

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЯГУП КАТЕРИНА ВАЛЕРІЇВНА



УДК 621.314 : 621.316

**ПОКРАЩАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ПОШУКОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ НА КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЯХ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Наукові консультанти: доктор технічних наук, професор
Харченко Віктор Федорович,
Харківський національний університет
міського господарства імені О.М.Бекетова,
директор Навчально-наукового інституту
підготовки кадрів вищої кваліфікації;
доктор технічних наук, професор
Щербак Яків Васильович,
Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова,
завідувач кафедри електричного транспорту.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Юрченко Олег Миколайович,
Інститут електродинаміки
Національної академії наук України, м. Київ,
завідувач відділу транзисторних перетворювачів;
доктор технічних наук, професор
Випанасенко Станіслав Іванович,
ВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпро,
завідувач кафедри систем електропостачання;
доктор технічних наук, професор
Гриб Олег Герасимович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
завідувач кафедри автоматизації
та кібербезпеки енергосистем.

Захист відбудеться «17» травня 2018 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «_5_» _квітня_ 2018 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради



Івахно В. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Істотними факторами при розгляді проблем якості електроенергії та електромагнітної сумісності в електричних системах є несиметрія і несинусоїдальність струмів і напруг в системі, а також рівні реактивної потужності (РП), присутні в ній. Саме ці фактори пов'язані із визначенням енергетичних показників, які характеризують якість електричної енергії в системах електропостачання (СЕС) електротехнічних комплексів. Інтегральним показником якості вважається коефіцієнт потужності, який включає кількісні оцінки як РП зсуву та несиметрії, так і відхилення споживаних струмів від синусоїдальної форми. Покращання енергетичних показників СЕС становить важливу науково-технічну задачу, вирішення якої гарантує підвищення економічних показників, зменшення втрат електроенергії, економію паливно-енергетичних ресурсів на електростанціях.

Значний вклад у рішення проблеми покращання енергетичних показників і підвищення якості електричної енергії внесли вітчизняні та закордонні вчені А.К.Шидловський, В.Г.Кузнецов, Г.Г.Півняк, О.В.Кириленко, І.В.Жежеленко, О.О.Маєвський, В.Т.Долбня, Я.В.Щербак, І.Ф.Домнін, М.П.Бадер, Г.С.Зинов'єв, Г.Г.Жемеров, В.Я.Жуйков, Є.І.Сокол, О.Г.Гриб, Ю.О.Сиротін, Г.А.Сендерович, М.Я.Мінц, В.М.Чинков, С.І.Випанасенко, Ю.Л.Саєнко, В.І.Сенько, І.В.Мостовяк, А.Ф.Жаркін, В.О.Новський, М.М.Юрченко, Г.В.Павлов, К.О.Липківський, В.М.Михальський, О.М.Юрченко, М.Ю.Артеменко, Л.Мадьяр, Р.Стжелецкі, L.Czarnecki, H.Akagi, J.Arrillaga, C.I.Budeanu, S.Frise, W.Quade, J.E.Miller, M.Depenbrock, F.Peng, E.H.Watanabe та інші.

Значні несиметрія і несинусоїдальність вносяться в електричні мережі сільськогосподарськими споживачами, електротранспортом, комунально-побутовими навантаженнями, зварювальним устаткуванням, електродуговими печами і т. п. Введення симетро-компенсуючого обладнання пов'язано з додатковими капітальними витратами, термін окупності яких обчислюється десятками місяців і роками. Це обладнання вимагає також додаткових витрат, пов'язаних з його обслуговуванням. Через змінний характер навантажень необхідне додаткове налаштування параметрів цього устаткування, що передбачає моніторинг та розробку систем автоматичного контролю і управління.

Указані обставини вимагають проведення широкого спектру досліджень, пов'язаних з аналізом оптимальних режимів та синтезом симетро-компенсуючих пристроїв (СКП) для реалізації таких режимів. Як позначається в багатьох наукових працях відомих спеціалістів, єдиної універсальної теорії розрахунків і проектування СКП поки ще не створено. Труднощі розв'язання цих задач обумовлені тим, що задачі розрахунків і проектування СКП пов'язані з необхідністю розв'язувати складні системи алгебраїчних та диференціальних нелінійних рівнянь. Відомі методи, що розподіляються на аналітичні, графічні та графічно-аналітичні, є недосконалими, мають різного роду обмеження та не відрізняються високою точністю. Бурхливий розвиток силової напівпровідникової техніки відкрив нові можливості у вирішенні завдань поліпшення параметрів електричної енергії, що характеризують її якість. Апаратні та програмні засоби обчислювальної техніки надають широкі можливості для вдосконалення методів аналізу та синтезу СКП,

компенсації РП і боротьби з вищими гармоніками в СЕП. Величезна номенклатура сучасних мікроконтролерів забезпечує широкі можливості точної реалізації методів і засобів управління пристроями для підвищення якості електроенергії в СЕП. Тенденції розвитку сучасних інтелектуальних електричних мереж підсилюють нагальну потребу в розвитку методів аналізу оптимальних режимів та синтезу СКП на новому якісному рівні.

В зазначених аспектах представляється актуальною розробка нових ефективних методів аналізу оптимальних електромагнітних процесів і синтезу пристроїв симетрування і компенсації РП в СЕП електротехнічних об'єктів з метою покращання енергетичних показників цих систем. Розроблені методи доцільно засновувати на широкому застосуванні комп'ютерних методів і моделей з використанням оптимізаційних методів, що дозволяє здійснювати постановку завдань в узагальненому вигляді і вирішувати їх з високою точністю. Вирішенню цієї науково-прикладної проблеми і присвячена дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами й планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О.М.Бекетова з урахуванням концептуальних положень в межах: «Енергетичної стратегії України на період до 2030 року», що схвалена розпорядженням Кабінету міністрів України від 15 березня 2006р. № 145-р; «Національного плану дій з відновлювальної енергетики на період до 2020 року», що схвалений розпорядженням Кабінету Міністрів України від 1 жовтня 2004 р. № 902-р; Державної Програми енергонезалежності, ухваленої Указом Президента України № 5/2015 Про стратегію сталого розвитку «Україна – 2020» від 12.01.2015 р., в частині впровадження 100 відсотків обов'язкового комерційного обліку споживання енергоресурсів; Енергетичної стратегії України на період до 2030 р., схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071 від 24.07.2013, в частині: – розвитку електроенергетичної галузі; – розширення пропускної спроможності залізничних коридорів; Постанови Верховної Ради України «Про програму діяльності Кабінету Міністрів України» № 26-VIII від 11.12.2014 р. стосовно: розділу 7 «Нова політика енергетичної незалежності», а саме інтеграція української енергосистеми в мережу європейських енергосистем ENTSO-E та підвищення енергоефективності; «Програми енергозбереження на залізничному транспорті України в 2007 році» (затверджена 16.02.2007 року №ЦЗТ-12/112); Держбюджетної науково-дослідної роботи МОН України «Розробка наукових основ вдосконалення електромеханічних транспортних систем», (ДР № 0117U000659), де здобувач був виконавцем окремих розділів та співавтором звіту з науково-дослідної роботи.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка ефективних методів аналізу оптимальних електромагнітних процесів і синтезу пристроїв симетрування і компенсації РП для підвищення енергетичних показників СЕП, заснованих на широкому застосуванні комп'ютерних моделей з використанням оптимізаційних методів.

Поставлена мета вимагає вирішення наступних наукових завдань:

- провести аналіз сучасного стану проблем якості електричної енергії в аспекті методів аналізу оптимальних режимів та синтезу СКП для електротехнічних сис-

тем енергопостачання з несиметричними та нелінійними навантаженнями, і за цим аналізом обґрунтувати необхідність розробки нових методів з широким застосуваннями комп'ютерних моделей та оптимізаційних методів;

- визначити показники, параметри та критерії оптимізації при розв'язанні задач знаходження оптимальних режимів та синтезу СКП для СЕП з несиметричними та нелінійними навантаженнями;

- створити методи і алгоритми для пошуку оптимальних режимів та синтезу СКП із застосуванням оптимізації на комп'ютерних моделях та розглянути можливості їх програмної реалізації за допомогою сучасних пакетів прикладних програм комп'ютерної математики;

- виявити особливі властивості процесів пошукової оптимізації (ПО) з метою їх прискорення та покращання збіжності при визначенні оптимальних режимів в електротехнічних системах, і з урахуванням цих властивостей розвинути та вдосконалити запропоновані методи і алгоритми аналізу оптимальних режимів та синтезу СКП;

- провести дослідження із застосуванням розроблених методів і алгоритмів оптимальних режимів із синтезом СКП для трифазних СЕП з трьома і чотирма проводами при живленні несиметричних навантажень;

- виконати дослідження оптимальних режимів СЕП, що містять елементи з індуктивними зв'язками, а також при живленні навантажень з дуговими розрядами і асинхронними двигунами;

- визначити оптимальні режими в СЕП з тиристорними компенсаторами РП та транзисторними силовими активними фільтрами (САФ) із застосуванням методів ПО на комп'ютерних моделях шляхом знаходження оптимальних законів керування силовими напівпровідниковими приладами;

- розвинути запропоновані методи і алгоритми для визначення оптимальних режимів та синтезу СКП у випадках живлення декількох несиметричних та нелінійних навантажень з урахуванням при цьому вкладу кожного з навантажень у спотворення енергетичних показників роботи електротехнічної системи.

Об'єктом дослідження є електромагнітні процеси перетворення електричної енергії в СЕП електротехнічних систем та комплексів з СКП на основі реактивних елементів та силових напівпровідникових пристроїв, що застосовуються для підвищення якості електричної енергії і поліпшення електромагнітної сумісності споживачів електричної енергії з мережею живлення.

Предметом дослідження є методи, моделі і програмна реалізація оптимізації режимів роботи СЕП з несиметричними та нелінійними навантаженнями при застосуванні комп'ютерного моделювання і ПО з метою покращання енергетичних показників електротехнічних комплексів та систем.

Методи дослідження. При вирішенні задач дисертаційного дослідження застосовувалися оптимізаційні методи деформованого багатогранника і спряжених градієнтів для пошуку оптимальних режимів і синтезу СКП, топологічні методи і метод змінних стану для формування математичних моделей електротехнічних систем, числові методи інтегрування жорстких систем диференціальних рівнянь моделей електротехнічних систем, перетворення Фур'є для знаходження гармонійних

складових струмів і напруг, розкладання систем несиметричних струмів і напруг на симетричні складові для оцінки несиметрії в електротехнічних системах.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Вперше задача визначення оптимального режиму і синтезу СКП поставлена як задача ПО, що дозволяє одночасно знаходити параметри оптимального режиму і параметри СКП, запропоновані критерії оптимізації, розроблена програмна реалізація процесів ПО з використанням комп'ютерних моделей при розв'язанні задач покращання енергетичних показників СЕП, що дозволяє враховувати реалізацію процесів ПО в сучасних пакетах прикладних програм комп'ютерної математики на основі системного підходу;

2. Вперше виявлена спроможність процесу ПО витискати невідповідний за типом реактивний елемент СКП, надаючи його параметру прагнення досягти граничного значення, що дає можливість правильно визначити тип кожного реактивного елемента СКП в процесі оптимізації шляхом заміни його на дуальний елемент.

3. Вперше запропоновано звільнення змінних оптимізації шляхом збільшення їх кількості, що дозволяє прискорити процес знаходження локального мінімуму, а перехід до дійсних параметрів глобального мінімуму здійснити перерахунком величин змінних оптимізації на основі фундаментальних законів електротехніки;

4. Вперше запропоновано обертання прямої симетричної складової струмів джерел, за допомогою якого на моделі можна отримати параметри СКП для будь якого симетричного режиму, що дозволило вперше виявити неоднозначність режиму повної компенсації РП в трипровідній СЕП.

5. Вперше із застосуванням запропонованого методу ПО на комп'ютерних моделях здійснено аналіз оптимальних режимів і синтез СКП для трипровідної і чотирипровідної узагальнених трифазних СЕП з несиметричними навантаженнями, що дозволило пришвидшити знаходження оптимальних режимів та параметрів СКП з високою точністю;

6. Вперше застосовано запропонований метод ПО і його програмну реалізацію для визначення оптимальних режимів і синтезу СКП електротехнічних систем живлення навантажень, які містять індуктивно-зв'язані елементи, елементи з дуговим розрядом, а також асинхронний двигун, завдяки реалізації яких суттєво покращуються енергетичні показники систем електропостачання.

7. Вперше запропоновано метод декомпозиції системи електропостачання для знаходження параметрів оптимального режиму СЕП електротехнічного об'єкту при відсутності СКП з подальшим їх структурним і параметричним синтезом, який дозволяють спростити математичні моделі та підвищити збіжність процесів ПО;

8. Вперше розроблено і реалізовано принципи функціонування та структури систем керування тиристорними компенсаторами РП та транзисторними САФ, які на основі ПО здійснюють підвищення енергетичних показників трифазних СЕП з несиметричними і нелінійними навантаженнями і дозволяють виключити застосування складних і громіздких математичних перетворень в системах керування;

9. Набуло подальшого розвитку на основі застосування розроблених методів ПО визначення параметрів СКП для випадків декількох навантажень, яке дозволяє враховувати внески кожного навантаження у створення несиметрії і РП в системі.

Практичне значення одержаних результатів в галузі покращання енергетичних показників електротехнічних систем полягають у тому, що запропоновані, теоретично розроблені і шляхом комп'ютерного експерименту підтверджені методи і алгоритми з використанням комп'ютерних моделей для визначення режимів повної компенсації РП, симетрування струмів та покращення гармонійного складу у трифазних трипроводних та чотирипроводних СЕП із несиметричними реактивними та нелінійними навантаженнями дозволяють забезпечити оптимальні режими, завдяки чому досягається значне скорочення втрат електричної енергії та підвищення коефіцієнтів потужності та корисної дії електротехнічних комплексів та систем. Практична цінність роботи підтверджена актами про впровадження результатів дисертаційної роботи в Міжнародний консорціум «Енергозберігання» (м. Харків), ДП «Проектно-вишукувальний інститут «Укрзалізничпроект» залізничного транспорту України» (м. Харків), в Регіональній філії «Південна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця» (м. Харків), у АК «Харківобленерго» (м. Харків), у навчальні процеси в ХНУМГ імені О.М.Бекетова на кафедрі електротранспорту та в НТУ «ХП» на кафедрі автоматизації та кібербезпеки енергосистем.

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові здобутки, що відображені в дисертаційній роботі та публікаціях, отримані здобувачем особисто. В [1] здобувачем запропоновано критерій оптимізації, здійснені комп'ютерні розрахунки і виявлена властивість витискання неналежного елемента і можливість перерахунків параметрів за критеріями подібності; в [2] здобувачем запропоновано застосування узагальненого реактивного елемента і здійснено налаштування програми та пошук оптимального режиму; в [4] здобувачем запропоновано спосіб декомпозиції СЕП, який дозволяє суттєво спростити рівняння моделі і досягти результатів з високою точністю; в [5] здобувачем створено візуальну модель для оптимізації та запропоновано використання керованих джерел для виключення впливу фільтра зворотної симетричної складової на саму СЕП, запропоновано метод перерахування параметрів СКП до двоконденсаторного варіанту; в [6] здобувачем застосовано метод декомпозиції, який дозволяє врахувати вплив кожного навантаження в несиметрію і генерацію РП в системі і з урахуванням цього побудувати індивідуальний СКП для кожного навантаження; в [8] здобувачем здійснено оптимізацію режимів всіх пристроїв з силовими напівпровідниковими приладами; в [9] здобувачем написані розділи, присвячені формуванню математичних моделей, організації їх взаємодії з програмами, налаштуванням моделюючих комплексів та безпосереднім здійсненням комп'ютерних розрахунків; в [10] здобувачем запропоновано обчислення параметрів СКП випрямляча на основі балансу активних потужностей; в [11] здобувачем здійснено моделювання коректора коефіцієнта потужності; в [12] здобувачем складено граф, матриці і рівняння моделі СЕП в несиметричному режимі і в режимі повної компенсації РП, а також введені обмеження оптимізації, що забезпечують фізичну реалізацію СКП; в [13] здобувачем складено сигнальний граф моделі дугового розряду та її реалізація засобами візуального моделювання; в [16] здобувачем виконано створення моделі засобами комплексної математики та реалізовано її в системі MathCAD, а також вдосконалено синтез СКП без розглядання фази зворотної складової, як це використовується в відомому першоджерелі; в [17] здобувачем складено візуальну модель розрядної лампи високого тиску та прове-

дено комп'ютерні розрахунки; в [18] здобувачем доведено модель дугового розряду до сумісності з елементами системи SimPowerSystem (SPS) та проведено комп'ютерні розрахунки режиму; в [19] здобувачем запропонований алгоритм розрахунків та складений критерій оптимізації і його програмна реалізація з використанням моделі асинхронного двигуна; в [20] здобувачем запропоновано алгоритм оптимізації режиму в умовах несиметрії системи живлення асинхронного двигуна; в [21] здобувачем запропонований перерахунок паспортних параметрів трансформатора до параметрів системи SPS та здійснені розрахунки точності представлення моделей трансформатора зв'язаними індуктивностями; в [22] здобувачем створений і налагоджений комплекс програм для моделювання тягової системи змінного струму; в [23] здобувачем виявлено типи елементів СКП і здійснено розрахунок оптимального режиму для тягової підстанції; в [24] здобувачем проведено аналіз технічної літератури та підготовлено розділ статті, в якому обґрунтовуються принципи ПО; в [26] здобувачем розроблено алгоритм виділення симетричної і несиметричної частин при еквівалентуванні навантаження; в [28] здобувачем запропоновано побудову програми, що забезпечує оптимізацію режиму СЕП з дуговим розрядом, та проведено комп'ютерні розрахунки режиму; в [29] здобувачем запропонована та налаштована модель системи управління САФ, що управляється за алгоритмом ПО, та здійснені комп'ютерні розрахунки; в [30] здобувачем запропоновано ввести в критерій оптимізації амплітуди вищих гармонік струму; в [33] здобувачем запропоновано порядок розрахунків для попереднього аналізу компенсованого режиму та реалізовано ці розрахунки на моделі; в [35] здобувачем запропонована концепція безперервності значень енергетичних коефіцієнтів від співвідношення частоти модуляції з частотою мережі, а також здійснені комп'ютерні розрахунки; в [36] здобувачем запропоновано критерій оптимізації за досягненням балансу активних потужностей; в [39] здобувачем здійснені комп'ютерні розрахунки оптимальних режимів при змінних навантаженнях за створеними здобувачем програмами; в [41] здобувачем запропоновані критерії оптимізації, симетричне керування тиристорами компенсатора РП і програма для розрахунку оптимальних режимів; в [42] здобувачем вкладено узагальнюючі відомості з методів моделювання при досягненні оптимальних режимів; в [43] здобувачем запропоновано введення еталонних сигналів в активний фільтр та запропонований критерій оптимізації при роботі з САФ; в [44] здобувачем запропонований і реалізований критерій вирівнювання живильних струмів і запропонований метод обертання вектору прямої симетричної складової струмів; в [45] здобувачем здійснені комп'ютерні розрахунки за розробленими їм програмами та переклад англійською; в [46] здобувачем запропоновано забезпечувати баланс потужностей шляхом стабілізації постійної складової напруги на конденсаторі САФ.

Праці [3, 7, 14, 15, 25, 27, 31, 32, 34, 37, 38, 40] підготовлені до опублікування здобувачем одноосібно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і одержали схвалення на таких вітчизняних та міжнародних конференціях: «Новітні технології в електроенергетиці» (Харків, 2009); V науково-технічній конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем» (Донецьк, 2011); науково-практичних конференціях

«Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (Харків, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016, 2017); V науково-практичній конференції «Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві» (Алушта, 2012); VI науково-технічної конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем» (Донецьк, 2013); V науково-технічній конференції «Сучасні тенденції розвитку світлотехніки» (Харків, 2013); «Енергоефективна техніка та технології в житлово-комунальному господарстві» (Харків, 2014); VII науково-практичній конференції «Електрифікація транспорту «Транселектро – 2014» (Одеса-Дніпропетровськ, 2014); V науково-практичній конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» (Воловець, Закарпатської обл. 2014); «Проблеми автоматизованого електропривода. Силова електроніка та енергоефективність» (Харків, 2015); XVI науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах: Наука, освіта і практика» (Кременчуг, 2015); III науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» (Вінниця, 2015); International scientific conference UNITECH (Gabrovo, 2015); VIII науково-практичній конференції «Електрифікація транспорту» (Одеса, 2015); «Завалишинские чтения '16» (СПб, 2016); науковій конференції з моделювання «SIMULATION-2016», (Київ, 2016); XXII науково-технічній конференції «Силовая електроніка та енергоефективність» (Одеса, 2016); VI науково-технічній конференції «Актуальні проблеми світлотехніки в рамках Світлотехнічного міжнародного форуму «Light Forum' 2017» (Харків, 2017); «Проблеми автоматизованого електропривода. Силовая електроніка та енергоефективність» (Харків, 2017).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 41 наукових працях в спеціалізованих наукових виданнях (12 праць одноосібно), в тому числі 2 монографії, 7 статей у виданнях що належать до науково-метричних баз SCOPUS та WEB of Science, 32 наукові праці у фахових виданнях, а також у 5 наукових працях, які додатково відображають результати дисертації, в тому числі 2 праці в зарубіжних виданнях і патент на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг дисертації становить 358 сторінок основного тексту, включаючи: 99 рисунків по тексту, 43 рисунків на 45 окремих сторінках, 7 таблиць по тексту, 305 найменувань використаних джерел інформації на 20 сторінках, 4 додатків на 21 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині обґрунтовані актуальність і доцільність виконаної роботи, сформульовані мета і завдання наукового дослідження, наведені дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладена наукова новизна, практичне значення і реалізація результатів дисертації, наведені дані про їх апробацію й публікацію.

У першому розділі розглядаються основні чинники збільшення втрат в мережі, пов'язані з РП та з несиметрією мережі. До уваги беруться основні показники якості електроенергії, які базуються на фундаментальному співвідношенні, що визначає повну потужність S в системі як геометричну суму активної потужності P і складових РП зсуву Q , несиметрії N і спотворень D :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2 + D^2} .$$

Для симетрування струмів в мережі включають СКП з реактивними елементами, величини параметрів яких необхідно визначити. Застосування аналітичних методів для вирішення такого завдання ускладнюється тією обставиною, що при аналізі режимів невідомими змінними є не тільки величини струмів і напруг в системі, а й параметри СКП. Крім завдання аналізу оптимального режиму виникає також завдання синтезу – визначення типів реактивних елементів СКП і способу їх вмикання. Для вирішення цих питань зазвичай використовувалися аналітично-графічні методи і застосовувалися номограми для визначення типів і параметрів елементів в залежності від розташування векторів зворотної та нульової послідовностей, але ці методи не відрізняються точністю і універсальністю.

В дисертації поставлені завдання використання числових методів для аналізу і оптимізації з реалізацією в сучасних програмних пакетах, що дозволить вирішувати задачі покращання енергетичних показників більш досконалішими і універсальними способами, з більш високою точністю і широким залученням апаратних і програмних засобів сучасної комп'ютерної техніки.

У другому розділі розкривається математична сутність методу ПО, розглядається вибір параметрів і критеріїв оптимізації, а також реалізація ПО сучасними програмними засобами.

Повна система рівнянь, що описує усталені процеси в лінійній електричній системі представляється в матричному вигляді

$$F(X)=0,$$

де $F(X)=AX-Q$; X – вектор невідомих струмів і напруг в електричній системі; A – квадратна матриця коефіцієнтів при шуканих змінних; Q – вектор задавальних величин джерел електричної енергії, що живлять електричну систему.

$F(X)$ можна трактувати як нев'язку, яка прагне стати рівною нулю після досягнення рішення. Зведення цієї нев'язки до нуля може бути здійснено оптимізаційними методами. В цьому випадку нев'язка буде являти собою цільову функцію, а змінні параметри оптимізації представлені вектором шуканих невідомих струмів і напруг електричної системи. У разі аналізу несиметричною трифазною СЕП з СКП до числа невідомих в рівнянні з нульовою правою частиною додається вектор P , що представляє параметри СКП

$$F(X, P) = 0.$$

Для вирішення такої нелінійної задачі можна використовувати відомі методи оптимізації, які наближають зображаючу точку до точки рішення за допомогою ітерацій. На кожній ітерації оцінюється величина цільової функції і за заданим алгоритмом рішення стратегії проводиться зміна значень параметрів оптимізації таким чином, щоб забезпечити мінімізацію значення цільової функції. Для досягнення вирішення такого завдання до повної системи рівнянь кола слід додати додаткові рівняння та нерівності, що представляють собою обмеження оптимізації, кількість яких має бути не менше, ніж число невідомих параметрів СКП. В якості змінних параметрів оптимізації використовуються параметри СКП, що забезпечують симетрування і врівноваження трифазною СЕП, а також як ідеальний режим повну компенсацію

РП. Найбільш фундаментальною в якості цільової функції слід визначити кульову метрику, складену з РП джерел Q_a , Q_b , Q_c

$$M = \sqrt{Q_a^2 + Q_b^2 + Q_c^2}.$$

В цьому випадку гарантується відсутність надходження в систему РП з боку джерел живлення і втрати в лініях електропередачі мінімізуються. Для симетрування струмів без повної компенсації РП досить задати умову рівності активних потужностей, що віддаються джерелами живлення, або рівність амплітуд їх струмів. Також для симетрування досить домогтися рівності нулю зворотної симетричної складової струму. Для повної компенсації РП необхідно, щоб став рівним нулю фазовий кут прямої симетричної складової. Для чотирипровідних трифазних систем електропостачання необхідно подавити як нульову, так і зворотну симетричні складові. Для визначення цих величин можна використовувати як відповідні математичні формули або віртуальні прилади бібліотеки SPS, так і відомі в електроенергетиці фільтри симетричних складових. При формуванні моделей СЕП доцільно використовувати для складання повної системи рівнянь, що описують протікання процесів в СЕП, таких понять, як дерево графа, особливий контур, матриця «контур-гілка», які формалізують алгоритм складання топологічних і компонентних рівнянь, в тому числі рівнянь, представлених у формі задачі Коші. Складену таким чином систему диференціальних рівнянь можна вирішити числовими методами за допомогою сучасних математичних пакетів MathCAD. Крім того, для системи, що досліджується, можна скласти сигнальний граф Мейсона або Коутса і відобразити його у вигляді візуальної моделі через обчислювальні блоки бібліотеки середовища Simulink пакета MATLAB. Найбільші можливості у моделюванні як лінійних, так і нелінійних СЕП з несиметричними і несинусоїдальними струмами дає саме система SPS пакета MATLAB.

Розглянуто програмні засоби реалізації ПО. В системі MathCAD як засіб оптимізації використовується оператор Given-Find (Solve Block). Значущою властивістю оператора Solve Block є та обставина, що він вирішує системи рівнянь і нерівностей навіть в разі комплексних змінних, що дозволяє аналізувати лінійні електротехнічні системи з СКП методом комплексних амплітуд. Алгоритм використання ПО в системі MathCAD полягає в попередньому завданні вихідних даних і початкових значень невідомих змінних, до складу яких належать і параметри СКП. У вирішальному блоці розміщується повна система рівнянь моделі СЕП, яка далі доповнюється умовами симетрування і компенсації РП, а також умовами реалізації СКП виключно реактивними елементами. При застосуванні системи MATLAB практичне значення щодо електротехнічних систем мають оптимізаційні методи нульового порядку, що не передбачають обчислення перших і других похідних цільової функції. Найбільш універсальним слід визнати симплекс-метод Нелдера-Міда. Алгоритм застосування оптимізації для вирішення поставлених задач полягає у наступному. Реалізація ПО здійснюється за допомогою функції $fminsearch()$, параметрами якої є початкові значення параметрів оптимізації, також ім'я файл-функції для обчислення значення цільової функції. Файл-функція здійснює запуск візуальної моделі і після закінчення її роботи передає отримане значення цільової функції у $fminsearch()$. Процес триває доти, поки функція $fminsearch()$ не з'ясує такі значення параметрів оптимізації, при

яких значення цільової функції стане мінімальним. При недосягненні рішення слід ввести корекцію відносно початкових значень параметрів оптимізації або топології і типів реактивних елементів СКП. Таким чином, під пошуковою оптимізацією стосовно до задачі покращання енергетичних показників електротехнічних комплексів та систем будемо розуміти обчислювальний процес пошуку оптимальних режимів і параметрів електротехнічної системи за допомогою оптимізаційних алгоритмів і комп'ютерних програм з адаптацією до умов отримання рішення шляхом введення обмежень та корекцій, пов'язаних з фізичною реалізацією СКП з ціллю покращання енергетичних показників і якості електричної енергії в системі живлення електротехнічного об'єкту.

Розглянуто застосування ПО до задачі синтезу електричної системи в часовій області, яка полягає у знаходженні топології кола і визначення параметрів його елементів для відтворення імпульсу за заданою формою. В представленій постановці вирішення задачі потребує визначення як топології схеми, так і типів елементів і їх параметрів. В процесі вирішення виявлено властивість ПО витискати неналежний за типом і топологією елемент, що проявляється в намаганні процесу оптимізації надати значенню параметра невідповідного елемента граничних значень. Ця обставина дозволяє виключити такий елемент або замінити його на дуальний. Крім того виявилось можливим звільняти параметри оптимізації шляхом штучного збільшення їх кількості. Завдяки цьому процес оптимізації знаходить рішення для будь-якого локального мінімуму, витрачаючи на це менший комп'ютерний час, а параметри, відповідні глобальному мінімуму, знаходяться перерахуванням на основі співвідношень відповідно до фундаментальних законів електротехніки.

Третій розділ присвячений оптимізації режимів узагальненої трифазної електричної системи без нульового проводу (рис.1 без елементів, зображених пунктиром).

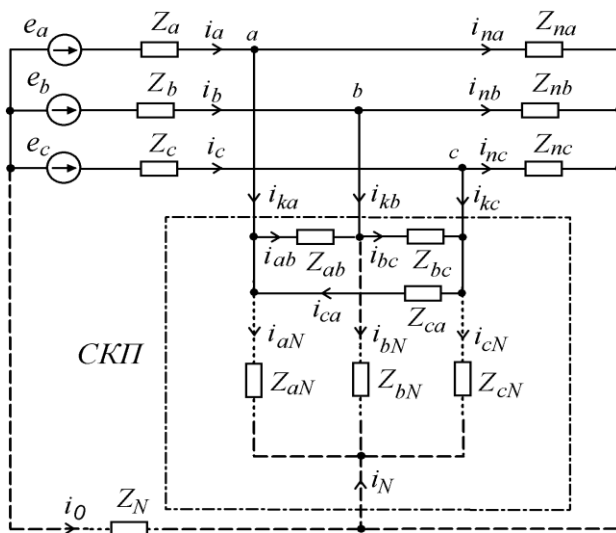


Рисунок 1 - Схема узагальненої трифазної системи електропостачання електротехнічного об'єкту

Тестові параметри системи: $e_a=100$ В; $z_a=z_b=z_c=0,1+j\omega 0,001$ Ом; $z_{na}=0,7+j\omega 0,005$ Ом; $z_{nb}=1+j\omega 0,01$ Ом; $z_{nc}=2+j\omega 0,04$ Ом, де $\omega=100\pi$ – частота напруги живильної мережі. При цих параметрах спостерігається суттєво несиметричний режим роботи СЕП, який був визначений з використанням математичного пакета MathCAD за допомогою сформованої математичної моделі. Розрахунки показали, що струми джерел по фазам А, В, С мають амплітуди відповідно 31.194 А, 30.995 А та 10.342 А, коефіцієнти потужності відповідно 0.608, -0.0611 та 0.337. Повна сумарна потужність

джерел живлення складає величину $S_{esum}=1037.412 + j3283.532$ ВА. Активні втрати потужності на лініях електропередачі складають величину 192.974 Вт.

Вектори прямої і зворотної симетричних складових струмів джерел відповідно дорівнюють $I_1=6.96-j21.894$ А та $I_2=12.242-j3.107$ А, що дійсно відповідає суттєво несиметричному режиму. Здійснення з використанням ПО розрахунку параметрів СКП, що забезпечують повну компенсацію РП, вимагає введення умов компенсації та реалізації СКП реактивними елементами. Для цієї мети, змінні повної системи були доповнені комплексними опороми компенсуючих елементів. Умови компенсації РП сформульовані у вигляді критерію рівності нулю РП кожного живильного джерела. Для реалізації СКП виключно реактивними елементами введені обмеження у вигляді відсутності дійсних частин комплексних опорів цих елементів. Після виконання ПО знайдені комплексні опори елементів СКП, які відповідають конденсаторам з величинами $C_{ab}=562.190$ мкФ, $C_{bc}=182.318$ мкФ, $C_{ca}=34.465$ мкФ. При цьому амплітуди струмів в фазах зменшилися до 7.754 А, коефіцієнти потужності стали одиничними для всіх фаз, кожне джерело віддає лише активну потужність величиною 387.702 Вт. Повна сумарна потужність джерел живлення складає величину $S_{esum}=1163.107$ Вт. Активні втрати потужності на лініях електропередачі суттєво зменшилися і тепер складають величину лише 9.019 Вт. Для порівняння проведено розрахунок параметрів СКП за аналітичним методом (формули В.А.Венікова), суть якого полягає в подавленні зворотної симетричної складової струму I_2 . При цьому приходимо до двохконденсаторного СКП при $C_{ab}=449.91$ мкФ, $C_{bc}=126.03$ мкФ. Однак рішення задачі цим методом не забезпечило повного симетрування струмів джерел: вони по фазам А, В, С мають амплітуди відповідно 11.56 А, 9.616 А та 8.068 А, коефіцієнти потужності відповідно 0.814, 0.616 та 0.858. Повна сумарна потужність джерел живлення складає величину $S_{esum}=1112.682 + j921.509$ ВА, тобто РП в системі скомпенсована не повністю. Активні втрати потужності на лініях електропередачі складають величину 14.56 Вт. Ці дані свідчать про неточність традиційної методики і про перевагу методу ПО при визначенні оптимального режиму і синтезі СКП.

Візуальна модель трифазної СЕП в SPS приведена на рис. 2.

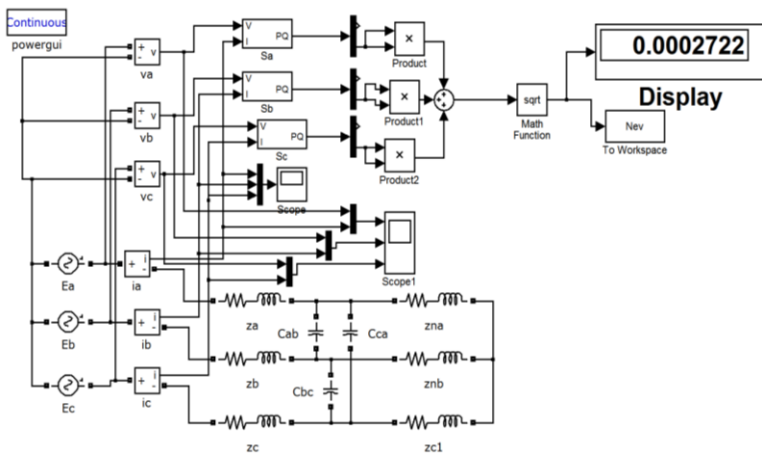


Рисунок 2 – Візуальна модель трифазної системи з СКП після виконання пошукової оптимізації

робочій простір за допомогою віртуального блоку To Workspace. Далі значення цільової функції використовується вбудованою функцією $fminsearch()$, яка здійснює ПО, зводячи за алгоритмом деформованого багатогранника значення цільової функції до нуля (на рис. 2 видно, що цільова функція надбала досить мале значення 0.0002722 ВАр).

В якості критерію оптимізації використаний середньоквадратичний функціонал, складений з РП джерел. Для цього в моделі (рис. 2) вимірюються напруги і струми джерел живлення, які подаються на віртуальні вимірювачі активної і РП, а далі квадратичні значення РП складаються, із суми здобувається квадратний корінь і результат отриманого значення цільової функції передається у

Знайдені значення параметрів СКП співпали з тими значеннями, які були обчислені в MathCAD (562.0866 мкФ; 182.3057 мкФ; 34.4635 мкФ). Часові діаграми струмів, споживаних джерелами живлення, показані на рис. 3, а та 3, б відповідно для несиметричного режиму при відсутності СКП та для оптимального режиму при підключенні СКП з параметрами, знайденими в результаті оптимізації. Ці діаграми підтверджують попередні розрахунки методом комплексних амплітуд, здійснені Solve Block в пакеті Mathcad. Витрати часу при використанні візуальної моделі більші, однак при цьому відпадає необхідність складання рівнянь математичної моделі, яка формується системою Simulink в пам'яті комп'ютера, що є суттєвою перевагою застосування саме візуальної моделі у сполученні із *fminsearch()*. Крім цієї функції випробувана також функція оптимізації *fminunc()*, яка заснована на числовому визначенні значень похідних, що необхідно для роботи за алгоритмом спряжених градієнтів.

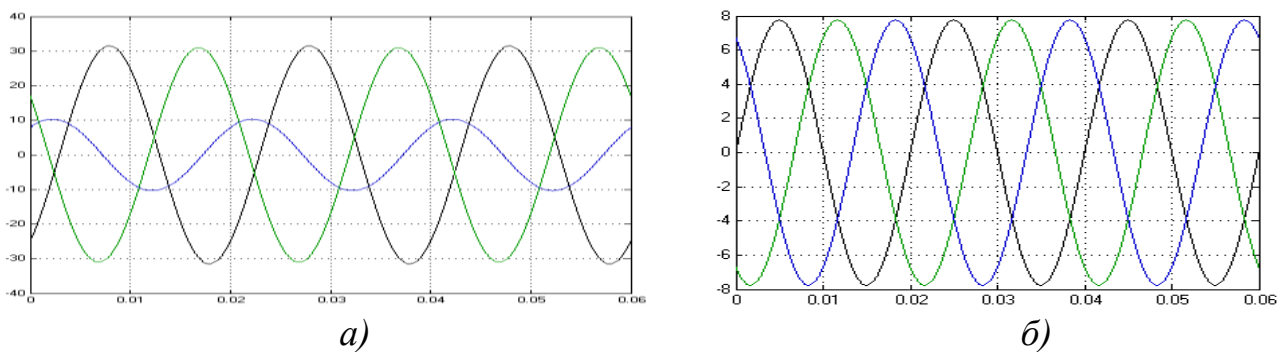


Рисунок 3 – Часові діаграми струмів джерел в несиметричному (а) і оптимальному (б) режимах

Побудовані поверхні оптимізації для обраної цільової функції (рис.4), які дають певне уявлення про складності процесу оптимізації, обумовлені появою ярів.

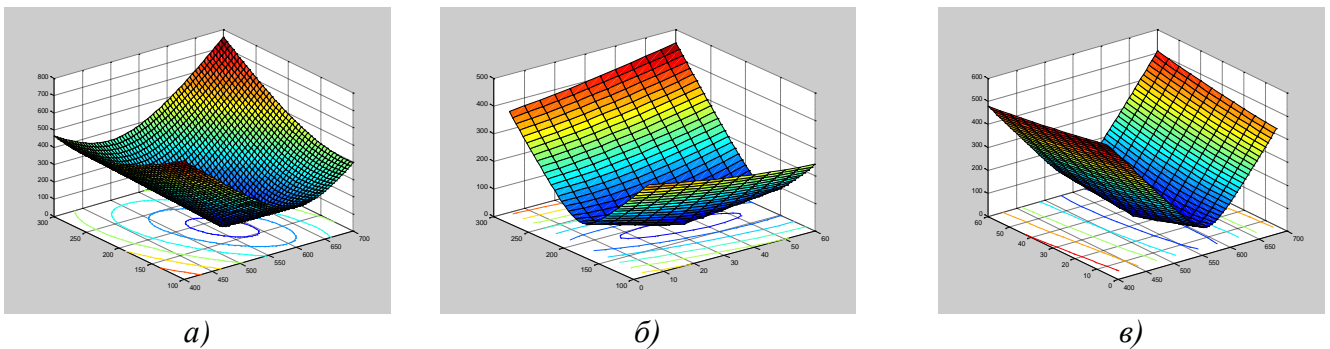


Рисунок 4 – Поверхні оптимізації при фіксації C_{ca} (а), при фіксації C_{ab} (б), при фіксації $C_{ab}(в)$

Лінії рівнів мають характер витягнутих еліпсів, на подолання яких витрачаються додаткові обчислення цільової функції. В усіх випадках поверхня оптимізації торкається найнижчою точкою горизонтальної площини в точці з координатами, що відповідають параметрам симетро-компенсуючого пристрою за умови повної симетризації і компенсації РП в системі

Хід процесу оптимізації наочно демонструють графік залежності величини цільової функції від номеру звернення функції оптимізації до моделі, яка обчислює саме значення цільової функції (рис. 5). Використання *fminsearch()* характеризується меншими відхиленнями, більшою кількістю прогонів моделі ($N=327$), але більш високою точністю досягнення мінімального значення цільової функції $1,444E-5$ ВАр. При використанні *fminunc()* графік має характерні ступінчасті ділянки, обумовлені

числовими визначеннями похідних цільової функції. Хоча кількість звернень до моделі менша ($N=192$), точність мінімуму також менша і складає значення 0,00635 Вар.

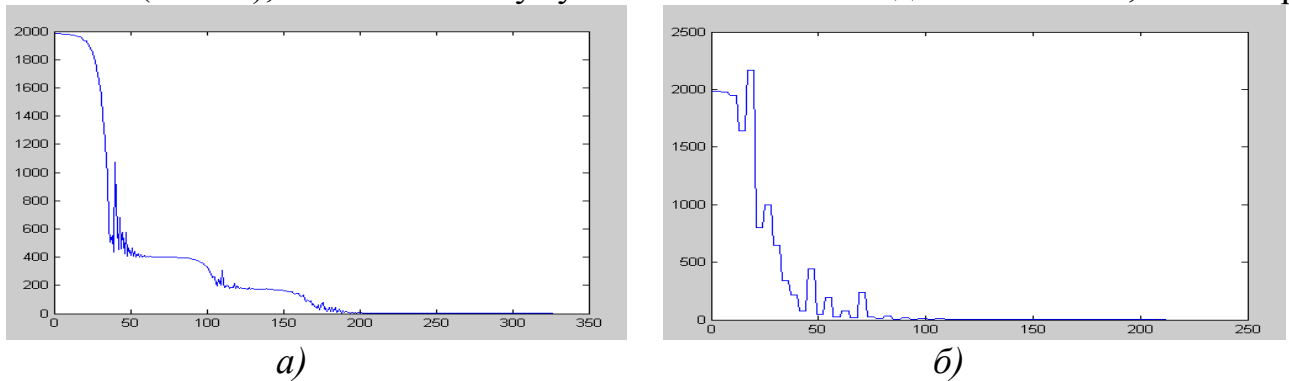


Рисунок 5 – Хід процесів оптимізації при застосуванні *fminsearch* (а) та *fminunc* (б).

ПО отримала застосування до методу еквівалентування навантаження, згідно з яким будь-яке несиметричне навантаження можна представити у вигляді симетричного трифазного навантаження і однофазного навантаження, ввімкненого на лінійну напругу до затискачів трифазного навантаження. Застосування ПО дозволило визначити комплекси опорів трифазного симетричного і однофазного навантаження, а так само точок підключення останнього. Розрахунок еквівалента трифазного несиметричного навантаження в запропонованій методиці проводиться на підставі рівності струмів в лініях електропередачі для вихідної і еквівалентної систем. Після визначення параметрів еквівалента несиметричного трифазного навантаження знаходження параметрів СКП здійснено за допомогою еквівалентних перетворень і введення елементів за схемою симетрування Штейнметца.

Розроблено і реалізовано метод оптимізації режиму несиметричної системи, коли цільова функція формується шляхом вимірювань на стороні навантаження за допомогою фільтра симетричної складової (ФСС) зворотної послідовності, що уявляє собою резистивно-ємнісний фільтр $CaRaCcRc$ (рис. 6).

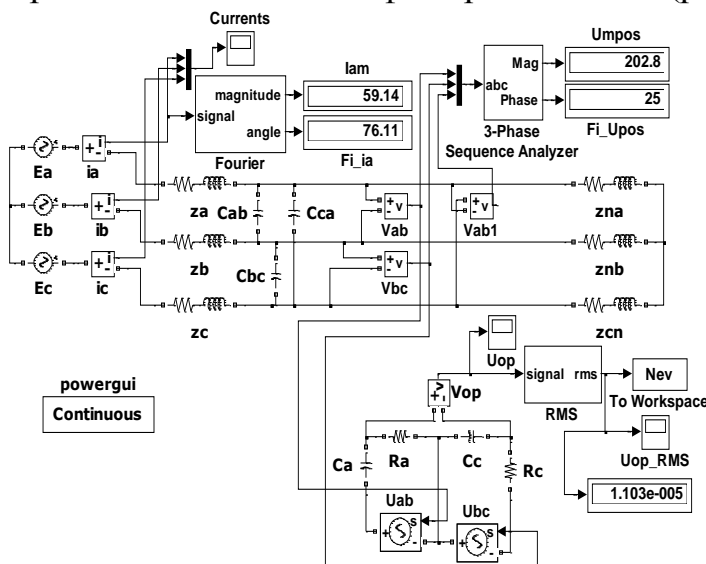


Рисунок 6 – Візуальна модель узагальненої трифазної системи електропостачання з ФСС

З метою уникнення впливу елементів фільтра на мережу електропостачання запропоновано фільтр підключати не до затискачів навантаження, а до залежних джерел напруги. При цьому в якості цільової функції використовується діюче значення вихідної напруги фільтра. Слід зазначити, що в залежності від початкових заданих значень в процес оптимізації може виходити на різні варіанти значень параметрів СКП. При цьому для деяких варіантів

може виникати перекомпенсація РП. Для приведення системи до оптимального режиму запропонований метод обертання векторів прямої симетричної складової

струмів в лініях електропередачі шляхом одночасної зміни величин ємностей СКП на одну і ту ж величину. Ознакою входу в оптимальний режим є досягнення амплітудами струмів в лініях електропередач мінімумальних значень.

Для отримання варіанту двоконденсаторного СКП запропоновано на основі методу обертання вираховання з величин ємностей триконденсаторного СКП ємності конденсатора з мінімальною ємністю. Вирішено задачу визначення параметрів СКП за критерієм вирівнювання струмів I_A, I_B, I_C в лінії електропередачі (рис.7) Сформований вираз для цільової функції при ПО для прискореного рішення, при якому знаходиться будь-який локальний оптимум.

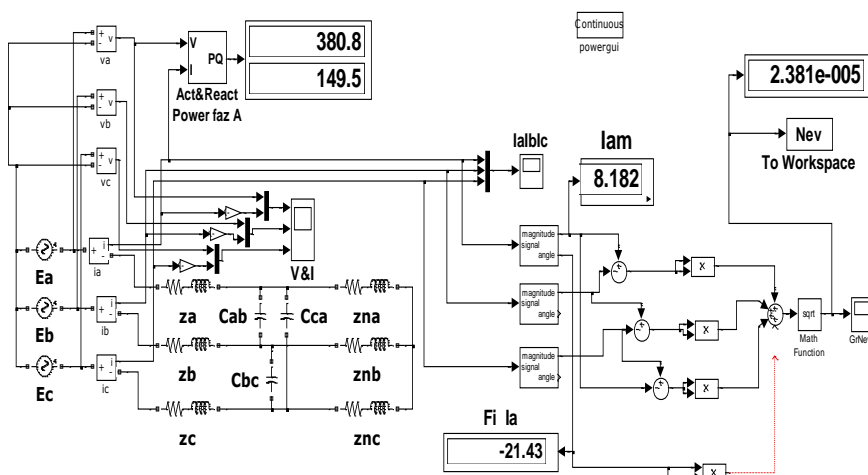
$$N = \sqrt{(I_A - I_B)^2 + (I_B - I_C)^2 + (I_C - I_A)^2}.$$

Визначення режиму повної компенсації РП можна виконати шляхом доповнення виразу для цільової функції ще одним параметром

$$N = \sqrt{(I_A - I_B)^2 + (I_B - I_C)^2 + (I_C - I_A)^2 + \varphi_A^2},$$

де φ_A - кут зсуву першої гармоніки струму живильного джерела щодо його напруги. В цьому випадку відшукується безпосередньо глобальний мінімум.

Застосування обертання вектору прямої симетричної складової у бік збільшення ємностей конденсаторів СКП дозволило виявити ще один теоретично можливий режим з повною компенсацією РП при наступних параметрах СКП:



$C_{ab}=3935.999$ мкФ;
 $C_{bc}=3555.518$ мкФ;
 $C_{ca}=3407.678$ мкФ. Амплітуди струмів в джерелах при цьому складають величини 928,39А, а амплітуди фазних напруг на навантаженнях – 291,76В. Вихід на цей режим відбувався також при оптимізації за критерієм вирівнювання струмів джерел при певних початкових значеннях параметрів оптимізації із застосуванням візуальної моделі, а також був підтверджений розрахунками методом комплексних амплітуд при реалізації ПО в системі Mathcad за допомогою Solve Block. За умови рівності прирощень провідностей, для індуктивного елемента отримана формула знаходження наступного значення індуктивності L_{k+1} через попереднє L_k

$$L_{k+1} = (L_k^{-1} - \omega^2 \Delta C)^{-1},$$

де ΔC - прирощення ємності для конденсаторів СКП.

Відштовхуючись від двоконденсаторного варіанту СКП з $C_{ab}=527.6638$ мкФ; $C_{bc}=147.8530$ мкФ, і вважаючи, що $C_{ca}=0$ мкФ еквівалентно увімкненню індуктивного елемента з нескінченно великою індуктивністю (було прийнято $L_{ca}=10^{12}$ Гн), на моделях здійснено обертання в бік подальшого зменшення ємностей конденсаторів.

При цьому було отримано симетричний режим в трипровідній системі з параметрами СКП $C_{ab}=492.769$ мкФ; $C_{bc}=112.957$ мкФ; $L_{ca}=0.29035$ Гн. Амплітуди струмів джерел складають 9,7896 А; кут зсуву струмів джерел відносно їх напруг складає -40,107 ел. град. Продовжуючи обертання в зазначеному напрямі, отримуємо симетричний режим з двома індуктивностями в СКП при параметрах $C_{ab}=185.0503$ мкФ; $L_{bc}=0.052023$ Гн; $L_{ca}=0.029573$ Гн, при якому амплітуди струмів джерел складають 32,3527 А; кут зсуву струмів джерел відносно їх напруг складає -76,987 ел.град. Таким чином, справедливим є висновок про неоднозначність режимів повної компенсації РП в трипровідній системі.

В четвертому розділі проведена оптимізація трифазних СЕП з нульовим проводом. Завдання розрахунку СКП для чотиріпровідних СЕП (рис.1 з елементами, зображеними пунктиром) пов'язане як з визначенням параметрів їх елементів, так і з розрахунком електричних величин, зв'язаних з ними. При цьому необхідно забезпечити компенсацію РП, а також симетрування і врівноваження СЕП. При дослідженні несиметричного режиму системи з тестовими параметрами навантаження $z_{na}=1+j\omega 0,025$ Ом; $z_{nb}=1+j\omega 0,01$ Ом; $z_{nc}=2+j\omega 0,04$ Ом і прийнятим опором нульового проводу $z_N=0,3+j\omega 0,003$ Ом було встановлено, що несиметрія обумовлює в системі режим, що характеризується нерівномірністю завантажень фаз, низькими енергетичними показниками і суттєвим струмовим перевантаженням нульового проводу. Візуальна модель системи для забезпечення ПО наведена на рис.8.

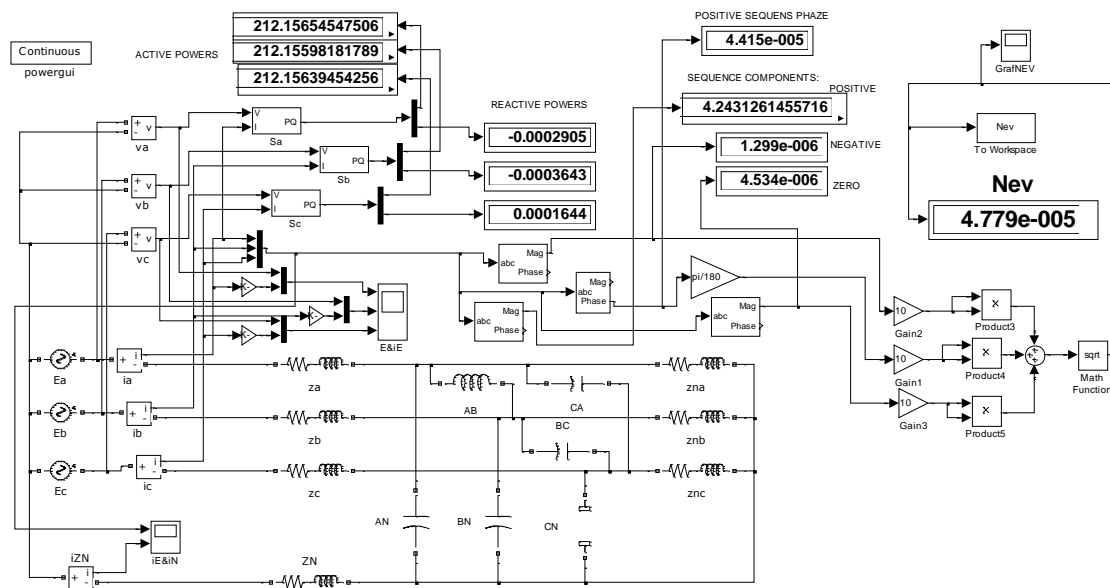
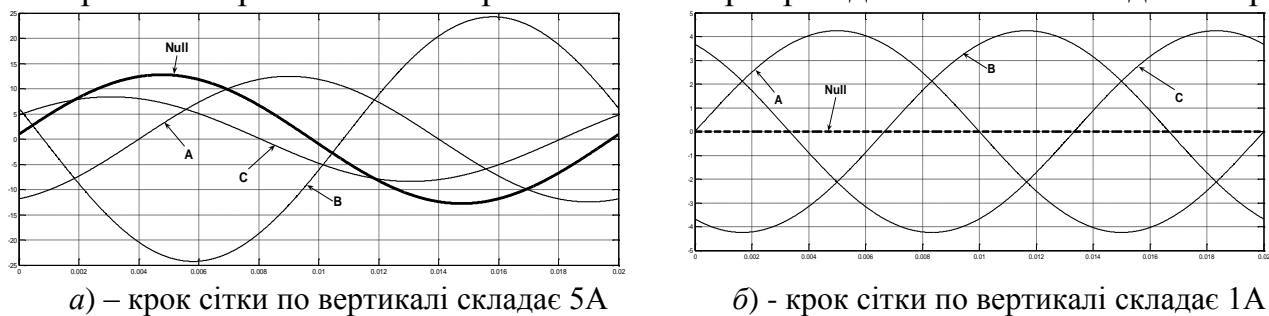


Рисунок 8 – Візуальна модель чотиріпровідної системи електропостачання після завершення процесу пошукової оптимізації

Для формування цільової функції використовуються вихідні величини віртуальних аналізаторів симетричних складових: амплітуди I_2 зворотної і I_0 нульової послідовностей струмів, а також фазовий кут φ_1 прямої послідовності. СКП представлено п'ятьма елементами. Спочатку типи усіх елементів були задані, як конденсатори, а в процесі оптимізації виявлялося, які з елементів були призначені невірно. На завершення останнього процесу оптимізації отримані наступні значення параметрів симетро-компенсуючого пристрою: $L_{ab}=0,2356052$ Гн; $C_{bc}=138,547$ мкФ; $C_{ca}=27,3564$ мкФ; $C_{an}=416,3018$ мкФ; $C_{bn}=778,4783$ мкФ. Величина цільової функції досягла близького до нуля значення $N_{ev} = 4,78E-5$, амплітуда зворотної симетричної

складової $I_{обр}=1,299E-6$ А, амплітуда нульової симетричної складової $I_o = 4,534E-6$ А, фазовий кут прямої симетричної складової $\varphi_{np} = 4,415E-5$, що зумовлює одиничне значення коефіцієнта потужності. Незначними є і величини РП, що віддаються кожним джерелом живлення: $Q_a = 0,00029$ ВАР; $Q_b = 0,00036$ ВАР; $Q_c = 0,00016$ ВАР, в той час як активні потужності, що віддаються джерелами, зрівнялися і склали величини $P_a=P_b=P_c=212,16$ Вт. Амплітуди струмів, що віддаються кожним джерелом, рівні амплітуді прямої симетричної складової струмів в лініях електропередачі: $I_{am} = I_{bm} = I_{cm} = I_{np} = 4,243$ А, і ці значення в кілька разів менші, ніж в несиметричному режимі (12,46 А; 24,26 а і 8,39 А). Амплітуда струму в нульовому проводі становить близьку до нуля величину 13,6Е-6 А (при несиметричному невірноваженому режимі амплітуда цього струму досягала значення 12,772 А). Ці результати свідчать про високу точність розрахунку оптимального режиму та параметрів синтезованого СКП. Часові діаграми струмів джерел і в нульовому проводі для несиметричного і симетричного врівноваженого режимів в чотирипровідній системі наведені на рис.9.



а) – крок сітки по вертикалі складає 5А

б) - крок сітки по вертикалі складає 1А

Рисунок 9 – Діаграми струмів при несиметричному(а) і оптимальному (б) режимах

Для повної автоматизації процесу оптимізації при пошуку типів елементів складного СКП запропонований ефективний штучний прийом включення в кожній гілці СКП пари з конденсатора і котушки індуктивності, що шунтують одне одного і утворюють узагальнений реактивний елемент з можливістю одночасної зміни параметрів обох елементів в процесі оптимізації (рис. 10).

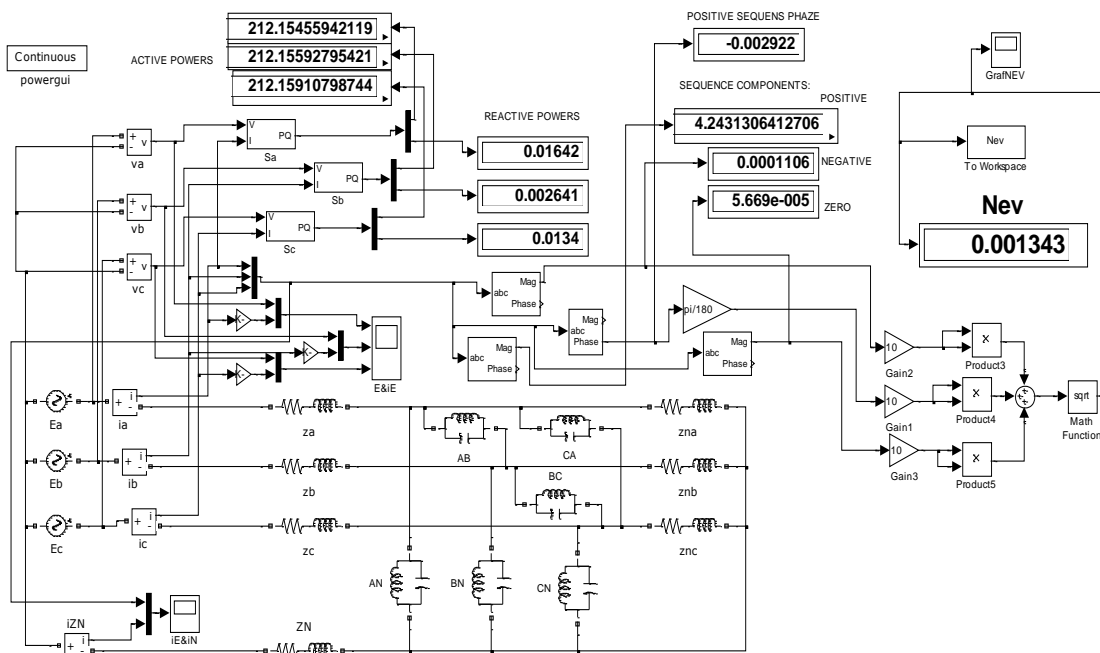


Рисунок 10 – Візуальна модель чотирипровідної системи з використанням узагальнених реактивних елементів в СКП після завершення пошукової оптимізації

В цьому випадку відпадає необхідність втручання в процес ПО. За рахунок звільнення параметрів оптимізації знаходиться локальний мінімум, що може скоротити витрати комп'ютерного часу. По завершенню процесу оптимізації достатньо виконати заміну пар кожного узагальненого реактивного елемента одним реактивним елементом, тип якого визначається за превалюванням реактивності в узагальненому елементі. Для цього прикладу уточнюючий розрахунок п'ятиелементного СКП представлений наступними результатами: $C_{ab}=216,4938$ мкФ; $C_{bc}=398,0475$ мкФ; $C_{ca}=286,8551$ мкФ; $L_{an}=0,027974$ Гн $L_{cn}=0,0130150$ Гн. Цей варіант симетрокомпенсуючого пристрою відрізняється за структурою і типами елементів від раніше знайденого варіанту. Однак оптимальний режим з точки зору джерел, ліній електропередачі і навантаження, виявився ідентичним, що свідчить про неоднозначність вирішення завдання синтезу СКП для СЕП з нульовим проводом. Для полегшення вирішення задачі визначення початкових значень параметрів оптимізації, початковими наближеними значеннями приймалися значення струмів через гілки трифазного навантаження.

Розвиток цієї концепції привів до розробки алгоритму попереднього точного розрахунку симетрованого режиму без підключення СКП, що базується на декомпозиції СЕП. При завданні початкових значень струмів в лініях електропередачі вважаємо, що струми зрушені один відносно одного на 120 ел. град. Далі обчислюються напруги фаз на кінці лінії електропередачі та розраховуються струми в фазах навантаження при визначеному потенціалі загального вузла навантаження.

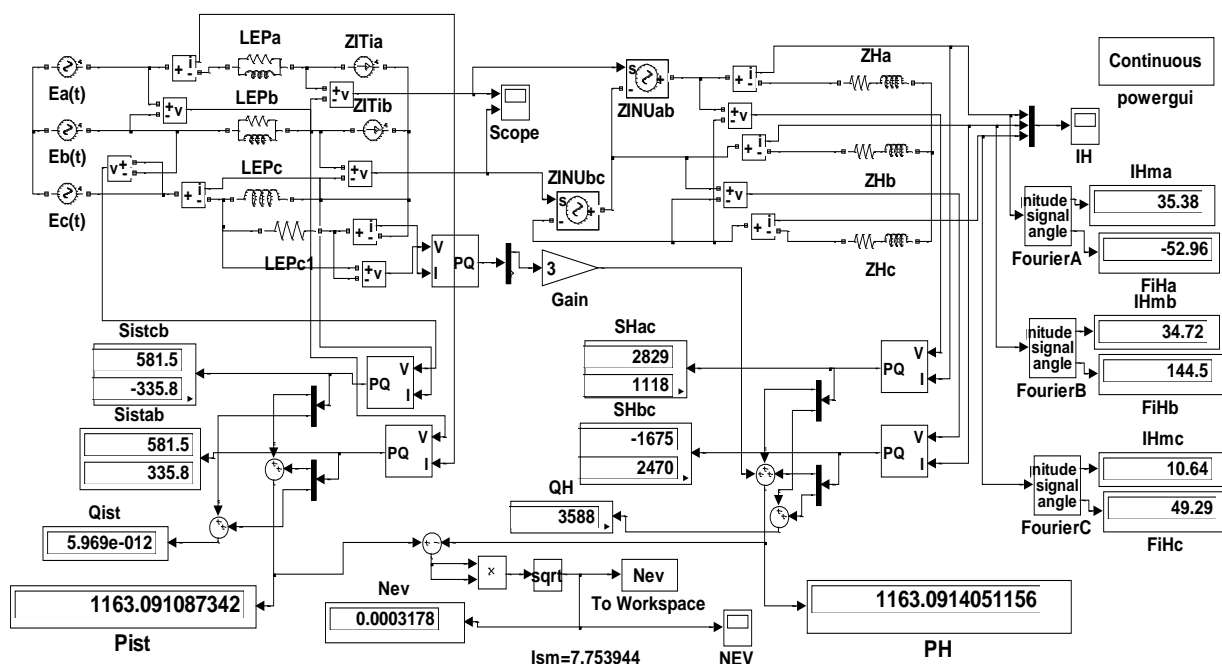


Рисунок 11 – Візуальна модель розділеної системи електропостачання

Останнім кроком є уточнення рішення, виходячи з рівняння балансу активних потужностей, що віддаються джерелами напруги і споживаються лінією електропередачі та навантаженням. Реалізація алгоритму для трифазної системи без нульового проводу була здійснена на моделі в системі SPS на основі візуальної моделі (рис. 11). У моделі здійснюється ПО амплітуд струмів, що віддаються джерелами струму, яка забезпечує баланс активних потужностей в СЕП. За оптимальними зна-

ченнями струмів визначаються ті струми і напруги, які є вихідними даними для синтезу СКП. Це задача за всіма показниками більш проста в порівнянні з аналізом і синтезом всієї СЕП. Ефективно ця задача вирішена також у системі Mathcad. Запропонований на основі декомпозиції СЕП універсальний метод реалізовано в універсальній програмі, яка передбачає можливість розрахунку параметрів СКП як для трипровідної, так і для чотирипровідної СЕП. За допомогою цієї програми з високою точністю і швидкістю знайдені усі можливі шість варіантів СКП з правильним визначенням типів елементів СКП та точних значень їх параметрів.

П'ятий розділ присвячений дослідженню процесу оптимізації в системах з індуктивними зв'язками. Розроблено програму для розрахунку параметрів заступної схеми трансформатора для SPS-моделі, в якій за паспортними даними визначаються дані схеми заміщення. Перевірка точності розрахунків здійснена на SPS-моделях для однофазного трансформатора і для магнітно-зв'язаних котушок. За розробленою методикою були розраховані параметри трифазного понижувального трансформатора, через який був підключений СКП з низьковольтними компенсуючими конденсаторами (рис. 12). Шляхом моделювання за допомогою алгоритмів ПО в досліджуваній СЕП досягнута компенсація РП і повне симетрування. Розраховані запропонованим методом параметри СКП забезпечують симетрування і компенсацію РП, з урахуванням реактивності і несиметрії навантаження, а також реактивностей лінії електропередачі і самого трансформатора СКП. ПО проведена для декількох варіантів моделей з різними коефіцієнтами трансформації і показала, що збільшення коефіцієнта трансформації призводить до зростання ємностей конденсаторів (рис. 13).

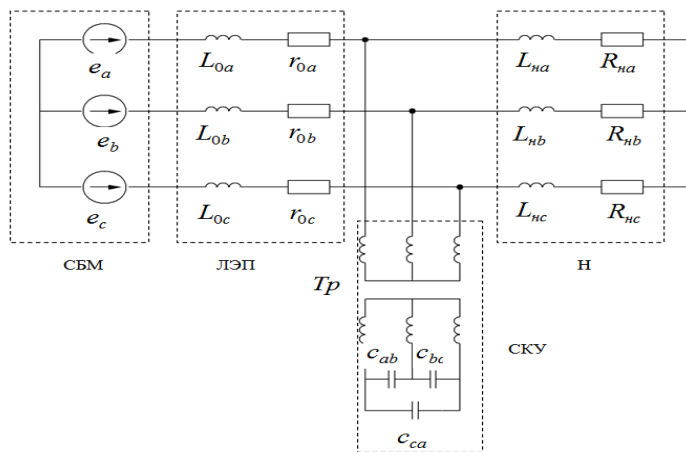


Рисунок 12– Підключення СКП через трансформатор

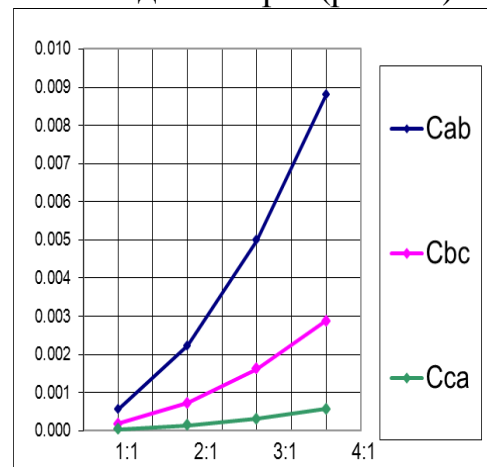


Рисунок 13 – Залежності ємностей СКП від коефіцієнту трансформації

Істотну несиметрію і зростання РП в СЕП вносять тягові трансформатори залізничного транспорту змінного струму, де живлення тягового електроприводу здійснюється від однієї зі сторін трикутника вторинних обмоток, тобто, фактично за схемою однофазного навантаження. (рис. 14). ПО СЕП залізниці змінним струмом реалізована із використанням SPS-моделі (рис. 15). Трансформатор відповідає паспортним даним серійного трансформатора типу ТДНЖ-25000/110, за якими обчислені відповідні реальні параметри для SPS-моделі трансформатора. При роботі моделі використовується метод дискретних моделей елементів, що забезпечує подолання явища жорсткості системи диференціальних рівнянь. Модель зображена при відключених елементах СКП і віддзеркалює стан несиметричного режиму.

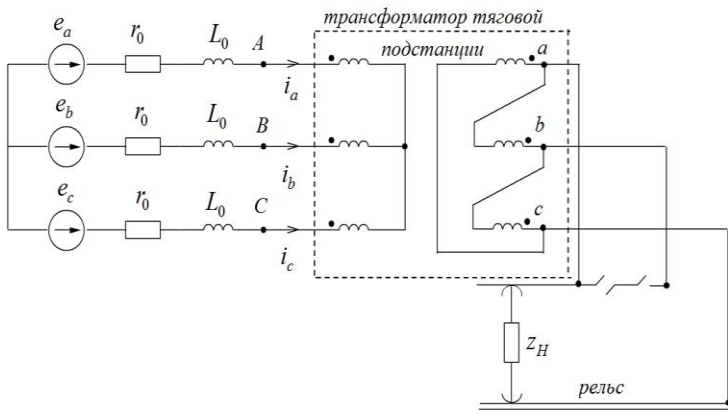


Рисунок 14 – Система живлення змінним струмом залізничного тягового навантаження

того, показник РП джерела фази С при таких умовах має також від'ємну величину $-5.495E+5$ Вар. Такі показники свідчать про аномальну роботу джерел фаз В і С. Ці обставини слугували приводом для невідповідних претензій енергопостачальних організацій до Південної залізниці у зв'язку з ситуацією на ділянці Полтава-Александрія.

Навантаження z_{na} увімкнене між вузлами a та c трикутника вторинних обмоток трансформатора. Це зумовлює такий несиметричний режим, що струм в навантаженій обмотці за амплітудою майже вдвічі перевищує струми в ненавантажених обмотках, внаслідок такої різкої несиметрії активна потужність джерела фази В має від'ємну величину $-2.334E+5$ Вт (рис.15). Крім

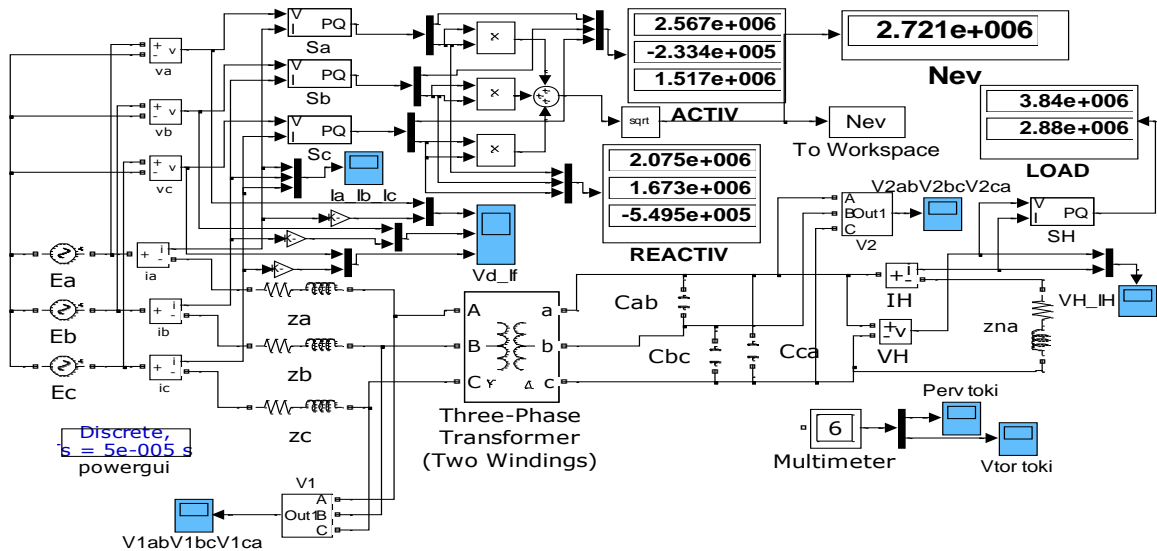


Рисунок 15 – Модель системи живлення змінним струмом залізничного навантаження

Коефіцієнти потужності джерел фаз А, В, С відповідно складають 0.778, 0.138 і 0.94. ПО дозволила визначити параметри СКП для цього випадку, в якості СКП повинні вмикатися конденсатори C_{ab} і C_{ca} та індуктивність L_{bc} . Величини параметрів елементів СКП визначені шляхом комп'ютерних розрахунків для ряду величин навантажень, за цими розрахунками побудовані графіки, які дозволяють графічно визначити параметри СКП для будь-якого навантаження. Застосування цих графіків дозволяє за принципом суперпозиції визначити параметри СКП при несиметричних навантаженнях на обох боках трикутника вторинних обмоток живильного трансформатора. Внаслідок вмикання СКП коефіцієнти потужності джерел усіх трьох фаз стають одиничними, первинні і вторинні струми вирівнюються між собою за фазами та амплітудами, і, таким чином, трансформатор працює у виключно симетричному режимі. Це покращує умови роботи трансформаторів і збільшує термін їх безаварій-

ної роботи. Зменшення амплітуд струмів в обмотках трансформатора суттєво зменшує теплові втрати в СЕП.

Досліджені процеси у трифазній СЕП, що знайшла застосування для живлення однофазного навантаження сільськогосподарського призначення. В ній саме живлення здійснюється від двох вторинних обмоток, а вільна третя обмотка використовується в якості елемента СКП. Завдяки серії комп'ютерних експериментів з використанням ПО встановлена залежність величин ємностей конденсаторів від індуктивності намагнічування трансформатора. Крім того виявлено, що при збільшенні індуктивності намагнічування ємність конденсатора C_{ab} зменшується до нуля, і таким чином ця схема має обмеження властивості симетрування в певному діапазоні параметрів системи.

Із використанням ПО врівноважена і збалансована СЕП з нейтралером (рис. 16).

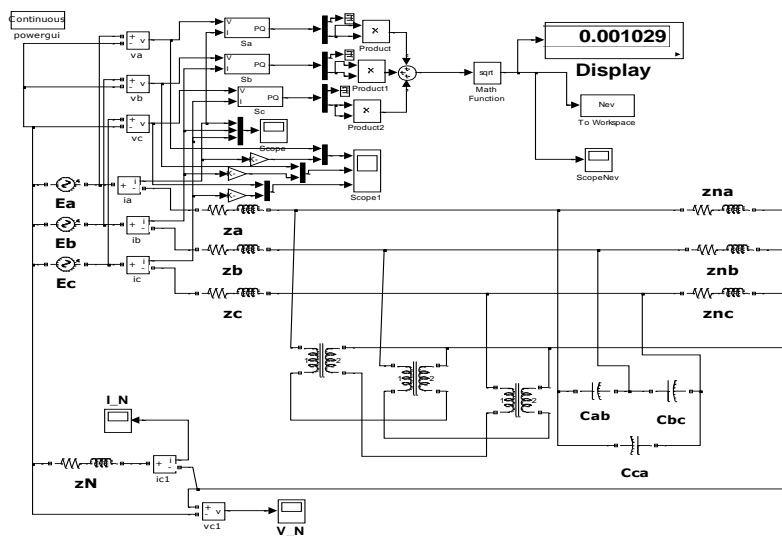


Рисунок 16 – Візуальна модель системи з нейтралером

Первинною обмоткою нейтралер підключається до точок приєднання несиметричного навантаження. Загальний вузол вторинних обмоток утворює штучну нульову точку, до якої підключається загальний вузол несиметричного трифазного навантаження (як при наявності нульового проводу, так і при відсутності його). Підключення нейтралера при відсутності симетруючих конденсаторів зменши-

ло величину струму в нейтральному проводі до амплітуди 0,4 А (замість 13,105 А при відсутності нейтралера). Однак струми ліній електропередачі в фазах А, В, С при цьому залишаються несиметричними з амплітудами 14,522 А, 22,178 А, 13,96 А, що відповідає значному коефіцієнту несиметрії струмів $5.777/16.31=0.354$. Залишилися значними зсуви струмів джерел щодо їх напруг і коефіцієнти потужності для джерел складають величини по фазам А, В, С відповідно 0.56, 0.225, -0.119, тому застосування лише нейтралера залишає енергетичні показники низькими. Після підключення СКП із симетруючих конденсаторів (рис.16) та виконання ПО, струми через джерела стали практично симетричними, їх амплітуди по фазам А, В, С склали значення відповідно 3,72 А, 4,18 А, 4,03 А. Амплітуда струму через нейтральний провід становить, як і раніше малу величину 0,4 А. Коефіцієнт несиметрії струмів значно зменшується: $0.1351/3.976=0.034$. Коефіцієнти потужності для всіх джерел стають майже одиничними. Ємності потрібних симетруючих конденсаторів: $C_{ab}=228,22$ мкФ; $C_{bc}=268,2$ мкФ; $C_{ca}=43,41$ мкФ, що еквівалентно отриманим результатами при оптимізації режиму чотирипровідної системи шляхом підключення п'ятиелементного СКП (без z_{aN}).

Метод ПО придатний для дослідження компенсація РП в СЕП асинхронних двигунів. Система споживання вважається симетричною, тому достатньо проводити

вимірювання потужності тільки по одній фазі. Компенсація РП здійснюється трикутником компенсуючих конденсаторів. Для усунення топологічних вироджень другого роду СКП в моделі слід приєднувати до ліній електропередачі через невеличкі резистори. Для типового двигуна за рахунок зменшення амплітуд струмів втрати в лінії електропередачі зменшилися майже в чотири рази, коефіцієнти потужності стали одиничними. Розглянуто також варіант оптимізації режиму живлення асинхронного двигуна в умовах несиметрії живильних напруг. При цьому симетруються і зменшуються струми в лініях електропередачі, однак зберігається несиметрія напруг на затискачах асинхронного двигуна.

В шостому розділі розглядається оптимізація процесів в СЕП з нелінійними та силовими напівпровідниковими елементами. Одними з поширених нелінійних навантажень є навантаження з дуговим розрядом, які використовуються в металургійних печах, в зварювальному виробництві і т. п. У такому випадку відбувається індуктивне зрушення фази струму. Для дослідження електромагнітних процесів, що протікають в системах з дуговим розрядом в основу математичної моделі були покладені нелінійні рівняння, що описують вольт-амперну характеристику дугового розряду в нормальній формі звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{k_2 r} \left(\frac{k_3}{r^2} i^2 - k_1 r^2 \right)$$

де r – радіус дуги; i – струм через дугу; k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти, що визначають параметри вольт-амперної характеристики дугового розряду. Така характеристика має всі характерні ознаки реальної вольт-амперної характеристики дугового розряду, такі як наявність гістерезису і напруги загоряння дуги. Розраховано скомпенсований по основній гармоніці оптимальний режим електроживлення елемента з дуговим розрядом за допомогою оптимізаційних алгоритмів шляхом використання в ролі СКП конденсатора, ємність якого визначається в результаті оптимізації. В цьому режимі значно зменшилася амплітуда першої гармоніки мережевого струму (з 1,647А до 0,6987А), що знизило втрати електроенергії в СЕП, а РП основної гармоніки зведена практично до нуля, тобто $\cos \varphi = 1$. Вирішена задача знаходження оптимального режиму системи живлення розрядних ламп високого тиску. Математична модель ламп високого тиску представляється системою двох нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dg_n}{dt} = A_n U_0^2 \frac{\left(\frac{i_n}{\beta U_0}\right)^2 - g_n^2}{1 + k_1 \left(\frac{|i_n|}{\beta g_n U_0} - 1\right)}, \\ \frac{d\beta}{dt} = [k_2 + k_3 \left(\frac{|i_n|}{\beta g_n U_0}\right)^{k_4}] \cdot [1 + k_1 \left(\frac{|i_n|}{\beta g_n U_0} - 1\right) - \beta], \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dg_n}{dt} = A_n U_0^2 \frac{\left(\frac{i_n}{\beta U_0}\right)^2 - g_n^2}{1 + k_1 \left(\frac{|i_n|}{\beta g_n U_0} - 1\right)}, \\ \frac{d\beta}{dt} = [k_2 + k_3 \left(\frac{|i_n|}{\beta g_n U_0}\right)^{k_4}] \cdot [1 + k_1 \left(\frac{|i_n|}{\beta g_n U_0} - 1\right) - \beta], \end{array} \right. \quad (2)$$

де g_n – приведена провідність лампи, що враховує середнє значення концентрації електронів; β – безрозмірний коефіцієнт, що змінюється протягом часу і враховує рухливість електронів; i_n – струм, що протікає через лампу; U_0 – номінальна напруга на лампі; A_n – коефіцієнт, що визначається конструкцією лампи; $k_1 - k_4$ – коефіцієнти, що визначаються для певного типу лампи. На основі диференціальних рівнянь

(1) і (2) для лампи високого тиску складена візуальна модель (рис. 17). Модель лампи представлена у вигляді підсистеми. Вона живиться від джерела змінної напруги через обмежувальний дросель, компенсація РП здійснюється конденсатором, ємність якого визначається в процесі ПО. При введенні СКП помітно знижується амплітудне значення основної гармоніки струму (з 3,52 А до 2,179 А), а фаза основної гармоніки струму співпадає із фазою живильної фазної напруги ($\cos \varphi$ підвищився від 0,6188 до 1,0).

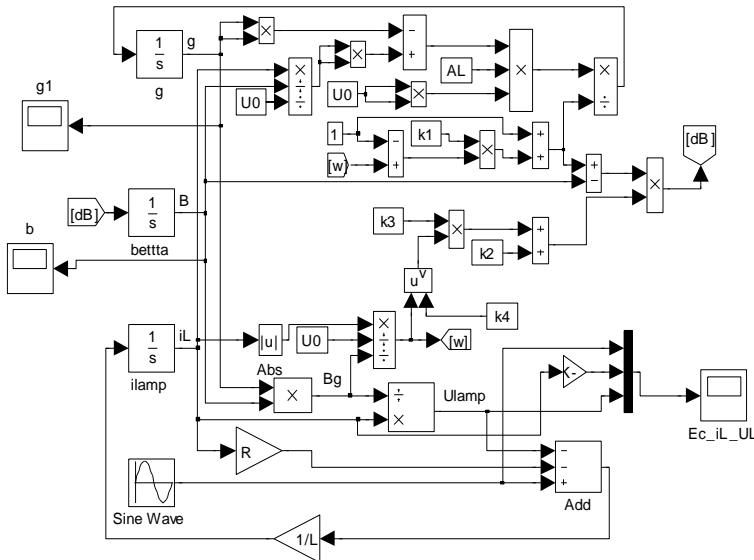


Рисунок 17 – Візуальна модель лампи високого тиску

метрами оптимізації визначені часові зсуви керуючих імпульсів, заведені у вікна властивостей блоків генерації імпульсів у вигляді змінних оптимізації.

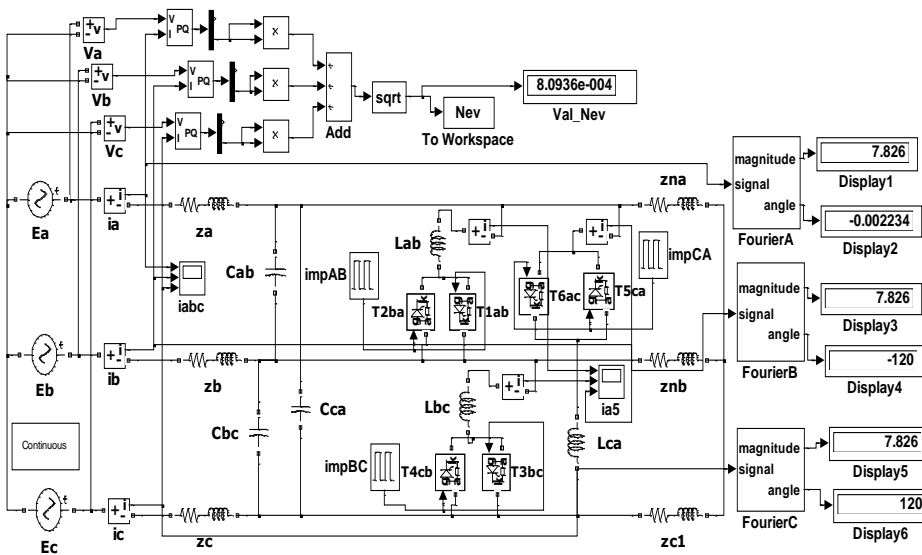


Рисунок 18 – Візуальна модель системи електропостачання з тиристорно-реакторним компенсатором реактивної потужності

0,000622 с, амплітуди перших гармонік всіх фазних струмів вирівнялися і стали рівними 7,826 А, величина РП зсуву в системі стала рівною практично нулю, тобто $\cos \varphi = 1$. Аналогічні дослідження проведені для тиристорного компенсатора з одноступінчастою комутацією, в якому як СКП через три конденсатори підключається трифазний тиристорний міст з лише однією індуктивністю в його вихідній діагоналі.

Здійснення точної компенсації РП з використанням симетричних конденсаторів неможливе, так як ємності конденсаторів є дискретними величинами. Тому використовують реактори із зустрічно-паралельно включеними тиристорами, які управляються від джерел періодичних імпульсів і слугують для точного компенсування надлишкової ємнісної РП конденсаторів (рис. 18).

Компенсація РП залежить від зсувів керуючих імпульсів тиристорів. При виконанні ПО пара-

Цільова функція сформована як кульова метрика РП трьох фаз системи. Після завершення процесу оптимізації значення зсувів керуючих імпульсів для реакторів, включених між лініями АВ, ВС і СА відповідно складають 0,006864 с; 0,003937 с і

Розглянуто питання покращання енергетичних показників за допомогою САФ на основі інверторів на IGBT транзисторах, що керуються за алгоритмами гистерезисної модуляції. Застосування алгоритмів управління САФ на принципах ПО дозволило обійтися без використання складних перетворень миттєвих струмів і напруг системи для отримання коригуючих струмів САФ. В основу запропонованого способу управління САФ покладено ті умови, що у оптимальному режимі струми джерел повинні мати синусоїдальну форму, співпадати з фазами напруг джерел і мати однакові амплітуди. При таких умовах на компаратор гистерезисного елемента достатньо подавати еталонні синусоїдальні сигнали у фазах живильних напруг. Єдиним параметром оптимізації виявляється амплітуда еталонних сигналів, яку запропоновано знаходити ПО за критерієм балансу активних потужностей джерел і споживачів СЕП. Запропонований алгоритм управління САФ реалізований в однофазній СЕП. При цьому виявлено, що при умові кінцевої величини ємності накопичувального конденсатора САФ при надлишковій амплітуді еталонного сигналу напруга на конденсаторі зростає, а при недостатній амплітуді зменшується. В обох випадках напруга на конденсаторі САФ втрачає періодичність. Тому запропоновано за критерій оптимізації при визначенні режиму СЕП з САФ прийняти саме періодичність пульсуючої напруги на накопичувальному конденсаторі САФ. Для трифазної СЕП проведено дослідження застосування ПО для управління САФ паралельного типу за зазначеними алгоритмами. (рис. 19).

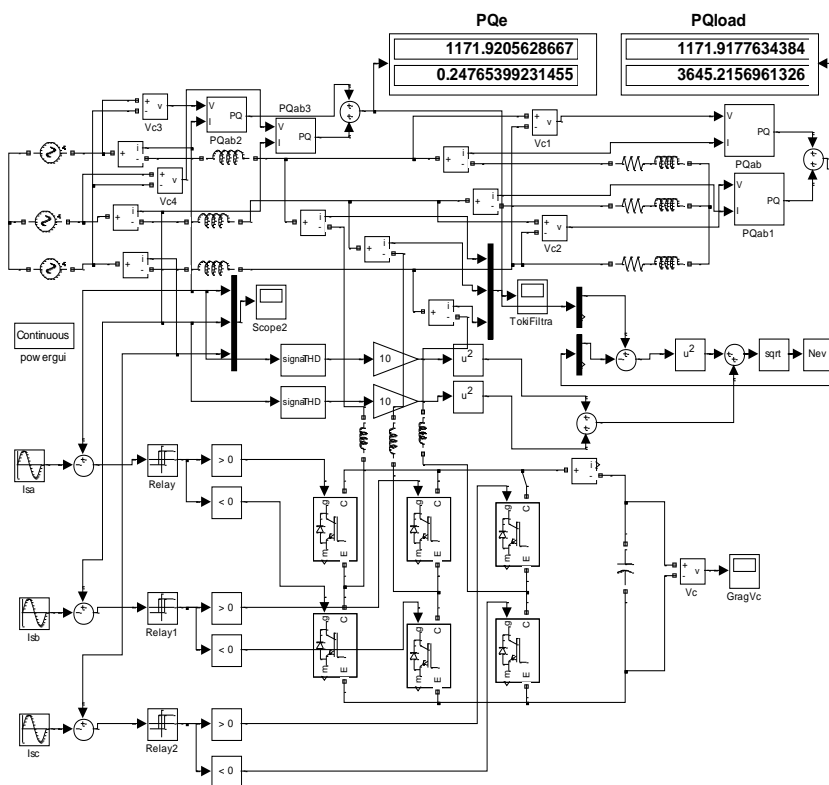


Рисунок 19 - SPS-модель СЕП з паралельним САФ

Різниця між сумою активних потужностей джерел і навантаження утворюють складову для цільової функції по потужності. До складу цільової функції включені також амплітуди вищих гармонік, що знімаються з віртуальних аналізаторів гармонік, що дозволяє виключити режими викривлення струмів при надмірних спадах миттєвих значень напруги накопичувального конденсатора. В результаті виконання ПО активні потужності на джерелах і на навантаженні СЕП зрівнялися (рис. 19), мережеві струми стали симетричні (рис. 20) і їх амплітудні значення суттєво знизилися. Методом ПО здійснена також компенсація РП мережі з використанням САФ за схемою трифазного інвертора при живленні асинхронного двигуна.

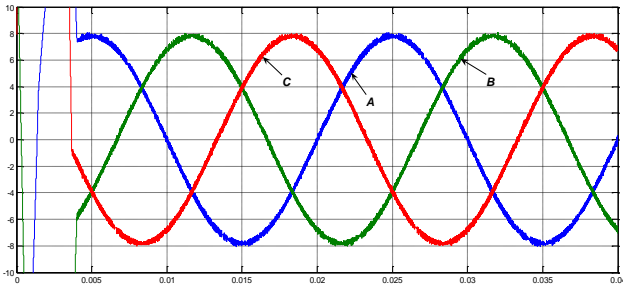


Рисунок 20 – Діаграми струмів системи з САФ після виконання пошукової оптимізації

рел електричної енергії. На реєструючі прилади виводяться сумарні активні потужності для зіставлення споживаної і віддаваної джерелами енергії. Ключовою властивістю є та обставина, що при мінімізації різниці цих потужностей напруга на накопичувальному конденсаторі САФ стабілізується на постійному рівні. У даній системі управління напруга завдання (750 В) порівнюється з постійною складовою напруги на конденсаторі, яка визначається в процесі роботи моделі за допомогою віртуального приладу розкладання в ряд Фур'є напруги на конденсаторі.

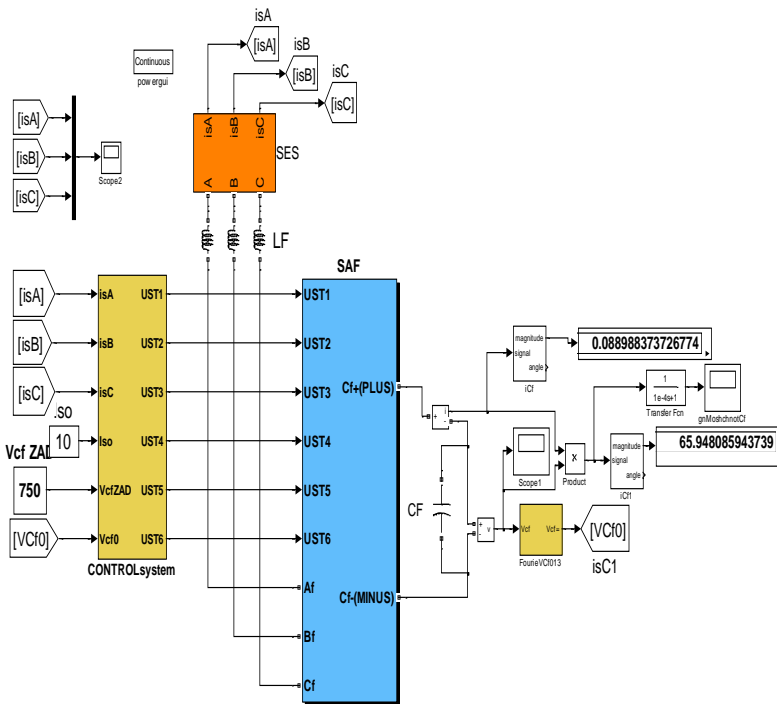


Рисунок 21 - Модель СЕП асинхронного двигуна з САФ вається електромагнітний момент, що долає момент в'язкого тертя (близько 1,5 Нм). При набірннн моменту в запрограмований момент часу 0,7 с перехідний процес призводить до збільшення електромагнітного моменту двигуна до 21,5 Нм. При цьому швидкість обертання знижується, а фазні струми збільшуються. Двигун працює з недовантажем і споживає істотну РП, порівнянну з активною потужністю. Амплітуди струмів в статорних обмотках двигуна трохи перевищують 10 А. У той же час завдяки компенсуючій дії САФ, амплітуди фазних струмів в джерелах і лініях електропередачі складають 7,23 А.

Візуальна модель такої системи (рис. 21) складається з трьох підсистем: блок SES являє собою СЕП з асинхронним двигуном, блок SAF – силову частину САФ, блок CONTROL system – систему управління САФ. Вимірювання потужності асинхронного двигуна здійснюється за схемою двох пар приладів (лінійні вольтметри і фазні амперметри), а аналогічні вимірювання забезпечені на стороні дже-

рел електричної енергії. На реєструючі прилади виводяться сумарні активні потужності для зіставлення споживаної і віддаваної джерелами енергії. Ключовою властивістю є та обставина, що при мінімізації різниці цих потужностей напруга на накопичувальному конденсаторі САФ стабілізується на постійному рівні. У даній системі управління напруга завдання (750 В) порівнюється з постійною складовою напруги на конденсаторі, яка визначається в процесі роботи моделі за допомогою віртуального приладу розкладання в ряд Фур'є напруги на конденсаторі.

Різниця подається на пропорційно- інтегральний регулятор, одержуваний сигнал управління додається до амплітуд всіх еталонних струмів САФ. Результати моделювання, представлені на рис. 22, підтверджують працездатність моделі. До моменту часу 0,2 с протікає характерний процес прямого пуску асинхронного двигуна на неробочому ходу. При встановленні неробочого ходу роз-

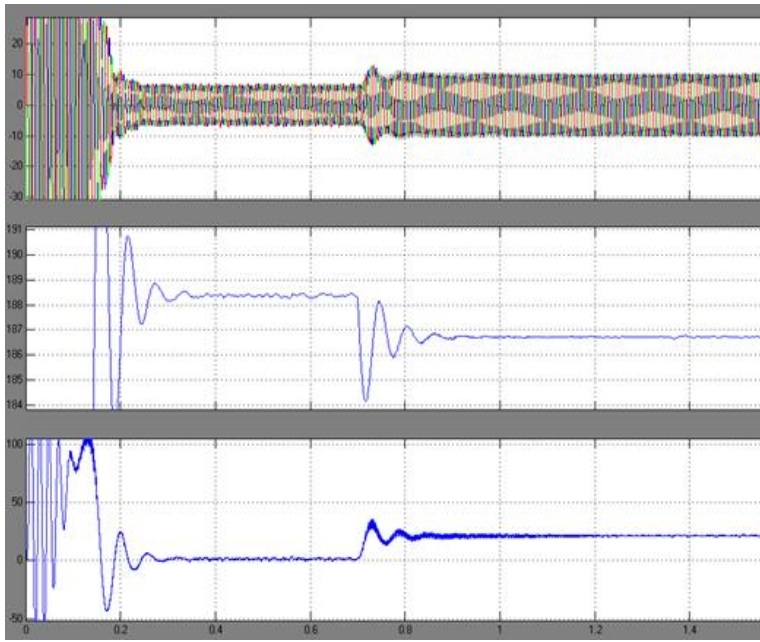


Рисунок 22 – Часові діаграми струмів статора, швидкості обертання та електромагнітного моменту асинхронного двигуна

Постійна складова напруги на накопичувальному конденсаторі в сталому режимі при будь-якому механічному навантаженні близька до напруги задання 750 В, що свідчить про правильну роботу оптимізуючого вузла системи управління САФ.

У цьому розділі виконується оптимізація режимів в електричних системах з декількома навантаженнями з урахуванням вкладу кожного з них (рис.23). Для випадку двох навантажень сформована цільова функція, яка забезпечує справедливий розподіл компенсуючих РП між обома СКП

$$N_{ss} = \sqrt{I_{mNeg1}^2 + \varphi_{Pos1}^2 + I_{mNeg2}^2 + \varphi_{Pos2}^2},$$

де I_{mNeg1} та I_{mNeg2} – амплітудні значення зворотних симетричних складових для струмів в фідерах першого і другого навантажень відповідно; φ_{Pos1} і φ_{Pos2} – фазові кути прямих симетричних складових для струмів в фідерах першого і другого навантажень.

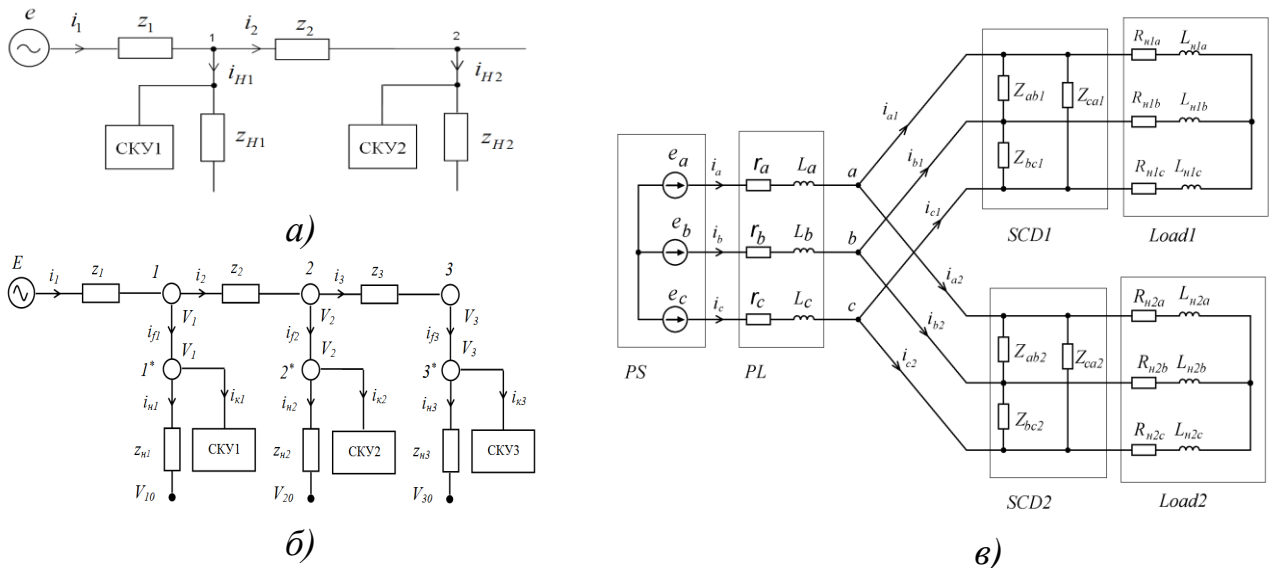


Рисунок 23 - Принципові схеми :а)–системи з двома розділеними навантаженнями; б) – системи з трьома розділеними навантаженнями; в) системи з двома паралельними навантаженнями.

Оптимізація режимів здійснена із в використанням моделі і ПО в програмі MATLAB (рис. 24). Виділення прямої і зворотної послідовностей струмів здійснюється за допомогою віртуальних аналізаторів симетричних складових 3-Phase Sequence analyzer, із значень яких і формується цільова функція. Для встановлення

типів СКП в процесі ПО була використана вже зазначена вище спроможність ПО витискати невідповідні реактивні елементи з подальшою заміною їх на дуальні.

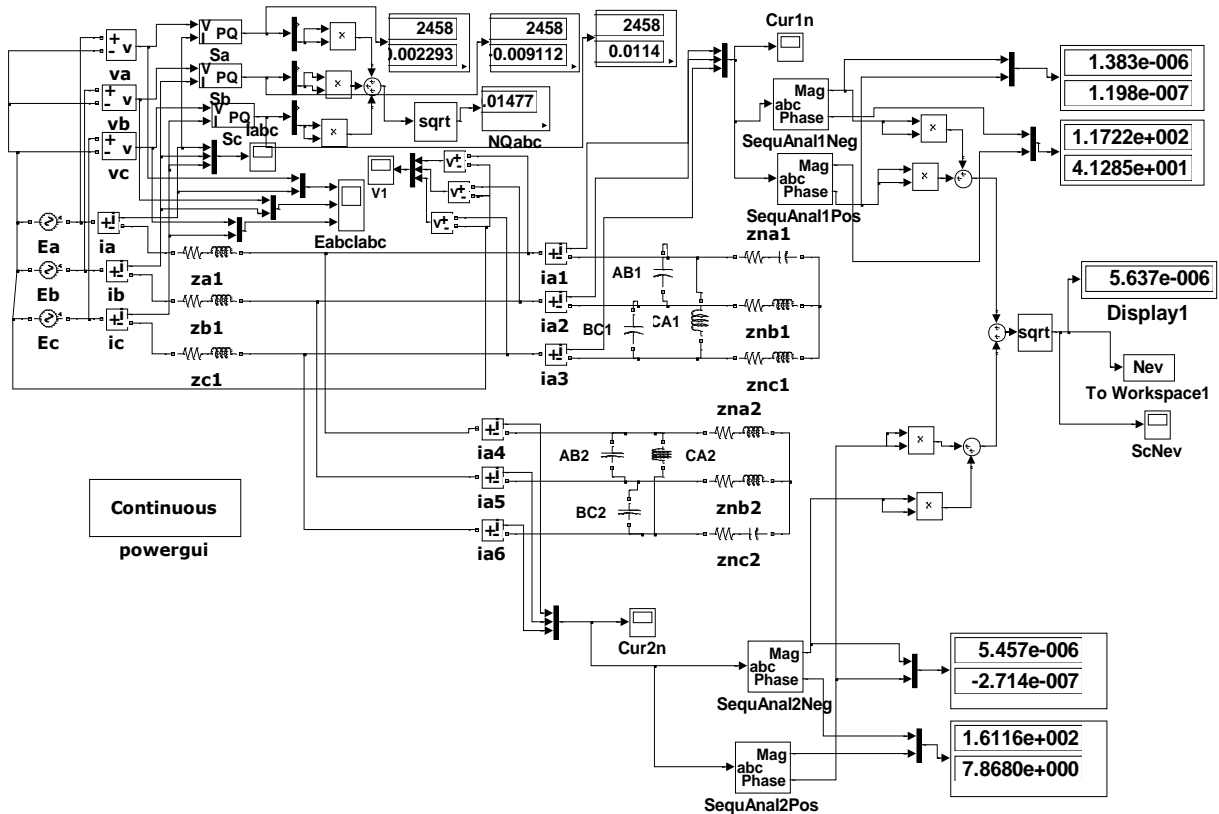


Рисунок 24. – Візуальна модель системи електропостачання із двома паралельно ввімкненими споживачами після завершення процесу оптимізації.

Для виконання оптимізації використовується вбудована функція $fminunc()$. Після завершення процесу оптимізації амплітуди напруг в точках підключення споживачів вирівнялися і істотно зросли в порівнянні з несиметричним режимом. Осідання напруг на затискачах приєднання навантажень значно зменшилися і не перевищують допустимих величин, регламентованих стандартами. Підвищення напруги в вузлах підключення споживачів внаслідок компенсації РП в системі сприятливо позначається на роботі споживачів. Рівні РП в системі стали практично нульові, а всі три джерела електричної енергії навантажені рівномірно. Кожний СКП при цьому бере на себе повну компенсацію РП, обумовлену змішаним індуктивно-ємнісним навантаженням, а також ті частини РП, які припадають на реактивності лінії електропередачі. Задача синтезу СКПв системі з трьома каскадно включеними навантаженнями, також була розв'язана за допомогою програми MathCAD із використанням запропонованого методу декомпозиції. З його допомогою задача аналізу досить громіздкої системи, що містить велику кількість реактивних елементів, значно спростилася.

Виконана також оптимізація режиму трифазної чотирипровідної системи з несиметричним і нелінійним навантаженнями за допомогою САФ, що керується за оптимізаційним алгоритмом (рис. 25). Нелінійне навантаження представляє собою однофазний мостовий випрямляч, підключений між фазою і нульовим проводом. Трифазне несиметричне навантаження представляє собою активно-індуктивні елементи із різними параметрами, з'єднані за схемою зірки.

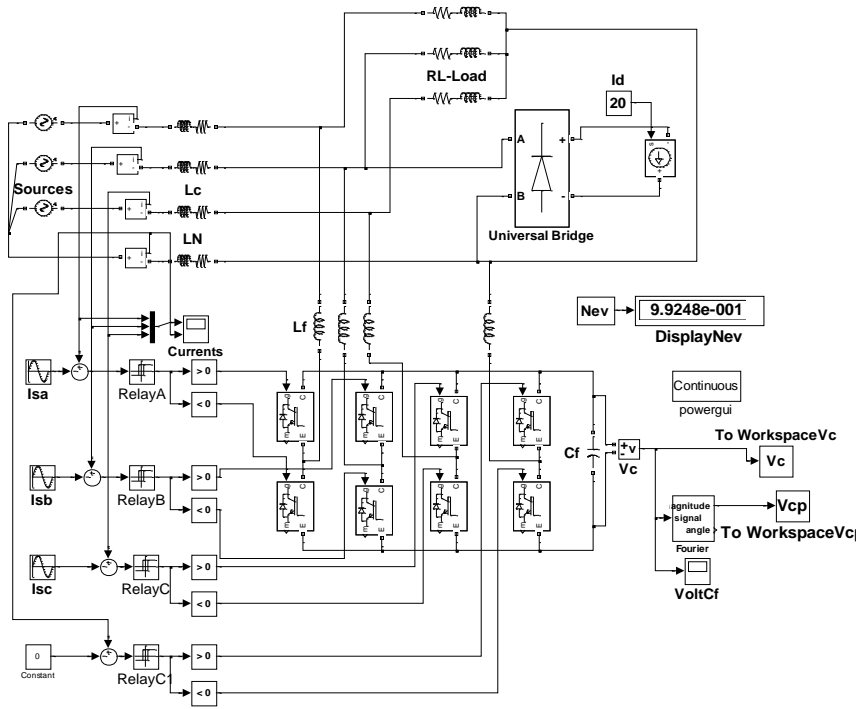


Рисунок 25 – Візуальна модель системи з несиметричним і нелінійним навантаженнями

Силовий блок САФ представлений у вигляді інвертора з чотирма плечима IGBT транзисторів, кожен з яких шунтований зворотним діодом. Через зворотні діоди заряджається накопичувальний конденсатор C_f , який фактично живить САФ. Система управління САФ реалізує принцип релейної модуляції наступним чином. Еталонний сигнал для управління транзисторним плечем, що формує струм в нульовому проводі, прийнятий нульовим. Нескомпенсований режим при відключеному САФ характеризується несинусоїдальністю і несиметрією струмів і напруг в системі, а також значним перевантаженням нейтрального проводу по струму I_0 (рис. 26).

зуються несинусоїдальністю і несиметрією струмів і напруг в системі, а також значним перевантаженням нейтрального проводу по струму I_0 (рис. 26).

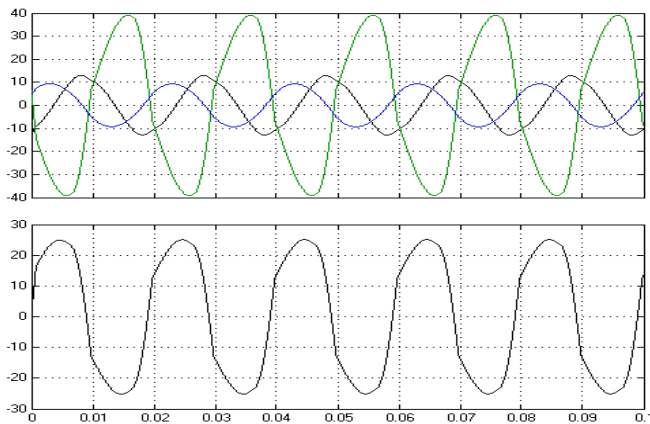


Рисунок 26 Струми в несиметричному режимі (верх - в фазах, низ - в нульовому проводі)

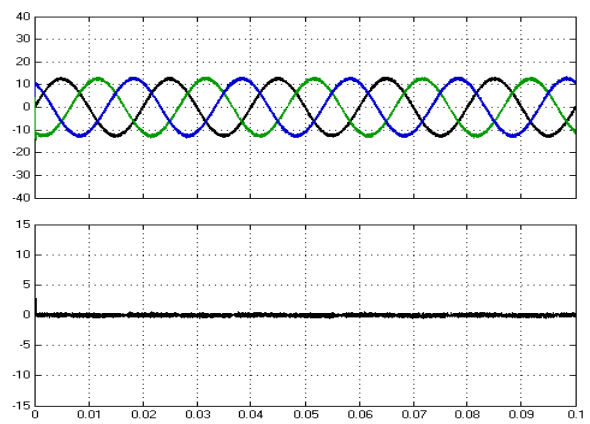


Рисунок 27 - Струми при скомпенованому режимі

Оптимізація режиму здійснюється при підключеному САФ програмними засобами MATLAB з використанням представленої візуальної моделі і заснована на вимозі завдання такого єдиного значення амплітуд еталонних сигналів для фаз, при якому в системі має місце квазіусталений режим. Він характеризується встановленням періодичних струмів і напруг на всіх елементах системи. Зокрема, напруга на накопичувальному конденсаторі має представляти суму постійної і змінної складових. При цьому постійна складова напруги на конденсаторі повинна перевершувати амплітуду лінійної напруги мережі. В якості змінних оптимізації використовуються амплітуда еталонного сигналу системи управління і початкова напруга на накопичувальному конденсаторі. Цільова функція сформована з дискретних значень напруги на накопичувальному конденсаторі і параметра стабілізації напруги на накопичува-

льному конденсаторі. Для формування цільової функції складаються різниці суміжних дискретних значень, з яких формується кульова метрика. В результаті виконання ПО амплітуди лінійних струмів зрівнялися, а їх фази стали збіжними з фазами живильних напруг (рис. 27). Струм в нейтральному проводі практично зник, що свідчить про повне симетрування і врівноваження режиму в СЕП.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему визначення оптимальних режимів і синтезу СКП для СЕП електротехнічних об'єктів, які викликають несиметрію та нелінійні спотворення струмів і напруг в електротехнічній системі. Розроблено та досліджено використання оптимізаційних методів для покращання енергетичних показників трифазних СЕП шляхом компенсації РП, симетрування струмів у мережі, покращання гармонійного складу мережевих струмів. Розроблені оптимізаційні алгоритми надають можливість виконувати з високою точністю аналіз та синтез СКП, а також керувати САФ таким чином, щоб забезпечити належну електромагнітну сумісність, підвищити якість електричної енергії та енергетичні показники електропостачання в живильних мережах.

1. На основі критичного аналізу відомих методів обґрунтована необхідність розробки нових методів і алгоритмів аналізу оптимальних режимів та синтезу СКП із застосуванням комп'ютерних моделей для підвищення енергетичних показників СЕП. Обґрунтована можливість і необхідність застосування ПО для оптимізації режиму електротехнічних систем, визначені змінні параметри оптимізації, визначено критерії оптимізації, і сформульовано математичний опис цільових функцій, що дозволяють досягнути оптимальних режимів в електротехнічних системах. Зокрема, такі критерії можуть формуватися у вигляді цільових функцій як кульові метрики, що складаються з РП джерел, а також забезпечують рівність амплітуд мережевих струмів, усунення зворотної і нульової симетричних складових струмів або напруг, приведення до нуля фазового кута прямої симетричної складової. Визначені та досліджені методи і програмні засоби для виконання оптимізації режимів роботи СЕП із використанням оптимізаційних методів в відомих пакетах прикладних програм комп'ютерної математики.

2. Сформована математична модель узагальненої трифазної трипроводної СЕП з несиметричним навантаженням. Засобами математичного пакета MathCAD виконано дослідження несиметричного режиму роботи СЕП, проведено пошукову оптимізацію з одночасним синтезом СКП. Проведено порівняльний розрахунок параметрів симетрувальних елементів за відомою аналітичною методикою і показано, що розраховані оптимізаційним методом значення параметрів СКП забезпечують більш точні результати, здійснюючи цілковито повну компенсацію РП в електричній системі. На основі використання запропонованих критеріїв оптимізації вперше проведено визначення оптимальних режимів і СКП для трифазної трипроводної системи з несиметричними навантаженнями із застосуванням візуальних комп'ютерних моделей. Запропоновано метод обертання вектору прямої симетричної складової струмів джерел, що дозволяє визначити будь-який симетричний режим в системі. Цей метод дозволив також вперше виявити неоднозначність режиму повної компенсації РП в трипроводній СЕП.

3. Із використанням візуальних моделей проведений аналіз несиметричного режиму узагальненої трифазної чотирипровідної СЕП з цільовою функцією, що представляє собою кульову метрику, яка складається з амплітуд струмів зворотної та нульової симетричних послідовностей, а також фази прямої послідовності. При цьому застосовується вперше розроблений автоматизований метод рішення задачі синтезу СКП для трифазної чотирипровідної СЕП, заснований на виявленій властивості процесу ПО витискати неналежний реактивний елемент, що дозволяє зрештою правильно встановити типи всіх реактивних елементів СКП.

4. Вперше розроблений універсальний метод автоматичного визначення типів елементів СКП в процесі оптимізації на основі запропонованого метода звільнення параметрів оптимізації, що базується на понятті узагальненого реактивного елемента. Використання таких елементів в структурі СКП дозволяє звести задачу оптимізації до знаходження лише одного локального мінімуму із безлічі всіх локальних мінімумів, що полегшує і прискорює знаходження оптимального рішення. Запропонований метод переходу від узагальненого реактивного елемента до одного елемента, тип якого визначається по превалюючій реактивності кожного узагальненого реактивного елемента. Обґрунтована можливість переходу від знайденого рішення для випадку шестиелементного СКП, до п'ятиелементного, де надлишковий реактивний елемент виключається після зіставлення величин параметрів СКП. Вперше розроблений алгоритм попереднього знаходження точного симетричного режиму без підключення СКП, що базується на декомпозиції СЕП, завдяки чому полегшується визначення початкових значень параметрів оптимізації і покращується збіжність процесу оптимізації при синтезі СКП.

5. Проведено дослідження несиметричних систем з магнітно-зв'язаними індуктивностями у складі як навантаження, так і СКП. Зокрема, проаналізовано системи, в яких компенсуючі конденсатори підключаються через трансформатор на його низькому боці. Представлено розрахунок СКП для тягової системи залізничного електропостачання змінного струму, що дозволило повністю скомпенсувати РП в системі і виключити несиметричні режими роботи тягового трансформатора. На основі проведеного аналізу побудовано графіки, що дозволяють визначати параметри СКП для змінного навантаження і одночасного навантаження на двох фідерах, що живляться від одного тягового трансформатора. Проаналізована схема симетрування СЕП, що знайшла використання для живлення однофазного навантаження сільськогосподарського призначення, яка використовує в якості одного з елементів вільну вторинну обмотку трифазного трансформатора, що дозволило виявити обмеженість діапазону навантажень для симетрування такої системи. Досліджена також чотирипровідна система з нейтралером, для якої за допомогою ПО визначені параметри СКП, що зрівноважує і симетрує таку систему.

6. Розроблені SPS-моделі дугового розряду за системами нелінійних диференціальних рівнянь, які реалізовані за допомогою залежного джерела напруги, вони адекватно віддзеркалюють вольт-амперні характеристики дугового розряду і адаптовані для використання спільно з елементами бібліотеки SPS, що дало змогу застосувати ПО для оптимізації процесів в системах електроживлення дуги. За допомогою цих моделей досліджені можливості підвищення енергетичних показників СЕП дугових розрядів, в тому числі, освітлювальних приладів високого тиску. Показано, що оп-

тимізація тільки коефіцієнта зсуву, розрахована за допомогою запропонованих методів, призводить до зниження споживаного по основній гармоніці струму в 1,5-2 рази, що істотно знижує втрати в лініях електропередачі.

7. Проведене дослідження електромагнітних процесів в системі електроживлення асинхронного двигуна на SPS-моделі із залученням пошукової оптимізації показало працездатність запропонованого підходу. Продемонстрована ефективність компенсації РП на рівні споживача електроенергії при живленні асинхронного двигуна безпосередньо від мережі. Показано можливості оптимізації режиму в СЕП асинхронних двигунів, в тому числі при несиметрії живильної мережі. Компенсація РП дозволяє в 1,5-1,8 рази зменшити споживані струми і підвищити коефіцієнт корисної дії системи.

8. Обґрунтоване застосування ПО для управління тиристорними компенсаторами РП, а також САФ з широтно-імпульсною модуляцією. Показано, що метод ПО з високою точністю визначає положення керуючих імпульсів, необхідні для підвищення енергетичних показників СЕП. Для тиристорного компенсатора з одноступінчастої комутацією доведено перевагу симетричного управління, яке істотно поліпшує спектр гармонік живлячих струмів. При цьому виключаються неканонічні гармоніки, а канонічні гармоніки, що залишилися, можуть бути придушені резонансними фільтрами.

9. Показано, що метод ПО може бути використаний для знаходження оптимального режиму з максимальним коефіцієнтом потужності в системах з САФ без використання традиційних складних систем управління, в яких здійснюються досить громіздкі математичні перетворення струмів напруг за формулами Кларк. Розроблені критерії та визначені параметри оптимізації при оптимізації роботи системи електропостачання із підключенням САФ. Такими критеріями можуть бути врівноваження активних потужностей джерел і навантаження або стабілізація напруги на накопичувальному конденсаторі САФ. Визначено, що в якості параметрів оптимізації слід використовувати амплітуду еталонних синусоїдальних сигналів, синхронізованих з фазними напругами живильної системи, та початкову напругу на накопичувальному конденсаторі, а критерій оптимізації визначається балансом активних потужностей в системі. Показано, що цей баланс характеризується стабілізацією періодичної напруги на накопичувальному конденсаторі кінцевої ємності, що живить САФ. Такий підхід дозволив розробити оригінальні алгоритми ПО на основі використання дискретних значень напруги конденсатора. Запропонований метод управління САФ показав свою працездатність у оптимізації режиму роботи СЕП із несиметричним навантаженням і асинхронним двигуном.

10. Метод ПО адаптований для визначення оптимальних режимів та параметрів СКП для випадків підключення декількох споживачів з урахуванням вкладу кожного з них у внесення несиметрії та генерацію РП. Застосування ПО разом з запропонованим методом декомпозиції системи дозволяє прискорити знаходження оптимального режиму і синтез СКП з урахуванням вкладу кожного з навантажень для варіантів як паралельного, так і каскадного підключення декількох лінійних несиметричних навантажень. Розглянуто також цю задачу при наявності несиметричних і нелінійних навантажень, розв'язання здійснено із застосуванням САФ завдяки використанню ПО на основі запропонованого критерію мінімізації РП в фідерах, що

підводять енергію від точки приєднання навантаження до мережі до загальної точки з'єднання навантаження і СКП

11. Результати дослідження використано в Міжнародному консорціумі «Енергозберігання» (м. Харків); в Регіональній філії «Південна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця» (м. Харків); в Державному підприємстві «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект» (м. Харків); в АК «Харківобленерго» (м. Харків); у навчальному процесі Харківського національного університету міського господарства імені О.М.Бекетова та Національно технічного університету «ХПІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати дисертації опубліковані в таких наукових працях:

у виданнях, що індексуються SCOPUS та Web of Science:

1. Ягуп Е. В. Синтез электрической системы во временной области методом поисковой оптимизации / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 2. – С. 24–29. *Здобувачем запропоновано критерій оптимізації, здійснені комп'ютерні розрахунки і виявлені власність витискання неналежного елемента і можливість перерахунків параметрів за критеріями подібності.*

2. Ягуп Е. В. Определение режима компенсации реактивной мощности в четырехпроводной трехфазной системе электроснабжения с помощью поисковой оптимизации / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 1. – С. 60–66. *Здобувачем запропоновано застосування узагальненого реактивного елемента і здійснено налаштування програми та пошук оптимального режиму.*

3. Ягуп Е.В. Моделирование системы электроснабжения с активным фильтром, управляемым по оптимизационному алгоритму / Е. В. Ягуп // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – 2016. – 1/8(79). – С. 52 –58.

4. Ягуп Е.В. Расчёт параметров симметрично-компенсирующего устройства трёхфазной системы электроснабжения на основе декомпозиции системы / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 6. – С. 20 – 26. *Здобувачем запропоновано спосіб декомпозиції системи електропостачання, який суттєво спрощує рівняння моделі і досягає результатів з високою точністю.*

5. Yagup K. V. Symmetrization of Three-Phase System with Negative Component Filter Using Simulation / V. G. Yagup, K. V. Yagup // Науковий Вісник Національного гірничого університету. – Дніпро. - 2017. - №3(159). – С. 89 – 94. *Здобувачем створено візуальну модель для оптимізації та запропоновано використання керованих джерел для виключення впливу фільтра зворотної симетричної складової на саму систему електропостачання, запропоновано метод перерахування параметрів СКП до двохконденсаторного варіанту.*

6. Ягуп Е. В. Расчёт параметров симметрично-компенсирующих устройств для двух потребителей с учетом вклада каждого из них. / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 4. – С. 22 – 28. *Здобувачем застосовано метод декомпозиції, який дозволяє врахувати вплив кожного навантаження в несиметрію і генерацію РП в системі і з урахуванням цього побудувати індивідуальний СКП для кожного навантаження.*

7. Ягуп Е. В. Силовой активный фильтр при работе на несимметричную и нелинейную нагрузки с управлением по оптимизационному алгоритму / Е. В. Ягуп // *Електротехніка і електромеханіка* – 2017. - №5. – С. 23-26.

у монографіях:

8. Ягуп Е. В. Компьютерное моделирование переходных и установившихся процессов в преобразователях электрической энергии / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // *Монографія*. – Харьков: ХНАГХ, 2013. – 131 с. *Здобувачем здійснено оптимізацію режимів всіх пристроїв з силовими напівпровідниковими приладами.*

9. Ягуп Е. В. Применение оптимизационных методов для решения задач улучшения показателей электрических систем / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп *Монографія*. – Харьков: ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2017. – 170 с. *Здобувачем особисто написані розділи, присвячені формуванню математичних моделей, організації їх взаємодії з програмами, налаштуванням моделюючих комплексів та безпосереднім здійсненням комп'ютерних розрахунків.*

у фахових виданнях:

10. Ягуп Е. В. Компенсация реактивной мощности трехфазного управляемого выпрямителя / В. Г. Ягуп, М. А. Литвин, Д. А. Кузьменко, Е. Я. Ивакина, Е. В. Ягуп // *Світлотехніка та електроенергетика: міжнародний науково-технічний журнал*. – Харків: ХНАМГ, 2009. – №2 (18). – С. 44 – 49. *Здобувачем запропоновано обчислення параметрів СКП випрямляча на основі балансу активних потужностей.*

11. Ягуп Е. В. Режимы работы низкочастотного корректора коэффициента мощности / Д. А. Луценко, Е. Я. Ивакина, В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // *Світлотехніка та електроенергетика: міжнародний науково-технічний журнал*. – Харків: ХНАМГ, 2009. – №1(17). – С. 56 – 60. *Здобувачем здійснено моделювання коректора коефіцієнта потужності*

12. Ягуп Е. В. Расчет режима компенсации реактивной мощности в несимметричной системе электроснабжения методом поисковой оптимизации / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // *Наукові праці Донецького національного технічного університету: науково-прикладний журнал*. – Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк, 2011. – Вип. 11 (186). – С. 449 – 454. *Здобувачем складено граф, матриці і рівняння моделі системи електропостачання в несиметричному режимі і в режимі повної компенсації РП, введені обмеження оптимізації, що забезпечують фізичну реалізацію СКП.*

13. Ягуп Е. В. Математична модель дугового розряду / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. – Харків: ХНТУСГ, 2012. – Вип. 129: «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – С. 49 – 50. *Здобувачем складено модель дугового розряду та її реалізація засобами візуального моделювання.*

14. Ягуп Е. В. Моделирование процессов в системе электропитания дугового разряда через ограничительный реактор / Е. В. Ягуп // *Світлотехніка та електроенергетика: міжнародний науково-технічний журнал*. – Харків: ХНАМГ, 2012. – №3 (31). – С. 82 – 85.

15. Ягуп Е. В. Исследование поверхностей отклика при оптимизации режима трехфазной системы электроснабжения / Е. В. Ягуп // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – Харьков, 2012. – №6/8 (60). – С. 56 – 59.

16. Ягуп В. Г., Ягуп Е.В. К аналитическому определению емкостей симметрирующих конденсаторов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк, 2013. – № 2 (15). – С.293-296. *Здобувачем виконано створення моделі засобами комплексної математики та реалізовано її в системі Mathcad, а також вдосконалено синтез СКП без розглядання фази зворотної складової, як це використовується в відомому періоджерелі.*

17. Ягуп Е. В. Разработка компьютерной модели для разрядной лампы высокого давления / В. Ф. Харченко, В. Г. Ягуп, А. А. Якунин, Е. В. Ягуп // Світлотехніка та електроенергетика: міжнародний науково-технічний журнал. – Харків: ХНАМГ, 2013. – №2 (34). – С. 52 – 57. *Здобувачем складено візуальну модель розрядної лампи високого тиску та проведено комп'ютерні розрахунки.*

18. Ягуп Е. В. SPS-модель дугового разряда для бібліотеки компонентів SIMULINK / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2013. – Вип. 141. С.67-69. *Здобувачем доведено модель дугового розряду до сумісності з елементами системи SPS та проведено комп'ютерні розрахунки режиму*

19. Ягуп Е.В. Моделирование процессов компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения асинхронного двигателя / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Вісник нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. - №36(1009), 2013. – С.378-379. *Здобувачем запропонований алгоритм розрахунків та складений критерій оптимізації і його програмна оптимізація з використанням моделі асинхронного двигуна*

20. Ягуп К. В. Оптимізація режиму живлення асинхронного двигуна в умовах несиметрії системи електропостачання / В. Г. Ягуп, К. В. Ягуп // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2014, вип.. 1 (112). – С. 74 – 77. *Здобувачем запропоновано алгоритм оптимізації режиму в умовах несиметрії СЕП асинхронного двигуна*

21. Ягуп Е.В. К определению параметров моделей трансформаторов / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Світлотехніка та електроенергетика. – 2014. – № 2. – С. 52 – 64. *Здобувачем запропонований перерахунок паспортних параметрів трансформатора до параметрів системи SPS та здійснені розрахунки точності представлення моделей елементів із зв'язаними індуктивностями*

22. Ягуп Е.В. Компенсация реактивной мощности в тяговой системе переменного тока / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Електрифікація транспорту. - Дніпропетровськ. – 2014. – №7. – С.60–66. *Здобувачем створений і налагоджений комплекс програм для моделювання тягової системи змінного струму*

23. Ягуп Е. В. Расчёт параметров симметрирующего устройства для тяговой подстанции переменного тока на визуальной модели / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4(8). – С. 23 – 28. *Здобувачем виявлено типи компенсуючих елементів і здійснено розрахунок оптимального режиму для тягової підстанції;*

24. Ягуп Е.В. Об уравновешивании и компенсации реактивной мощности в несимметричных трехфазных электрических системах с применением поисковой оптимизации / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Комунальне господарство міст. Серія: Енергоефективна техніка та технології в житлово-комунальному господарстві. –

Вип. 118(1). – 2014. – С. 179 – 182. *Здобувачем проведено аналіз технічної літератури та підготовлено розділ статті, в якому обґрунтовуються принципи ПО.*

25. Ягуп Е. В. Расчет параметров устройства компенсации реактивной мощности с использованием модели и поисковой оптимизации / Е. В. Ягуп // *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*, 2014, вип. 150. – С. 115 –120.

26. Ягуп Е. В. Расчет параметров симметро-компенсирующего устройства методом эквивалентирования нагрузки / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // *Світлотехніка – 2015. – №1 (41).*–С. 23 – 30. *Здобувачем розроблено алгоритм виділення симетричної і несиметричної частин при еквівалентуванні навантаження.*

27. Ягуп Е. В. Расчет параметров устройства компенсации реактивной мощности сети электроснабжения с трансформатором на визуальной модели. / Е. В. Ягуп // *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*, 2015, вип. 153. – С. 25 –32.

28. Ягуп К. В. Моделирование та оптимізація режиму електричної системи з дуговым розрядом / В. Г. Ягуп, К. В. Ягуп // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Вип. 164. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – С. 127 –130. Здобувачем запропоновано побудову програми, що забезпечує оптимізацію режиму електричної системи з дуговым розрядом, та проведено комп'ютерні розрахунки режиму*

29. Ягуп Е. В. Электропитание асинхронного двигателя в системе с силовым активным фильтром, управляемым по оптимизационному алгоритму / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*, 2015, Вып. 12 (1121). – С. 453 –457. *Здобувачем запропонована та налаштована модель системи управління САФ, що керується за оптимізаційним алгоритмом, здійснені комп'ютерні розрахунки.*

30. Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Модель активного фильтра для трехфазной электрической системы с несимметричной нагрузкой и управлением по оптимизационному алгоритму // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2015. –Вип. 3/2015(31). – С.103-109. Здобувачем запропоновано ввести в критерій оптимізації амплітуди вищих гармонік струмів.*

31. Ягуп Е.В. Моделирование несимметричной системы электроснабжения с использованием оптимизации для определения параметров симметрирующего устройства / Е. В. Ягуп // *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. - 2016. – Вип. 161. – С. 130–138.*

32. Ягуп Е. В. Оптимизация режима работы трехфазной системы электроснабжения с использованием трансформаторного симметрирующего устройства/ Е. В. Ягуп // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка–2016. –№175. –С.88 – 90.*

33. Ягуп К. В. Уточнений розрахунок параметрів компенсаційно-симетрувального пристрою на основі попереднього аналізу компенсованого режиму/ В. Г. Ягуп, К. В. Ягуп // *Вісник Вінницького політехнічного інституту 2016.–№ 3.–С.41–45. Здобувачем запропоновано порядок розрахунків для попереднього аналізу компенсованого режиму та реалізовано розрахунки на моделі.*

34. Ягуп Е. В. Оптимизация режима несимметричной трехфазной системы с использованием активного фильтра и модифицированного алгоритма управления / Е. В. Ягуп // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». – 2016. – № 42 (1214). – С. 124 – 128.

35. Ягуп Е. В. Анализ энергетических показателей тягового выпрямителя с широтно-импульсным регулированием. / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп, Е. Я. Ивакина // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2016. Вип. 143. – С. 169 – 176. *Здобувачем запропонована концепція безперервності енергетичних коефіцієнтів від співвідношення частоти модуляції з частотою мережі, а також здійснені комп'ютерні розрахунки.*

36. Ягуп Е. В. Анализ режима системы электроснабжения с силовым активным фильтром по оптимизационному алгоритму / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – Вип. 4(2) – С. 105–108. *Здобувачем запропоновано критерій оптимізації за досягненням балансу активних потужностей.*

37. Ягуп Е. В. Метод расчета параметров симметрирующего устройства в тяговой системе электроснабжения переменного тока при питании нескольких нагрузок / Е. В. Ягуп // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2017. - № 3. – С. 22 - 28.

38. Ягуп Е. В. Силовой активный фильтр со стабилизацией напряжения на накопительном конденсаторе по дискретам с помощью поисковой оптимизации. / Е. В. Ягуп // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – 2017. - Вып. 27(1249). – С. 226 - 229.

39. Ягуп Е. В. Расчёт параметров симметрирующего устройства в тяговой системе электроснабжения переменного тока при изменяющейся нагрузке / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Електрифікація транспорту. - Дніпропетровськ. – 2017. - №13. – С. 21–27. *Здобувачем здійснені комп'ютерні розрахунки оптимальних режимів при змінних навантаженнях за створеними здобувачем програмами.*

40. Ягуп К. В. Узагальнені методи для оптимізації режимів в трифазних системах з несиметричними та нелінійними навантаженнями / К. В. Ягуп // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка–2017. – № 186. – С. 213 – 125.

41. Ягуп Е. В. Оптимизация режима трехфазной системы электроснабжения с тиристорным компенсатором с одноступенчатой коммутацией / В.Ф. Харченко, Я. В. Щербак, Е. В. Ягуп // Світлотехніка та електроенергетика: міжнародний науково-технічний журнал. – Харків: ХНАМГ. -2017. – №2 (49). – С. 34 – 40. *Здобувачем запропоновані критерії оптимізації, симетричне керування тиристорами компенсатора РП і програма для розрахунку оптимальних режимів.*

Наукові праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:

42. Ягуп Е. В. Моделирование систем электроснабжения как средство для расчета оптимальных режимов трехфазных систем / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Сборник трудов конференции Моделирование-2016 SIMULATION-2016 – Киев: Институт проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины, 2016. – С. 255 – 258. *Здобувачем викладено узагальнюючі відомості з методів моделювання при досягненні оптимальних режимів.*

43. Ягуп Е. В. Активный фильтр для трехфазной системы электроснабжения с несимметричной нагрузкой с управлением по оптимизационному алгоритму / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Проблемы энергоресурсосбережения в электротехнических системах. – Вып. 1/2015(3). – Кременчук, 2015. – С. 192 – 194. *Здобувачем запропоновано введення еталонних сигналів в САФ та запропонований критерій оптимізації при роботі з САФ.*

44. Ягуп Е. В. Расчет симметрирующего устройства трехфазной системы путём оптимизации по критерию выравнивания питающих токов / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Завалишинские чтения 16, – Санкт-Петербург, ГУАП, 2016. – С. 302 –306. *Здобувачем запропонований і реалізований критерій вирівнювання живильних струмів і запропонований метод обертання вектору прямої симетричної складової струмів.*

45. Ягуп Е.В. Using generalized method for solving the problem determining mode of reactive power compensation / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Праці Міжнародної наукової конференції “UNITECH’15” –Габрово, 2015. – Р. 98 –102. *Здобувачем здійснені комп'ютерні розрахунки за розробленими їм програмами та переклад англійською.*

46. Спосіб управління силовим активним фільтром у складі інтелектуальної електричної системи: пат. № 122457 Україна, МПК H02J 3/18, H02J 3/26, H02J 3/32 / Ягуп В. Г., Ягуп Е. В.; Заявник та власник патенту Харк. нац. ун-т. міськ. госп-ва імені О.М.Бекетова. – № u2017707318; завл. 11.07.2017; опубл. 10.01.2018. Бюл. №1/2018. *Здобувачем запропоновано забезпечувати баланс потужностей шляхом стабілізації постійної складової напруги на конденсаторі САФ.*

АНОТАЦІЇ

Ягуп К.В. Покращання енергетичних показників електротехнічних систем із застосуванням пошукової оптимізації на комп'ютерних моделях. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03-електротехнічні комплекси та системи. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2018.

Розглядаються методи оптимізації режимів систем електропостачання з несиметричними і нелінійними навантаженнями з метою підвищення енергетичних показників і розрахунку симетро-компенсуючих пристроїв. Обґрунтовано необхідність і можливість застосування комп'ютерних засобів, розроблено узагальнені алгоритми реалізації пошукової оптимізації. Розроблені методи успішно застосовані для оптимізації режимів в трипровідних і чотирипровідних системах, в тому числі в системах з взаємно-зв'язаними індуктивностями, в системах залізничного електропостачання, в системі з нейтралером, в системах живлення асинхронних двигунів, освітлювальних приладів високого тиску, в системах з силовими активними фільтрами, а також для випадків кількох навантажень з урахуванням вкладу кожного з них в зниження енергетичних показників системи.

Ключові слова: електротехнічна система, несиметрія струмів і напруг, реактивна потужність, симетро-компенсуючий пристрій, силовий активний фільтр, змінні оптимізації, критерій оптимізації, енергетичні показники.

Ягуп Е.В. Улучшение энергетических показателей электротехнических систем с применением поисковой оптимизации на компьютерных моделях. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03-электротехнические комплексы и системы. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2018.

Рассматриваются методы оптимизации режимов систем электроснабжения с несимметричными и нелинейными нагрузками с целью повышения энергетических показателей и расчета симметро-компенсирующих устройств. Обоснована необходимость и возможность применения компьютерных средств, разработаны обобщенные алгоритмы реализации поисковой оптимизации. Разработанные методы успешно применены для оптимизации режимов в трехпроводных и четырехпроводных системах, в том числе в системах с взаимно связанными индуктивностями, в системах железнодорожного электроснабжения, в системе с нейтралером, в системах питания асинхронных двигателей, ламп высокого давления, в системах с силовыми активными фильтрами, а также для случаев нескольких нагрузок с учетом вклада каждой из них в снижение энергетических показателей системы.

Ключевые слова: электротехническая система, несимметрия токов и напряжений, реактивная мощность, симметро-компенсирующее устройство, силовой активный фильтр, переменные оптимизации, критерий оптимизации, энергетические показатели.

Yagup K.V. Improvement of energy indices of electrotechnical systems with the use of search engine optimization on computer models. – Manuscript.

Thesis for a Doctor's degree in Engineering Science by specialty 05.09.03 – Electrical Engineering Complexes and Systems. National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkiv, 2018.

The dissertation is devoted to the development and research of optimization methods of power supply systems modes in electrotechnical systems with asymmetric and nonlinear loads in order to increase the energy indices and calculate the parameters of symmetry-compensating devices using mathematical and computer models, and using search engine optimization implemented with the use of modern software of computer mathematics. The necessity and the possibility of using computer tools for solving set tasks are substantiated. The generalized algorithms for implementing search engine optimization using modern software packages are developed. The possibilities of applying different optimization criteria for solving the problems of increasing the energy indices of power supply systems with asymmetric and nonlinear loads are shown. The properties of the search engine optimization system have been found to extrude the inappropriate element of the synthesized device, as well as the possibility of releasing the optimization variables by increasing their amount, which allows us to get ahead of a faster locating of the local minimum and then recalculate the parameters corresponding to the global minimum are shown.

The developed method of search optimization using the models of power supply systems has been successfully applied for optimization of regimes and synthesis of symmetry-compensating devices in three-phase three-wire and four-wire systems of power

supply. The possibilities of using the optimization tools for Mathcad and Matlab software packages are considered, in particular, using zero-order methods that do not require the calculation of derivatives, such as the deformed polyhedron method and the conjugate gradient method. The algorithm of load equivalence is proposed, with the help of which the symmetrical and asymmetric parts of the load are allocated. After this, the parameters of the balancing device are determined with sufficient accuracy by means of the Steinmetz and Kennely formulas. The method of currents direct symmetric component rotation with the preservation of symmetry and the mode of full reactive power compensation is proposed. For four-wire systems, the use of a generalized reactive element in a symmetry-compensating device is proposed, which accelerates the process of achieving the optimal solution. The method of determining the optimal mode based on the decomposition of the power supply system, which improves the convergence of the solution processes, is developed. Systems of power supply containing inductively coupled elements are considered. The calculation of the symmetry-compensating device of the traction system of the alternating current railway power supply is considered. A four-wire system with a neutralizer was studied, with the help of search engine optimization the parameters of the symmetry-compensating device were determined which allows to balance and counterbalance such a system. The possibilities of optimization of the regime in the power system of asynchronous motors, including the asymmetry of the supply network, are shown. Compensation of reactive power allows here to reduce the consumed currents and increase the efficiency of the system.

To find the optimal modes of systems with an arc discharge, visual models have been developed that are adapted for use with the SimPowerSystem library elements. With the help of these models, the possibilities of increasing the power indices of arc discharge power supply systems, including high-pressure lighting devices, are investigated. It was shown that the optimization of the power factor alone, calculated with the help of the proposed methods, leads to decrease in the current consumed by the fundamental harmonic, which substantially reduces the losses in the transmission lines.

For a thyristor compensator with single-stage switching, the advantage of symmetric control is proven, which greatly improves the spectrum of harmonics of supply currents. The use of the search optimization method to increase the power factor is shown without the use of traditional rather complicated control systems by power active filters. Comparison signals are used as control signals, synchronized with the phase voltages of the supply system. The amplitudes of these signals are accepted as optimization variables, and the optimization criterion is determined by the balance of active power in the system, which is characterized by the stabilization of the periodic voltage on the storage capacitor of the power active filter.

The problems of synthesis of symmetric-compensating devices for several asymmetrical loads in parallel and cascade connection are considered. The task is to determine the parameters of the symmetric-compensating devices for each of the loads separately, and the contribution to the creation of asymmetry and the generation of reactive power of each connected load must be taken into account. This problem is solved by the method of search optimization, and it is shown that, in forming the objective function, currents in the feeders, supplying energy from the point of connection of the load to the network to the common point of connection of the load and the symmetric-compensating device. It is ef-

fective to use the developed decomposition method, which makes it possible to simplify and accelerate the determination of the optimal regime of the system under study, taking into account the contribution of each load to the reduction of the energy parameters of the system as a whole. The case is also analyzed when two loads consisting of both unbalanced linear and nonlinear loads are simultaneously connected to the network. Optimization of the regime with increasing power factor is achieved by using a parallel power active filter with control over the proposed optimization algorithm.

Methods and algorithms of search optimization developed for the purposes of increasing the energy indicators of power supply systems with asymmetric and nonlinear consumers developed and presented in the thesis work are characterized by high accuracy, the maximum possible use of computer technology, low computer time and the possibility of complete automation of design and research procedures in solving theoretical and practical tasks related to increasing energy performance and quality of electrical energy in power supply systems.

Keywords: electrical system, power supply system, currents and voltages asymmetry, reactive power, symmetry-compensating device, power active filter, optimization variable, optimization criterion, power quality, energy indices.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'E. Ruyz', located at the bottom right of the page.

Підписано до друку 20.03.2018 р.

Формат 60x90/16. Папір офсетний. Друк – цифровий.
Умовн. друк. арк. 1,9. Гарнітура Times New Roman.
Наклад 100 прим. Зам. № 1052

Надруковано в ТОВ «Друкарня Мадрид»
61024, м. Харків, вул. Максиміліанівська, 11
Тел.: (057) 756-53-25

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
Серія ДК № 4399 від 27.08.2012 р.

www.madrid.in.ua

e-mail: info@madrid.in.ua