

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**

ПЛАХТІЙ ОЛЕКСАНДР АНДРІЙОВИЧ



УДК 621.314

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ
ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРАЛЕЛЬНИХ СИЛОВИХ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ
НА ОСНОВІ ІНВЕРТОРА НАПРУГИ ТА ІНВЕРТОРА СТРУМУ**

спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Реферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків–2025

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту та на кафедрі промислової і біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Опоненти:

доктор технічних наук, ст. наук. співробітник
Руденко Юрій Володимирович,
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,
провідний науковий співробітник
відділу транзисторних перетворювачів;

доктор технічних наук, професор
Ягуп Валерій Григорович,
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет «ХНАДУ», м. Харків, професор кафедри
комп'ютерних наук і інформаційних систем;

доктор технічних наук, професор
Яськів Володимир Іванович,
Тернопільський національний технічний університет
ім. Івана Пулюя, м. Тернопіль, професор кафедри
радіотехнічних систем.

Захист відбудеться «10» липня 2025 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Ректорський корпус (аудиторія 38).

З дисертацією та рефератом можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2 та за посиланням:
<http://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/vr/archives/6427>.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Володимир ІВАХНО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Науково-технічна проблема розвитку теорії силових активних фільтрів на базі напівпровідникових перетворювачів електроенергії шляхом вдосконалення їх силових схем та систем керування пов'язана з тим, що надважливою задачею надважливою задачею є підвищення енергетичної ефективності електричних мереж. Одним з шляхів для її реалізації є зниження складових втрат потужності, викликаних реактивною складовою та вищими гармоніками струмів за рахунок активної компенсації, яку реалізують паралельні силові активні фільтри (САФ) на основі автономного інвертора напруги (АІН) та автономного інвертора струму (АІС). Застосування паралельних САФ в трифазних електричних мережах дозволить отримати:

- зниження додаткових втрат потужності в трифазній електричній мережі, зумовлених наявністю реактивної складової потужності та вищих гармонік струмів навантаження мережі;
- забезпечити суттєве покращення показників якості електричної енергії в трифазних електричних мережах: забезпечити коефіцієнт потужності близький до одиниці та коефіцієнт гармонійних спотворень струму мережі менше 5%;
- забезпечити режим споживання реактивної складової потужності промислових підприємств близьке до нуля, що зумовлює зниження енергетичних та економічних витрат підприємств.

Значний внесок у вирішення проблеми покращення показників якості електричної енергії напівпровідникових перетворювачів, питанням зниження емісії вищих гармонік, корекції коефіцієнта потужності і підвищення енергоефективності систем електропостачання внесли вітчизняні та зарубіжні вчені: А. К. Шидловський, Г. Г. Півняк, І. В. Волков, А. Ф. Жаркін, В. Г. Кузнецов, О. В. Кириленко, А. К. Чиженко, Є. І. Сокол, А. А. Щерба, П. Д. Андрієнко, І. Ф. Домнін, І. В. Жежеленко, Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай, В. Г. Ягуп, В. Я. Жуйков, Г. С. Зінов'єв, К. О. Липківський, О. А. Маєвський, М. Ю. Артеменко, Л. М. Батрак, В. М. Михальський, В. А. Новський, В. Б. Павлов, Г. В. Павлов, А. В. Перверзєв, Б. Є. П'яних, Д. Й. Родькін, В. С. Руденко, В. І. Сенько, С. А. Харитонов, Е. М. Чехет, М. М. Юрченко, М. Ю. Артеменко, Є. Є. Чаплигін, Я. В. Щербак, Н. Akagi, M. F. Aredes, F. Blaabjerg, F. Barrero, S. R. Bowes, J. Chen, L. Czarnecki, M. Dopenbrock, D. G. Holmes, J. Holts, J. Lai, H. Kim, T. Lipo, F. Peng, H. W. Van der Broek, M. Venturini, E. H. Watanabe та багато інших вчених.

Про наукову актуальність досліджень присвячених силовим активним фільтрам свідчить досить велика кількість міжнародних публікацій. В одній лише електронній базі наукових публікацій IEEE Library за темами досліджень, присвячених силовим активним фільтрам, на 01.04.2025 розміщено 29084 наукові публікації Scopus.

Проте, частина наукових завдань, направлених на розвиток теорії силових активних фільтрів, залишається невирішеними, а саме визначення критерію підтримки стійкості режиму корекції коефіцієнта потужності силових активних фільтрів, вдосконалення методів розрахунку параметрів силових схем паралельних САФ, що забезпечують роботу в стійкому режимі корекції коефіцієнта

потужності, розробка систем керування САФ на базі АІС, створення методів визначення втрат потужності в САФ на базі АІН та АІС, які враховують багатогармонійну форму комутованого струму, оптимізації методів синтезу сигналу завдання фазного струму САФ, та створення методики визначення енергозберігаючого ефекту в електричних мережах при застосуванні САФ з урахуванням власних втрат потужності, коефіцієнта гармонійних спотворень, та коефіцієнта потужності мережі, розробки систем керування силових активних фільтрів на основі інвертора струму.

Вирішення вищеперелічених завдань вдосконалення паралельних силових активних фільтрів на базі інвертора напруги та інвертора струму, за рахунок яких досягається підвищення показників якості електричної енергії та підвищення енергоефективності електричних мереж, визначає напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» Українського державного університету залізничного транспорту відповідно до пріоритетних напрямів в галузі електроенергетики та узгоджується з «Енергетичною стратегією України на період до 2035 року», схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 року №605-р та інших державних напрямків підвищення енергоефективності.

Результати дисертаційної роботи отримані впродовж виконання ініціативних та держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України, а також в рамках виконання Європейського наукового гранту Eurizon-2023.

Ініціативні науково-дослідні роботи МОН України, за якими виконувалась робота:

1. «Підвищення енергоефективності систем електропостачання постійного і змінного струму шляхом застосування модульних багаторівневих перетворювачів», ДР 0118U001572. Здобувач - керівник проекту.

2. «Інтелектуальні системи електропостачання на залізничному транспорті та метрополітені. Концепція "Smart Grid"» ДР№0118U001571. Здобувач - головний виконавець проекту.

3. «Підвищення енергоефективності зарядних станцій електромобілів із застосуванням активного чотириквadrантного випрямляча в режимі корекції коефіцієнта потужності» за державним реєстраційним номером ДР№0120U103664. Здобувач - керівник проекту.

Держбюджетні науково-дослідні роботи МОН України, за якими виконувалась робота:

1. «Розробка наукових основ впровадження інтелектуальних енергоефективних систем електропостачання Smart Grid». НДР № 53-73/19, ДР№0119U001072. Здобувач - головний виконавець проекту.

2. «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах». НДР №25/2-21Б, ДР№0121U109440. Здобувач - керівник проекту.

Європейський науковий грант: Eurizon fellowship programme: “Remote Research Grants for Ukrainian Researchers” 2023. Project ID-522, grant Agreement #EU-3032. Project: “Increasing Energy Efficiency and Improving the Electromagnetic Compatibility of On-grid Power Converters of Solar Energy Systems”. Здобувач - керівник та головний виконавець проєкту (Principal Investigator).

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є розвиток методів та математичних моделей для розрахунку, удосконалення структур паралельних силових активних фільтрів на основі інвертора струму та інвертора напруги, спрямованих на підвищення показників їх енергетичної ефективності, забезпечення заданих показників якості електроенергії та зниження додаткових втрат потужності в електричних мережах.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі наукові задачі:

- виконати порівняльний аналіз існуючих пасивних та активних методів компенсації вищих гармонік та реактивної складової потужності в трифазних електричних мережах;

- розробити метод розрахунку втрат потужності в силових ключах САФ на базі АІН та АІС, який враховує параметри силових схем, параметри силових транзисторів та багатогармонійну форму комутованого струму, за допомогою імітаційного програмного забезпечення *Matlab*;

- виконати порівняльний аналіз існуючих методів визначення сигналів задання фазних струмів паралельних САФ, які ґрунтуються на перетвореннях в системах координат $\alpha\beta 0$, pqr та $dq0$, визначити їх недоліки та виконати синтез покращеного методу визначення сигналу задання в abc системі координат, який потребує меншої кількості математичних обчислень та зумовлює більшу швидкість системи керування;

- отримати аналітичні вирази, що визначають умови стійкості режиму корекції коефіцієнта потужності паралельного силового активного фільтру на основі інвертора напруги в функції параметрів вхідного *LCL* фільтра та вихідної напруги САФ, напруги мережі при реалізації гістерезисної та широтно-імпульсної модуляції;

- розробити метод визначення частоти комутації силових транзисторів та індуктивності фазних дроселів паралельних силових активних фільтрів на основі інвертора напруги з гістерезисною модуляцією в функції параметрів навантаження (мережі, параметрів силової схеми САФ та параметрів сигналу задання струму САФ);

- розробити метод керування паралельного силового активного фільтру на основі інвертора напруги з адаптивною гістерезисною модуляцією в якій значення уставки гістерезису фазного струму САФ регулюється в функції діючого значення струму навантаження мережі, яка забезпечує зниження пульсаційної складової фазного струму САФ в режимі зниження потужності навантаження мережі;

- розробити метод керування паралельного силового активного фільтру на основі інвертора напруги з адаптивною частотою широтно-імпульсної моду-

ляції, який забезпечує зниження пульсаційної складової фазного струму САФ в режимі зниження потужності навантаження мережі;

- розробити динамічну модель та визначити передавальні функції контуру регулювання вихідної напруги САФ на базі інвертора напруги, виконати синтез регулятора вихідної напруги, провести аналіз стійкості системи автоматичного регулювання;

- розробити методику визначення загального енергозберігаючого ефекту в активному опорі електричних мереж від компенсації вищих гармонік струмів та реактивної складової потужності при застосуванні паралельних силових активних фільтрів;

- розробити комп'ютерні моделі паралельного силового активного фільтру на базі інвертора напруги з системами керування на основі гістерезисної модуляції та широтно-імпульсної модуляції. Виконати аналіз показників якості електричної енергії, власних втрат потужності в силових активних фільтрах та енергозберігаючого ефекту в електричній мережі;

- розробити метод керування паралельного силового активного фільтру на базі інвертора струму з широтно-імпульсної модуляції, який реалізує модуляцію багатогармонійної форми фазного струму, провести аналіз динамічних властивостей та передавальної функції контуру регулювання вихідного струму САФ на базі інвертора струму, виконати синтез регулятора вихідного струму, провести аналіз стійкості системи автоматичного регулювання;

- розробити комп'ютерну модель паралельного силового активного фільтру на базі інвертора струму. На розробленій моделі провести дослідження ефекту компенсації вищих гармонік та реактивної складової потужності, визначити власні втрати потужності в паралельному силовому активному фільтрі на основі інвертора струму та визначити загальний енергозберігаючий ефект від використання паралельного САФ на основі інвертора струму

Об'єкт дослідження – електричні процеси, що протікають в силових активних фільтрах на базі інвертора струму та інвертора напруги, які підключені до трифазних електричних мережах в режимі активної компенсації реактивної складової потужності та вищих гармонік струмів.

Предмет дослідження – параметри силових схем та структури систем автоматичного керування силових активних фільтрів на базі інвертора струму та інвертора напруги.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених в роботі задач використовувались: положення теорії електричних кіл, методи розв'язання систем диференціальних і алгебраїчних рівнянь, сучасна теорія миттєвих активної і реактивної потужностей, частотні методи теорії автоматичного керування, математичний апарат швидкого перетворення Фур'є, теорія просторових векторів, елементи матричного числення, векторний аналіз для створення систем складових сумарної потужності втрат і математичної моделі трифазної системи електропостачання, метод поліноміальної апроксимації, математичне імітаційне моделювання в прикладних програмних пакетах для перевірки отриманих теоретичних результатів.

Наукова новизна отриманих результатів. На підставі теоретичних та експериментальних досліджень здобувачем:

- вперше, із застосуванням тривимірної поліноміальної апроксимації, розроблено універсальний аналітичний метод визначення статичних та динамічних втрат потужності в силових транзисторах та діодах паралельних силових активних фільтрів на базі інвертора струму та інвертора напруги, який, на відміну від існуючих, враховує параметри силової схеми, особливості алгоритму керування, частоту модуляції та враховує багатогармонійну форму комутованого струму САФ, чим досягається підвищення точності розрахунків втрат потужності;

- отримав подальший розвиток метод визначення сигналу завдання фазного струму паралельного САФ в abc системі координат, який на відміну від існуючих методів, які базуються на перетвореннях pqr та $dq0$ систем координат, дозволяє знизити число математичних операцій для визначення сигналу завдання, що дозволяє спростити, зменшити вартість та підвищити швидкодію апаратної частини системи керування (СК) паралельного САФ;

- вперше розроблено метод побудови адаптивних гістерезисних систем керування паралельних силових активних фільтрів на базі інвертора напруги, які, на відміну від відомих, реалізують регулювання значення уставки гістерезису в функції значення амплітуди першої гармоніки струму навантаження мережі, що забезпечує зменшення величини коефіцієнта гармонійних спотворень фазного струму (THD_I) мережі після компенсації на рівні менше 5% в повному діапазоні зміни струму навантаження мережі;

- вперше запропоновано метод побудови частотно-адаптивних систем керування паралельного САФ з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), які, на відміну від відомих, реалізують регулювання частоти ШІМ в функції діючого значення сигналу завдання фазного струму САФ, що забезпечує зниження пульсаційної складової струму САФ в режимі зниження струму навантаження мережі, чим досягається покращення ефекту компенсації вищих гармонік;

- отримав подальший розвиток метод розрахунку мережевих дроселів паралельного силового активного фільтру на базі інвертора напруги з ШІМ, в якому, на відміну від відомих, враховується значення частоти модуляції, індуктивності мережевих дроселів САФ, вихідної напруги САФ та допустиме значення пульсаційної складової струму САФ, чим досягається покращення гармонійного складу струму мережі після компенсації і забезпечення умови $THD_I < 5\%$;

- вперше теоретично обґрунтовано та запропоновано спосіб керування САФ на основі інвертора струму з ШІМ на основі логічних змінних та формування сигналу завдання в abc системі координат, що дозволяє знизити кількість математичних операцій в системі керування САФ, чим досягається підвищення показників якості електричної енергії;

- отримав подальший розвиток метод аналітичного визначення енергозберігаючого ефекту від застосування паралельних силових активних фільтрів в трифазних електричних мережах, який розраховується з параметрів електричної

мережі та гармонійного складу струму навантаження мережі до компенсації та, на відміну від відомих, дозволяє визначати енергозберігаючий ефект в електричній мережі з урахуванням втрат потужності в САФ.

Практичне значення отриманих результатів для силової електроніки та електроенергетики полягає в створенні теоретичних основ для розробки паралельних силових активних фільтрів на основі інвертора напруги та інвертора струму, які забезпечують компенсацію вищих гармонік струмів та реактивної складової потужності в трифазних електричних мережах, а саме:

- розроблено методику аналітичного розрахунку та моделювання втрат потужності в паралельних силових активних фільтрах на основі інвертора напруги та інвертора струму, яка дає можливість підвищити точність розрахунку та врахувати багатогармонійну форму комутованого струму САФ;

- розроблено структури для побудови силових схем паралельних силових активних фільтрів на базі інвертора напруги з використанням мережевого *LCL* фільтру, що дозволяють покращити параметри якості напруги в точці підключення САФ, знизити величину пускових струмів, та покращити ефект компенсації вищих гармонік струмів навантажень мережі, чим досягається підвищення коефіцієнта потужності електричної мережі;

- розроблено удосконалену систему керування паралельного силового активного фільтру на базі інвертора напруги, яка за рахунок застосування частотно-адаптивної широтно-імпульсної модуляції забезпечує покращений ефект компенсації вищих гармонік та реактивної складової потужності в режимі зниження навантаження мережі, чим досягається покращений ефект компенсації вищих гармонік;

- запропоновано методику визначення енергозберігаючого ефекту в трифазних електричних мережах від компенсації вищих гармонік струмів навантаження та реактивної складової потужності, що реалізується паралельними силовими фільтрами, яка дозволяє обґрунтувати енергетичну доцільність застосування паралельних САФ на основі інвертора напруги та інвертора струму;

- розроблена методика визначення залежності частоти комутації силових активних фільтрів в гістерезисною модуляцією в функції параметрів силової схеми САФ та значення уставки гістерезису, яка дозволяє обрати силові транзистори САФ з необхідними частотними властивостями;

- отримано аналітичні рівняння, що визначають умови забезпечення стійкості режиму корекції коефіцієнту потужності паралельного силового активного фільтру на основі інвертора напруги з системою керування на основі гістерезисної модуляції та ШІМ та забезпечують покращення ефекту корекції коефіцієнта потужності;

- розроблено систему керування силового активного фільтру на основі інвертора струму з ШІМ, яка забезпечує режим комутації *zero-voltage switching* і зниження втрат потужності в САФ.

Запропоновані методи, комп'ютерні моделі, принципи побудови систем керування використано при розробці силового активного фільтру та активного випрямляча з корекцією коефіцієнта потужності ККМ-800, які впроваджені у се-

рійне виробництво на підприємствах ТОВ НПО «Вертикаль» та ТОВ «АКУТЕК».

Практичне значення одержаних результатів роботи підтверджено відповідними актами впровадження від конструкторських бюро ТОВ «НПО ВЕРТИКАЛЬ», ТОВ «АКУТЕК» та ТОВ «ІМПУЛЬС».

Теоретичні та практичні результати, які отримані під час виконання досліджень, впроваджено в навчальний процес кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальністю 141 – Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка; в навчальний процес кафедри промислової і біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальністю 171 – електроніка; в навчальний процес кафедри мехатроніки та електротехніки Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальностями 141 – електротехніка, електроенергетика та електромеханіка та 151 – автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології. Науково-технічна новизна розробок підтверджена 3 патентами України на винаходи. Технічна новизна розробок захищена 6 патентами України на винаходи.

Особистий внесок здобувача. Усі положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто, серед них визначення структури роботи, мети, постановка завдань досліджень, розроблений метод аналітичного розрахунку та моделювання статичних і динамічних втрат потужності силових ключів паралельних САФ, метод визначення сигналу завдання САФ, який забезпечує зменшення кількості розрахункових операцій, розроблений метод побудови адаптивних гістерезисних систем керування САФ на основі інвертора напруги, принципи побудови систем керування САФ с частотно-адаптивною ШІМ, яка забезпечує покращені показники якості електричної енергії, метод ШІМ на основі логічних змінних для трифазного САФ на основі інвертора струму, який реалізує модуляцію багатогармонійного фазного струму, метод визначення енергозберігаючого ефекту від компенсації вищих гармонік та реактивної потужності від застосування САФ, який враховує втрати потужності в САФ, а також розроблені математичні, динамічні і комп'ютерні імітаційні моделі.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень доповідались та обговорювались на Міжнародних науково-технічних конференціях: Силова електроніка та енергоефективність (м. Харків, 2016, 2017, 2018, 2019), Проблеми силовой електроніки (м. Київ, 2018), Електротехнічні та комп'ютерні системи: теорія та практика (м. Одеса, 2018), IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (м. Київ, 2018), Industry 4.0 (Болгарія, м. Софія 2018, 2019), IEEE Modern electrical and energy systems (м. Кременчук, 2018), IEEE International Conference Conference on Electronics and Nanotechnology ELNANO (м. Київ, 2020, 2022, 2024), IEEE International Conference on Energy Smart Systems ESS (м. Київ 2022),

IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems IEPS (Турція м. Стамбул, 2020), IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (м. Харків, 2020, 2022, 2024), International conference on the experience of designing and application of cad systems CADSM (м. Львів 2021), IEEE 19th International Conference on Smart Technologies (EUROCON) (м. Львів, 2021), IEEE Ukrainian Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON (м. Львів, 2021), International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance MMA (Болгарія, м. Созопол, 2021), а також у повному об'ємі дисертація доповідалась на науковому семінарі кафедри силової електроніки Талліннського технологічного університету TalTech (м.Таллінн, Естонія, 2025) та на фаховому семінарі кафедри промислової та біомедичної електроніки національного технічного університету Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Публікації. Основні наукові результати висвітлені у 50 наукових працях, які розкривають основний зміст дисертації, з яких: 3 – монографії; 3 – у іноземних наукових фахових періодичних виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science; 13 – у періодичних наукових фахових виданнях України категорії А, які входять до наукової бази Scopus, з яких 10 мають другий квартиль Q2; 20 – у періодичних наукових фахових виданнях України категорії Б; 3 – патенти України на винаходи; 8 – у матеріалах конференцій, які входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та/або Web of Science.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація має вступ, шість розділів, висновки, список використаних джерел з 269 найменувань та 4 додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи 417 сторінок, у тому числі 286 сторінки основного тексту, 35 таблиць, 125 рисунків, 46 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначені задачі дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами, наведено дані про наукову новизну, практичне значення, апробацію результатів та публікації.

В першому розділі відзначається, що з розвитком технологій, як в промисловому, так і в побутовому секторі, інтенсивно зростає частина імпульсних та нелінійних споживачів електроенергії, які зумовлюють емісію вищих гармонік струмів та реактивної складової потужності до електричних мереж. Наявність вищих гармонік та реактивної потужності в електричних мережах спричиняє додаткові втрати потужності, що зумовлює необхідність їх компенсації.

Показано, що традиційні методи компенсації вищих гармонік, а саме застосування пасивних фільтрів та тиристорних компенсаторів, мають ряд недоліків, таких як залежність ступеня компенсації реактивної потужності від поточного значення струму навантаження, можливість виникнення резонансних явищ, комутаційні спотворення струму тиристорними компенсаторами та інші. Представлено аналіз методів активної компенсації вищих гармонік та реактив-

ної складової потужності. Визначено, що найбільш перспективним методом підвищення енергетичної ефективності електричних мереж шляхом компенсації вищих гармонік струмів та реактивної складової потужності є застосування паралельних САФ на базі АІС та АІН, схеми яких наведено на рис. 1.

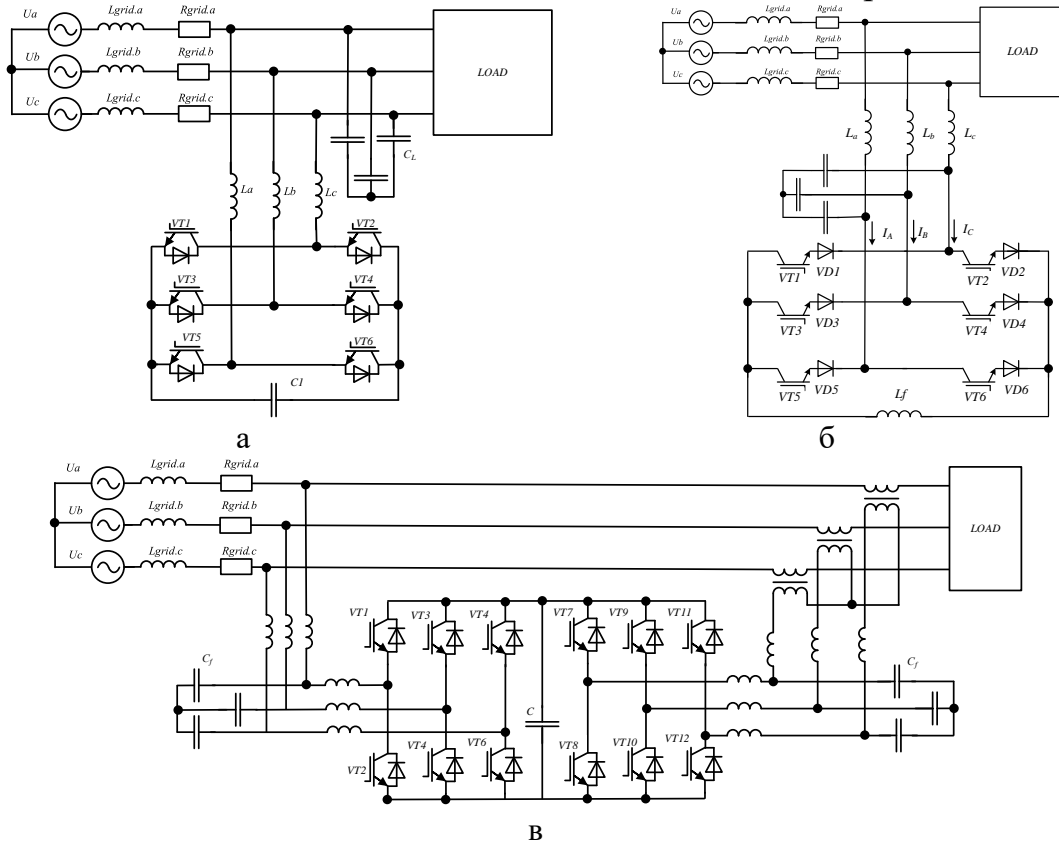


Рисунок 1 – Схеми силових активних фільтрів: а – паралельний САФ на основі АІН; б – паралельний САФ на базі АІС; в – гібридний САФ на основі АІН

Виконано аналіз українських та міжнародних стандартів щодо параметрів якості електричної енергії в електричних мережах та норм обмеження вищих гармонік струмів та напруги. Розглянуті норми стандартів обрані за максимальні допустимі значення гармонік струмів мережі $THD_I < 5\%$, компенсацію яких мають забезпечити паралельні САФ на базі АІН та АІС. Проаналізовано недоліки минулих досліджень, присвячених визначенню енергетичних і динамічних параметрів силових схем та систем керування силових активних фільтрів, на базі яких сформовано задачі для подальших розділів.

В другому розділі дисертаційної роботи розроблено метод розрахунку та моделювання статичних та динамічних втрат потужності в силових IGBT та MOSFET транзисторах та силових діодах САФ. Методика основана на тривимірній поліноміальній апроксимації наступних енергетичних залежностей силових напівпровідникових вентилів: вольт-амперних характеристик (ВАХ) транзистора та зворотнього діода, залежностей енергії вмикання силових транзисторів від комутованого струму, енергії вимикання силових транзисторів від комутованого струму, енергії відновлення зворотнього діода від комутованого струму, вплив температурних характеристик на втрати потужності. Дані характеристики IGBT типу 2MBI150U2A-060 наведено на рис.2.

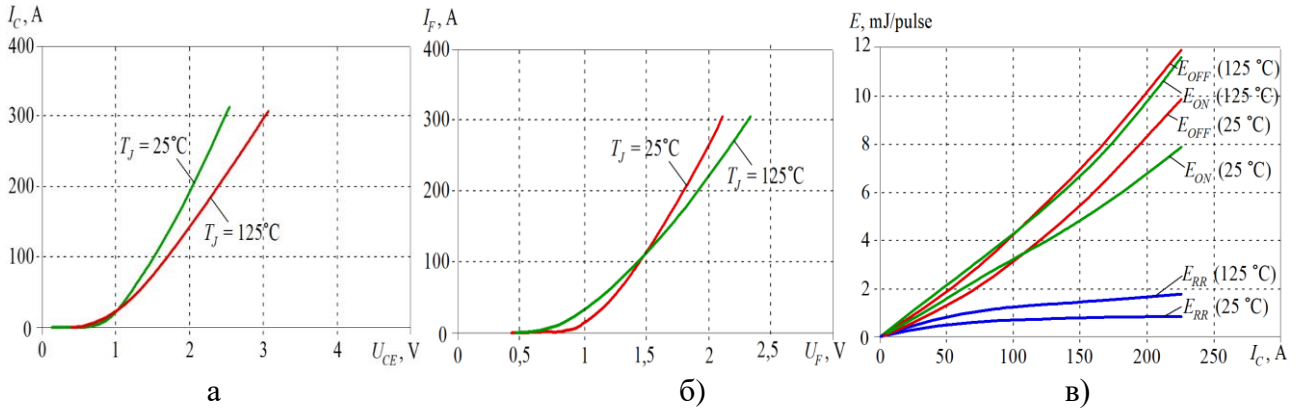


Рисунок 2 – Енергетичні характеристики IGBT типу 2MBI150U2A-060: а – ВАХ транзистора $U_{ce}(I)$; б – ВАХ зворотного діода; в– залежності енергії ввімкнення $E_{on}(I)$, енергії вимкнення $E_{off}(I)$ та відновлення зворотного діода $E_{rec}(I)$ від струму вентиля

Результати поліноміальної апроксимації енергетичних характеристик силових транзисторів при температурах 25°C та 125°C , реалізованої методом найменших квадратів, та інтерполяції коефіцієнтів поліномів в функції температури вентиля наведено в рівняннях:

$$\begin{aligned}
 U_{ce}(I_c; t) &= -1005,9 \cdot I_c^4 \cdot (2,496 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,688) + \\
 &+ 677,07 \cdot I_c^3 \cdot (2,685 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,664) - 156,39 \cdot I_c^2 \cdot (2,81 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,649) + \\
 &+ 21,408 \cdot I_c \cdot (2,679 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,665) + 0,5288 \cdot (-2,288 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,286); \\
 U_{fw}(I_f; t) &= -798,78 \cdot I_f^4 \cdot (3,178 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,603) + \\
 &+ 568,49 \cdot I_f^3 \cdot (3,159 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,605) - 141,58 \cdot I_f^2 \cdot (3,168 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,604) + \\
 &+ 18,764 \cdot I_f \cdot (3,049 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,619) + 0,4792 \cdot (-6,127 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,766); \\
 E_{on}(I_c; t) &= 394,34 \cdot I_c^3 \cdot (6,27 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,22) - 56,97 \cdot I_c^2 \cdot (5,85 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,27) + \\
 &+ 44,487 \cdot I_c \cdot (2,649 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,669) + 1,53 \cdot 10^{-2} \cdot (-1,895 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,237); \\
 E_{off}(I_c; t) &= 55,07 \cdot I_c^3 \cdot (1,754 \cdot 10^{-2} \cdot t - 1,19) + 64,02 \cdot I_c^2 \cdot (-7,64 \cdot 10^{-3} \cdot t + 1,95) + \\
 &+ 35,379 \cdot I_c \cdot (4,152 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,48) - 1,27 \cdot 10^{-2} \cdot (2,71 \cdot 10^{-2} \cdot t - 2,376); \\
 E_{rec}(I_f; t) &= 221,79 \cdot I_f^3 \cdot (3,27 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,59) - 107,46 \cdot I_f^2 \cdot (3,03 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,62) + \\
 &+ 20,898 \cdot I_f \cdot (3,81 \cdot 10^{-2} \cdot t + 0,524) + 9,4 \cdot 10^{-3} \cdot (1,18 \cdot 10^{-2} \cdot t - 0,476),
 \end{aligned}$$

де t – температура модуля в градусах Цельсія; I_c – миттєве значення струму транзистора; I_f – миттєве значення струму зворотнього діода.

Фрагмент *Matlab* моделі, яка реалізує розрахунок статичних та динамічних втрат потужності силових вентилів в функції миттєвих значень струму та напруги силових транзисторів при застосуванні отриманих поліномів реалізована в *Matlab/Simulink* представлена на рис.3. Результати розрахунку статичних і динамічних втрат потужності наведено на рис.4.

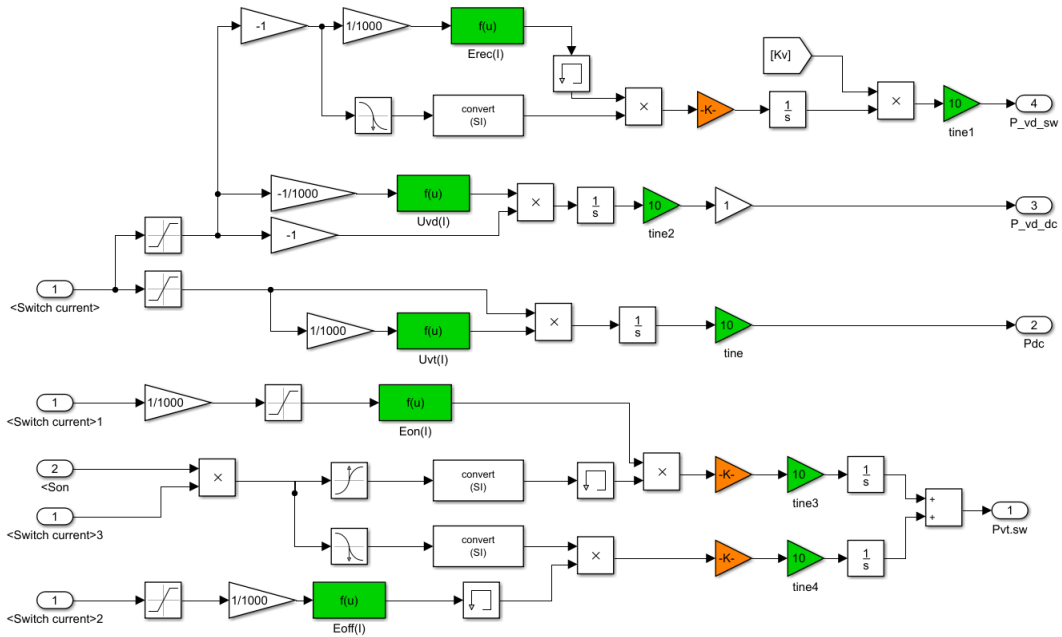


Рисунок 3 – Фрагмент *Matlab* моделі, який реалізує розрахунок статичних та динамічних втрат потужності силових вентилів САФ

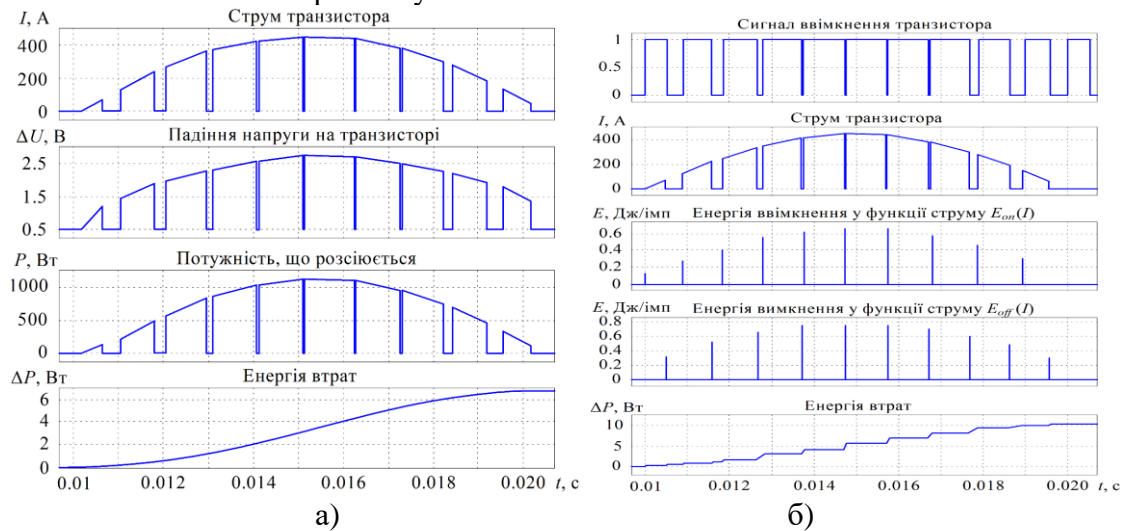


Рисунок 4 – Результати розрахунку: а – статичних; б – динамічних втрат потужності

Перевагою розробленого методу від існуючих є врахування енергетичних параметрів конкретних силових вентилів, які застосовуються в силовій схемі САФ, врахування температури, а також врахування миттєвих значень струму та напруги вентилів перетворювачів, що дозволяє визначити статичні та динамічні втрати потужності в стаціонарних та перехідних режимах при наявності багатогармонійної форми комутованих струмів, що не дозволяють визначити стандартні методики розрахунку втрат потужності і стандартні програмні пакети розрахунку втрат потужності в силових перетворювачах, таких як *MelcoSim*, *Semisel*, *Iposim*. На основі розробленого методу виконано розрахунок втрат потужності та визначення загального енергозберігаючого ефекту при використанні паралельних САФ на основі АІН та АІС в електричних мережах.

В третьому розділі виконано порівняння існуючих методів визначення сигналів завдання фазних струмів паралельних САФ, які основані на перетворенні до систем координат $abc-\alpha\beta 0-pqr$ (рис.5,а), $abc-dqo$ (рис.5,б).

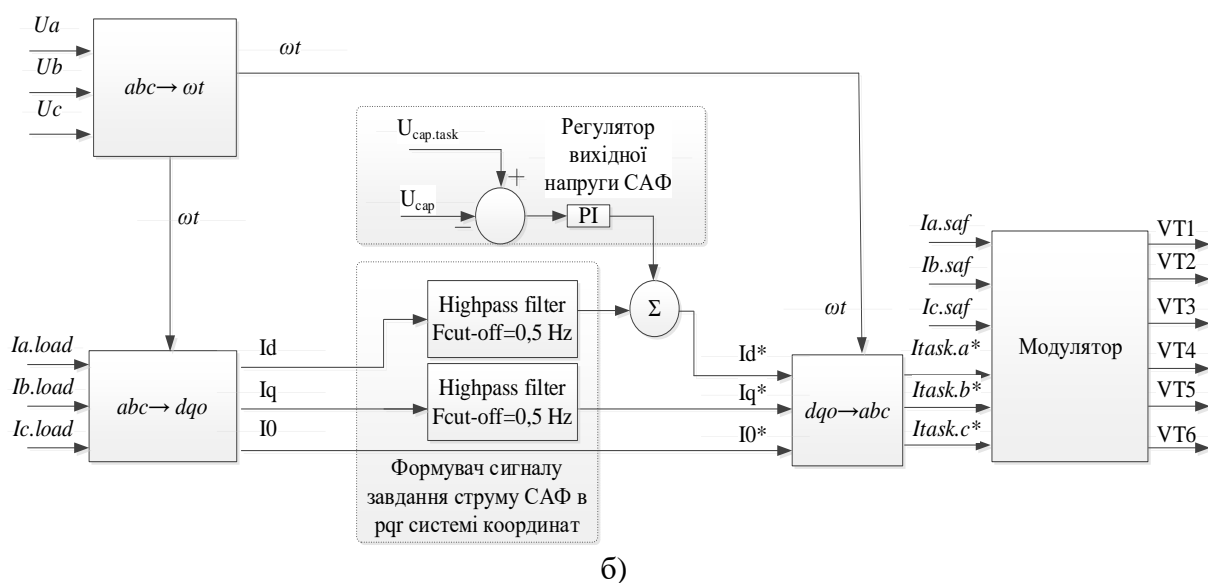
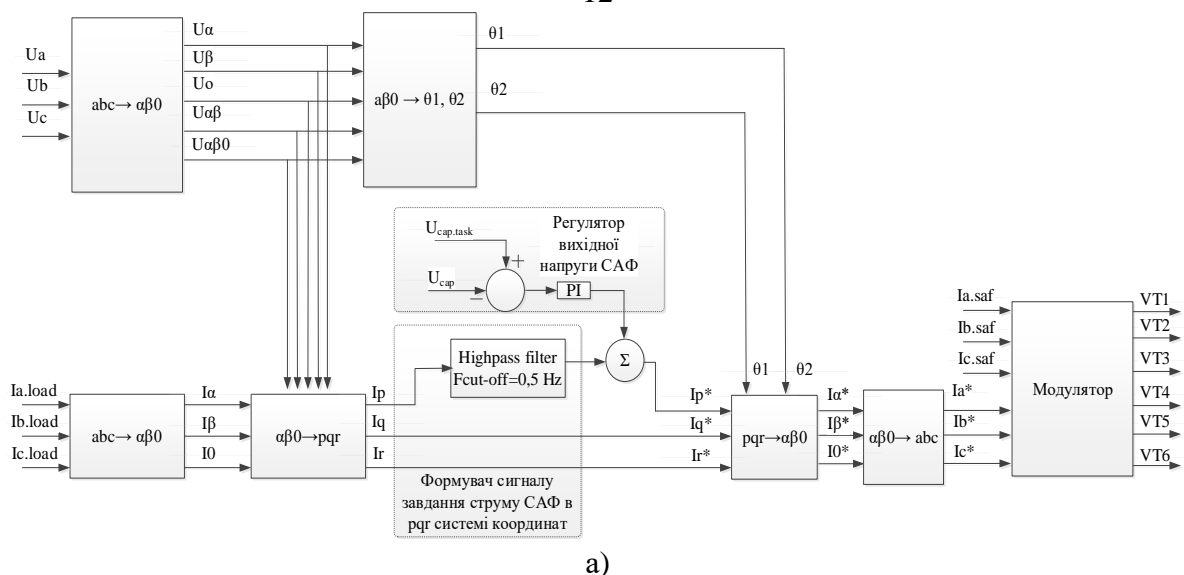


Рисунок 5 – Структурні схеми системи керування силового активного фільтра: а – на базі pqr -теорії потужності; б – на базі перетворень до $dq0$ системи координат

Визначено, що існуючі методи синтезу сигналу завдання фазного струму паралельного силового активного фільтра дають ідентичні результати, проте вимагають досить великого обсягу математичних обчислень при перетвореннях в з abc до $\alpha\beta0$, pqr , $dq0$ систем координат. Зроблено висновок, що критерієм обрання того чи іншого методу визначення сигналу завдання є мінімізація обсягу розрахункових операцій.

Запропоновано метод синтезу сигналу завдання силового активного фільтра, який визначає сигнал завдання в abc системі координат і не вимагає додаткових перетворень в системи координат pqr , $\alpha\beta0$, $dq0$. (рис.б).

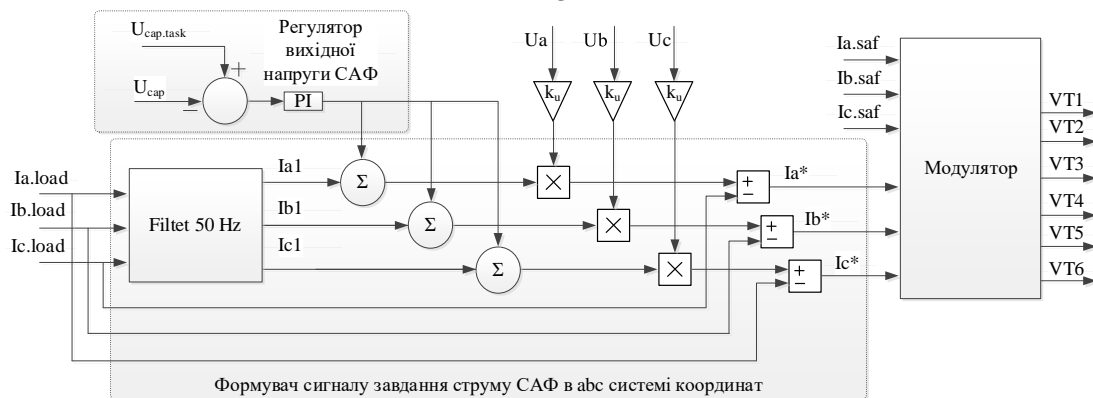


Рисунок 6 – Структура схема системи керування паралельного силового активного фільтра на основі інвертора напруги з формувачем сигналу завдання фазного струму в abc системі координат

Показано, що запропонований метод визначення сигналу завдання в abc системі координат, у порівнянні з існуючими дає ідентичні показники якості фазного струму мережі після компенсації і в той же час дозволяє суттєво знизити число математичних операцій, що дозволяє підвищити швидкодію та спростити апаратну частину системи керування паралельного САФ.

Визначено поняття стійкості режиму корекції коефіцієнта потужності САФ, умовою якої є не перевищення похибки між миттєвими значеннями фазного струму САФ i_{saf} та його сигналу завдання i_{task} заданого значення h .

$$i_{saf}(t) - i_{task}(t) < h,$$

де h – значення допустимої похибки в формуванні миттєвого значення фазного струму САФ, яка задається при визначенні уставки гістерезису.

Визначено аналітичні умови забезпечення стійкості режиму корекції коефіцієнта потужності САФ з гістерезисною модуляцією.

При цьому умова стійкості режиму корекції коефіцієнта потужності САФ при формуванні фазного струму заданої форми визначається похідною сигналу завдання і похідною струму формованого САФ згідно виразів

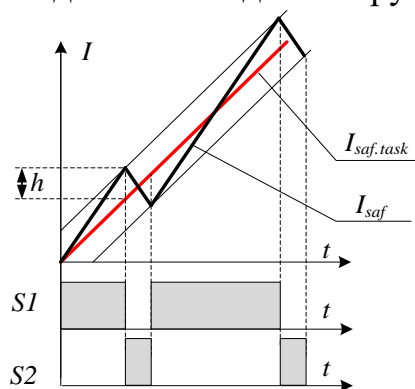


Рисунок 7 – Гістерезисна модуляція фазного струму САФ на базі АІН

$$\left| \frac{di_{saf}(t)}{dt} \right| > \left| \frac{di_{task}(t)}{dt} \right|,$$

$$\frac{di_{saf}}{dt} = \frac{U_L(t) - U_{conv}(t)}{L_{grid} + L_{saf}} = \frac{U_L(t) - f_k(t) \cdot U_{DC}(t)}{L_{grid} + L_{saf}},$$

$$i_{SAF.task}(t) = I_{load1.r} \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_{1p.a}) + \sum_{n=2} I_{load.n} \cdot \sin(\omega_n t + \varphi_n),$$

$$\frac{i_{SAF.task}(t)}{dt} = \omega_1 I_{load1.r} \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_{1p.a} - \frac{\pi}{2}) + \sum_{n=2} \omega_n I_{load.n} \cdot \sin(\omega_n t + \varphi_n - \frac{\pi}{2}),$$

де U_L – напруга прикладена до фазного дроселя САФ з боку мережі; L_{saf} – індуктивність фазного дроселя САФ; U_{DC} – вихідна напруга САФ; U_{conv} – напруга прикладена до фазного дроселя з боку

САФ; f_k – комутаційна функція СК САФ; $I_{load1.r}$ – амплітуда реактивної складової струму навантаження мережі; $I_{load.n}$ – амплітуда n -ої вищої гармоніки струму навантаження мережі.

Таким чином, умову забезпечення стійкості режиму корекції коефіцієнта потужності САФ на основі інвертора напруги з гістерезисною модуляцією визначається виразом

$$\frac{U_L(t) - f_k(t) \cdot U_{DC}(t)}{L_{grid} + L_{saf}} > \omega_1 I_{load1.r} \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_{1p.a}) + \sum_{n=2} \omega_n I_{load.n} \cdot \cos(\omega_n t + \varphi_n).$$

В режимі САФ на АІН з двосторонньою ШІМ для забезпечення стійкості режиму корекції коефіцієнта потужності накладаються додаткові умови

$$\left| \frac{d(I_{saf} - I_{saf.task})}{dt} \right| < \left| \frac{d[pwm(t)]}{dt} \right|; \quad \frac{U_L(t) - f_k(t) \cdot U_{DC}(t)}{L_{grid} + L_{saf}} - (\omega_1 I_{load1.r} \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_{1p.a}) + \sum_{n=2} \omega_n I_{load.n} \cdot \cos(\omega_n t + \varphi_n)) < A_{pwm} \cdot f_{pwm} \cdot 2,$$

де A_{pwm} – амплітуда опорного ШІМ сигналу; f_{pwm} – частота сигналу ШІМ.

В САФ з гістерезисною модуляцією амплітуда пульсаційної складової фазного струму визначається значенням уставки гістерезису h . В зв'язку з тим, що значення струму навантаження мережі змінюється в досить широкому діапазоні при застосуванні постійної уставки гістерезису і відповідної постійної амплітуди пульсаційної складової струму САФ, при зниженні струму навантаження мережі буде відбуватись відносно збільшення пульсаційної складової струму мережі і значення THD_I струму мережі може перевищувати максимально допустиме значення, яке вимагають міжнародні стандарти з параметрів якості електричної енергії 5%. Розроблено покращену гістерезисну систему керування паралельного силового активного фільтру на базі інвертора напруги, яка забезпечує адаптивне регулювання значення уставки гістерезису, яка регулюється в функції значення амплітуди першої гармоніки струму навантаження мережі, яка наведена на рис.8.

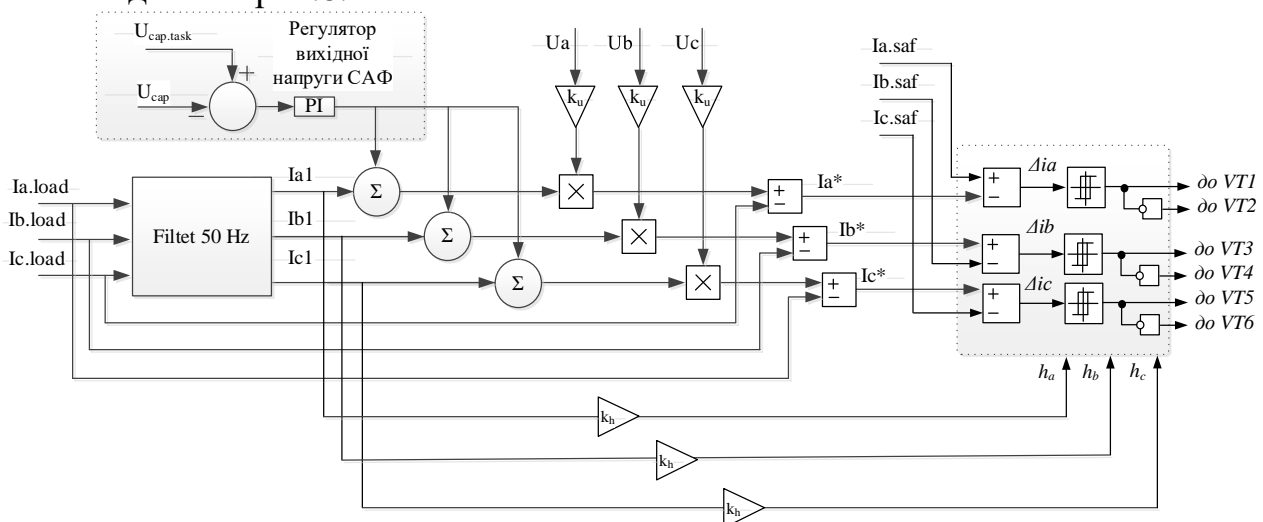


Рисунок 8 – Структурна схема системи керування паралельного САФ на основі АІН з адаптивним регулюванням величини уставки гістерезису h

Перевагою розробленої гістерезисної системи керування є забезпечення заданого значення коефіцієнта гармонійних спотворень в повному діапазоні зміни струму навантаження мережі.

Визначено, що частота комутації силових транзисторів САФ з гістерезисною модуляцією є змінною. Отримано аналітичні рівняння, які визначають значення частоти комутації в функції згідно виразів

$$T_{sw} = t_{zp} + t_{cn} = \frac{2h}{\frac{di_{saf}}{dt} - \frac{di_{task}}{dt}} + \frac{2h}{\frac{di_{saf}}{dt} + \frac{di_{task}}{dt}}; \quad \frac{di_{saf}}{dt} = \frac{U_{La} - U_{conv} - U_{Rgrid}}{(L_{grid} + L_{saf})}$$

де T_{sw} – період комутації, t_{zp} – інтервал часу зростання пульсаційної складової струму САФ, t_{cn} – інтервал час спаду пульсаційної складової струму САФ.

Максимальна частота комутації транзисторів САФ з гістерезисною модуляцією реалізується за умови $di_{task}/dt=0$ та визначається виразом

$$f_{sw,max} = \frac{1}{\frac{2h(L_{grid} + L_{saf})}{U_{La} - U_{conv}} + \frac{2h(L_{grid} + L_{saf})}{U_{La} + U_{conv}}}; \quad U_{conv} = \frac{2}{3}U_{DC}$$

Показано, що при наявності імпульсних навантажень мережі зі значними значеннями di/dt струму навантаження мережі, класична схема САФ з гістерезисною модуляцією зумовлює необхідність застосування частот комутації, які не можуть бути фізично реалізовані при заданих значеннях потужності на існуючій елементній базі силових транзисторів. При даних умовах, запропоновано силову схему силового активного фільтра, яка містить вхідний LCL фільтр САФ, що дозволяє покращити ефект корекції коефіцієнта потужності та знизити частоту комутації силових транзисторів до заданого значення, яка наведена на рис.9.

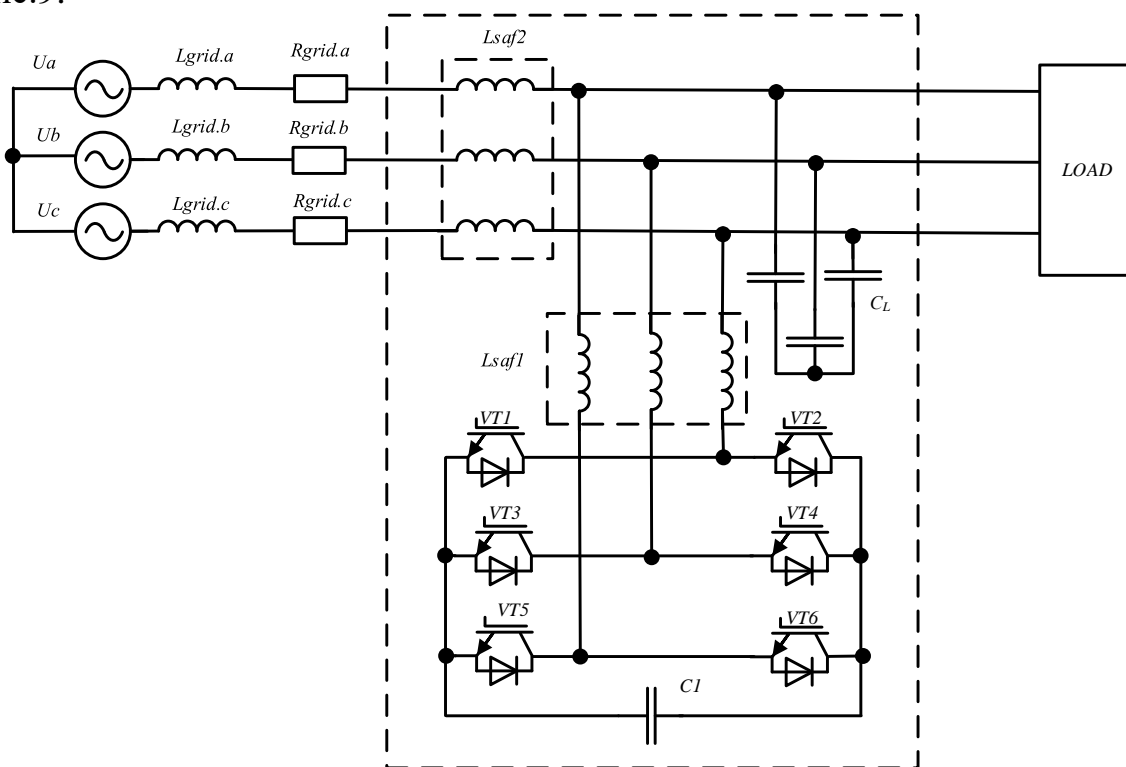


Рисунок 9 – Схема паралельного САФ з додатковим мережевим дроселем L_{saf2} , що обмежує di/dt сигналу завдання САФ

На рис.10, наведено осцилограми фазного струму САФ I_{saf} , його перша гармоніка I_{saf1} та виділена пульсаційна складова фазного струму САФ $I_{saf,p}$.

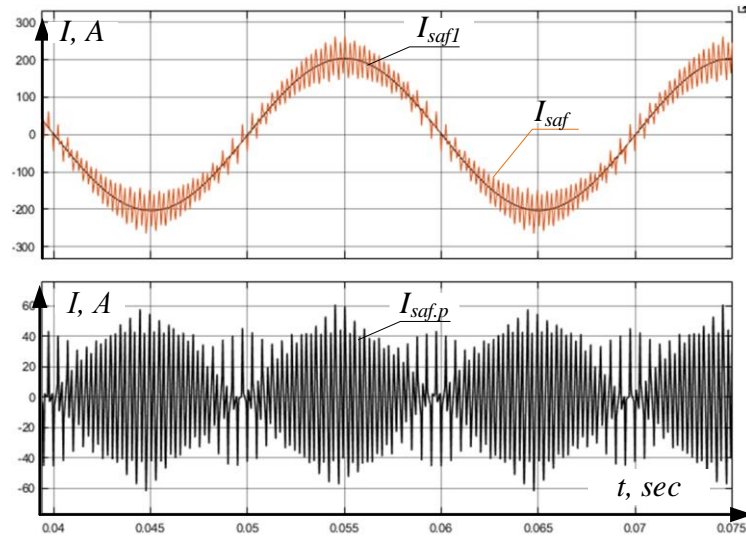


Рисунок 10 – Осцилограми фазного струму САФ I_{saf} , його перша гармоніка I_{saf1} та виділена пульсаційна складова фазного струму САФ $I_{saf,p}$ в режимі компенсації реактивної потужності

Миттєве значення фазного струму САФ визначається виразом

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int [U_{grid}(t) + U_{conv}(t)] \cdot dt.$$

Пульсаційна складова фазного струму САФ визначається саме комутацією прикладеної напруги з боку САФ. Визначено аналітичне рівняння, яке визначає значення амплітуди пульсаційної складової фазного струму САФ

$$\Delta I_{L,max} = \frac{U_{DC}}{3 \cdot (L_{saf} + L_{grid}) \cdot f_{sw}}.$$

Визначено, що для забезпечення коефіцієнту гармонійних спотворень струму мережі після компенсації САФ $THD_I < 5\%$, амплітуда пульсаційної складової фазного струму САФ не повинна перевищувати 6% відносно першої гармоніки струму навантаження мережі I_1 згідно виразу

$$\frac{U_{DC}}{3 \cdot (L_{saf} + L_{grid}) \cdot f_{sw}} < 0.06 \cdot I_1.$$

Визначено, що для забезпечення заданих параметрів якості електричної енергії при реалізації САФ, а саме значення коефіцієнта гармонійних спотворень струму мережі після компенсації $THD_I < 5\%$, при зменшенні діючого значення струму навантаження мережі, і, відповідно, зменшення діючого значення струму генерованого САФ, необхідне пропорційне збільшення частоти комутації силових транзисторів, або збільшенні індуктивності вхідного дроселя. Обидва підходи мають свої переваги та недоліки. Збільшення частоти комутації призведе до підвищення динамічних втрат потужності та зменшення ККД перетворювача. Реалізація регулювання величини індуктивності фазного дроселя САФ призведе до ускладнення його конструкції та збільшення вартості.

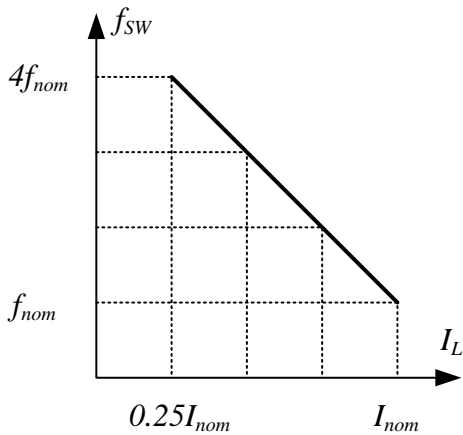


Рисунок 11 – Залежність частоти комутації силових транзисторів САФ з ШІМ в функції діючого значення струму мережі

В зниженні потужності навантаження мережі спостерігається ефект погіршення режиму корекції коефіцієнта потужності та перевищення значення фазного струму мережі $THD_I > 5\%$. Також, на імітаційній моделі підтверджено, що запропонований метод частотно-адаптивної широтно-імпульсної модуляції в САФ дозволяє забезпечити заданий стандартом *IEEE519* показник коефіцієнта гармонійних спотворень струму мережі нижче 5% в повному діапазоні потужності навантаження.

Визначено, що структура системи автоматичного регулювання вихідної напруги САФ представляє двуконтурну систему автоматичного регулювання (САР), в якій внутрішній контур визначає регулювання миттєвого значення фазного струму САФ, а зовнішній контур забезпечує регулювання вихідної напруги САФ.

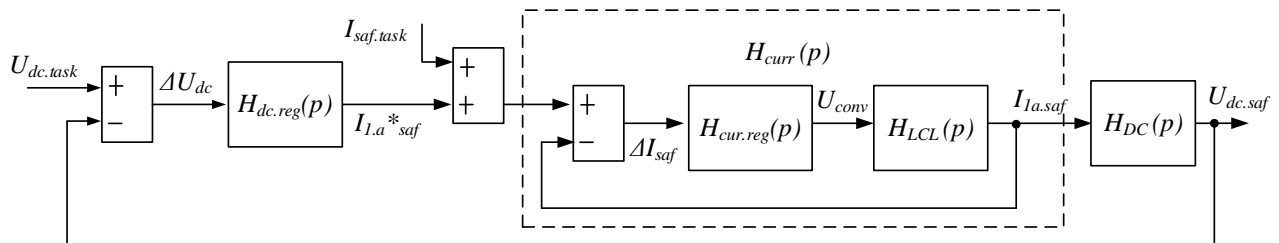


Рисунок 12 – Двуконтурна система автоматичного регулювання фазного струму САФ (внутрішній контур) та вихідної напруги САФ на основі АІН (зовнішній контур)

Передавальні функції контуру регулювання фазного струму визначаються виразами

$$H_{curr.reg}(p) = \frac{2}{3} U_{DC} = U_{conv}; H_{LCL}(p) = \frac{p^2 C_1 L_1 + p C_1 R_1 + 1}{p^3 C_1 L_1 L_2 + p^2 (C_1 L_1 R_2 + C_1 L_2 R_1) + p (R_1 R_2 + C_1 L_2 R_1)};$$

$$H_{curr}(p) = \frac{p^2 C_1 L_1 U_{conv} + p C_1 R_1 U_{conv} + U_{conv}}{p^3 L_1 L_2 C_1 + p^2 (C_1 L_1 R_2 + C_1 L_2 R_1 + C_1 L_1 U_{conv}) + p (L_1 + L_2 + C_1 R_1 R_2 + C_1 R_1 U_{conv}) + R_1 + R_2 + U_{conv}}.$$

де R_1 – активний опір мережі; L_1 – індуктивність мережі; R_2 – активний опір фазного дроселя САФ; L_2 – індуктивність фазного дроселя САФ; C_1 – ємність фазного фільтра САФ.

Регулювання вихідної напруги силового активного фільтра реалізується шляхом формування заданого значення активної складової першої гармоніки фазного струму. Таким чином, при умові сталості напруги в електричній мережі, фактично регульованою величиною є активна складова фазного струму, яку споживає САФ з електричної мережі, і відповідно значення активної потужності. На базі рівняння балансу потужності САФ

$$3 \cdot I_{saf1a} \cdot U_{in} \cdot \eta = U_{dc} \cdot I_{dc},$$

де U_{in} – діюче значення вхідної напруги силового активного фільтра; I_{saf1a} – діюче значення активної складової фазного струму силового активного фільтра (параметр, який регулюється внутрішнім контуром САР), визначено коефіцієнт передачі САФ за струмом згідно виразу

$$K_{dc.saf} = \frac{I_{DC}}{I_{saf1a}} = \frac{3U_{in}}{U_{out}}.$$

Передавальна функція формування вихідної напруги САФ визначається виразами:

$$U_{dc.saf} = \frac{1}{C} \int i_{DC.saf} dt; \quad U_{dc.saf} = \frac{1}{C_{dc}} \int \left[\frac{3U_{in}}{U_{dc.saf}} I_{saf1a} \right] dt; \quad H_{DC}(p) = \frac{K_{dc.saf}}{C_{dc} \cdot p}.$$

Таким чином, загальна зведена передавальна функція двоконтурної САР визначається виразами

$$H_{total2}(p) = \frac{H_{voltage.reg}(p) \cdot H_{curr}(p) \cdot H_{DC}(p)}{H_{voltage.reg}(p) \cdot H_{curr}(p) \cdot H_{DC}(p) + 1}; \quad H_{voltage.reg}(p) = K_p + \frac{K_I}{p} = \frac{K_p p + K_I}{p}.$$

Бажана АЧХ, частота зрізу якої визначає тривалість перехідного процесу, та АЧХ регулятора вихідної напруги представлено на рис.13.

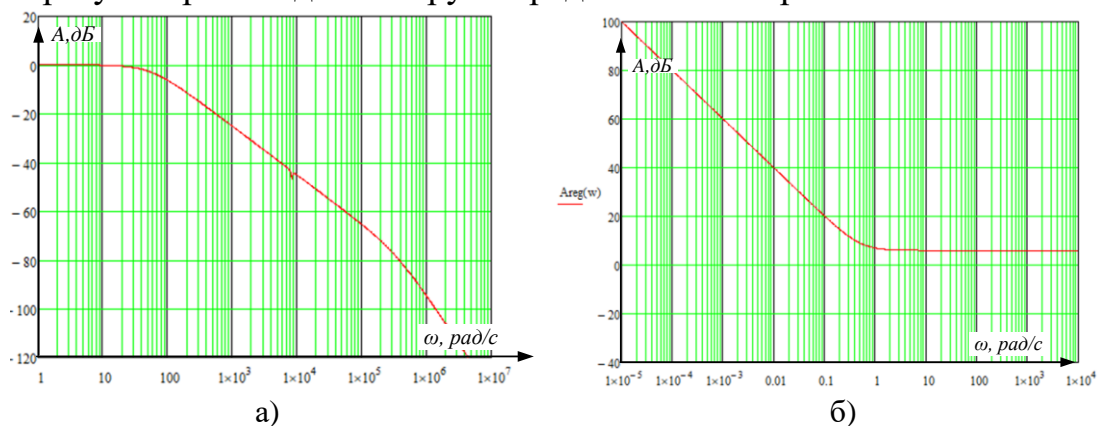


Рисунок 13 – АЧХ: а – бажана АЧХ; б – ПІ-регулятора вихідної напруги САФ та параметрами $K_p=2$, $K_I=1$

Визначення аналітичної функції регулювання вихідної напруги виконано методом зворотнього перетворення Лапласа передавальної функції замкненої САР силового активного фільтра $H_{total2}(p)$ та його сигналу завдання $H_{step}(P)$

$$f(t) = L^{-1} \left[H_{total2}(p) \cdot H_{step}(p) \right] = \frac{1}{2\pi i} \int_{\sigma_1 - i\infty}^{\sigma_1 + i\infty} e^{px} \left[H_{total2}(p) \cdot H_{step}(p) \right] \cdot dp; \quad H_{step}(p) = \frac{200}{p}.$$

Після виконання зворотнього перетворення Лапласа, отримано аналітичне рівняння перехідного процесу регулювання вихідної напруги при ступінчастій зміні сигналу завдання при розглянутих параметрах системи $R_1=0,3$ Ом; $R_2=1$ мОм; $C_1=40$ мкФ; $C_2=18$ мФ; $L_1=200$ мкГн; ; $L_2=600$ мкГн, яке визначається виразом

$$U_{dc}(t) = 1.412902 \cdot 10^{-19} \cdot e^{-167.268t} + 0.027818157 \cdot e^{-399806.521t} - 1,8536524 \cdot 10^{-19} \cdot e^{-399862.12359t} - 201,90147 \cdot e^{-55.022925t} + 1,8515322 \cdot e^{-0.5045863t} - 4,7055574 \cdot 10^{-23} \cdot \cos(11178.307948 \cdot t) \cdot e^{-104.36577t} + 4,96791468 \cdot 10^{-21} \cdot \sin(11178.307948 \cdot t) \cdot e^{-104.36577t} - 7.19734 \cdot 10^{-20} \cdot e^{-256.938t} \cdot \cos(8333.94548 \cdot t) + 0.022122 \cdot e^{-256.97528t} \cdot \cos(8333.48349 \cdot t) - 1.668279 \cdot e^{-256.93820t} \cdot \sin(8333.94548 \cdot t) + 0.002314798 \cdot e^{-256.97528t} \cdot \sin(8333.48349 \cdot t) + 200.$$

Результати аналітичного розрахунку та комп'ютерного імітаційного моделювання перехідного процесу регулювання вихідної напруги з розробленим регулятором наведено на рис.14.

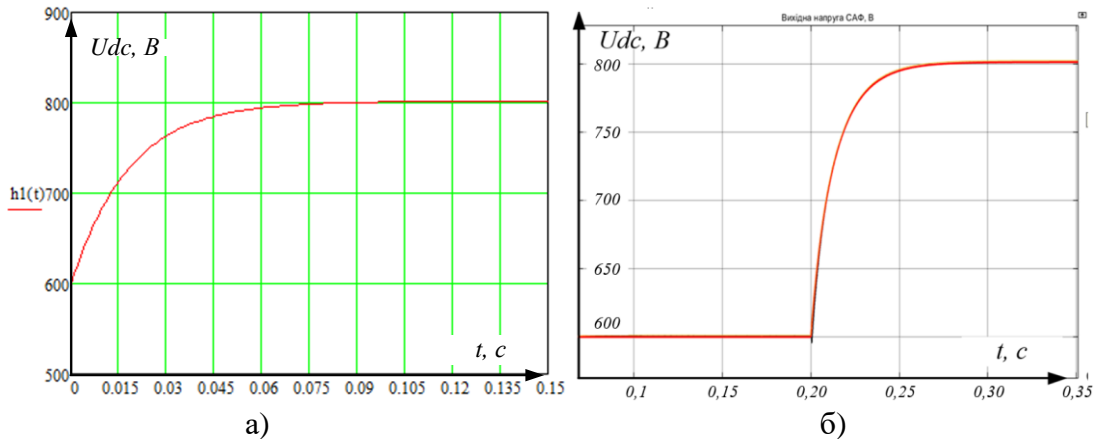


Рисунок 14 – Результати аналітичного розрахунку (а) та комп'ютерного імітаційного моделювання (б) перехідного процесу регулювання вихідної напруги з розробленим регулятором

Отримано аналітичні рівняння, які визначають енергозберігаючий ефект в електричних мережах від застосування паралельних силових активних фільтрів, який полягає в зменшенні діючого значення фазного струму мережі після компенсації на величину, яка відповідає векторній сумі реактивної складової першої гармоніки та реактивних складових вищих гармонік струмів навантаження мережі до компенсації. В залежності від коефіцієнту гармонійних спотворень струму навантаження діюче значення відносного його першої гармоніки зростає згідно виразів

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{m=2}^{m=\infty} I_m^2}}{I_1}, \quad I_{RMS} = I_1 \cdot \sqrt{(1 + THD_I^2)},$$

де I_m – діюче значення m -ої гармоніки.

Відповідно, відносне збільшення потужності втрат в активному опорі мережі R_{grid} , викликане вищими гармоніками струму навантаження мережі, в функції коефіцієнта гармонійних спотворень THD_I можна виразити як:

$$\Delta P = \frac{I_{RMS}^2 \cdot R_{grid}}{I_1^2 \cdot R_{grid}} = \frac{I_1^2 \cdot R_{grid} \cdot (1 + THD_I^2)}{I_1^2 \cdot R_{grid}} = 1 + THD_I^2.$$

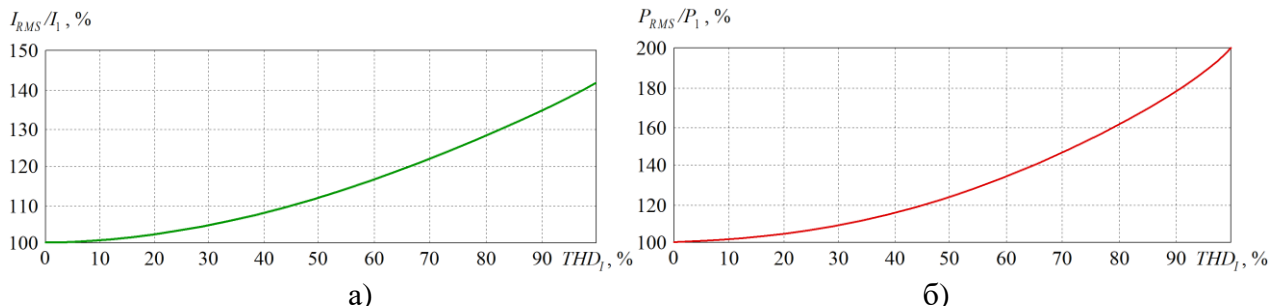


Рисунок 15 – Залежності відносних значень: а – фазного струму від THD_I при незмінному значенні першої гармоніки; б – відносного значення додаткових втрат потужності в функції коефіцієнта гармонійних спотворень фазного струму THD_I

Таким чином, у випадку повної компенсації реактивної складової струму навантаження мережі та повної компенсації вищих гармонійних складових зниження діючого значення струму в мережі від компенсації реактивної складової струму визначається

$$I_{comp} = \frac{I_{load.rms} \cdot \cos(\varphi_{load})}{\sqrt{(1 + THD_I^2)}}, \quad (4.22)$$

де I_{comp} – діюче значення струму в мережі після компенсації; $I_{Load.rms}$ – діюче значення струму навантаження до компенсації; THD_I - коефіцієнт гармонійних спотворень струму навантаження мережі.

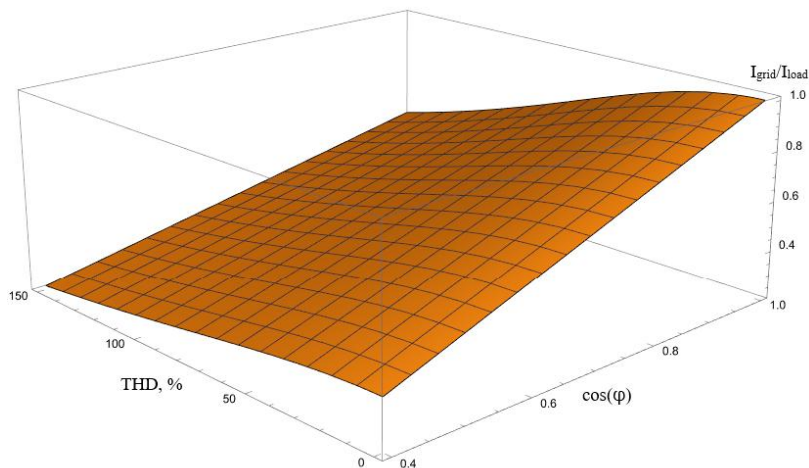


Рисунок 16 – Залежність відносного значення діючого струму мережі після компенсації в функції коефіцієнта гармонійних спотворень THD та $\cos(\varphi)$ струму навантаження до компенсації

Ефект енергозбереження P_e в електромережі при реалізації САФ визначається, як:

$$P_e = (\Delta P_{gr1} - \Delta P_{gr2}) - \Delta P_f,$$

де ΔP_{gr1} – втрати потужності в електромережі без застосування САФ; ΔP_{gr2} – втрати потужності в електромережі із застосуванням САФ; ΔP_f – втрати потужності в САФ.

В четвертому розділі представлено результати досліджень імітаційних моделей паралельного САФ на основі АІН з гістерезисною модуляцією та ШІМ, виконані в програмному пакеті *Matlab/Simulink*. На моделях визначено енергетичні показники силового активного фільтра та електричної мережі, параметри якості електричної енергії системи електропостачання в режимі активної компенсації. Обґрунтовано енергетичний критерій доцільності використання паралельних силових активних фільтрів, який полягає в зниженні втрат потужності в активному опорі електричної мережі, на значення більше, ніж власні втрати потужності в силовому активному фільтрі. Розроблена *Matlab* модель представлена на рис.17. Результати моделювання представлені на рис.18.

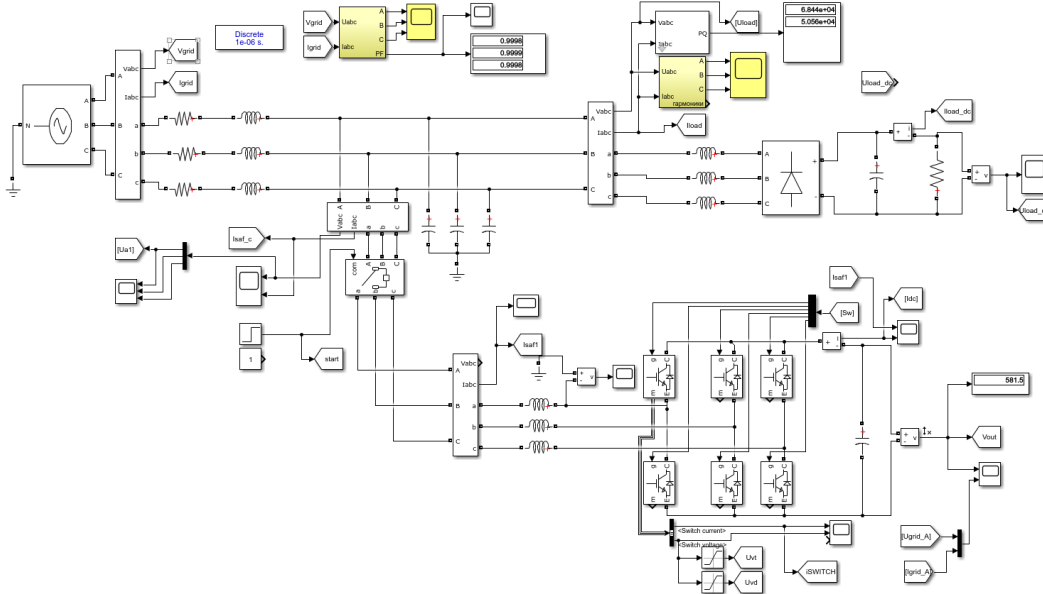


Рисунок 17 – *Matlab* модель паралельного САФ на основі інвертора напруги

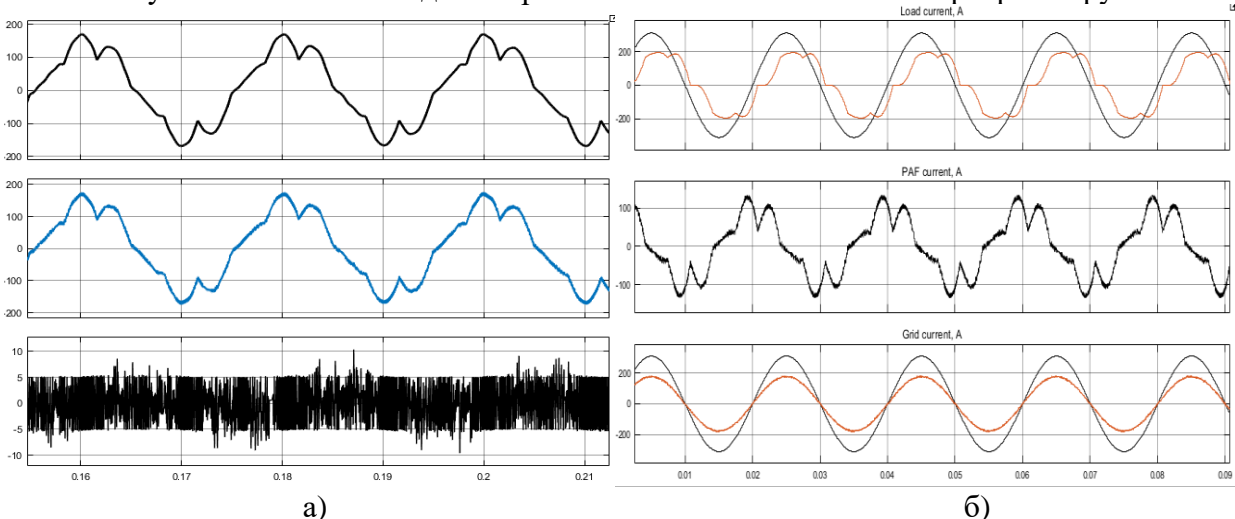


Рисунок 18 – Результати моделювання: а – сигнал завдання фазного струму, фазний струм САФ, похибка формування фазного струму; б – напруга та струм в мережі, струм генерований САФ, фазна напруга та фазний струм в мережі після компенсації

Шляхом комп'ютерного моделювання визначено, що при заданих в моделі параметрах мережі з паралельним САФ на базі АІН з гістерезисною модуляцією забезпечується покращення показників якості електричної енергії, яке полягає в підвищенні коефіцієнта потужності з 0,86 до 0,99 та зниження коефіцієнту гармонійних спотворень з 15,46% до 2,35%. Також на моделі визначено, що при розглянутих параметрах паралельний САФ забезпечує зниження втрат потужності в активному опорі трифазної мережі з 18,11кВт до 15,05 кВт. Проведено аналіз діапазону частот комутації силових транзисторів САФ, який підтвердив аналітичний вираз визначення максимальної частоти комутації. Діапазон частоти комутації складає від 4,1 до 11,3 кГц та визначені втрати потужності в САФ складають 817,3 Вт. Таким чином визначено, що при вказаних параметрах електричної мережі втрати потужності в активному опорі мережі знижуються на 20%, а енергозберігаючий ефект складає 3,673 кВт, що доводить доцільність застосування САФ.

В н'ятому розділі розроблена структурна схема та математична модель при застосуванні методу формування ШІМ на основі логічних змінних для паралельного силового активного фільтру на основі інвертора струму, який дозволяє реалізовувати багатогармонійну форму фазного струму силового активного фільтру згідно його сигналу завдання та забезпечити ефект компенсації вищих гармонік та реактивної складової потужності

Особливістю розробленої ШІМ для САФ на основі інвертора струму є необхідність подачі на блок ШІМ-модуляції сигналів завдання фазного струму $i_{task.A}$, $i_{task.B}$, $i_{task.C}$. САФ та сигналів миттєвих значень фазних напруги мережі U_a , U_b , U_c . Адекватність математичної моделі ШІМ САФ на основі АІС підтверджено імітаційним моделюванням.

Опорний пилкоподібний сигнал (двостороння двополярна ШІМ) при розрахунку миттєвих функцій в програмі *MathCad* визначено виразом

$$pwm(t) = A_{pwm} \cdot \left[4 \cdot \left| \frac{t}{T_{pwm}} - \text{floor}\left(\frac{t}{T_{pwm}} + \frac{1}{2}\right) \right| - 1 \right],$$

де A_{pwm} - амплітуда пилкоподібного сигналу; T_{pwm} - період ШІМ модуляції.

На блок модуляції трифазної ШІМ САФ на основі АІС подаються сигнали лінійних напруг електричної мережі u_{ab} , u_{bc} , u_{ca} та сигнали завдання фазного струму САФ $i_{saf.a}$, $i_{saf.b}$, $i_{saf.c}$, які відповідають сумі миттєвих значень реактивних складових перших гармонік та вищим гармонікам струму навантаження визначаються виразом

Значення проміжних логічних функцій при формуванні ШІМ на основі логічних змінних САФ на основі АІС визначаються виразами

$$\begin{cases} S_{a1}(t) = i_{task.A}(t) > pwm(t) \\ S_{a2}(t) = i_{task.B}(t) > pwm(t); \\ S_{a3}(t) = i_{task.C}(t) > pwm(t) \end{cases}; \quad \begin{cases} S_{d1}(t) = S_{c1}(t) \vee S_{c2}(t) \vee S_{c3}(t) \\ S_{d2}(t) = S_{c12}(t) \vee S_{c22}(t) \vee S_{c32}(t) \\ S_{d3}(t) = \neg[S_{d1}(t) \wedge S_{d2}(t)] \end{cases}; \quad \begin{cases} S_{b1}(t) = u_{ab}(t) > u_{ca}(t) \\ S_{b2}(t) = u_{bc}(t) > u_{ab}(t) \\ S_{b3}(t) = u_{ca}(t) > u_{bc}(t); \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{g1}(t) = S_{b1}(t) \wedge S_{b3}(t) \\ S_{g2}(t) = [\neg S_{b1}(t)] \wedge [\neg S_{b3}(t)] \\ S_{g3}(t) = S_{b2}(t) \wedge S_{b1}(t) \\ S_{g1}(t) = [\neg S_{b2}(t)] \wedge [\neg S_{b1}(t)] \\ S_{g2}(t) = S_{b3}(t) \wedge S_{b2}(t) \\ S_{g3}(t) = [\neg S_{b3}(t)] \wedge [\neg S_{b2}(t)] \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} S_{c1}(t) = [\neg S_{a1}(t)] \wedge S_{a3}(t) \\ S_{c12}(t) = S_{a1}(t) \wedge [\neg S_{a3}(t)] \\ S_{c2}(t) = [\neg S_{a2}(t)] \wedge S_{a1}(t) \\ S_{c22}(t) = S_{a2}(t) \wedge [\neg S_{a1}(t)] \\ S_{c3}(t) = [\neg S_{a3}(t)] \wedge S_{a2}(t) \\ S_{c32}(t) = S_{a3}(t) \wedge [\neg S_{a2}(t)] \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} S_{e1}(t) = S_{g1}(t) \vee S_{g2}(t) \\ S_{e2}(t) = S_{g3}(t) \vee S_{g4}(t) \\ S_{e3}(t) = S_{g5}(t) \vee S_{g6}(t) \\ S_{f1}(t) = S_{e1}(t) \vee S_d(t) \\ S_{f2}(t) = S_{e2}(t) \vee S_d(t) \\ S_{f3}(t) = S_{e3}(t) \vee S_d(t) \end{array} \right.$$

Кінцеві функції керування силових транзисторів САФ на основі АІС визначаються виразами

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1(t) = S_{c1}(t) \vee S_{f1}(t) \\ S_2(t) = S_{c12}(t) \vee S_{f1}(t) \\ S_3(t) = S_{c2}(t) \vee S_{f2}(t) \\ S_4(t) = S_{c22}(t) \vee S_{f2}(t) \\ S_5(t) = S_{c3}(t) \vee S_{f3}(t) \\ S_6(t) = S_{c32}(t) \vee S_{f3}(t) \end{array} \right.$$

Аналітичні рівняння, що визначають миттєве значення фазного струму САФ на основі АІС, описуються виразами

$$\left\{ \begin{array}{l} I_A(t) = I_{dc} \cdot \left[\left[(S_1(t) \wedge S_4(t)) \vee (S_1(t) \wedge S_6(t)) \right] - \left[(S_2(t) \wedge S_3(t)) \vee (S_2(t) \wedge S_5(t)) \right] \right] \\ I_B(t) = I_{dc} \cdot \left[\left[(S_3(t) \wedge S_2(t)) \vee (S_3(t) \wedge S_6(t)) \right] - \left[(S_4(t) \wedge S_1(t)) \vee (S_4(t) \wedge S_5(t)) \right] \right] \\ I_A(t) = I_{dc} \cdot \left[\left[(S_5(t) \wedge S_2(t)) \vee (S_5(t) \wedge S_4(t)) \right] - \left[(S_6(t) \wedge S_1(t)) \vee (S_6(t) \wedge S_3(t)) \right] \right] \end{array} \right.$$

Результати розрахунків миттєвого значення фазного струму САФ на базі АІС методом ШІМ на основі логічних функції в програмі MathCad представлені на рис. 19.

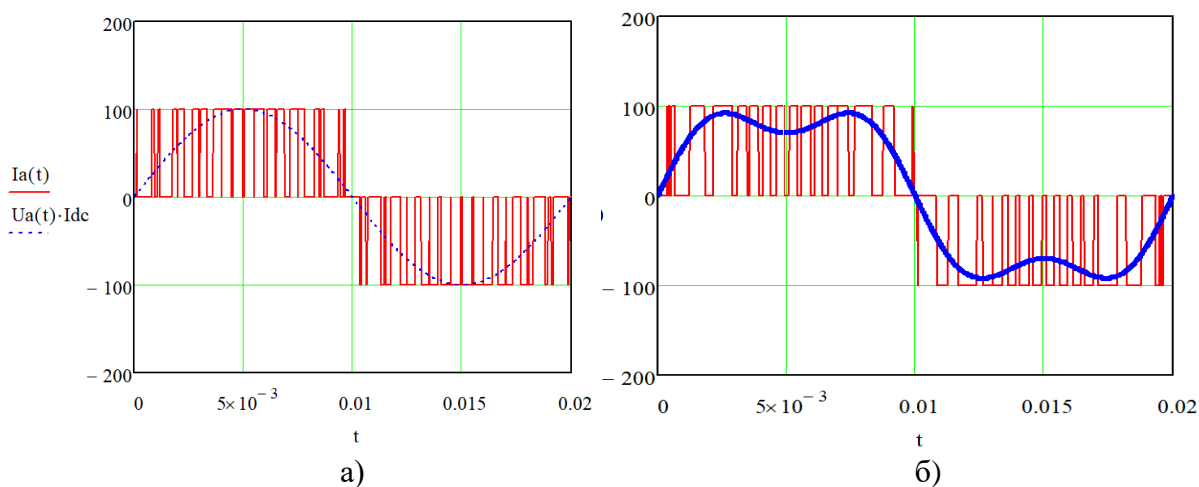


Рисунок 19 – Результати аналітичного розрахунку миттєвого значення фазного струму та його модульованого сигналу: а – при синусоїдальній модуляції; б – при модуляції багатогармонійного сигналу фазного струму

Структурна схема, яка реалізує запропонований метод формування ШІМ на основі логічних змінних для САФ на базі АІС представлена на рис.20.

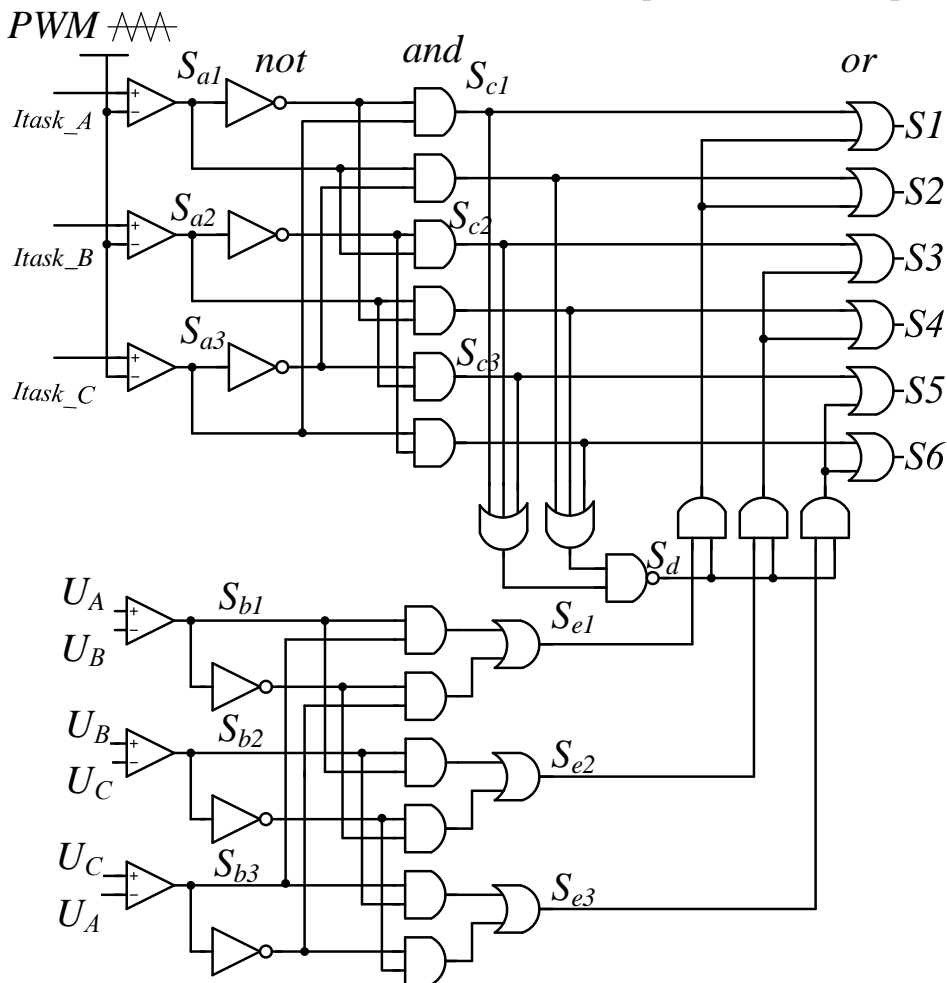


Рисунок 20 – Структурна схема ШІМ на основі логічних змінних

Визначено, що САФ на основі інвертора струму не забезпечує формування багатогармонійного фазного струму в ковзному режимі керування та реалізує задане миттєве значення мережевого струму САФ шляхом модуляції імпульсів струму до мережевого *CLR* фільтру САФ, на параметри якого істотно впливають індуктивність та опір мережі.

Напруга, прикладена до силових ключів САФ, визначається виразами:

$$U_{VT1} + U_{VD1} = \begin{cases} U_{VT1}(I_{VT1}) + U_{VD1}(I_{VD1}) & \text{при } S_1 = 1 \\ U_{ca} + U_{cb} - U_{VT3} - U_{VD3} & \text{при } S_3 = 1; \\ U_{ca} + U_{cc} - U_{VT3} - U_{VD3} & \text{при } S_5 = 1 \end{cases} \quad U_{VT2} + U_{VD2} = \begin{cases} U_{VT2}(I_{VT2}) + U_{VD2}(I_{VD2}) & \text{при } S_2 = 1 \\ U_{ca} + U_{cb} - U_{VT4} + U_{VD4} & \text{при } S_4 = 1, \\ U_{ca} + U_{cc} - U_{VT4} + U_{VD4} & \text{при } S_6 = 1 \end{cases}$$

де S_n – сигнал керування n -ого силового транзистора АІС; U_{ca} , U_{cb} , U_{cc} – напруги конденсаторів вихідного фільтру САФ на базі АІС.

Результати розрахунку динамічних втрат потужності в силових транзисторах САФ на базі АІС представлено на рис.21.

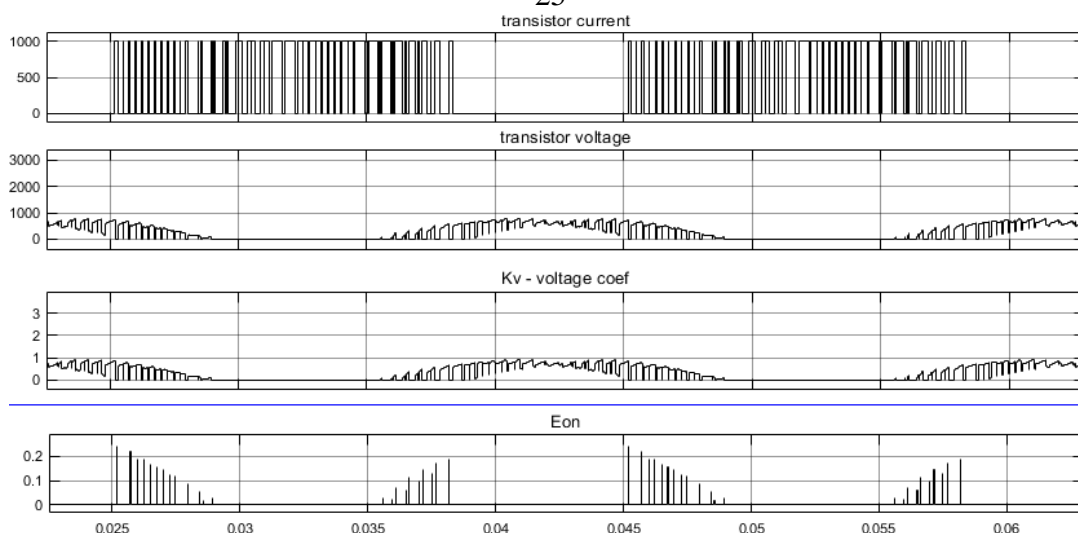


Рисунок 21 – Результати моделювання динамічних втрат потужності в САФ на основі АІС: 1 – миттєве значення струму транзистора САФ на основі АІС; 2 – миттєве значення напруги транзистора; 3 – миттєве значення коефіцієнту напруги транзистора при комутації; 4 – миттєве значення енергії ввімкнення.

У відповідності до рис.21, суттєва частина комутацій силових транзисторів САФ на основі АІС відбувається в режимі *zero voltage switching*, що зумовлює суттєве зниження динамічних втрат потужності у порівнянні з САФ на основі АІН.

Виконано порівняльний аналіз сумарних втрат потужності АІН та АІС, побудованих на основі силових транзисторів та зворотних діодів IGBT модуля типу CM1200HG-90R, при рівних значеннях потужності навантаження в функції частоти комутації. Визначення втрат потужності АІН та АІС виконано методом поліноміальної апроксимації енергетичних характеристик силових вентилів. Визначено, що суттєвою перевагою АІС перед АІН, є менші динамічні втрати потужності. Показано, що при необхідності реалізації високих частот модуляції, які є необхідними для формуванні багатогармонійної форми фазного струму САФ, АІС має менші сумарні втрати потужності та більше значення ККД.

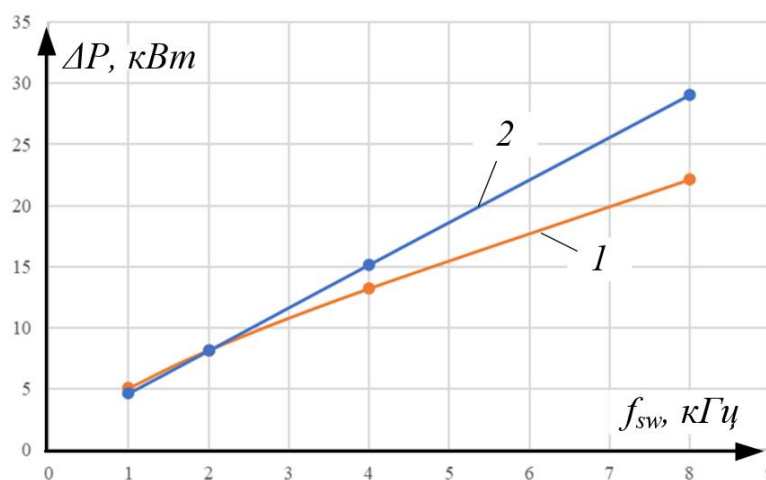


Рисунок 22 – Графічне порівняння залежності втрат потужності в трифазному інверторі струму – 1 та трифазному інверторі напруги – 2 в залежності від частоти модуляції при використанні IGBT ключів типу CM1200HG-90R

Як видно з рис.22, в зоні «низьких» частот комутації АІН мають менші втрати потужності, проте при збільшенні частоти комутації втрати потужності в АІС менші за АІН.

Розроблено структурну схему системи автоматичного регулювання вихідного струму САФ на основі трифазного інвертора струму, яка наведена на рис.23.

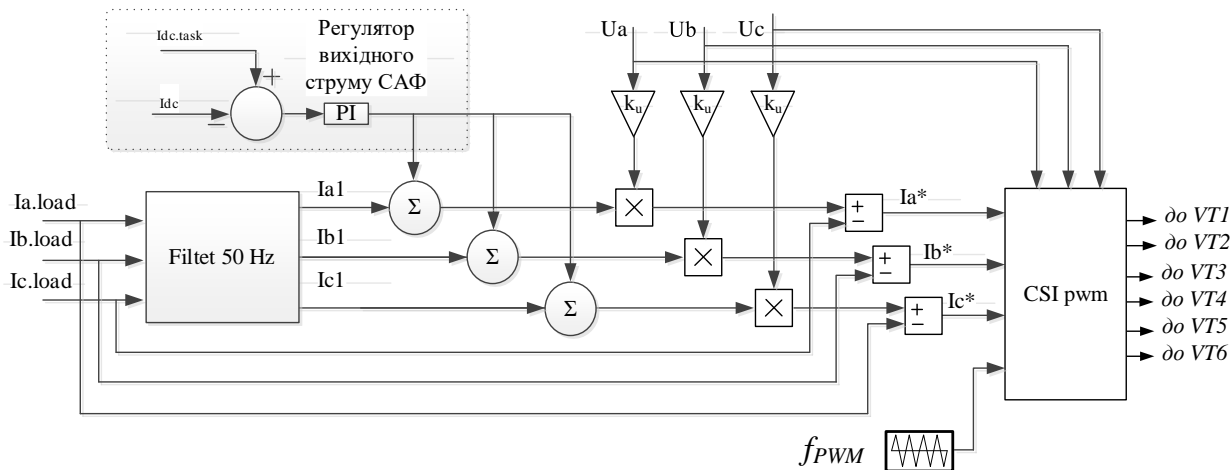


Рисунок 23 – Структурна схема системи керування паралельного САФ на основі інвертора струму

Визначено регульовальну характеристику вихідного струму АІС в функції коефіцієнта модуляції, що визначається виразом

$$I_{A1} = k_{mod} \cdot I_{DC} \cdot 0.865,$$

де I_{DC} – струм в ланці постійного струму, k_{mod} – коефіцієнт модуляції; I_{A1} – діюче значення активної складової фазного струму.

Визначено передавальні функції САФ та виконано синтез регулятора вихідного струму. Стійкість САФ перевірено методом побудови годографа Михайлова.

Адекватність проведеної лінеаризації передавальних функції САФ на основі інвертора струму перевірено шляхом порівнянням перехідних процесів, отриманих шляхом імітаційного моделювання та аналітичного розв'язку зворотнього перетворення Лапласа передавальних при подачі на неї ступінчатого сигналу завдання вихідного струму САФ.

В шостому розділі представлено результати досліджень трифазної електричної мережі з паралельним силовим активним фільтром на базі інвертора струму на комп'ютерній імітаційній моделі розроблений в програмі *Matlab/Simulink*, яка наведена на рис.24

На моделі підтверджено теоретичні положення, запропонованої системи керування паралельним силовим активним фільтром на основі інвертора струму. За результатами моделювання визначено показники покращення параметрів електричної енергії та зниження втрат потужності в трифазній електричній мережі при застосування САФ на основі інвертора струму. Показано, що при реалізації САФ на основі інвертора струму коефіцієнт гармонійних спотворень

струму мережі знижується з 12,47% до значення 2,47, а коефіцієнт потужності збільшується 0,88 до 0,99

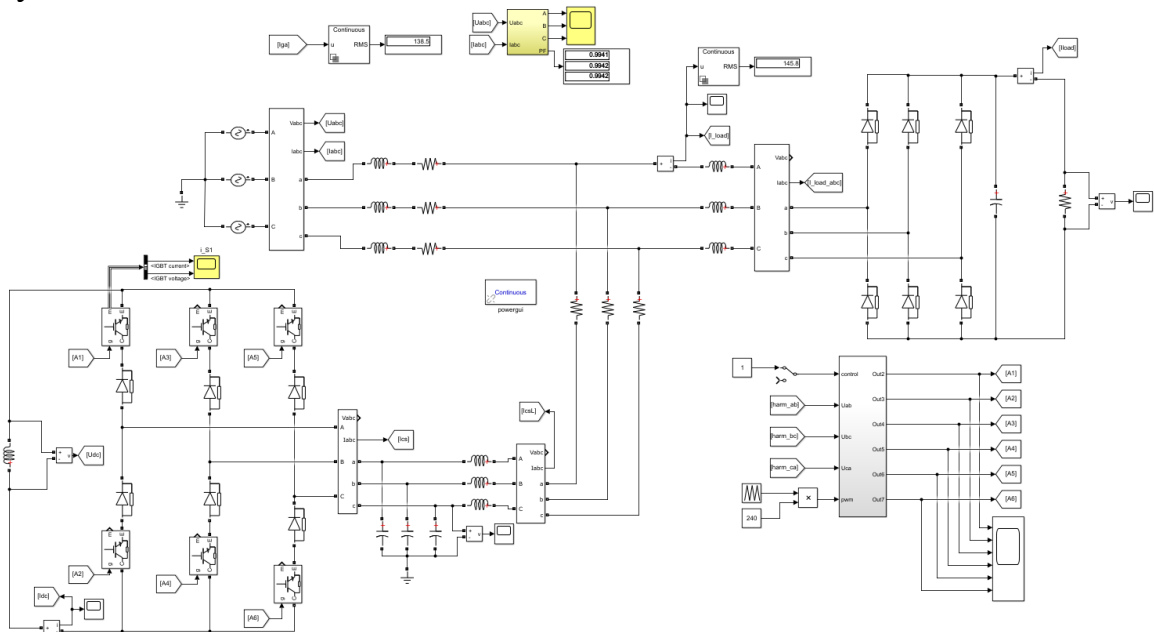
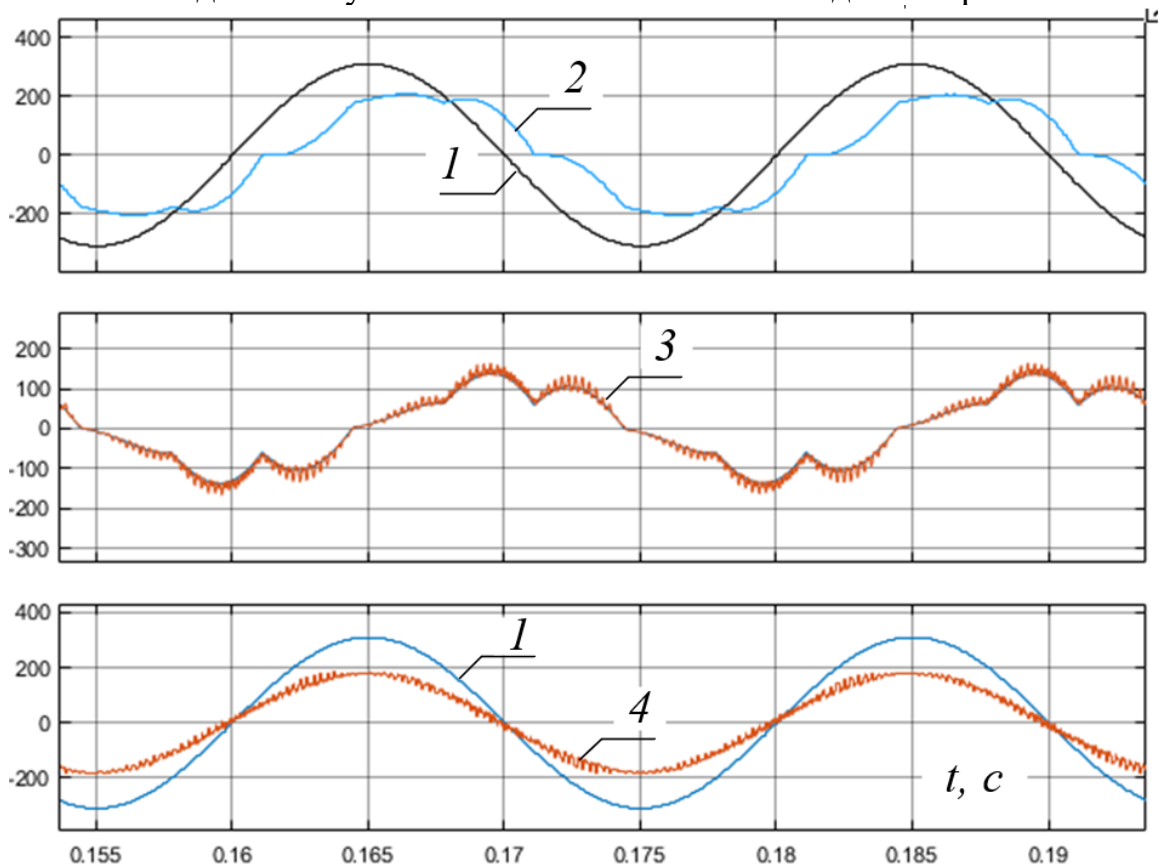


Рисунок 24 – *Matlab* модель трифазної електричної мережі з САФ на основі АС
Результати моделювання процесів компенсації вищих гармонік та реактивної складової потужності САФ на базі АС наведено на рис.25.



Рисункок 25 – Результати моделювання процесів компенсації вищих гармонік та реактивної складової потужності САФ на базі АС: 1 – напруга мережі до компенсації; 2 – струм мережі до компенсації; 3 – струм САФ; 4 – струм мережі після компенсації.

Проведено порівняльний аналіз власних втрат потужності в САФ на основі АІН та АІС з ШІМ при частоті модуляції 6 кГц та енергозберігаючого ефекту в електричній мережі від зниження діючого значення фазного струму мережі внаслідок компенсації реактивної складової та вищих гармонік струму навантаження мережі.

Таблиця 1 – Результати імітаційного моделювання САФ на базі АІН та АІС з широтно-імпульсною модуляцією

Параметр	САФ вимкнено	САФ на базі АІН	САФ на базі АІС
Діюче значення струму навантаження, А	145,9	149,2	149,2
Діюче значення струму джерела (мережі), А	145,9	127,7	127,3
Втрати потужності в мережі, кВт	19,16	14,67	14,58
Коефіцієнт потужності мережі	0,88	0,999	0,999
<i>THD</i> струму мережі після компенсації, %	12,14	2,35	2,47
Втрати потужності в САФ, кВт	-	0,817	0,664
Енергозберігаючий ефект в мережі від САФ, кВт	-	3,673	3,91

Таким чином, при розглянутих параметрах системи електропостачання енергозберігаючий ефект в електричній мережі від компенсації вищих гармонік та реактивної складової потужності паралельним силовим активним фільтром склав 3,79 кВт, тобто втрати потужності в активному опорі мережі знижуються на 19,8%.

У додатках наведено акти експериментальних та дослідно-промислових випробувань силового активного фільтру виробництва ТОВ «НПО ВЕРТИКАЛЬ» в розробці якого здобувач приймав участь, акти впровадження результатів дослідження в навчальний процес, список публікацій здобувача за темою дисертації.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено важливу науково-прикладну проблему розвитку теорії силових активних фільтрів на базі інвертора напруги та інвертора струму шляхом вдосконалення їх силових схем та систем керування, що забезпечує підвищення енергетичної ефективності електричних мереж шляхом компенсації вищих гармонік струмів та реактивної складової потужності. Сукупність отриманих результатів склала наукову основу для побудови паралельних силових активних фільтрів з покращеним ефектом компенсації вищих гармонік та реактивної складової потужності в трифазних електричних мережах.

1. Показано, що традиційні методи компенсації вищих гармонік та реактивної складової потужності електричних мереж, а саме застосування пасивних фільтрів та тиристорних компенсаторів, мають ряд недоліків, таких як залежність ступеня компенсації реактивної потужності від поточного значення струму навантаження мережі, можливість виникнення резонансних явищ, комутаційні спотворення струму мережі тиристорними компенсаторами та інші. Ви-

значено, що найбільш перспективним методом компенсації вищих гармонік струмів та реактивної складової потужності в трифазних системах електропостачання є застосування паралельних силових активних фільтрів.

2. Розроблено метод розрахунку та моделювання статичних та динамічних втрат потужності в силових IGBT та MOSFET транзисторах та силових діодах силових активних фільтрів. Метод засновано на тривимірній поліноміальній апроксимації наступних енергетичних залежностей силових напівпровідникових вентилів в функції комутованого струму та температури характеристик транзисторного модуля на втрати потужності. Перевагою розробленої методики від існуючих є врахування параметрів елементів силових схем, енергетичних параметрів конкретних силових вентилів, температури, багатогармонійної форми комутованого струму, що дозволяє визначити статичні та динамічні втрати потужності в стаціонарних та перехідних режимах.

3. Запропоновано метод синтезу сигналу завдання силового активного фільтру, який визначає сигнал завдання в abc системі координат. Метод засновано на визначення сигналу завдання фазного струму САФ шляхом фільтрації активної складової першої гармоніки струму навантаження мережі та визначення її різниці з миттєвим значенням струму навантаження. Запропонований метод у порівнянні з існуючими не вимагає додаткових перетворень в системі координат pqr , $\alpha\beta$, dqo і дозволяє суттєво знизити число математичних операцій, підвищити швидкодію та спростити апаратно-програмну частину системи керування паралельного САФ.

4. В аналітичному вигляді визначено критерій забезпечення стійкості режиму корекції коефіцієнта потужності паралельного силового активного фільтру на основі інвертора напруги з гістерезисною модуляцією, умовою якого є не перевищення похибки між миттєвим значенням фазного струму САФ та його сигналу завдання вище допустимого заданого значення. Критерій стійкості базується на співвідношенні похідної сигналу завдання фазного струму САФ і похідної фактичного фазного струму САФ. Отримані аналітичні вирази дозволяють покращити ефект компенсації вищих гармонік.

5. Розроблено аналітичний метод визначення залежності частоти комутації силових транзисторів САФ з гістерезисною модуляцією, який враховує параметри напруги, активного опору та індуктивності мережі, індуктивності фазного дроселя, вихідної напруги САФ, значення уставки гістерезису струму та значення похідної сигналу завдання фазного струму САФ. Розроблений метод дозволяє розрахувати та забезпечити безпечний діапазон частоти комутації силових транзисторів не вище критичного.

6. Розроблено метод керування силових транзисторів САФ на основі інвертора напруги з адаптивним гістерезисним керуванням, який реалізує регулювання значення уставки гістерезису струму в функції значення амплітуди першої гармоніки струму навантаження мережі, що забезпечує зменшення значення коефіцієнта гармонійних спотворень фазного струму (THD_I) мережі після компенсації на рівні менше 5% в повному діапазоні зміни струму навантаження мережі.

7. Запропоновано метод керування паралельного силового активного фільтру з адаптивним (регульованим) значенням частоти широтно-імпульсної модуляції, який реалізує регулювання частоти ШІМ в функції діючого значення сигналу завдання фазного струму САФ. Метод за рахунок обмеження пульсаційної складової фазного струму САФ дозволяє забезпечити стійкість режиму корекції коефіцієнта потужності САФ та реалізувати коефіцієнт гармонійних спотворень струму мережі після компенсації менше 5% в режимі зниження струму потужності навантаження електричної мережі.

8. Розроблено динамічну модель САФ на основі інвертора напруги, яка визначає динамічні властивості регулювання вихідної напруги. Динамічна модель являє собою двоконтурну систему автоматичного регулювання, в якій внутрішній контур забезпечує керування миттєвим значенням фазного струму, а зовнішній контур реалізує регулювання вихідної напруги. Визначено, що без застосування регулятора процес керування вихідною напругою САФ є нестійким. Отримані передавальні функції САР дозволили на базі частотних методів виконати синтез регулятора вихідної напруги САФ. Стійкість САР доведено за критерієм годографа Михайлова.

9. Розроблено аналітичні рівняння, які визначають енергозберігаючий ефект в трифазних електричних мережах від застосування паралельних САФ. Визначено, що енергозберігаючий ефект визначається в функції коефіцієнтів гармонійних спотворень струму мережі та коефіцієнту потужності до і після компенсації, а також в функції значення активного опору мережі, враховує значення власних втрат потужності в САФ, та розраховується як різниця енергозберігаючого ефекту в електричній мережі та втрат потужності в САФ. Розроблені рівняння дозволяють обґрунтувати енергетичну доцільність застосування САФ.

10. У програмному середовищі *Matlab/Simulink* розроблено імітаційні моделі паралельних силових активних фільтрів на основі інвертора напруги із застосуванням гістерезисної модуляції та широтно-імпульсної модуляції. Розроблені моделі підтвердили працездатність розроблених систем керування, та ефект підвищення параметрів якості електричної енергії та зниження втрат потужності в трифазних електричних мережах від застосування САФ.

11. Розроблено метод широтно-імпульсної модуляції на основі логічних змінних для трифазного силового активного фільтру на базі інвертора струму, який дозволяє реалізовувати модуляцію фазного струму САФ згідно його сигналу завдання та забезпечити ефект компенсації вищих гармонік та реактивної складової потужності.

12. Розроблено динамічну модель системи автоматичного регулювання та визначено передавальні функції САР вихідного струму САФ на основі інвертора струму. Отримані передавальні функції САР дозволили на базі частотних методів виконати синтез регулятора вихідного струму САФ. Стійкість САР доведено за критерієм годографа Михайлова.

13. У програмному середовищі *Matlab/Simulink* розроблено імітаційні моделі паралельних силових активних фільтрів на основі інвертора струму із за-

стосуванням широтно-імпульсної модуляції на базі логічних змінних. Розроблені моделі підтвердили працездатність розроблених систем керування та ефект підвищення параметрів якості електричної енергії та зниження втрат потужності в трифазних електричних мережах від застосування САФ на основі інвертора струму.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджено узгодженням результатів теоретичних досліджень автора з результатами розрахунків і експериментальних даних.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A. Scientific foundations of higher energy efficiency and electromagnetic compatibility of semiconductor electric energy converters: monograph. *Kharkiv: Publisher Machulin L.*, 2023. 220 p. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/17271>.

Здобувачем розроблені силові схеми та системи керування активними чотириквADRANTними перетворювачами, аналітичні рівняння які визначають втрати потужності в трифазній електричній мережі від вищих гармонік струму та ін.

2. Хоменко І. В., Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Стасюк І. В. Електроенергетика України. Структура, керування, інновації : монографія. Харків: НТУ «ХПІ», ТОВ «Планета-Прінт», 2020. 132 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/4892>.

Здовувачу належать розділи монографії, які присвячені пасивним методам компенсації вищих гармонік струмів та реактивної складової потужності, а також активним методам на основі силових активних фільтрів.

3. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А. Енергоефективні топології та алгоритми модуляції в автономних інверторах напруги : монографія. Харків: УкрДУЗТ, 2021. 248 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/9153>.

Здобувачем проведено розробку і дослідження силових схем, систем керування та енергетичним показникам автономних інверторів напруги різних топологій.

Статті в спеціалізованих фахових виданнях інших країн, які включені до наукометричної бази SCOPUS:

4. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Ivakhno V., Zamaruiev V. Improving quality of electricity generated by grid-tied inverters in solar power plants in low generated power mode using frequency adaptive PWM. *At Automatisierungstechnik*. 2024. Vol. 72, no 11. P. 1077–1091. DOI: <https://doi.org/10.1515/auto-2024-0093>. URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/auto-2024-0093/html>, (Scopus Q3).

Здобувачем розроблена система керування мережевого інвертора з частотно-адаптивною ШІМ, проведено комп'ютерне моделювання, визначено енергетичні параметри.

5. Plakhtii O., Trubchaninova K., Panchenko V., Anannieva O. Improving the Energy Efficiency of Railway Electrical Traction by Creating Smart Grid System. *ICTE in Transportation and Logistics 2019 (ICTE ToL 2019)* / Ginters E., Ruiz Estrada M., Piera Eroles M. (eds). Springer, Cham, 2020. P. 337–385. (Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure). URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-39688-6_42.

Здобувачем запропонована концепція інтелектуальної системи залізничного електропостачання з системою адаптивної компенсації вищих гармонік та реактивної складової потужності.

6. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Shelest D., Hordiienko D., Khomenko I. Modeling of Thermal Ventilation Processes in Printed Circuit Boards of Power Sources. *Smart Technologies in Urban Engineering (STUE 2023)* / Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Biletskyi, I., Tsegelnyk, Y. (eds). Springer, Cham, 2023. Vol. 808. P. 294–304. (Lecture Notes in Networks and Systems). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46877-3_26. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-46877-3_26, (Scopus Q4).

Здобувачем проведено розрахунок втрат потужності перетворювача та розроблена його 3D модель, яка визначає тепловий режим.

Статті в наукових фахових виданнях категорії А, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та/або Web of Science Core Collection

7. Щербак Я. В., Плахтій О. А., Нерубацький В. П. Регулювальні характеристики активного чотириквadrантного перетворювача в режимах випрямлення і рекуперації. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 6. С. 26–31. URL: http://techned.org.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=1196&Itemid=1. (Scopus Q3)

Здобувачем визначено аналітичні вирази, які визначають регулювальні характеристики трифазного активного чотириквadrантного випрямляча, які описують його в режимах випрямлення та рекуперації.

8. Determining additional power losses in the electricity supply systems due to current's higher harmonics / Plakhtii O., Nerubatskyi V., Ryshchenko I., Zinchenko O., Tykhonravov S., Hordiienko D. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1(8 (97)). P. 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.155672. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/155672>, (Scopus Q2).

Здобувачем визначено аналітичні вирази, які визначають значення додаткових втрат потужності в трифазних електричних мережах від вищих гармонік струму навантаження електричної мережі.

9. Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Tsybulnyk V. R. Analysis of the energy efficiency of voltage source inverter in the overmodulation mode. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. No 4. P. 69–72. DOI: 10.29202/nvngu/2019-4/9.

URL: http://www.nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2019/04/04_2019_Plakhtii.pdf, (Scopus Q2).

Здобувачем запропоновано метод визначення втрат потужності та проведено розрахунок втрат потужності та ККД трифазного інвертора напруги в режимі перемодуляції.

10. Improving energy characteristics of AC electric rolling stock by using the three-level active four-quadrant rectifiers / Plakhtii O., Nerubatskyi V., Sushko D., Ryshchenko I., Tsybulnyk V., Hordiienko D. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, No. 8 (100). P. 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174112. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/174112>, (Scopus Q2).

Здобувачем проведено моделювання та визначення параметрів енергетичної ефективності тривірневого активного випрямляча з корекцією коефіцієнта потужності.

11. Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Kavun V. Ye. Active single-phase four-quadrant rectifier with improved hysteresis modulation algorithm. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. No 3. P. 103–108. URL: <https://nvngu.in.ua/index.php/en/publishing-house/about-journal/1807-engcat/archive/2019/contens-5-2019/electrical-complexes-and-systems/5003-active-single-phase-four-quadrant-rectifier-with-improved-hysteresis-modulation-algorithm>, (Scopus Q2).

Здобувачем запропонована вдосконалена гістерезисна керування активного чотириквadrantного перетворювача, яка забезпечує зниження динамічних втрат потужності, проведено розрахунки та моделювання.

12. Research into energy characteristic in single phase active four-quadrant rectifier with advanced hysteresis modulation / Plakhtii O., Nerubatskyi V., Karpenko N., Hordiienko D., Butova O., Khoruzhevskyi H. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, No 8 (100). P. 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.179205. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/179205>, (Scopus Q2).

Здобувачем запропонована вдосконалена гістерезисна керування однофазного активного чотириквadrantного перетворювача, яка забезпечує зниження динамічних втрат потужності, проведено розрахунки та моделювання.

13. Studying a voltage stabilization algorithm in the cells of a modular sixlevel inverter / Plakhtii O., Nerubatskyi V., Karpenko N., Ananieva O., Khoruzhevskyi H., Kavun V. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6, No. 8 (102). P. 19–27. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185404>, (Scopus Q2).

Здобувачем запропоновано метод стабілізації напруги конденсаторів ММС перетворювачів, проведено імітаційне комп'ютерне моделювання.

14. Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A., Khoruzhevskyi H. A. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. No 2. P. 82–88. DOI:

<https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/082>.

URL:

<https://nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-the-issues/1841-2020/contens-2-2020/5253-calculation-of-static-and-dynamic-losses-in-power-igbt-transistors-by-polynomial-approximation-of-basic-energy-characteristics>, (Scopus Q2).

Здобувачем запропоновано метод визначення статичних та динамічних втрат потужності в силових транзисторах та діодах шляхом тримірної поліноміальної апроксимації їх енергетичних характеристик.

15. Improving the harmonic composition of output voltage in multilevel inverters under an optimum mode of amplitude modulation / Plakhtii O., Nerubatskyi V., Sushko D., Hordiienko D., Khoruzhevskiyi H. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2/8 (104). P. 17–24. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.200021. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/200021>, (Scopus Q3).

Здобувачем запропоновано метод формування вихідної напруги багатопрівневих інверторів, який забезпечує мінімально-можливий вміст вищих гармонік вихідної напруги.

16. Improving energy indicators of the charging station for electric vehicles based on a three-level active rectifier / Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mashura A., Hordiienko D., Khoruzhevskiyi H. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3/8 (105). P. 46–55. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/204068/206252>, (Scopus Q3).

Здобувачем запропоновано систему керування трифазного чотириквадрантного активного випрямляча зарядної станції електромобілів, проведено аналіз втрат потужності та показників емісії вищих гармонік до трифазної електричної мережі.

17. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordiienko D. A. Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № (1). P. 103–110. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/103> URL: http://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2021/1/01_2021_Nerubatskyi.pdf, (Scopus Q2).

Здобувачем запропоновано метод визначення оптимальної частоти комутації силових транзисторів інвертора перетворювача частоти, який визначає мінімум втрат потужності в системі АІН-АД.

18. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency / Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1, No. 8(109). P. 6–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225327. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/225327>, (Scopus Q2).

Здобувачем запропоновано метод розрахунку параметрів LC-фільтра мережевого інвертора напруги, який забезпечує задані частотні властивості з врахуванням обмеження пускового струму.

19. Synthesis of the transfer function of the voltage controller in an active filter-stabilizer converter. Shcherbak Ya., Semenenko Yu., Semenenko O., Karpenko

N., Suprun O., Plakhtii O., Nerubatskyi V. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2, No 2 (110). P. 71–77. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229827. <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/229827>, (Scopus Q2).

Здобувачем визначено передавальну функцію силового активного фільтра-стабілізатора та проведено комп'ютерне моделювання його роботи.

Статті в наукових фахових виданнях України категорії Б:

20. Плахтій О. А. Компенсаційні активні випрямлячі з корекцією коефіцієнта потужності. *Електротехніка та електромеханіка*. Спец. вип. до 17 Міжнародної науково-технічної конференції «Силова електроніка та енергоефективність». 2017. № 4(1). С. 98–102. URL: https://www.researchgate.net/publication/318909111_KOMPENSACIONNYYE_AKTIVNYYE_VYPRAMITELI_S_KORREKCIJEI_KOEFFICIENTA_MOSNOSTI.

Здобувачем запропоновано і проведено дослідження зниження вищих гармонік вхідних струмів трифазних активних чотириквadrантних перетворювачів шляхом синхронізації ШІМ в їх системах керування та взаємної компенсації вищих гармонік фазних струмів.

21. Щербак Я. В., Плахтій О. А., Нерубацький В. П. Аналіз енергетичних характеристик активного чотириквadrантного випрямляча з різними типами широтно-імпульсної модуляції. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 27 (1249). С. 221–225. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/33998>.

Здобувачем визначено енергетичні показники активних чотириквadrантних випрямлячів з різними типами широтно-імпульсної модуляції.

22. Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Кавун В. Є. Зниження динамічних втрат в активному однофазному чотириквadrантному перетворювачі з покращеним алгоритмом гістерезисної модуляції. *Праці ІЕД НАНУ*. 2018. Вип. 51. С. 88–94. URL: http://ied.org.ua/2019_51/16.pdf.

Здобувачем запропонована система керування однофазного активного чотириквadrантного перетворювача, яка реалізує зниження динамічних втрат потужності.

23. Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Кавун В. Є., Машура А. В. Компенсації вищих гармонік вхідних струмів в системах з паралельним включенням автономних інверторів. *Електротехнические и компьютерные системы*. 2018. № 27(103). С. 65–74. URL: http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=etks_2018_27_10.

Здобувачем проведено дослідження ефекту компенсації вищих гармонік в режимі інтерлівінгу для автономних інверторів напруги з ШІМ.

24. Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Гладкая А. В. Покращення електромагнітної сумісності тягового електропривода змінного струму шляхом застосування 4QS-випрямлячів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 178. С. 21–28. URL: <http://irbis-nbu.gov.ua/cgi->

bin/irbis_nbuiv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Znpudazt_2018_178_5.pdf

Здобувачем запропонована структура системи керування активного чотириквадрантного випрямляча тягового електроприводу, проведено комп'ютерне моделювання.

25. Плахтій О. А. Аналіз впливу вищих гармонік струмів на втрати потужності в системах електропостачання. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 26. С. 126–134. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/31b7da90-a56d-42e9-bc1f-5b8a1325eb7e>.

Здобувачем визначені аналітичні вирази, які визначають додаткові втрати потужності в трифазних електричних мережах в функції коефіцієнта гармонійних спотворень струму навантаження.

26. Аналіз показників енергоефективності автономних інверторів напруги з різними типами модуляції / Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Кавун В. Є., Машура А. В., Гордієнко Д. А., Цибульник В. Р. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 180. С. 106–120. URL: <http://znp.kart.edu.ua/images/arhiv/2018/special.pdf>.

Здобувачем проведено дослідження показників втрат потужності та показники якості вихідної напруги та вихідного струму трифазних автономних інверторах напруги при використанні режимів одноразової модуляції, ШІМ та перемодуляції.

27. Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Цибульник В. Р. Стабілізація напруг на конденсаторах комірок у модульних багаторівневих інверторах шляхом застосування покращеної просторово-векторної ШІМ. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. С. 126–134. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/d5fef782-0356-444d-9ae0-506f7d9ae8e7>.

Здобувачем запропоновано метод керування ключами модульних багаторівневих інверторів, який забезпечує стабілізацію конденсаторних комірок перетворювача.

28. Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А., Цибульник В. Р., Аналіз енергоефективності трирівневих автономних інверторів напруги в режимі перемодуляції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. Вип.4. С.3-12. URL: <http://jiks.kart.edu.ua/article/view/177089>.

Здобувачем визначено енергетичні показники трирівневих інверторів напруги при реалізації режиму перемодуляції.

29. Аналіз енергетичних процесів у семирівневному автономному інверторі напруги при різних алгоритмах модуляції / Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Карпенко Н. П., Гордієнко Д. А., Цибульник В. Р. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. Т. 24, № 5. С. 8–18. DOI: [10.18664/ikszt.v24i5.181286](https://doi.org/10.18664/ikszt.v24i5.181286). URL: <http://jiks.kart.edu.ua/article/view/181286>.

Здобувачем розроблено Matlab модель сімівневого інвертор напруги та визначено його енергетичні показники.

30. Аналіз показників енергоефективності автономних інверторів напруги з імпедансною і квазі-імпедансною ланками у вхідному колі при застосуванні різних алгоритмів модуляції / Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Цибульник В. Р., Гордієнко Д. А., Хоружевський Г. А. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. № 3. С. 19–31. DOI: 10.18664/iksz.v25i3.214089. URL: <http://jiks.kart.edu.ua/article/download/214089/214342>.

Здобувачем проведено дослідження показників енергоефективності автономних інверторів напруги з імпедансною і квазі-імпедансною ланками у вхідному колі при застосуванні різних алгоритмів модуляції.

31. A decomposition four-component model for calculation power losses in low-voltage power supply systems / Tugay D., Shkurpela O., Akimov V., Kostenko I., Plakhtii O. *Lighting Engineering and power systems*. 2021. Vol. 6, № 3. P. 79–91. DOI: 10.33042/2079-424X.2021.60.3.01.

URL: <https://lepe.kname.edu.ua/index.php/lepe/article/view/472>.

Здобувачем розроблено систему керування та комп'ютерну модель електричної мережі та паралельного силового активного фільтру. Визначено енергетичні показники.

32. Плахтій О., Нерубацький В., Шелест Д., Цибульник В. Дослідження впливу скін-ефекту на втрати потужності в системах тягового електропостачання постійного струму. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 4. С. 3–14. DOI: 10.18664/iksz.v26i4.247224. URL: <http://jiks.kart.edu.ua/article/view/247224>.

Здобувачем розроблено комп'ютерну модель перетворювача тягової підстанції постійного струму, проведено гармонійний аналіз вихідного струму та проведено дослідження ефекту збільшення втрат потужності від вищих гармонік струмів.

33. Аналіз точних і апроксимуючих залежностей активного опору провідника від частоти струму під дією скін-ефекту / В. Нерубацький, О. Плахтій, Д. Гордієнко, Г. Хоружевський, М. Філіп'єва. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. № 197. С. 99–112. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248216>. URL: <http://csw.kart.edu.ua/article/view/248216>.

Здобувачем розроблено точні аналітичні та апроксимуючі вирази, що визначають збільшення активного опору мережі та втрат потужності під дією вищих гармонік струмів внаслідок дії скін-ефекту.

34. Синтез регулятора вихідної напруги активного чотириквadrантного випрямляча / Нерубацький В., Плахтій О., Машура А., Горієнко Д., Варвянська В. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. № 198. С. 131–144. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256643>. URL: <http://csw.kart.edu.ua/article/view/256643/253686>.

Здобувачем визначені передавальні функції та виконано синтез регулятора вихідної напруги трифазного активного чотириквadrантного перетворювача.

35. Підвищення точності моделювання перехідних процесів і розрахунку втрат потужності напівпровідникових перетворювачів у програмному середовищі NI Multisim / Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А., Філіп'єва М. В., Багач Р. В. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 2. С. 22-35. DOI: 10.18664/ikszt.v28i2.283312 URL: <http://jiks.kart.edu.ua/article/view/283312>.

Здобувачем проведено дослідження перехідних процесів і результати розрахунків статичних і динамічних втрат потужності в силових IGBT- та MOSFET-транзисторах при моделюванні у програмних середовищах Matlab / Simulink і NI Multisim.

36. Нерубацький В.П., Плахтій О.А., Гордієнко Д.А., Синявський А.В., Шелест Д.А. [Огляд конфігурації і стратегії керування мікромережами на основі силової електроніки](http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/16337). *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. Вип. 204. С. 101–115. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/16337>.

Здобувачем проведено аналіз структур систем керування інтелектуальних мікромереж, розроблена система керування мережевого інвертора напруги з покращеними показниками електромагнітної сумісності.

37. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Increasing the energy indicators of converters of electric vehicle charging stations. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. № 204. С. 125–137. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.284153>. URL: <http://csw.kart.edu.ua/article/view/284153>.

Здобувачем запропоновано використання активного трифазного чотириквADRантного випрямляча в якості зарядного перетворювача для електромобілів, розроблено вдосконалену систему керування, розроблену комп'ютерну модель, визначено енергетичні показники.

38. Методи боротьби з кондуктивною завадоємiсiєю у зворотногоходових перетворювачах / Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А., Хоружевський Г. А., Орлов М. Е. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. № 1. С. 3–13. DOI: 10.18664/ikszt.v25i1.198645. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/2626/1/Plakhtii.%20pdf>.

Здобувачем розроблено схему вхідного фільтра та проведено комп'ютерне моделювання емісії вищих гармонік зворотногоходового перетворювача.

39. Аналіз методів керування випрямно-інверторного перетворювача електровоза / Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Івахно В. В., Гордієнко Д. А., Шелест Д. А. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 2. С. 33–44. DOI: 10.18664/ikszt.v29i2.307651. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/24018>.

Здобувачем проведено аналіз систем керування випрямно-інверторного перетворювача, проведено комп'ютерне моделювання та визначено енергетичні показники.

Патенти України на винаходи:

40. Патент на винахід 128176 С2 Україна. Трифазний трирівневий силовий активний фільтр для трифазної чотирипровідної електричної мережі / Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А., Щербак Я. В., Фетюхіна Л. В., Костенко І. О., Даніл'ян В. О. а 202107369; заявл. 17.12.2021. Публікація відомостей про державну реєстрацію: 24.04.2024, Бюл. № 17. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1796631/>.

Здобувачем запропоновано структурну схему та принцип роботи трифазного трирівневого силового активного фільтру.

41. Пат. на винахід 151131 Україна, МПК H02J3/26. Трифазний трирівневий силовий активний фільтр для трифазної трипровідної електричної мережі / Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Шелест Д. А., Гордієнко Д. А., Тихонравов С. М., Кочук С. Б., Фомичов К. Ф. № а202107001; заявл. 07.12.2021; опубл. 01.05.2024, Бюл. № 18. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1691518/>.

Здобувачем запропоновано структурну схему та принцип роботи паралельного силового активного фільтру.

42. Пат. на винахід 124712 Україна, МПК H02J3/01 H02J3/26 H02J3/18. Спосіб керування трифазним паралельним силовим активним фільтром в нелінійних та несиметричних системах електропостачання / Тугай Д. В., Жемеров Г. Г., Колонтаєвський Ю. П., Корнелюк С. І., Плахтій О. А. № а201909943; заявл. 23.09.2019; опубл. 10.02.2020, Бюл. № 8. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1690675/>.

Здобувачем виконано моделювання способу керування трифазним паралельним силовим активним фільтром в нелінійних та несиметричних системах електропостачання та підтверджено його працездатність.

Наукові праці за матеріалами міжнародних науково-технічних конференцій, які включені до наукометричної бази SCOPUS:

43. O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, Y. Scherbak, A. Mashura and I. Khomenko, "Energy efficiency criterion of Power Active Filter in a three-phase network," 2020 *IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2020, pp. 165-170, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250073. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9250073>.

Здобувачем отримано аналітичні вирази, які визначають енергоефективний критерій застосування застосування трифазного паралельного силового активного фільтру.

44. Y. Scherbak, O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, D. Hordiienko, D. Shelest and Y. Semenenko, "Analysis of Exact and Approximating Dependences of the Active Resistance of Conductor on the Frequency of Current Under the Action of Skin Effect", *IEEE EUROCON 2021 - 19th International Conference on Smart Technologies*, Lviv, Ukraine, 2021, pp. 438-442, doi: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535581. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9535581>.

Здобувачем визначені аналітичні рівняння, які визначають додаткові втрати потужності від вищих гармонік струмів в трифазних електричних мережах під дією скін-ефекта.

45. V. Burlaka, S. Podnebenna, V. Nerubatskyi, O. Plakhtii, S. Gulakov and K. Kudinova, "Modular Residential Power Supply With Renewable Sources, Zero Export Capability and Active Harmonic Filtering," *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 628-633, doi: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926758. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9926758>.

Здобувачем запропоновано концепцію топології житлової системи електропостачання з використанням відновлюваних джерел та акумуляторної батареї. Виконано комп'ютерне моделювання запропонованої структури та визначено енергетичні показники.

46. O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, S. Mykhalkiv, D. Hordiienko, D. Shelest and I. Khomenko, "Research of Energy Characteristics of Three-Phase Voltage Source Inverters with Modified Pulse Width Modulation," *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2021, pp. 422-427, doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570071. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9570071>.

Здобувачем визначено енергетичні показників трифазних інверторів напруги при застосування модифікованої ШІМ.

47. O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, D. Hordiienko, D. Sushko, A. Syniavskyi and D. Shelest, "Thermal-Powerloss Approximation Method for Determination of Efficiency in Semiconductor Devices," *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 456-461, doi: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926756. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9926756>.

Здобувачем розроблено метод визначення втрат потужності в напівпровідникових перетворювачах шляхом тривимірної апроксимації енергетичних характеристик силових транзисторів.

48. V. Nerubatskyi, O. Plakhtii and D. Hordiienko, "Adaptive Modulation Frequency Selection System in Power Active Filter," *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 341-346, doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969261. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9969261>.

Здобувачем розроблена система керування паралельного силового активного фільтра на основі інвертора напруги, яка реалізує зниження пульсацій фазного струму шляхом застосування частотно-адаптивної широтно-імпульсної модуляції.

49. O. Plakhtii, S. Mykhalkiv, O. Shefer, L. Lievi, O. Prokopenko and R. Zakharchenko, "Investigation of Analog And Spase-Vector Pulse-Width Modulation In Three-Phase Current-Source Rectifiers," *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312894.

URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10312894> .

Здобувачем запропоновано структурну системи керування трифазного активного чотириквADRантного випрямляча на основі трифазного інвертора струму з ШІМ. Проведено комп'ютерне моделювання, визначено енергетичні показники.

50. O. Plakhtii, O. Zhuchenko, S. Mykhalkiv, Y. Semenenko, K. Trubchaninova and O. Logvinenko, "Power Quality Improvement Of Grid Tied Solar Inverter In Underload Zone Using The Adaptive PWM Frequency," *2024 IEEE 7th International Conference on Smart Technologies in Power Engineering and Electronics (STEE)*, Kyiv, Ukraine, 2024, pp. TT1.05.1-TT1.05.6, doi: 10.1109/STEE63556.2024.10747993. URL:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/10747993>.

Здобувачем запропоновано метод зниження пульсаційної складової струму трифазних мережевих інверторів напруги шляхом застосування ШІМ з регульованою частотою модуляції.

АНОТАЦІЇ

Плахтій О.А. Теоретичні основи підвищення енергетичної ефективності паралельних силових активних фільтрів на основі інвертора напруги та інвертора струму. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2022 р.

Дисертація присвячена створенню теоретичних основ підвищення енергетичної ефективності паралельних силових активних фільтрів на основі інвертора напруги та інвертора струму, чим досягається підвищення їх енергетичної ефективності та покращення якості компенсації реактивної складової потужності та вищих гармонік струмів навантаження мереж.

Розроблено метод розрахунку та моделювання статичних та динамічних втрат потужності в силових IGBT та MOSFET транзисторах та силових діодах силових активних фільтрів. Метод засновано на тривимірній поліноміальній апроксимації наступних енергетичних залежностей силових напівпровідникових вентилів в функції комутованого струму та температури характеристик транзисторного модуля на втрати потужності. Перевагою розробленої методики від існуючих є врахування параметрів елементів силових схем, енергетичних параметрів конкретних силових вентилів, температури, багатогармонійної форми комутованого струму, що дозволяє визначити статичні та динамічні втрати потужності в стаціонарних та перехідних режимах.

Запропоновано метод синтезу сигналу завдання силового активного фільтру, який визначає сигнал завдання в *abc* системі координат. Метод засновано на визначення сигналу завдання фазного струму САФ шляхом фільтрації активної складової першої гармоніки струму навантаження мережі та визначення її різ-

ниці з миттєвим значенням струму навантаження. Запропонований метод у порівнянні з існуючими не вимагає додаткових перетворень в системі координат pqr , $\alpha\beta 0$, $dq0$ і дозволяє суттєво знизити число математичних операцій, підвищити швидкодію та спростити апаратно-програмну частину системи керування паралельного САФ.

В аналітичному вигляді визначено критерій забезпечення стійкості режиму корекції коефіцієнта потужності паралельного силового активного фільтру на основі інвертора напруги з гістерезисною модуляцією, умовою якого є не перевищення похибки між миттєвим значенням фазного струму САФ та його сигналу завдання вище допустимого заданого значення Δh .

Розроблено аналітичний метод визначення залежності частоти комутації силових транзисторів САФ з гістерезисною модуляцією, який враховує параметри напруги, активного опору та індуктивності мережі, індуктивності фазного дроселя, вихідної напруги САФ, значення уставки гістерезису струму та значення похідної сигналу завдання фазного струму САФ.

Розроблено метод керування силових транзисторів САФ на основі інвертора напруги з адаптивним гістерезисним керуванням, який реалізує регулювання значення уставки гістерезису струму в функції значення амплітуди першої гармоніки струму навантаження мережі, що забезпечує зменшення значення коефіцієнта гармонійних спотворень фазного струму (THD_I) мережі після компенсації на рівні менше 5% в повному діапазоні зміни струму навантаження мережі.

Запропоновано метод керування паралельного силового активного фільтру з адаптивним (регульованим) значенням частоти широтно-імпульсної модуляції, який реалізує регулювання частоти ШІМ в функції діючого значення сигналу завдання фазного струму САФ.

Визначено аналітичні рівняння, які визначають енергозберігаючий ефект в трифазних електричних мережах від застосування паралельних САФ. Визначено, що енергозберігаючий ефект визначається в функції коефіцієнтів гармонійних спотворень струму мережі та коефіцієнту потужності до і після компенсації, а також в функції значення активного опору мережі, враховує значення власних втрат потужності в САФ, та розраховується як $\Delta P_{grid} - \Delta P_{saf}$. Розроблені рівняння дозволяють обґрунтувати енергетичну доцільність застосування САФ.

У програмному середовищі *Matlab/Simulink* розроблено імітаційні моделі паралельних силових активних фільтрів на основі інвертора напруги із застосуванням гістерезисної модуляції та широтно-імпульсної модуляції. Розроблені моделі підтвердили працездатність розроблених систем керування, та ефект підвищення параметрів якості електричної енергії та зниження втрат потужності в трифазних електричних мережах від застосування САФ.

Розроблено метод широтно-імпульсної модуляції на основі логічних змінних для трифазного силового активного фільтру на базі інвертора струму, який дозволяє реалізовувати модуляцію фазного струму САФ згідно його сигналу завдання та забезпечити ефект компенсації вищих гармонік та реактивної складової потужності.

У програмному середовищі *Matlab/Simulink* розроблено імітаційні моделі паралельних силових активних фільтрів на основі інвертора струму із застосуванням широтно-імпульсної модуляції на базі логічних змінних. Розроблені моделі підтвердили працездатність розробленої системи керування.

Ключові слова: активні чотириквADRANTні перетворювачі, силові активні фільтри на базі інвертора струму, силові активні фільтри на базі інвертора напруги, корекція коефіцієнта потужності, якість електроенергії, вищі гармоніки, втрати потужності, енергоефективність, САФ.

Oleksandr Plakhtii. Theoretical foundations of increasing the energy efficiency of parallel power active filters based on a voltage-source inverter and a current-source inverter. On the rights of the manuscript.

Plakhtiy Oleksandr. Theoretical Foundations for Improving the Energy Efficiency of Parallel Power Active Filters Based on Current Source Inverter and Voltage Source Inverter – Qualification Scientific Work as a Manuscript.

The dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.09.12 "Semiconductor Power Converters". The dissertation was prepared at the Ukrainian State University of Railway Transport and submitted for defense at the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".

The dissertation is devoted to the development of theoretical foundations for improving the energy efficiency of parallel power active filters based on voltage source inverter and current source inverter, which provide active compensation of the reactive power component and higher-order load current harmonics in three-phase electrical networks. This leads to improved power quality indicators and reduced power losses in electrical networks.

Using three-dimensional polynomial approximation, a universal analytical method has been developed for determining the static and dynamic power losses in power transistors and diodes of parallel power active filters based on current and voltage inverters. Unlike existing methods, it takes into account the parameters of the power circuit, the applied algorithm, modulation frequency, and the multi-harmonic nature of the commutated current of the active filter, which significantly improves the accuracy of power loss calculations.

The method for determining the reference signal of the phase current of a parallel active filter in the abc coordinate system has been further developed. Unlike existing methods based on pqr and dq0 coordinate transformations, it reduces the number of mathematical operations required to determine the reference signal, thus simplifying, reducing the cost of, and increasing the response speed of the hardware part of the control system.

An adaptive hysteresis control system has been developed for a parallel power active filter based on a voltage inverter. Unlike known systems, it adjusts the hysteresis band in function of the amplitude of the first harmonic of the load current, which ensures that the total harmonic distortion of the network phase current after

compensation remains below 5% (THDI < 5%) across the full range of load current variations.

A new method has been developed for determining the minimum and maximum switching frequency of power transistors in parallel power active filters based on a voltage inverter with hysteresis modulation. Unlike known methods, it considers the values of network voltage parameters, line resistance, line inductance, phase reactor inductance, output voltage of the active filter, current hysteresis band setting, and the derivative of the phase current reference signal, allowing accurate calculation of the current, minimum, and maximum switching frequencies.

A frequency-adaptive control system with pulse-width modulation has been proposed for a parallel power active filter. Unlike existing systems, it adjusts the PWM frequency according to the effective value of the phase current reference signal, thereby reducing the ripple component of the filter current under decreasing load conditions and ensuring that the THDI remains below 5%.

The power circuit of parallel power active filters based on voltage inverters has been improved. Unlike known designs, it includes a network LCL filter that improves voltage quality at the point of filter connection, reduces inrush currents, and enhances compensation of high-order current harmonics from nonlinear (impulse-type) loads, resulting in better harmonic compensation and improved power factor in the electrical network.

A method for calculating network inductances for a parallel power active filter based on a voltage inverter operating under PWM mode has been further developed. Unlike existing approaches, it considers the modulation frequency, the inductance of the SAF's line reactors, the SAF's output voltage, and the allowable ripple current value, enabling an improved harmonic profile of the network current after compensation and ensuring THDI < 5%.

A new control system for a power active filter based on a current inverter has been developed. Unlike known systems, it includes sinusoidal PWM and a reference signal generator in the abc coordinate system, which reduces the number of mathematical operations in the control system, lowers intrinsic power losses in the SAF due to the current inverter topology, and improves overall power quality.

A new analytical method has been developed for determining the energy-saving effect from the use of parallel power active filters in three-phase electrical networks. This method evaluates the effect as a function of network parameters and the harmonic content of the load current prior to compensation, and unlike existing approaches, it takes into account power losses in the active filters themselves.

Keywords: active four-quadrant converters, power active filters based on current-source inverters, power active filters based on voltage-source inverters, power factor correction, power quality, higher harmonics, power losses, energy efficiency, SAF.

