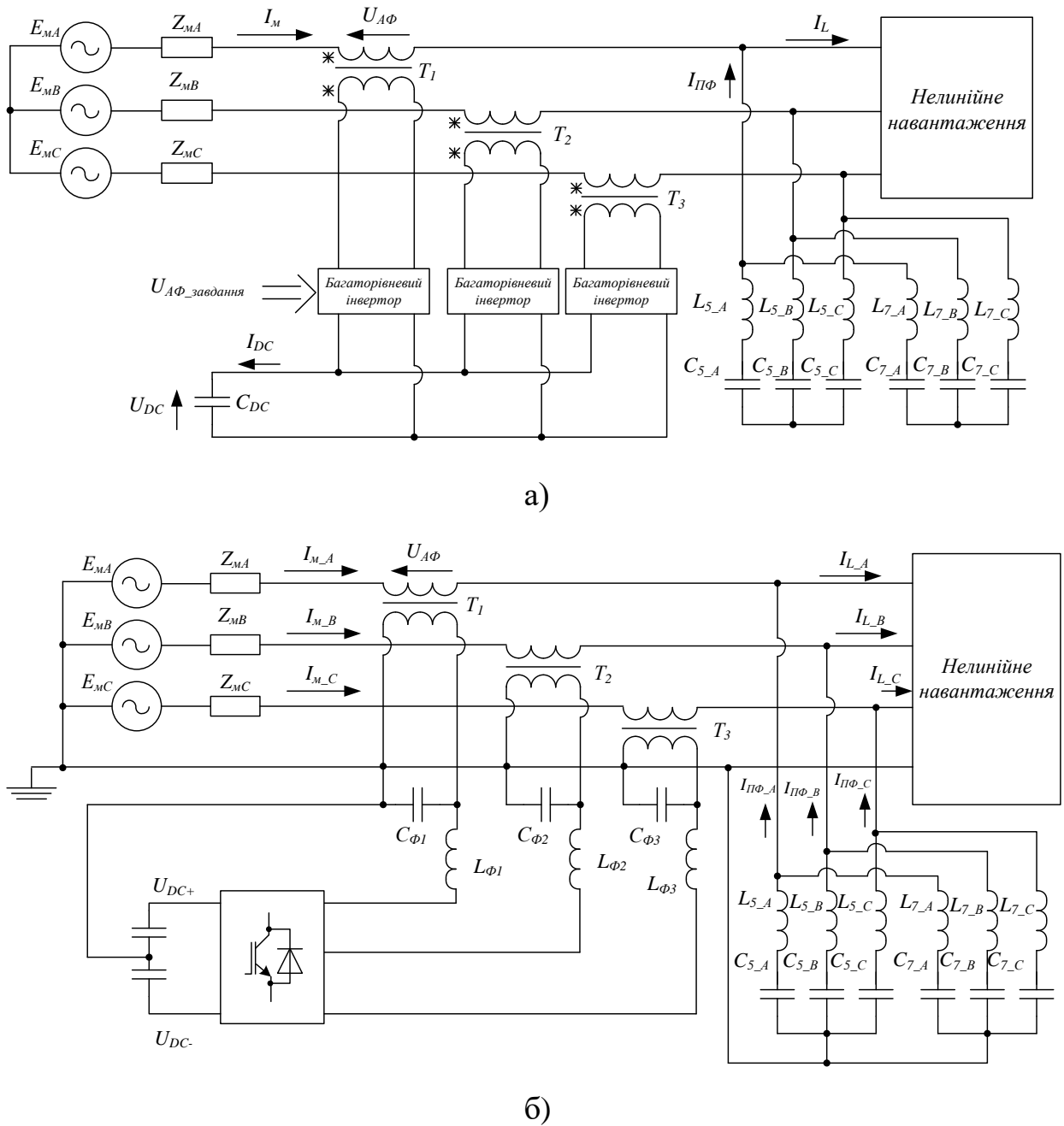


Рис. 1.31. Схема ГКРП з паралельним з'єднанням LC-фільтру та активного компенсатора: а) для трипровідних мереж; б) для чотирьохпровідних мереж

Крім того паралельне включення пасивного і активного компенсаторів може викликати проблема виникнення резонансних явищ, що призведе до перенапруги на пасивному компенсаторі.

Відома конфігурація компенсатора, при якій виконується паралельне з'єднання гібридного компенсатора, що має активну та пасивну складові, та пасивного фільтру. Приклад такого пристрою наведений на рис. 1.32. Гібридна частина компенсатора складається з резонансного фільтру, що налаштований на основну частоту та через узгоджувальний трансформатор з'єднаний з активним компенсатором. Пасивний фільтр представлений РТК [81].

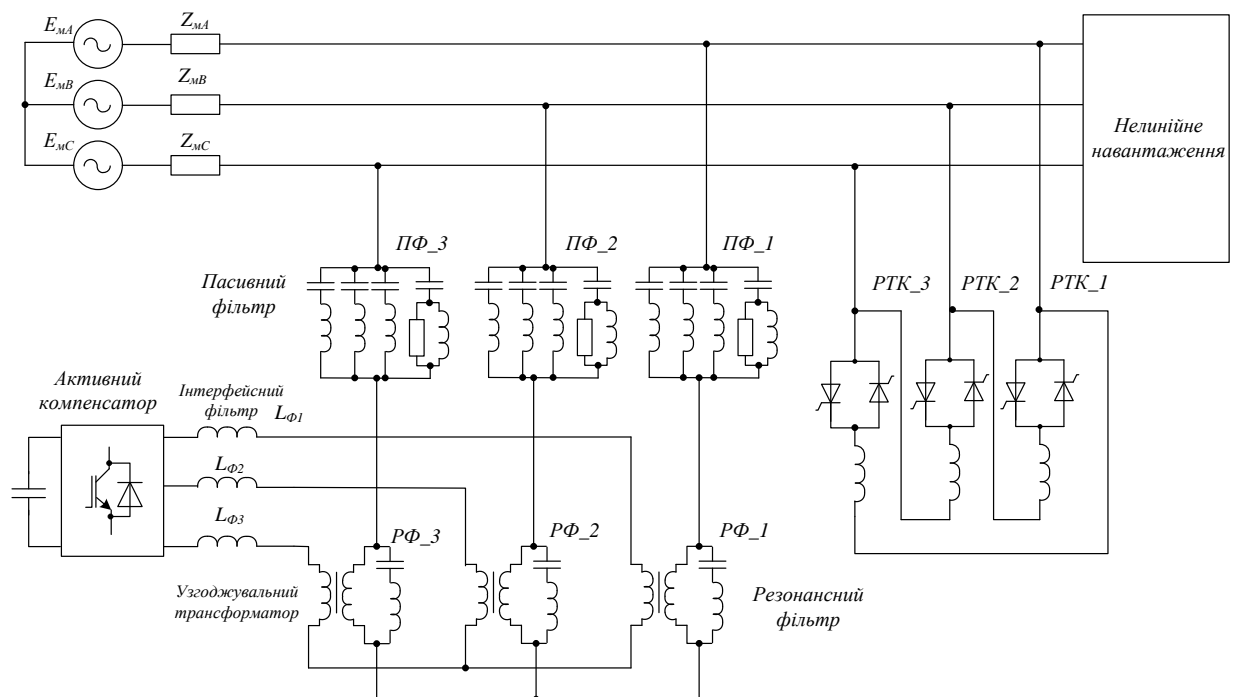


Рис. 1.32. Схема ГКРП з паралельним з'єднанням РТП та компенсатора, що складається з активної та пасивної частин

У зв'язку з тим, що більшість нелінійних навантажень носить індуктивний характер та струм через РТК також індуктивний, від активного компенсатора може вимагатися забезпечити великий ємнісний струм, що

потребує збільшеної потужності активної частини. Також використання узгоджувального трансформатору погіршує економічні показники пристрою.

З урахуванням недоліків розглянутих конфігурацій компенсаторів, поширення набуло послідовне з'єднання пасивних та активних пристроїв компенсації РП.

Одним з варіантів такої конфігурації є послідовне з'єднання активного компенсатора та РТК [82], що дозволяє виконувати як компенсацію реактивної потужності, так і струмів вищих гармонік, що генеруються нелінійними споживачами (рис. 1.33).

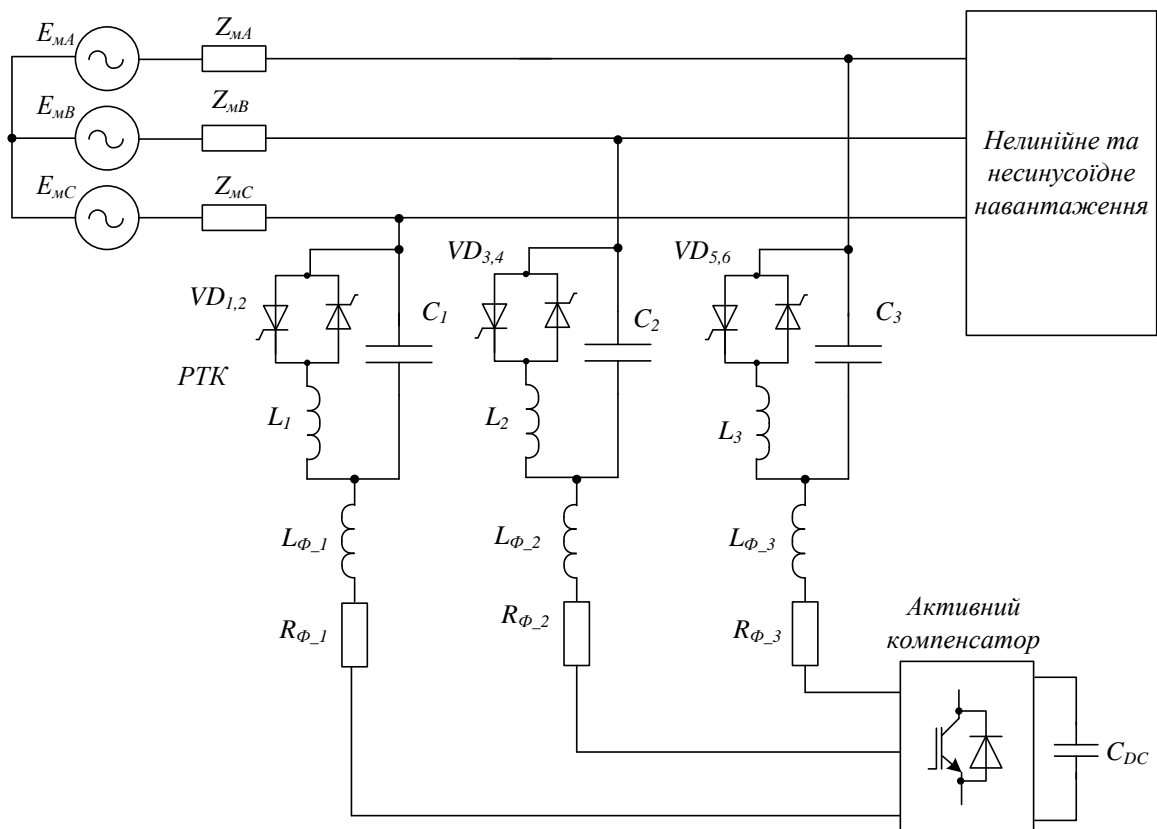


Рис. 1.33. Схема ГКРП з послідовним з'єднанням РТК та активного компенсатора

Недоліком наведеної схеми є зовнішня початкова вартість пристрою та великі втрати на перемикання ключів [60, 83]. Варто зазначити, що при комбінованому використанні СТАТКОМів та РТК сумарна потужність

гібридного пристрою може становити до 80% від потужності трифазного навантаження, що позначиться на вартості ГКРП [8].

Скорегувати вказані недоліки можливо розробкою методології розподілення потужностей активної та пасивної частин компенсатора з метою мінімізації потужності саме активного компенсатора та методології вибору параметрів пасивного фільтру. У якості пасивного фільтру надано перевагу БК з тиристорним перемиканням.

У табл. 1.1 наведені порівняльні характеристики найбільш використовуваних пристроїв компенсації реактивної потужності [36, 60, 80, 83, 84].

Таблиця 1.1

## Порівняльна таблиця пристроїв компенсації реактивної потужності

Пристрій	Нерегульований пасивний фільтр	КТП, РТК	СТАТКОМ / АФ	Гібридний фільтр	
				Паралельне включення активного та пасивного компенсаторів	Послідовне включення активного та пасивного компенсаторів
Можливість запобігання резонансу	Низька	Низька	Висока	Середня або висока (в залежності від обраної конфігурації)	Висока
Діапазон КРП	Широкий	Широкий	Широкий	Вузький або середній (в залежності від обраної конфігурації)	Широкий
Можливість плавного регулювання РП	Низька	Висока	Висока	Висока	Висока
Генерація ВГ	Низька	Висока у випадку РТК	Низька	Низька	Низька



Продовження таблиці 1.1

Можливість компенсації вищих гармонік	Низька	Низька	Дуже добра	Середня	Добра
Потужність інвертору	-	-	Велика	Середня	Середня
Втрати енергії	Малі	Малі, але збільшуються при збільшенні частоти перемикання ключів	Високі	Малі, але збільшуються при збільшенні частоти перемикання ключів	Малі, але збільшуються при збільшенні частоти перемикання ключів
Вартість	Низька	Низька	Висока	Середня/висока (в залежності від обраної конфігурації)	Середня

## Висновки до розділу 1

На підставі літературного огляду встановлено:

- використання пасивних пристроїв компенсації реактивної потужності є доцільним з економічної точки зору та забезпечує компенсацію реактивної потужності у широкому діапазоні, але: пристрої ємнісного типу не забезпечують плавності керування величиною реактивної потужності та є чутливими до вищих гармонік у спектрі прикладеної напруги, що потребує встановлення додаткових захисних пристроїв; пристрої індуктивного типу з тиристорним керуванням схильні до генерації вищих гармонік у мережу;
- використання активних засобів компенсації дозволяє плавно керувати величиною реактивної потужності у широкому діапазоні та виконувати компенсацію неактивних складових потужності, але вимагає великої встановленої потужності інвертора, що значно погіршує економічні показники пристрою;
- установка гібридних компенсаторів дозволяє зменшити встановлену потужність інвертора активної частини, але потребує розробки алгоритмів керування для ефективного перерозподілу потужностей між пасивною та активною частинами та алгоритмів вибору параметрів пасивної частини;
- використання гібридних компенсаторів з пасивною частиною індуктивного типу вимагає збільшення встановленої потужності активної частини, як наслідок, значного збільшення собівартості пристрою в цілому;
- при використанні гібридних пристроїв компенсації з паралельним з'єднанням активної частини та пасивної частини ємнісного типу виникає ризик виникнення перевантаження на БК в умовах несинусоїдності прикладеної напруги;
- доцільним та ефективним є використання гібридного компенсатора реактивної потужності з послідовним з'єднанням активної частини та пасивної частини ємнісного типу.

За результатами літературного огляду сформульована мета дисертаційної роботи – підвищення ефективності компенсації реактивної потужності в електротехнічних комплексах та електричних мережах шляхом удосконалення гібридних компенсаторів реактивної потужності та методів керування ними.

Поставлена мета може бути досягнута при виконанні таких завдань:

- розробка методів і способів підвищення енергоефективності паралельного гібридного компенсатора за рахунок вдосконалення алгоритмів вибору параметрів пасивної частини і зниження встановленої потужності активної частини;
- підвищення надійності електричних мереж за рахунок «ізоляції» пасивної частини гібридного компенсатора від вищих гармонік.

## РОЗДІЛ 2. ВДОСКОНАЛЕННЯ СХЕМНИХ РІШЕНЬ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ГІБРИДНИМ КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Відповідно до недоліків та переваг, що були зазначені у розділі 1, найбільш оптимальним варіантом є використання гібридного компенсатора, у якому пасивна частина з'єднана послідовно з активною частиною. Схема силової частини компенсатора зазначеної структури наведена на рис. 2.1.

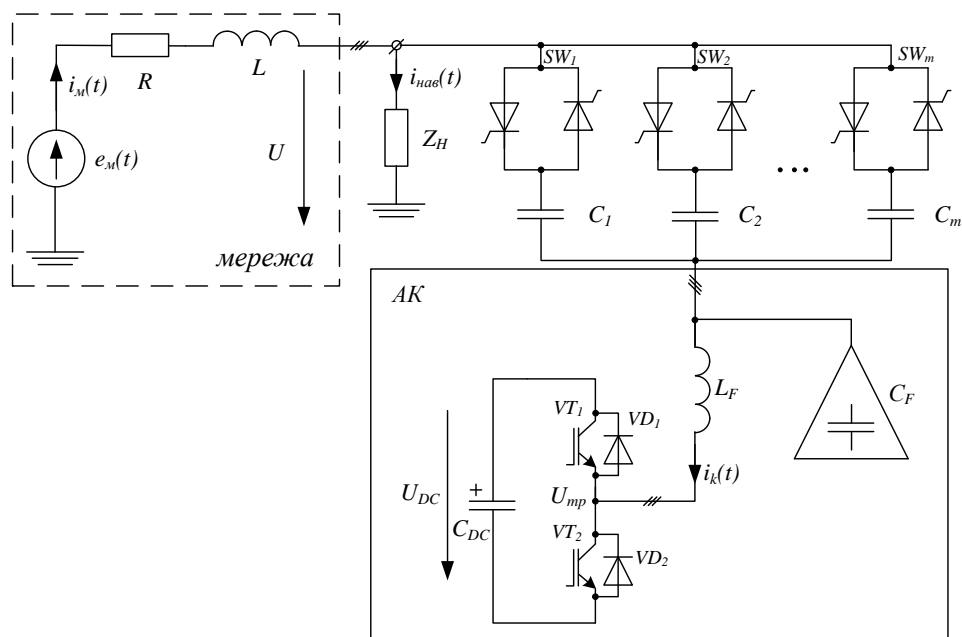


Рис. 2.1. Однофазна схема силової частини ГКРП

У відповідності з задачами, визначеними у розділі 1, розроблені методики вибору ємності ступенів БК.

### 2.1 Розробка методики визначення ємності ступенів ГКРП за умови мінімізації вихідної напруги інвертора активної частини

Для оптимального вибору ємності ступенів пасивної частини ГКРП складено математичний опис роботи компенсатора [85, 86].

Реактивна потужність ГКРП, відповідно до [87], розраховується наступним чином:

$$Q = E_{AK} \cdot I_{комп} + I_{комп} \cdot U_{БК}, \quad (2.1)$$

де  $I_{комп}$  – складова струму компенсатора на основній частоті;  $U_{БК}$  – напруга на БК,  $E_{AK}$  – вихідна ЕРС активної частини компенсатора на основній частоті мережі.

Струм компенсатора розраховується як

$$I_{комп} = \frac{U_1 - E_{AK}}{X_C}, \quad (2.2)$$

де  $U_1$  – складова напруги мережі на основній частоті, В.

Напруга на конденсаторі:

$$U_{БК} = U_1 - E_{AK}. \quad (2.3)$$

Тоді

$$Q = \frac{U_1 - E_{AK}}{X_C} \cdot (E_{AK} + U_{БК}). \quad (2.4)$$

Прийmemo вихідну ЕРС активного компенсатора на основній частоті мережі пропорційною напрузі мережі:

$$E_{AK} = \Delta \cdot U_1, \quad (2.5)$$

де  $\Delta$  – коефіцієнт пропорційності між напругою мережі і ЕРС активного компенсатора, може приймати значення від  $-\Delta_{макс}$  до  $+\Delta_{макс}$ .

В результаті математичних перетворень отриманий вираз для розрахунку величини максимальної реактивної потужності  $n$ -го ступеню, яку генерує компенсатор:

$$Q_{n.\text{макс}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_n \cdot U_1^2 \cdot (1 + \Delta_{\text{макс}}), \quad (2.6)$$

а мінімальної РП, що генерується на  $(n+1)$ -ому ступені:

$$Q_{(n+1).\text{мин}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_n \cdot U_1^2 \cdot (1 - \Delta_{\text{макс}}). \quad (2.7)$$

Одна з традиційних методик розподілу ємностей ступенів БК – розподіл ємностей згідно зі ступенями двійки [36]. Для гібридного КРП, в якому використана БК з ємностями ступенів, пропорційними ступеню двійки, при  $\Delta_{\text{макс}} = 0,1$  виходить регулювальна характеристика, показана на рис. 2.2. Видно, що при малих номерах ступенів регулювання БК в регулювальній характеристиці з'являються розриви, що призводить до зниження точності компенсації РП [85].

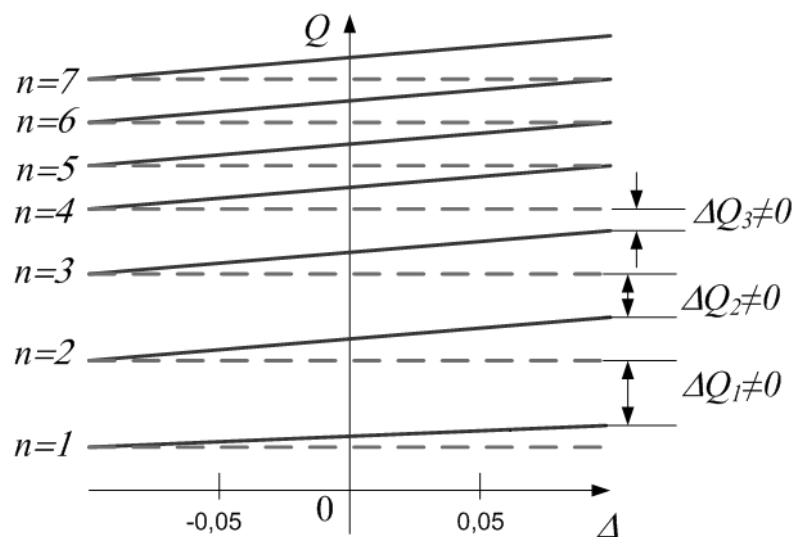


Рис. 2.2. Регулювальна характеристика гібридного КРП з БК, ємність ступенів якої встановлена пропорційно ступенями двійки ( $\Delta_{\text{макс}} = 0,1$ )

Для усунення розривів необхідно або збільшувати величину встановленої потужності активного компенсатора, або збільшувати кількість ступенів БК, що погіршує техніко-економічні показники КРП.

Плавності регулювання РП можна домогтися за умови виконання рівності:

$$Q_{(n+1) \text{ мин}} = Q_{n \text{ макс}}. \quad (2.8)$$

Отже, можна отримати співвідношення ступенів ємностей БК [88, 89]:

$$\frac{C_{n+1}}{C_n} = \frac{U_1 + E_{AK \text{ max}}}{U_1 - E_{AK \text{ max}}}, \quad (2.9)$$

де  $C_{n+1}$  – ємність ступені БК з номером  $(n+1)$ ,  $C_n$  – ємність ступені БК з номером  $n$ ,  $E_{AK \text{ max}}$  – максимальна вихідна напруга активного компенсатора на основній частоті, В.

Прийнявши  $\frac{U_1 + E_{AK \text{ max}}}{U_1 - E_{AK \text{ max}}} = q$ , отриманий наступний вираз:

$$C_{n+1} = C_n \cdot q. \quad (2.10)$$

Таким чином, для забезпечення безступеневого регулювання РП ємності ступенів БК повинні змінюватися в геометричній прогресії.

Розглянутий підхід дозволяє зменшити кількість використовуваних конденсаторів і доцільний для застосування у випадках, коли встановлена потужність активної частини становить менше 20% від потужності ГКРП.

Для зменшення кількості ступенів БК співвідношення їх ємностей може бути вибрано таким чином [88, 89]:

$$\left(\frac{C_{n+1}}{C_n}\right)^k = 1 + \frac{C_{n+1}}{C_n}, \quad (2.11)$$

де  $k$  – ціле число не менше 2.

При величині  $k = 4$  характер розподілу реактивної потужності між ступеннями має вигляд, представлений на рис. 2.3 [85].

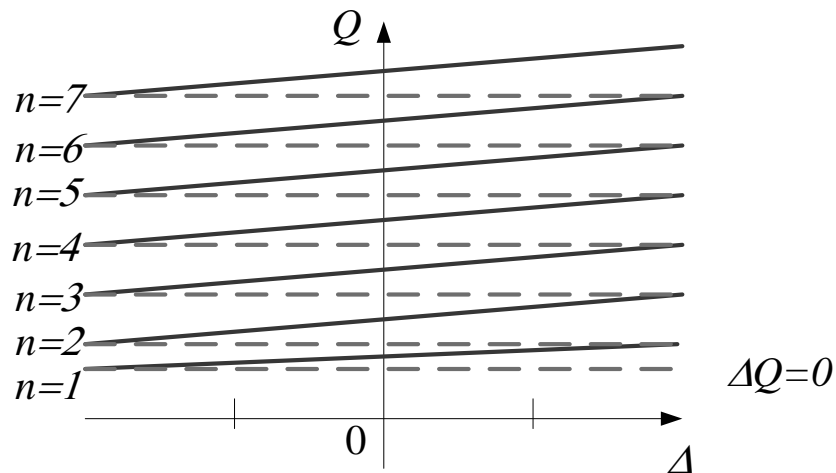


Рис. 2.3. Регулювальна характеристика гібридного КРП з БК, ємність ступенів якої встановлена згідно з виразом (2.11)

При виконанні цієї умови ємність ступеню з номером  $k$  може бути реалізована шляхом паралельного включення ступенів з номерами 0 і 1; ємність ступені з номером  $(k + 1)$  – включенням ступенів з номерами 1 і 2 і т.д.

Вирази (2.9) і (2.11) однозначно визначають залежність між числом  $k$  і коефіцієнтом  $\Delta_{\max}$ , який, в свою чергу, визначає встановлену потужність активного компенсатора. У таблиці 2.1 представлені результати визначення співвідношення ємностей ступенів БК і коефіцієнта  $\Delta_{\max}$  для значень від 2 до 6.



**Таблиця відповідності значень співвідношення ємностей ступенів БК і коефіцієнта  $\Delta_{\max}$**

№ п/п	$k$	$\frac{C_{n+1}}{C_n}$	$\Delta_{\max}$
1	2	1,618	0,236
2	3	1,325	0,139
3	4	1,221	0,1
4	5	1,167	0,077
5	6	1,134	0,067

Викладений підхід дозволяє значно скоротити кількість конденсаторів у складі батареї і ефективний при встановленій потужності активного компенсатора, що становить не більше 10% від потужності всього пристрою.

Включення БК здійснюється за допомогою зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів, що дозволяє отримати кілька ступенів безперервного регулювання потужності ГКРП. Такий підхід дозволяє зменшити кількість використовуваних конденсаторів. Компенсація тієї частини реактивної потужності, що не була скомпенсована пасивним пристроєм, виконується активним компенсатором.

Для уникнення проблем, що виникають при роботі БК в умовах несинусоїдності прикладеної напруги, які були розглянуті у літературному огляді, для захисту БК пропонується використання можливостей активної частини компенсатора. Тобто крім плавного регулювання величиною реактивної потужності активний компенсатор дозволяє забезпечити «ізоляцію» БК від впливу вищих гармонік, що присутні у струмі навантаження. Це визначається методами керування компенсатором, які будуть використовуватися.

Шляхом вибору методу керування можна забезпечити роботу ГКРП в двох режимах: 1) виконання завдання компенсації реактивної потужності, при цьому струм компенсатора носить синусоїдний характер, отже, забезпечується «ізоляція» БК від вищих гармонік; 2) крім компенсації реактивної складової виконується фільтрація вищих гармонійних складових, які включає спектр струму мережі. При виборі першого підходу до керування компенсатором установка гібридного компенсатора дозволяє плавно регулювати величину споживаної / генерованої навантаженням реактивної складової струму, при цьому спектр струму мережі буде включати всі вищі гармоніки струму навантаження. Другий підхід дає можливість мінімізувати рівень вищих гармонійних складових в струмі мережі. При виборі стратегії керування приймається до уваги конфігурація мережі і реальні вимоги електроприймачів до показників якості електроенергії [90].

Складемо математичний опис роботи ГКРП при чотирипровідному та трипровідному підключенні до мережі.

## **2.2 Розробка алгоритмів керування роботою ГКРП при чотирипровідному підключенні пристрою до мережі**

При дослідженні роботи ГКРП при чотирипровідному підключенні до електричної мережі кожна фаза розглядається як окремий контур. На рис. 2.4 представлена розрахункова схема заміщення. Активна частина ГКРП представлена у вигляді джерела ЕРС  $e_{AK}(t)$ , що є допустимим для частот, значно менших, ніж частота перемикання ключів інвертора активного компенсатора (АК). Пасивна частина являє собою батарею конденсаторів регульованої ємності. Втрати активної потужності на перемикання транзисторних ключів представлені активним опором  $R$  [91].

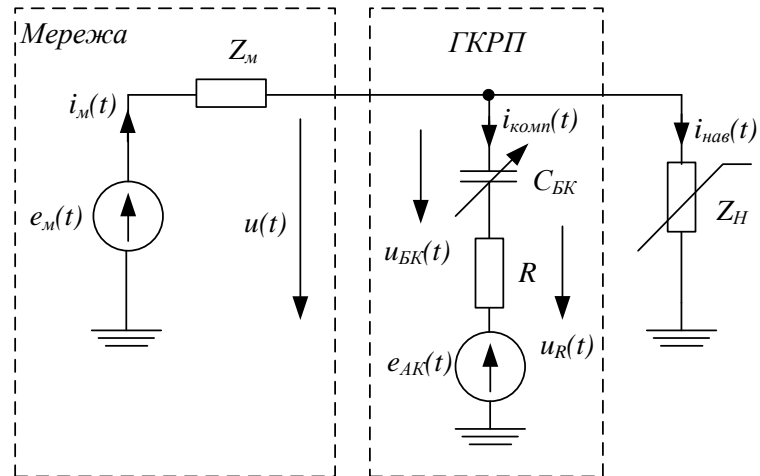


Рис. 2.4. Однофазна схема заміщення при чотирьохпроводному підключенні ГКРП до мережі

Векторна діаграма, що описує режим роботи наведеної схеми, у загальному виді наведена на рис. 2.5.

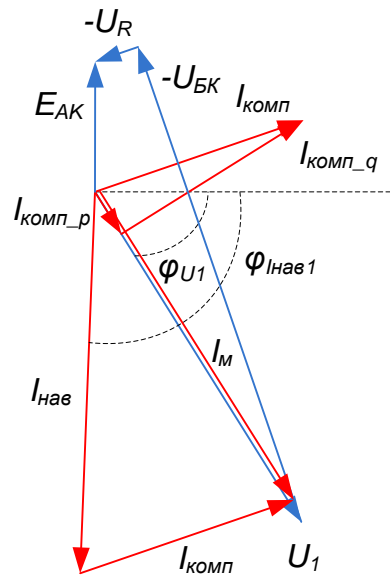


Рис. 2.5. Векторна діаграма струмів та напруг, що описує роботу схеми, наведеної на рис. 2.4

Завдання на струм ГКРП формується як сума активної (синфазної) і реактивної (квадратурної) складових. Величина активної складової залежить

тільки від активної потужності  $P$ , яка витрачається на перемикання і втрати провідності в транзисторних ключах [91]:

$$\dot{I}_{\text{комп}_p} = \frac{P}{U_1} \cdot e^{j \cdot \arg(\dot{U}_1)}, \quad (2.12)$$

де  $U_1$  – середньоквадратичне значення першої гармоніки напруги мережі, В.

Реактивна компонента струму дорівнює реактивному струму навантаження, що прийнятий з протилежним знаком:

$$\dot{I}_{\text{комп}_q} = j \cdot I_{\text{навл}} \cdot \sin(\arg(\dot{I}_{\text{навл}}) - \arg(\dot{U}_1)) \cdot e^{j \cdot \arg(\dot{U}_1)}, \quad (2.13)$$

де  $I_{\text{навл}}$  – середньоквадратичне значення першої гармоніки струму навантаження, А.

Тоді струм компенсатора буде дорівнювати:

$$\dot{I}_{\text{комп}} = \dot{I}_{\text{комп}_p} + j \cdot \dot{I}_{\text{комп}_q}. \quad (2.14)$$

Потужність пасивної частини компенсатора вибирається з умови мінімізації потужності активної частини. Розрахунок ємності БК виконується наступним чином:

$$X_{BK} = \frac{Q_1}{I_{\text{комп}}^2} = \frac{U_1 \cdot I_{\text{навл}} \cdot \sin(\arg(\dot{I}_{\text{навл}}) - \arg(\dot{U}_1))}{I_{\text{комп}}^2}. \quad (2.15)$$

В наведеній формулі використані середньоквадратичні значення струмів навантаження й компенсатора та напруги мережі.

Розраховане значення  $X_{BK}$  реалізується за допомогою регульованої БК, яка являє собою набір ступенів, кожна з яких має свою встановлену ємність.

Необхідна величина набирається шляхом одночасного включення декількох конденсаторів меншої ємності. Методика вибору ємностей викладена в п. 2.1.

Падіння напруги на батареї конденсаторів:

$$\dot{U}_{БК} = \dot{I}_{комп} \cdot (-j \cdot X_{БК}), \quad (2.16)$$

де  $X_{БК}$  – встановлена ємність пасивної частини компенсатора, Ом.

ЕРС активного компенсатора:

$$\dot{E}_{АК} = \dot{U}_I - \dot{I}_{комп} \cdot (-j \cdot X_{БК}) - \dot{I}_{комп} \cdot R, \quad (2.17)$$

де  $R = \frac{P}{I_{комп}^2}$  – активний опір компенсатора, Ом.

Розрахунок струму мережі був виконаний наступним чином:

$$\dot{I}_M = \dot{I}_{нав} + \dot{I}_{комп}. \quad (2.18)$$

Структурна схема синтезованої система керування ГКРП в режимі роботи з синусоїдними струмами зображена на рис. 2.6 [91]. Частота дискретизації АЦП  $f_{виб}$  дорівнює 6400 Гц (прийнята кількість відліків за період – 128). Струм завдання  $i_3(z)$  визначається як сума синфазної  $i_p(z)$  та квадратурної  $i_q(z)$  складових.

Формування синфазної складової струму завдання здійснюється регулятором напруги ланки постійного струму  $U_{ДС}$ . Цей струм має невелику величину, так як споживана АК активна потужність витрачається тільки на втрати в ньому. З цієї причини при подальшому аналізі властивостей ГКРП цим струмом можна знехтувати.



У свою чергу, миттєва потужність АК дорівнює:

$$p_{AK}(t) = p_m(t) - p_n(t), \quad (2.22)$$

де  $p_m(t)$  – миттєва потужність мережі, Вт,  $p_n(t)$  – миттєва потужність навантаження, Вт.

Прирівняємо (2.21) і (2.22) і знайдемо:

$$U_{DC}^2(t) = \frac{2}{C} \int p_{DC}(t) dt = \frac{2}{C} \int p_{AK}(t) dt, \quad (2.23)$$

$$U_{DC}(t) = \sqrt{\frac{2}{C} \int p_{AK}(t) dt}. \quad (2.24)$$

З урахуванням отриманих виразів, структурна схема ланки постійного струму АК як об'єкта управління представлена на рис. 2.7.

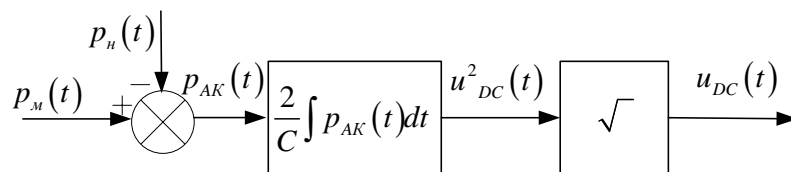


Рис. 2.7. Структурна схема ланки постійного струму АК як об'єкта управління

Для зниження впливу збурень з боку навантаження реалізований метод «зв'язку вперед», що полягає в попередньому вимірі і подальшому обліку потужності навантаження, що дозволяє істотно (до 1-2 періодів мережі) зменшити час перехідного процесу в контурі стабілізації напруги ланки постійного струму. Це дає можливість мінімізувати величину ємності конденсатора ланки постійного струму, тим самим підвищити економічну ефективність АК.

Структурна схема регулятора зі «зв'язком вперед» наведена на рис. 2.8.

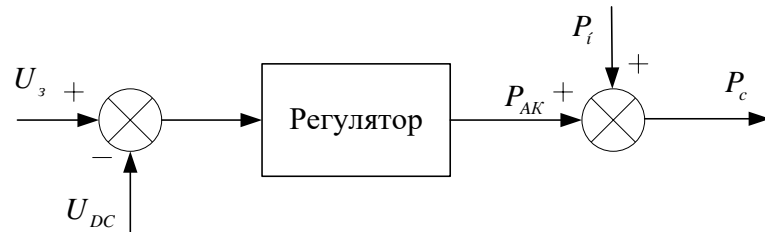


Рис. 2.8. Структурна схема регулятора напруги ланки постійного струму зі «зв'язком вперед»

Коефіцієнт передачі регулятора, використовуваного в наведеній системі, вибирається з умови отримання прийняттого перерегулювання (не більше 5%, що обумовлено максимальною робочою напругою конденсаторів ланки постійного струму активного компенсатора).

Структурна схема замкнутої САК ланки постійного струму активного компенсатора з урахуванням об'єкта регулювання представлена на рисунку 2.9.

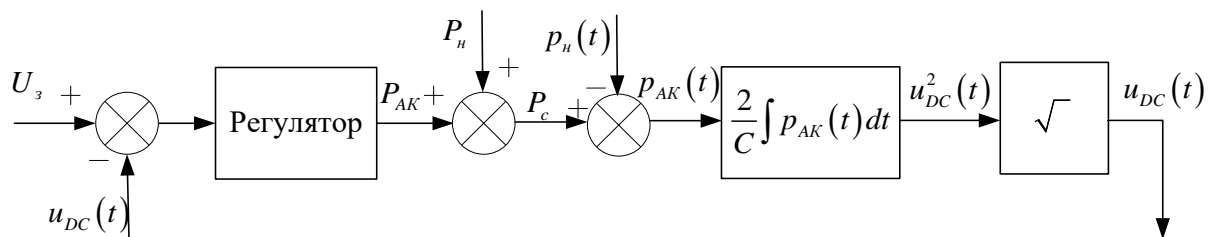


Рис. 2.9. Структурна схема системи управління напругою ланки постійного струму

Для того, щоб позбутися від нелінійності, яка обумовлена наявністю блоку обчислення арифметичного квадратного кореня, проведений перехід до системи, в якій сигнал помилки обчислюється для квадрата напруги ланки постійного струму (рис. 2.10), що викликає зміну налаштування регулятора.



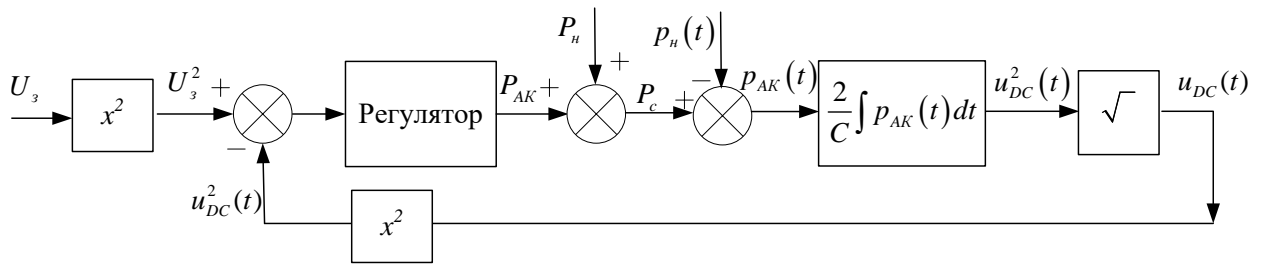


Рис. 2.10. Структурна схема системи управління напругою ланки постійного струму з порівнянням квадратів напруг

Оскільки вимірювання активної потужності навантаження проводиться 1 раз в період, розраховувати квадрат напруги ланки постійного струму в режимі реального часу не має сенсу. При цьому система управління стає дискретною, так як з'являється квантування за часом.

Синтез цифрового регулятора зроблено аналогічно описаному в [93], структурна схема результуючої системи управління наведена на рис. 2.11.

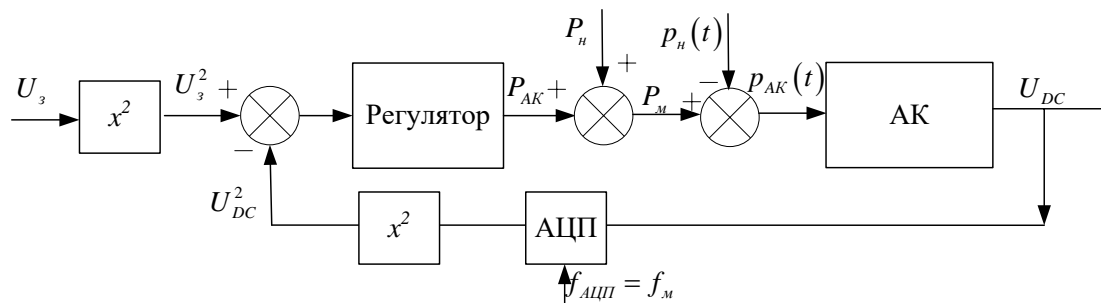


Рис. 2.11. Структурна схема стабілізатора напруги ланки постійного струму активного компенсатора

Передавальна функція регулятора обрана за аналогією з [93]:

$$W(z) = \frac{C}{2 \cdot T} \cdot \frac{1}{1 - z^{-1}}, \quad (2.25)$$

де  $T$  – період мережі, с.

В цьому випадку час регулювання напруги ланки постійного струму АК не перевищує  $2T$ .

Блок DPLL (рис. 2.6) призначений для виділення з напруги мережі синфазної і квадратурної компонент основної частоти. Ці сигнали використовуються для формування синфазної і квадратурної складових струму завдання.

Виділення квадратурної компоненти струму мережі  $I_{qc}$  (рис. 2.6) здійснюється шляхом перемноження з еталонним сигналом з DPLL і подальшої низькочастотної фільтрації. У якості ФНЧ (рис. 2.6) використаний sinc-фільтр першого порядку з інтервалом інтегрування, рівним періоду мережі. Передавальна функція sinc-фільтру першого порядку має вигляд [94]:

$$W_{\text{sinc}}(z) = \frac{1}{M} \frac{1 - z^{-M}}{1 - z^{-1}}, \quad (2.26)$$

де  $M$  – кількість відліків за період. Для можливості використання швидкого перетворення Фур'є прийемо кількість гармонік спектру, які будуть враховуватися при роботі схеми, рівною ступеню двійки, а саме 64. Тоді  $M$  буде дорівнювати 128 згідно з теоремою Котельникова [19]. Блок схема sinc-фільтру першого порядку та побудована АЧХ наведені на рис. 2.12-2.13.

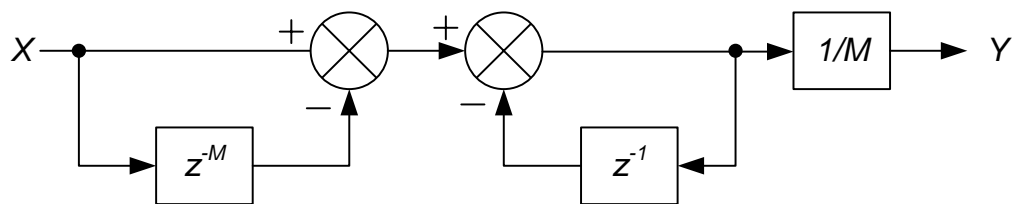


Рис. 2.12. Блок схема sinc-фільтру

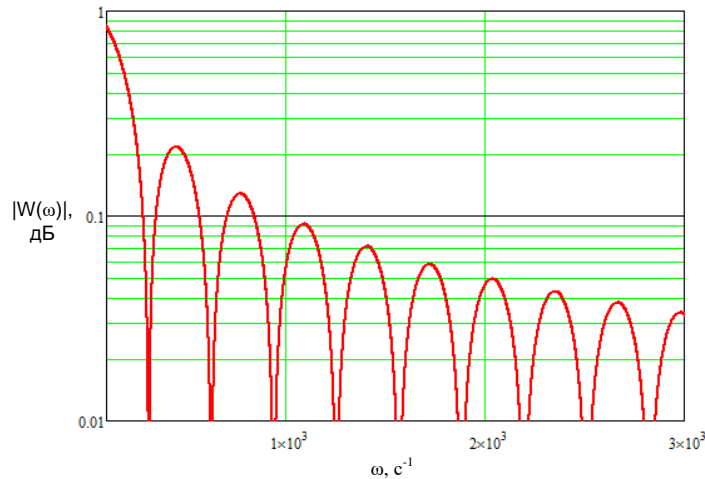


Рис. 2.13. Амплітудно-частотна характеристика sinc-фільтру першого порядку

Отриманий сигнал  $I_{qc}$  (рис. 2.6) надходить на суматор разом зі струмом завдання  $I_{qREF}$ . Використання ненульового  $I_{qREF}$  дозволяє здійснювати режими перекомпенсації або недокомпенсації РП. Різницевий сигнал є вхідним для регулятора амплітуди реактивного струму  $I_q$ , вихідний сигнал якого використовується для формування  $i_q(t)$  [91].

Теоретично регулятор амплітуди реактивного струму  $I_q$  (рис. 2.6) може бути пропорційним з коефіцієнтом підсилення, рівним одиниці. Однак зважаючи на те, що параметри решти схеми відомі неточно, крім того вони можуть змінюватися у процесі роботи, використовується пропорційно-інтегральний регулятор. Інтегральна ланка вводиться для того, щоб звести до нуля похибку регулювання. Коефіцієнт підсилення пропорційної ланки приймається меншим за одиницю з метою запобігання перерегулювання. Передавальна функція регулятора реактивного струму має вигляд:

$$W(z) = K_{np} + \frac{K_{im}}{1 - z^{-1}}, \quad (2.27)$$

де  $K_{np}$  – коефіцієнт підсилення пропорційної ланки регулятора, прийнятий рівним 0,8;  $K_{im}$  – коефіцієнт підсилення інтегральної ланки регулятора,

прийнятий рівним  $0,1 \div 0,2$ , більші значення  $K_{um}$  призведуть до перерегулювання.

Регулятор розподілу  $Q$  (рис. 2.6) виконує перерозподіл потужності між БК і АК за умовою мінімізації потужності АК, тобто вибирається така ємність БК, при якій для заданої реактивної потужності вихідна напруга АК буде мінімальною.

Підтримка середнього значення напруги в середній точці напівмоста на рівні  $0,5 \cdot U_{DC}$  відносно негативної шини ланки постійного струму АК здійснюється регулятором  $U_{tr}$  (рис. 2.6), вихідний сигнал якого є струм корекції  $i_{кор}(t)$ . Тут достатньо П-регулятора з невеликим коефіцієнтом підсилення  $K$ . Без цього регулятора неминуха поява на БК неконтрольованої постійної складової напруги, що призведе до неможливості забезпечення коректного керування струмом ГКРП. Для такого регулятора передавальна функція має наступний вигляд:  $W(s) = K$ .

У якості регулятору струму РС (рис. 2.6) можна використовувати гістерезисний регулятор або ПІ-регулятор з ШІМ управління. Кожен з цих варіантів має свої переваги та недоліки.

Перевагою використання ПІ-регулятора з ШІМ управлінням є постійна частота перемикання, що забезпечує передбачуваність у плані вищих гармонік та резонансних явищ, але він більш чутливий до похибок в визначенні значення індуктивності [95].

Гістерезисний регулятор забезпечує швидке формування заданого струму та автоматично обмежує його величину, має мінімальний час регулювання.

Розглянемо можливість використання гістерезисного струмового регулювання. Це метод управління інвертором напруги, при якому вихідний струм перетворювача формується відповідно до струму завдання [96-98]. Управління ключами перетворювача відбувається асинхронно зі зростанням і

зменшенням струму через дросель інтерфейсного фільтру з відстеженням струму завдання.

Метою гістерезисного управління є утримання струму в установленому діапазоні, близькому до бажаного значення. Стан ключів інвертора визначається відповідно до величини петлі гістерезису. Коли струм перевищує бажане значення і помилка регулювання носить позитивний знак, положення ключів змінюється, і струм починає зменшуватися до того моменту, поки помилка регулювання не перевищить допустимого значення і буде мати негативний знак, тоді положення ключів знову зміниться.

Важно розрахувати *min* та *max* частоту перемикання транзисторів інвертора, щоб уникнути резонансів і для зниження втрат перемикання.

Для забезпечення заданого сигналу розрахуємо струм навантаження для напівмостового інвертора (рис. 2.14).

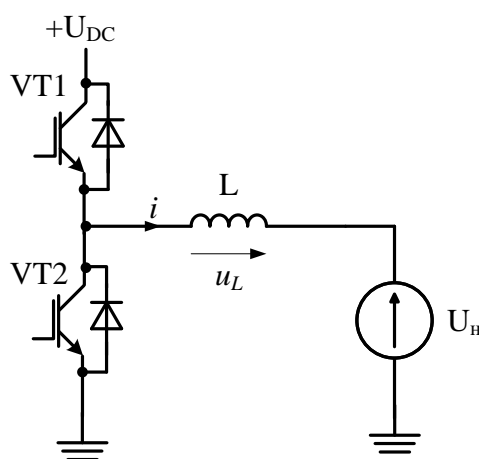


Рис. 2.14. Схема однофазного напівмостового інвертора

Принцип гістерезисного методу управління ключами інвертора графічно продемонстрований на рис. 2.15.

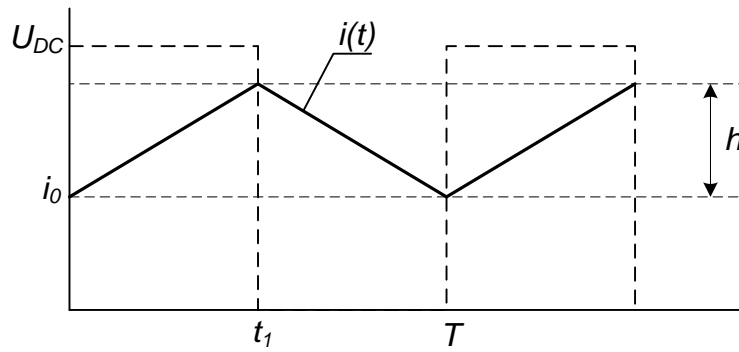


Рис. 2.15. Часова діаграма, що пояснює гістерезисний метод управління ключами інвертора

Струм, що протікає через індуктивність, на інтервалі  $0 < t < t_1$  буде дорівнювати:

$$i(t) = i_0 + \frac{U_{DC} - U_H}{L} \cdot t. \quad (2.28)$$

Струм на інтервалі  $t > t_1$ :

$$i(t) = i_0 + \frac{U_{DC} - U_H}{L} \cdot t + \frac{-U_H}{L} \cdot (t - t_1). \quad (2.29)$$

На рис. 2.16 наведений графік зміни напруги, що прикладена до котушки індуктивності.

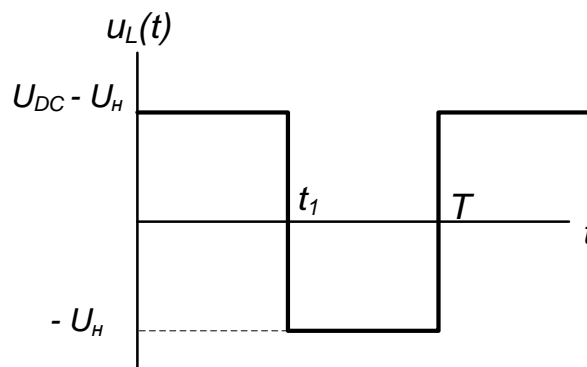


Рис. 2.16. Графік зміни напруги на котушці індуктивності

Так як середня напруга, що прикладена до котушки індуктивності інтерфейсного фільтру, дорівнює нулю (що проілюстровано на рис. 2.16), то можна записати наступне:

$$\frac{U_{DC} - U_H}{L} t_1 - \frac{U_H}{L} (t - t_1) = 0. \quad (2.30)$$

Або

$$\begin{aligned} U_{DC} \cdot t_1 - U_H \cdot t_1 - U_H \cdot t + U_H \cdot t_1 &= 0, \\ \Rightarrow U_{DC} \cdot t_1 - U_H \cdot t &= 0. \end{aligned}$$

Знайдемо відношення  $\frac{t_1}{t}$ , що дорівнює коефіцієнту заповнення імпульсів:

$$\frac{t_1}{t} = \frac{U_H}{U_{DC}}. \quad (2.31)$$

Вираз для частоти знайдемо з умови, що  $h$  – ширина петлі гістерезису (рис. 2.15):

$$h = i(t_1) - i_0 = \frac{U_{DC} - U_H}{L} \cdot t_1, \quad (2.32)$$

звідки

$$t_1 = \frac{h \cdot L}{U_{DC} - U_H}.$$

Тоді період  $T$  дорівнює:

$$T = \frac{t_1 \cdot U_{DC}}{U_H} = \frac{h \cdot L \cdot U_{DC}}{(U_{DC} - U_H) \cdot U_H}. \quad (2.33)$$

Вираз для частоти:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{(U_{DC} - U_H) \cdot U_H}{h \cdot L \cdot U_{DC}}. \quad (2.34)$$

Знайдемо екстремум функції:

$$\frac{df}{dU_H} = \frac{d \frac{(U_{DC} - U_H) \cdot U_H}{h \cdot L \cdot U_{DC}}}{dU_H} = \frac{U_{DC} - 2 \cdot U_H}{h \cdot L \cdot U_{DC}} = 0 \rightarrow U_H = 0.5 \cdot U_{DC}. \quad (2.33)$$

$$\frac{d^2 f}{dU_H^2} = \frac{d \left( \frac{U_{DC} - 2 \cdot U_H}{h \cdot L \cdot U_{DC}} \right)}{dU_H^2} = -\frac{2}{h \cdot L \cdot U_{DC}} < 0, \text{ отже}$$

$$f_{\max} = \frac{0.25 \cdot U_{DC}}{h \cdot L}. \quad (2.34)$$

При використанні гістерезисного регулятора можуть виникнути проблеми, якщо навантаження має складну АЧХ зі своїми резонансними частотами. Так як цей тип регулятора характеризується відсутністю обмеження частоти перемикання ключових елементів, для усунення цього недоліку пропонується використання модифікованого гістерезисного регулятора з постійною частотою перемикання.

Запишемо  $h$  як функцію напруг  $U_{DC}$  та  $U_H$  згідно з виразом (2.34):



$$h(U_{DC}, U_n) = \frac{(U_{DC} - U_n) \cdot U_n}{f \cdot L \cdot U_{DC}}. \quad (2.35)$$

Тоді частота перемикання буде підтримуватися незмінною шляхом корегування ширини петлі гістерезису  $h$ , що виконується зміною напруги у ланці постійного струму.

На рис. 2.17 представлена структурна схема регулятора струму та система управління ним з підтримкою постійної частоти перемикання, побудована згідно з отриманим виразом (2.35). Система управління виконує розрахунок ширини петлі гістерезису. Похибка  $\xi$ , що виникла при формуванні струму завдання та дорівнює різниці між вимірним струмом компенсатора та струмом завдання, подається на компаратор та порівнюється з половиною ширини  $h$ . У разі перевищення похибкою величини  $h/2$  RS-тригер встановлюється у нуль, струм починає спадати. Похибка також починає зменшуватися до моменту доки не стане менше за  $-h/2$ , тоді тригер встановлюється в одиницю. Безструмова пауза реалізована блоком DT.

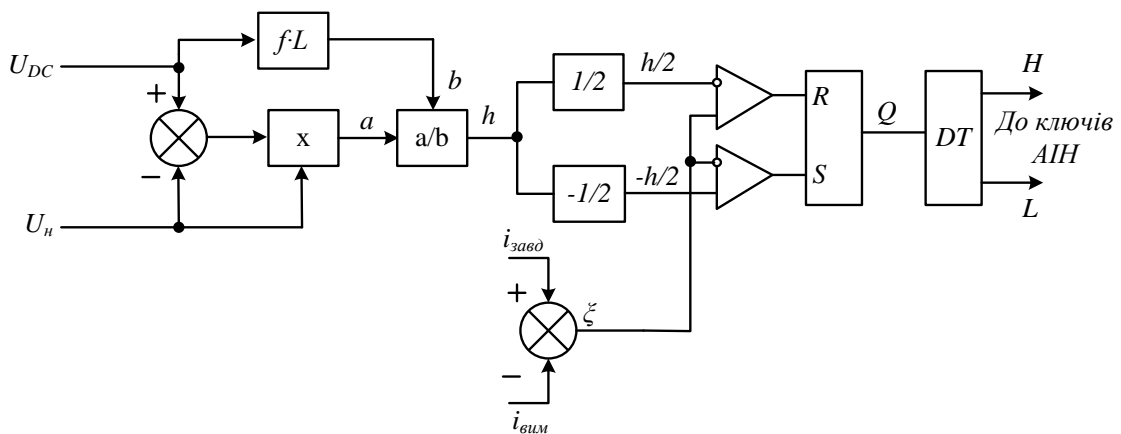


Рис. 2.17. Структурна схема регулятора струму

Часова діаграма, що пояснює роботу RS-тригеру та блоку безструмової паузи, наведена на рис. 2.18. Запізнення при формуванні сигналів на вмикання транзисторів на час безструмової паузи (складає  $0,5 \div 4$  мкс)

необхідне для того, щоб не допустити одночасного вмикання обох транзисторів однієї пари, що призведе до протікання наскрізного струму.

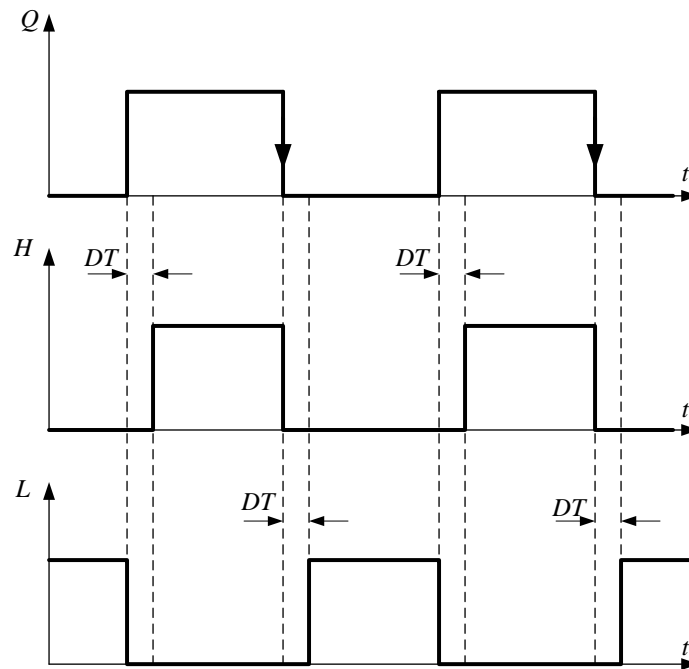


Рис. 2.18. Часова діаграма, що описує формування сигналів для АІН

Запропонована система управління регулятором може бути використана також як адаптивна система. Для цього необхідно на виході RS-тригера виконувати вимірювання частоти перемикання вихідного сигналу та зіставляти її з розрахунковою частотою. У разі виникнення похибки, система управління корегує величину індуктивності прямо під час роботи, тим самим змінюючи сталий коефіцієнт  $f \cdot L$ , що призводить до зміни ширини петлі гістерезису та, як наслідок, частоти сигналу на виході регулятора. Це необхідно для тих випадків, коли індуктивність інтерфейсного фільтру на виході АІН може змінюватися під час роботи (наприклад, якщо осердя виконане з розпиленого заліза та при роботі плавно йде в насичення, індуктивність може змінюватися навіть протягом одного періоду).

Таким чином, запропонована система управління адаптується під зміну величини індуктивності та перераховує її у режимі реального часу, тим самим підтримуючи постійну середню частоту перемикання.

Структурна схема запропонованої системи управління у трифазному виконанні представлена на рис. 2.19 [91, 99].

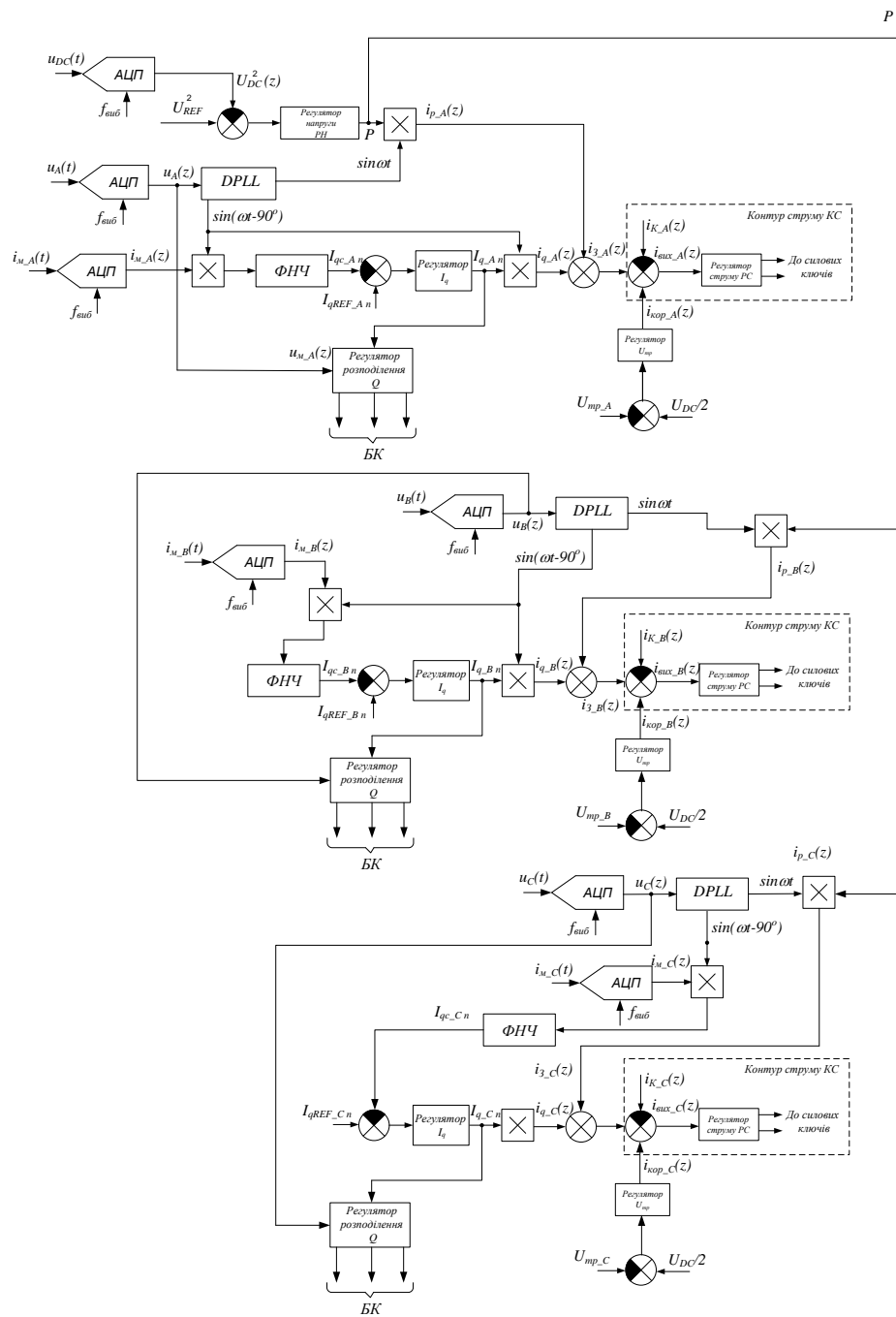
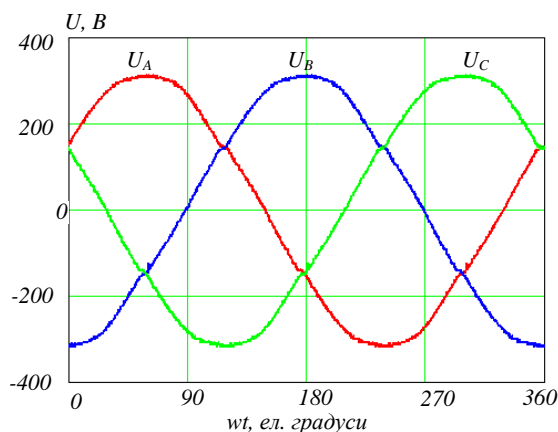
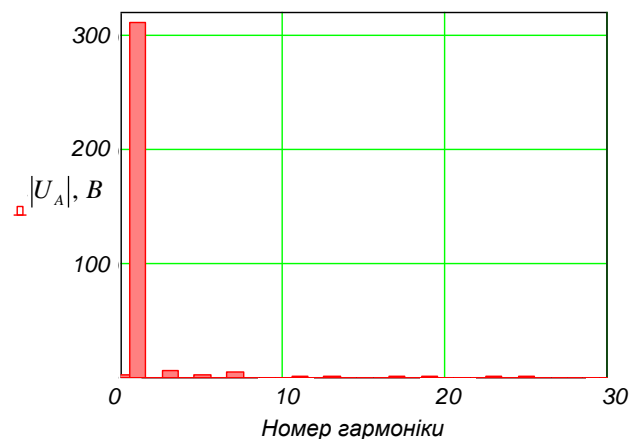


Рис. 2.19. Структурна схема системи управління ГКРП в трифазному виконанні





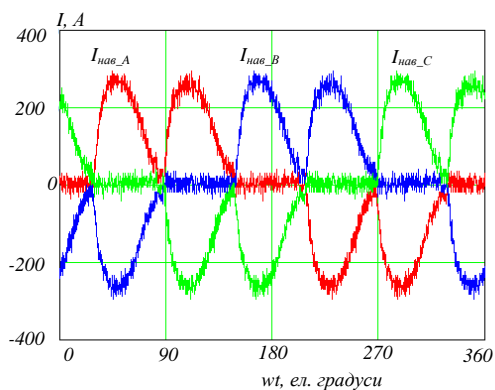
а)



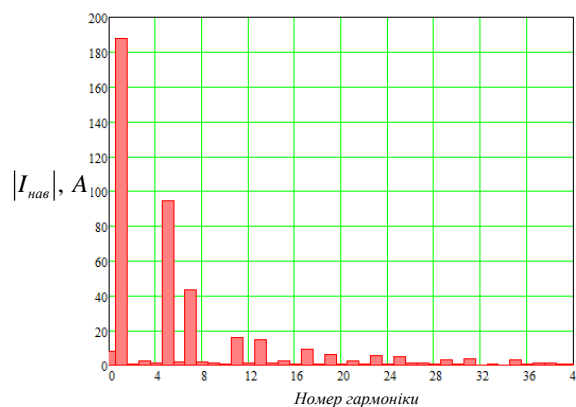
б)

Рис. 2.21. Форми кривих фазної напруги мережі (а) та спектр напруги фази А (б)

Струм навантаження представлений на рис. 2.22. Нелінійне навантаження вводиться до моделі як джерело струму, що задається масивом вибірок оцифрованого струму перетворювача частоти Danfoss з вихідною потужністю близько 23 кВт ( $\text{THD}_I = 57\%$ ).



а)



б)

Рис. 2.22. Форми кривих струмів навантаження а) діаграма струму навантаження; б) спектр струму навантаження фази А

На рис. 2.23 представлена діаграма струмів компенсатора для режиму керування, в якому виконується компенсація реактивної потужності. При

розглянутому методі керування в спектрі струму компенсатора є тільки основна частота мережі [100, 101].

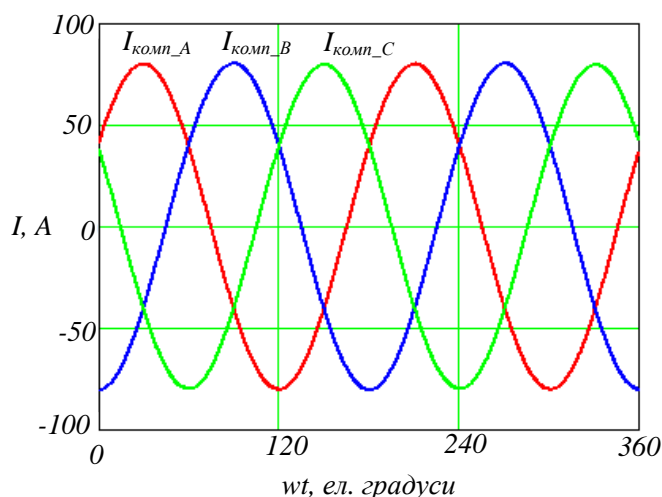


Рис. 2.23. Форми кривих струмів компенсатора

На рис. 2.24 представлені діаграми падіння напруги на БК та ЕРС активного компенсатора. Напряга на БК синусоїдна, тобто батарея ізольована від вищих гармонік, присутніх в напрузі мережі [100, 101].

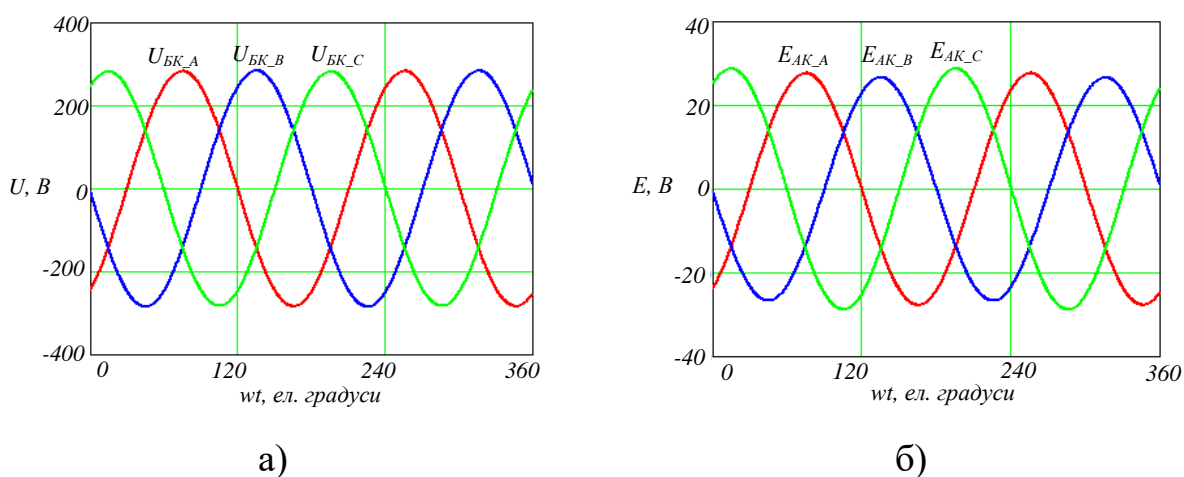


Рис. 2.24. Результати математичного моделювання: а) діаграма падіння напруги на БК; б) діаграма ЕРС активного компенсатора

Форми кривих струму мережі зображені на рис. 2.25а. Спектр струму містить всі вищі гармоніки струму навантаження, проте відсутній фазовий

зсув між струмом і напругою мережі. Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої струму мережі при роботі в даному режимі склав 90%, спектр струму фази А представлений на рис. 2.25б.

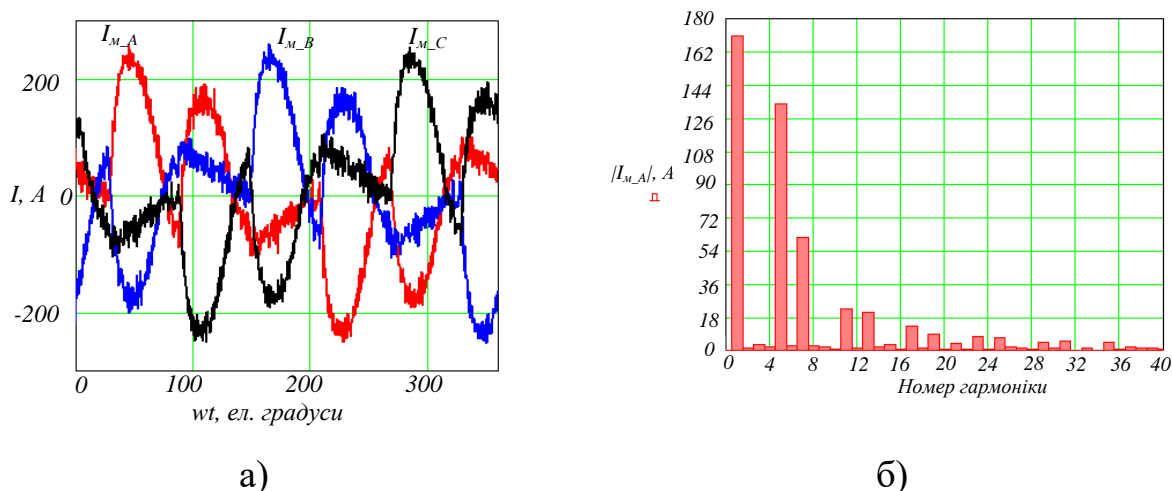


Рис. 2.25. Результати математичного моделювання: а) діаграма струму мережі; б) спектр струму мережі фази А

Наступний підхід до керування ГКРП дозволяє компенсувати реактивну компоненту струму мережі і в допустимих межах «розвантажити» струм мережі від вищих гармонік. У цьому випадку струм завдання компенсатора буде включати не тільки реактивну, а й все гармонійні складові неосновної частоти, які включає спектр струму навантаження.

В систему керування ГКРП, зображену на рис. 2.26, додається контур виділення складових неосновної частоти (на схемі – контур виділення ВГ), який формує струм  $i_{\text{вг}}(t)$  як різницю між струмом мережі і його компонентою з частотою 50 Гц. Отриманий сигнал з протилежним знаком додається до струму завдання компенсатора.

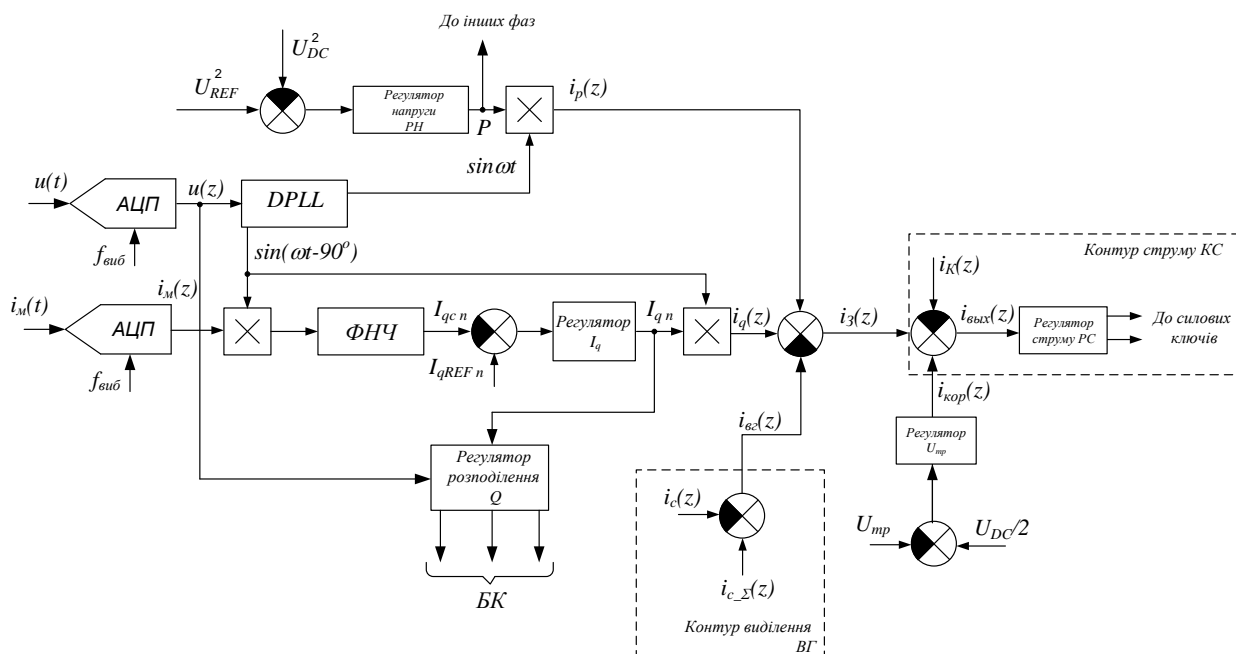


Рис. 2.26. Однофазна структурна схема системи керування ГКРП для режиму компенсації РП та фільтрації ВГ

Для реалізації контуру виділення складових неосновної частоти використаний режекторний фільтр, який налаштований на основну частоту. Його передавальна функція має вигляд [102]:

$$W(s) = \frac{A_0 \cdot \left(1 + \left(\frac{s}{2 \cdot \pi \cdot f_{нал}}\right)^2\right)}{1 + \frac{\Delta f}{f_{нал}} \cdot \frac{s}{2 \cdot \pi \cdot f_{нал}} + \left(\frac{s}{2 \cdot \pi \cdot f_{нал}}\right)^2},$$

де  $f_{нал}$  – частота налаштування фільтру (дорівнює 50 Гц),  $\Delta f$  – смуга частот, на краях якої коефіцієнт передачі падає на 3 дБ (згідно з [103] відхилення частоти приймається рівним 0,4 Гц),  $A_0$  – коефіцієнт передачі постійного сигналу.

На рис. 2.27 представлена амплітудно-частотна характеристика режекторного фільтру з частотою налаштування 50 Гц (кругова частота налаштування складає  $314 \text{ с}^{-1}$ ).



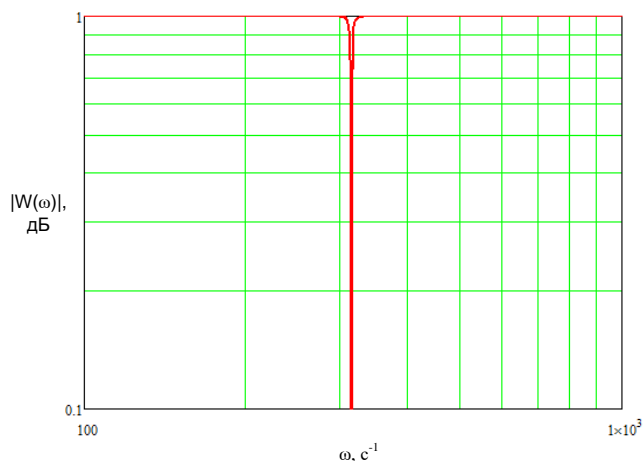


Рис. 2.27. АЧХ режекторного фільтру у безперервній області

За допомогою перетворення Тастіна виконаємо перехід від системи безперервного часу до системи дискретного часу шляхом апроксимації диференціального оператора з наступним чином [104, 105]:

$$s \approx \frac{2}{T_{кв}} \cdot \frac{z-1}{z+1}, \quad (2.36)$$

де  $T_{кв}$  – період квантування, с.

Передавальна функція у дискретній області:

$$W(z) = \frac{A_0 \cdot \left(1 + \left(\frac{T_{кв}}{2 \cdot \pi \cdot f_{нал}} \cdot \frac{z-1}{z+1}\right)^2\right)}{1 + \frac{\Delta f}{f_{нал}} \cdot \frac{T_{кв}}{2 \cdot \pi \cdot f_{нал}} \cdot \frac{z-1}{z+1} + \left(\frac{T_{кв}}{2 \cdot \pi \cdot f_{нал}} \cdot \frac{z-1}{z+1}\right)^2}. \quad (2.37)$$

Для переходу в частотну область у формулі (2.37) замінюємо  $z$  на  $e^{j2\pi fT}$ . Для перевірки правильності виконаних перетворень побудована амплітудна частотна-характеристика фільтру (рис. 2.28).

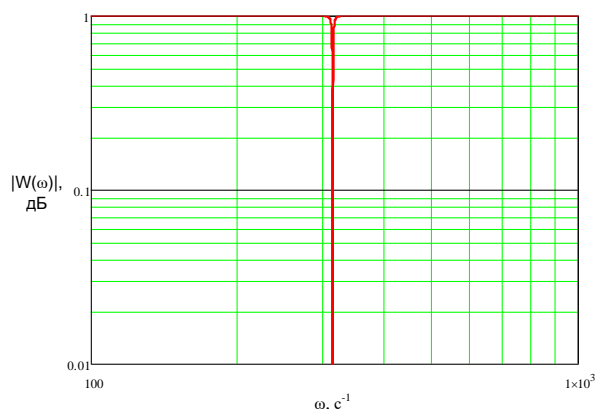


Рис. 2.28. АЧХ режекторного фільтру у дискретній області

Таким чином, виконується фільтрація першої гармоніки струму та виділення складових вищих гармонік.

На рис. 2.29 наведена отримана узагальнена схема досліджуваного ГКРП з системою керування для другої стратегії керування.

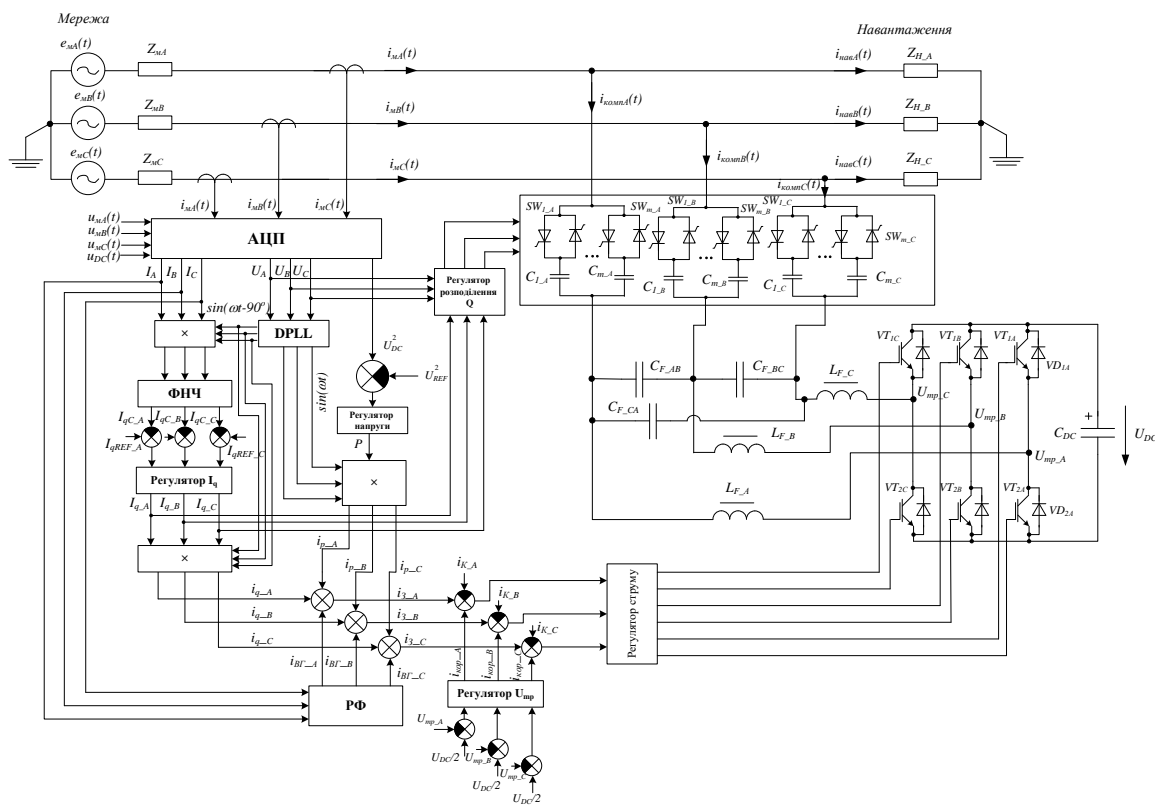
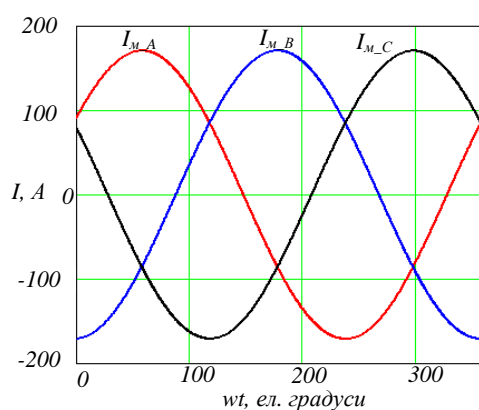
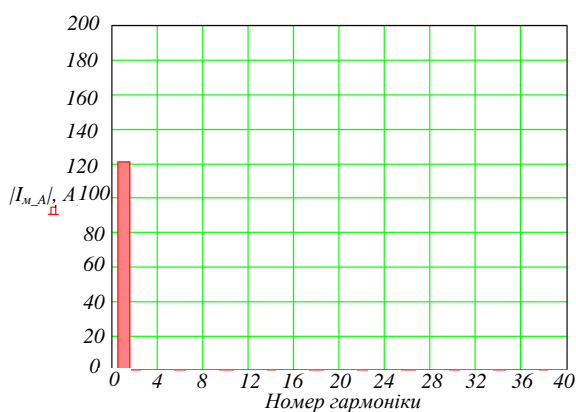


Рис. 2.29. Узагальнена схема досліджуваного ГКРП з системою керування

Осцилограма струму мережі і спектр струму фази А, отримані в результаті математичного моделювання, представлені на рис. 2.30.



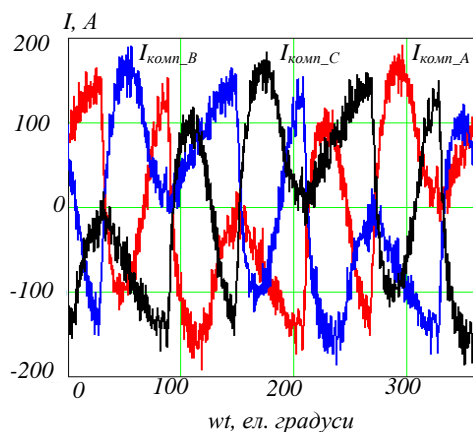
а)



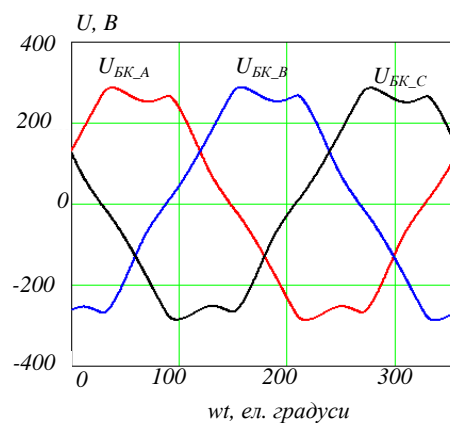
б)

Рис. 2.30. Результати математичного моделювання: а) діаграма струму мережі; б) спектр струму мережі фази А

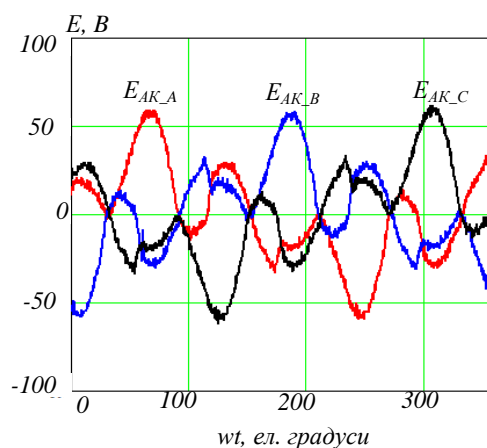
Форми кривих струму компенсатора, напруги на БК і ЕРС АК зображені на рис. 2.31.



а)



б)



в)

Рис. 2.31. Результати математичного моделювання: а) діаграма струму компенсатора; б) діаграма напруги на БК; в) діаграма ЕРС активного компенсатора

В результаті математичного моделювання роботи ГКРП реактивна потужність, яка була скомпенсована, склала 37,35 кВАр, при цьому засобами пасивної частини компенсатора було скомпенсовано 34,03 кВАр. Тобто потужність, що була скомпенсована засобами активної частини, склала 9% від всієї скомпенсованої потужності.

Таким чином, проведене математичне моделювання підтвердило можливість використання запропонованих підходів до керування компенсатором для виконання поставлених задач в чотирипровідних мережах. В залежності від обраної стратегії, забезпечується компенсація

реактивної потужності та фільтрація вищих гармонік, що входять до складу струму навантаження.

### 2.3 Розробка алгоритмів керування роботою ГКРП для трипровідного підключення пристрою до мережі

При аналізі роботи трипровідного підключення компенсатора до мережі доцільно використання методу симетричних складових, оскільки необхідно відфільтровувати струми нульової послідовності.

Принципова схема силовій частини ГКРП представлена на рис. 2.32 [106].

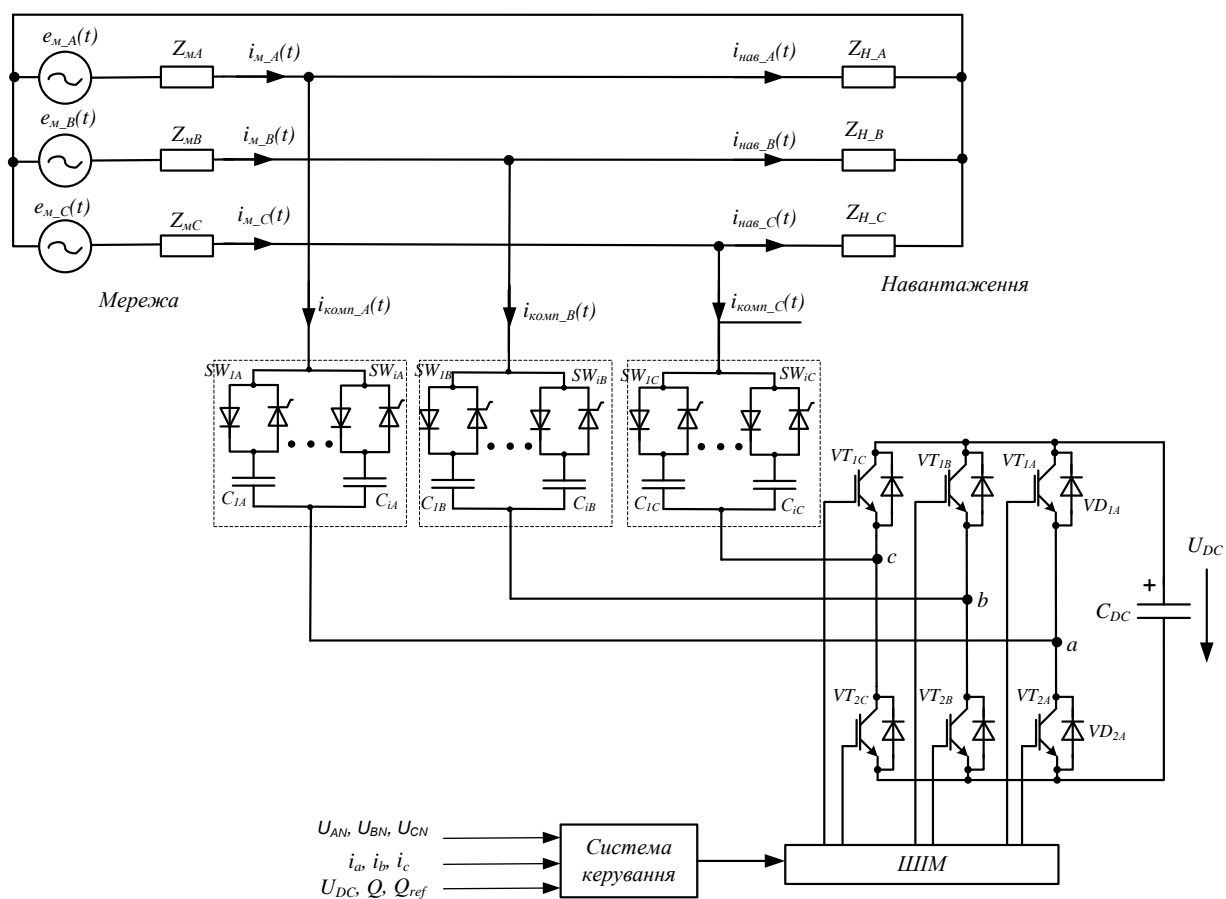


Рис. 2.32. Принципова схема силовій частини ГКРП при трипровідному підключенні пристрою до мережі

Розрахункова схема заміщення представлена на рис. 2.33.

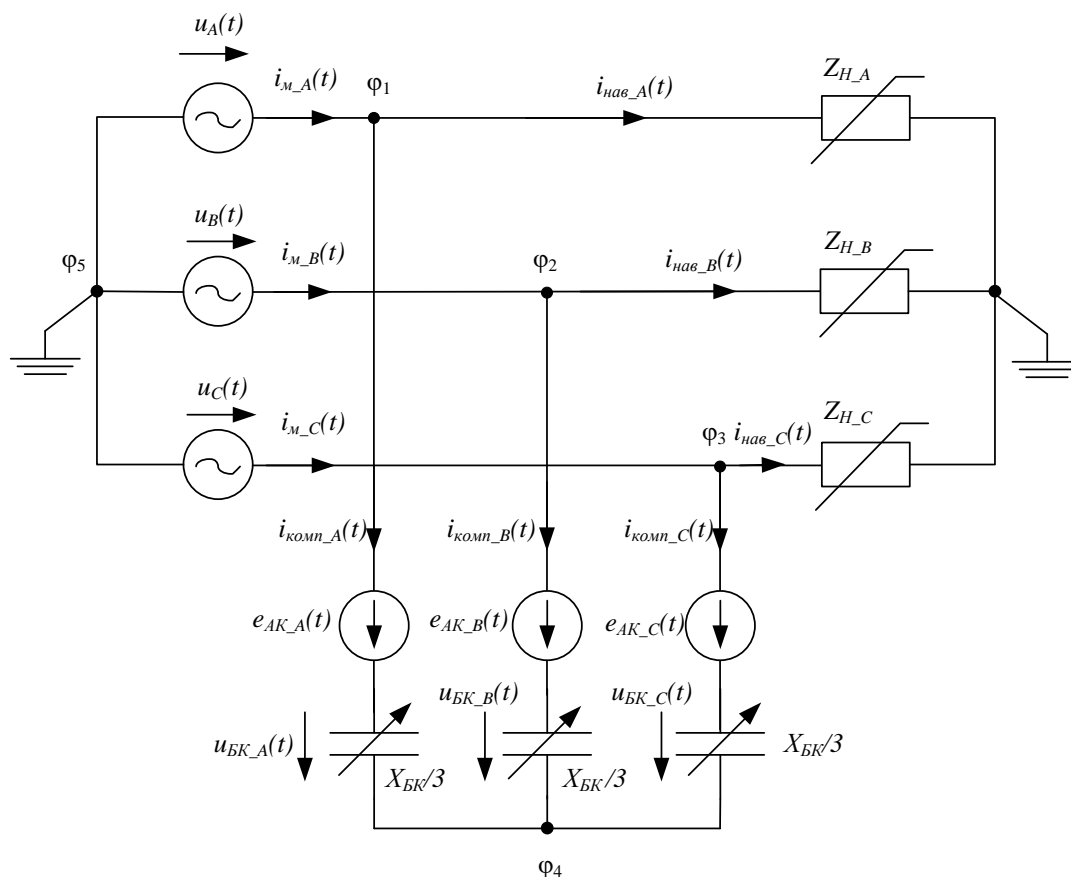


Рис. 2.33. Розрахункова схема заміщення при трифазному підключенні ГКРП до мережі

Так як на практиці переважна більшість трифазних БК випускаються з внутрішньою схемою з'єднання «трикутник», пасивна частина компенсатора представлена трифазною БК з трьома виводами, однак для спрощення представлення результатів був виконаний перехід до еквівалентної «зірки» [107].

Після виділення прямої послідовності струму навантаження  $I_{нав\_np}$  і напруги мережі  $U_{np}$  на основній частоті отримаємо вираз для розрахунку реактивної компоненти прямої послідовності струму навантаження [100]:

$$I_{нав\_q} = \frac{Im(U_{np} \cdot \overline{I_{нав\_np}})}{|U_{np}|}. \quad (2.38)$$

Ємність БК в кожній фазі для внутрішньої схеми з'єднання «трикутник»:

$$X_{БК} = \frac{3 \cdot |U_{np}|}{I_{нав\_q}}. \quad (2.39)$$

Вибір встановленої ємності ступеню проводиться згідно з алгоритмом (2.5)-(2.10).

Падіння напруги на БК:

$$U_{БК\_np} = I_{нав\_q} \cdot e^{j(\arg(U_{np}) + 90^\circ)} \cdot \left(-j \cdot \frac{X_{БК}}{3}\right). \quad (2.40)$$

Величина ЕРС активного компенсатора, яка вводиться для досягнення необхідного рівня реактивної потужності:

$$E_{АК\_np} = U_{np} - U_{БК\_np}. \quad (2.41)$$

При розрахунку параметрів фільтру для схеми заміщення зворотної послідовності в першу чергу виконується виділення зворотної послідовності струму навантаження  $I_{нав\_звор}$  та напруги мережі  $U_{звор}$ . Зворотна послідовність напруги на БК:

$$U_{БК\_звор} = -I_{нав\_звор} \cdot \left(-j \cdot \frac{X_{БК}}{3}\right), \quad (2.42)$$

а ЕРС активного компенсатора:

$$E_{АК\_звор} = U_{звор} - U_{БК\_звор}. \quad (2.43)$$

Перейдемо від розрахованих  $U_{БК}$  та  $E_{АК}$  прямої і зворотної послідовностей до фазних значень [19]:

$$\begin{cases} U_{БК\_A} = U_{БК\_np} + U_{БК\_звор}; \\ U_{БК\_B} = \alpha^2 \cdot U_{БК\_np} + \alpha \cdot U_{БК\_звор}; \\ U_{БК\_C} = \alpha \cdot U_{БК\_np} + \alpha^2 \cdot U_{БК\_звор}; \end{cases} \quad (2.44)$$

$$\begin{cases} E_{АК\_A} = E_{АК\_np} + E_{АК\_звор}; \\ E_{АК\_B} = \alpha^2 \cdot E_{АК\_np} + \alpha \cdot E_{АК\_звор}; \\ E_{АК\_C} = \alpha \cdot E_{АК\_np} + \alpha^2 \cdot E_{АК\_звор}, \end{cases} \quad (2.45)$$

де  $\alpha$  – оператор трифазної системи ( $\alpha = e^{j120^\circ}$ ).

Розрахуємо фазні струми компенсатора за методом вузлових потенціалів, при цьому потенціал вузла 5  $\varphi_5$  приймемо рівним нулю (вузли пронумеровані на рис. 2.33), а величини потенціалів інших вузлів розрахуємо:

$$\varphi_1 = U_A; \quad \varphi_2 = U_B; \quad \varphi_3 = U_C; \quad (2.46)$$

$$\varphi_4 = \frac{\frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3}{-j \cdot X_{БК} / 3} - \frac{E_{АК\_A} + E_{АК\_B} + E_{АК\_C}}{-j \cdot X_{БК} / 3}}{3 / (-j \cdot X_{БК} / 3)}. \quad (2.47)$$

Фазні струми, що протікають через компенсатор:

$$\begin{aligned} I_{комп\_A} &= \frac{\varphi_1 - \varphi_4 - E_{АК\_A}}{-j \cdot X_{БК} / 3}; \\ I_{комп\_B} &= \frac{\varphi_2 - \varphi_4 - E_{АК\_B}}{-j \cdot X_{БК} / 3}; \\ I_{комп\_C} &= \frac{\varphi_3 - \varphi_4 - E_{АК\_C}}{-j \cdot X_{БК} / 3}. \end{aligned} \quad (2.48)$$



Розглянутий підхід до розрахунку струму завдання компенсатора реалізований в системі керування, структурна схема якої представлена на рис. 2.34. Виділення сигналів прямої і зворотної послідовностей струмів і напруг мережі виконується відповідними фільтрами (на схемі фільтри напруги ФНПП і струму ФСПП прямої послідовності, напруги ФНЗП і струму ФСЗП зворотної послідовності). Зворотній перехід виконаний в блоці формування фазних струмів.

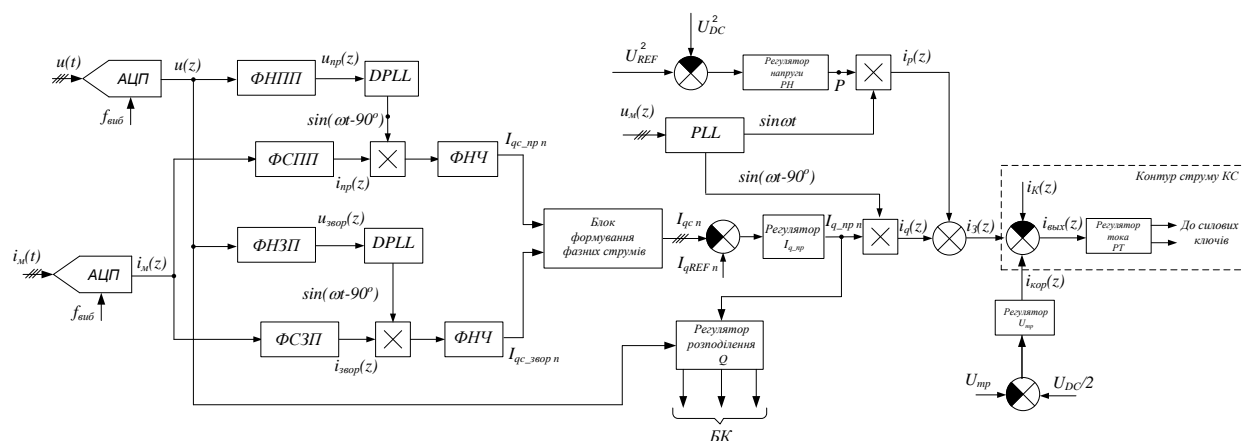


Рис. 2.34. Структурна схема керування роботою ГКРП при трипровідному підключенні

Для реалізації фільтру напруги прямої послідовності використана структурна схема, представлена на рис. 2.35. Фільтр струму прямої послідовності виконується аналогічно.

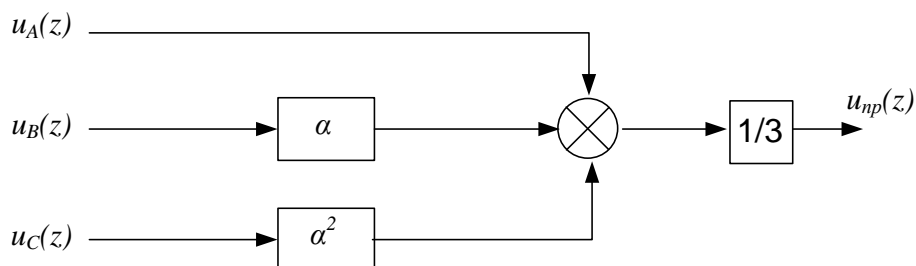


Рис. 2.35. Структурна схема фільтру напруги прямої послідовності для фази А

Для реалізації зсуву на  $120^\circ$  використані аперіодичні ланки [108].  
Передавальна функція аперіодичної ланки першого порядку має наступний вигляд:

$$W(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1} \quad (2.49)$$

З огляду на те, що небажано використовувати диференціатор для виконання зсуву уперед, оператори повороту реалізовуємо з використанням зсуву назад:  $\alpha = e^{j \cdot 120^\circ} = e^{-j \cdot 240^\circ}$ ;  $\alpha^2 = e^{j \cdot 240^\circ} = e^{-j \cdot 120^\circ}$ .

Так як за допомогою аперіодичної ланки першого порядку можна реалізувати максимальний зсув на  $-90^\circ$ , для виконання зсуву на  $-120^\circ$  використані дві ланки, фазо-частотна характеристика кожної з яких проходить через точку  $-60^\circ$  на частоті мережі [108]. Крім того, на частоті мережі амплітуда підтримується постійною. Виходячи з цього розраховані постійні часу аперіодичної ланки:  $K = 2$ ,  $T = 5,513 \cdot 10^{-3}$  с.

Таким чином, зсув на  $-120^\circ$  реалізований двома аперіодичними ланками з розрахованими коефіцієнтами, а зсув на  $-240^\circ$  – чотирма ланками, що проілюстровано на рис. 2.36.

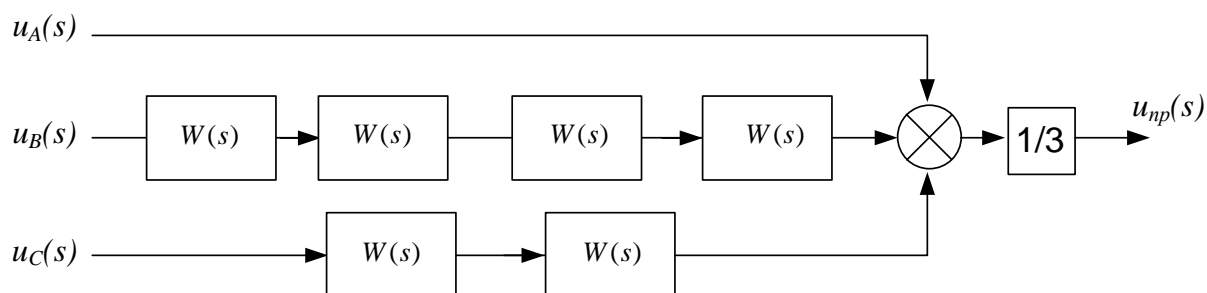


Рис. 2.36. Розгорнута структурна схема фільтру напруги прямої послідовності

Опишемо обрані аперіодичні ланки у дискретній формі згідно з [109, 110]:

$$W^*(s) = \frac{1}{T_p} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{K}{T \cdot (s + j \cdot n \cdot \omega_p) + 1} = \frac{K}{T} \cdot \frac{e^{s \cdot T_p}}{e^{s \cdot T_p} - e^{\frac{-T_p}{T}}}, \quad (2.50)$$

де  $T_p = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_p}$  – період квантування,  $n$  – номер гармоніки частоти квантування.

Так як  $z = e^{s \cdot T_p}$ , то

$$W^*(z) = \frac{K}{T} \cdot \frac{z}{z - e^{\frac{-T_p}{T}}} = \frac{K}{T} \cdot \frac{z}{z - a}.$$

На рис. 2.37 представлена структурна схема фільтру напруги зворотної послідовності. Фільтр струму зворотної послідовності виконується аналогічно.

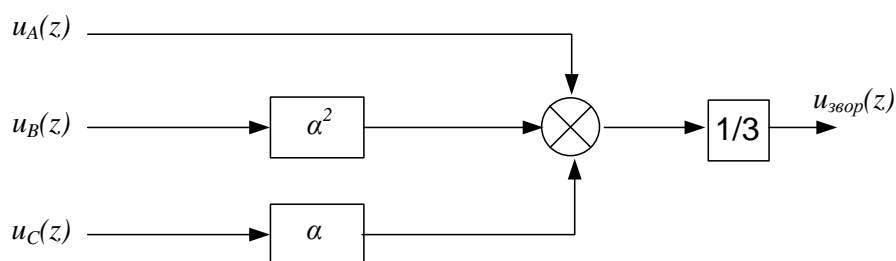


Рис. 2.37. Структурна схема фільтру напруги зворотної послідовності для фази А

Структурна схема блоку формування фазних струмів представлена на рис. 2.38.

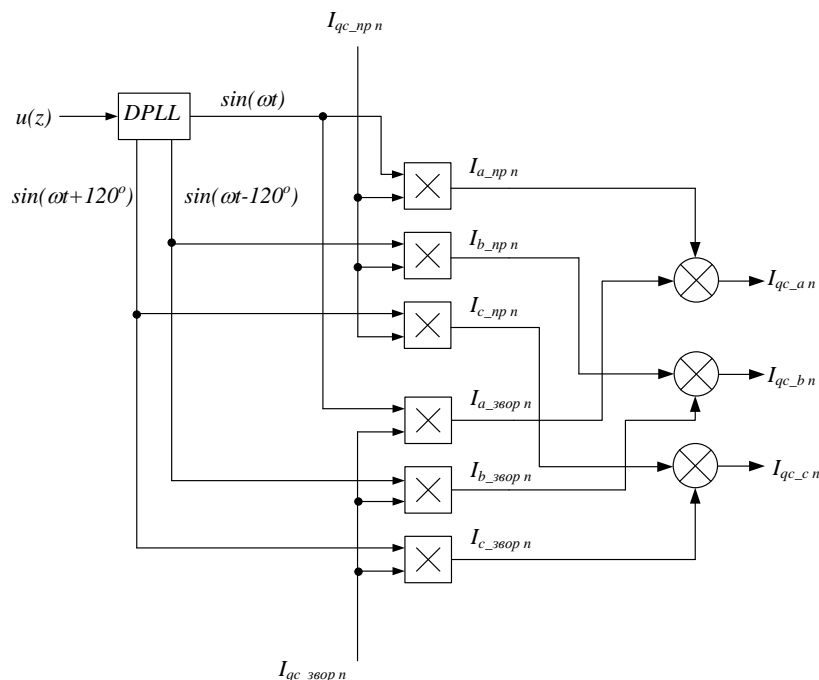
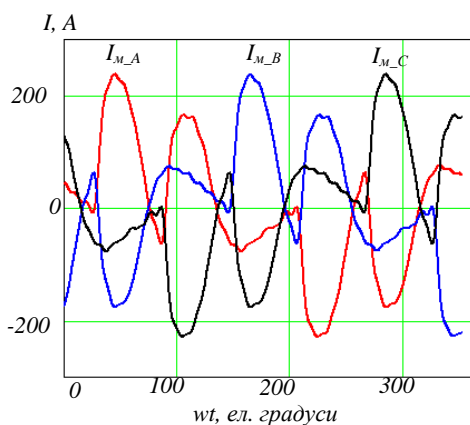


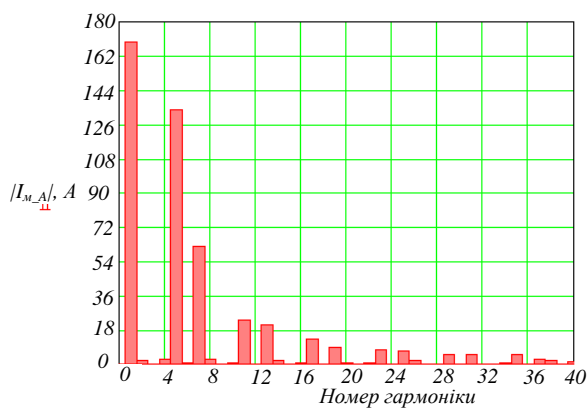
Рис. 2.38. Структурна схема блока формування фазних струмів

При дослідженні підходу до керування компенсатором, при якому виконується тільки компенсація реактивної компоненти струму, були отримані наступні результати математичного моделювання [111]:

1) виконана компенсація реактивної потужності, струм мережі містить всі вищі гармоніки струму навантаження (рис. 2.39).  $THD_I$  складає 89.8%.



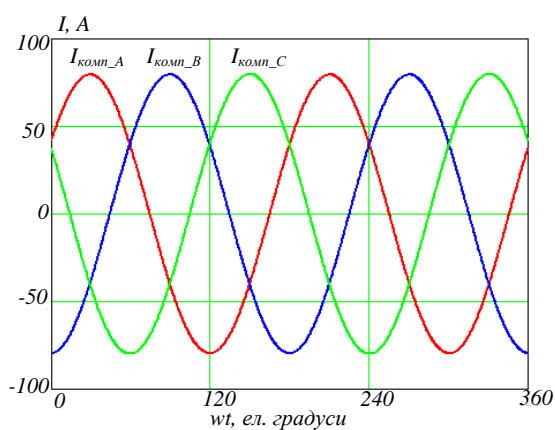
а)



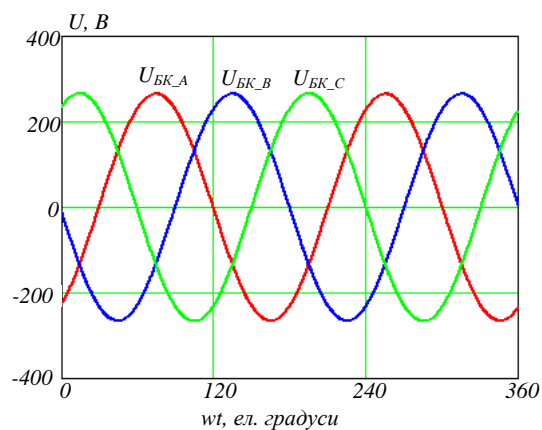
б)

Рис. 2.39. Результати математичного моделювання: а) діаграми струмів мережі; б) спектр струму мережі фази А

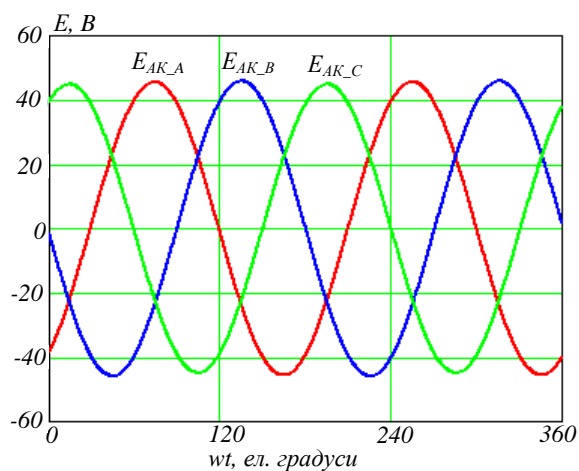
2) струм і напруга на БК, ЕРС АК носять чисто синусоїдний характер (рис. 2.40).



а)



б)



в)

Рис. 2.40. Результати математичного моделювання: а) діаграми струмів компенсатора; б) діаграми падіння напруги на БК; в) діаграми ЕРС активного компенсатора

При виборі другого підходу до керування компенсатором для реалізації функції фільтрації вищих гармонік доданий контур виділення компонент неосновної частоти (рис. 2.41) [111].

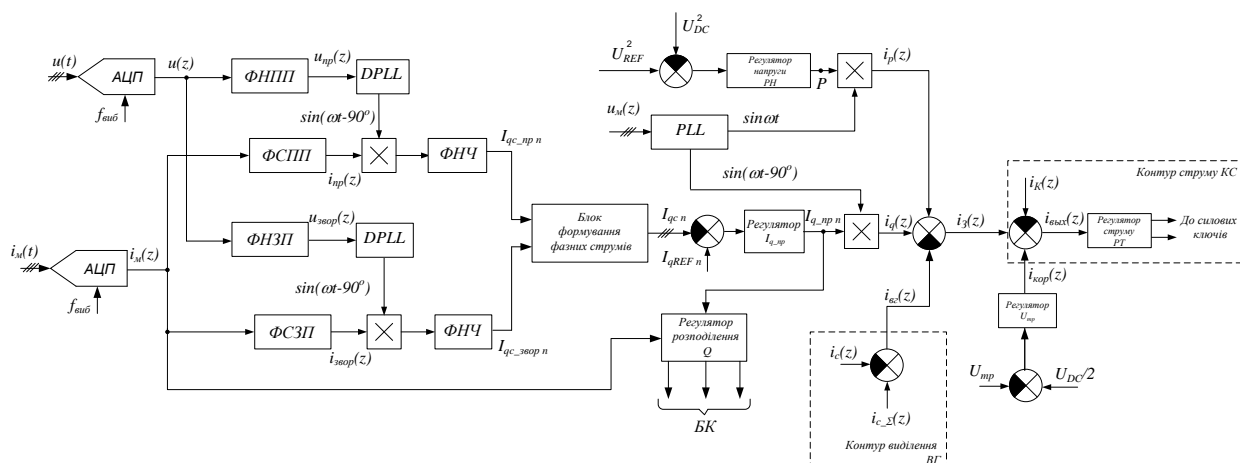
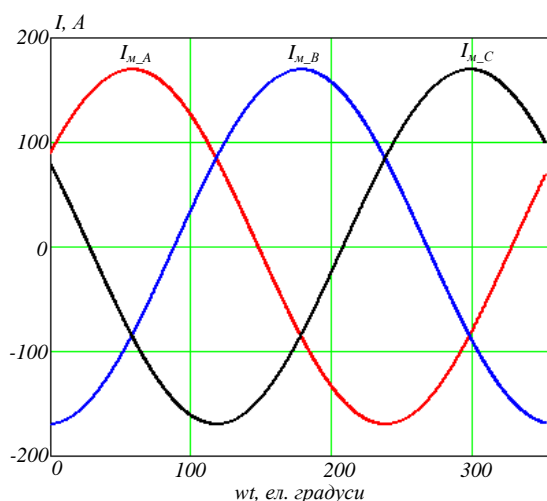


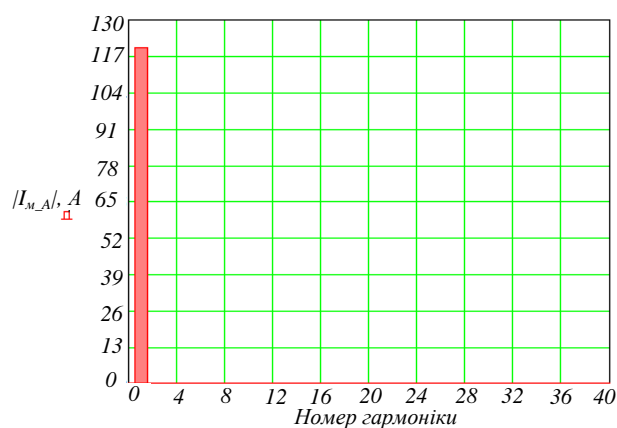
Рис. 2.41. Структурна схема керування роботою ГКРП при трипровідному підключенні в режимі компенсації РП та фільтрації ВГ

В цьому випадку отримані наступні результати моделювання:

1) струм мережі носить синусоїдний характер, нульовий зсув фази між струмом і напругою (рис. 2.42).



а)



б)

Рис. 2.42. Результати математичного моделювання: а) діаграми струмів мережі; б) спектр струму мережі фази А

2) струм і напруга на БК, а також ЕРС АК насичені компонентами вищих гармонік, форми кривих зображені на рис. 2.43.

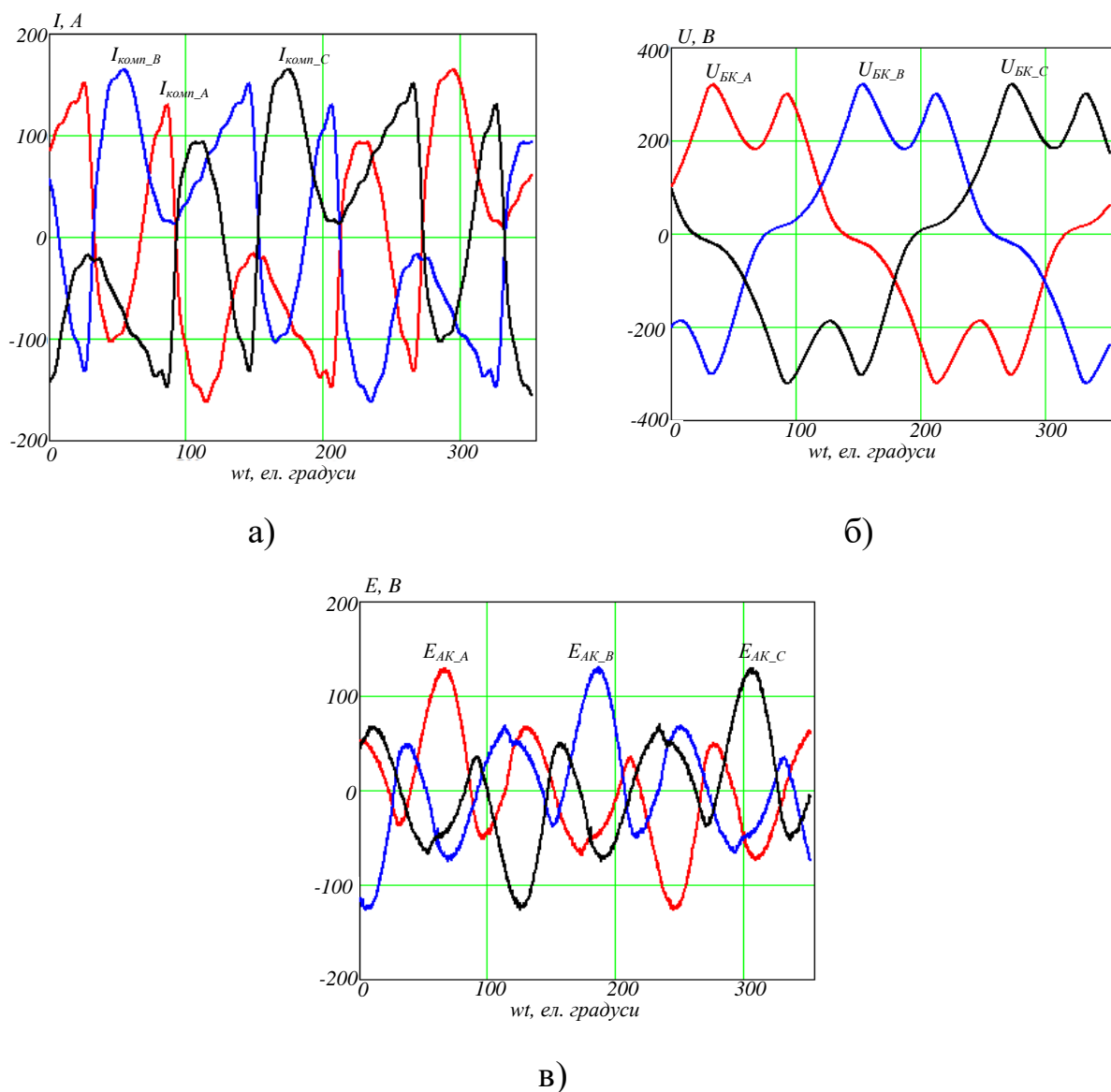


Рис. 2.43. Результати математичного моделювання: а) діаграми струмів компенсатора; б) діаграми падіння напруги на БК; в) діаграми ЕРС активного компенсатора

В результаті математичного моделювання роботи ГКРП реактивна потужність, яка була скомпенсована, склала 37,16 кВАр, при цьому засобами пасивної частини компенсатора було скомпенсовано 31,64 кВАр. Тобто потужність, що була скомпенсована засобами активної частини, склала 15% від всієї скомпенсованої потужності.

## Висновки до розділу 2

1. Запропоновані методики вибори ємностей ступенів пасивної частини компенсатора встановлюються у відповідності до розробленого алгоритму, що дозволяє забезпечити плавність регулювання реактивної потужності та мінімізувати питому потужність активної частини компенсатора

2. Використання розроблених методик розподілення ємності БК на ступені дозволяє зменшити кількість використовуваних конденсаторів.

3. Виконаний математичний опис роботи гібридного компенсатора реактивної потужності, який включає в себе процеси, що протікають у електричній мережі, електричному навантаженню, яке споживає несинусоїдні струми, та процеси у гібридному компенсаторі з системою керування. У математичному описі розраховані струм завдання та струм компенсації. Перевірена можливість роботи запропонованої системи у режимі компенсації реактивної потужності та режимі додаткової компенсації неактивних складових струму мережі. Представлені результати математичного моделювання роботи запропонованої системи при чотирипровідному та трипровідному підключенні пристрою до мережі.

4. Розроблений спосіб стабілізації напруги ланки постійного струму, що дозволяє зменшити час перехідного процесу при стрибкоподібній зміні потужності навантаження до двох періодів напруги мережі і мінімізувати ємність конденсаторів ланки постійного струму активного компенсатора.

5. Обґрунтована доцільність використання модифікованого гістерезисного регулятора з постійною частотою перемикання у якості регулятора струму завдання, що дозволяє забезпечити швидке формування заданого струму та автоматично обмежити його величину, при цьому час регулювання – мінімальний. Запропонована адаптивна система управління регулятором, яка перераховує величину індуктивності інтерфейсного фільтру у режимі реального часу, тим самим підтримуючи постійну середню частоту перемикання.



6. За допомогою математичного моделювання виконано теоретичне обґрунтування можливості застосування запропонованих підходів до керування гібридним компенсатором. Досліджено роботу компенсатора при трипровідному та чотирипровідному підключенні до мережі. Реалізована поставлена задача компенсації реактивної компоненти струму мережі, забезпечена можливість зменшення коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої струму мережі. Забезпечено роботу гібридного ГКРП в умовах несиметрії напруги живлення.

### РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГІБРИДНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЗА УМОВИ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ

#### 3.1 Моделювання роботи ГКРП в умовах симетричної напруги живлення

Коректність запропонованих алгоритмів керування роботою ГКРП в динаміці перевірена в графічному середовищі імітаційного моделювання Simulink пакета Matlab.

Для розрахунку величини реактивної потужності, яку необхідно компенсувати, та струму завдання використаний алгоритм, заснований на теорії миттєвої потужності. Відповідно до обраного алгоритму виконується перетворення векторів, що обертаються в системі координат a-b-c, в нерухому у просторі систему координат  $\alpha$ - $\beta$ -0 (т.зв. перетворення Кларка) [112]:

$$\begin{bmatrix} f_{\alpha} \\ f_{\beta} \\ f_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

де  $f_{\alpha}$ ,  $f_{\beta}$ ,  $f_0$  – функція в координатах  $\alpha$ - $\beta$ -0;  $f_a$ ,  $f_b$ ,  $f_c$  – функція в координатах a-b-c.

Загальний вигляд функції в системі координат  $\alpha$ - $\beta$  наведений на рис. 3.1.

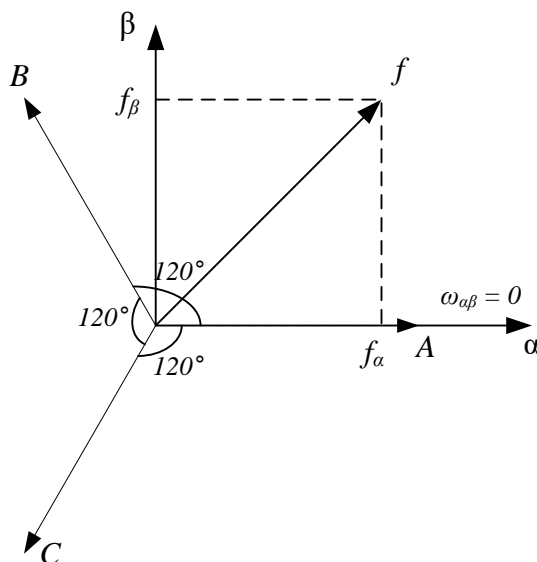


Рис. 3.1. Функція в координатах  $\alpha$ - $\beta$

Систему координат  $\alpha$ - $\beta$ -0 доцільно використовувати лише у разі симетричної трифазної системи напруг, бо при несиметрії напруг розглянутий метод є нездатним компенсувати ВГ, навіть більш того – є додатковим джерелом ВГ струму, тому його застосування небажано при наявності несиметрії або несинусоїдності напруги.

Шляхом виконання описаних перетворень вектора напруги мережі і струму навантаження представлені у вигляді двох проекцій на осі  $\alpha$ ,  $\beta$  –  $\dot{I}_{\text{нав}\alpha,\beta} = i_\alpha + j \cdot i_\beta$  та  $\dot{U}_{\text{м}\alpha,\beta} = u_\alpha + j \cdot u_\beta$ , відповідно. Тоді розрахувати повну потужність можна наступним чином [19]:

$$S = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = p + j \cdot q, \quad (3.2)$$

де  $p = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$  – миттєва активна потужність,  $q = \begin{bmatrix} u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$  – миттєва реактивна потужність.

Миттєва активна потужність представляє собою сукупність енергії, яку потрібно передати від джерела навантаження за одиницю часу (постійна

складова  $p_{nocm}$ ), та енергії, якою обмінюється джерело з навантаженням за одиницю часу (осцилююча складова  $p_{occy}$ ) [16]. Миттєва реактивна потужність  $q$  кількісно характеризує процеси обміну енергією між фазами.

Струми завдання компенсатора в системі координат  $\alpha$ - $\beta$  визначаються змінною складовою миттєвої активної потужності і миттєвої реактивної потужності [16, 113, 114]:

$$\begin{cases} i_{комп\_α}^* = \frac{1}{u_α^2 + u_β^2} \cdot \begin{bmatrix} u_α & u_β \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p - p_{nocm} \\ q \end{bmatrix}; \\ i_{комп\_β}^* = \frac{1}{u_α^2 + u_β^2} \cdot \begin{bmatrix} u_β & -u_α \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p - p_{nocm} \\ q \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (3.3)$$

де  $i_{комп\_α}^*$ ,  $i_{комп\_β}^*$  – струми завдання компенсатора в  $\alpha$ - $\beta$ -координатах, А;  $u_α$ ,  $u_β$  – напруга мережі, представлена в  $\alpha$ - $\beta$ -координатах, В;  $p$  – миттєва активна потужність, Вт;  $p_{nocm}$  – постійна складова миттєвої активної потужності, Вт;  $q$  – миттєва реактивна потужність, ВАр.

Струми завдання компенсатора  $i_{k\_A}^*$ ,  $i_{k\_B}^*$ ,  $i_{k\_C}^*$  в системі координат а-в-с визначаються як:

$$\begin{cases} i_{комп\_A}^* = \frac{2}{3} \cdot i_{комп\_α}^*; \\ i_{комп\_B}^* = -\frac{1}{3} \cdot i_{комп\_α}^* + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_{комп\_β}^*; \\ i_{комп\_C}^* = -\frac{1}{3} \cdot i_{комп\_α}^* - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_{комп\_β}^*. \end{cases} \quad (3.4)$$

Описаний підхід реалізований у системи керування, що зображена на рис. 3.2 [114].



несиметричним навантаженням (блок Series RLC Load), а несинусоїдність кривої струму отримана шляхом включення шестипульсного випрямляча, на виході якого підключене RC-навантаження (що імітує роботу частотного приводу потужністю 20 кВт) (рис. 3.4) [115].

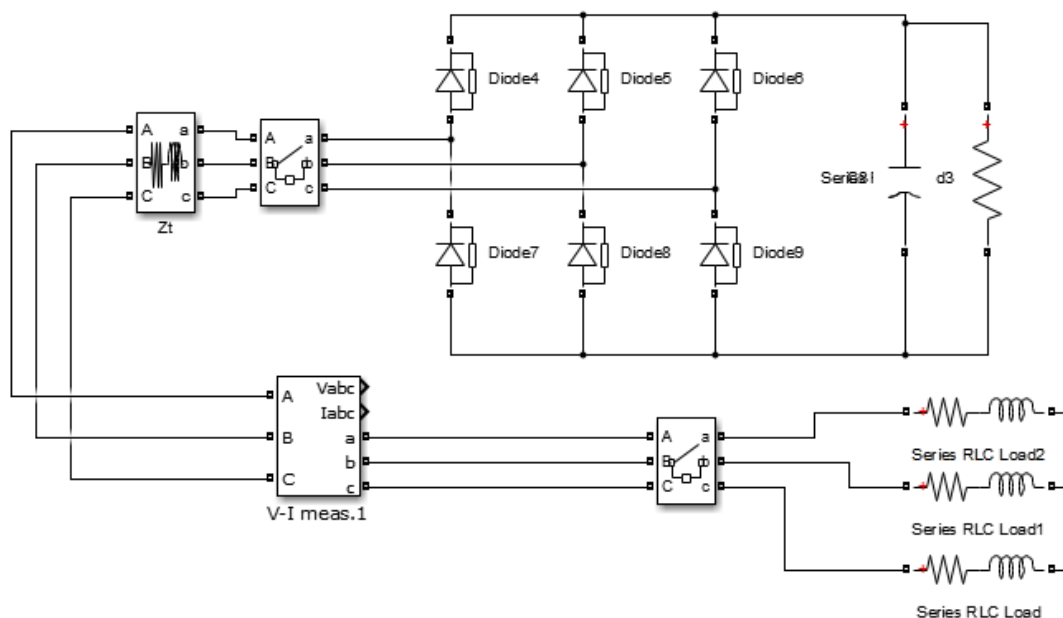


Рис. 3.4. Підсистема моделювання навантаження з несинусоїдним споживаним струмом і споживанням реактивної потужності

Підключення компенсатора проводиться через 20 мс після початку моделювання, що пов'язано з виникненням перехідних процесів в перший період роботи мережі.

Отримане значення реактивної потужності використовується для розрахунку ємності  $C$  пасивної частини компенсатора. Розглянута частина системи керування представлена на рис. 3.5.

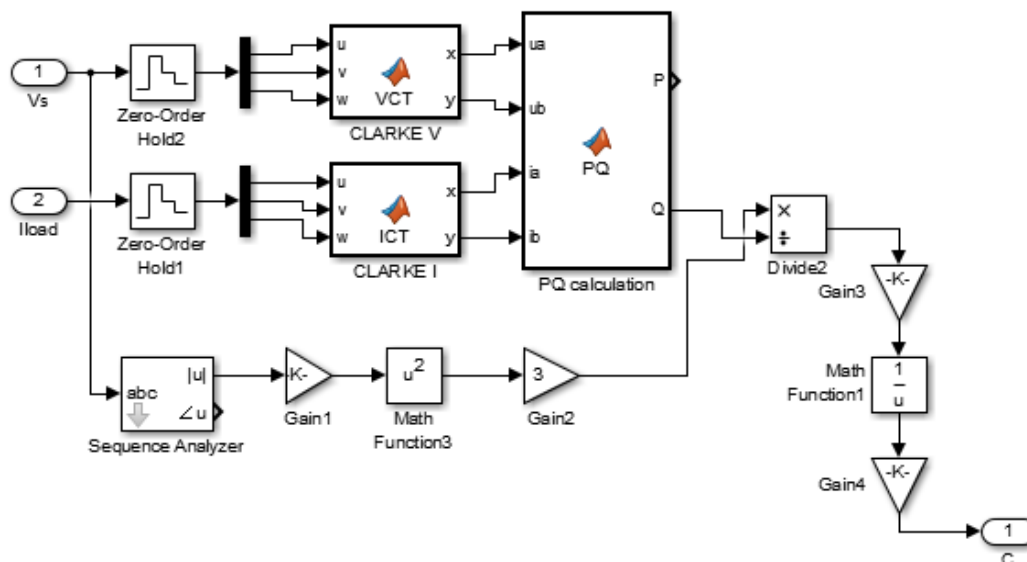


Рис. 3.5. Підсистема розрахунку ємності завдання

Розраховане значення  $C$  використовується для вибору оптимальної ємності батареї конденсаторів. Методика вибору ємностей ступенів БК описана в п. 2.1. В таблиці 3.1 представлені обрані ємності ступенів пасивної частини ГКРП.

Таблиця 3.1

### Ємності ступенів пасивного компенсатора

Номер ступеню	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C$ , мкФ	150	183	223	273	333	406	496	605	738	900

Підсистема розрахунку струму завдання активної частини компенсатора зображена на рис. 3.6. Активна складова струму враховує втрати на перемикання транзисторних ключів і активну потужність навантаження (шляхом низькочастотної фільтрації виділена перша гармоніка). Реактивна складова струму розрахована, виходячи з величини реактивної потужності, яку необхідно компенсувати [116].

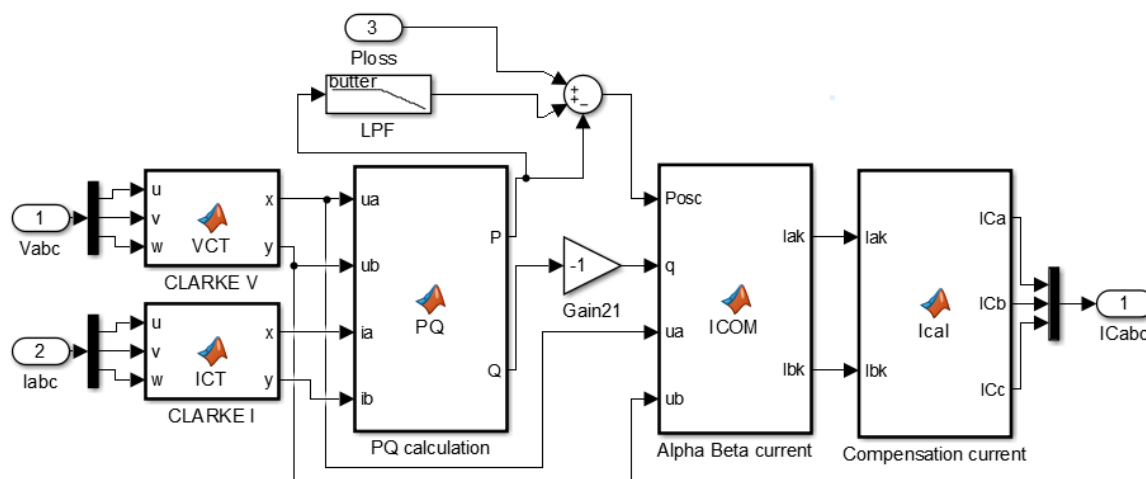


Рис. 3.6. Підсистема розрахунку струму завдання компенсатора

Схема з'єднання активної і пасивної частин компенсатора представлена на рис. 3.7 [117].

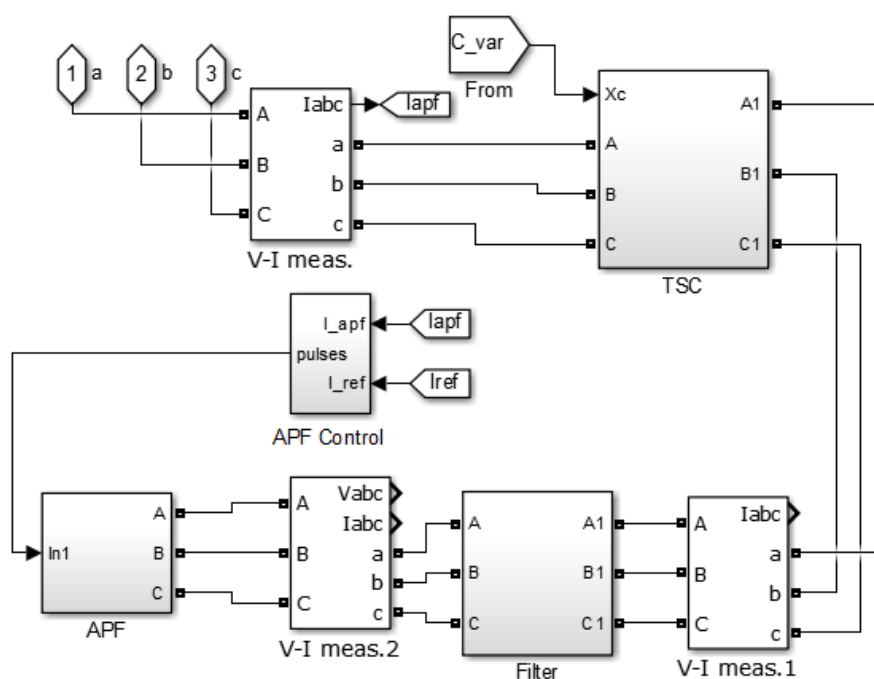


Рис. 3.7. Гібридний компенсатор реактивної потужності

Блок TSC являє собою БК з тиристорним перемиканням (рис.2.1). Ємності ступенів БК встановлюються згідно з алгоритмом (2.5)-(2.10). Ємність завдання для пасивного фільтра розрахована згідно (2.39).



Активний компенсатор (блок APF) виконаний на базі автономного інвертора напруги (блок Universal Bridge 3 arms), для формування вихідної напруги інвертора заданої форми використовується гістерезисне струмове керування (блок APF Control, рис. 3.7, підсистема наведена на рис. 3.8).

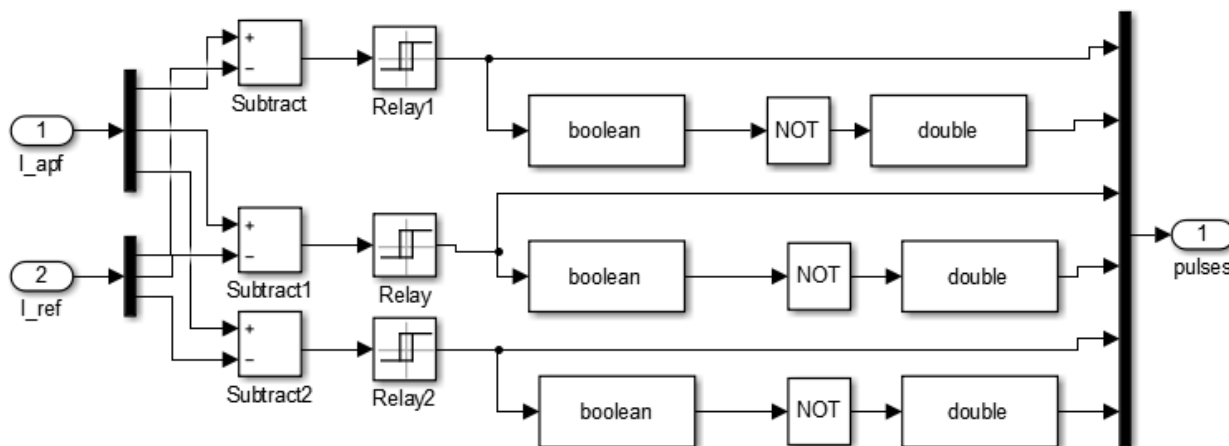


Рис. 3.8. Підсистема керування інвертором напруги

На виході інвертора встановлений інтерфейсний фільтр (блок Filter) для згладжування модуляційних складових вихідного струму інвертора. Підсистема моделювання інтерфейсного фільтра представлена на рис. 3.9. Вибір параметрів інтерфейсного фільтра виконується згідно з алгоритмом, наведеним у [92].

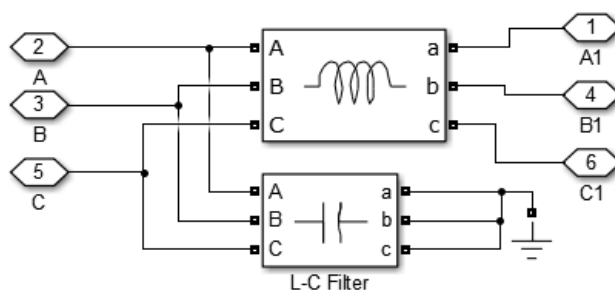


Рис. 3.9. Підсистема моделювання інтерфейсного фільтра

Перевірка роботи обраної системи керування виконана в декількох режимах [118, 119].

Розглянемо варіант, коли необхідно компенсувати як реактивну потужність, так і вищі гармоніки. На рис. 3.10 представлені напруга і струм навантаження.

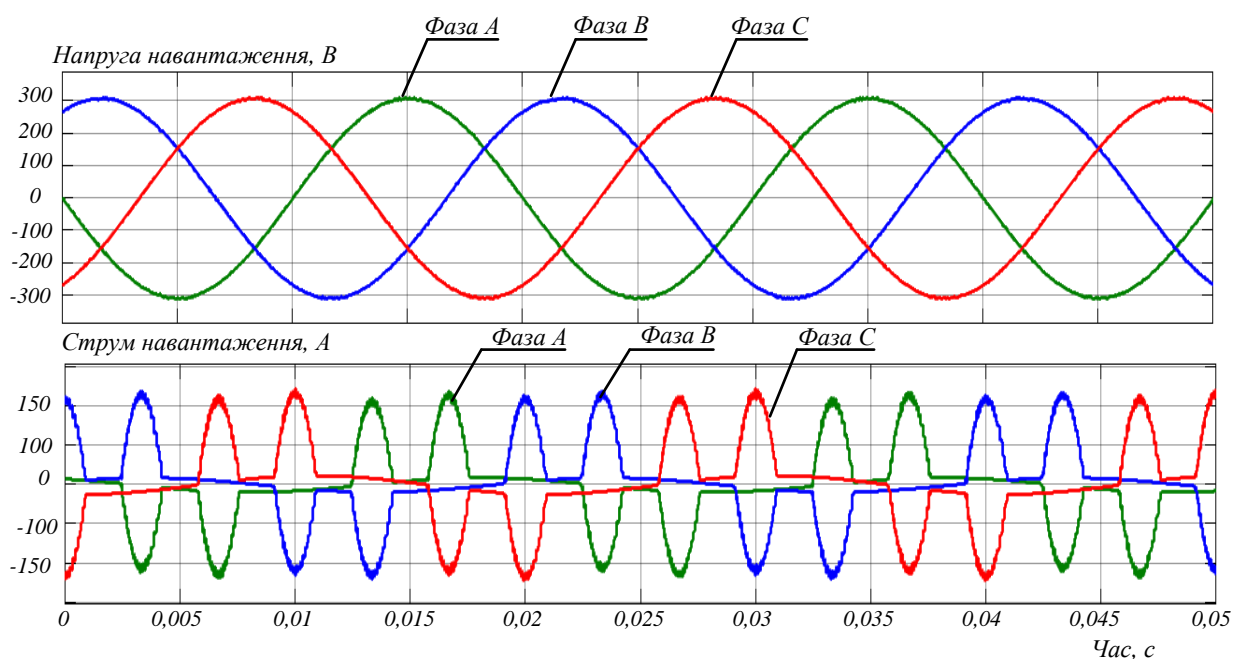


Рис. 3.10. Осцилограми напруги та струму навантаження

Спектральний склад струму навантаження представлений на рис. 3.11. Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої струму  $THD_I$  склав 27,39%, коефіцієнт потужності PF дорівнює 0,7.

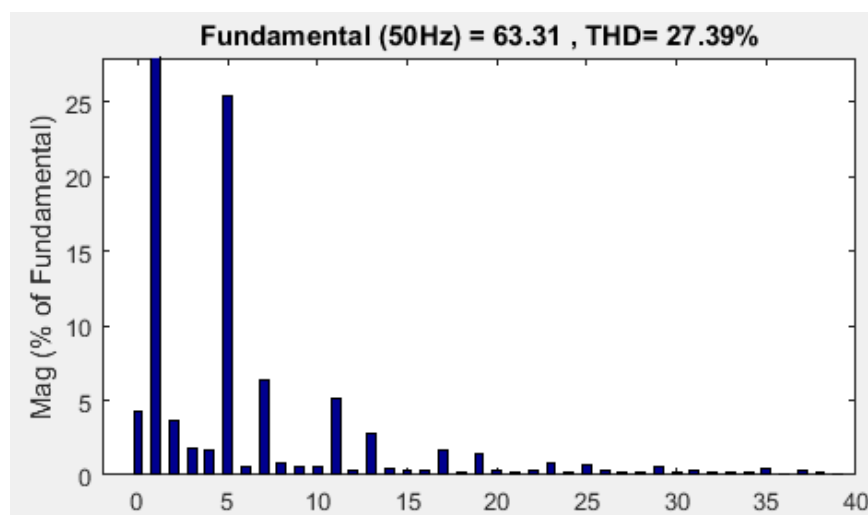


Рис. 3.11. Спектр струму навантаження фази А

Струм завдання для інвертора і струм, що протікає через компенсатор, представлені на рис. 3.12.

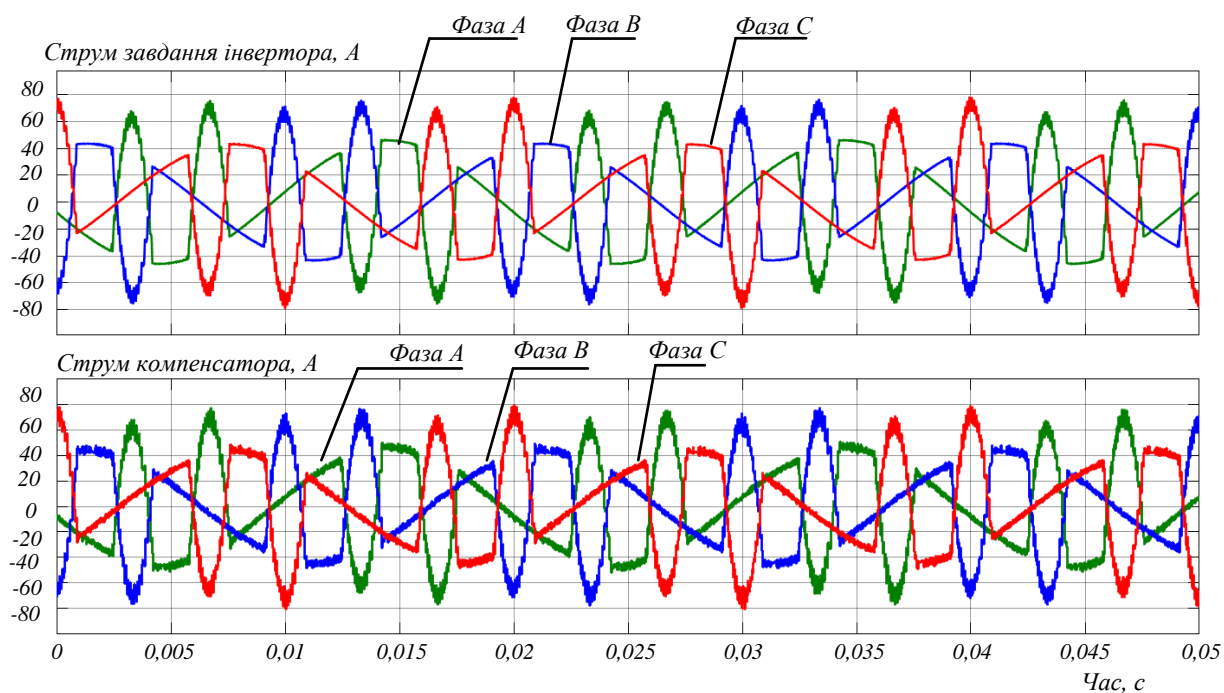


Рис. 3.12. Осцилограми розрахункового струму завдання інвертора та струму, що протікає через компенсатор

В розглянутому випадку забезпечується нульовий фазовий зсув між напругою та струмом мережі, але крім того додатково виконується компенсація вищих гармонік, що входять до спектру струму навантаження. Таким чином, підтримується синусоїдна форма струму мережі. На рис. 3.13 зображені напруга та струм мережі, струм компенсатора.

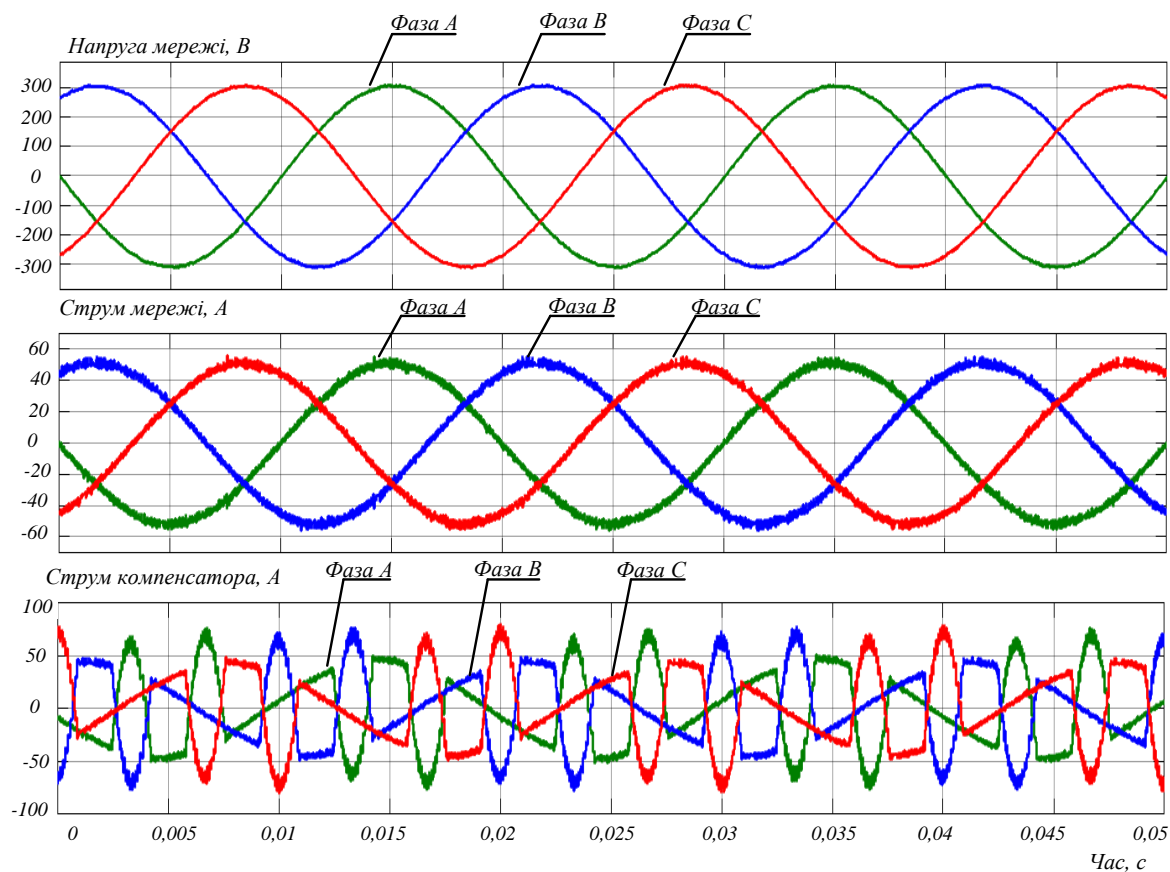


Рис. 3.13. Результати імітаційного моделювання: осцилограми напруги та струму мережі, струму компенсатора

На рис. 3.14 представлений спектр струму мережі у фазі А. Коефіцієнт  $\text{THD}_I = 2,83\%$ , коефіцієнт потужності  $\text{PF} = 0,98$ .

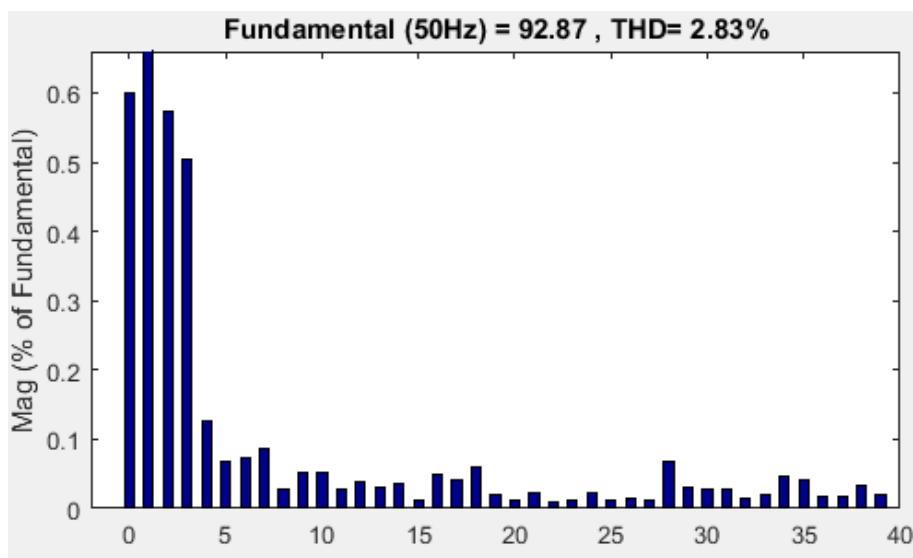


Рис. 3.14. Спектр струму мережі фази А

Забезпечується нульовий фазовий зсув між напругою та струмом мережі (рис. 3.15).

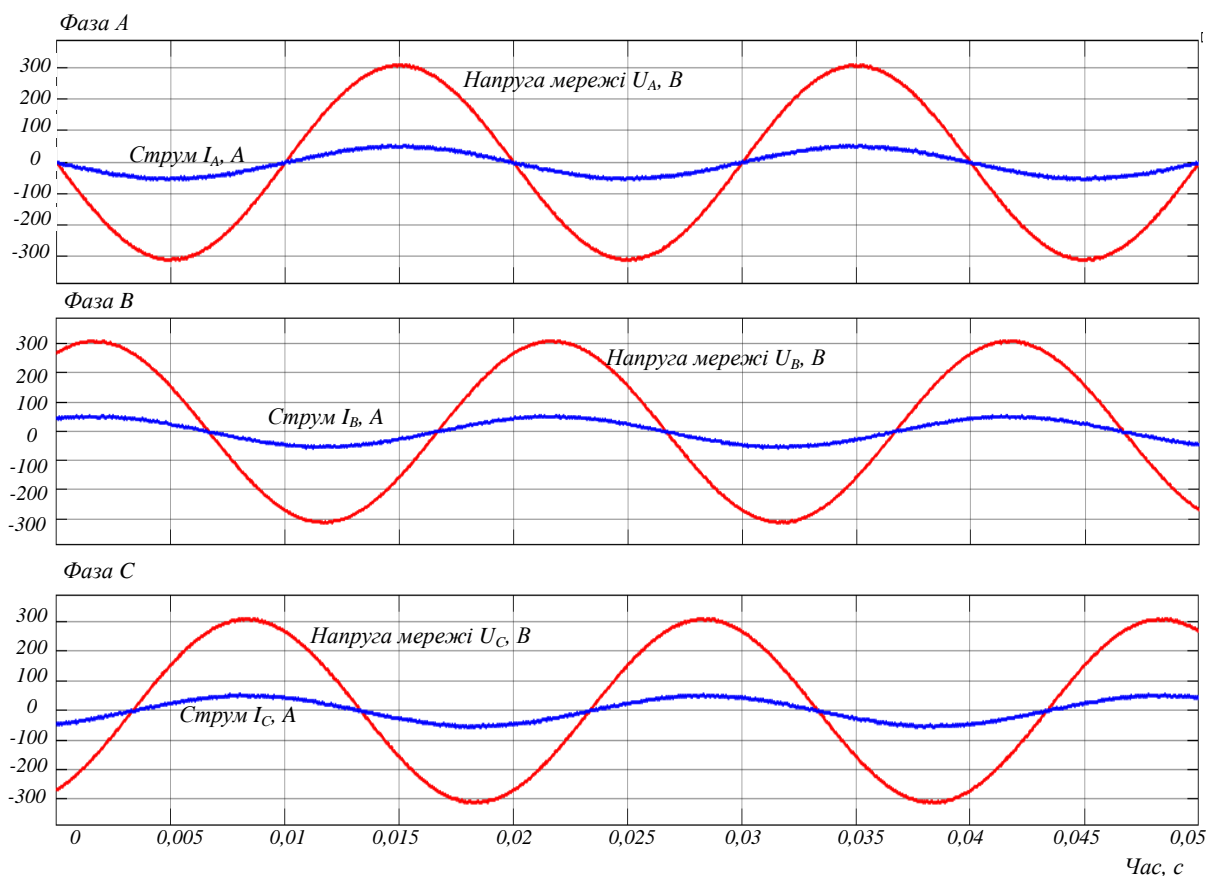


Рис. 3.15. Результати імітаційного моделювання: суміщені осцилограми напруги та струму мережі у трьох фазах

Розглянутий режим роботи, при якому ГКРП виконує виключно компенсацію реактивної складової струму навантаження, при цьому не корегуючи спектральний склад. В цьому випадку осцилюючі складові миттєвої активної і реактивної потужностей дорівнюють нулю, тобто в системі (3.3):  $p - p_{пост} = 0$ , а  $q = q_{пост}$ , де  $q_{пост}$  – постійна складова миттєвої реактивної потужності, ВАр [120].

Тоді блок розрахунку струму завдання компенсатора буде виглядати наступним чином (рис. 3.16).

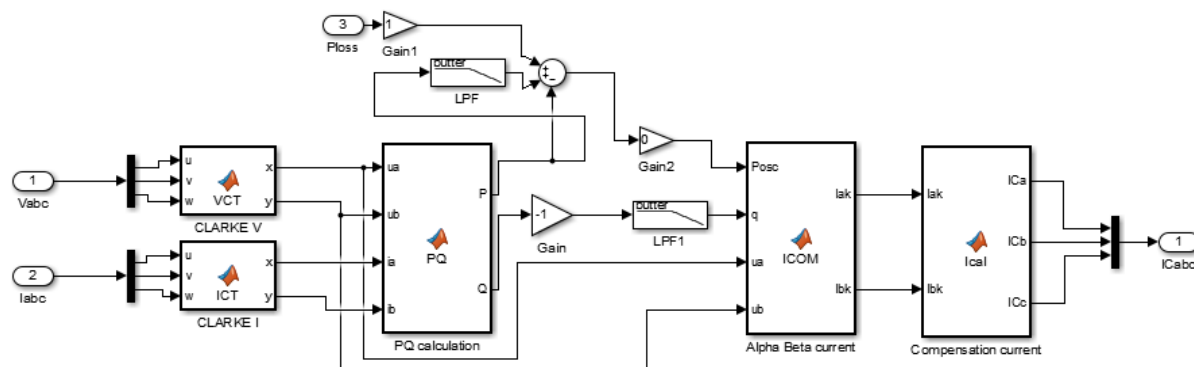


Рис. 3.16. Підсистема розрахунку струму завдання при умові компенсації виключно реактивної потужності

Фільтрація складової реактивної потужності на основній частоті виконується за допомогою фільтра низьких частот (блок Analog Filter, встановлений тип фільтру – Lowpass).

Струм завдання для інвертора і струм, що протікає через компенсатор, представлені на рис. 3.17. Струм носить синусоїдний характер (THD<sub>i</sub> склав 2,1%), тобто батарея конденсаторів, що входить до складу компенсатора, повністю ізольована від струмів вищих гармонік.

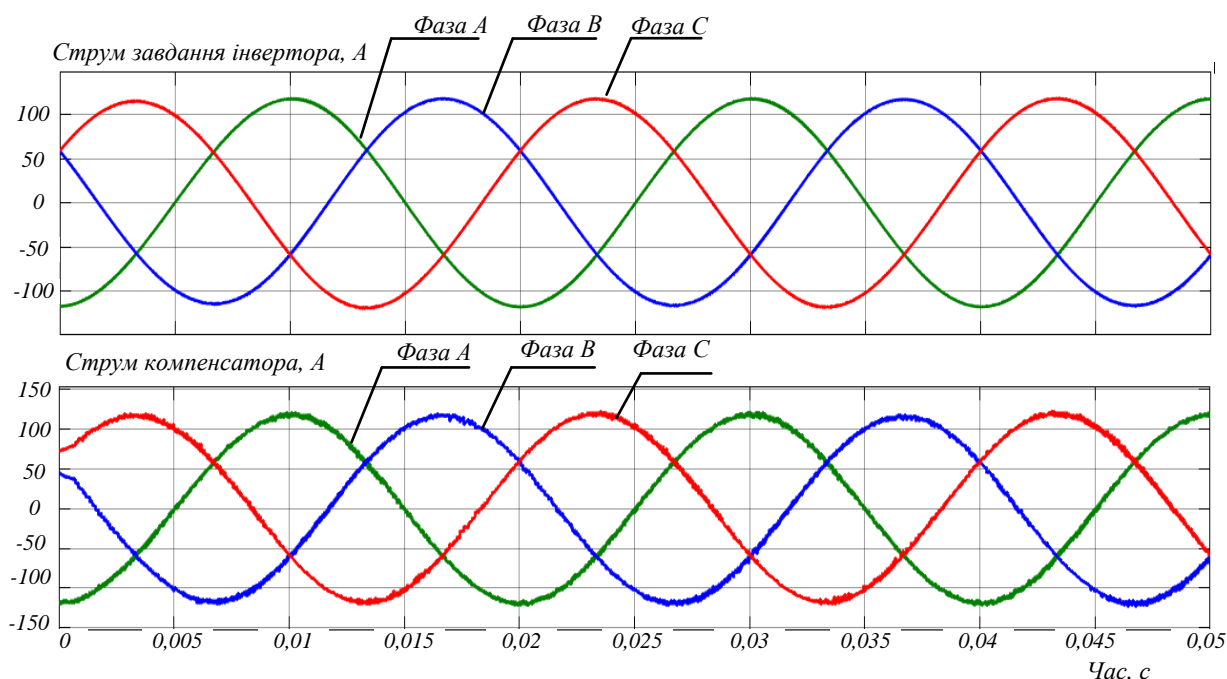


Рис. 3.17. Осцилограми розрахункового струму завдання інвертора та струму, що протікає через компенсатор

На рис. 3.18 зображені напруга та струм мережі, струм компенсатора.

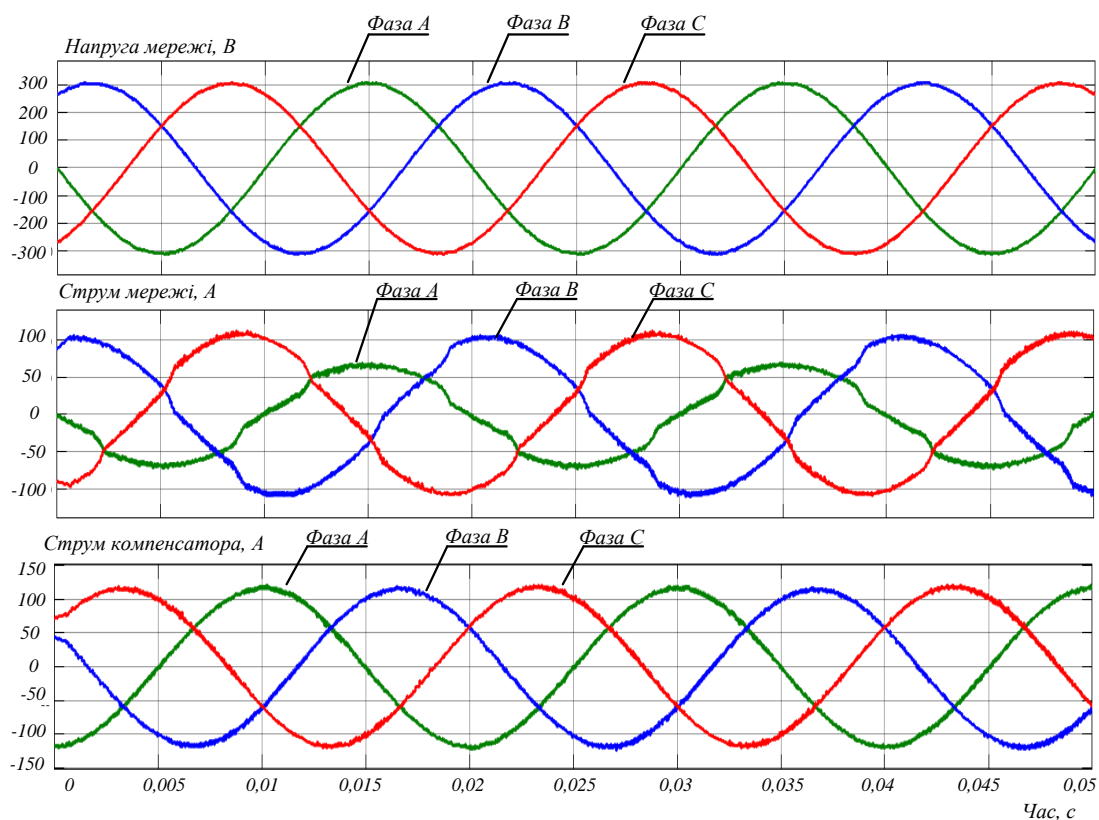


Рис. 3.18. Результати імітаційного моделювання: осцилограми напруги та струму мережі, струму компенсатора

Для струму мережі  $\text{THD}_I = 7,9\%$  (рис. 3.19), коефіцієнт потужності PF дорівнює 0,97.

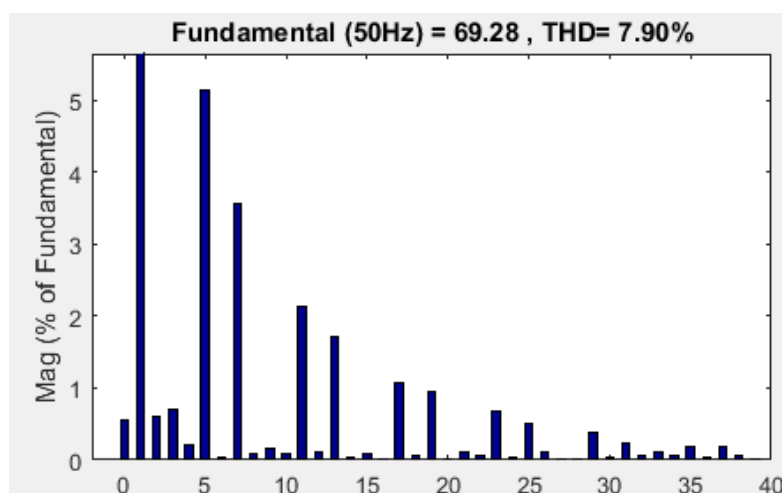


Рис. 3.19. Спектр струму мережі фази А

На рис. 3.20 представлені форми напруги та струму мережі. Залишається невеликий фазовий зсув, але більша частина реактивної складової струму скомпенсована.

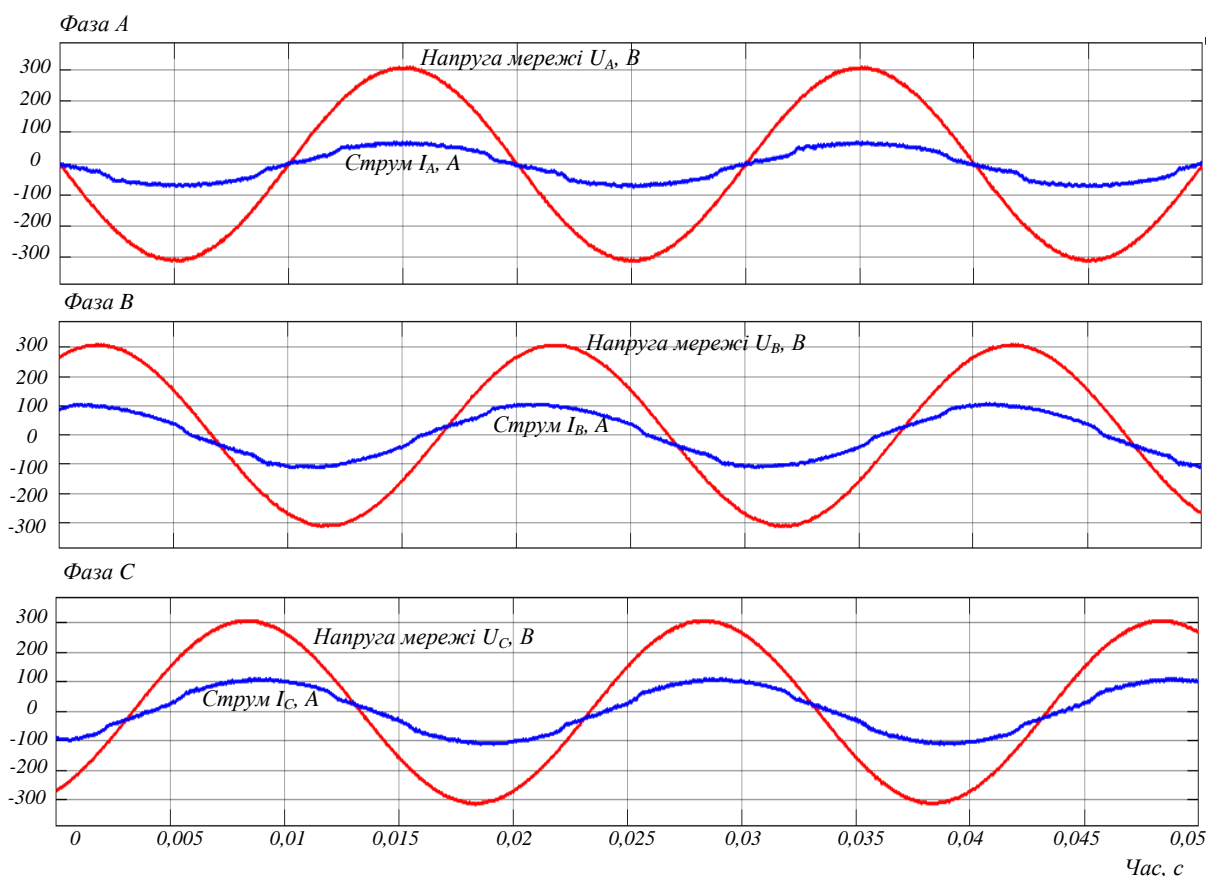


Рис. 3.20. Результати імітаційного моделювання: суміщені осцилограми напруги та струму мережі у трьох фазах

В результаті проведеного імітаційного моделювання було підтверджено доцільність використання запропонованих алгоритмів керування гібридним компенсатором в умовах симетричної напруги живлення. В залежності від обраної стратегії керування забезпечується компенсація РП та фільтрація вищих гармонійних складових струму навантаження або компенсація РП та «ізоляція» БК від струмів вищих гармонік, що знімає ймовірність виникнення резонансних перенапруг на БК.



### 3.2 Моделювання роботи ГКРП в умовах несиметричної та несинусоїдної напруги живлення

Розглянута робота компенсатора в умовах несиметрії напруги живлення. Розглянутий вище підхід до розрахунку струму завдання при несиметрії і / або несинусоїдності напруг мережі нездатний компенсувати вищі гармоніки, навіть більш того – є додатковим джерелом гармонік струму, тому його застосування небажано в таких умовах [121]. Тому був використаний dq-алгоритм керування роботою компенсатора. Цей підхід дозволяє формувати симетричну трифазну синусоїдну систему струмів, незалежно від спектру і несиметрії напруги мережі [113].

Трифазна система напруг і струмів перетворюється в систему d (прямої) і q (квадратурної) координат, яка обертається з заданою частотою (рис. 3.21). Це може бути або частота першої гармоніки при використанні алгоритму по основній частоті, або частота обраної ВГ. Перехід в систему d-q-координат виконується за допомогою перетворення Кларка і Парка [122, 123].

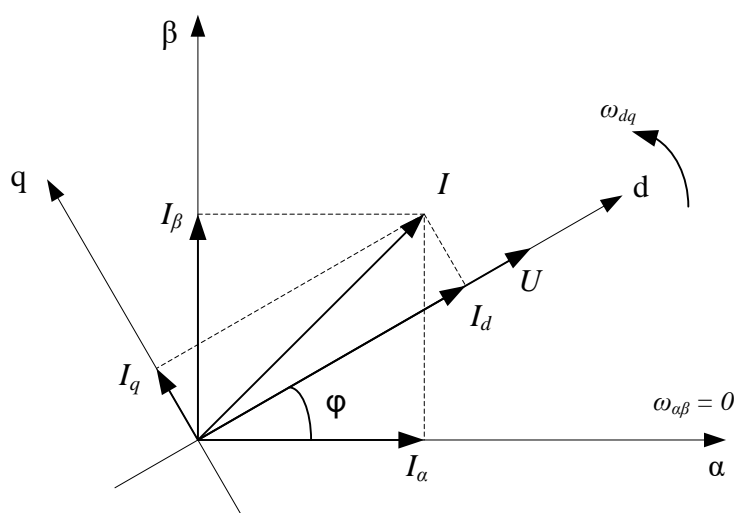


Рис. 3.21. Вектор струму у системі координат d-q

Шляхом використання перетворення Кларка відбувається перехід від трифазної системи координат а-в-с до нерухомої системі координат  $\alpha$ - $\beta$ , перетворенням Парка – перехід від  $\alpha$ - $\beta$  до d-q координат [124]:

$$\dot{I}_{dq} = i_d + j \cdot i_q, \quad (3.5)$$

де

$$i_d = i_\alpha \cdot \cos \phi + i_\beta \cdot \sin \phi; \quad (3.6)$$

$$i_q = i_\beta \cdot \cos \phi - i_\alpha \cdot \sin \phi. \quad (3.7)$$

Для напруги:

$$U_{dq} = u_d + j \cdot u_q, \quad (3.8)$$

де

$$u_d = u_\alpha \cdot \cos \phi + u_\beta \cdot \sin \phi; \quad (3.9)$$

$$u_q = u_\beta \cdot \cos \phi - u_\alpha \cdot \sin \phi. \quad (3.10)$$

У загальному випадку:

$$S = U_{dq} \cdot \dot{I}_{dq}^* = (u_d + j \cdot u_q) \cdot (i_d - j \cdot i_q) = p - j \cdot q, \quad (3.11)$$

де

$$p = u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q; \quad (3.12)$$

$$q = -u_d \cdot i_q + u_q \cdot i_d. \quad (3.13)$$

Керування величинами  $i_d$  і  $i_q$  дозволяє регулювати активну і неактивну потужності.

Для здійснення компенсації реактивної потужності необхідно забезпечити нульову квадратурну складову струму ( $i_q = 0$ ), тобто повний струм буде дорівнювати синфазній складовій ( $i = i_d$ ).

Струм  $i_d$  містить постійну і змінну складові, причому постійна складова  $i_{d\_ном}$  забезпечує передачу активної потужності.

Тоді струм компенсатора можна розрахувати як:

$$i_{комп} = (i_d - i_{d\_ном}) + j \cdot i_q. \quad (3.14)$$

Під час проведення імітаційного моделювання формування несиметричної напруги мережі виконувалось шляхом використання блоку Three-Phase Programmable Voltage Source, зміна амплітуди напруги відбувалася у 0.05 с, 0.1 с та 0.2 с.

Підсистема розрахунку струму завдання для інвертора зображена на рис. 3.22. Використано перетворення Парка для представлення струму навантаження в dq-координатах, шляхом низькочастотної фільтрації виділена постійна складова струму  $i_d$  (блок LPF), яка в подальшому віднімається від повного струму [114].

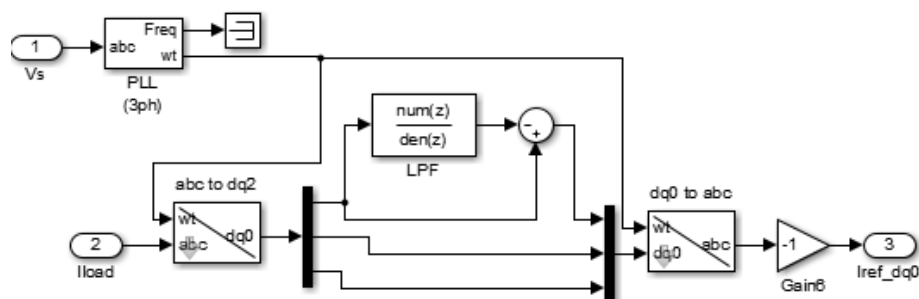


Рис. 3.22. Підсистема розрахунку струму завдання

Виконане моделювання роботи компенсатора при підключенні несинусоїдного навантаження, струм якого містить реактивну складову.

Форми напруги та струму навантаження зображені на рис. 3.23 ( $\text{THD}_U = 15,26\%$ ,  $\text{THD}_I = 12,89\%$ ,  $\text{PF} = 0,82$ ).

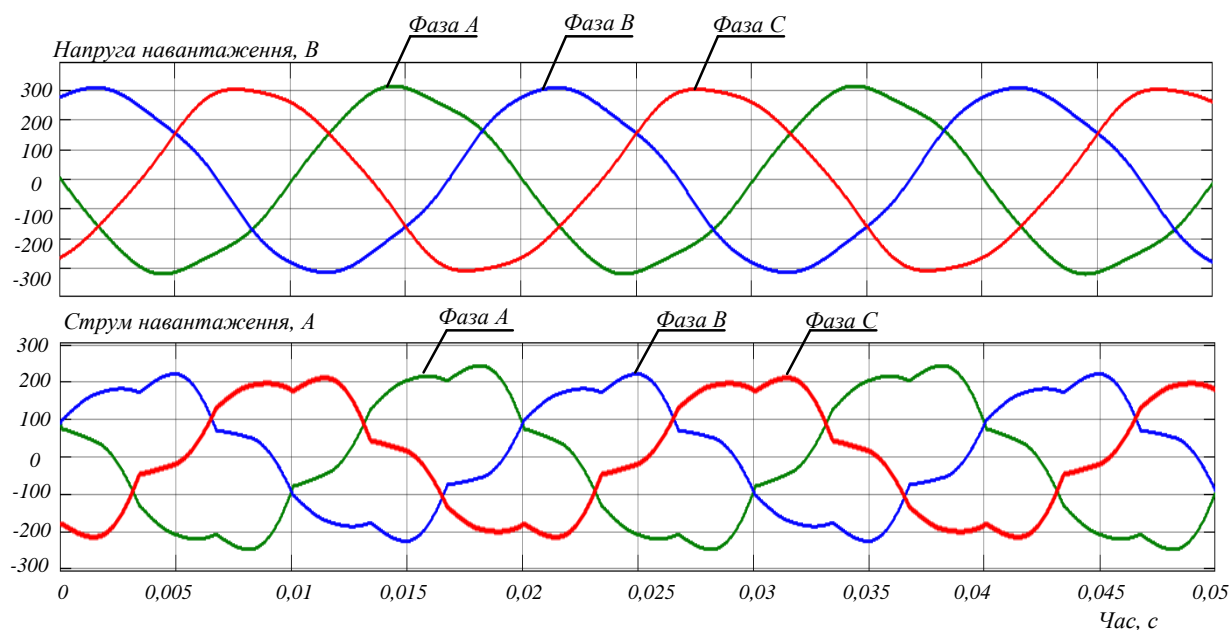


Рис. 3.23. Осцилограми напруги та струму навантаження

Спектральний склад струму навантаження фази А наведений на рис. 3.24.

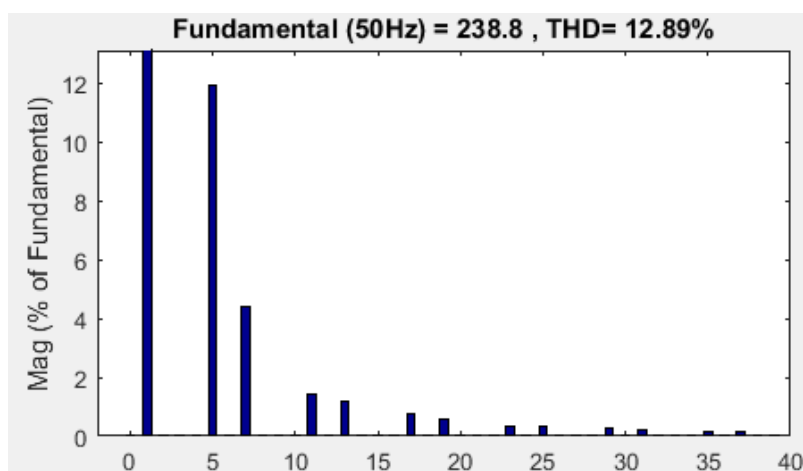


Рис. 3.24. Спектр струму навантаження фази А

На рис. 3.25 представлені форми кривих напруги і струму мережі, струму компенсатора.

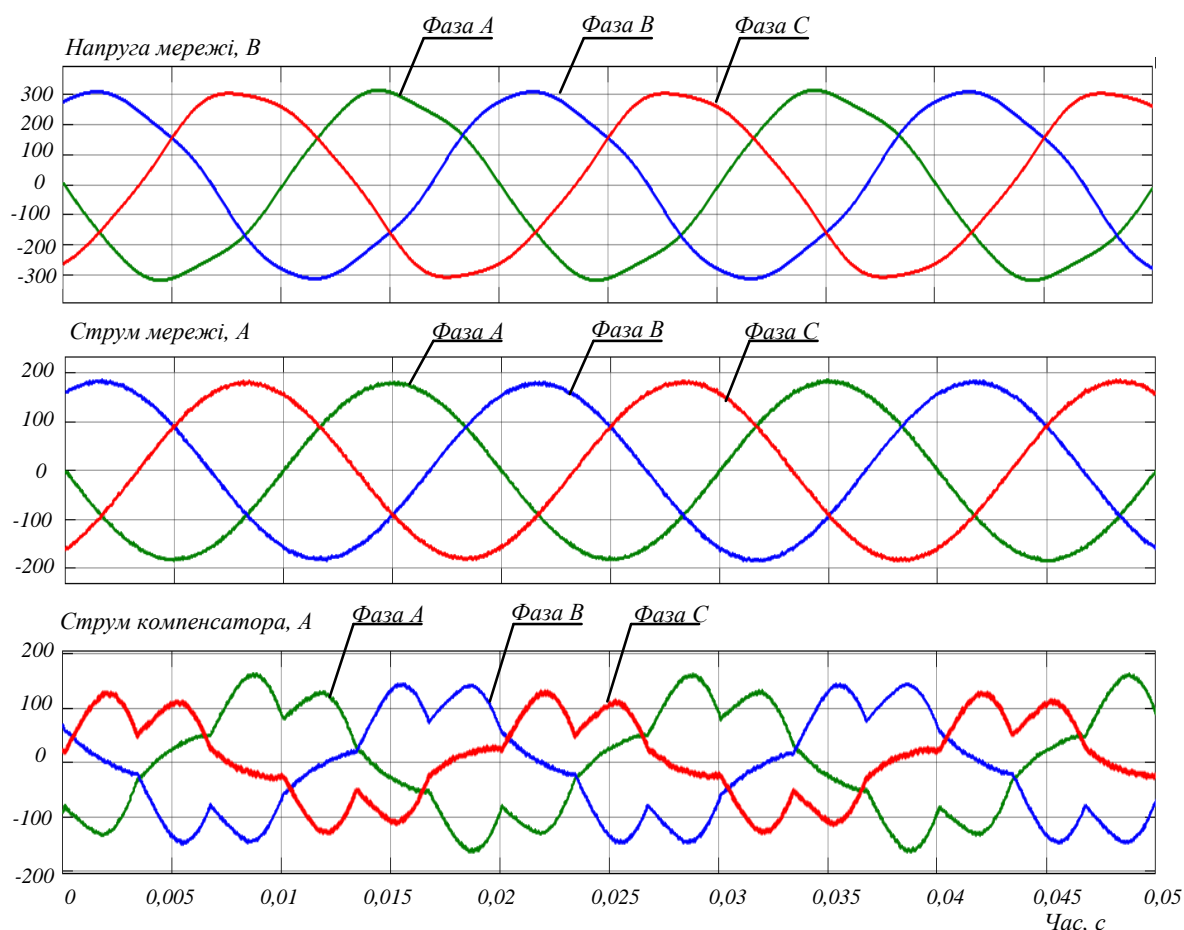


Рис. 3.25. Результати імітаційного моделювання: осцилограми напруги та струму мережі, струму компенсатора

На рис. 3.26 зображений спектральний склад струму мережі фази А ( $\text{THD}_I = 1,17\%$ ,  $\text{PF} = 0,96$ ).

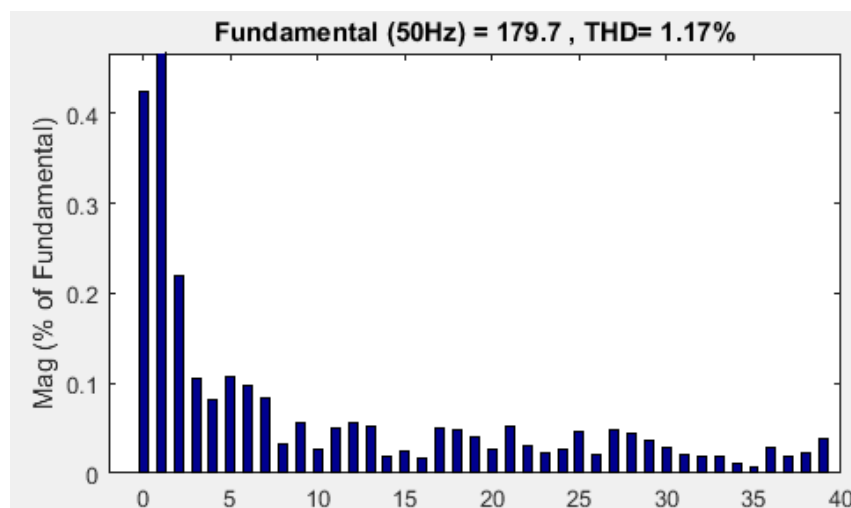


Рис. 3.26. Спектр струму мережі фази А

Таким чином, системою керування забезпечується синусоїдна форма струму мережі.

Форми струму завдання для інвертора і струму компенсатора представлені на рис. 3.27.

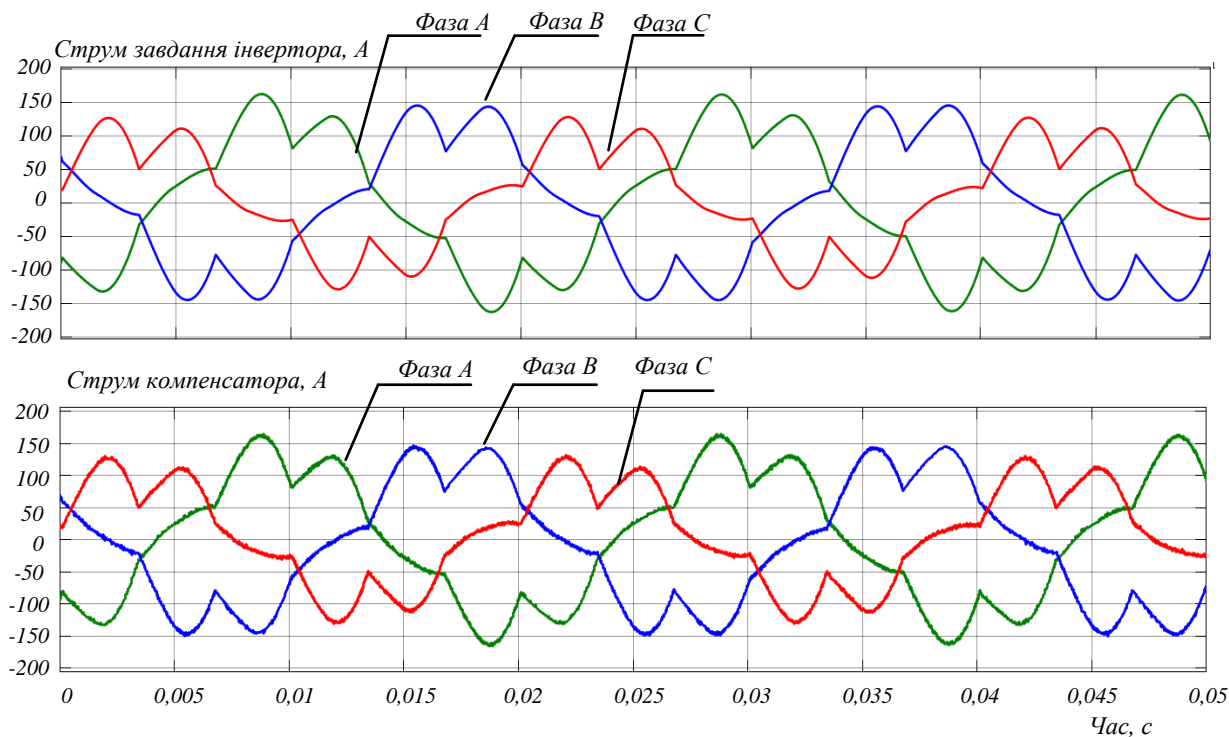


Рис. 3.27. Осцилограми розрахункового струму завдання інвертора та струму, що протікає через компенсатор

На рис. 3.28 представлені форми напруги та струму мережі. З представлених суміщених діаграм видно, що системою керування забезпечується нульовий фазовий зсув між напругою та струмом мережі, тобто виконується компенсація реактивної потужності.

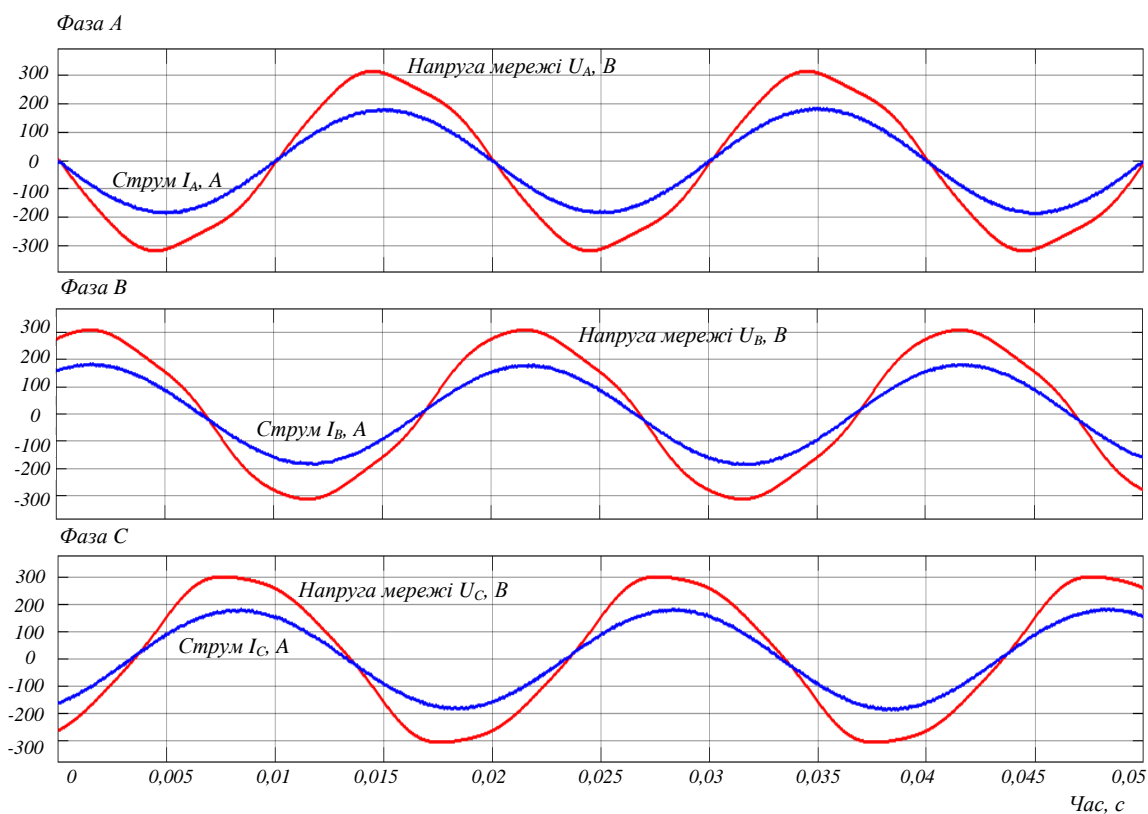


Рис. 3.28. Результати імітаційного моделювання: суміщені осцилограми напруги та струму мережі у трьох фазах

Виконане моделювання режиму роботи компенсатора, в якому забезпечується виключно компенсація реактивної потужності. При цьому не корегується спектральний склад струму мережі. Підтримується синусоїдна форма напруги на БК, тобто виконується «ізоляція» батарей від струмів вищих гармонік.

Підсистема розрахунку струму завдання представлена на рис. 3.29. В цьому випадку забезпечується нульове значення осцилюючої складової струму  $i_d$ , тобто в виразі (3.14) різниця  $i_d - i_{d\_ном}$  буде дорівнювати нулю [114].

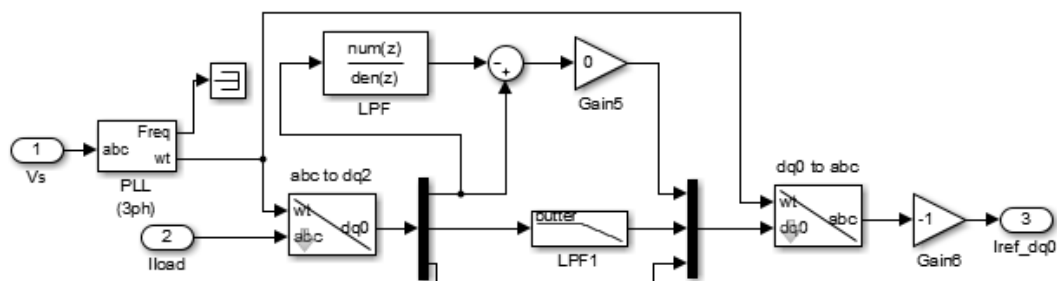


Рис. 3.29. Підсистема розрахунку струму завдання для режиму компенсації виключно реактивної потужності

Струм завдання для інвертора і струм, що протікає через компенсатор, представлені на рис. 3.30. Струм компенсатора, який протікає через БК, має синусоїдну форму, тобто функція «ізоляції» БК від вищих гармонік виконана.

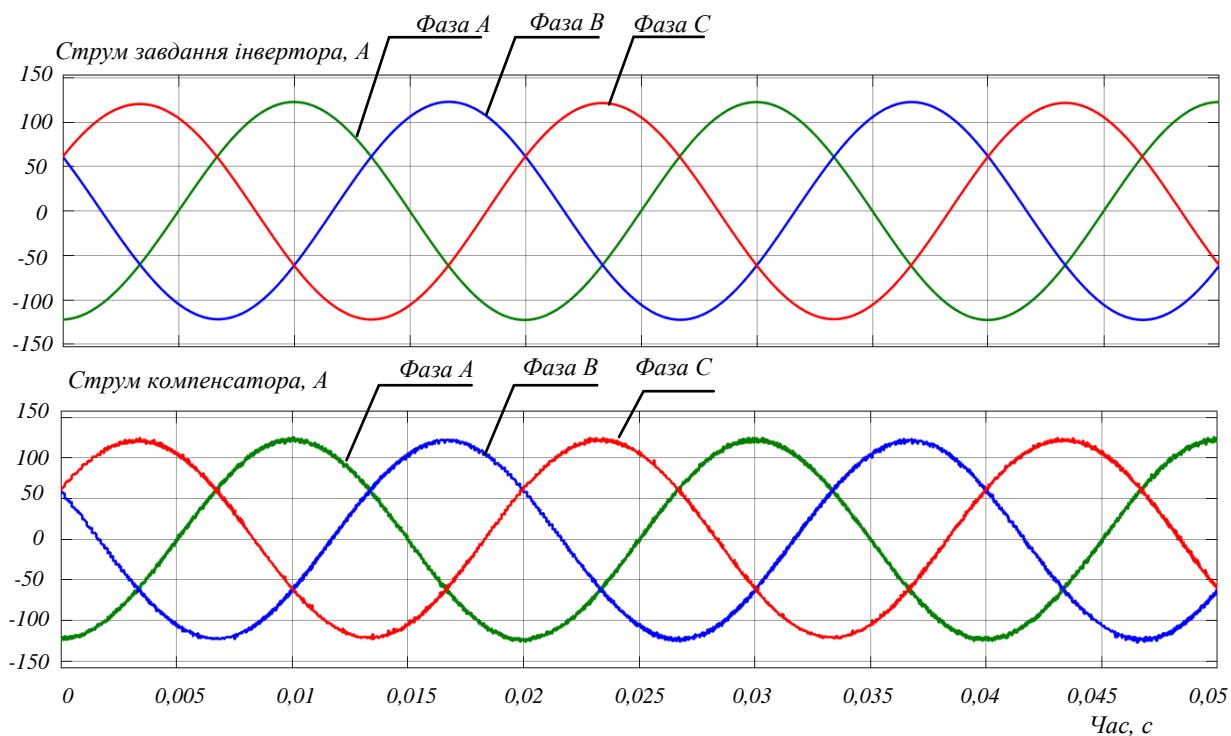


Рис. 3.30. Осцилограми розрахункового струму завдання інвертора та струму, що протікає через компенсатор

На рис. 3.31 зображені напруга та струм мережі, струм компенсатора.



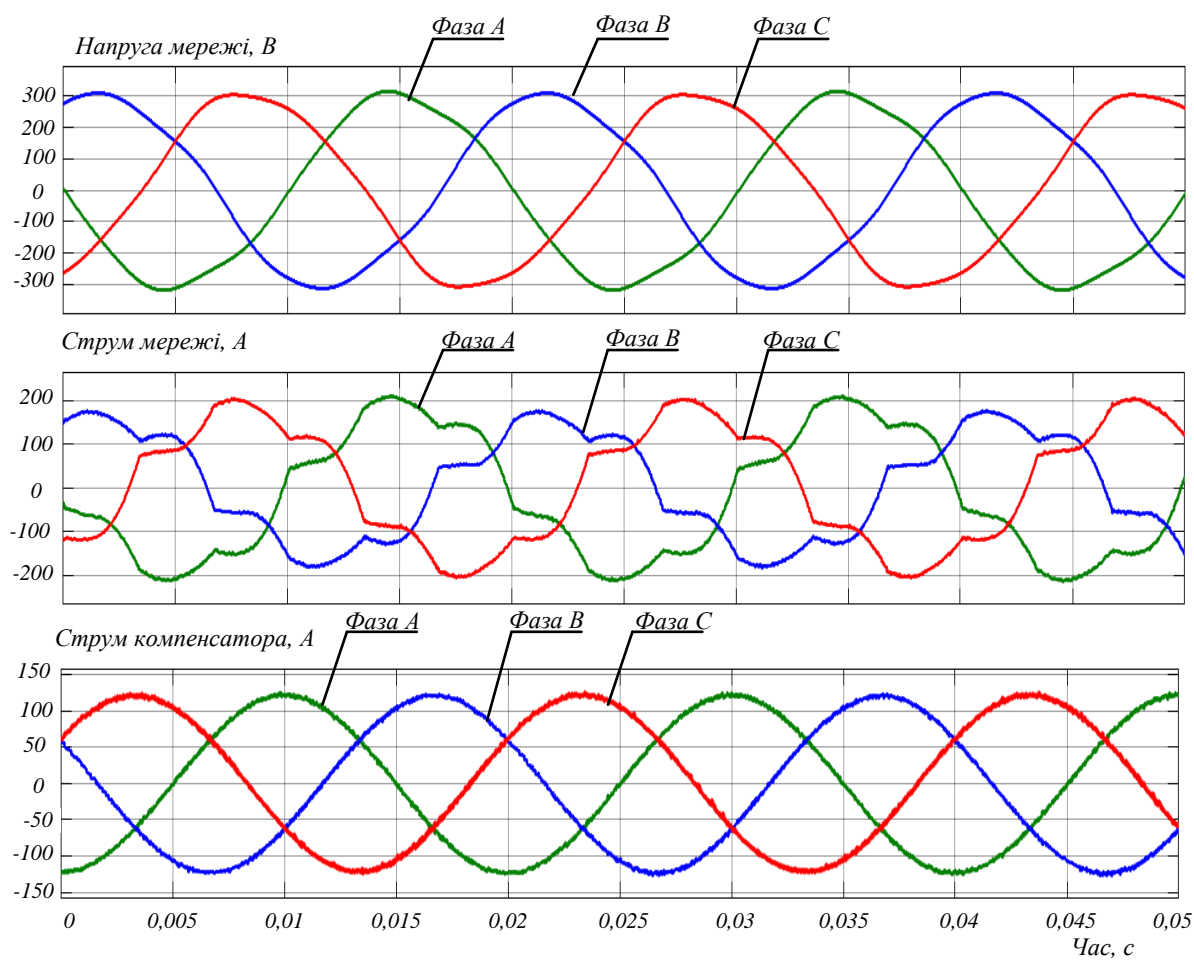


Рис. 3.31. Результати імітаційного моделювання: осцилограми напруги та струму мережі, струму компенсатора

Для струму мережі  $\text{THD}_I = 18,85\%$  (спектр струму фази А наведений на рис. 3.32),  $\text{PF} = 0,92$ .

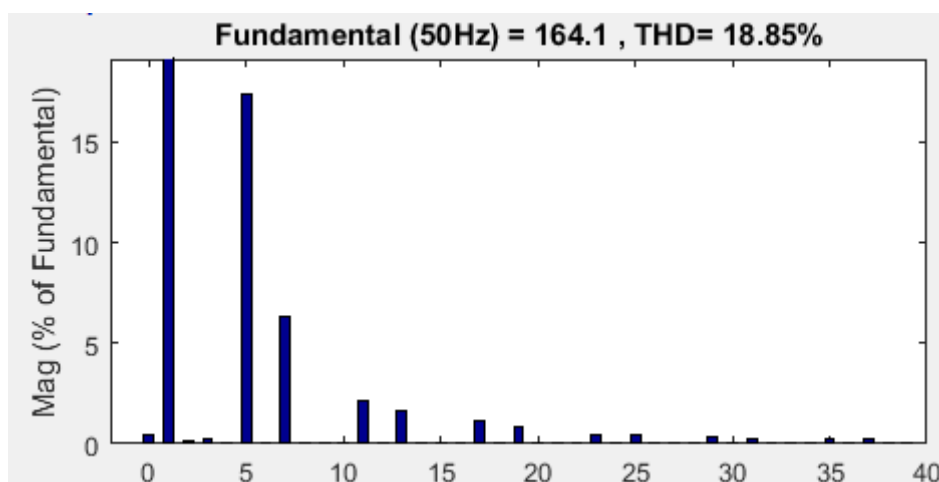


Рис. 3.32. Спектр струму мережі фази А

На рис. 3.33 представлені форми напруги та струму мережі.

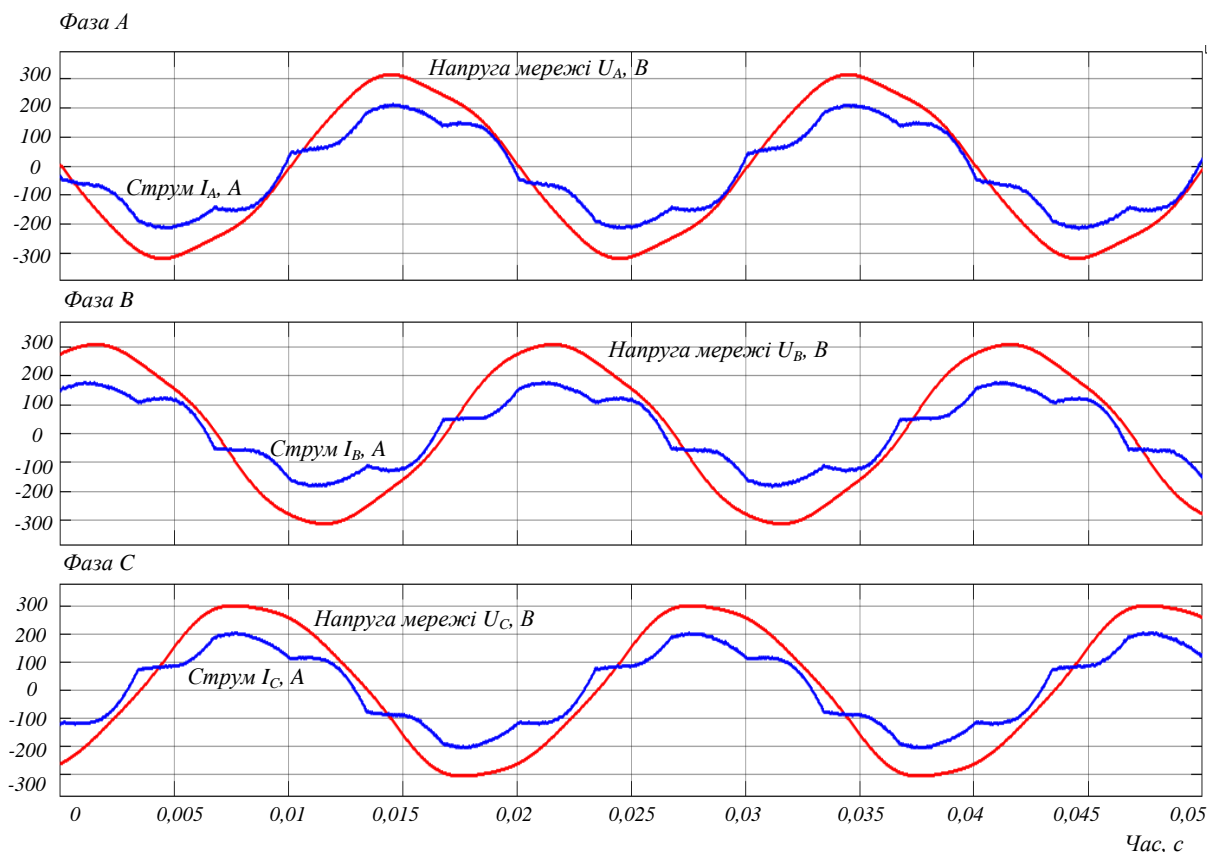


Рис. 3.33. Результати імітаційного моделювання: суміщені осцилограми напруги та струму мережі у трьох фазах

Проведене імітаційне моделювання підтвердило можливість використання запропонованих підходів к керуванню гібридним компенсатором в умовах несинусоїдної та несиметричної напруги мережі. Розглянута система керування дозволяє здійснювати роботу компенсатора у двох режимах: 1) режим компенсації реактивної потужності та забезпечення синусоїдного струму, що протікає через компенсатор; 2) режим компенсації реактивної потужності та забезпечення синусоїдного струму мережі.

### 3.3 Моделювання трансформаторного підключення гібридного компенсатора реактивної потужності до мережі

#### 3.3.1 Трифазне підключення

На практиці переважна більшість трифазних БК випускаються з внутрішньою схемою з'єднання «трикутник». В цьому випадку конденсаторна батарея має тільки три виводи. На рис. 3.34 представлена схема заміщення гібридного ГКРП, до складу якого входить трифазна БК з трьома виводами. Трансформатори і інвертор з системою керування представлені джерелами струму [107].

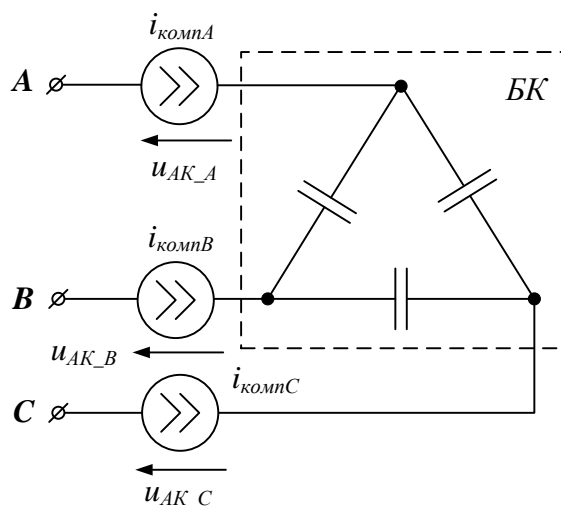


Рис. 3.34. Схема заміщення гібридного КРП при трифазному трансформаторному підключенні до мережі

На рис. 3.35 зображена схема силової частини ГКРП з використанням трифазної БК, яка має три виводи, і його системи керування. Компенсатор підключається до мережі через вторинні обмотки трансформаторів. Первинні обмотки трансформаторів підключені до АІН. Можливо включення однофазних трансформаторів в три фази або використання одного трифазного трансформатора

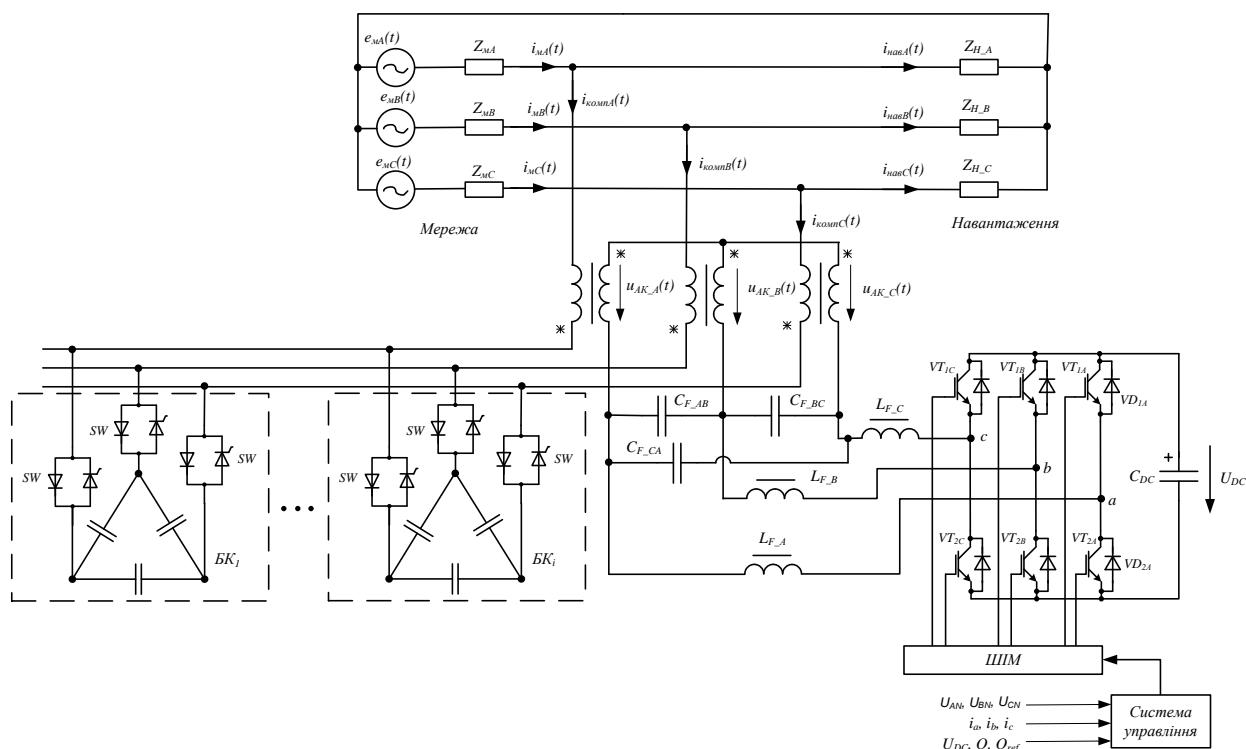


Рис. 3.35. Схема силової частини ГКРП та його системи керування

Структурна схема системи керування наведена на рис. 3.36.

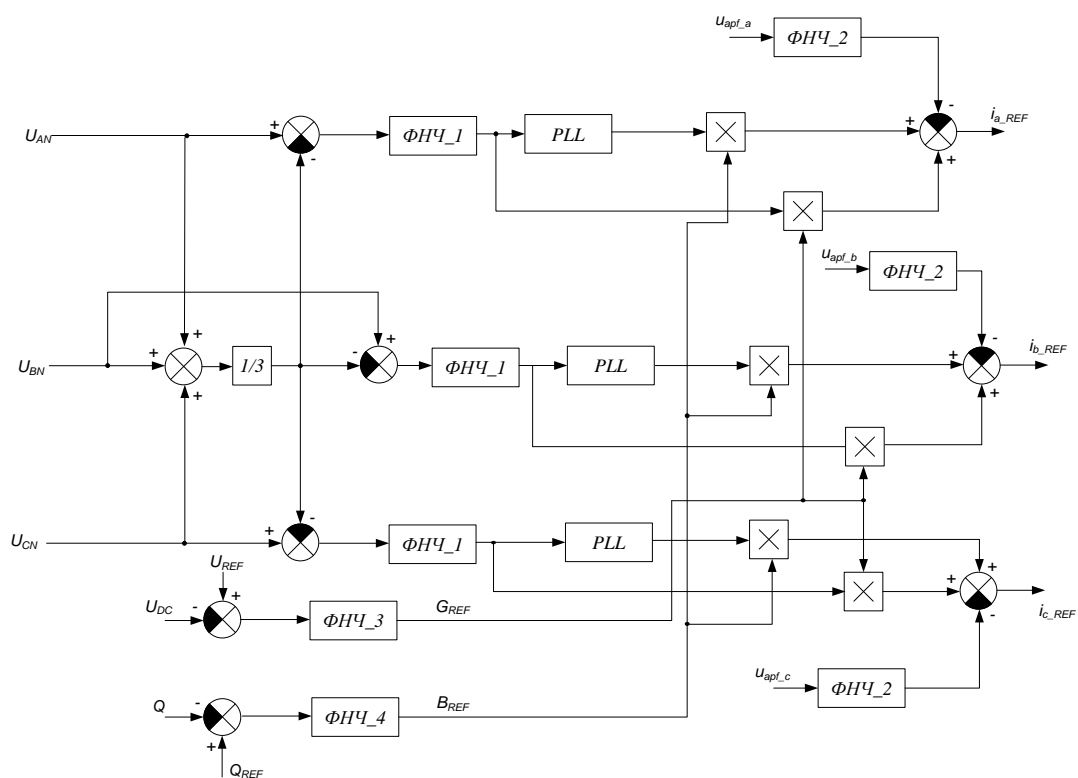


Рис. 3.36. Структурна схеми системи керування

Дія системи керування подібна до дії системи, представленої на рис. 2.6: виконується низькочастотна фільтрація напруги мережі, отриманий сигнал за допомогою блоку PLL зсувається на  $90^\circ$ . Для отримання заданого значення синфазної і квадратурної складових струму завдання проводиться множення на масштабуючі коефіцієнти  $G_{REF}$  і  $B_{REF}$ . Фільтри низьких частот ФНЧ\_2 введені для виключення явища підмагнічування трансформатора постійним струмом – за допомогою негативного зворотного зв'язку забезпечується нульове середнє значення вихідних напруг інвертора  $u_{apf\_a}$ ,  $u_{apf\_b}$ ,  $u_{apf\_c}$ . Пропорційна ланка з коефіцієнтом посилення  $1/3$  введена для формування сигналу напруги нульової послідовності, який в подальшому віднімається від сигналів фазних напруг мережі.

На рис. 3.37 зображена імітаційна модель для перевірки трифазного трансформаторного включення компенсатора в умовах реактивного несинусоїдного струму навантаження та симетричної напруги мережі (рис. 3.10) [120, 125].

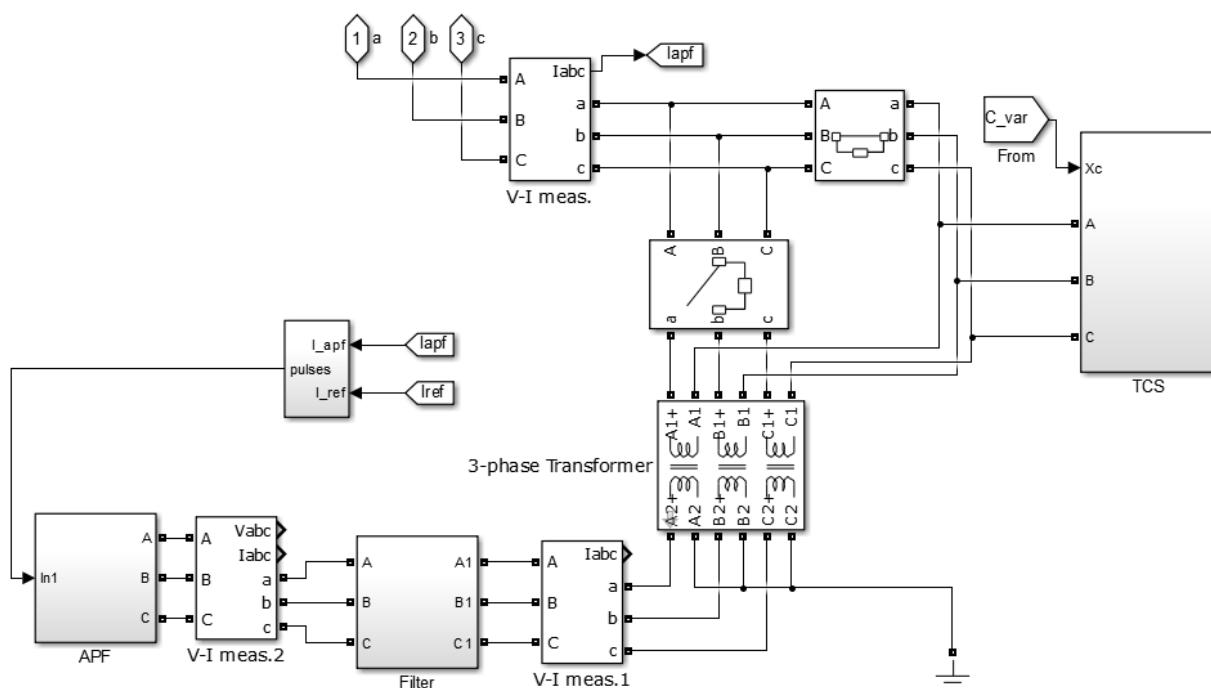


Рис. 3.37. Трансформаторне підключення гібридного компенсатора реактивної потужності

Для розрахунку струму завдання використаний підхід, описаний формулами (3.2)-(3-4).

Струм завдання для інвертора і струм компенсатора представлені на рис. 3.38.

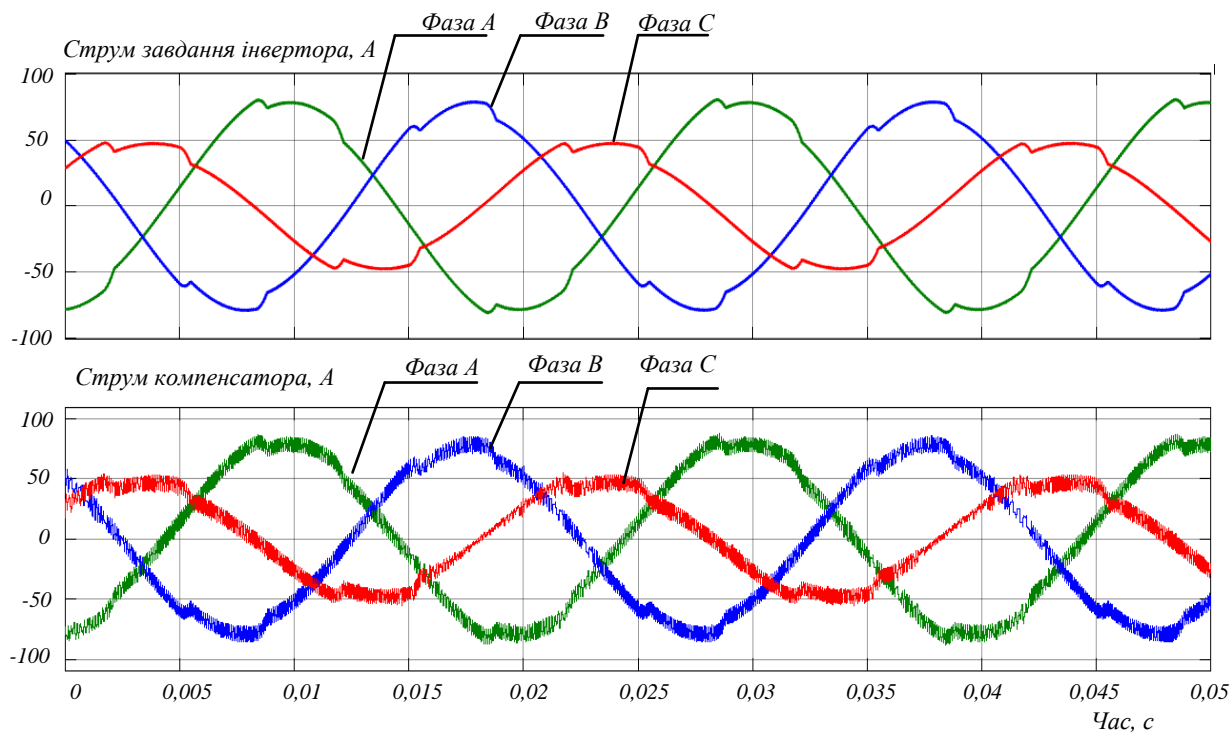


Рис. 3.38. Осцилограми розрахункового струму завдання інвертора та струму, що протікає через компенсатор

На рис. 3.39 зображені напруга та струм мережі, струм компенсатора.

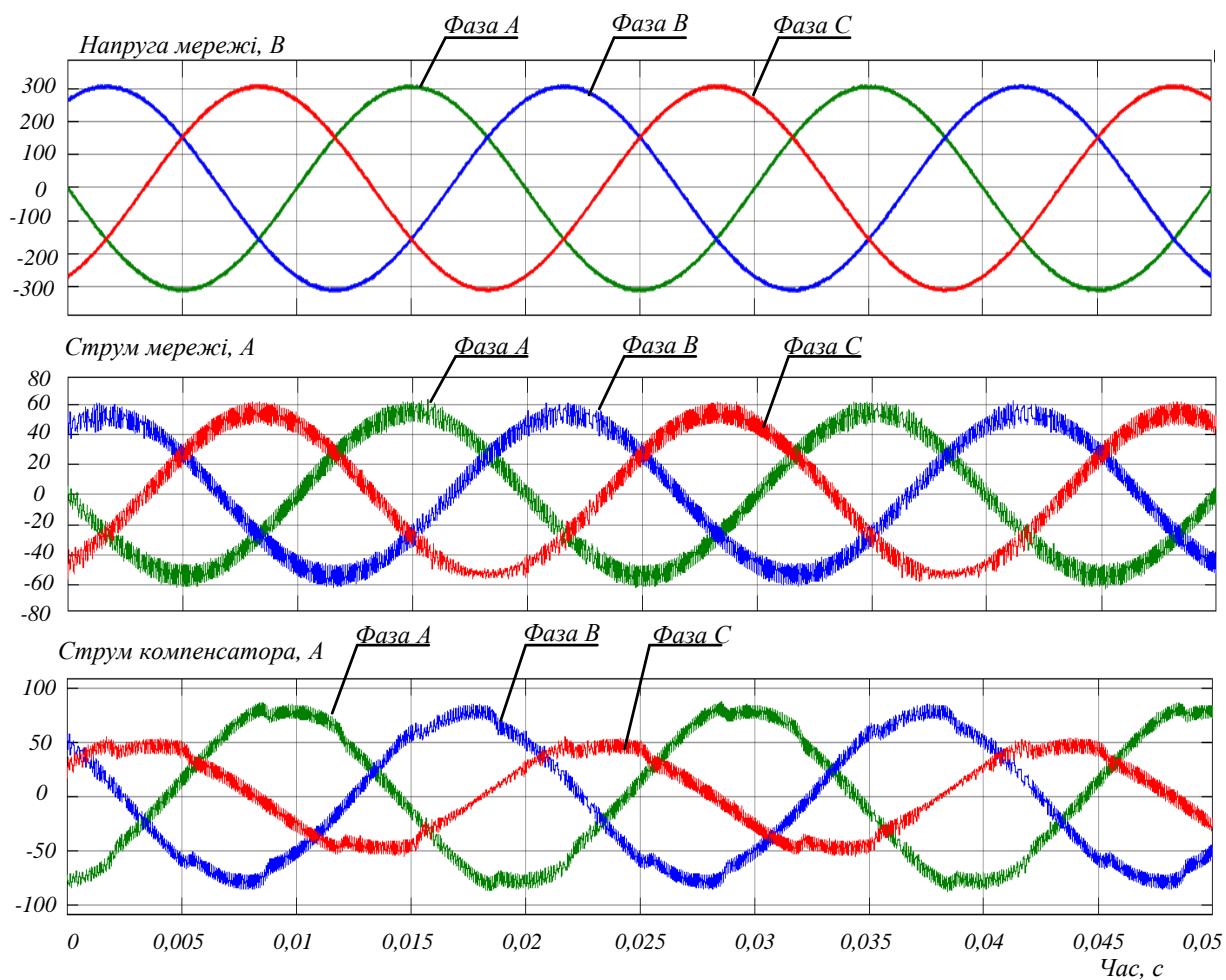


Рис. 3.39. Результати імітаційного моделювання: осцилограми напруги та струму мережі, струму компенсатора

На рис. 3.40 представлені форми напруги та струму мережі. Фазовий зсув між напругою та струмом дорівнює нулю.

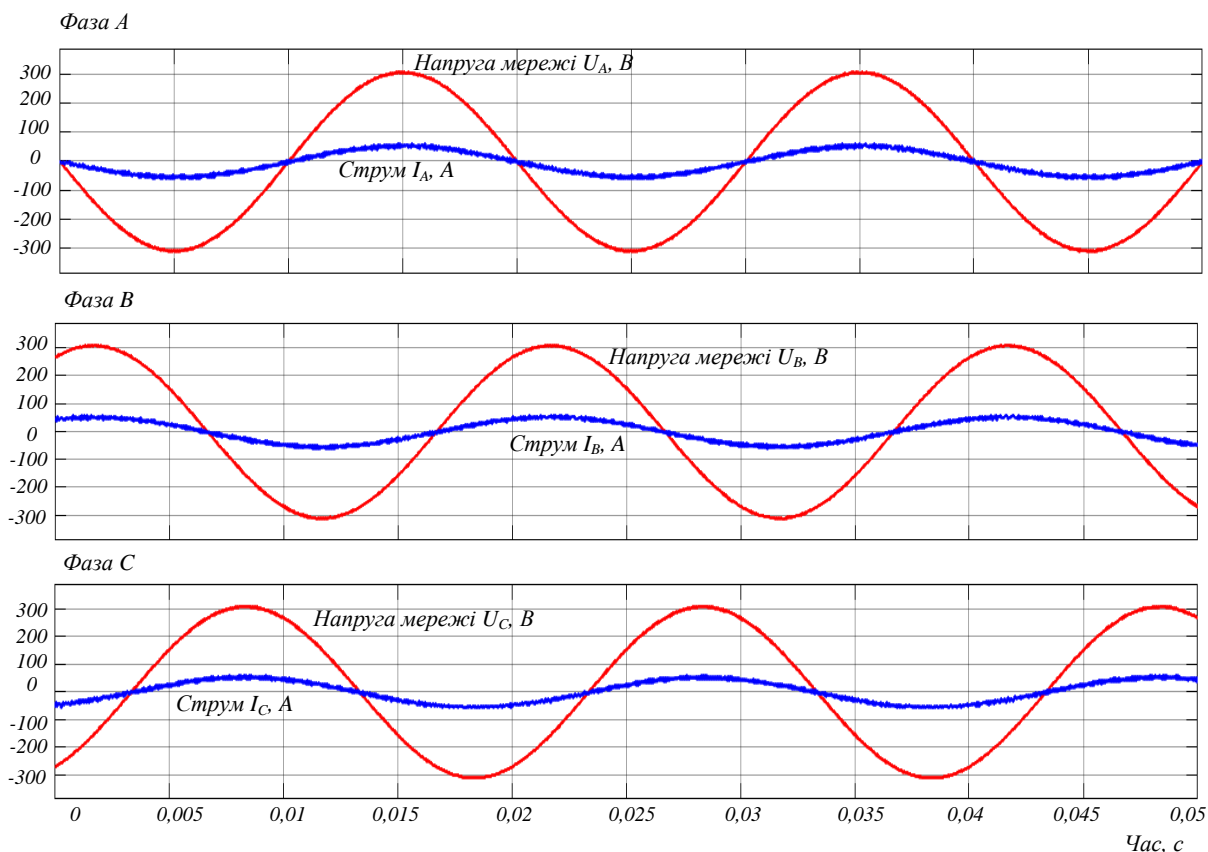


Рис. 3.40. Результати імітаційного моделювання: суміщені осцилограми напруги та струму мережі у трьох фазах

Після підключення ГКРП були отримані наступні значення параметрів, що характеризують ефективність роботи запропонованого пристрою: коефіцієнт потужності PF дорівнює 0,99, коефіцієнт несинусоїдності струму мережі фази А становить 0,4%.

Виконане моделювання роботи ГКРП в умовах несиметричної несинусоїдної напруги мережі та реактивного несинусоїдного струму навантаження (рис. 3.23) [124]. Для розрахунку струму завдання інвертора використаний алгоритм (3.5)-(3.14).

На рис. 3.41 представлені осцилограми розрахованого струму завдання для інвертора напруги та отриманого струму, що протікає через компенсатор.



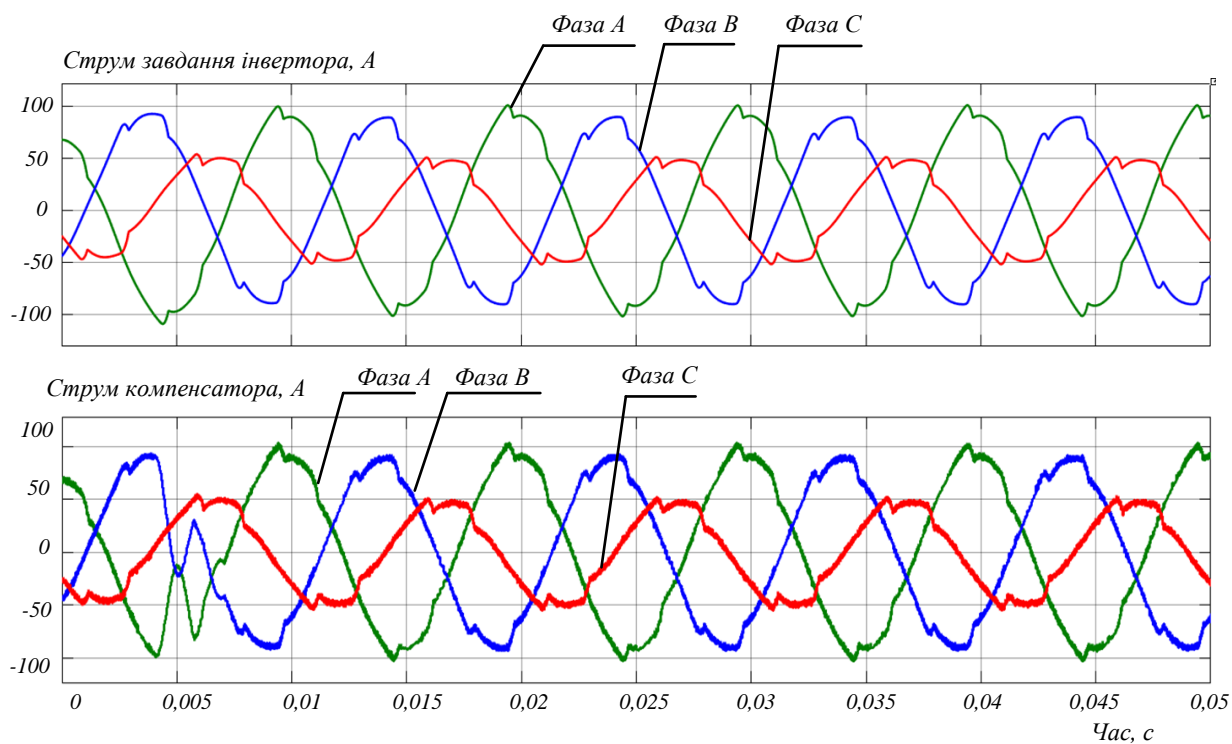


Рис. 3.41. Осцилограми розрахункового струму завдання інвертора та струму, що протікає через компенсатор

На рис. 3.42 зображені отримані осцилограми напруги та струму мережі, струму компенсатора.

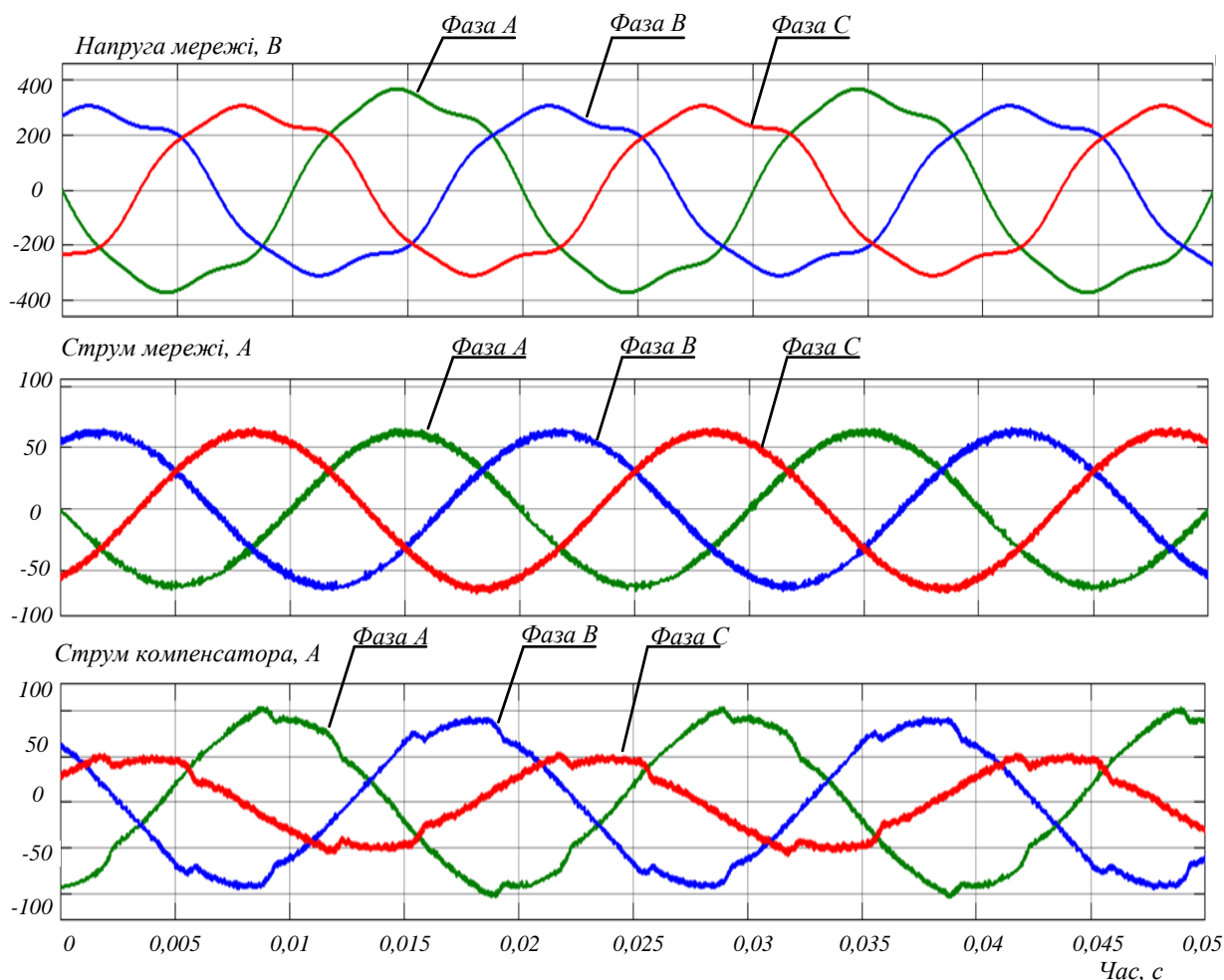


Рис. 3.42. Результати імітаційного моделювання: осцилограми напруги та струму мережі, струму компенсатора

Фазовий зсув між струмом та напругою мережі дорівнює нулю (рис. 3.43), що свідчить про компенсацію реактивної складової струму. Крім того, струм мережі має синусоїдний характер, тобто виконується фільтрація вищих гармонійних складових струму мережі.

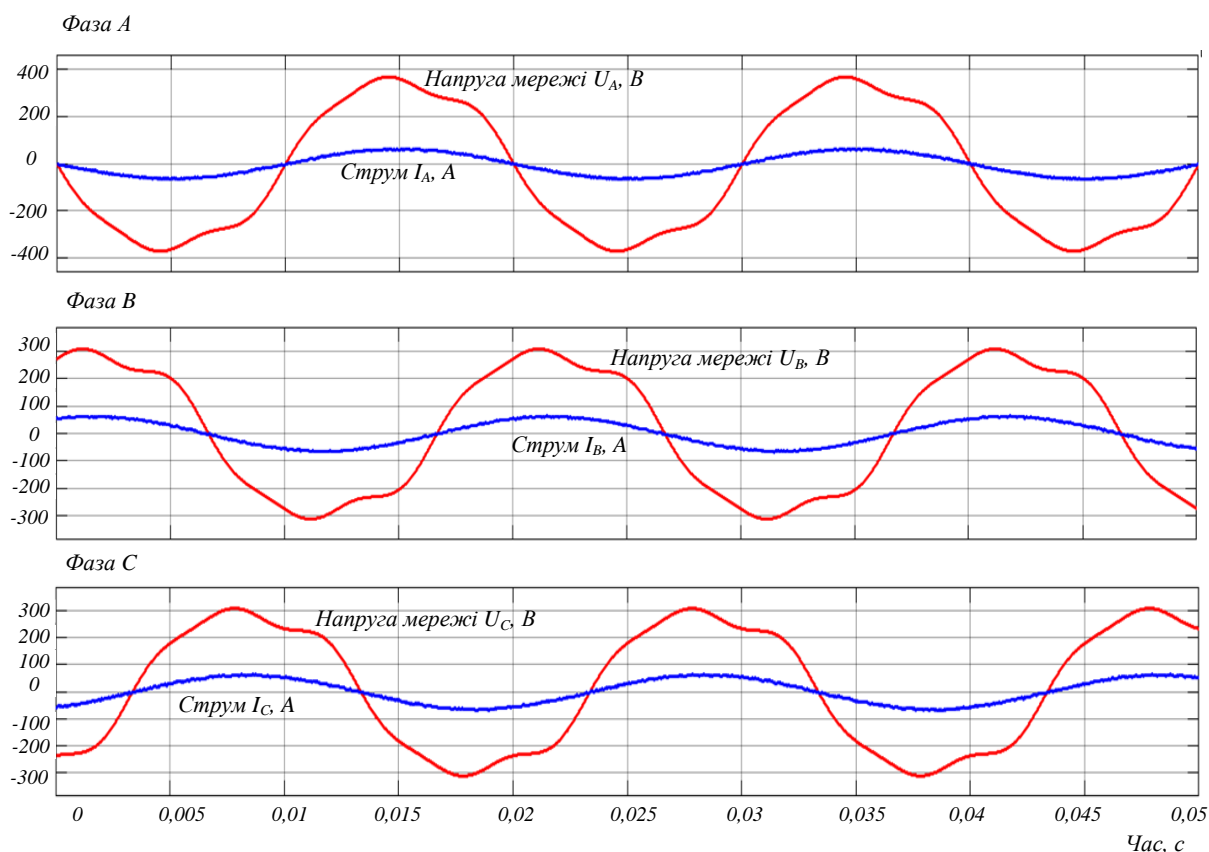


Рис. 3.43. Результати імітаційного моделювання: суміщені осцилограми напруги та струму мережі у трьох фазах

Для цього режиму роботи отримані наступні параметрів: коефіцієнт потужності PF дорівнює 0,99, коефіцієнт несинусоїдності струму мережі фази А становить 0,63%.

В результаті проведення імітаційного моделювання перевірена працездатність запропонованих систем керування при трансформаторному підключенні гібридного компенсатора до мережі в умовах як симетричної, так и несиметричної напруги живлення. У кожному випадку системою керування забезпечувалося виконання функцій компенсації РП та фільтрації ВГ, що включає спектр струму навантаження.

### 3.3.2 Двофазне підключення

Розглянутий варіант включення двох однофазних трансформаторів у дві фази. Схема заміщення представлена на рис. 3.44. Компенсатором формуються струми двох фаз, а струм третьої фази необхідної форми отримується згідно з першим законом Кірхгофа.

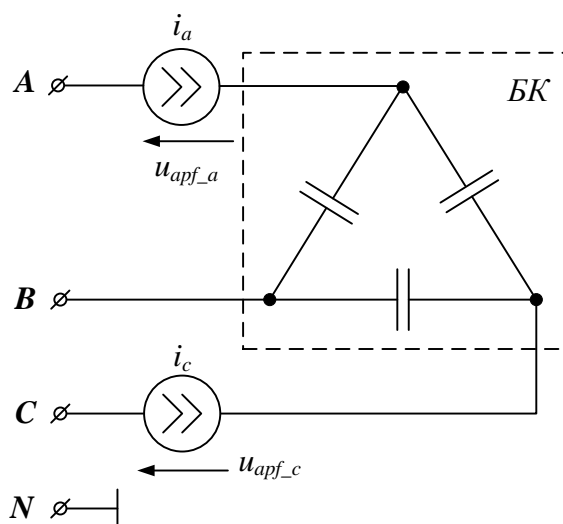


Рис. 3.44. Схема заміщення гібридного КРП при двофазному трансформаторному підключенні до мережі

Одна з фаз (на рис. фаза В) підключається до мережі безпосередньо, а дві інші – через вторинні обмотки трансформаторів. Первинні обмотки трансформаторів з'єднані за схемою «відкритий трикутник» і підключені до АІН (рис. 3.45).

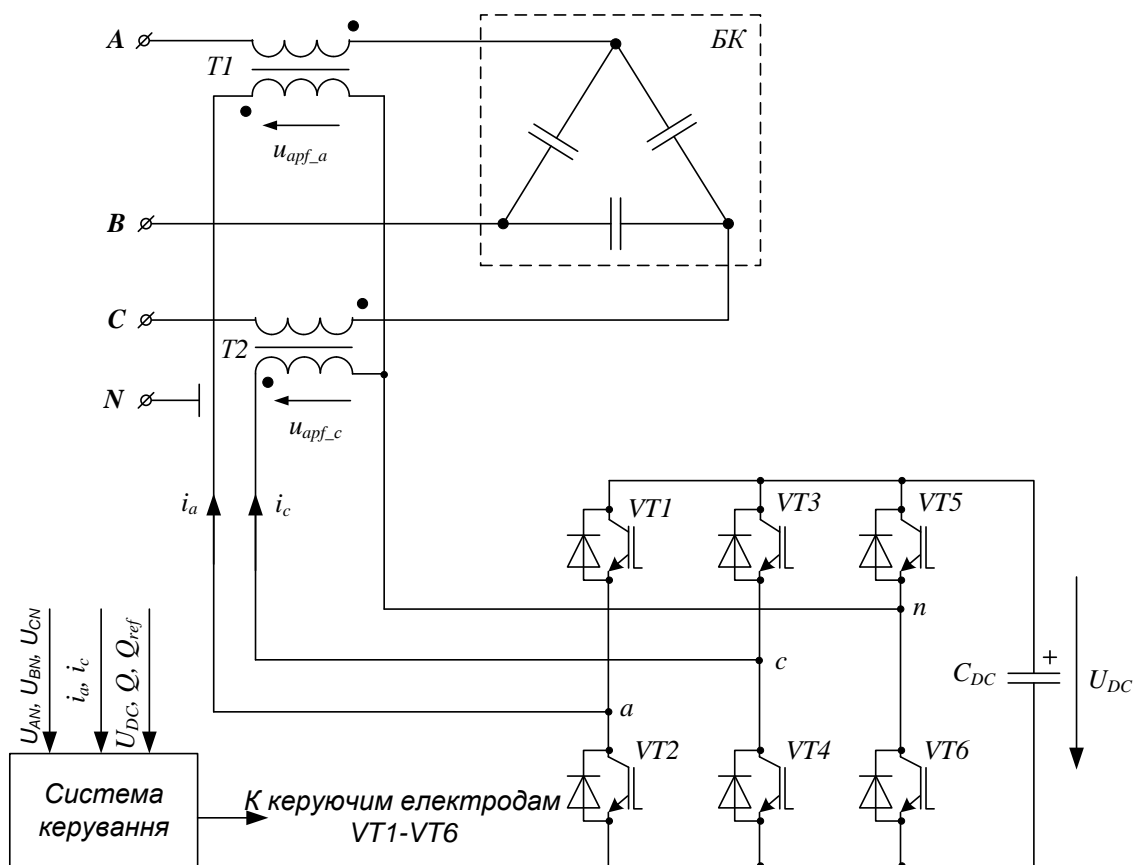


Рис. 3.45. Узагальнена схема силової частини ГКРП та його системи керування

Структурна схема системи керування наведена на рис. 3.46 [91]. Принцип дії аналогічний принципу дії системи керування, зображеної на рис. 3.36.

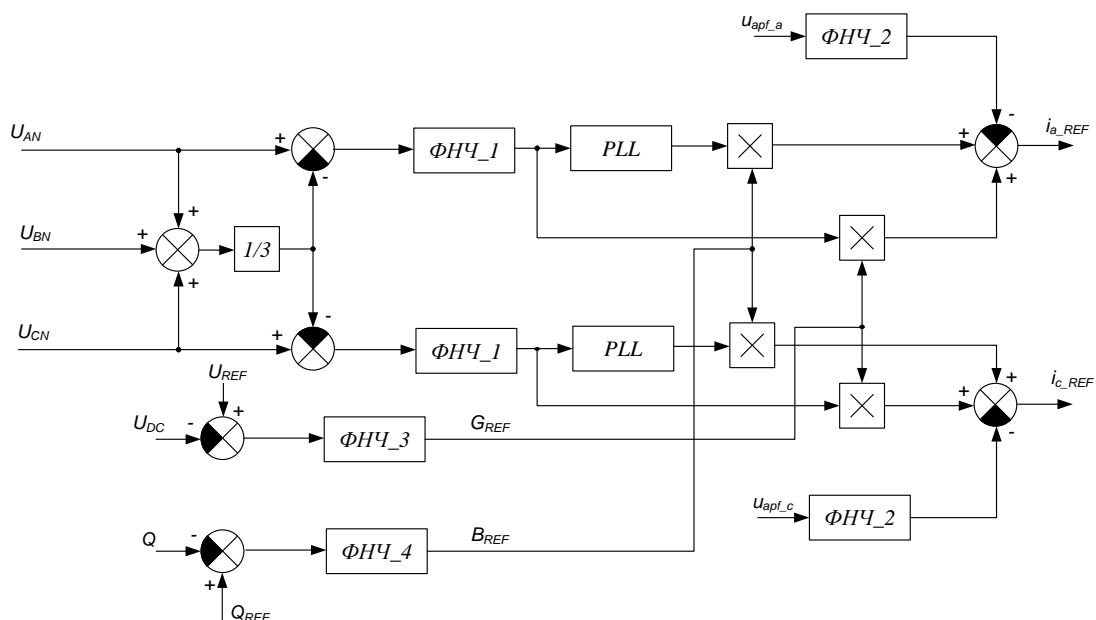


Рис. 3.46. Структурна схема системи керування ГКРП при двофазному трансформаторному включенні

На рис. 3.47 зображена імітаційна модель для перевірки двофазного трансформаторного включення компенсатора в умовах реактивного несинусоїдного струму навантаження та симетричної напруги мережі (рис. 3.10) [125].

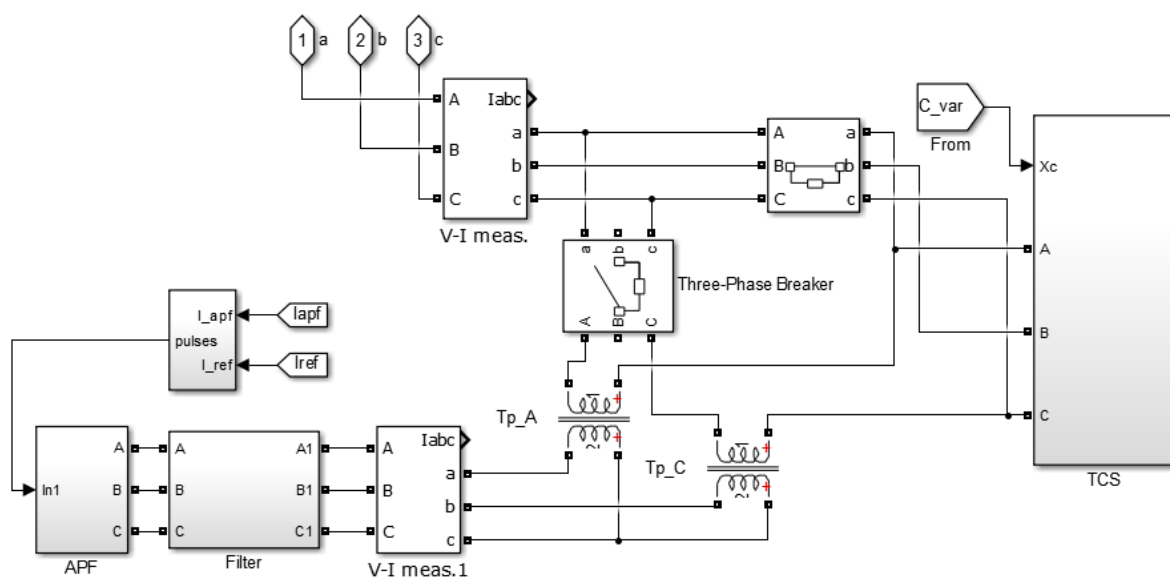


Рис. 3.47. Двофазне трансформаторне підключення гібридного компенсатора реактивної потужності

Струм завдання для інвертора і струм компенсатора представлені на рис. 3.48.

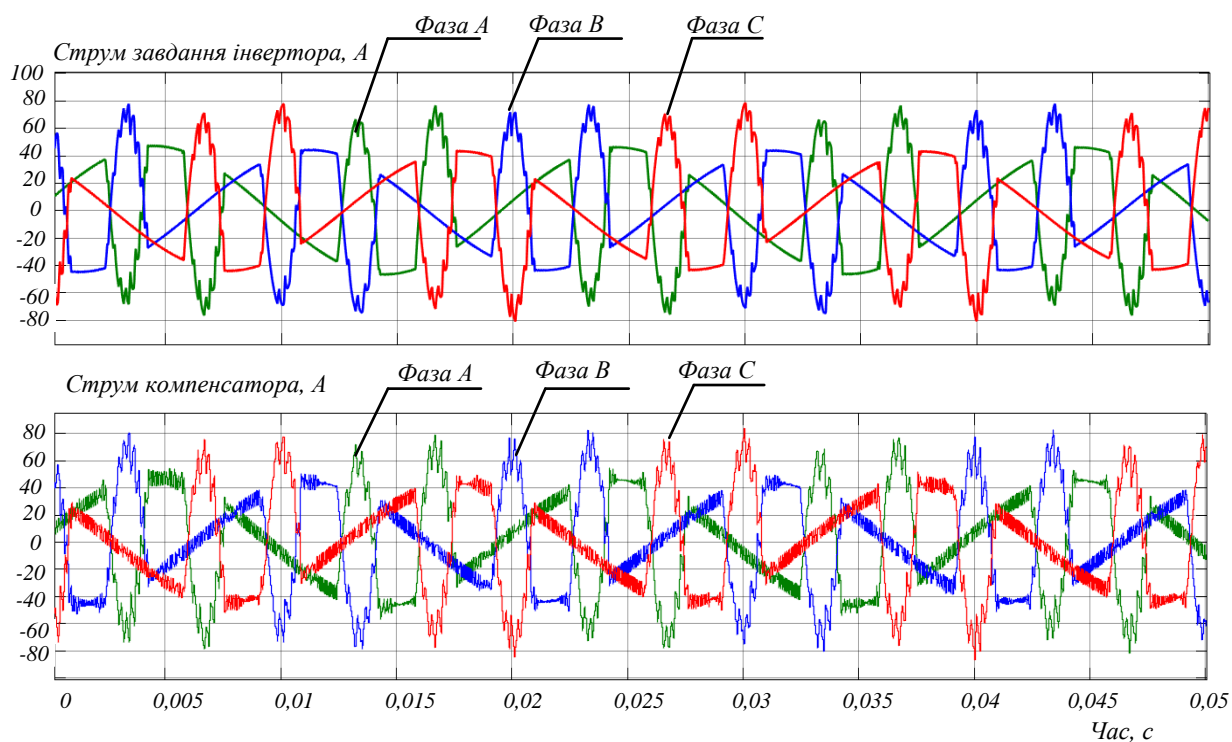


Рис. 3.48. Осцилограми розрахункового струму завдання інвертора та струму, що протікає через компенсатор

На рис. 3.49 зображені напруга та струм мережі, струм компенсатора.

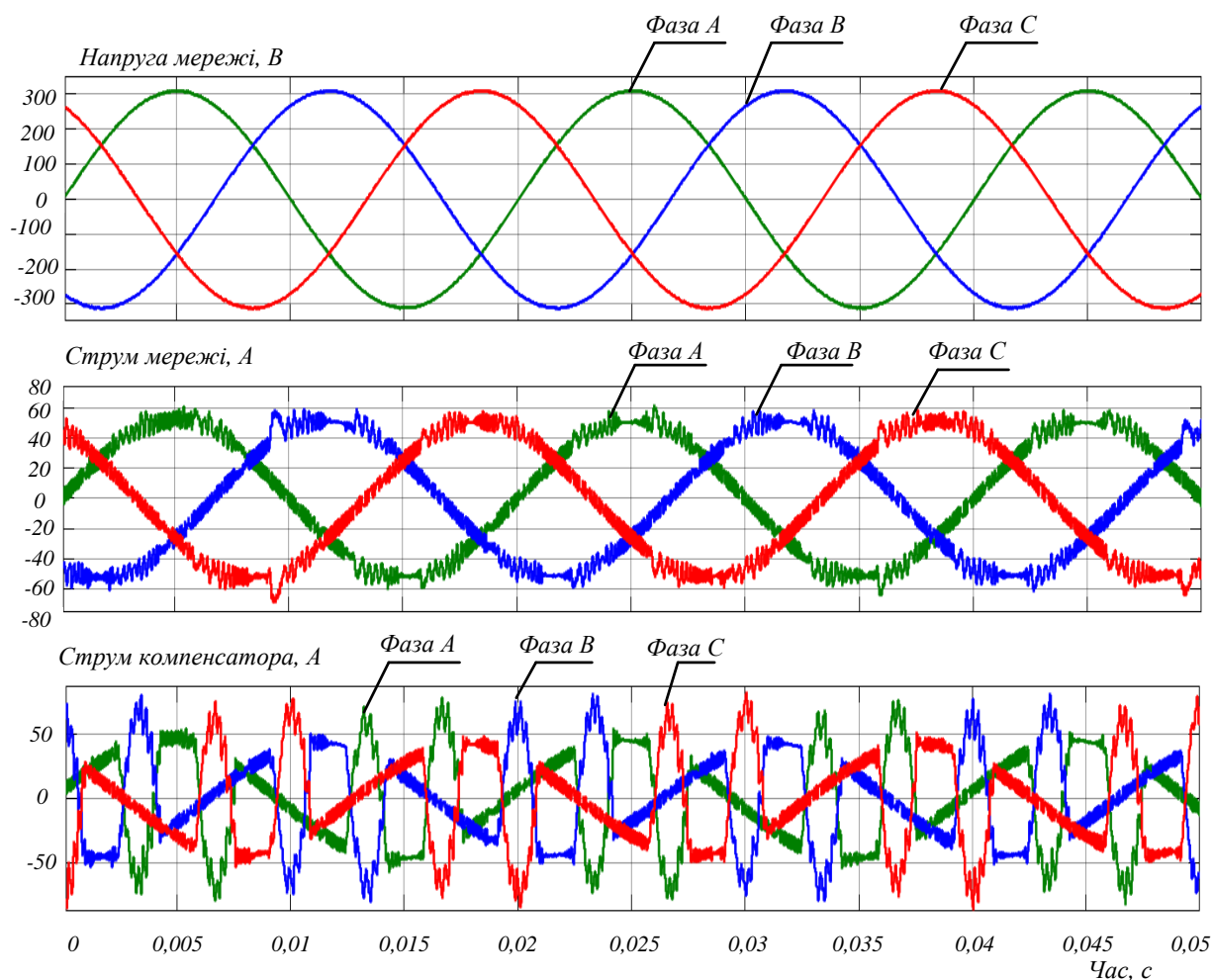


Рис. 3.49. Результати імітаційного моделювання: осцилограми напруги та струму мережі, струму компенсатора

На рис. 3.50 представлені форми напруги та струму мережі. Фазовий зсув між напругою та струмом дорівнює нулю, тобто виконується компенсація реактивної потужності. Коефіцієнт потужності після підключення пристрою дорівнює 0,98.



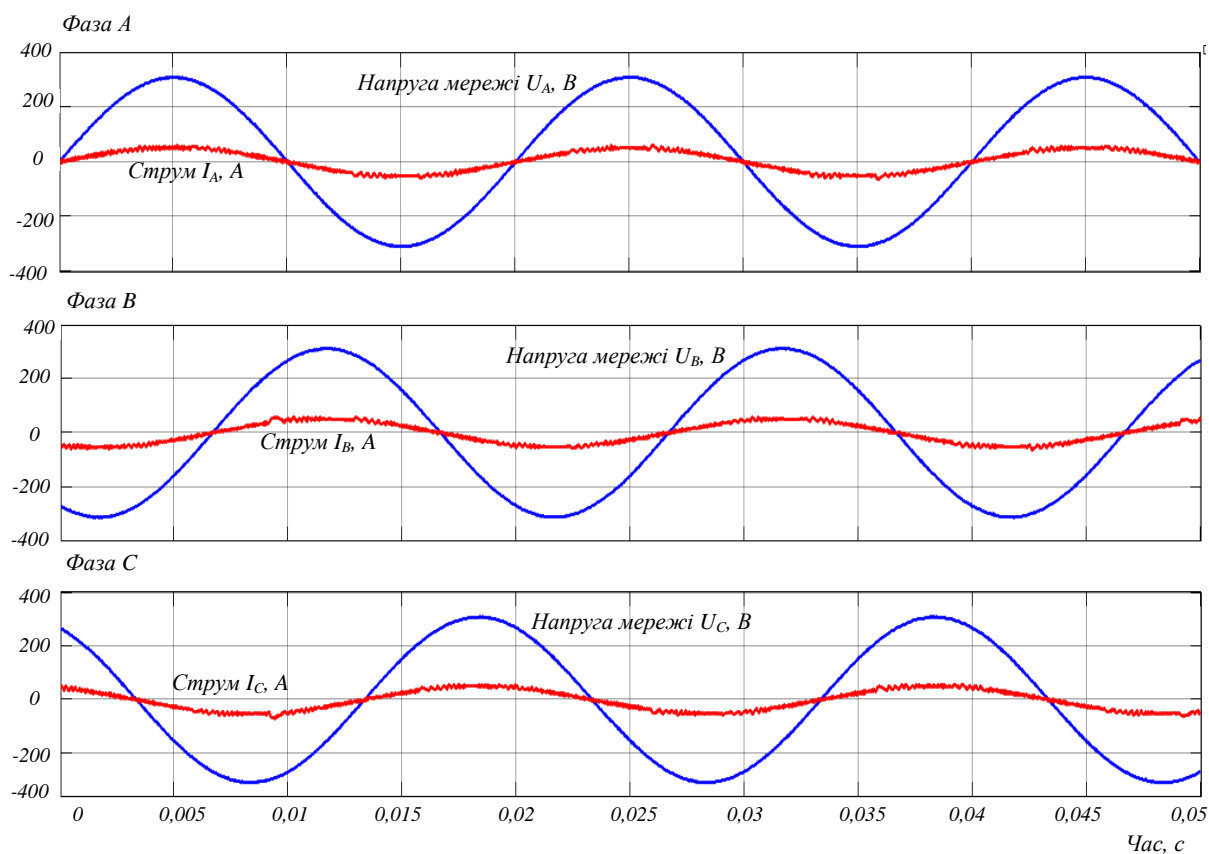


Рис. 3.50. Результати імітаційного моделювання: суміщені осцилограми напруги та струму мережі у трьох фазах

Для струму мережі  $THD_I = 13,65\%$  (спектр струму фази А наведений на рис. 3.51).

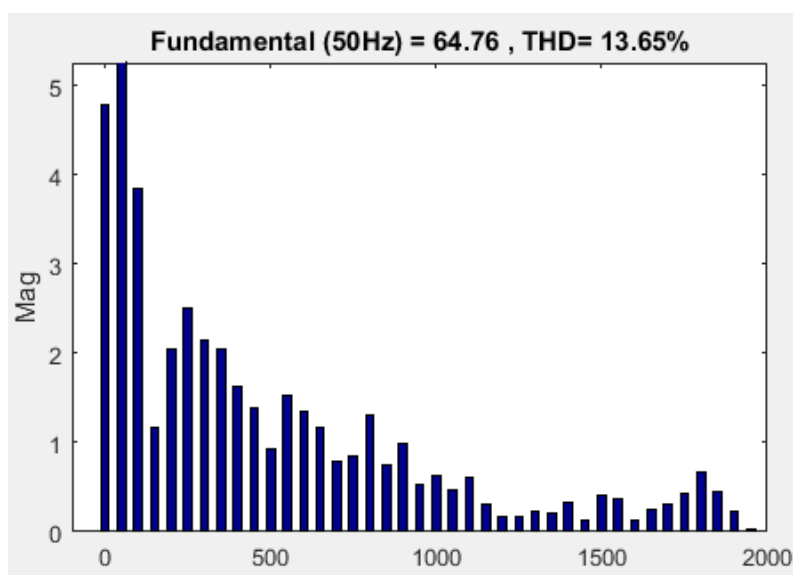


Рис. 3.51. Спектр струму мережі фази А

Виконане моделювання роботи двофазного трансформаторного включення ГКРП в умовах несиметричної несинусоїдної напруги мережі та реактивного несинусоїдного струму навантаження [116]. Для розрахунку струму завдання інвертора використаний алгоритм (3.5)-(3.14).

На рис. 3.52 представлені осцилограми розрахованого струму завдання для інвертора напруги та отриманого струму, що протікає через компенсатор.

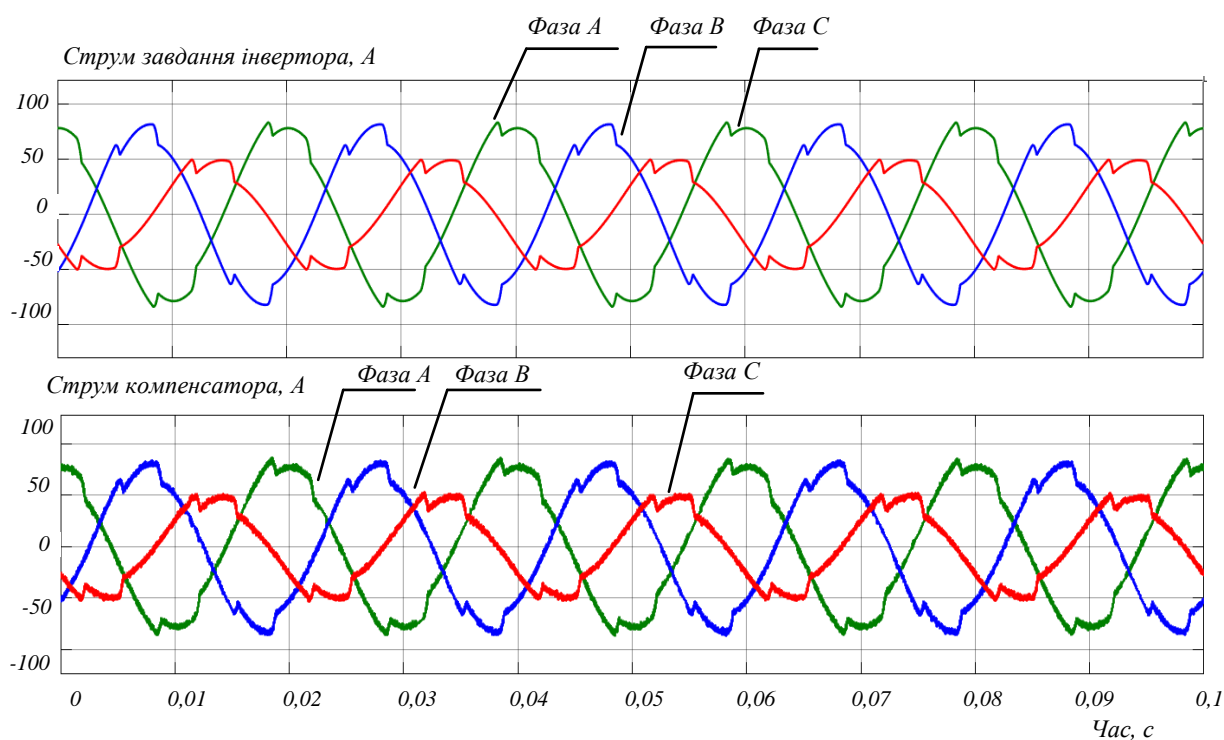


Рис. 3.52. Осцилограми розрахункового струму завдання інвертора та струму, що протікає через компенсатор

На рис. 3.53 зображені отримані осцилограми напруги та струму мережі, струму компенсатора.

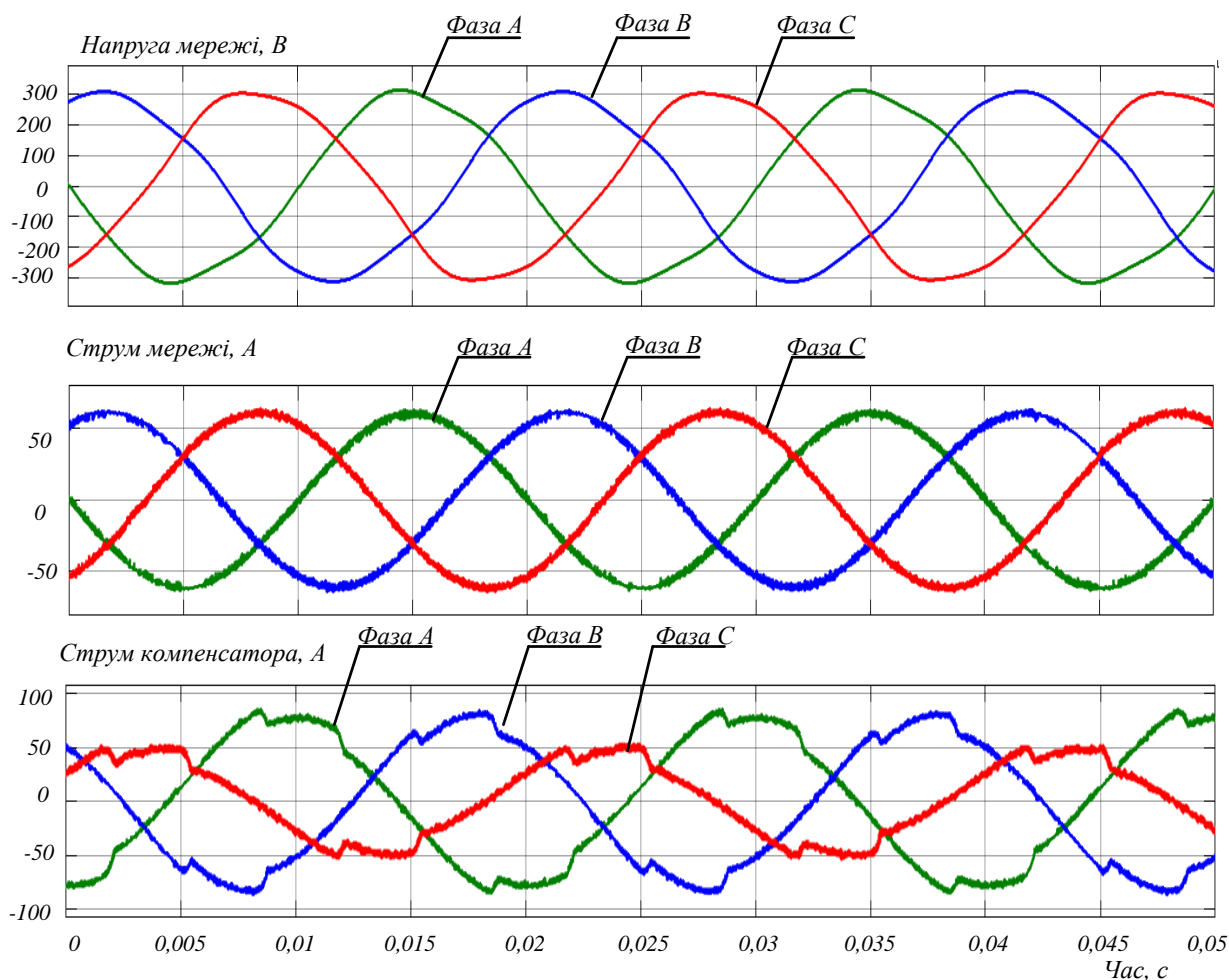


Рис. 3.53. Результати імітаційного моделювання: осцилограми напруги та струму мережі, струму компенсатора

Фазовий зсув між струмом та напругою мережі дорівнює нулю (рис. 3.54), що свідчить про компенсацію реактивної складової струму. Коефіцієнт потужності склав 0,97. Крім того, струм мережі має синусоїдний характер ( $\text{THD}_I$  складає 3,96%), тобто виконується фільтрація вищих гармонійних складових струму мережі.

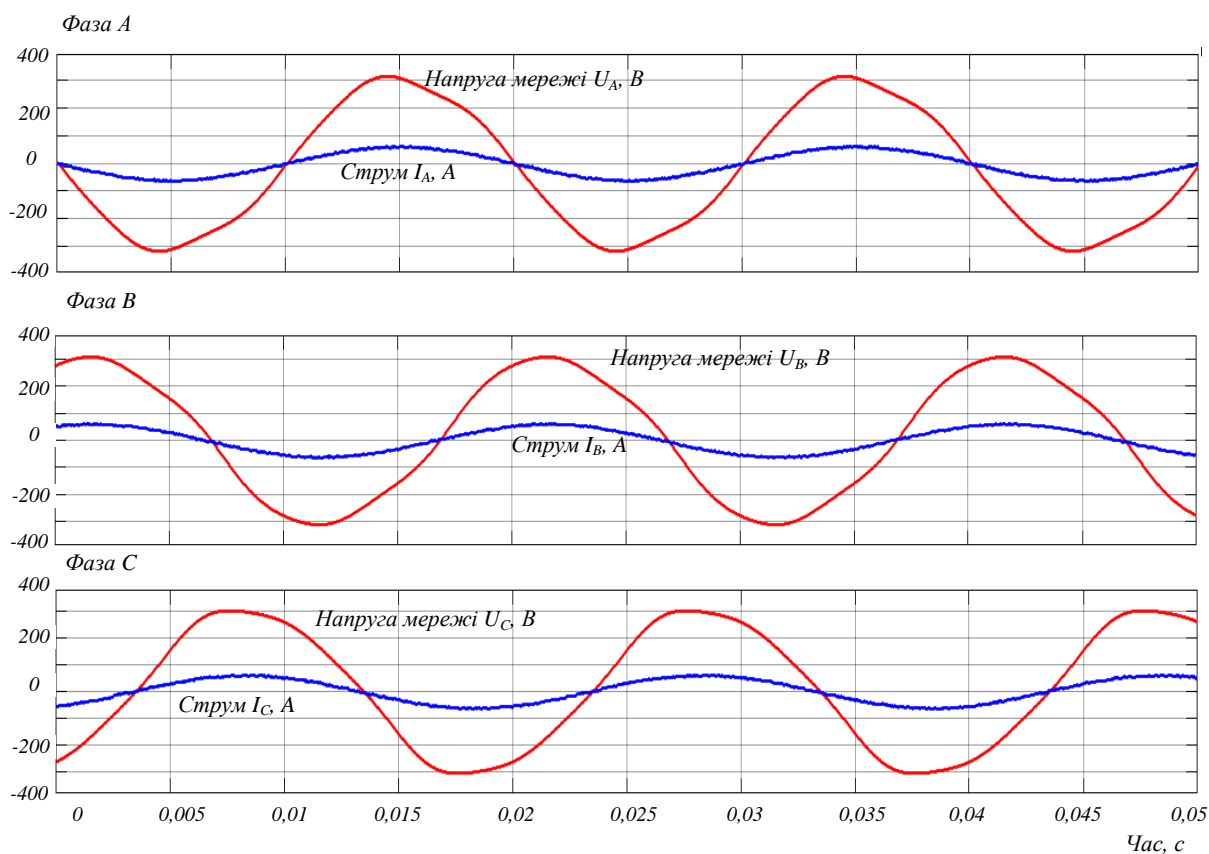


Рис. 3.54. Результати імітаційного моделювання: суміщені осцилограми напруги та струму мережі у трьох фазах

У табл. 3.2 зведені результати імітаційного моделювання для трьох видів підключення ГКРП та для різних стратегій керування його роботою. Для оцінки ефективності роботи запропонованого пристрою були використані наступні параметри:

- коефіцієнт потужності PF;
- коефіцієнт несинусоїдності струму ( $\text{THD}_I$ ).

Таблиця 3.2

**Показники ефективності роботи ГКРП, отримані в результаті  
імітаційного моделювання**

Умови проведення моделювання	Стратегія керування	До підключення ГКРП		Після підключення ГКРП	
		PF	THD <sub>I</sub> , %	PF	THD <sub>I</sub> , %
Безпосереднє підключення до мережі					
Симетрична напруга мережі	Компенсація РП, фільтрація ВГ	0,7	27,39	0,98	2,83
	Компенсація РП			0,97	7,9
Несиметрична напруга мережі	Компенсація РП, фільтрація ВГ	0,82	12,89	0,96	1,17
	Компенсація РП			0,92	18,85
Трифазне трансформаторне підключення до мережі					
Симетрична напруга мережі	Компенсація РП, фільтрація ВГ	0,7	27,39	0,99	0,4
Несиметрична напруга мережі		0,82	12,89	0,99	0,63

Продовження таблиці 3.2

Умови проведення моделювання	Стратегія керування	До підключення ГКРП		Після підключення ГКРП	
		PF	THD <sub>I</sub> , %	PF	THD <sub>I</sub> , %
Двофазне трансформаторне підключення до мережі					
Симетрична напруга мережі	Компенсація РП, фільтрація ВГ	0,7	27,39	0,98	13,65
Несиметрична напруга мережі		0,82	12,89	0,97	3,96

В результаті аналізу величин параметрів, що наведені у таблиці 3.2, видно, що підключення ГКРП забезпечує повну компенсацію реактивної потужності та дозволяє корегувати спектральний склад струму мережі відповідно до обраної стратегії керування. Тобто результати імітаційного моделювання повністю підтверджують працездатність запропонованих систем керування роботою ГКРП.

### Висновки до розділу 3

1. Розроблена імітаційна модель для перевірки роботи запропонованого пристрою в умовах симетричної та несиметричної напруги живлення. Перевірена працездатність представлених моделей у режимах компенсації як реактивної потужності, так і вищих гармонійних складових струму мережі.

2. У системі керування використане перетворення Парка і Кларка для випадку несиметрії напруги мережі, що дозволяє формувати симетричну трифазну синусоїдну систему струмів, незалежно від спектру і несиметрії напруги мережі.

3. Розроблено системи управління для трансформаторного підключення гібридного компенсатора до мережі. Забезпечена робота для двох варіантів включення: через один трифазний або два однофазних трансформатора, що покращує техніко-економічні показники ПКРП. Працездатність запропонованих алгоритмів підтверджена результатами імітаційного моделювання.

## **РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКУ ГІБРИДНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО РОБОТИ**

З метою дослідження роботи гібридного компенсатора розроблений експериментальний зразок, який складається з активної частини, що виконаний на базі силового модулю IRAMS10UP60B, до складу якого входить 6-транзисторний міст, керування якими відбувається за допомогою 32-бітного однокристального мікроконтролера з ядром Cortex-M3 STM32F103C8T6B, та пасивної частини, що складається з батарей конденсаторів з симісторним управлінням, які включені паралельно.

### **4.1 Активна частина ГКРП**

Активний компенсатор представляє собою модуль, який дозволяє моделювати джерело живлення з довільною формою і частотою вихідної напруги і керованим вихідним опором.

У модулі реалізовано:

1) чотири канали для вимірювання струму. Для реалізації каналів використані датчики на мікросхемах ACS712-05B. Робота датчиків базується на використанні ефекту Холла; забезпечена гальванічна розв'язка від силового кола; діапазон частот – від 0 до 80 кГц (по рівню -3 дБ). Два канали призначені для вимірювання вихідного струму АІН (виконується контроль сигналів цих каналів віконними компараторами, що реалізовані на мікросхемі LM339, і застосовані для апаратного захисту силових транзисторів), два канали виведені на клемник і можуть бути використані в залежності від розв'язуваної задачі;

2) чотири канали для вимірювання напруги. Для реалізації каналів використані чотири диференціальні підсилювачі на базі мікросхеми MCP6004 з діапазоном вхідних напруг  $\pm 360$  В. Вихід підсилювачів зміщений



на 1,65 В (половина від опорної напруги АЦП, яка дорівнює 3,3 В) для виконання вимірювання негативної напруги;

- 3) вимірювання температури силових ключів;
- 4) вимірювання напруги ланки постійного струму;
- 5) захист від перевищення вхідного струму, робота якого виконується відокремлено від мікроконтролера для запобігання відключення силової частини у разі помилок у роботі програми управління;
- 6) можливість обміну даними між модулями і/або між модулем і комп'ютером завдяки наявності двох високошвидкісних послідовних портів (USART1 і USART3) з гальванічною розв'язкою на оптопарах 6N137. Максимальна швидкість передачі даних складає 10 Мбіт/с.

Принципова електрична схема активного компенсатора наведена на рис. 4.1 [126].

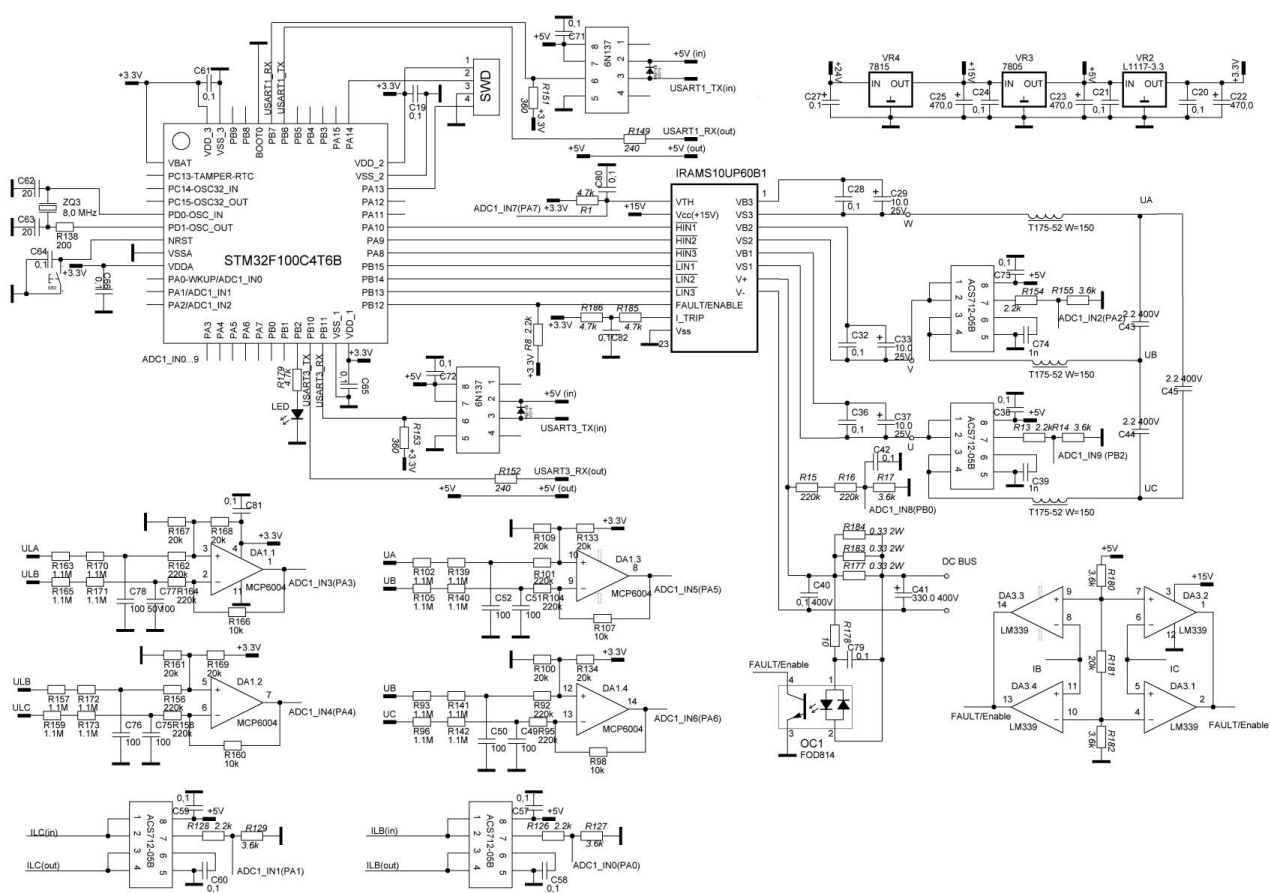


Рис. 4.1. Принципова електрична схема активного компенсатора

На рис. 4.2 представлений зовнішній вигляд плати модуля з боку пайки, на рис. 4.3 – вид зверху та збоку.

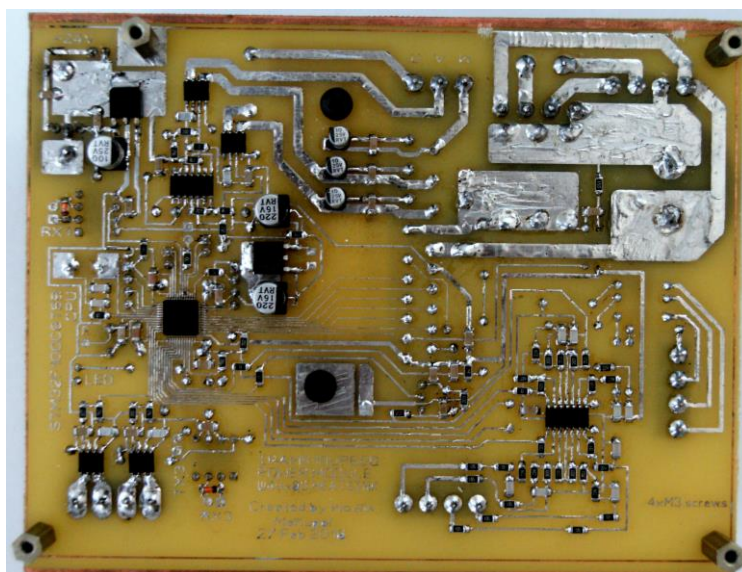
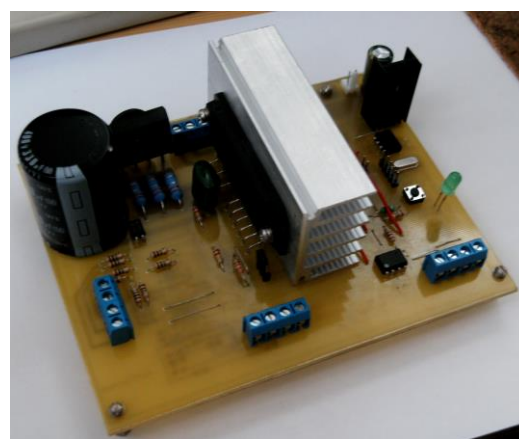


Рис. 4.2. Друкована плата активного компенсатора (сторона пайки)



а)



б)

Рис. 4.3. Активний компенсатор в зборі: а) – вид зверху; б) – вид збоку

Використаний вбудований силовий модуль IRAMS10UP60B, до складу якого входить шість IGBT транзисторів, кожен з резистором в колі затвора, шістьма кристалами комутаційних діодів, однією трифазною інтегральною схемою контролера рівня зміщення, трьома пусковими діодами з струмообмежувальним резистором і NTC термопари для захисту по

перегріву. Допустимий струм колектора складає 10 А, максимальна напруга «колектор-емітер» – 600 В, частота несучої ШІМ – 20 кГц [127]. В негативній шині ланки постійного струму встановлений шунт для захисту силових ключів у випадку короткого замикання на виході, вимірювання температури виконується за допомогою термістора. Внутрішня електрична схема модулю зображена на рис. 4.4 [127].

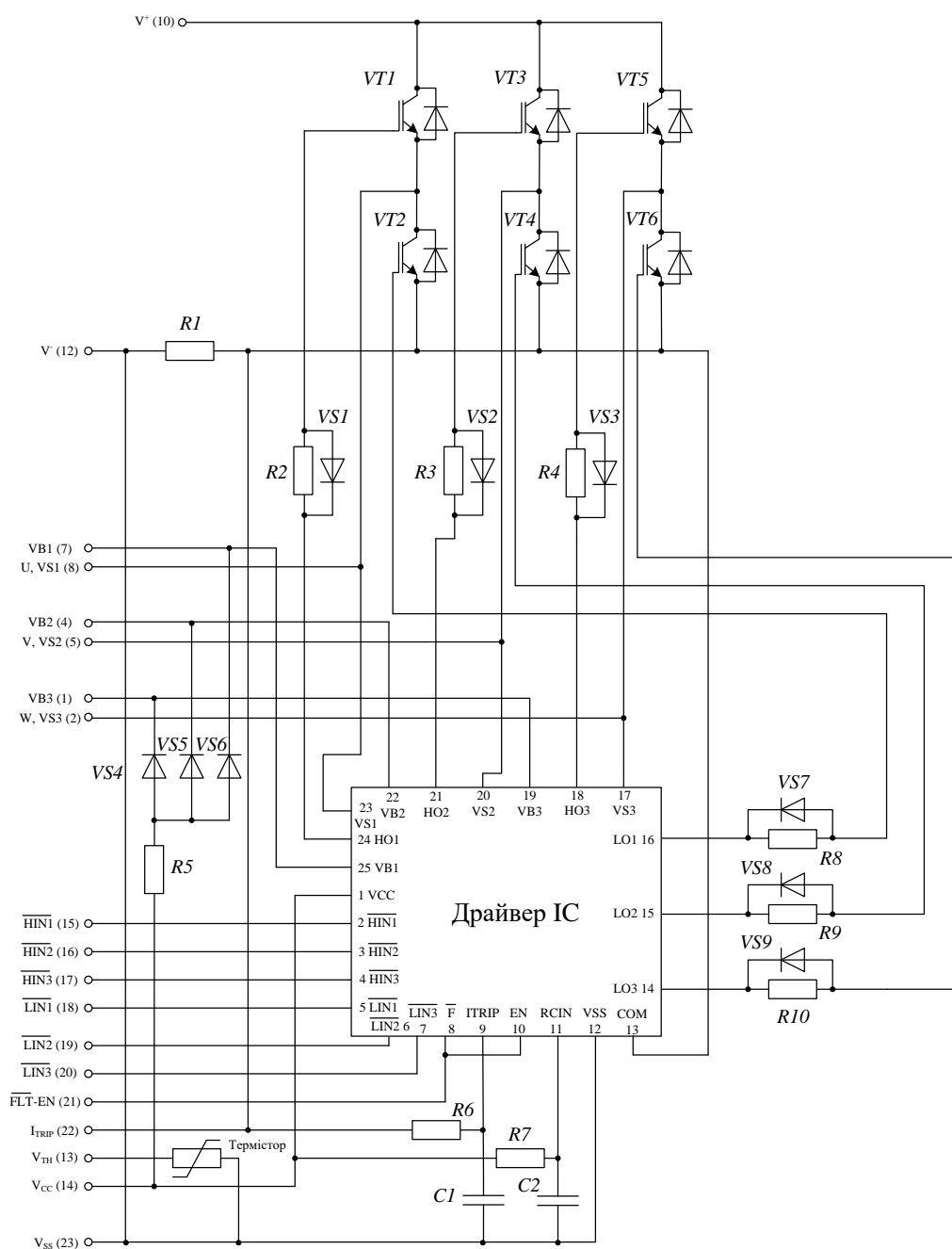


Рис. 4.4. Внутрішня електрична схема силового модулю IRAMS10UP60B

Для формування сигналів управління, що подаються на силові транзистори, використаний однокристальний мікроконтролер STM32F103C8T6B. Робоча частота мікроконтролера – 72 МГц. Перетворення аналогових сигналів, що поступають з 4 каналів вимірювання струму, 4 каналів вимірювання напруги, каналу вимірювання напруги ланки постійного струму та каналу вимірювання напруги з термістора, у цифрову форму виконують два швидкодіючих 12-бітних АЦП послідовного наближення з 10 мультиплексованими входами. Час вибірки складає 1 мкс [128].

Схема управління живиться від зовнішнього джерела, напруга живлення 18...+30 В. За допомогою лінійних стабілізаторів виконується живлення:

- драйверів затворів IGBT (+15 В);
- датчиків струму і компараторів захисту (+5 В);
- мікроконтролера (+3,3 В).

Програмування контролера проводиться внутрішньосхемно, за допомогою програматора ST-LINK або ST-LINK / V2 через роз'єм SWD.

Після оцифровки сигналів дані з бортових АЦП контролера передаються на ПК через порт USART1. По кожному з каналів частота дискретизації становить 6,67 кГц, що зумовлено обмеженням пропускної здатності послідовного порту (використовується швидкість 1,5 Мбіт/с).

Програмне забезпечення дозволяє передавати через порт USART1 дані бортових АЦП контролера на ПК. Частота дискретизації становить 6,67 кГц (по кожному з 10 каналів) через обмеження пропускної здатності послідовного порту (використовується швидкість 1,5 Мбіт/с). Так, на рис. 4.5 наведено приклад осцилограми вихідної напруги модуля в режимі формування синусоїдних напруг із зсувом фаз 120 ел. градусів.

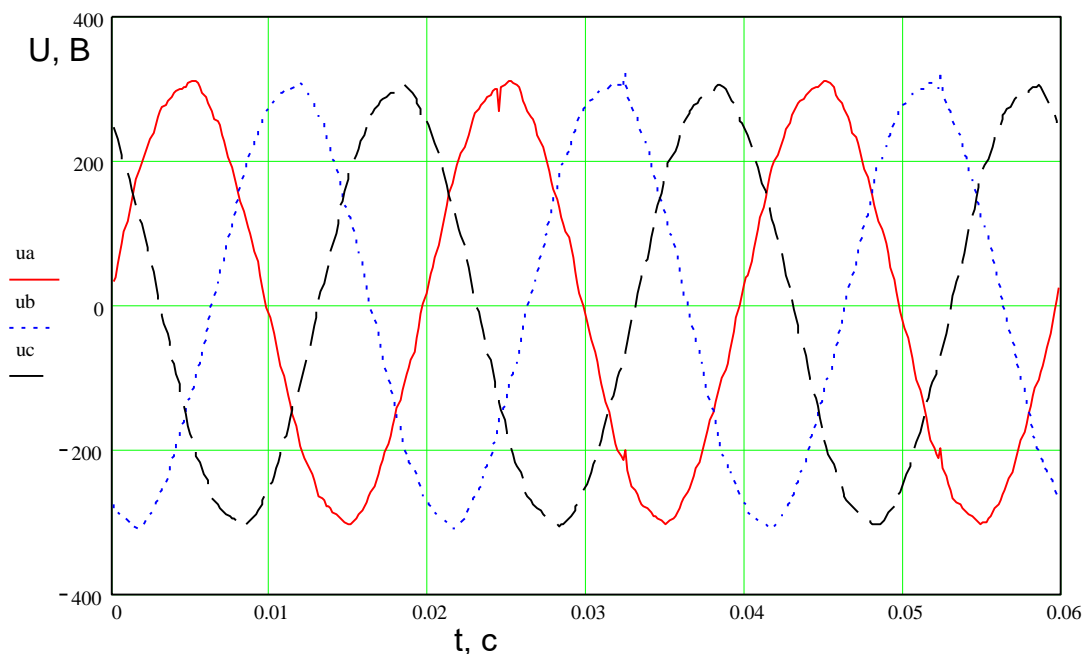


Рис. 4.5. Вихідні напруги блоку в режимі формування трифазної системи напруг синусоїдальної форми

Шляхом використання послідовного порту USART3 можна здійснити обмін інформацією з іншими аналогічними модулями, що дозволяє реалізувати досить складні технічні систем з можливістю програмування законів управління ними.

## 4.2 Пасивна частина ГКРП

Переключення ступенів пасивної частини компенсатора реалізовано з використанням симісторів ВТА24-800BW. Номінальний струм складає 25 А, номінальна напруга – 800 В [129]. На рис. 4.6 зображена спрощена схема підключення симісторів.

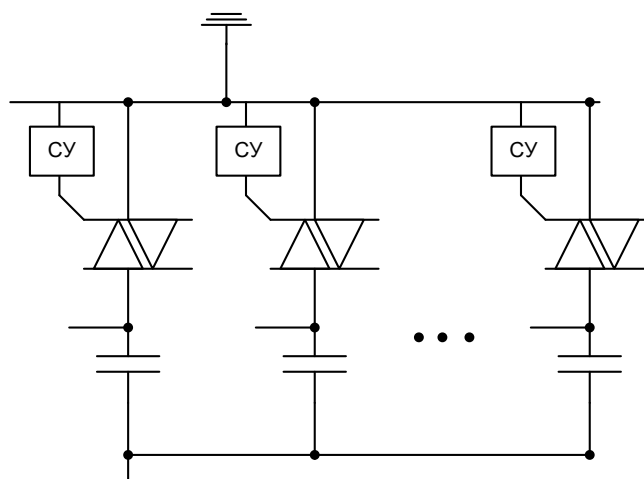


Рис. 4.6. Схема підключення симісторів з системою управління

Схема управління симісторами з контролем переходу напруги через нуль наведена на рис. 4.7.

Контроль переходу через нуль виконується для зменшення пускових струмів і комутаційних шумів. Для гальванічної розв'язки між силовим і керуючим колами використана оптопара РС817 з високим коефіцієнтом передачі струму. Максимальна вихідна напруга колектор-емітер – 25 В, максимальний вхідний та вихідний струм – 50 мА, максимальний коефіцієнт передачі струму – 600% [130]. Характеристики обраних елементів вказані на схемі на рис. 4.7.

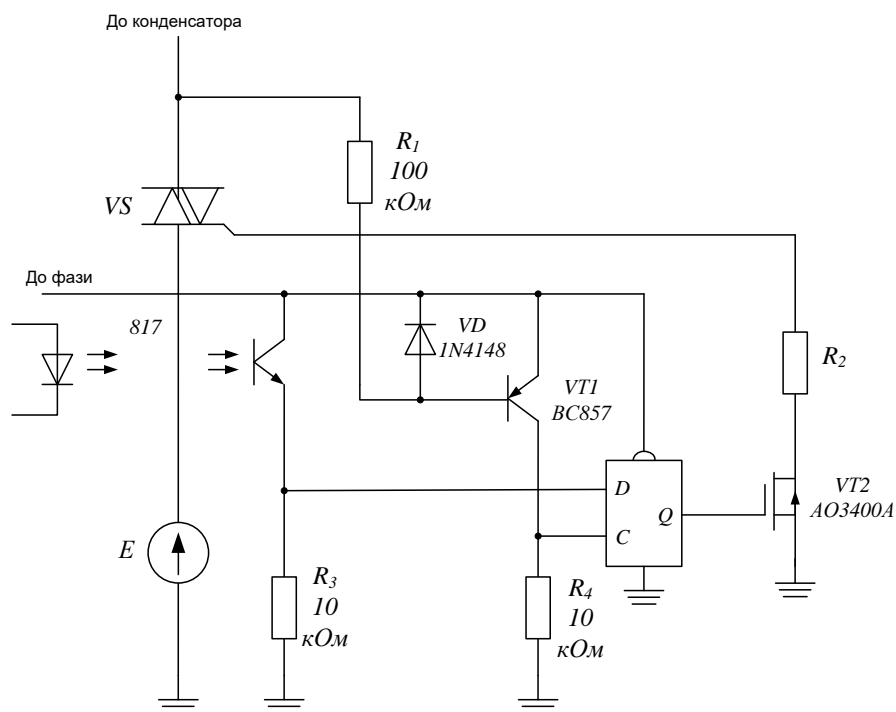


Рис. 4.7. Схема управління симісторами з контролем переходу напруги через нуль

На рис. 4.8 представлений зовнішній вигляд виводів симісторів з одного боку пристрою, на рис. 4.9 – плата управління ними.

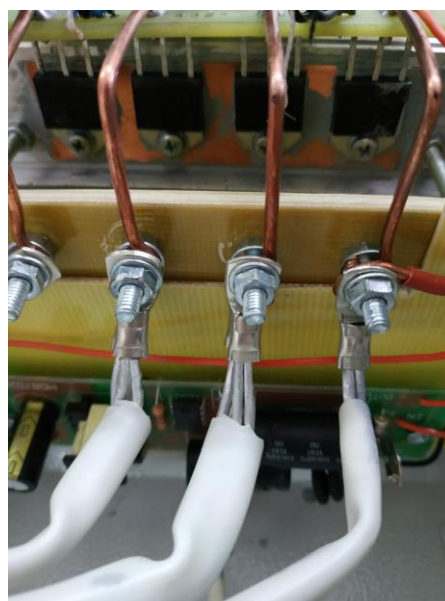
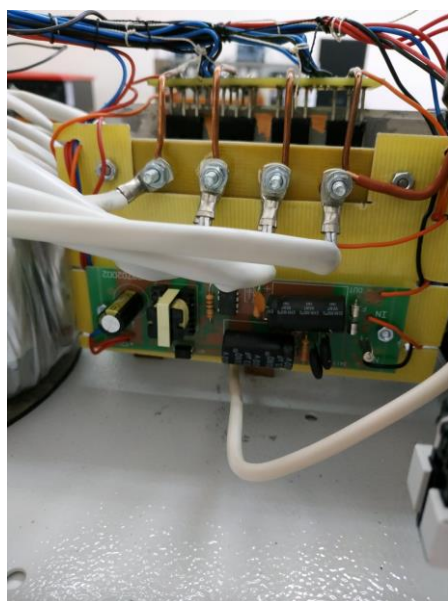


Рис. 4.8. Зовнішній вигляд виводів симісторів



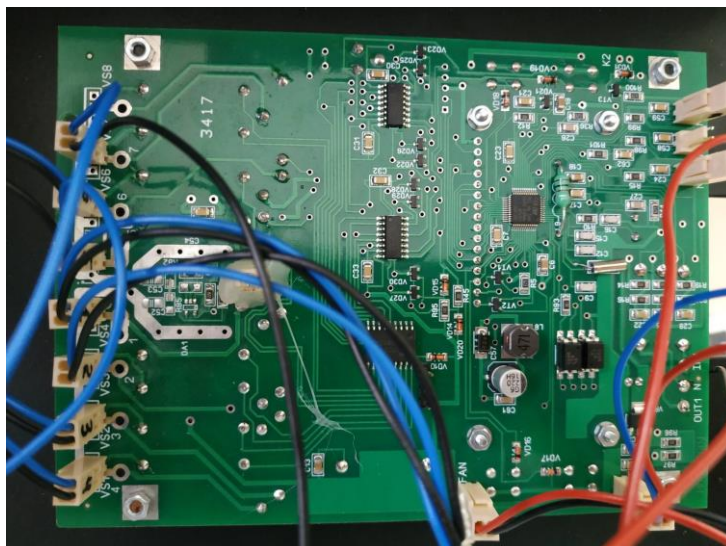


Рис. 4.9. Зовнішній вигляд плати управління симісторами

Пасивний компенсатор реалізований на базі пускових конденсаторів СВВ-65 номінальною напругою 450 В.

Для забезпечення діапазону регулювання реактивної потужності від 2,1 кВАр до 13,8 кВАр при напрузі мережі 220 В максимальна вихідна напруга активного компенсатора становить 22 В (10% від напруги мережі, тобто  $\Delta_{\max} = 0,1$ ). Для реалізації підходу до розрахунку ємностей ступенів, що описується формулами (2.9)-(2.10), розроблена схема, до складу якої входять 10 конденсаторів з розрахунковими ємностями 150 мкФ, 33 мкФ, 40 мкФ, 50 мкФ, 60 мкФ, 73 мкФ, 90 мкФ, 109 мкФ, 133 мкФ, 162 мкФ. Тоді ємності ступенів БК, відповідно, дорівнюють 150 мкФ, 183 мкФ, 223 мкФ, 273 мкФ, 333 мкФ, 406 мкФ, 496 мкФ, 605 мкФ, 738 мкФ, 900 мкФ.

Розрахункові ємності отримані шляхом паралельного з'єднання БК з наступними номінальними параметрами:

- 150 мкФ: 1 батарея конденсаторів СВВ65 150uF 450V;
- 33 мкФ: 1 батарея конденсаторів СВВ65 20uF 450V, 2 батареї конденсаторів СВВ65 7,5uF 450V;
- 40 мкФ: 1 батарея конденсаторів СВВ65 40uF 450V;
- 50 мкФ: 1 батарея конденсаторів СВВ65 50uF 450V;
- 60 мкФ: 1 батарея конденсаторів СВВ65 60uF 450V;





## Продовження таблиці 4.1

Номер ступеню БК	Включені конденсатори (+)									
9	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

При використанні підходу до розрахунку ємності ступенів, що описується виразом (2.11), можна зменшити кількості ступенів БК.

На рис. 4.10 представлений зовнішній вигляд фрагменту пасивної частини однофазного ГКРП.



Рис. 4.10. Зовнішній вигляд фрагменту паралельно-з'єднаних батарей конденсаторів

Пасивний компенсатор складається з 4 конденсаторів розрахунковою ємністю 150 мкФ, 183 мкФ, 223 мкФ, 273 мкФ (тобто  $k = 4$ ,  $\Delta_{\max} = 0,1$ ). Для їх реалізації використані БК наступної номінальної ємності:

- 150 мкФ: 1 батарея конденсаторів СВВ65 150uF 450V;
- 183 мкФ: 1 батарея конденсаторів СВВ65 150uF 450V, 1 батарея конденсаторів СВВ65 25uF 450V, 1 батарея конденсаторів СВВ65 8uF 450V;
- 223 мкФ: 2 батареї конденсаторів СВВ65 100uF 450V, 1 батарея конденсаторів СВВ65 15uF 450V, 1 батарея конденсаторів СВВ65 8uF 450V;

- 273 мкФ: 2 батареї конденсаторів CBV65 130uF 450V, 2 батареї конденсаторів CBV65 7,5uF 450V.

Десять ступенів безперервного регулювання потужності ГКРП були отримані шляхом з'єднання в паралель конденсаторів в різних комбінаціях відповідно до табл. 4.2. Для отримання ємності п'ятого ступеню необхідне спільне включення конденсаторів першого і другого ступеню, ємності шостого ступеню – конденсаторів другого і третього ступеню і т.д. При цьому комбінації для дев'ятої та десятої ступенів не можуть бути розраховані за виразом (2.15), проте отримання цих ступенів можливо при включенні конденсаторів в комбінаціях, зазначених в таблиці 4.2. Діапазон зміни реактивної потужності гібридного КРП становить від 2,1 кВАр до 13,8 кВАр при напрузі мережі 220 В.

Таблиця 4.2

**Таблиця істинності включення конденсаторів БК**

Конденсатор	C1	C2	C3	C4
Ємність, мкФ	150	183	223	273
Номер ступеню батареї конденсаторів	Включені конденсатори (+)			
1	+			
2		+		
3			+	
4				+
5	+	+		
6		+	+	
7			+	+
8	+	+		+
9		+	+	+
10	+	+	+	+

### 4.3 Результати експериментального дослідження

При проведенні експериментального дослідження у якості навантаження було прийняте навантаження, яке складалося з паралельно включених асинхронного двигуна потужністю 0.18 кВт ( $\cos\varphi = 0.6$ ;  $\eta = 0.55$ ) та перетворювача частоти потужністю 0.4 кВт ( $\cos\varphi = 0.98$ ;  $\text{THD}_I = 59\%$ ). На рис. 4.11 представлені форма струму навантаження фази А ( $\text{THD}_I = 29,3\%$ ) та напруги мережі фази А ( $\text{THD}_U = 5,2\%$ ) [126].

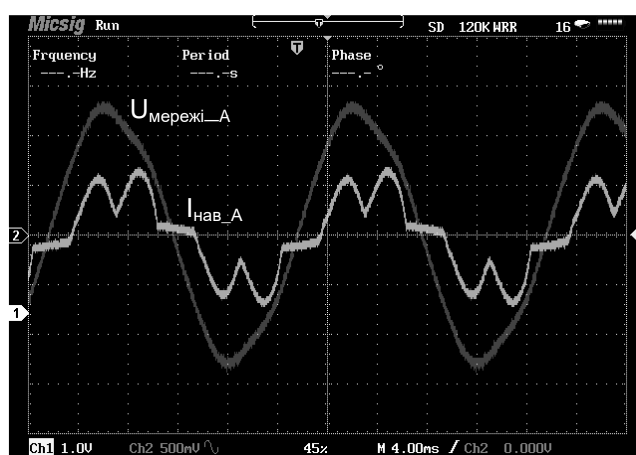
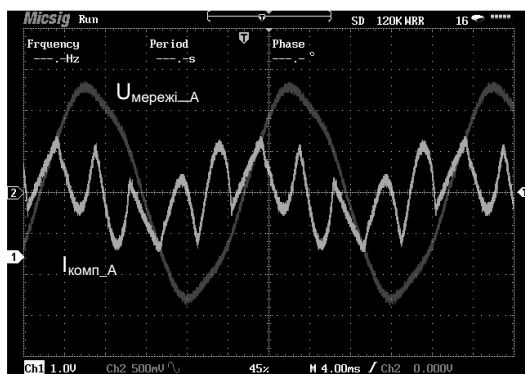
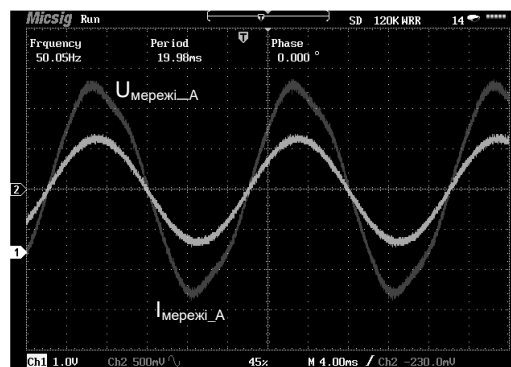


Рис. 4.11. Осцилограми струму навантаження фази А та напруги мережі фази А

Осцилограми струмів при роботі ГКРП наведені на рис. 4.12.



а)



б)

Рис. 4.12. Осцилограми: а) струму компенсатора фази А та напруги мережі фази А; б) струму мережі фази А та напруги мережі фази А

На рис. 4.13 наведені отримані спектри струму навантаження, струму мережі та струму компенсатора.

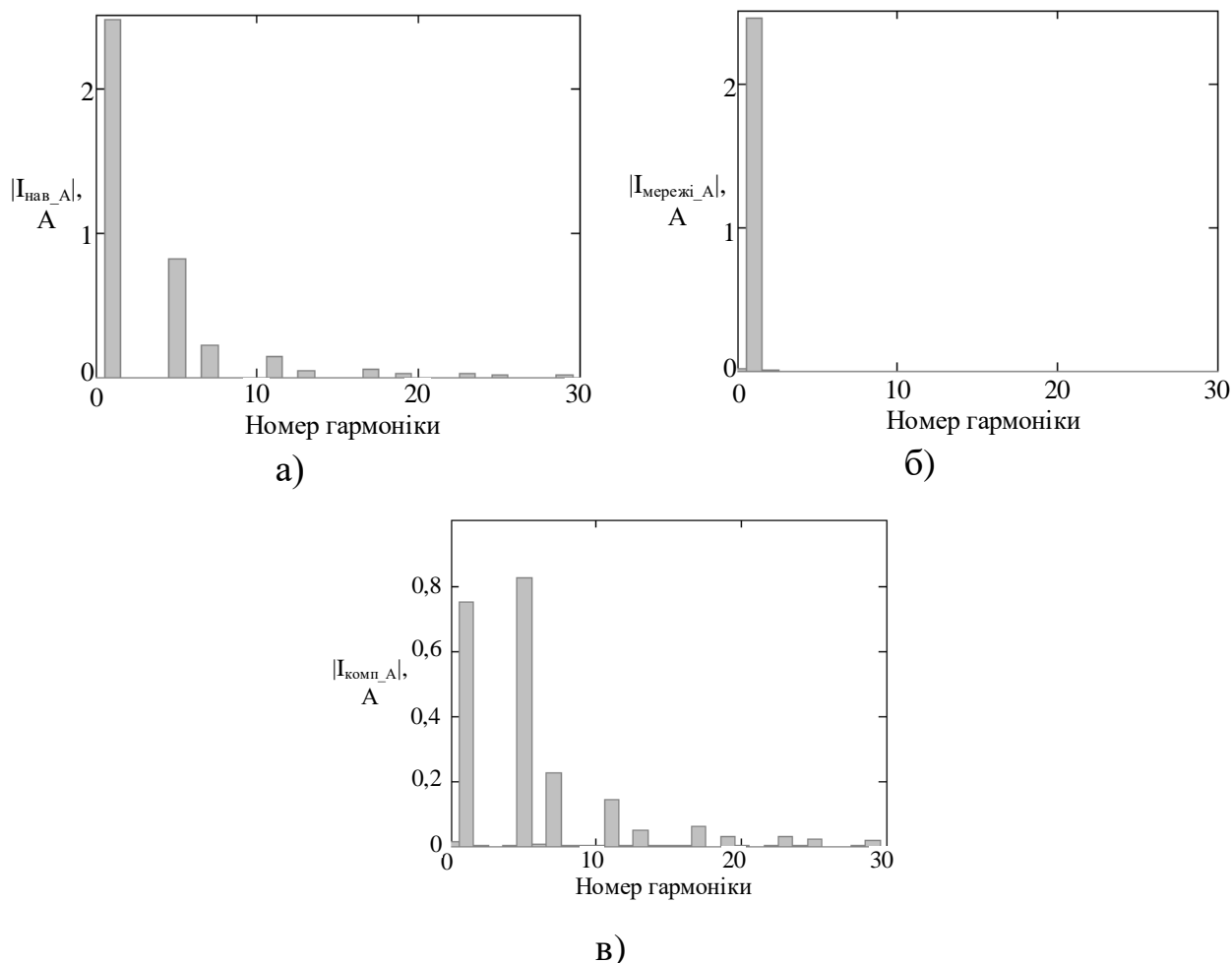


Рис. 4.13. Спектр: а) струму навантаження фази А; б) струму мережі фази А; в) струму компенсатора фази А

Для проведення вимірювань був використаний цифровий двоканальний осцилограф Micsig MS510S з гальванічною розв'язкою каналів та частотним діапазоном до 100 МГц.

Результати розрахунку коефіцієнту несинусоїдності та коефіцієнту потужності для досліджуваного навантаження при підключенні ГКРП наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

**Результати дослідження показників ефективності роботи ГКРП**

Показники	До підключення ГКРП	Після підключення ГКРП
Коефіцієнт несинусоїдності струму мережі $THD_I$	29,3%	3,1%
Коефіцієнт потужності PF, розрахований для частоти 50 Гц	0,7	0,99

У результаті проведення експерименту величина реактивної потужності, що була скомпенсована, склала 360 ВАр. При цьому засобами пасивної частини скомпенсовано 316,8 ВАр, активної – 43,2 ВАр.

Результати експериментів підтвердили працездатність представлених алгоритмів керування та показали, що використання запропонованих в дисертації підходів дозволяє суттєво зменшити встановлену потужність активної частини ГКРП, при цьому забезпечуючи повну компенсацію реактивної потужності, та дають можливість корегувати спектральний склад струму мережі.

## Висновки до розділу 4

1. Розроблений експериментальний зразок, який складається з активної частини, що виконаний на базі силового модулю IRAMS10UP60B, до складу якого входить 6-транзисторний міст, керування якими відбувається за допомогою 32-бітного однокристального мікроконтролера з ядром Cortex-M3 STM32F103C8T6B, та пасивної частини, що складається з батарей конденсаторів з симісторним управлінням, які включені паралельно.
2. Для зменшення пускових струмів і комутаційних шумів розроблена схема управління симісторами з контролем переходу напруги через нуль.
3. Проведені експериментальні випробування розробленого зразка з електричними навантаженнями мережі, що показали забезпечення повної компенсації реактивної складової струму навантаження та зниження коефіцієнта гармонік струму мережі.

## ВИСНОВКИ

Сукупність отриманих теоретичних результатів, наукових положень і технічних розробок, представлених в дисертації, становить обгрунтоване розв'язання актуального наукового завдання підвищення ефективності пристроїв компенсації реактивної потужності за рахунок розробки нових методів керування та удосконалення силової частини компенсатора, що дозволяє забезпечити високу швидкодію, плавність регулювання та покращити техніко-економічні показники компенсатора.

Основні наукові результати, висновки і рекомендації полягають у наступному:

1. У дисертаційній роботі дане нове рішення науково-практичної задачі удосконалення пристроїв компенсації реактивної потужності за рахунок розробки нових методів керування та удосконалення силової частини компенсатора, що дозволяє забезпечити високу швидкодію (час виходу на новий режим складає до 40 мс), плавність регулювання, мінімізувати встановлену потужність автономного інвертора напруги шляхом оптимального вибору ємностей ступенів батареї конденсаторів (забезпечується зниження потужності АІН в 5-10 разів при збереженні властивостей АФ), та покращити техніко-економічні показники ПКРП.

2. Розроблено системи управління, що забезпечують роботу гібридного компенсатора при чотирипровідному та трипровідному підключенні пристрою до мережі в умовах несинусоїдності струму навантаження та несиметричної напруги живлення. Забезпечена робота пристрою у двох режимах – компенсації реактивної потужності та компенсації усіх неактивних складових струму навантаження до 64 гармоніки включно (ТНД забезпечується на рівні 2-3%).

3. Розроблено системи управління для трансформаторного підключення гібридного компенсатора до мережі. Забезпечується робота для двох варіантів включення: через один трифазний або два однофазних



трансформатора, що покращує техніко-економічні показники ПКРП. При цьому сумарна потужність трансформаторів становить до 20% від потужності компенсатора.

4. Розроблений спосіб стабілізації напруги ланки постійного струму АІН у складі гібридного компенсатора реактивної потужності, що дозволяє зменшити час перехідного процесу при стрибкоподібній зміні потужності навантаження до 2 періодів напруги мережі і мінімізувати ємність конденсаторів ланки постійного струму активного компенсатора.

5. Розроблено імітаційні моделі запропонованого гібридного компенсатора, на базі яких підтверджена працездатність запропонованих алгоритмів управління в усіх розглянутих режимах роботи. Моделювання проводилося для навантаження з THD споживаного струму у діапазоні 12-30% та коефіцієнтом потужності на рівні 0,7.

6. Проведена експериментальна перевірка розробленого гібридного компенсатора реактивної потужності в умовах лабораторії електроприводу ДВНЗ «ПДТУ». Експериментальна перевірка показала ефективність запропонованих підходів: THD струму був знижений з 29,3% до 3,1%, коефіцієнт потужності підвищений з 0,7 до 0,99. При цьому потужність активного компенсатора склала 12% від потужності компенсатора в цілому.

7. Результати досліджень пройшли дослідно-промислову апробацію в умовах в умовах ТОВ «Магма» та ПрАТ «МК «Азовсталь». Очікуваний економічний ефект склав 318,5 тис. грн. на рік та 4483,505 тис. грн. на рік, відповідно.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях / В. А. Веников [и др.]. – М., «Энергия», 1975. – 136 с.
2. Reactive Power Control in AC Power Systems / N. Mahdavi Tabatabaei, A. Jafari Aghbolaghi, N. Bizon, F. Blaabjerg. – Springer International Publishing, 2017. – 634 p. – Mode of access: DOI: 10.1007/978-3-319-51118-4
3. Hofmann W. Reactive Power Compensation: A Practical Guide 1st / W. Hofmann, J. Schlabbach, W. Just. – Wiley, 2012. – 304 p.
4. Electrical Power Systems Quality, Third Edition / R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, H. Wayne Beaty. – McGraw-Hill Education, 2012. – 580 p.
5. Мельников Н. А. Реактивная мощность в электрических сетях / Н. А. Мельников. – М.: Энергия. – 1975. – 128 с.
6. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах / Ю. С. Железко. – М.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.
7. Омельчук А.О. Електричні системи та мережі / А.О. Омельчук. – Київ: Видавничий центр НУБІП України, 2006. – 160 с.
8. Шепетюк И. С. Источники реактивной мощности / И. С. Шепетюк ; науч. рук. Р. Р. Мороз // Актуальные проблемы энергетики : материалы 70-й научно-технической конференции студентов и аспирантов / Белорусский национальный технический университет, Энергетический факультет. Секция 6: Электротехника и электроника. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 285-286.
9. Лыкин А. В. Электроэнергетические системы и сети : учебник для вузов / А. В. Лыкин. – Москва : Издательство Юрайт, 2019. – 360 с. – (Университеты России). – ISBN 978-5-534-04321-1.
10. Абулхаев Х. К. Улучшение энергоэффективности электрических сетей металлургического предприятия / Х.К. Абулхаев, М.А. Валиев, С.А. Васильченко // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и

аспирантов (09-20 апреля 2018г.; Комсомольск-на-Амуре). – 2018. – С. 202-204.

11. Управление реактивной мощностью – эффективное средство повышения надежности и экономичности работы энергосистемы / И.Ш. Фардиев [и др.] // Энергетика Татарстана. – 2007. – № 4. – С. 18-25.

12. Кабышев А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий / А.В. Кабышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 234 с.

13. Irinjila Kranti Kiran. Shunt versus Series compensation in the improvement of Power system performance // Irinjila Kranti Kiran, Jaya Laxmi. A // International journal of applied engineering research. – 2011. – Vol. 2, № 1. – Pp. 28-37.

14. Хіргій А. Г. Аналіз існуючих і перспективних методів компенсації реактивної потужності / А. Г. Хіргій, О. В. Москаленко // Проблеми інформатизації та управління. – 2005. – № 13, том 2. – С. 132-137

15. Воротницкий В. Э. Энергетическая эффективность и компенсация реактивной мощности в электрических сетях. Проблемы и пути решения / В.Э. Воротницкий // Энергосовет. – 2017. – № 1(47). – С. 44-53.

16. Ahmed A. A. Hafez. Saud H. Alruways. Yazeed A. Alsaif. Naif A. Alotaibi. Reactive Power Problem and Solutions: An Overview / Ahmed A. AbdElhafez [et al.] // Journal of Power and Energy Engineering. – 2017. – Vol. 5. – Pp. 40-54. DOI: 10.4236/jpee.2017.55004

17. Козирський В.В. Електротехнічні системи електропостачання: навчальний посібник // В.В. Козирський, М.В. Гребченко, А.О. Омельчук. – Київ : ЦП «КОМПРИНТ», 2018. – 326 с.

18. Омельчук А.О. Зниження технологічних витрат електроенергії в розподільних електричних мережах / А.О. Омельчук, А.М. Скрипник // Енергетика і автоматика. – 2013. – № 4. – С. 61-73.

19. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник / Л.А. Бессонов. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
20. Filipski P. S. Evaluation of reactive power meters in the presence of high harmonic distortion / P. S. Filipski, P. W. Labaj // IEEE Trans on Pow. Del. – 1992. – Vol. 7, no. 4. – Pp. 1793-1799.
21. Budeanu C. Reactive and fictitious powers / C. Budeanu // Rumanian National Institute. – 1927. – No. 2. – Pp. 127-138.
22. Fryze S. Wirk- Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung / S. Fryze // Elektrotechnische Zeitschrift. – 1932. – No. 25. – Pp. 596-702.
23. Kusters N. L. On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions / N. L. Kusters, W. J. M. Moore // IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. – 1980. – Vol. PAS-99, no. 5. – Pp. 1845-1854.
24. Shepherd W. Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems / W. Shepherd, P. Zakikhani // PROC. IEE. – 1972. – Vol. 119, no. 9. – Pp. 1361-1362.
25. Sharon D. Reactive power definition and power factor improvement in non-linear systems / D. Sharon // Proc. of Ins Vol. Electric Engineers. – 1973. – Vol 120, no. 6. – Pp. 704-706.
26. Czarnecki L. S. Considerations on the reactive power in nonsinusoidal situations / L. S. Czarnecki // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1985. – Vol. 34, no. 3. – Pp. 399-404.
27. Czarnecki L. S. What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned / L. S. Czarnecki // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1987. – Vol. 36, no. 3. – Pp. 834-837.
28. Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: a discussion / R. Arseneau [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, no. 1. – Pp. 79-101.

29. IEEE Standard 1459-2000. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. – New York, 2000.

30. Корнилов Г. П. Повышение эффективности электротехнических комплексов предприятий чёрной металлургии за счёт регулируемых компенсирующих устройств : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.03 / Корнилов Геннадий Петрович. – Магнитогорск, 2010. – 378 с.

31. Омельчук А.О. Зниження технологічних витрат електроенергії в розподільних електричних мережах / А.О. Омельчук // Енергетика і автоматика. – 2016. – № 4. – С. 56-67.

32. Савенко О. С. Обзор методов компенсации реактивной мощности / О. С. Савенко, С. К. Поднебенная // Енергетика, енергозбереження на початку ХХІ століття: Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів. (20 березня 2014 р.; Маріуполь). – С. 18.

33. Омельчук А.О. Щодо участі синхронних двигунів у компенсації реактивної потужності / А.О. Омельчук, С.М. Волошин, А.В. Петренко / Промелектро. – 2010. – № 1. – С. 46-51.

34. Давидов О. Ю. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах / О. Ю. Давидов, О. В. Бялобржеський // Діагностика в електромеханічних і енергетичних системах. – Випуск 3/2010 (62). Частина 1. – С.132-136.

35. Шидловський, В.О. Новський, А.Ф. Жаркін Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями / А.К. Шидловський, В.О. Новський, А.Ф. Жаркін. – Київ : Інститут електродинаміки НАН України, 2013. – 378 с.

36. Dixon J. Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review / J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, R. Domke // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93(12). – Pp. 2144-2164. doi:10.1109/jproc.2005.859937

37. Xu Y. An over-voltage protection scheme of power capacitor bank exposed to harmonic / Y. Xu, Y. Tang, W. Hong // 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). – 2014. – Pp. 82-86. doi:10.1109/ichqp.2014.6842866

38. New algorithm for protection of capacitor banks exposed to harmonic overvoltages / G. Benmouyal, H. Bilodeau, S. Chano, G. Sybille // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1993. – Vol. 8(3). – Pp. 898-904. doi:10.1109/61.252616

39. Кузьмин В. В. Анализ средств компенсации реактивной мощности в электрических сетях Украины // В. В. Кузьмин, И. Г. Кирисов, С. В. Малинин // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 5(99). – С.45-50.

40. Avdhut D. Baing. Closed loop control of Thyristor Switched Capacitor (TSC) for instantaneous Reactive Power Compensation / D. Baing Avdhut, Dr. J.G. Jamnani // International journal of engineering development and research IJEDR (Two Day National Conference (RTEECE-2014) - 17th, 18th January 2014). – Pp. 84-87.

41. Коваленко Д. В. Неисправности батарей статических конденсаторов, возникающих при наличии высших гармоник в системах электроснабжения // Молодой ученый. — 2016. — №19. — С. 69-72.

42. Attachie J. C. Investigating Harmonic Resonance And Capacitor Bank Switching At A Power Distribution Substation Using A Fixed Capacitor Bank / J. C. Attachie, C. K. Amuzuvi // Research Journal in Engineering and Applied Sciences. – 2013. – №2(4). – Pp. 343-348.

43. Методы снижения влияния высших гармоник на батареи конденсаторов / О. С. Савенко, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, С. К. Поднебенная // Університетська наука-2014: Міжнар. науково-технічна конференція (20-21 травня 2014 р.; Маріуполь). – Т. 2. – С. 7-8.

44. Cheng S. Research on Reactive Compensation Technology Based on SVC-APF / S. Cheng, N. Zhang, X. Cui, Z. Fu // IEEE 3rd Advanced Information

Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). 2018. – Pp. 1547-1551. doi:10.1109/iaeac.2018.8577530

45. Vijayakumar T. Harmonics Analysis of Thyristor controlled Reactor circuits / T.Vijayakumar, A.Nirmalkumar // International Journal of Computer and Electrical Engineering (IJCEE). – 2010. – Vol. 2(1). – Pp. 190-192. DOI: 10.7763/IJCEE.2010.V2.134

46. Ponce C. A. Technique Power Factor Compensation by the Electronic Generation of Reactive and Harmonic Currents / C. A. Ponce // XVI Workshop on Information Processing and Control (RPIC) (6-9 October 2015; Cordoba). – 2015. – Pp. 1-6. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/RPIC.2015.7497149>

47. Данилюк І. О. Компенсація реактивної потужності. Теперішнє та майбутнє / І. О. Данилюк, М. Ю. Голованьов // Екологія. Людина : матеріали V Міжн. наук.-техн. конф. / Інститут енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2013. – С. 394-401.

48. Киселев М. Г. Исследование и разработка методов симметрирования токов в трехфазных системах электроснабжения на основе силовых электронных устройств компенсации неактивной мощности : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Киселев Михаил Геннальевич. – Москва, 2017. – 160 с.

49. Satpute K. V. Hybrid Model of TSC-TCR for Power Transmission / K. V. Satpute, P. S. Vaidya // International Journal of Computing and Technology. – 2014. – Volume 1, Issue 1. – Pp. 34-38.

50. Harmonics and capacitors effects of capacitors in a harmonic environment // From the mcgraw-edison power systems capacitor plant. – 1985. – Iss. 4. – Pp. 1-4.

51. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / Edited by: Ewald F. Fuchs, Mohammad A.S. Masoum. – 2008. – 664 p. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-369536-9.X5001-3>

52. Fassbinder S. Capacitors in Harmonic-Rich Environments / S. Fassbinder. – 2004. – 16 p.

53. Performance Investigation of Active Harmonic Power Filter Using PWM Methods / S. V. Purnima, C. Gomathi, S. Sathya, T. Snekapriya // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 3, Issue 3. – Pp. 10685-10691.

54. Pradeepa S. Voltage Harmonic Reduction Using Current Source Inverter as a Series Active Power Filter / S. Pradeepa, K. Uma rao, Ravishankar Deekshit // IEEE ICARET. – 2013. – Pp. 12-16.

55. Шидловський А.К. Моделювання режимів роботи статичних синхронних компенсаторів реактивної потужності та фазоповоротних трансформаторних пристроїв для створення гнучких систем передачі змінного струму в ОЕС України / А.К. Шидловський, А.Ф. Жаркін, В.О. Новський, Д.О. Малахатка // Праці Інституту електродинаміки. – 2014. – Випуск 38. – С. 18-30.

56. KusumaLatha Y. Control Strategy for Three Phase Shunt Active Power Filter with Minimum Current Measurements / Y. Kusuma Latha, Ch. Saibabu, Y. P. Obulesh // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2011. – Vol.1, No.1. – Pp. 31-42.

57. Шидловський А. К. Моделювання режимів роботи статичних синхронних компенсаторів реактивної потужності та фазоповоротних трансформаторних пристроїв для створення гнучких систем передачі змінного струму в ОЕС України / А. К. Шидловський, А. Ф. Жаркін, В. О. Новський, Д. О. Малахатка // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2014. – Вип. 38. – С. 18-29. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/PIED\\_2014\\_38\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/PIED_2014_38_4)

58. Harmonic Compensation in Power System using Active Power Filters / Abhijit A Dutta, Manisha Sabley, B.S.Sudame, A.N.Kadu // International Journal of Multidisciplinary and Current Research. – Nov/Dec 2013 iss. – Pp. 188-192.



59. Effective Elimination of Harmonics By Means Of A Hybrid Series Active Filter (HSAF) / Ch. Ravikiran, G. Indira Kishore, Tlsv. Ayya Rao, M. Rambabu // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). – 2012. – Vol. 2, Issue 5. – Pp. 96-101.

60. Wang L. Design of a Thyristor Controlled LC Compensator for Dynamic Reactive Power Compensation in Smart Grid / L. Wang, C.-S. Lam, M.-C. Wong // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2017. – Vol. 8(1). – Pp. 409-417. – Mode of access: doi:10.1109/tsg.2016.2578178

61. Application of Synchronous Static Series Compensator (SSSC) on enhancement of voltage stability and power oscillation damping / H. Taheri, S. Shahabi, S. Taheri, A. Gholami // IEEE EUROCON. – 2009. – Pp. 533-539. – Mode of access: doi:10.1109/eurcon.2009.5167683

62. Vireshkumar G. Mathad. Review on Comparison of FACTS Controllers for Power System Stability Enhancement / Vireshkumar G. Mathad, Basangouda F. Ronad, Suresh H. Jangamshetti // International Journal of Scientific and Research Publications. – 2013. – Volume 3. – Pp.1-4.

63. Woodley N. H. Field Experience With Dynamic Voltage Restorer Systems / N. H. Woodley // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. – Singapore, 2000. – Vol. 4. – Pp. 2864-2871.

64. Saha T. K. Dynamic Voltage Restorer Against Balanced and Unbalanced Voltage Sags: Modelling and Simulation / T. K. Saha, P. T. Nguyen // IEEE Power Engineering Society General Meeting (6-10 June, 2004). – Denver, 2004. – Vol. 1. – Pp. 639-644.

65. Sadigh A. K. Review of voltage compensation methods in dynamic voltage restorer (DVR) / A. K. Sadigh, K. M. Smedley // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. – 2012. – Pp. 1-8. – Mode of access: doi:10.1109/pesgm.2012.6345153

66. Appala Naidu T. The Role Of Dynamic Voltage Restorer (DVR) in improving power quality / T. Appala Naidu // 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-

Informatics (AEEICB). – 2016. – Pp. 136-141. – Mode of access: doi:10.1109/aeecb.2016.7538259

67. Ganesh S. N. V. A unified algorithm for injecting voltage in 3- phase dynamic voltage restorer (series power quality controller): a thesis in partial fulfillment for the award of the degree of doctor of philosophy / S. N. V. Ganesh. – 2013. – 160 p. – Mode of access: <http://hdl.handle.net/10603/18931>

68. Nimje A. A. Interline Power Flow Controller: Review Paper / A. A. Nimje, Ch. K. Panigrahi, A. K. Mohanty // International Electrical Engineering Journal (IEEJ). – 2011. – Vol. 2, no. 3. – Pp. 550-554.

69. Unified Power Quality Conditioner (UPQC) with Voltage Dips and Over-voltages Compensation Capability / V. M. Moreno [et al.] // Renewable Energies and Power Quality Journal. – 2008. – Vol. 1, no. 6. – Pp. 294-299.

70. Metin K. Simplified Control Method for Unified Power Quality Conditioner (UPQC) / M. Kesler, E. Ozdemir // Renewable Energies and Power Quality Journal. – 2009. – Vol. 1, no. 7. – Pp. 474-478.

71. A comparative analysis of UPFC as a Power Flow controller with applications / Ch. Kiran Kumar, M. Sudheer Kumar, V. SriramBabu, S. Nagulmeera // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE). – 2013. – Volume 4, Issue 6. – Pp. 53-61.

72. Nabil A. Hussein. Analyzing the Interline Power Flow Controller (IPFC) Steady State Performance in Power Systems / Nabil A. Hussein, Ayman A. Eisa, Essam Eddin M. Rashad // Proceedings of the 15th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'12). – 2012. – Pp. 1-8.

73. Vasquez-Arnez R. L. The Interline Power Flow Controller: Further aspects related to its operation and main limitations / R. L. Vasquez-Arnez, F. A. Moreira // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. – 2008. – Pp. 1-6. – Mode of access: doi:10.1109/tdc.2008.4517091

74. Жаркін А. Ф. Комплексне покращення якості електроенергії та забезпечення електробезпеки в локальних системах електропостачання при застосуванні гібридних фільтрокомпесуючих перетворювачів / А. Ф. Жаркін,

В. О. Новський, Д. О. Малахатка // Технічна електродинаміка. – 2018. – № 1. – С. 69-77. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.069>

75. Seyed Hossein Hosseini. Novel Hybrid Active Filter for Power Quality Improvement and Neutral Current Cancellation / Seyed Hossein Hosseini, Tohid Nouri, Mehran Sabahi // 2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering – ELECO 2009. – 2009. – Pp. 244-248. – Mode of access: DOI: 10.1109/ELECO.2009.5355371

76. A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter / J. Dixon, Ya. del Valle, M. Orchard, M. Ortúzar, L. Morán, C. Maffrand // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2003. – Volume 50, Issue 5. – Pp. 982-989. – Mode of access: DOI: 10.1109/TIE.2003.817604

77. Wang L. Hybrid Structure of Static Var Compensator and Hybrid Active Power Filter (SVC//HAPF) for Medium-Voltage Heavy Loads Compensation / L. Wang, C.-S. Lam, M.-C. Wong // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65(6). – Pp. 4432–4442. – Mode of access: doi:10.1109/tie.2017.2772201

78. Cascaded Nine-Level Inverter for Hybrid-Series Active Power Filter, Using Industrial Controller / A. Varschavsky, J. Dixon, M. Rotella, L. Morán, // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 57(8). – Pp. 2761-2767. – Mode of access: doi:10.1109/tie.2009.2034185

79. Litran S. P. Reference Voltage Optimization of a Hybrid Filter for Nonlinear Load Compensation / S. P. Litran, P. Salmeron // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 61(6). – Pp. 2648-2654. – Mode of access: doi:10.1109/tie.2013.2276078

80. Garg R. K. Reactive Power Compensation and Power Factor Improvement Using Fast Active Switching Technique / R. K. Garg, S. Ray, N. Gupta // IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). – 2016. – Pp. 1-5. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/icpeices.2016.7853166>

81. Power Electronic Hybrid System for Load Balancing Compensation and Frequency-Selective Harmonic Suppression / A. Luo, S. Peng, C. Wu, J. Wu, Z. Shuai // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2012. – Vol. 59(2). – Pp. 723-732. – Mode of access: doi:10.1109/tie.2011.2161066

82. A Combination of Shunt Hybrid Power Filter and Thyristor-Controlled Reactor for Power Quality / S. Rahmani, A. Hamadi, K. Al-Haddad, L.A. Dessaint // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 61(5). – Pp. 2152-2164. – Mode of access: doi:10.1109/tie.2013.2272271

83. Wang L. Unbalanced Control Strategy for A Thyristor-Controlled LC-Coupling Hybrid Active Power Filter in Three-Phase Three-Wire Systems / L. Wang, C.-S. Lam, M.-C. Wong // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2017. – Vol. 32(2). – Pp. 1056-1069. – Mode of access: doi:10.1109/tpel.2016.2555330

84. Ajeet Kumar Rawat. Reactive Power Compensation in Single Phase Distribution System using SVC, STATCOM & UPFC / Ajeet Kumar Rawat, A. S. Pandey, Ankit Kumar Srivastava // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2017. – Vol. 4, Iss.9. – Pp. 360-367.

85. Гибридный компенсатор реактивной мощности с плавным регулированием / В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, С. К. Поднебенная, О. С. Савенко // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – № 2. – С. 13-19.

86. Компенсатор реактивной мощности с плавным регулированием / О. С. Савенко, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, С. К. Поднебенная // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: V Міжнародна науково-технічна конференція (29 червня – 1 липня 2014 р.; Луцьк). – С. 32-34.

87. IEEE Standard 1459-2010. Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. – Approved 2010-2-2. – IEEE-SA Standards Board, 2010. – 72 p.

88. Пат. 106174 Україна, МПК G05F 1/70 (2006.01) H02J 3/18 (2006.01). Спосіб компенсації реактивної потужності / В. Бурлака, С. Гулаков, С. Поднебенна; Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет». – № а201310826; заявл. 09.09.2013; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 17.

89. Пат. 112554 Україна, МПК G05A 1/70. Спосіб компенсації реактивної потужності / С. В. Гулаков, В. В. Бурлака, С. К. Поднебенна, О. С. Савенко. – № а201403912; заявл. 14.04.2014; опубл. 26.09.2016, Бюл. №18.

90. К вопросу синтеза системы управления гибридным компенсатором реактивной мощности / О. С. Савенко, С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков // Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика: Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, спеціалістів, аспірантів (20-24 квітня 2015 р.; Маріуполь). – С. 35.

91. Hybrid VAR compensator with improved efficiency / V. V. Burlaka, S. V. Gulakov, S. K. Podnebennaya, O. S. Savenko // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2014. – Вип. 29. – С. 174-180. – (Серія: Технічні науки).

92. Поднебенная С.К. Повышение энергоэффективности электротехнического комплекса «нелинейная нагрузка – силовой активный фильтр» в электрических сетях 0,4 кВ : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Поднебенная Светлана Константиновна. – Донецк, 2013. – 199 с.

93. Бурлака В. В. Активный корректор коэффициента мощности с повышенным быстродействием регулятора напряжения / В. В. Бурлака // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникации РТ-2010: 6-я Международная молодежная научно-техническая конференция (19-24 апреля 2010г.; Севастополь). – С. 145.

94. Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing / Steven W. Smith. – California Technical Publishing, 2002. – 640 p.

95. Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter / J. Rodriguez [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54, iss. 1. – Pp. 495-503. – Mode of access: DOI: 10.1109/TIE.2006.888802.
96. Nelson A. Patel. A Hysteresis Current Control Technique for Electronics Converter / Nelson A. Patel, Jaydeep C. Baria // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 5, Issue 2. – Pp. 2205-2210. – Mode of access: DOI:10.15680/IJIRSET.2016.0502106.
97. Blaabjerg F. Control of Power Electronic Converters and Systems. Vol.1 / F. Blaabjerg. – Academic Press, 2018. – 392 p.
98. Patin N. Power Electronics Applied to Industrial Systems and Transports. Vol.2 / N. Patin. – ISTE Press – Elsevier, 2015. – 336 p. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04690-4>.
99. Исследование свойств гибридных компенсаторов реактивной мощности / О. С. Савенко, С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков // Університетська наука-2015: Міжнар. науково-технічна конференція. (19-20 травня 2015 р.; Маріуполь). – Т. 2. – С. 229-230.
100. Control Strategy for Hybrid VAR Compensator / O. S. Savenko, S. K. Podnebennaya, V. V. Burlaka, S. V. Gulakov // IEEE Ukraine Student, Young Professional and Women in Engineering Congress (UKRSYW). – 2018. – Pp. 93-96.
101. Способ компенсации реактивной компоненты тока / О. С. Савенко, С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика : XVII Міжнародна науково-технічна конференція (17-19 травня 2016р.; Кременчук). – С. 225-227.
102. Титце У. Полупроводниковая схемотехника : Справочное руководство. Пер. с нем. / У. Титце, К. Шенк. – М. : Мир, 1982. – 512 с., ил.
103. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах

електроснабження общего назначения. – К.: Госстандарт Украины. – 1999. – 32 с.

104. Оппенгейм А. В. Цифровая обработка сигналов / А. В. Оппенгейм, Р. В. Шафер. – М.: Связь, 1979. – 416 с.

105. Смит Д. М. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей / Д. М. Смит. – М.: Машиностроение, 1980. – 271 с.

106. Малинов В. Л. Источник питания установки индукционного нагрева / В. Л. Малинов, О. С. Савенко // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2016. – Вип. 33. – С. 82-86. – (Серія: Технічні науки).

107. К вопросу повышения эффективности средств компенсации реактивной мощности / О. С. Савенко, С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков // Університетська наука-2016 : Міжнар. науково-технічна конференція (19-20 травня 2016 р.; Маріуполь). – Т. 1. – С. 203.

108. Мартяков А. И. Теория автоматического управления / А. И. Мартяков. – М.: МГИУ, 2008. – 147 с.

109. Туманов М. П. Теория импульсных, дискретных и нелинейных САУ: учебное пособие / М. П. Туманов. – М.: МГИЭМ, 2005. – 63 с.

110. Нелінійні та дискретні системи автоматичного керування: Курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Б. І. Приймак. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 198 с.

111. Оценка эффективности методов управления гибридным компенсатором реактивной мощности (ГКРМ) / О. С. Савенко, С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков // Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика : IV Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів. (15-17 травня 2018р.; Маріуполь). – С. 33.

112. Chattopadhyay S. Electric Power Quality / S. Chattopadhyay, M. Mitra, S. Sengupta. – Springer Netherlands, 2011. – 182 p. DOI: 10.1007/978-94-007-0635-4.

113. Hasan K. N. M. Comparative study on combined series active and shunt passive power filter using two different control methods / K. N. M. Hasan, M. F. Romlie // 2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems. – 2007. – Pp. 928-933. – Mode of access: doi: 10.1109/ICIAS.2007.4658522.

114. Савенко О. С. Имитационное моделирование работы гибридного компенсатора реактивной мощности / О. С. Савенко, С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака // Електротехніка та електроенергетика. – 2019. – № 1. – С. 61-70.

115. О возможностях управления параметрами качества электроэнергии со стороны электроприемников с активными выпрямителями / С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, О. С. Савенко // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2017. – Вип. 34. – С. 139-147. – (Серія: Технічні науки).

116. Повышение энергоэффективности электрической сети при наличии несимметричных нагрузок / О. С. Савенко, С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков // Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика: Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів (11-12 травня 2016 р.; Маріуполь). – С. 32.

117. Иммитационное моделирование режимов работы ГКРМ в условиях несимметрии питающего напряжения / О. С. Савенко, С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков // Університетська наука-2018: Міжнар. науково-технічна конференція (23-24 травня 2018 р.; Маріуполь). – Т. 1. – С. 288-289.

118. Выбор критериев оптимизации работы статических компенсаторов в сетях с несимметричной нагрузкой / О. С. Савенко,



С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков // Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика : III Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів (11-12 травня 2017 р.; Маріуполь). – С. 24.

119. Математическое моделирование работы гибридного компенсатора реактивной мощности в условиях несимметричной трехфазной сети / О. С. Савенко, С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков // Університетська наука-2017: Міжнар. науково-технічна конференція (18-19 травня 2017 р.; Маріуполь). – Т. 1. – С. 259-260.

120. Система управління гібридним компенсатором реактивної потужності / О. С. Савенко, С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков // Університетська наука – 2019: Міжнар. науково-технічна конференція (16-17 травня 2019 р.; Маріуполь). – Т. 1. – С. 251-252.

121. Czarnecki L. S. On Some Misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power Theory / L. S. Czarnecki // IEEE Transactions on Power Electronics, 2004. – Vol. 19(3). – Pp. 828-836. DOI: 10.1109/tpel.2004.826500

122. Suru C. V. The synchronous fundamental dq frame theory implementation and adaptation for the active filtering / C. V. Suru, C. A. Patrascu, M. Linca // International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE). – 2014. – Pp. 1-6. – Mode of access: DOI: 10.1109/icate.2014.6972654.

123. Особливості розрахунку струму компенсатора реактивної потужності в умовах несинусоїдності та несиметрії напруги мережі / О. С. Савенко, С. К. Поднебенная, В. В. Бурлака, С. В. Гулаков // Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика: V Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів (19-21 листопада 2019 р.; Маріуполь). – С. 46-47.

124. Research on reactive power compensation technology in distribution grid / Y. Ma, L. Cao, X. Zhou, Z. Gao // 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC). – 2017. – Pp. 1409-1414. – Mode of access: doi:10.1109/ccdc.2017.7978738

125. Савенко О.С. Имитационное моделирование работы гибридного компенсатора реактивной мощности с трансформаторным подключением к сети / О.С. Савенко, С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака // Österreichisches Multiscience Journal. – Innsbruck, Austria, 2020. – Vol.1, № 30. – Pp. 46-53.

126. Експериментальне дослідження роботи гібридного компенсатора реактивної потужності / О.С. Савенко, С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук, 2020. – № 2(50). – С.36-42. – Mode of access: DOI: 10.30929/2072-2052.2020.2.50.36-42.

127. International Rectifier's IRAMS10UP60B iMOTION Series 10A, 600V with Internal Shunt Resistor. – 2012. – 17 p.

128. Microcontroller STM32F103C8T6B Datasheet. – STMicroelectronics. – 117 p.

129. A standard and Snubberless triacs BTA24-800BW Datasheet. – STMicroelectronics. – 2007. – 12 p.

130. High Density Mounting Type Photocoupler PC817 Datasheet. – Sharp. – 4 p.

## ДОДАТКИ

### Додаток А

#### ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ НЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРИ НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМАХ

##### Визначення по С. Budeanu

Відповідно до визначення по С. Budeanu (1927), активна потужність в ланцюзі з періодичними струмами і напругами визначається як сума активних потужностей кожної гармоніки:

$$P = \sum_n P_n = \sum_n U_n I_n \cos \phi_n, \quad (\text{A.1})$$

де  $\phi_n$  – зсув фази між струмом і напругою  $n$ -ої гармоніки.

Реактивна потужність, згідно з визначенням по С. Budeanu, визначається аналогічно:

$$Q = \sum_n Q_n = \sum_n U_n I_n \sin \phi_n. \quad (\text{A.2})$$

При цьому виявляється, що умова  $S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}$  не виконується:

$$S^2 = \sum_n U_n^2 \cdot \sum_n I_n^2 \geq \sum_n P_n^2 + \sum_n Q_n^2 = \left( \sum_n U_n I_n \cos \phi_n \right)^2 + \left( \sum_n U_n I_n \sin \phi_n \right)^2. \quad (\text{A.3})$$

С. Budeanu було введено додатковий доданок  $D$ , що отримав назву «потужність спотворень» (distortion power), що дорівнює:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2. \quad (\text{A.4})$$

Реактивна потужність і потужність спотворень, що визначаються за С. Budeanu, позначають з нижнім індексом В:  $Q_B$ ,  $D_B$ .

Однією з основних переваг даного визначення реактивної потужності при несинусоїдних режимах є те, що дотримується характеристика 5 (представлені в п. 1.1), що відповідає визначенню реактивної потужності при синусоїдальних режимах, тобто що сума реактивних потужностей в точці електричної мережі дорівнює нулю. До недоліків відноситься те, що не дотримуються характеристики 3 і 8, які відповідають визначенню реактивної потужності при синусоїдальних режимах, тобто реактивна потужність не може бути скомпенсована до нуля, і, відповідно, неможливо забезпечити одиничний коефіцієнт потужності.

### **Визначення по S. Fryze**

Відповідно до теорії S. Fryze (1932), миттєвий струм визначається двома складовими: активною та реактивною компонентами. Активна компонента  $i_a(t)$  визначається як струм, що співпадає по формі і по фазі з напругою, і дорівнює:

$$i_a(t) = \frac{P}{U^2} \cdot u(t), \quad (\text{A.5})$$

де  $P$  – активна потужність,  $U$  – середньоквадратичне значення напруги,  $u(t)$  – миттєве значення напруги.

Реактивна компонента  $i_r(t)$  визначається як:

$$i_r(t) = i(t) - i_a(t). \quad (\text{A.6})$$

Активна компонента струму характеризує активну складову навантаження, в той час як реактивна компонента може бути повністю компенсована, що дозволить забезпечити одиничний коефіцієнт потужності.

Для середньоквадратичних значень активної і реактивної компонент струму можна записати наступний вираз:

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2, \quad (\text{A.7})$$

звідки можна зробити висновок, що реактивна компонента струму повинна бути ортогональна активній компоненті.

Повна потужність може бути знайдена в результаті добутку середньоквадратичних значень струму і напруги:

$$S^2 = U^2 \cdot I^2 = U^2 \cdot (I_a^2 + I_r^2) = P^2 + Q^2. \quad (\text{A.8})$$

Величину  $Q$ , знайдену за визначенням S. Fryze, прийнято називати «уявною» потужністю і позначати як  $Q_F$ .

Перевагою даного визначення реактивної потужності при несинусоїдних режимах є те, що немає необхідності вводити додаткове поняття потужності спотворень. Крім того, при такому підході можлива повна компенсація реактивної потужності, що забезпечує виконання характеристики 3 по аналогії з синусоїдним режимом. До недоліків відноситься те, що не виконується характеристика 5, яка відповідає визначенню реактивної потужності при синусоїдних режимах. Крім того, так як коефіцієнт потужності буде дорівнює нулю при нульовій  $Q_F$ , цього не можна досягти, використовуючи тільки індуктивні і ємнісні елементи. Таким чином, використання пасивних фільтрокомпенсуючих пристроїв, розрахованих по теорії S. Fryze, є неможливим, що визначає перевагу

використання активних компенсаторів, для яких реактивна компонента струму  $i_r(t)$  є струмом завдання.

### **Визначення по N.L. Kusters і W.J.M. Moore**

Визначення реактивної потужності по N. L. Kusters і W. J. M. Moore (1980) також відноситься до часової області. На відміну від визначення по S. Fryze, відбувається поділ реактивної складової струму на дві ортогональні складові: ємнісну або індуктивну реактивну складову (в залежності від навантаження) і залишкову реактивну складову (також ємнісну або індуктивну).

Для повної потужності можна записати наступний вираз:

$$S^2 = P^2 + Q_c^2 + Q_{cr}^2 = P^2 + Q_l^2 + Q_{lr}^2. \quad (\text{A.9})$$

Активна складова струму визначається аналогічно (A.5):

$$i_p = \frac{P}{U^2} \cdot u = \frac{\frac{1}{T} \int_T u \cdot i \cdot dt}{U^2} \cdot u. \quad (\text{A.10})$$

Ємнісна реактивна складова струму:

$$i_{qc} = \frac{\frac{1}{T} \int_T u_{der} \cdot i \cdot dt}{U_{der}^2} \cdot u_{der}, \quad (\text{A.11})$$

де  $u_{der}$  – періодична складова похідною від миттєвої напруги,  $U_{der}$  – середньоквадратичне значення похідної від миттєвої напруги.

Індуктивна реактивна складова струму:

$$i_{ql} = \frac{\frac{1}{T} \int_T u_{int} \cdot i \cdot dt}{U_{int}^2} \cdot u_{int}, \quad (A.12)$$

де  $u_{int}$  – періодична складова інтеграла миттєвої напруги,  $U_{int}$  – середньоквадратичне значення інтеграла від миттєвої напруги.

Активна потужність дорівнює:

$$P = U \cdot I_p. \quad (A.13)$$

Ємнісна реактивна потужність дорівнює:

$$Q_c = U \cdot I_{qc} = \frac{U}{U_{der}} \cdot \frac{1}{T} \int_T u_{der} \cdot i \cdot dt. \quad (A.14)$$

Індуктивна реактивна потужність дорівнює:

$$Q_l = U \cdot I_{ql} = \frac{U}{U_{int}} \cdot \frac{1}{T} \int_T u_{int} \cdot i \cdot dt. \quad (A.15)$$

Залишкові складові струму знаходяться за виразами:

$$i_{qcr} = i - i_p - i_{qc}; \quad (A.16)$$

$$i_{qlr} = i - i_p - i_{ql}. \quad (A.17)$$

Відповідно, залишкові потужності можуть бути знайдені з виразів:

$$Q_{cr} = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_c^2}; \quad (A.18)$$

$$Q_{lr} = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_l^2}. \quad (A.19)$$

Для розрахунку величини струму компенсації користуються виразом:

$$i_q = a \cdot u_{der} + b \cdot u_{int} + i_{qr}, \quad (\text{A.20})$$

де  $i_{qr}$  – залишкова складова струму в залежності від характеру навантаження (ємнісна або індуктивна),  $a$ ,  $b$  – константи, що дозволяють оптимізувати компенсацію реактивної потужності.

Як правило, оптимуму можна досягти, якщо одна з констант буде дорівнювати нулю.

У порівнянні з визначенням по S. Fryze, перевагою визначення по N.L. Kusters і W.J.M. Moore є те, що є можливість досить легко обчислити струм, який може бути компенсувати за допомогою конденсатора або котушки індуктивності, і що характеристики 7 і 8 виконуються і для ємнісної реактивної потужності, і для індуктивної. Однак такий підхід справедливий тільки при допущенні, що імпеданс мережі дорівнює нулю.

### **Визначення по W. Shepherd і P. Zakikhani**

Визначення реактивної потужності по W. Shepherd і P. Zakikhani (1972) ґрунтується на частотних методах аналізу. Нелінійні навантаження, підключені до ідеального джерела, будуть генерувати гармоніки струму, що не відповідають гармонікам напруги. Таким чином, гармоніки струму і напруги умовно діляться на «загальні» і «незагальні». «Загальні» гармоніки присутні як в спектрі струму, так і в спектрі напруги, «незагальні» гармоніки присутні або тільки в спектрі струму, або тільки в спектрі напруги. Відповідно до цього можна записати вираз для повної потужності:

$$S^2 = \left[ \sum_{n \in N} U_n^2 + \sum_{m \in M} U_m^2 \right] \cdot \left[ \sum_{n \in N} I_n^2 + \sum_{p \in P} I_p^2 \right], \quad (\text{A.21})$$



де  $n$  – номер гармонік, присутніх і в спектрі струму, і в спектрі напруги,  $m$  – номер гармонік, присутніх в спектрі напруги,  $p$  – номер гармонік, присутніх в спектрі струму.

W. Shepherd запропонував розділити повну потужність на наступні складові:

$$S_R^2 = \sum_{n \in N} U_n^2 \cdot \sum_{n \in N} I_n^2 \cdot \cos^2 \phi_n; \quad (\text{A.22})$$

$$S_X^2 = \sum_{n \in N} U_n^2 \cdot \sum_{n \in N} I_n^2 \cdot \sin^2 \phi_n; \quad (\text{A.23})$$

$$S_D^2 = \sum_{n \in N} U_n^2 \cdot \sum_{p \in P} I_p^2 + \sum_{m \in M} U_m^2 \cdot \left( \sum_{n \in N} I_n^2 + \sum_{p \in P} I_p^2 \right). \quad (\text{A.24})$$

При цьому дотримується таке співвідношення:

$$S^2 = S_R^2 + S_X^2 + S_D^2. \quad (\text{A.25})$$

Всі компоненти в виразах (A.21-A.25) визначаються середньоквадратичними значеннями, а значить, знака не мають. Складова може бути скомпенсована пасивними елементами, таким чином, можна забезпечити максимальний коефіцієнт потужності, в той же час складова пасивними елементами скомпенсована бути не може.

Основним недоліком визначення по W. Shepherd є те, що активна потужність, яка визначається як  $P$ , не еквівалентна  $S_R$ . Крім того, дійсне значення опору мережі відмінно від нуля, тому запропоноване визначення потужності може бути використано тільки в теоретичних розрахунках.

### Визначення по Sharon

В основі визначення по Sharon (1973) лежать методи частотного аналізу, і аналогічно визначенню по W. Shepherd, гармоніки діляться на «загальні» і «незагальні», і повна потужність визначається аналогічно (A.21).

Активна складова повної потужності визначається аналогічно (A.1), реактивна складова – за наступним виразом:

$$S_Q^2 = U_{rms}^2 \sum_{n \in N} I_n^2 \cdot \sin^2 \phi_n. \quad (A.26)$$

Повна потужність визначається як:

$$S^2 = P^2 + S_Q^2 + S_C^2, \quad (A.27)$$

де  $S_C$  – залишкова складова повної потужності, яка визначається за виразом:

$$\begin{aligned} S_C^2 = & \sum_{m \in M} U_m^2 \cdot \sum_{n \in N} I_n^2 \cdot \cos^2 \phi_n + U_{rms}^2 \cdot \sum_{p \in P} I_p^2 + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{\beta=n} \sum_{\gamma=n} (U_\beta \cdot I_\gamma \cdot \cos \phi_\gamma - U_\gamma \cdot I_\beta \cdot \cos \phi_\beta) \end{aligned} \quad (A.28)$$

Основними відмінностями визначення по Sharon в порівнянні з визначенням по W. Shepherd є визначення активної потужності, яка збігається з визначенням її по Budeanu, і те, що при обчисленні реактивної складової (A.26) використовується повна середньоквадратична напруга на відміну від (1.23), де використовується сума середньоквадратичних «загальних» гармонік.

### Визначення по L. S. Czarnecki

Визначення по L. Czarnecki (1985-1988) також відноситься до частотних. Миттєве значення періодичного напруги може бути представлено у вигляді ряду Фур'є:

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \sum_n U_n e^{jn\omega_1 t}, \quad (\text{A.29})$$

де  $\omega_1$  – фундаментальна кутова частота,  $n$  – номер гармоніки, яка присутня в спектрі напруги ( $U_n \neq 0$ ).

Електрична мережа має комплексну провідність:

$$Y_n = G_n + jB_n, \quad (\text{A.30})$$

причому складові  $G_n$ ,  $B_n$  залежать від частоти.

Тоді струм можна знайти за наступним виразом:

$$i(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_n U_n \cdot (G_n + jB_n) \cdot e^{jn\omega_1 t}. \quad (\text{A.31})$$

Активна складова струму знаходиться за аналогією з визначенням по Fryze:

$$i_a(t) = u(t) \cdot G_e, \quad (\text{A.32})$$

де  $G_e$  – активна провідність еквівалентного навантаження:

$$G_e = \frac{P}{U_{rms}^2}. \quad (\text{A.33})$$

Струм «розсіювання» (по L. Czarnecki) знаходиться за виразом:

$$i_s(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_n U_n \cdot (G_n - G_e) \cdot e^{jn\omega t}. \quad (\text{A.34})$$

Реактивний струм може бути знайдений як:

$$i_r(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_n U_n \cdot jB_n \cdot e^{jn\omega t}. \quad (\text{A.35})$$

Всі описані складові повного струму ортогональні, що дозволяє записати наступне (для середньоквадратичних значень):

$$I^2 = I_a^2 + I_s^2 + I_r^2 = \frac{P^2}{U^2} + \sum_n (G_n - G_e)^2 \cdot U_n^2 + \sum_n B_n^2 \cdot U_n^2. \quad (\text{A.36})$$

Якщо помножити (A.36) на  $U^2$ , отримаємо вираз для квадрата повної потужності:

$$S^2 = P^2 + D_s^2 + Q_r^2. \quad (\text{A.37})$$

За визначенням Л. Czarnesкі реактивна складова потужності може бути скомпенсована до нуля при установці шунтуючого опору, наприклад, пасивного смугового фільтра. У той же час потужність «розсіювання» може бути скомпенсована тільки за допомогою активної компенсації.

Перевагою визначення по Л. Czarnesкі є те, що його теорія поширюється і на однофазні системи, і на трифазні. Велика частина визначень по Л. Czarnesкі збігається з визначенням по Fryze.

У той же час визначення по Л. Czarnesкі не дає достовірних результатів при наявності опору мережі і несиметрії напруг живлення, що в дійсності спостерігається в електричних мережах.

### Рішення робочої групи IEEE по гармонікам

Головною відмінністю визначення IEEE від усіх описаних вище є виділення активної  $P_I$  і реактивної  $Q_I$  складових повної потужності на основній частоті.

Для цього виділимо першу гармоніку з середньоквадратичних значень напруги і струму:

$$U^2 = U_1^2 + U_H^2 = U_1^2 + \sum_{h \neq 1} U_h^2; \quad (\text{A.38})$$

$$I^2 = I_1^2 + I_H^2 = I_1^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2. \quad (\text{A.39})$$

Квадрат повної потужності дорівнює, як відомо:

$$S^2 = (UI)^2 = (U_1 I_1)^2 + (U_H I_1)^2 + (U_1 I_H)^2 + (U_H I_H)^2. \quad (\text{A.40})$$

При цьому фундаментальна повна потужність дорівнює:

$$S_1^2 = (U_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2 = (U_1 I_1 \cos \phi_1)^2 + (U_1 I_1 \sin \phi_1)^2, \quad (\text{A.41})$$

де  $P_1$  – фундаментальна активна потужність,  $Q_1$  – фундаментальна реактивна потужність.

Решта три складові повної потужності складають «нефундаментальну» повну потужність:

$$S_N^2 = (U_H I_1)^2 + (U_1 I_H)^2 + (U_H I_H)^2 = S^2 - S_1^2. \quad (\text{A.42})$$

Вводяться поняття неактивної потужності  $N$ , що дорівнює:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (\text{A.43})$$

і повної потужності гармонік  $S_H$ :

$$S_H^2 = (U_H I_H)^2 = P_H^2 + N_H^2, \quad (\text{A.44})$$

де  $P_H$  – активна потужність, що переноситься вищими гармоніками,  $N_H$  – неактивна потужність, що переноситься вищими гармоніками.

**Додаток Б**  
**АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ**

ПРАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ»  
Цех рейкових скріплень



## АКТ

промислових випробувань

гібридного компенсатора реактивної потужності

Даний акт складений про те, що в період з травня по липень 2019 року в умовах цеху рельсових скріплень ПрАТ «МК «Азовсталь» були проведені експериментальні випробування гібридного компенсатора реактивної потужності з корекцією спектрального складу струму живлення, потужністю 32 кВА, розробленого в дисертаційній роботі Савенко О.С. Випробування показали відповідність пристрою заявленим технічним характеристикам та зменшення споживаного струму за рахунок компенсації реактивної потужності.

Необхідність використання вказаного обладнання зумовлена наявністю споживачів реактивного струму серед устаткування цеху, що відрізняється різкозмінним характером включення та потребує плавного регулювання.

В результаті проведених розрахунків можливості впровадження гібридного компенсатора реактивної потужності, отриманий очікуваний економічний ефект від впровадження, який складає 4483,505 тис. грн. Очікуваний економічний ефект досягається за рахунок різниці у вартості між запропонованою системою та установкою активних фільтрів високої потужності при збереженні функціональних можливостей. Очікуваний економічний ефект від зменшення втрат потужності та плати за реактивну потужність складає 792,302 тис. грн/рік.

Цей акт не є підставою для пред'явлення фінансових зобов'язань, а призначений для спеціалізованих Вчених рад з захисту дисертацій.

Помічник начальника цеху по технології

Р.В. Цукуров

Заступник начальника цеху з інжинірингу

Л.І. Клейнос

Майстер електрослужби

А.В. Бабченко



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

**ООО «МАГМА»**

Украина, 87555, г. Мариуполь,  
ул. Флотская, 165  
Код ЄДРПОУ 31577458,  
Р/с UA583354290000026001361019011 в  
МФ АО КБ "ПРИВАТБАНК"  
Тел/факс: +380-629-560189  
E-mail: [info@magma.net.ua](mailto:info@magma.net.ua)  
Web: [www.magma.net.ua](http://www.magma.net.ua)



TUV THURINGEN DIN EN ISO 9001:2008

МАШИНОБУДІВНЕ ПІДПРИЄМСТВО

**ТОВ «МАГМА»**

Україна, 87555, м. Маріуполь,  
вул. Флотська, 165  
Код ЄДРПОУ 31577458,  
Р/р UA583354290000026001361019011 в  
МФ АТ КБ "ПРИВАТБАНК"  
Тел/факс: +380-629-560189  
E-mail: [info@magma.net.ua](mailto:info@magma.net.ua)  
Web: [www.magma.net.ua](http://www.magma.net.ua)

**АКТ ПРОМИСЛОВИХ ВИПРОБУВАНЬ**

Даний акт складений про те, що в умовах ТОВ «МАГМА» проведене промислове випробування розробленого і виготовленого у ДВНЗ «ПДТУ» гібридного компенсатора реактивної потужності на базі автономного інвертора напруги та пасивного компенсатора.

При розробці гібридного компенсатора використані технічні рішення та алгоритми керування, що є основою дисертаційної роботи Савенко О.С. Експериментальний зразок досліджений при підключенні навантаження потужністю 24 кВА (36 А на фазу), при цьому повна потужність експериментального зразку складає 32 кВА (50 А/фазу). У результаті проведених досліджень відзначена стабільна робота пристрою і підтверджене значне зниження реактивної складової у струмі живлення при підключенні гібридного компенсатора реактивної потужності паралельно навантаженню, що відповідає заявленим результатам. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 318,5 тис. грн. на рік за рахунок зниження сплати за перетоки реактивної потужності, підвищення якості електричної енергії та зменшення втрат потужності, що зумовлено зниженням неактивних складових в споживаному струмі.

Цей акт не є підставою для пред'явлення фінансових зобов'язань, а призначений для спеціалізованих Вчених рад з захисту кандидатських дисертацій.

Провідник інженер-електронік ТОВ «МАГМА»

