

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

В. Г. Ягуп

К. В. Ягуп

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ СИСТЕМ
ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2019**

УДК 621.3(075.8)

ЯЗ1

Автори:

Ягуп Валерій Григорович, професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Ягуп Катерина Валеріївна, доцент кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рецензенти:

Миколай Леонідович Лисиченко, доктор технічних наук, професор, перший проректор Харківського технічного університету сільського господарства імені Петра Василенко;

Олег Герасимович Гриб, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

*Рекомендовано до друку Вченою радою ХНУМГ ім. О. М. Бекетова,
протокол №14 від 02 липня 2019 р.*

Ягуп В. Г.

ЯЗ1 Моделювання та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання : навч. посібник / В. Г. Ягуп, К. В. Ягуп ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 183 с.

У навчальному посібнику розкриті можливості застосування сучасних методів для оптимізації режимів систем електропостачання. Приділено увагу особливостям розрахунку параметрів симетро-компенсувальних пристроїв, силових активних фільтрів та інших пристроїв при використанні пошукової оптимізації у поєднанні з візуальними моделями.

Призначений для студентів і магістрів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», викладачів, вчених, а також усіх, кого цікавлять проблеми оптимізації режимів роботи систем електропостачання.

УДК 621.3(075.8)

© В. Г. Ягуп, К. В. Ягуп, 2019

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ І ПОВ'ЯЗАНІ З НЕЮ ПРОБЛЕМИ.....	9
1.1 Проблеми якості електричної енергії.....	9
1.2 Показники якості електричної енергії.....	12
1.3 Аналіз режимів та синтез пристроїв для симетрування і компенсації реактивної потужності.....	17
Контрольні запитання до розділу 1	21
РОЗДІЛ 2 СУТНІСТЬ МЕТОДУ ПОШУКОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ І ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ.....	22
2.1 Математична сутність методу пошукової оптимізації.....	22
2.2 Вибір параметрів і критеріїв оптимізації.....	23
2.3 Методи реалізації моделей систем електропостачання.....	26
2.4 Методи і програмні засоби для оптимізації режимів роботи систем електропостачання.....	31
2.5 Особливості процесу пошукової оптимізації щодо електротехнічних систем.....	36
Контрольні запитання до розділу 2.....	38
РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТРИФАЗНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ БЕЗ НУЛЬОВОГО ПРОВОДУ.....	39
3.1 Еквівалентна розрахункова схема і рівняння трифазної трипровідної системи електропостачання.....	39
3.2 Дослідження несиметричного режиму.....	41
3.3 Розрахунок параметрів компенсуючого пристрою у симетричному режимі.....	45
3.4 Аналітичний розрахунок ємностей симетрувальних конденсаторів.....	49
3.5 Розрахунок параметрів пристрою компенсації реактивної потужності з використанням SPS-моделі та пошукової оптимізації.....	53
Контрольні запитання до розділу 3.....	61
РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТРИФАЗНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З НУЛЬОВИМ ПРОВОДОМ.....	63
4.1 Визначення режиму компенсації реактивної потужності за допомогою SPS-моделі і пошукової оптимізації.....	63

4.2 Визначення режиму компенсації реактивної потужності під час звільнення параметрів оптимізації.....	70
Контрольні запитання до розділу 4.....	76
РОЗДІЛ 5 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ З ІНДУКТИВНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ.....	78
5.1 Підвищення енергетичних показників мережі електропостачання з трансформатором на візуальній моделі.....	78
5.2 Компенсація реактивної потужності в тяговій системі змінного струму.....	85
5.3 Розрахунок параметрів симетрувального пристрою в тяговій системі електропостачання змінного струму за навантаження, що змінюється.....	94
5.4 Урівноваження і балансування системи електропостачання з нейтраллером.....	103
5.5 Моделювання процесів компенсації реактивної потужності в системі електропостачання асинхронного двигуна.....	110
Контрольні запитання до розділу 5.....	113
РОЗДІЛ 6 СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НЕЛІНІЙНИМИ ТА СИЛОВИМИ НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ.....	115
6.1 Розроблення комп'ютерної моделі для розрядних ламп високого тиску і оптимізація режиму живлення лампи.....	115
6.2 Оптимізація процесів у тиристорному компенсаторі реактивної потужності.....	124
6.3 Моделювання системи електропостачання з активним фільтром, керованим за оптимізаційним алгоритмом.....	127
6.4 Активний фільтр для трифазної електричної системи з несиметричним навантаженням і управлінням за оптимізаційним алгоритмом за критерієм балансу активних потужностей.....	135
6.5 Силовий активний фільтр зі стабілізацією напруги на накопичувальному конденсаторі за дискетами за допомогою пошукової оптимізації.....	141
6.6 Оптимізація режиму системи з несиметричним і нелінійним навантаженнями за допомогою силового активного фільтра, що керується за оптимізаційним алгоритмом	147
Контрольні запитання до розділу 6.....	153
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	155
ДОДАТОК А Визначення параметрів моделей індуктивно-зв'язаних систем та трансформаторів.....	175

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АІ – автономний інвертор;
БК – батарея конденсаторів;
КП – коефіцієнт потужності;
КРП – компенсація реактивної потужності;
ЛЕП – лінія електропередачі;
МК - мікроконтролер;
РП – реактивна потужність;
САУ – система автоматичного управління;
САФ – силовий активний фільтр;
СЕП – система електропостачання;
СК – система керування;
СКП – симетрично-компенсуючий пристрій;
ТКРП – тиристорний компенсатор реактивної потужності;
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;
ШІП – широтно-імпульсний перетворювач;
ЯЕЕ – якість електричної енергії.

ВСТУП

Навчальний посібник призначений для підготовки магістрів за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. При написанні навчального посібника враховувалася та обставина, що магістерська робота повинна включати в собі елементи науково-дослідної роботи. Проведення таких робіт студентами повинно бути обов'язково пов'язано з використанням сучасних засобів обчислювальної техніки, яка забезпечує моделювання режимів електротехнічних систем і комплексів, а також пошук оптимальних рішень відносно режимів і параметрів електричних систем. Магістри повинні засвоїти методи комп'ютерного моделювання і оптимізації в системах електропостачання та електроспоживання, при енергопостачанні світлотехнічних приладів, а також при живленні систем електричного транспорту. Саме ці означені системи і розглядаються в навчальному посібнику.

Як відомо, електрична енергія становить найуніверсальніший і доцільний вид енергії, зручний для генерації, перетворення, передачі на відстань і живлення споживачів будь-якої фізичної природи. Ера електрифікації всіх сфер діяльності людства, що розпочалася наприкінці ХІХ століття, характеризується прискоренням розвитку продуктивних сил людства, підвищенням рівня добробуту людей, розквітом наук і мистецтв. Винахід і впровадження напівпровідникових приладів у середині минулого століття відкрили широкі можливості для створення нових силових перетворювальних установок, а також інтелектуальних систем управління на основі мікроконтролерів. Усе це створило нові перспективи для розвитку електричних комплексів і систем, особливо якщо врахувати, що за останні два десятиліття досягнуті значні успіхи в розробленні засобів обчислювальної техніки і програмного забезпечення. Зрештою технічний прогрес у галузях електротехніки, електроніки та програмних і апаратних засобів обчислювальної техніки сприяв появі концепції розвитку і впровадження сучасних інтелектуальних електричних систем, які дозволяють суттєво підвищити енергетичні параметри систем електропостачання.

Через розширення номенклатури споживачів електричної енергії все більш актуальною стає проблема електромагнітної сумісності та якості електроенергії в електричних системах. Особливості споживання електричної енергії обумовлюються як параметрами і характеристиками самих споживачів, так і взаємним розташуванням і обопільним впливом частин системи електропостачання. Цей вплив особливо інтенсивно проявляється в електричних системах, де джерела живлення мають кінцеву потужність, що

обмежується як власним внутрішнім опором генератора електричної енергії, так і опорами ліній передачі електроенергії. Строго кажучи, будь-яка електрична мережа має обмежену потужність, тому ефекти впливу споживачів один на одного наявні в будь-якій реальній енергетичній системі.

Істотними факторами під час розгляду проблем якості електроенергії та електромагнітної сумісності в електричних системах є несиметрія і несинусоїдальність струмів і напруг у 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 (СЕР) електротехнічних комплексів. Покращання енергетичних показників СЕР становить важливе науково-технічне завдання, вирішення якого гарантує підвищення економічних показників, зменшення втрат електроенергії, економію паливно-енергетичних ресурсів на електростанціях. Значні несиметрія і несинусоїдальність вносяться в електричні мережі сільськогосподарськими споживачами, електротранспортом, комунально-побутовими навантаженнями, зварювальним устаткуванням, електродуговими печами тощо.

Зазначені обставини вимагають проведення широкого спектру досліджень, пов'язаних з аналізом оптимальних режимів та синтезом симетрокомпенсувальних пристроїв (СКП) для реалізації таких режимів. Труднощі вирішення цих завдань обумовлено тим, що задачі розрахунків 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 різні обмеження та не відрізняються високою точністю. Апаратні та програмні засоби обчислювальної техніки надають широкі можливості для вдосконалення методів аналізу та синтезу СКП, компенсації РП і боротьби з вищими гармоніками в СЕР. Тенденції розвитку сучасних інтелектуальних електричних мереж підсилюють нагальну потребу в розвитку методів аналізу оптимальних режимів та синтезу СКП на новому якісному рівні.

У зазначених аспектах актуальними є розробка нових ефективних методів аналізу оптимальних електромагнітних процесів і синтезу пристроїв симетрування і компенсації РП у СЕР електротехнічних об'єктів з метою покращання енергетичних показників цих систем. В навчальному посібнику викладаються оригінальні методи, засновані на широкому використанні комп'ютерних методів і моделей з застосуванням оптимізаційних методів. Для ефективного засвоєння матеріалу, поданому у навчальному посібнику, рекомендується спочатку уважно ознайомитися з приведеними поняттями, що характеризують енергоефективність електротехнічних систем згідно з

державними стандартами. При розгляді наведених прикладів моделювання і оптимізації слід приділяти увагу постановці завдання, створенню математичної та візуальної моделей, визначенню критеріїв оптимізації та реалізації обчислення значення цільової функції в конкретних прикладах. Рекомендується в процесі самостійної роботи скласти за прикладами моделі та програми оптимізації і в процесі їх роботи спостерігати, яким чином досягаються поставлені цілі моделювання та оптимізації. Необхідно також уважно аналізувати результати, що отримуються в зазначених комп'ютерних експериментах, особливо в аспектах покращання енергетичних показників електротехнічних систем.

Матеріал навчального посібника рекомендується при вивчанні дисциплін, пов'язаних з сучасними методами аналізу і оптимізації електротехнічних систем, покращання електромагнітної сумісності і якості електричної енергії в системах енергопостачання, в тому числі із застосуванням сучасних засобів енергетичної електроніки. Список рекомендованої літератури, що включає в себе широкий перелік вітчизняних та іноземних джерел, може використовуватися при виконанні магістрами науково-дослідної роботи і написанні спеціальних розділів магістерської роботи.

РОЗДІЛ 1 ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ І ПОВ'ЯЗАНІ З НЕЮ ПРОБЛЕМИ

1.1 Проблеми якості електричної енергії

Основним засобом електропостачання є трифазні електричні системи, що живляться від трифазних синхронних генераторів великої потужності, встановлюваних на електростанціях. Синхронні генератори приводяться в обертання в основному паровими турбінами, що перетворюють теплову енергію палива в механічний обертальний рух вала турбіни за відносно невисокого коефіцієнта корисної дії. Від синхронного генератора електрична енергія надходить до електричних споживачів через лінії електропередачі, що утворюють електричні мережі. Споживачі електроенергії здійснюють перетворення електричної енергії в інші види енергії – механічну, теплову, світлову і т. п. Із огляду на системний підхід, варто зазначити, що ефективність генерації – передачі – споживання електроенергії визначається ефективністю роботи кожної ланки електроенергетичної системи. Особливе місце в цій системі займають лінії електропередачі. Становлячи, здавалося б, найменш складну частину системи, вони, разом із тим, найбільш суттєво впливають на втрати електроенергії. Боротьба з цими втратами є одним із основних завдань електроенергетики, успішне вирішення якого зрештою може допомогти істотно економити енергоресурси, які обчислюються мільйонними показниками економічного ефекту в масштабах країни.

Концептуально виправдано вважати лінією електропередачі всю систему, розташовану між затискачами джерел синусоїдальних напруг (тобто вихідними затискачами трифазного синхронного генератора) і затискачами, до яких приєднуються електроспоживачі (навантаження). Насправді на цій ділянці є не тільки проводи у вигляді повітряних або кабельних ліній електропередачі, а й різні пристрої перетворення електричної енергії, включаючи силові трансформатори і напівпровідникові перетворювачі параметрів електричної енергії у вигляді випрямних і інверторних напівпровідникових агрегатів. Під час проектування електричних мереж зазвичай враховуються силові трансформатори, облік яких здійснюється, наприклад, введенням комплексних опорів, що відображають втрати розсіювання, і джерел потужності, відповідних втратам на намагнічування осереддя трансформатора. Провідники представляються активно-індуктивними опорами залежно від типу проводу або кабелю, а також відстані, на яку ці провідники передають електричну енергію. Під час проектування втрати в лініях електропередачі визначаються струмами,

що протікають через активні опори схем заміщення зазначених елементів, тому питання про зниження втрат у мережах, фактично, полягає в зниженні рівнів струмів, що протікають у цих мережах.

Які ж фактори призводять до невинного збільшення втрат у мережах за заданих рівнів струмів, споживаних навантаженнями? Ці фактори пов'язані значною мірою з реактивною потужністю в системі і несиметрією в споживанні електричної енергії трифазних систем електропостачання.

Теорія реактивної потужності протягом сотні років невпинно піддавалася ретельному аналізу і розвитку. У цих питаннях значним є внесок таких вчених, як С. Фризе [62, 63], В. Кваде [64], Д. Є. Міллер [69], К. Будеану [61], О. А. Маєвський [163], Е. Г. Пухов [67, 112], К. С. Демірчан [108–110], І. М. Чиженко, А. Н. Милях, А. К. Шидловський, В. Г. Кузнецов, Б. П. Борисов, І. В. Мостовяк [126–149, 177], О. В. Кириленко [21–23], А. Ф. Жаркін [20, 223], В. А. Новський [197], В. М. Михальський [28], І. В. Жежеленко [76–80], О. Г. Гриб [151–153], Є. І. Сокол [24–27], В. В. Зорін [49–51], С. М. Рожавський [154], Ю. А. Сиротін [95–99, 170–174], Ю. Л. Саєнко, Н. А. Мельников [75, 169], В. А. Веніков [164, 165], Ю. С. Желєзко [47, 48, 81], В. Е. Тонкаль [105–106], А. В. Новосельцев, В. Я. Жуйков, С. П. Денисюк [45], І. Ф. Домнін, Г. Г. Жемеров [82–88, 182], В. В. Кізілов [91–94], А. Ф. Крогеріс [90], Х. Акагі [119–125], Ф. З. Пенг [244, 245], А. К. Чарнецкі [100–103], Л. Мадяр [73] та інших [64, 66, 68, 70, 74, 89, 178–181]. Частина робіт за цією тематикою присвячена пошукам тлумачення фізичної сутності реактивної потужності [65, 66, 68, 74, 89, 90, 111, 113–118], природи її появи у зв'язку з генерацією в систему вищих гармонік через нелінійні елементи [58]. Інша частина робіт прагне використовувати запропоновані теорії для спрощення методів апаратного визначення параметрів, що характеризують реактивну потужність, з метою проектування систем управління компенсуючими пристроями, зокрема силовими активними фільтрами [104, 107, 156–159]. Раціонально керуватися фундаментальним співвідношенням [163], що визначає повну потужність у системі як геометричну суму активної потужності P і складових реактивної потужності зсуву Q , несиметрії N і спотворень D :

$$S = (P^2 + Q^2 + N^2 + D^2)^{0.5}.$$

Активна потужність P витрачається на виконання корисної роботи в навантаженнях, а також на покриття неминучих теплових втрат в елементах обладнання системи електропостачання.

Потужність зсуву Q визначається реактивним характером струмів навантаження та інших елементів системи електропостачання. Для різних

споживачів частка реактивної потужності оцінюється усередненими показниками. На асинхронні двигуни припадає близько 40 % усієї реактивної потужності енергосистем, на силові трансформатори – до 35 %, напівпровідникові перетворювачі – 10 %, електричні печі – 8 %, лінії електропередач – 7 %. Варто враховувати, що частка реактивної потужності основних її споживачів – асинхронних двигунів і силових трансформаторів – може істотно зростати під час роботи їх у недовантажених режимах.

Потужність несиметрії N обумовлена різного роду порушеннями симетричних режимів трифазних систем електропостачання, які спочатку розраховувалися і продовжують проектуватися в сподіванні на симетричні режими споживання електроенергії. Однак реальні споживачі можуть створювати несиметричні режими, що пов'язано, наприклад, з підключенням однофазних і двоплечевих навантажень [127, 130, 135, 150, 154]. Несиметрія присутня в мережах електропостачання сільськогосподарських навантажень [56, 192–196], комунальних систем електропостачання [161], під час підключення потужних сталеплавильних і зварювальних агрегатів [192–196], за електроживлення залізничного транспорту [199–202, 205]. Наявність несиметрії призводить до нерівномірного завантаження фаз, перекосів напруги на споживачі, до підвищення втрат і зниження продуктивності роботи споживачів. При чотирипровідній системі трифазного електропостачання з'являється додаткова проблема, викликана несиметричними режимами електроспоживання, яка полягає в перевантаженні четвертого, нейтрального проводу [168, 175, 176]. За симетричних режимів струм у нейтральному проводі відсутній. Несиметрія призводить до зростання струму, який надходить через нейтральний провід, і цей струм може досягти неприпустимо великих величин, результатом чого може бути аварійний режим відгорання нейтралі. Водночас перекоп напруг на навантаженнях істотно зростає, що може призвести до виходу з ладу електрообладнання, під'єданого в цій системі та розрахованого на деякі гранично допустимі амплітуди напруги живлення.

Реактивна потужність спотворень D пов'язана з невідповідністю струмів і напруг синусоїдальній формі. З математичної точки зору це явище може трактуватися як поява вищих гармонік у спектрах струмів і напруг [58]. Гармоніки струму і напруги визначають потужності на відповідних частотах. Оскільки теоретично гармонійний ряд складається з нескінченної кількості його членів, то безпосереднє обчислення результуючої потужності всіх вищих гармонік важко виконати, і тому частіше за все ця потужність може бути обчислена на основі фундаментального співвідношення після того, як визначені всі інші складові цієї формули. Поява вищих гармонік обумовлена режимами роботи нелінійних елементів. Так насичення магнітних систем трансформаторів

і асинхронних двигунів спричиняє появу вищих гармонік в струмах живильних ліній електропередач. Відповідні складові будуть супроводжуватися падінням напруги на лініях електропередачі, а отже, і напруг на затискачах навантажень, що характеризуються нелінійними властивостями. Як потужні генератори вищих гармонік використовуються напівпровідникові випрямлячі [79]. У граничному випадку ідеально згладженого струму навантаження напівпровідникового випрямляча в первинній обмотці живильного трансформатора індуктуються струми, що складаються з прямокутних фрагментів. Розкладання в тригонометричний ряд подібних кривих струмів свідчить про наявність так званих канонічних гармонік, частоти яких визначаються пульсністю випрямляча. Реальні випрямлячі працюють в умовах несиметрії мережі і систем управління (у разі керованих випрямлячів), внаслідок чого також з'являються неканонічні гармоніки з частотами, відмінними від канонічних. Крім того, у результаті взаємодії можуть з'явитися так звані інтергармоніки [79, 80, 140]. Усе це створює достатньо складну картину електромагнітного оточення реальних систем електропостачання. Вищі гармоніки можуть становити значну небезпеку не тільки як постачальники додаткової потужності спотворень, але і як джерела різного роду завад, які можуть впливати на умови електрозв'язку і забивання радіочастотного діапазону додатковими стійкими завадами [80]. Практика показує, що боротьба з вищими гармоніками за допомогою пасивних фільтрів часто є недостатньою і малоефективною. Такі фільтри вимагають точного налаштування і не можуть охопити весь потрібний діапазон вищих гармонік [58, 70]. Останніми роками розроблені ефективні засоби боротьби з вищими гармоніками у вигляді силових активних фільтрів [222, 223, 226, 227, 228, 229, 233], які, фактично, є адаптивними системами, що подавляють практично весь спектр вищих гармонік.

1.2 Показники якості електричної енергії

Державні стандарти [1 – 19] не завжди прямо посилаються на поняття реактивної потужності, однак нормують величини, пов'язані з нею. Зокрема, для випадку лінійних навантажень, що живляться синусоїдальними струмами і напругами, використовується поняття коефіцієнта потужності ($\cos \varphi$), що чисельно відображає частку активної потужності в повній комплексній (уявній) потужності. Робота обладнання з низьким коефіцієнтом потужності є вкрай небажаною, і тому вирішення проблеми підвищення коефіцієнта потужності спрямовано на зниження рівнів реактивної потужності [29, 44, 46, 52–55, 57, 160, 162]. У силовій електроніці як один з основних енергетичних показників

використовується коефіцієнт потужності, що враховує вищі гармоніки, які неодмінно супроводжують роботу перетворювальних установок [118, 163, 166]. У цьому випадку коефіцієнт потужності визначається як добуток коефіцієнта $\cos \varphi$ зсуву основної гармоніки струму щодо напруги і коефіцієнта спотворень, що визначається співвідношенням діючого значення першої гармоніки струму і діючого значення повного струму, тобто в знаменнику враховується струм основної гармоніки та всіх вищих гармонік струму. Однак значення коефіцієнта потужності в державних стандартах не завжди нормується, хоча вочевидь, що воно має бути якомога ближче до одиниці.

Показники несиметричного режиму визначаються шляхом застосування теорії симетричних складових для вираження несиметричних струмів і напруг [59, 60, 71, 72]. Для трипровідної трифазної несиметричної системи електропостачання ступінь несиметрії оцінюється за співвідношенням амплітудного або діючого значення зворотної послідовності і прямої послідовності струму або напруги. ГОСТ 13109-97 [1] нормує коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю в межах 2–4 % (нормально і гранично допустимі значення в точках загального приєднання). У разі використання чотирьохпровідної системи трифазного електропостачання оці несиметрії по зворотній послідовності, потрібно доповнити коефіцієнтом несиметрії за нульовою послідовністю, який визначається співвідношенням величини нульової послідовності і величини прямої послідовності. Для низьковольтних чотирьохпровідних мереж з напругою 0,38 кВ коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю (він ще називається коефіцієнтом невривноваженості) також нормується ГОСТ 13109-97 у межах 2–4 %. Для обчислення напруг прямої і зворотної послідовностей в тексті ГОСТ 13109-97 наведені доволі громіздкі формули, що дозволяють обчислити зазначені величини за діючими значеннями міжфазних напруг:

$$U_{1(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)i} + \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} + U_{AB(1)i} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]}$$

$$U_{2(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)i} - \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} + U_{AB(1)i} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]}$$

Формула для обчислення напруги нульової послідовності має ще більш громіздкий вигляд:

$$U_{0(1)i} = \frac{1}{6} \sqrt{\left[\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} - 3 \cdot \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right]^2} + \sqrt{\left[4U_{BC(1)i}^2 - \left(U_{AB(1)i} - \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]} - \sqrt{\left[4U_{B(1)i}^2 - \left(U_{AB(1)i} - \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]}.$$

Оскільки напруга прямої послідовності близька до номінальної напруги, то в деяких випадках під час визначення коефіцієнтів несиметрії і неврівноваженості його можна замінити в знаменнику номінальною напругою.

Синхронні генератори, що виробляють електроенергію, достатньо чутливі до проявів несиметричного режиму в електроспоживачах, що живляться від них. Через несиметрію в обмотках статора з'являються гармоніки струму прямої і зворотної послідовностей непарного спектра, а в обмотці ротора – аналогічні гармоніки парного спектра [75, 76, 191], що призводить до додаткового нагрівання обмоток статора і ротора. Крім того, несиметричні фазні струми створюють не кругове, а еліптичне магнітне поле з просторово-нерухомими центрами, яке викликає вібрації в конструкції генератора. Струми зворотної послідовності викликають нестабільність активної потужності внаслідок механічного перенапруження вала турбогенератора і з'єднувальної муфти. ГОСТ 183-74 регламентує тривалу роботу трифазних генераторів за умови, що різниця струмів у фазах не перевищує 10 % від номінального струму фази. Насправді за такої гранично допустимої різниці фазних струмів допускається струм зворотної послідовності не більше 6–7 % від номінального значення струму. В асинхронних двигунах навіть відносно невелика асиметрія напруги в 1 % призводить до появи значної несиметрії струмів в обмотках, яка може досягати величин 7–9 %. За несиметрії напруг на затискачах асинхронного двигуна в 3,5 % температура обмоток збільшується на 25 %. Відомо, що зменшення корисного обертового моменту асинхронного двигуна в першому наближенні визначається квадратом коефіцієнта несиметрії. За несиметрії напруги в 4 % термін експлуатації асинхронних двигунів скорочується вдвічі. Якщо ж водночас рівень напруги зворотної послідовності підвищений, то наявна потужність двигунів може знижуватися майже вдвічі [69].

У трансформаторах несиметрія напруг на первинних обмотках викликає несиметрію і неврівноваженість напруг на вторинних обмотках, що проявляється за з'єднання обмоток за схемою «зірка – зірка з нулем». Перегрівання ізоляції на 8 % зменшує термін її експлуатації вдвічі. За

несиметрії, якщо найбільш навантажена фаза споживає номінальний струм, пропускна здатність трансформатора зменшується на 42 % порівняно з потужністю еквівалентного однофазного навантаження. В особливих умовах в цьому сенсі працюють тягові трансформатори, що живлять електротранспорт на залізницях змінним струмом [199]. Тут одна з фаз вторинних обмоток, з'єднаних трикутником, приєднується до рейок, а два других вузли трикутника передають напругу на лінії живлення електровозів. Незважаючи на чергування фаз у групах трансформаторів [200, 201], вони працюють в різко несиметричному режимі. Ця несиметрія трансформується в обмотки тягових трансформаторів, які використовуються для живлення інфраструктури ділянок залізниці. Несиметрія напруг згубно впливає на освітлювальні прилади. У низці робіт показано, що у разі збільшення напруги на 5 % світловий потік ламп розжарювання збільшується на 20 %, а термін експлуатації зменшується вдвічі. У разі зменшення напруги на 5 % потік ламп розжарювання зменшується на 18 %, у той час як у роботі люмінесцентних ламп спостерігається нестійкість [73, 80, 215].

Таким чином, несиметрія та невривноваженість у трифазних системах електропостачання становить істотну проблему, яка призводить до значних коливань напруги, що пов'язано як із перетіканням реактивної потужності, так і з наявністю струмів і напруг вищих гармонік.

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги, згідно з ГОСТ 13109-97, визначається формулою:

$$K_{U_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{40} U_{(n)i}^2}{U_{(1)i}^2}} \cdot 100$$

У чисельнику міститься корінь з суми квадратів амплітуд вищих гармонік від другої до сорокової, а в знаменнику – амплітуда першої основної гармоніки.

Зарубіжні стандарти використовують, фактично, еквівалентну формулу:

$$KH I = \sqrt{\frac{V_{rms}^2 - V_{1(rms)}^2}{V_{1(rms)}^2}},$$

де V_{rms} – середньоквадратичне значення всієї напруги (струму),

$V_{1(rms)}$ – середньоквадратичне значення її першої гармоніки.

Зарубіжний стандарт IEEE519-1992 [9] дає рекомендації щодо конструювання фільтрів для подавлення вищих гармонік. Основні вимоги за рівнями вищих гармонік наводяться в двох таблицях. У першій таблиці – максимальні напруги гармонік у відсотках від номінальної напруги живлення для навантажень, підімкнених до точки загального приєднання залежно від

характеру навантаження. Разом із тим характер навантаження відображається співвідношенням максимального струму мережі (струму короткого замикання в точці загального приєднання) до струму споживання. Зі збільшенням цього співвідношення від 10 до 1 000 максимально допустима напруга вищих гармонік знижується відповідно від 2,5 – 3 % до 0,05 – 0,1 % (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Максимальні напруги гармонік від номінальної напруги живлення для навантажень

I_{SC}/I_L	Максимальна напруга окремої гармоніки [%]	Примітка
10	2.5...3.0	У вузькоспеціалізованих системах
20	2.0...2.5	1...2 великих споживачів
50	1.0...2.0	Деякі порівняно великих споживачів
100	0.5...1.0	5...20 споживачів середнього масштабу
1000	0.05...0.1	Множина дрібних споживачів

У таблиці 1.2 встановлюються межі на струми гармонік, що досягають точок загального приєднання залежно від характеру навантажень, визначуваних способом, зазначеним вище.

Таблиця 1.2 – Граничні значення для струмів гармонік

I_{SC}/I_L	Порядок гармонік					Загальний коефіцієнт нелінійних спотворень по струму
	$k < 11$	$11 \leq k < 17$	$17 \leq k < 23$	$23 \leq k < 35$	$35 \leq k$	
< 20	0.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	0.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	0.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1\ 000$	2.0	5.5	5.0	2.0	0.0	15.0
$> 1\ 000$	5.0	7.0	6.0	2.5	0.4	30.0

Примітка. Все електрогенераторні установки повинні відповідати вимогам, наведеним у цьому рядку незалежно від значень їх I_{SC}/I_L .

Струм гармоніки складає різницю між струмом перетворювача напруги, яка постачає енергію в навантаження, і струмом фільтра, що подавляє гармоніку напруги. Як видно з таблиці, для невеликих навантажень (відношення струмів понад 1 000) струми гармонік з номерами до десяти включно повинні складати менше 15 % від струму навантаження, водночас загальний коефіцієнт нелінійних спотворень по струму не повинен перевищувати 12 %.

На залізничному транспорті, де живлення ліній електропостачання становить постійну напругу 3,3 кВ, від тягових підстанцій з багатофазними (шести- або дванадцятипульсними) випрямлячами вводиться ще один показник – так звана психофотометрична напруга [199–202]. Вона визначається з міркувань, що вищі гармоніки не повинні заважально впливати на системи телефонного зв'язку між службами залізниці. Лінії зв'язку протягнуті уздовж рейкового шляху, і наведення від силового контуру живлення електровозів можуть змішуватися з корисним сигналом систем зв'язку. Ця так звана заважальна напруга враховує не тільки амплітуду кожної заданої гармоніки, а й показники впливу окремої гармоніки на слуховий апарат людини залежно від частоти. Заважальна напруга вищих гармонік обмежується стандартами і галузевими документами на рівні 4 В.

Незважаючи на відносно невелику потужність, яка може бути обчислена математично за взаємодією однойменних гармонік струму і напруги, вищі гармоніки можуть призводити до негативних явищ і навіть до виходу з ладу обладнання. Це впливає з тієї обставини, що гармоніки з вищими частотами, незважаючи на їхні невеликі амплітуди, мають властивості інтенсивно розігрівати сердечники магнітних систем трансформаторів і двигунів, а також ізоляцію електротехнічних пристроїв. Унаслідок перегрівання ізоляція піддається прискореному старінню і пришвидшено виходить з ладу, що, за свого боку, може призвести до коротких замикань – тяжких аварійних режимів.

Таким чином, реактивна потужність, що обумовлена індуктивним характером і несиметрією навантажень, а також вищі гармоніки струмів і напруг, є суттєво негативними явищами, що погіршують технічні та економічні показники роботи систем трифазного електропостачання.

1.3 Аналіз режимів та синтез пристроїв для симетрування і компенсації реактивної потужності

В електроенергетиці завдання компенсації традиційно обумовлюється необхідністю забезпечення необхідних рівнів напруги на затискачах споживачів. Типове завдання компенсації реактивної потужності довгі роки вирішується шляхом установки симетричних батарей конденсаторів, призначених для зменшення рівнів реактивної потужності до деякої заданої, відносно малої величини [47, 53, 73–75]. Приблизний характер вирішення цього завдання обумовлений, з одного боку, дискретністю величин ємностей батарей конденсаторів, у той час як характер споживання електроенергії безперервно змінюється протягом доби і не завжди може бути точно передбачений. Галузь із

виробництва конденсаторів приділяє належну увагу проблемі компенсації реактивної потужності та забезпечує електроенергетичні системи широкою номенклатурою компенсувальних (косинусних) конденсаторів. З метою недопущення перекомпенсації доводиться стежити за добовими графіками зміни навантажень у певному вузлі споживання і відповідно до усереднених показників перемикає секції батарей конденсаторів. Ці графіки також є приблизними, а компенсація неповною.

Удосконалення компенсації за допомогою батарей конденсаторів здійснюється шляхом введення тиристорно-індуктивних елементів [165, 166, 167]. Вони дозволяють шляхом регулювання кута відмикання зустрічно-паралельно увімкнених тиристорів регулювати частку реактивної потужності індуктивного характеру, яку віддає кожна індуктивність. Отже, проблема дискретності в компенсації реактивної потужності за допомогою батарей конденсаторів може бути вирішена, хоча не можна не відзначити, що струми індуктивностей стають несинусоїдальними і містять вищі гармоніки.

При комутаціях конденсаторів актуальною є також проблема увімкнення секцій батарей конденсаторів на напругу мережі. У загальному випадку напруга на конденсаторі може мати будь-яку величину. Увімкнення конденсатора на напругу мережі, що відрізняється від напруги на конденсаторі, призводить до протікання через конденсатор надструмів. У таких умовах терміни експлуатації конденсаторів істотно скорочуються.

Оптимальним з погляду зменшення амплітуд перехідних струмів є момент часу, коли напруги конденсатора і мережі виявляються рівними. Зрозуміло, що механічні комутатори не можуть забезпечити високу точність бажаного моменту комутації через інерційність механічної системи. Найбільш прийнятним щодо цього є застосування зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів як комутаторів косинусних конденсаторів. Отримані у такий спосіб системи тиристорно-конденсаторних блоків можуть також застосовуватися для компенсації реактивної потужності. Іноді послідовно з конденсаторами для обмеження амплітуд перехідних струмів вмикаються невеличкі індуктивності.

Якщо забезпечена безструмова комутація конденсаторів, то за допомогою батарей конденсаторів легко може бути реалізовано симетрування живильних струмів за несиметричних навантажень. Тим самим досягається не тільки компенсація реактивної потужності зсуву, але і реактивної потужності несиметрії. У цих випадках за фазами повинні вмикатися батареї конденсаторів із різною ємністю. Визначення параметрів симетрувального пристрою становить сутність завдань аналізу несиметричних режимів трифазних систем електропостачання, синтезу структури і параметрів симетрувальних і компенсувальних пристроїв.

Великий внесок у вирішення цього завдання зробили такі вчені, як Р. Штейнметц [59], А. Н. Милях [126, 127], А. К. Шидловський [129–134], В. Г. Кузнецов [142–148], Б. П. Борисов [130, 135], А. Д. Музиченко [128, 129], В. Г. Новський [137], В. А. Веніков [164]. Розвиток теорії розрахунку та проектування систем електропостачання з симетро-компенсувальними пристроями в наведених роботах здійснювався на підставі фундаментальних законів електротехніки із залученням матричних, топологічних і топографічних методів. Основну роль у таких розрахунках відіграє метод симетричних складових. Застосування аналітичних методів для вирішення зазначених завдань ускладнюється тим, що під час аналізу режимів невідомими є не тільки величини струмів і напруг у системі, а й параметри симетро-компенсувального пристрою. У зв'язку з цим для вирішення завдання застосовуються спрощувальні припущення. Наприклад, нехтують впливом втрат електричної енергії на елементах лінії передачі і вважають, що на затискачах навантаження і симетро-компенсувального пристрою діють напруги джерела напруги живлення. Внаслідок цього виникає похибка в розрахунках параметрів симетро-компенсувального пристрою, залежно від конкретних параметрів системи електропостачання ці похибки можуть становити відчутні величини. Крім того, під час синтезу структури симетро-компенсувального пристрою важливим моментом є визначення типів реактивних елементів, які необхідно включити в цей пристрій. Особливо складним виявляється це завдання при розгляді чотирипровідних систем електропостачання, де кількість реактивних елементів у симетро-компенсувальному пристрої досягає п'яти. У низці робіт для вирішення цього завдання наводяться графічні методи, засновані на розгляді різних роду діаграм. Водночас залежно від розташування векторів зворотної та нульової послідовностей струмів і напруг повинні застосовуватися різні формули для визначення типів і параметрів елементів симетро-компенсувального пристрою.

Прикладами застосування графічних методів можуть бути номограми, зображені на рисунках 1.1 і 1.2.

Номограма на рисунку 1.1 запозичена з [129], де вона згадується як діаграма С. Гауффе поряд з іншими (Л. Є. Ебіна, А. А. Ковзана, А. Гохрайнера, І. І. Іванова та інших). Вона дозволяє проаналізувати коефіцієнт несиметрії і фазові кути між симетричними складовими зворотної та прямої послідовностей для фази А. Тут же відзначаються суттєві обмеження номограм, зокрема, відносно точності результатів, що отримуються за цими номограмами.

Номограма на рисунку 1.2 запозичена з [78], де вказано, що вона може використовуватися для встановлення потужностей батарей конденсаторів під

час синтезу симетрувального пристрою з метою симетрування режиму за несиметричного трифазного навантаження.

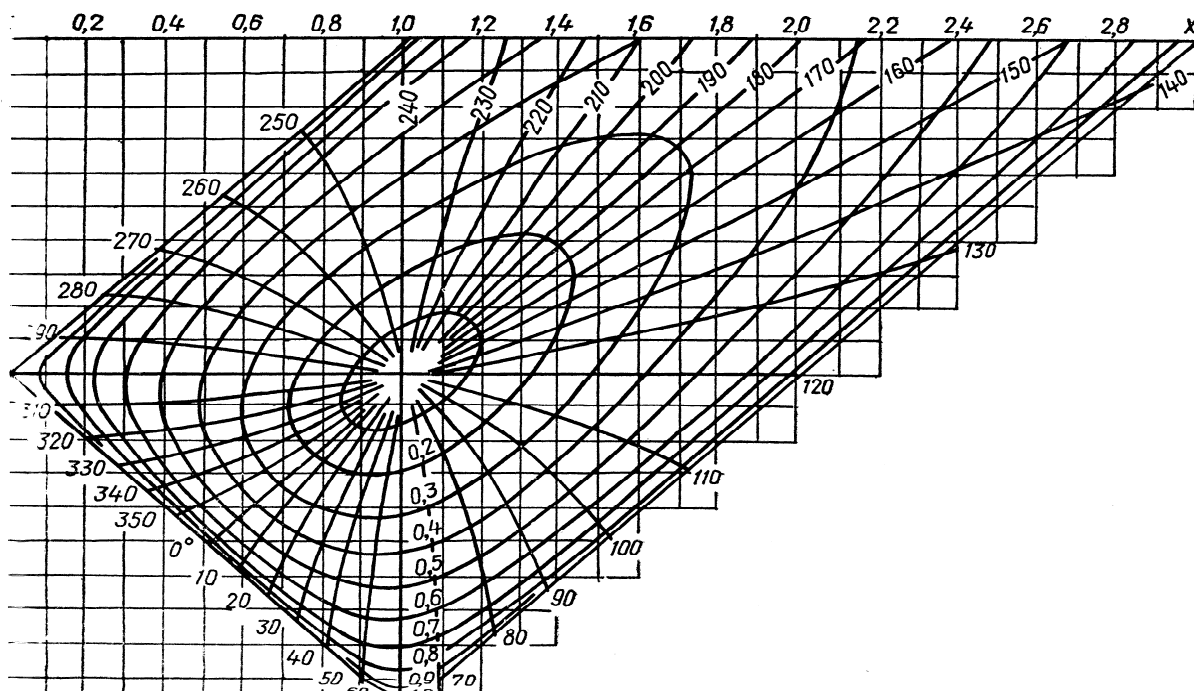


Рисунок 1.1 – Номограми для оцінки коефіцієнта несиметрії

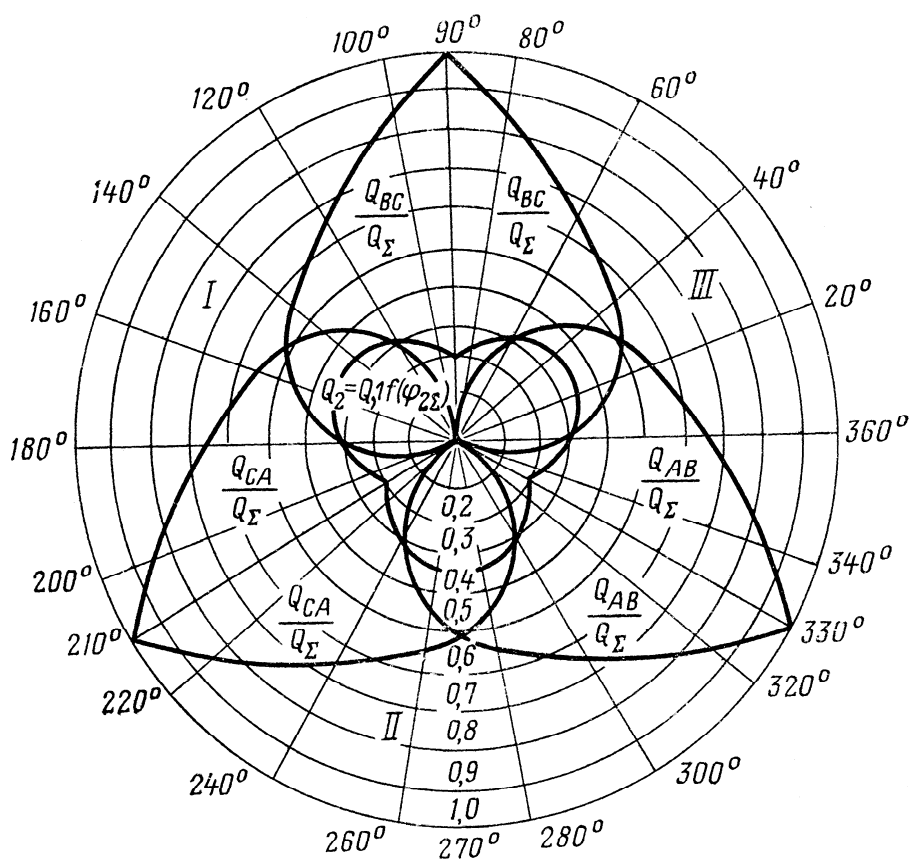


Рисунок 1.2 – Номограма для визначення потужностей конденсаторів

Як пояснення порядку використання наводяться лише три варіанти розрахункових формул, вибір саме якої, зі свого боку, залежить від аргумента еквівалентного струму зворотної послідовності. Безперечно, що використання зазначених графічних методів і засобів аналізу несиметричних режимів та синтезу симетрувальних пристроїв є доволі складним, незручним та неточним методом, що потребує безпосередньої участі розробника в процесах аналізу та синтезу.

В останнє десятиліття інтенсивно впроваджуються засоби обчислювальної техніки і їх програмного забезпечення у вигляді пакетів комп'ютерної математики. Найпоширенішими є програмні пакети MS Excel, MathCAD, MATLAB. Вони оснащені потужним програмним забезпеченням, що дозволяє за допомогою чисельних методів вирішувати поставлені завдання, зокрема і нелінійні. Отже, природними видаються спроби застосувати зазначені засоби для вирішення завдань аналізу несиметричних режимів у трифазних системах електропостачання та синтезу структур, а також параметрів симетрокомпенсувальних пристроїв.

Контрольні запитання до розділу 1

1. У чому полягають основні сучасні вимоги до якості електричної енергії?
2. Які є найбільш суттєві показники, що характеризують наявність реактивної потужності і генерації гармонійних складових у системі електропостачання?
3. Що є причиною виникнення потужностей зсуву, несиметрії та спотворення?
4. В чому проявляється вплив потужностей зсуву, несиметрії та спотворення?
5. Чим обумовлена необхідність розробки та застосування нових методів розрахунків параметрів засобів підвищення якості електричної енергії в системах електропостачання?

РОЗДІЛ 2 СУТНІСТЬ МЕТОДУ ПОШУКОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ І ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Математична сутність методу пошукової оптимізації

Електромагнітні процеси в електротехнічних системах описуються системами рівнянь на підставі законів, що відображають топологічну структуру системи і поведження елементів, що її утворюють. Відповідно ці рівняння називаються топологічними і компонентними, вони утворюють повну систему рівнянь, що описують процеси в електричній системі. Під час вирішення завдання аналізу заданими є параметри та характеристики всіх елементів системи, а також всі параметри джерел енергії, що впливають на саму систему. Шуканими невідомими під час аналізу вважаються струми і напруги на елементах електричної системи. У разі лінійної електричної системи для сталого режиму система рівнянь може бути подана в матричному вигляді:

$$AX = Q; \quad (2.1)$$

де X – вектор невідомих струмів і напруг в електричній системі;

A – квадратна матриця коефіцієнтів при шуканих змінних;

Q – вектор задаючих величин джерел електричної енергії, що впливають на електричну систему.

Рішення такої системи (2.1) не викликає принципових труднощів і здійснюється за допомогою добре відомих методів шляхом застосування оберненої матриці A^{-1} або здійснення ітераційних наближень за збіжною обчислювальною схемою аж до досягнення необхідної точності.

Якщо позначити $F(X) = AX - Q$, то повна система рівнянь, що описує процеси в електричній системі, може бути подана в такому вигляді:

$$F(X) = 0. \quad (2.2)$$

$F(X)$ у (2.2) може трактуватися як нев'язка, яка прагне стати рівною нулю після досягнення рішення. Зведення нев'язки до нуля може здійснюватися за допомогою квазіньютонівських чисельних методів, які, насправді, становлять оптимізаційні методи [30-32]. У цьому випадку сама нев'язка є цільовою функцією, а змінні параметри оптимізації подані вектором шуканих невідомих струмів і напруг електричної системи.

У разі аналізу несиметричної трифазної системи електропостачання з симетро-компенсувальним пристроєм до невідомих у рівнянні (2.2) з нульовою правою частиною додається вектор P , що представляє параметри симетро-компенсувального пристрою:

$$F(X, P) = 0. \quad (2.3)$$

Як вже зазначалося раніше, змінні обох векторів зв'язуються операціями множення завдяки компонентним рівнянням елементів електричної системи. У такому випадку система рівнянь (2.3), що описує систему електропостачання з несиметричним навантаженням і симетро-компенсувальним пристроєм, втрачає властивість лінійності і може бути вирішена наближеними чисельними методами із заданою точністю. Таке завдання аналізу несиметричної системи електропостачання та синтезу симетро-компенсувального пристрою може бути подана як типове завдання пошукової оптимізації [37–42]. Для його вирішення можна використовувати весь набір відомих методів оптимізації, які наближають зображувану точку до вирішення за допомогою ітерацій. У кожній ітерації оцінюється величина цільової функції і за заданою алгоритмом рішення стратегією проводиться зміна значень змінних оптимізації, щоб забезпечити (найчастіше) мінімізацію значення цільової функції [35, 36].

Необхідно зауважити, що повної системи рівнянь, достатньої для вирішення завдання аналізу, тепер недостатньо. Справа в тому, що при опису постановки завдання до невідомих додаються також і параметри симетро-компенсувального пристрою. Для того щоб рішення могло бути досягнуто, необхідно додати до повної системи рівнянь кола додаткові рівняння або нерівності, що становлять певні обмеження оптимізації, кількість яких має бути не менше, ніж кількість невідомих параметрів симетро-компенсувального пристрою. Ці співвідношення, як буде показано на конкретних прикладах, можуть визначати умови фізичної реалізації необхідного режиму і елементів симетро-компенсуючого пристрою.

Отже, під пошуковою оптимізацією стосовно до завдання 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 із фізичною реалізованістю симетро-компенсувальних пристроїв для покращання якості електричної енергії в системі живлення електротехнічних об'єктів.

2.2 Вибір параметрів і критеріїв оптимізації

Як змінні параметри оптимізації використовуються параметри симетро-компенсувального пристрою. Вони повинні забезпечити симетрування й урівноваження трифазної системи електропостачання, а також як ідеальний режим повну компенсацію реактивної потужності.

Які ж додаткові співвідношення можуть виразити в процесі оптимізації необхідні критерії, і як їх можна реалізувати за допомогою відповідних цільових функцій стосовно до поставлених завдань?

Найбільш глобальним критерієм при системному підході може бути відсутність у системі електропостачання реактивної потужності, що генерується джерелами електричної енергії в кожній фазі трифазної системи електроживлення. Під час формування рівнянь можна обчислити комплексні повні потужності, що віддаються кожним джерелом трифазної системи:

$$\begin{aligned} S_a &= 0,5E_a I_a^*; \\ S_b &= 0,5E_b I_b^*; \\ S_c &= 0,5E_c I_c^*, \end{aligned}$$

де E_a, E_b, E_c – комплексні величини задавальних напруг живильних джерел синусоїдальних напруг, I_a^*, I_b^*, I_c^* – спряжені комплекси струмів, що віддаються відповідними джерелами.

Реактивні потужності можуть бути визначені як уявні частини від комплексів повних потужностей:

$$\begin{aligned} Q_a &= \text{Im}(S_a); \\ Q_b &= \text{Im}(S_b); \\ Q_c &= \text{Im}(S_c). \end{aligned}$$

Цільова функція, складена з реактивних потужностей джерел у вигляді кульової метрики, виглядає так:

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

При використанні моделей у системі візуального моделювання SimPowerSystem (SPS-моделей) для визначення реактивної потужності доцільно використовувати віртуальний PQ-вимірювач активної і реактивної потужностей Active & Reactive Power.

Для симетрування струмів за допомогою симетричної системи джерел живильних напруг достатньо задати умову рівності активних потужностей, що віддаються цими джерелами:

$$P_a = P_b = P_c.$$

Іншим критерієм, необхідним для симетрування струмів джерел, є рівність їхніх амплітуд. Варто зауважити, що ГОСТи нормують коефіцієнти несинусоїдальності і невірноваженості лише для напруг у точці загального приєднання [1]. Однак для досягнення цих умов може здійснюватися саме симетрування струмів, що віддаються джерелами, якщо врахувати, що опори ділянок ліній передачі електроенергії для кожної з фаз вважається однаковими.

Традиційним і природним під час симетрування і компенсації реактивної потужності видається розкладання системи несиметричних напруг і струмів на

симетричні складові [60, 240, 241, 250]. Пряма I_1 , зворотна I_2 і нульова I_0 симетричні складові обчислюються за відомими формулами для комплексів несиметричних струмів:

$$I_1 = (I_a + aI_b + a^2I_c)/3;$$

$$I_2 = (I_a + a^2I_b + aI_c)/3;$$

$$I_0 = (I_a + I_b + I_c)/3.$$

Для симетрування достатньо домогтися знищення зворотної складової I_2 . Для повної компенсації реактивної потужності необхідно, щоб був рівний нулю фазовий кут для прямої складової. Необхідно врахувати, що в трифазних трипровідних системах електропостачання нульова складова струмів завжди дорівнює нулю, оскільки струми в лініях підкоряються першому закону Кірхгофа, і їхня сума дорівнює нулю. У чотирипровідних трифазних системах при несиметрії з'являється нульова складова, потрібне значення якої становить струм у нульовому проводі. Надмірне зростання цього струму збільшує загальні втрати і може становити небезпеку з погляду можливості термічного руйнування проводу нейтралі та різкого перекосу напруг на затискачах навантажень. Тому для симетрування системи необхідно подавити як зворотну I_2 , так і нульову I_0 симетричні складові. За використання SPS-моделей для обчислення всіх симетричних складових у процесі моделювання передбачений спеціальний віртуальний прилад аналізу симетричних складових 3-Phase Sequence Analyzer, який можна налаштувати на розрахунок і виділення на виході необхідної симетричної складової. Водночас на виході приладу знімаються амплітуда і фазовий кут симетричної складової, що визначається, при заданій частоті.

Деякі можливості із визначення симетричних складових надає застосування фільтрів симетричних складових. Зазвичай вони використовуються в релейному захисті електроенергетичних систем і навантажуються на виконавчі елементи, що запобігають небажаним аварійним режимам. Підключені до затискачів моделей, вони можуть виділяти симетричні складові, необхідні для формування цільових функцій.

Як критерій, пов'язаний з гармонійним складом струмів і напруг, необхідно прийняти коефіцієнт спотворень синусоїди. Для його вимірювання в системі SPS присутній віртуальний прилад Total Harmonic Distortion (THD). Крім того, для вимірювання окремої гармонійної складової заданого порядку відносно частоти мережі живлення можна використовувати віртуальний аналізатор гармонійних складових Fourier, що дозволяє сформувати цільові функції, що враховують окремі гармоніки.

Як фундаментальний критерій можна також розглядати мінімізацію струмів, що протікають у лініях електропередачі. Цей критерій співвідноситься

з основною метою, яка досягається повною компенсацією реактивної потужності в системі електропостачання. У плані обчислення формування цільової фікції, що відповідає цьому критерію, здійснюється простим виміром амплітудних або діючих значень струмів і визначення по ним кульової метрики. Однак досягнення необхідного мінімуму вимагає обов'язкового застосування числових методів безумовної оптимізації.

Для формування цільових функцій, пов'язаних із коефіцієнтом потужності, а також з величиною заважаючої напруги можна використовувати конструювання віртуальних приладів. Ці показники мають особливе значення для оптимізації режимів у системах електропостачання з напівпровідниковими силовими перетворювачами на залізничному електротранспорті.

2.3 Методи реалізації моделей систем електропостачання

Електроенергетичні системи цілком обгрунтовано можуть бути зараховані до розряду складних систем як за величезною кількістю елементів у них, великими розмірами рівнянь, що описують їх, так і за характером процесів, що протікають у них, які мають різну фізичну природу. Тому завдання аналізу процесів, які відбуваються в них, є складним, а введення пристроїв, які здійснюють симетрування і компенсацію реактивної потужності, ще більше ускладнює отримання результатів. Традиційні символічні методи розв'язання задачі аналізу, що дають результат в аналітичній формі, все більше втрачають своє значення. Досліджувані в стандартних курсах теоретичних основ електротехніки, вони покликані виробити навички рішення щодо простих електричних систем і зрозуміти фізичну природу процесів, що відбуваються в них. Обмеженість символічних методів під час розрахунку перехідних процесів виявляється вже під час спроби збільшити в досліджуваній схемі кількість реактивних елементів до 3–4. Тут відразу ж стикаємося з необхідністю знайти корені характеристичного рівняння відповідно 3–4 порядків. Завдання рішення алгебраїчного рівняння вищого порядку якомога краще ілюструє обмеженість символічних методів. Дійсно, за допомогою відомих коренів можна легко скласти рівняння, представивши ліву частину у вигляді добутків різниць невідомої змінної і кожного з відомих коренів. Однак після розкриття дужок в лівій частині отримуємо алгебраїчний многочлен, порядок якого дорівнює числу коренів. У символічному вигляді відомі рішення лише для другого і третього порядків (формули Вієтта і Кардано). Вживані протягом двох століть спроби математиків отримати символічний розв'язок для алгебраїчного рівняння скільки завгодно високого порядку практично припинилися після доведення теореми Абеля. Вона строго визначає, що алгебраїчні рівняння вище

четвертого порядку не можуть бути розв'язані у радикалах. У зв'язку з цим, наприклад, у теорії авторегулювання були розроблені спрощені методи оцінювання властивостей коренів таких рівнянь (критерії Гурвіца, Михайлова).

У той же час в інженерно-технічних розробках і дослідженнях головним є отримання результатів у вигляді чисельних значень, які подаються зазвичай у вигляді таблиць або графіків. Можливості для отримання таких результатів представляють наближені числові методи, що забезпечують скільки завгодно малу похибку результатів обчислень. Числові методи дали величезний поштовх для розвитку методів розрахунку технічних пристроїв. Зокрема, у методах аналізу і синтезу використовується матричне обчислення, розроблені топологічні методи на основі неспрямованих і спрямованих (сигнальних) графів, які істотно прискорюють розрахунки, що забезпечують їхню наочність і значною мірою оберігають розробників від помилок при отриманні результатів [43, 190, 300].

Розвиток засобів електроніки та розробка на основі операційних підсилювачів методів аналогового моделювання забезпечили широкі можливості для вирішення складних технічних завдань на електронних обчислювальних блоках. Аналогове моделювання інтенсивно використовувалося аж до 70-х років ХХ століття, хоча і було остаточно витіснене внаслідок появи і бурхливого розвитку цифрових обчислювальних машин і алгоритмічних мов програмування. З появою в 70–80 роки інтегральних електронних схем, мікропроцесорів і персональних комп'ютерів цифрові технології стали широко доступними. Саме це зумовило появу таких потужних математичних пакетів, як MS Excel, MathCAD, MATLAB, що дозволяють реалізувати ідеї автоматизованого проектування [257, 258]. Розробник не повинен витрачати зусилля і час на написання громіздких складних програм, налагодження яких раніше займало місяці і роки та вимагало роботи цілих колективів інженерів, математиків і програмістів. Впроваджені в математичні пакети стандартні підпрограми, що реалізують чисельні методи, надали можливості швидкого створення обчислювальних схем і систем, що забезпечують отримання потрібних результатів із необхідною точністю.

Системи електропостачання містять у своєму складі такі важливі елементи, як синхронні генератори, лінії електропередач, трансформатори, різного роду лінійні та нелінійні навантаження. Для розрахунку процесів у системах електропостачання використовують розрахункові схеми заміщення, які точно відображають поведінку елементів у межах поставленого завдання і умов. Питання про еквівалентні розрахункові схеми заміщення досить докладно висвітлено в технічній літературі [29, 59, 60, 70, 75, 126, 156, 157, 164]. Основою для формування моделей систем електропостачання є повна система

рівнянь, що описує систему електропостачання. Повна система рівнянь складається з топологічних і компонентних рівнянь. Система топологічних рівнянь відображає структуру системи і зв'язок у ній елементів між собою. Вона формується на основі законів Кірхгофа, а кількість рівнянь визначається числом незалежних топологічних контурів і перерізів.

Формалізація задачі складання топологічних рівнянь пов'язана з використанням поняття дерева графа системи [43, 190, 300], яке становить пов'язану сукупність ребер графа системи, що містить всі вузли графа і водночас не утворює жодного контуру. Ребра графа, що включені в дерево, називаються вітками, інші ребра – зв'язками. Приєднання до дерева окремого зв'язку створює так званий особливий контур. Вся сукупність особливих контурів створює систему незалежних рівнянь за законом Кірхгофа для напруг. Дуальним поняттям відносно до особливого контуру є особливий переріз. Він становить сукупність ребер графа, розрив яких призводить до поділу цього графа на дві частини, однією з яких може бути навіть окремий вузол (канонічний переріз). Особливий переріз містить лише одну вітку, іншими ребрами мають бути зв'язки. Кожний особливий переріз дає можливість скласти із струмів ребер цього перерізу рівняння за законом Кірхгофа для струмів. Система рівнянь для особливих перерізів є також незалежною. Та обставина, що системи топологічних рівнянь, складені з особливих контурів і перерізів, є незалежними, істотно полегшує формування рівнянь моделі системи електропостачання.

Для представлення топологічних рівнянь у матричній формі складається топологічна матриця F , яка називається матрицею «контур-вітка». Її рядки відображають зв'язки, а стовпці – вітки графа. Матриця F заповнюється по рядках позитивними і негативними одиницями, що тим самим відображає структуру особливого контуру при обході в напрямку, що задається напрямком зв'язку в контурі (цей напрямок апіорі приймається як позитивний). Можна помітити, що аналіз системи особливих контурів візуально наочний. Принципово можливо скласти матрицю F і по системі особливих перерізів. Такий підхід раціонально будувати шляхом еквівалентних перетворень матриці інциденцій, що відображає номери вузлів, до яких приєднано кожне ребро. Ці перетворення необхідно виконувати на комп'ютері, що і становить сутність комп'ютерних алгоритмів, які лежать в основі автоматизованого проектування електротехнічних систем і комплексів. Після формування матриці F топологічні рівняння представляються в компактній матричній формі:

$$V^C = -FV^B;$$

$$I^B = F^T I^C,$$

де V^C , V^B - напруги на зв'язках і вітках відповідно;

I^B, I^C - струми віток і зв'язків відповідно;

F^T - транспонована матриця F .

Топологічні рівняння пов'язують однорідні величини і мають одиничні коефіцієнти змінних. До повної системи рівнянь, що дозволяють побудувати математичну модель системи електропостачання, топологічні рівняння необхідно доповнити компонентними рівняннями. Вони описують поведінку кожного елемента, зокрема визначають співвідношення струмів і напруг кожного елемента електричних систем. У найпростішому випадку, коли елемент двополюсний, цей зв'язок визначається законом Ома у формі алгебраїчного рівняння для резистивних елементів. Для реактивних елементів конденсаторів та індуктивностей використовуються аналогічні рівняння, складені у вигляді диференціального або інтегрального рівняння. Застосування перетворення Лапласа дозволяє алгебраїзувати і ці рівняння, що на певному етапі спрощує обчислення.

Під час вибору дерева графа електричної системи компонентні рівняння доцільно представляти для віток – в імпедансній, для зв'язків – в адмітансній формах:

$$V^B = Z^B I^B;$$

$$I^C = Y^C V^C,$$

де Z^B – діагональна матриця опорів елементів, що представляють вітки графа;

Y^C - діагональна матриця провідностей елементів, що представляють зв'язки графа.

Самі компонентні рівняння визначають вид повної системи рівнянь електричної системи. У лінійній системі, яка живиться від джерел постійної напруги або струму, модель відображається системою винятково алгебраїчних рівнянь з дійсними коефіцієнтами. У лінійній системі електропостачання, що живиться від джерел синусоїдальної напруги або струму, модель відображається також алгебраїчними рівняннями, однак величини і коефіцієнти в них є комплексними числами. Нарешті, найбільш загальною формою представлення моделі є інтегро-диференціальні рівняння, які дозволяють представляти рішення для перехідних процесів у часовій області. У той же час ці рівняння можуть представляти рішення для сталих періодичних режимів за допомогою методу встановлення. Саме диференціальні рівняння електричних систем складають основу формування візуальних моделей у системах автоматизованого розрахунку [188, 189]. Тут від розробника не потрібно вміння складати і розв'язувати рівняння динаміки електричної системи. Опис модельованої системи надається комп'ютеру у вигляді текстового файлу, що відображає структуру і параметри системи [186, 187], або у вигляді графічного зображення схеми на робочому аркуші, складеному з бібліотечних компонентів

[188]. В останньому випадку програма моделювання все ж переводить графічне зображення до відповідних текстових описів модельованої системи. Далі модельовальна програма автоматично, за допомогою складених і відтестованих підпрограм, формує опис графа, вибирає дерево, формує топологічні матриці, описи сигнального графа системи, складає диференціальні рівняння динаміки системи і здійснює їхнє рішення на заданому інтервалі моделювання за допомогою чисельних методів інтегрування систем диференційних рівнянь, представлених у формі завдання Коші.

Інформація про процеси накопичується в пам'яті комп'ютера або в дискових файлах у вигляді масивів чисел, що представляють значення безперервних величин струмів і напруг у перехідному режимі в дискретні моменти часу. За цими даними результатів комп'ютерних експериментів за допомогою спеціальних програм будуються і виводяться на екран графіки змін величин, що цікавлять розробника, залежно від модельного часу.

Зручною формою подання повної системи рівнянь є зображення її у вигляді сигнального матричного графа Мейсона [190, 303]. Кожне з чотирьох матричних ребер сигнального графа відображає при цьому наведені вище системи топологічних і компонентних рівнянь. Перевагою представлення рівнянь у вигляді сигнального графа є не тільки їхня наочність, а й можливість легко переходити до побудови візуальних моделей на основі комп'ютерних віртуальних обчислювальних блоків. Як реалізуються такі можливості, буде проілюстровано нижче у відповідних прикладах аналізу систем електропостачання з симетро-компенсувальними пристроями.

Рівняння моделі можна легко перетворити в узагальнену форму, придатну для вирішення за допомогою квазіньютонівських і оптимізаційних методів. Для цього достатньо в кожному з чотирьох матричних рівнянь моделі перенести в праву частину елементи лівої частини і поміняти отримані у такий спосіб ліву і праву частину місцями. Отримаємо рівняння з нульовими правими частинами, що представляють завдання оптимізації нев'язок шляхом зведення їх до нуля. У термінах теорії сигнальних графів такі рівняння відображаються графами Коутса. Відмінною рисою графів Коутса є наявність поодиноких петель з одиничними передачами на кожному вузлі всіх залежних змінних, що впливає зі структури використовуваних рівнянь. Формування графа Коутса, на відміну від графа Мейсона, не вимагає встановлення причинно-наслідкового зв'язку між змінною в лівій частині рівняння і змінними в правій частині, що виражають ліву частину рівняння. Це полегшує складання графа Коутса порівняно з графом Мейсона.

2.4 Методи і програмні засоби для оптимізації режимів роботи систем електропостачання

У широко поширених програмних пакетах комп'ютерної математики містяться засоби для здійснення пошукової оптимізації. Електронні таблиці MS Excel мають надбудову «Пошук рішення», яка заснована на оптимізаційних алгоритмах. Як зазначено в довідці по цій надбудові, «Пошук рішення» є частиною блока завдань, який іноді називають аналіз «що-якщо». Процедура пошуку рішення дозволяє знайти оптимальне значення формули, що міститься в комірці, яка називається цільовою. Ця процедура працює з групою комірок, прямо або побічно пов'язаних з формулою в цільовій комірці. Щоб отримати за формулою, що міститься в цільовій комірці, заданий результат, процедура змінює значення у впливаючих комірках. Засіб пошуку рішення Microsoft Excel використовує алгоритм нелінійної оптимізації Generalized Reduced Gradient (GRG2), розроблений Л. Ласдоном і А. Уорен.

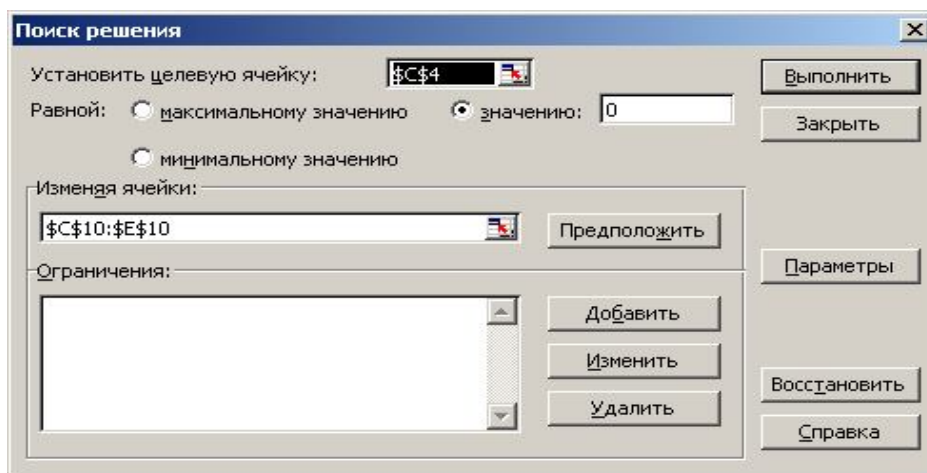


Рисунок 2.1 – Вікно надбудови пошуку рішення

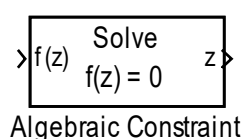
Вікно діалогу для надбудови «Пошук рішення» наведено на рисунку 2.1. Тут в рядку «Встановити цільову комірку» необхідно вказати фіксовану адресу комірки, у якій розраховується цільова функція, яка може бути максимізована, мінімізована або приведена до нульового значення залежно від вибору відповідної радіокнопки із розташованих нижче.

У розділі «Змінюючи комірки» потрібно вказати комірки із змінними параметрами оптимізації, які і є так званими впливаючими комірками. За наявності обмежень вони можуть бути введені у відповідному розділі «Обмеження». Запуск на початок пошуку шляхом розв'язання оптимізаційної задачі здійснюється кнопкою «Виконати».

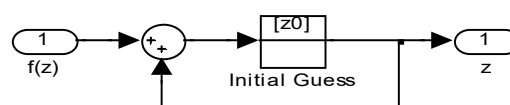
У системі MathCAD [258] як засіб оптимізації використовується оператор Given-Find (Solve Block). Для його включення на першому етапі необхідно задати початкові значення шуканих змінних оптимізації за допомогою операторів присвоювання. На другому етапі між Given і Find потрібно записати рівняння, використовуючи знак довгої, так званої логічної рівності (він вставляється за допомогою утримання клавіші Ctrl і натискання клавіші «= \Rightarrow »). Разом із тим навіть не потрібно представляти рівняння у вигляді, за якого права частина дорівнює нулю. Крім рівнянь, сюди можна вставити нерівності, які можуть задавати додаткові умови і обмеження під час оптимізації. Загальна кількість рівнянь і нерівностей не повинна бути менше числа шуканих параметрів оптимізації. На третьому етапі має бути записаний оператор Find, у круглих дужках якого необхідно вказати перелік імен шуканих змінних оптимізації. Знайдені значення можуть бути присвоєні деякому вектору, зокрема і тому, що містить імена шуканих змінних оптимізації. Solve Blocks може вирішувати системи рівнянь до 400 змінних, використовуючи квазіньютонівський алгоритм або алгоритм методу сполучених градієнтів. Метод Левенберга - Марквардта дозволяє вирішити завдання оптимізації без обмежень розмірів системи, лінійна система може містити до 8 192 обмежень, а нелінійна – до 200. Визначною властивістю оператора Solve Block є та обставина, що він вирішує системи рівнянь і нерівностей навіть у разі комплексних змінних. Водночас MathCAD розділяє дійсні та уявні частини комплексних чисел, а отриману систему з'єднує в єдину з урахуванням як рівнянь, так і обмежень.

Для налаштування робочого листа для роботи з комплексними змінними на початку потрібно визначити комплексну одиницю, яка дорівнює $j: = (-1)^{0,5}$. Зазначена можливість робить особливо зручним використання Solve Block для аналізу усталених режимів систем електропостачання, які живляться за допомогою синусоїдальних джерел напруги або струму. Крім того, він дуже ефективний для синтезу симетрично-компенсувальних пристроїв, що складаються, зазвичай, винятково з реактивних елементів. Їхні параметри провідності й опору виражаються уявними числами у разі використання методу комплексних амплітуд.

У системі Simulink [257] властивість оптимізації має обчислювальний блок Algebraic Constraint (рис. 2.2, а).



а



б

Рисунок 2. 2 – Блок Algebraic Constraint (а) та його структура (б)

Вихідна величина z цього блока змінюється так, щоб сигнал на вході блока $f(z)$ дорівнював нулю, що передбачає і напис на зображенні блока: $f(z) = 0$. Водночас, обчислювальна структура цього блока проста і абсолютно не пов'язана з якимось математичним методом оптимізації (рис. 2.2, б). Видно, що сигнал з виходу блока подається на суматор разом із вхідним сигналом. Отже, має бути справедливим рівняння:

$$f(z) + z = z,$$

що можливо лише у разі виконання умови $f(z) = 0$. Ця умова задовольняється внаслідок здатності Simulink-моделей працювати в урівноваженому режимі. Обчислювальний блок Initial Guess дозволяє задавати початкове значення вихідної змінної z на початку першого кроку інтегрування протягом роботи моделі. Далі, тобто вже на другому і всіх наступних кроках інтегрування, цей блок абсолютно не впливає на вихідний сигнал і робить його рівним сигналу на виході блока підсумовування. Принципово, якщо початкове значення z можна не ставити, то блок Initial Guess взагалі може бути виключений зі структури, хоча працездатність Algebraic Constraint водночас. Однак бібліотечний варіант цього блока не передбачає роботи з комплексними величинами.

Математичні методи оптимізації широко висвітлені в технічній і математичній літературі. Практичне значення щодо технічних систем мають оптимізаційні методи нульового порядку [35–42]. Ці методи не передбачають обчислення перших і других похідних цільової функції, а обмежуються лише обчисленням значень самої цільової функції в декількох точках, що лежать в околиці зображувальної точки, щоб прийняти рішення про подальше її переміщення в просторі параметрів оптимізації. Найбільш потужним і універсальним потрібно визнати симплекс-метод Нелдера - Міда [33, 34].

Блок-схема, яка пояснює роботу цього методу, зображена на рисунку 2.3.

Сутність цього методу полягає в порівнянні значень функції в $(n+1)$ вершинах багатогранника в просторі параметрів оптимізації, що називається симплексом. Далі симплекс переміщується в напрямку оптимальної точки за допомогою спеціальних процедур. Порівняння і переміщення виконуються циклічно доти, поки не буде досягнута умова збіжності симплекса. Симплекс може переміщатися за допомогою трьох операцій – відображення, розтягування і стиснення. Усі три процедури здійснюються щодо центра ваги, який обчислюється як середнє арифметичне для всіх координат точок, які не є максимальними. Виконання однієї з трьох перерахованих вище операцій залежить від результатів порівняння оптимальних значень функції, а саме порівняння максимального значення f_{max1} , наступного за найбільшим значення f_{max2} і найменшого значення f_{min} . Координати, відповідні цим значенням функції, позначені відповідно точками x_{max1} , x_{max2} , x_{min} , де координата кожної точки є n -

мірний вектор. Величини коефіцієнтів відбиття, стиснення і розтягування приймаються відповідно: $\alpha = 1$, $\beta = 0,5$, $\gamma = 2$. У результаті виконання тієї чи іншої операції точка, у якій значення функції максимальне, замінюється на одну з нових точок: відображену $x_{отр}$, отриману в результаті стиснення $x_{сж}$ або розтягування $x_{рост}$. Алгоритм виконання симплекс-методу Нелдера – Міда можна розбити на описану нижче послідовність кроків.

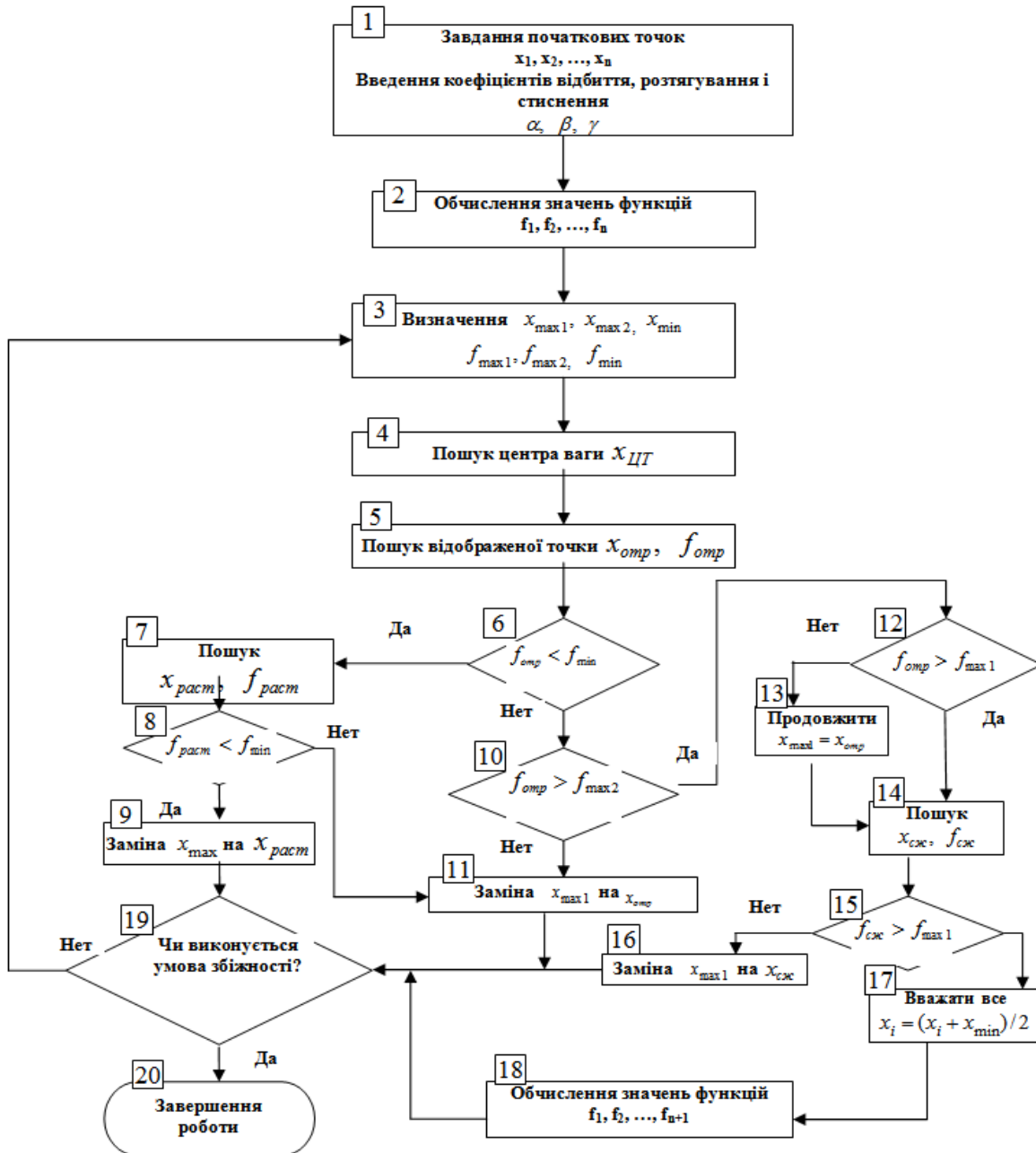


Рисунок 2.3 - Блок-схема алгоритму роботи симплекс-методу Нелдера - Міда

Спочатку довільно задаються початкові значення координат $x1=(x1, \dots, xn)$, де n - кількість змінних цільової функції (n -мірний простір). Потім формуються

ще n точок (або вершин симплекса) з координатами $x_2 = x_1 + ke_1$, $x_3 = x_1 + ke_2$, ..., $x_n = x_1 + ke_n$, де k – довільна довжина кроку, а e_j – одиничний вектор.

Обчислюються значення цільових функцій у вершинах симплекса $f_1=f(x_1)$, $f_2=f(x_2)$... $f_n=f(x_n)$, здійснюється пошук найбільшого значення функції f_{max1} , наступного за найбільшим значення цільової функції f_{max2} , і пошук найменшого значення f_{min} , а також визначаються відповідні їм координати x_{max1} , x_{max2} , ... x_{min}

1. За наведеною нижче формулою 2.1 обчислюються координати центра ваги $x_{ЦГ}$ і значення цільової функції в точці $f_{ЦГ}$:

$$x_{ЦГ} = \frac{1}{n} \sum_{i \neq \max 1} x_i, \quad (2.1)$$

де точка x_{max1} є вершиною симплекса, у якій цільова функція досягає свого максимального значення.

2. Щодо центра ваги $x_{ЦГ}$ здійснюється операція відображення координат точки x_{max1} , у якій функція має максимальне значення. Як результат отримаємо точку $x_{отр}$, яка обчислюється за формулою:

$$x_{отр} = (1 + \alpha)x_{ЦГ} - \alpha x_{\max 1}.$$

3. Значення функцій f_{min} і $f_{отр}$ порівнюються. Якщо $f_{отр} < f_{min}$, то здійснюється операція розтягування в напрямку від центра ваги до точки $x_{сж}$, описаної в пункті 6.

Якщо $f_{отр} > f_{min}$ і $f_{отр} < f_{max2}$, то x_{max1} замінюється $x_{отр}$ і переходимо до пункту 12 – перевірці умов збіжності.

Якщо $f_{отр} > f_{min}$ і $f_{отр} > f_{max2}$, то перевіряються умови в пункті 8, а потім здійснюється операція стиснення.

4. Під час виконання операції розтягування здійснюється пошук координат точки $x_{раст}$, отриманої в результаті розтягування, за формулою:

$$x_{раст} = \gamma x_{отр} + (1 - \gamma)x_{ЦГ}.$$

Далі виконується пункт 7.

5. Якщо $f_{раст} < f_{min}$, то здійснюється заміна точки x_{max1} на $x_{раст}$.

Якщо $f_{раст} > f_{min}$, то точка $x_{раст}$ відкидається і відбувається заміна точки x_{max1} точкою $x_{отр}$.

Далі перевіряються умови збіжності в пункті 12.

6. Якщо $f_{отр} > f_{max1}$, то безпосередньо виконується пункт 9 – операція стиснення.

Якщо $f_{отр} < f_{max1}$, то стиснення виконується після заміни x_{max1} на $x_{отр}$.

7. При виконанні операції стиснення здійснюється пошук координат точки $x_{сж}$ за такою формулою: $x_{сж} = \beta x_{\max 1} + (1 - \beta)x_{ЦГ}$.

Здійснюється перехід на порівняння в пункті 10.

8. Порівнюються значення $f_{c_{ж}}$ і f_{max1} .

Якщо $f_{c_{ж}} < f_{max1}$, то координати x_{max1} замінюються на $x_{c_{ж}}$, виконується перевірка на відповідність.

Якщо $f_{c_{ж}} > f_{max1}$, то симплекс зменшується внаслідок виконання дії 1.

9. Здійснюється зменшення розміру симплекса, що полягає в тому, що відстань від кожної точки симплекса до точки x_{min} , що визначає найменше значення, ділиться навпіл, тобто кожна точка x_i замінюється на точку $(x_i + x_{min})/2$. Потім обчислюються значення цільової функції в розрахованих точках і перевіряється умова збіжності.

10. Перевірка збіжності функції заснована на тому, що стандартне відхилення $(n+1)$ -го значення функції має бути менше деякого заданого малого значення. Обчислення відхилення здійснюється за такою формулою:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} (f_i - \bar{f})^2}{n+1}$$

де $\bar{f} = \frac{\sum f_i}{n+1}$.

Якщо умова збіжності не виконується, то здійснюється перехід до пункту 2; якщо умова збіжності виконується, то локальний мінімум знайдений і програма завершує своє виконання.

У системі MATLAB алгоритм методу Нелдера – Міда реалізується у вигляді файл-функції *fminsearch()* [257]. У головній програмі вказується звернення до функції *fminsearch()*, серед параметрів якої потрібно назвати ім'я файл-функції, що доставляє значення цільової функції, а також початкові значення параметрів оптимізації у вигляді вектора. Зі свого боку, використовувана файл-функція може викликати Simulink- або SPS-моделі, за допомогою яких на кінці інтервалу моделювання обчислюється значення цільової функції (або величин, необхідних для її обчислення у викликаній файл-функції). Необхідні значення можуть передаватися у файл-функцію через робочий простір за допомогою блока To Workspace. У такий спосіб можна аналізувати електричні системи, як лінійні, так і нелінійні, у перехідних і сталих режимах.

2.5 Особливості процесу пошукової оптимізації щодо електротехнічних систем

Проведені дослідження підтверджують ефективність постановки і вирішення завдань аналізу та синтезу електротехнічних систем і комплексів із

залученням оптимізаційних алгоритмів. Разом із тим з'являється можливість обійтися без використання складних символічних перетворень, перекласти всю обчислювальну роботу повністю на комп'ютер і отримати результат з високою точністю і без значних витрат часу.

Відзначимо також наступні надзвичайно важливі особливості процесу пошукової оптимізації та поведінки моделі електричної системи, що були виявлені в процесі оптимізації під час розв'язання цієї задачі синтезу у часовому просторі.

По-перше, під час вибору адекватної структури електричної системи ті елементи, які не відповідають такій структурі, *витискаються* з неї. Це проявляється в зміні величини параметра такого невідповідного елемента у бік його крайнього чисельного значення. Величина нев'язки обмежується на деякому значенні, не досягаючи водночас оптимального. Це і є сигналом для видалення такого елемента. Таким чином, *властивість витискання невідповідного елемента* може допомогти розробникові в творчому процесі конструювання структури електричної системи, зокрема, у виключенні невідповідних за типом елементів та заміні їх на дуальні елементи.

По-друге, необхідно обов'язково підкреслити, що під час вирішення розглянутого завдання кількість параметрів оптимізації було штучно збільшено на одиницю. Фактично, до параметрів оптимізації зараховані не тільки величини опорів і ємностей, а й величина початкової напруги на накопичувальному конденсаторі. Насправді напруга на конденсаторі задана і відома, і вона може бути виключена із параметрів оптимізації. У цьому випадку постановка задачі оптимізації буде більш суворою, оскільки припускає знаходження тільки єдиного, глобального оптимуму, відповідного перерахованим параметрам. Однак пошук глобального оптимуму, зазвичай, вимагає великих витрат комп'ютерного часу. Він може бути утруднений складною конфігурацією поверхні оптимізації, рельєф якої передбачити заздалегідь практично неможливо. Навмисне збільшення кількості параметрів оптимізації *звільняє* параметри, оскільки дозволяє програмі оптимізації знайти будь-який локальний оптимум. Який саме локальний оптимум буде знайдений в процесі оптимізації, залежить від стратегії пошукової оптимізації, що визначається алгоритмом оптимізації, а також залежить від заданих початкових значень параметрів оптимізації. Отже, *звільнення параметрів оптимізації* може зумовити скорочення комп'ютерного часу, що витрачається на проведення оптимізації, оскільки перерахунок до дійсних параметрів зазвичай здійснюється за допомогою досить простих обчислювальних процедур. Зрозуміло, правила перерахунку необхідно визначати адекватно виходячи з фундаментальних фізичних законів в їхньому математичному відображенні.

Контрольні запитання до розділу 2

1. У чому полягає математична сутність задачі пошукової оптимізації стосовно поставленого завдання покращання енергетичних показників систем електропостачання?
2. Які величини визначені як параметри оптимізації?
3. Як визначаються цілі, які необхідно досягти процесом пошукової оптимізації?
4. Як формуються цільові функції під час оптимізації?
5. Які методи і програмні засоби можуть застосовуватися для виконання оптимізації режимів роботи систем електропостачання?
6. Розкрийте сутність оптимізації за алгоритмом Нелдера – Міда.
7. У чому полягає сутність властивості системи пошукової оптимізації витискати невідповідний?
8. У чому полягає ідея методу звільнення параметрів оптимізації?

РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТРИФАЗНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ БЕЗ НУЛЬОВОГО ПРОВОДУ

3.1 Еквівалентна розрахункова схема і рівняння трифазної трипровідної системи електропостачання

Розглянемо розробку методу точного знаходження ємностей конденсаторів, що компенсують реактивну потужність несиметричної системи електропостачання, із застосуванням сучасних засобів комп'ютерної математики. Вирішення цього завдання цікаво також і з погляду перевірки і контролю інших, наближених методів розрахунку компенсувальних конденсаторів. Крім того, розроблений підхід може бути використаний під час побудови мікропроцесорних систем управління автоматичними компенсаторами реактивної потужності на основі силової напівпровідникової техніки з метою оптимізації режимів їхньої роботи.

Розглянемо випадок узагальненої трифазної трипровідної системи електропостачання (рис. 3.1).

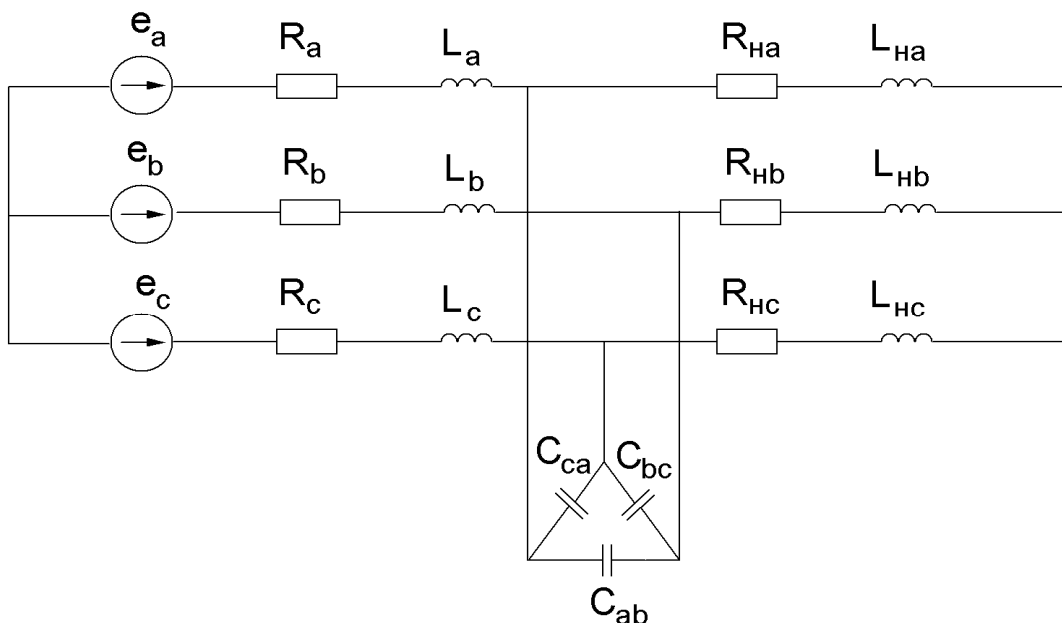


Рисунок 3.1 – Узагальнена схема заміщення трифазної трипровідної системи електропостачання з несиметричним трифазним навантаженням

На підставі цієї схеми можна легко отримати схему з одноплечевим навантаженням, якщо вважати, що опір навантаження однієї з фаз прагне до нескінченності. Якщо ж припустити, що опор однієї з фаз навантаження дорівнює нулю, то отримаємо випадок двоплечевого навантаження [130].

В узагальненій схемі:

e_a, e_b, e_c – трифазна система джерел живлення необмеженої потужності;

$R_a = R_b = R_c$ – активні опори лінії електропередачі;

$L_a = L_b = L_c$ – індуктивності лінії електропередачі;

R_{na}, R_{nb}, R_{nc} – активні опори навантаження;

L_{na}, L_{nb}, L_{nc} – індуктивності навантаження;

C_{ab}, C_{bc}, C_{ca} – компенсувальні конденсатори.

Оскільки в загальному випадку навантаження є несиметричним, то

$$R_{na} \neq R_{nb}, R_{nb} \neq R_{nc}, R_{nc} \neq R_{na};$$

$$L_{na} \neq L_{nb}, L_{nb} \neq L_{nc}, L_{nc} \neq L_{na},$$

а для компенсувальних конденсаторів справедлива відповідна нерівність:

$$C_{ab} \neq C_{bc}, C_{bc} \neq C_{ca}, C_{ca} \neq C_{ab}.$$

Фактично замість конденсаторних елементів можуть використовуватися індуктивні елементи, що спостерігатиметься для випадків зміни характеру навантажувального опору окремих фаз.

Зважаючи на несиметрію системи вона не може розглядатися пофазно, а тому необхідно скласти рівняння для вихідної топології. Позначимо

$$z_a = R_a + j\omega L_a; z_b = R_b + j\omega L_b; z_c = R_c + j\omega L_c;$$

$$z_{na} = R_{na} + j\omega L_{na}; z_{nb} = R_{nb} + j\omega L_{nb}; z_{nc} = R_{nc} + j\omega L_{nc}$$

$$z_{ab} = \frac{1}{j\omega c_{ab}}; z_{bc} = \frac{1}{j\omega c_{bc}}; z_{ca} = \frac{1}{j\omega c_{ca}}.$$

Орієнтований граф з виділеним деревом (суцільні жирні лінії) наведено на рисунку 3.2.

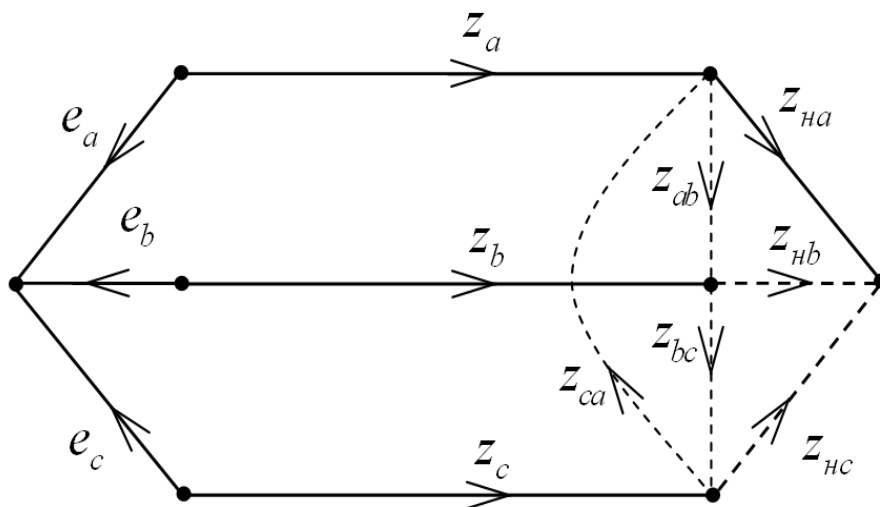


Рисунок 3.2 – Орієнтований граф системи електропостачання

Топологічна матриця контур-ватка [43, 190] для обраної системи віток і зв'язків буде такою:

$$F = \begin{array}{ccccccc} \begin{array}{c} -1 \\ \\ +1 \\ +1 \\ +1 \end{array} & \begin{array}{c} +1 \\ -1 \\ \\ -1 \\ \\ \end{array} & \begin{array}{c} \\ +1 \\ -1 \\ \\ -1 \end{array} & \begin{array}{c} +1 \\ \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{array} & \begin{array}{c} -1 \\ +1 \\ \\ +1 \\ \\ \end{array} & \begin{array}{c} \\ -1 \\ 1 \\ \\ +1 \end{array} & \begin{array}{c} \\ \\ \\ -1 \\ -1 \end{array} & \begin{array}{c} zab \\ zbc \\ zca \\ znb \\ znc \end{array} \\ \begin{array}{c} ea \\ eb \\ ec \\ za \\ zb \\ zc \\ zna \end{array} & & & & & & & \end{array}$$

Виражаючи напруги на пасивних елементах згідно із законом Ома в імпедансній формі, за допомогою топологічної матриці можна записати таку систему рівнянь за законом Кірхгофа для напруг системи особливих контурів:

$$\begin{aligned} e_a - e_b - z_a i_a + z_b i_b - z_{ab} i_{ab} &= 0, \\ e_b - e_c - z_b i_b + z_c i_c - z_{bc} i_{bc} &= 0, \\ e_c - e_a + z_a i_a - z_c i_c - z_{ca} i_{ca} &= 0, \\ e_b - e_a + z_a i_a - z_b i_b + z_{na} i_{na} - z_{nb} i_{nb} &= 0, \\ e_c - e_a + z_a i_a - z_c i_c + z_{na} i_{na} - z_{nc} i_{nc} &= 0. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Доповнимо отримані рівняння (3.1) системою рівнянь Кірхгофа для струмів особливих перерізів:

$$\begin{aligned} i_{ab} - i_{ca} - i_{nb} - i_{nc} - i_a &= 0, \\ i_{bc} - i_{ab} + i_{nb} - i_b &= 0, \\ i_{ca} - i_{bc} + i_{nc} - i_c &= 0, \\ i_{na} + i_{nb} + i_{nc} &= 0. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Повна система рівнянь складається з систем (3.1) і (3.2), що утворюють дев'ять рівнянь для дев'яти невідомих струмів: фазних – i_a, i_b, i_c ; навантажувальних – i_{na}, i_{nb}, i_{nc} ; струмів компенсувальних елементів – i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} .

3.2 Дослідження несиметричного режиму

У несиметричному режимі елементи СКП відсутні. Тому необхідно припустити, що опори z_{ab}, z_{bc}, z_{ca} у рівняннях моделі прагнуть до нескінченності.

Скористаємося математичним пакетом MathCAD [258]. Його перевагою, насамперед, є простота обробки комплексних чисел, за допомогою яких

вирішуються рівняння сталих режимів лінійних систем електропостачання за синусоїдальних впливів із боку живильної системи. Система MathCAD оснащена простим засобом пошукової оптимізації, який реалізується операторами `given` і `find`. Передбачається, що на робочому аркуші після оператора `given` буде записана система рівнянь, які забезпечуються спеціальним символом логічної рівності $=$ («Ctrl» + «=»). Оператор `find()` передбачає перерахування всередині дужок шуканих змінних, що беруть участь у записі рівнянь між `given` і `find()`, а результат роботи оператора `find()` видається у вигляді вектора, значення якого зазвичай присвоюється пойменованій змінній. Пошук самого рішення здійснюється вбудованими програмними засобами пошукової оптимізації, внаслідок роботи яких повинні бути задоволені рівняння, записані між `given` і `find()`. До групи цих рівнянь можуть бути додані математичні вирази необхідних обмежень, які також враховуються під час роботи засобів пошукової оптимізації.

Зрештою, група `given-find()` фактично забезпечує пошукову оптимізацію з урахуванням обмежень.

Зазначені засоби пошукової оптимізації дозволяють вирішити завдання аналізу режиму системи електропостачання. Разом із тим завдання аналізу може бути вирішено в лінійній постановці як альтернатива лінійним матричним методам, які використовують, наприклад, перетворення відповідної матриці коефіцієнтів.

Хід і результати вирішення з розрахунком на несиметричність режиму при зазначених параметрах наведено на рисунку 3.3, що відображає структуру робочого аркуша.

РОЗРАХУНОК НЕСКОМПЕНСОВАНОГО НЕСИМЕТРИЧНОГО РЕЖИМУ

в и х і д н і д а н і :

$$w := 100 \cdot \pi \quad w = 314.159 \quad j := \sqrt{-1} \quad j = i \quad a := \exp\left(j \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \quad a = -0.5 + 0.866i$$

$$E_m := 100 \quad e_a := E_m \quad e_b := E_m \cdot a^2 \quad e_c := E_m \cdot a$$

$$e_a = 100 \quad e_b = -50 - 86.603i \quad e_c = -50 + 86.603i$$

$$r_a := 0.1 \quad r_b := 0.1 \quad r_c := 0.1 \quad l_a := 0.001 \quad l_b := 0.001 \quad l_c := 0.001$$

$$R_a := 0.7 \quad R_b := 1 \quad R_c := 2 \quad L_a := 0.005 \quad L_b := 0.01 \quad L_c := 0.04$$

$$z_a := r_a + j \cdot w \cdot l_a \quad z_b := r_b + j \cdot w \cdot l_b \quad z_c := r_c + j \cdot w \cdot l_c$$

$$z_{na} := R_a + j \cdot w \cdot L_a \quad z_{nb} := R_b + j \cdot w \cdot L_b \quad z_{nc} := R_c + j \cdot w \cdot L_c$$

$$z_a = 0.1 + 0.314i \quad z_{na} = 0.7 + 1.571i \quad z_b = 0.1 + 0.314i \quad z_{nb} = 1 + 3.142i$$

$$z_c = 0.1 + 0.314i \quad z_{nc} = 2 + 12.566i$$

Рисунок 3.3 – Робочий аркуш розрахунку несиметричного режиму системи електропостачання

симетрувальні елементи відсутні:

$$z_{ab} := 10^9 \quad z_{bc} := 10^9 \quad z_{ca} := 10^9$$

початкові наближення струмів, які необхідно знайти:

$$i_a := 30 - j \cdot 30 \quad i_b := -36 + j \cdot 21 \quad i_c := 4 + j \cdot 9 \quad i_{na} := 30 - j \cdot 30 \quad i_{nb} := -36 + j \cdot 21$$

$$i_{nc} := 4 + j \cdot 9$$

$$i_{ab} := j \quad i_{bc} := j \quad i_{ca} := j$$

розрахунок режиму без компенсації реактивної потужності:

Given

$$e_a - e_b + z_b \cdot i_b - z_{ab} \cdot i_{ab} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$e_b - e_c + z_c \cdot i_c - z_{bc} \cdot i_{bc} - z_b \cdot i_b = 0$$

$$e_a - e_c + z_c \cdot i_c + z_{ca} \cdot i_{ca} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$e_a - e_c + z_c \cdot i_c + z_{nc} \cdot i_{nc} - z_{na} \cdot i_{na} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$i_{na} + i_{nb} + i_{nc} = 0$$

$$i_a - i_{ab} + i_{ca} + i_{nb} + i_{nc} = 0$$

$$i_b + i_{ab} - i_{bc} - i_{nb} = 0$$

$$i_c + i_{bc} - i_{ca} - i_{nc} = 0$$

$$x := \text{Find}(i_a, i_b, i_c, i_{ab}, i_{bc}, i_{ca}, i_{na}, i_{nb}, i_{nc})$$

	0
0	19.1562946-24.9975771i
1	-25.8445705+17.1096233i
2	6.688276+7.8879538i
3	1.3227155·10 ⁻⁷ +7.6675822i·10 ⁻⁸
4	6.1503576·10 ⁻⁹ -1.6390675i·10 ⁻⁷
5	-1.384219·10 ⁻⁷ +8.7230931i·10 ⁻⁸
6	19.1562943-24.9975771i
7	-25.8445704+17.1096235i
8	6.6882761+7.8879536i

$$i_a := x_0 \quad i_b := x_1 \quad i_c := x_2$$

$$i_a = 19.156 - 24.998i \quad i_b = -25.845 + 17.11i \quad i_c = 6.688 + 7.888i$$

$$i_{na} := x_6 \quad i_{nb} := x_7 \quad i_{nc} := x_8$$

$$i_{na} = 19.156 - 24.998i \quad i_{nb} = -25.845 + 17.11i \quad i_{nc} = 6.688 + 7.888i$$

$$i_{ab} := x_3 \quad i_{bc} := x_4 \quad i_{ca} := x_5 \quad i_{ab} = 1.323 \times 10^{-7} + 7.668i \times 10^{-8}$$

$$i_{bc} = 6.15 \times 10^{-9} - 1.639i \times 10^{-7} \quad i_{ca} = -1.384 \times 10^{-7} + 8.723i \times 10^{-8}$$

розрахунок кутів між струмами і живильними напругами:

$$\arg(i_a) - \arg(e_a) = -0.917 \quad \arg(i_b) - \arg(e_b) = 4.651 \quad \arg(i_c) - \arg(e_c) = -1.227$$

амплітуди фазних струмів:

$$|i_a| = 31.494 \quad |i_b| = 30.995 \quad |i_c| = 10.342$$

косинуси кутів зсуву фазних струмів відносно живильних напруг

Продовження рисунка 3.3

$$\cos(\arg(x_0) - \arg(ea)) = 0.60826125 \cos(\arg(x_1) - \arg(eb)) = -0.0611419 \cos(\arg(x_2) - \arg(ec)) = 0.33717825$$

напруги на затисках навантаження відносно загального вузла джерел:

$$U_a := ea - (ra + j \cdot w \cdot la) \cdot x_0 \quad U_a = 90.231 - 3.518i \quad |U_a| = 90.3 \quad \arg(U_a) \cdot \frac{180}{\pi} = -2.233$$

$$U_b := eb - (rb + j \cdot w \cdot lb) \cdot x_1 \quad U_b = -42.04 - 80.194i \quad |U_b| = 90.546 \quad \arg(U_b) \cdot \frac{180}{\pi} = -117.665$$

$$U_c := ec - (rc + j \cdot w \cdot lc) \cdot x_2 \quad U_c = -48.191 + 83.713i \quad |U_c| = 96.593 \quad \arg(U_c) \cdot \frac{180}{\pi} = 119.928$$

напруги на загальному вузлі навантаження відносно загального вузла джерел:

$$U_0 := U_a - z_{na} \cdot x_6 \quad U_0 = 37.556 - 16.111i \quad U_{U0} := U_b - z_{nb} \cdot x_7 \quad U_{U0} = 37.556 - 16.111i$$

$$U_{UU0} := U_c - z_{nc} \cdot x_8$$

$$U_{UU0} = 37.556 - 16.111i \quad |U_{U0}| = 40.865 \quad \arg(U_{U0}) \cdot \frac{180}{\pi} = -23.218$$

повні потужності, що віддаються джерелами по фазах

$$S_a := 0.5 e_a \cdot \overline{i_a} \quad S_a = 957.814728 + 1249.878856i \quad S_b := 0.5 e_b \cdot \overline{i_b} \quad S_b = -94.754 + 1546.843i$$

$$S_c := 0.5 e_c \cdot \overline{i_c} \quad S_c = 174.352 + 486.81i$$

сумарні:

$$S_{sum} := S_a + S_b + S_c \quad S_{sum} = 1037.412 + 3283.532i \quad |S_{sum}| = 3443.516$$

втрати на лінії електропередачі:

$$S_{ta} := 0.5 z_a \cdot \overline{i_a \cdot i_a} \quad S_{ta} = 49.592 + 155.798i \quad S_{tb} := 0.5 z_b \cdot \overline{i_b \cdot i_b} \quad S_{tb} = 48.034 + 150.903i$$

$$S_{tc} := 0.5 z_c \cdot \overline{i_c \cdot i_c} \quad S_{tc} = 5.348 + 16.8i$$

сумарні: $S_t := S_{ta} + S_{tb} + S_{tc} \quad S_t = 102.974 + 323.502i$

потужності, які споживаються несиметричним навантаженням:

$$S_{na} := 0.5 z_{na} \cdot \overline{i_{na} \cdot i_{na}} \quad S_{na} = 347.145 + 778.991i$$

$$S_{nb} := 0.5 z_{nb} \cdot \overline{i_{nb} \cdot i_{nb}} \quad S_{nb} = 480.341 + 1509.034i$$

$$S_{nc} := 0.5 z_{nc} \cdot \overline{i_{nc} \cdot i_{nc}} \quad S_{nc} = 106.953 + 672.005i$$

сумарні: $S_n := S_{na} + S_{nb} + S_{nc}$

$$S_n = 934.438 + 2960.03i \quad |S_n| = 3104.022$$

перевірка балансу потужностей:

$$S_t + S_n = 1037.412 + 3283.532i \quad S_{sum} = 1037.412 + 3283.532i$$

Закінчення рисунка 3.3

Як видно з результатів розрахунку, представлених на робочому аркуші, система працює в різко несиметричному режимі, коли зсув нейтралі досягає до 40 % порівняно з амплітудою напруги живильних джерел. Струм джерела фази В протікає в напрямку, протилежному необхідному для віддачі джерелом потужності споживачам. У системі електропостачання наявна реактивна потужність, яка більш ніж у три рази перевищує активну потужність, споживану навантаженням.

3.3 Розрахунок параметрів компенсувального пристрою у симетричному режимі

На рисунку 3.4 представлений фрагмент робочого аркуша, що забезпечує розрахунок параметрів симетро-компенсувального пристрою з використанням пошукової оптимізації. Тут комплексні опори, що компенсують реактивну потужність, включені в змінні повної системи рівнянь моделі системи електропостачання. Умови компенсації реактивної потужності сформульовані у вигляді критерію рівності нулю реактивної потужності, що віддається кожним джерелом симетричної трифазної системи синусоїдальних напруг. Разом із тим використовуються спряжені комплекси струмів відповідно до теорії потужності на змінному струмі [90]. Для реалізації симетро-компенсувального пристрою винятково реактивними елементами, що не вносять додаткових активних втрат, введені відповідні обмеження на відсутність дійсних частин у опорів цих елементів. Додатково введено також обмеження на знак уявної частини опорів симетро-компенсувальних елементів, який відповідає саме ємкісному характеру цих елементів.

РОЗРАХУНОК КОНДЕНСАТОРІВ, ЩО КОМПЕНСУЮТЬ РЕАКТИВНУ ПОТУЖНІСТЬ ЗАВДАННЯ ПОЧАТКОВИХ ЗНАЧЕНЬ ШУКАНИХ ЗМІННИХ:

$$\begin{aligned} z_{ab} &:= 10 - j \cdot 20\Omega & z_{bc} &:= 10 - j \cdot 20\Omega & z_{ca} &:= 10 \cdot -j \cdot 20\Omega & i_a &:= 30 - j \cdot 30 & i_b &:= -36 + j \cdot 21 & i_c &:= 4 + j \cdot 9 \\ i_{na} &:= 30 - j \cdot 30 & i_{nb} &:= -36 + j \cdot 21 & i_{nc} &:= 4 + j \cdot 9 & i_{ab} &:= j & i_{bc} &:= j & i_{ca} &:= j \end{aligned}$$

Given

Рівняння електричної рівноваги:

$$\begin{aligned} e_a - e_b + z_b \cdot i_b - z_{ab} \cdot i_{ab} - z_a \cdot i_a &= 0 \\ e_b - e_c + z_c \cdot i_c - z_{bc} \cdot i_{bc} - z_b \cdot i_b &= 0 \\ e_a - e_c + z_c \cdot i_c + z_{ca} \cdot i_{ca} - z_a \cdot i_a &= 0 \\ e_a - e_b + z_b \cdot i_b + z_{nb} \cdot i_{nb} - z_{na} \cdot i_{na} - z_a \cdot i_a &= 0 \\ e_a - e_c + z_c \cdot i_c + z_{nc} \cdot i_{nc} - z_{na} \cdot i_{na} - z_a \cdot i_a &= 0 \\ i_{na} + i_{nb} + i_{nc} &= 0 \\ i_a - i_{ab} + i_{ca} + i_{nb} + i_{nc} &= 0 \\ i_b + i_{ab} - i_{bc} - i_{nb} &= 0 \\ i_c + i_{bc} - i_{ca} - i_{nc} &= 0 \end{aligned}$$

Умови компенсації реактивної потужності:

$$\text{Im}(e_a \cdot \bar{i}_a) = 0 \quad \text{Im}(e_b \cdot \bar{i}_b) = 0 \quad \text{Im}(e_c \cdot \bar{i}_c) = 0$$

Умови реалізації компенсації реактивними елементами:

$$\text{Re}(z_{ab}) = 0 \quad \text{Re}(z_{bc}) = 0 \quad \text{Re}(z_{ca}) = 0$$

Умови реалізації компенсації конденсаторними елементами:

$$\text{Im}(z_{ab}) < 0 \quad \text{Im}(z_{bc}) < 0 \quad \text{Im}(z_{ca}) < 0$$

$$x := \text{Find}(i_a, i_b, i_c, i_{ab}, i_{bc}, i_{ca}, i_{na}, i_{nb}, i_{nc}, z_{ab}, z_{bc}, z_{ca})$$

Рисунок 3.4 – Розрахунок параметрів симетро-компенсувального пристрою

	0
0	7.7540446
1	-3.87702236.7151996i
2	-3.8770223+6.7151996i
3	-14.5299812+26.6569026i
4	9.84371640.2416673i
x = 5	-0.96997391.5886762i
6	21.314051928.2455788i
7	-28.2507199+20.1833703i
8	6.9366679+8.0622084i
9	-5.6625684i
10	-17.4590606i
11	-92.3581873i

Перевірка збігу фазних струмів і напруг:

$$\arg(x_0) - \arg(ea) = 0 \quad \arg(x_1) - \arg(eb) = 0 \quad \arg(x_2) - \arg(ec) = 0$$

Перевірка рівності фазних струмів:

$$|x_0| = 7.754045 \quad |x_1| = 7.754045 \quad |x_2| = 7.754045$$

Обчислення ємностей компенсувальних конденсаторів:

$$C_{ab} := \frac{-1}{w \cdot (\text{Im}(x_9))} \quad C_{ab} = 5.621299 \times 10^{-4}$$

$$C_{bc} := \frac{-1}{w \cdot (\text{Im}(x_{10}))} \quad C_{bc} = 1.8231788 \times 10^{-4}$$

$$C_{ca} := \frac{-1}{w \cdot (\text{Im}(x_{11}))} \quad C_{ca} = 3.446472 \times 10^{-5}$$

Продовження рисунку 3.4

Це співвідноситься з найбільш поширеним випадком резистивно-індуктивного навантаження в усіх трьох фазах. Однак у загальному випадку змішаного характеру фазних навантажень це обмеження можна зняти.

Результати пошукової оптимізації представлені вектором x , у якому значення змінних подані в тій саме послідовності, у якій вони перераховані в дужках оператора `find()`. Після знаходження результатів пошукової оптимізації здійснюється перевірка збігу фаз струмів і напруг, рівності амплітуд струмів у лініях передачі, а також визначені ємності конденсаторів симетрокомпенсувального пристрою, що забезпечує повне симетрування режиму та компенсацію реактивної потужності в системі електропостачання з несиметричним трифазним навантаженням. На рисунку 3.5 подано розрахунок показників у системі електропостачання з підключеним симетрокомпенсувальним пристроєм, параметри якого визначені за допомогою пошукової оптимізації.

РОЗРАХУНОК СИМЕТРИЧНОГО СКОМПЕНСОВАНОГО РЕЖИМУ

ВИХІДНІ ДАННІ:

СИМЕТРУЮЧІ ЕЛЕМЕНТИ ПРИСУТНІ:

$$z_{ab} := -j \cdot 5.662568 \quad z_{bc} := -j \cdot 17.459060 \quad z_{ca} := -j \cdot 92.358187$$

ПОЧАТКОВІ НАБЛИЖЕННЯ ШУКАНИХ СТРУМІВ:

$$i_a := 30 - j \cdot 30 \quad i_b := -36 + j \cdot 21 \quad i_c := 4 + j \cdot 9 \quad i_{na} := 30 - j \cdot 30 \quad i_{nb} := -36 + j \cdot 21 \quad i_{nc} := 4 + j \cdot 9$$

$$i_{ab} := j \quad i_{bc} := j \quad i_{ca} := j$$

РОЗРАХУНОК РЕЖИМУ З КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ:

Given

$$e_a - e_b + z_b \cdot i_b - z_{ab} \cdot i_{ab} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$e_b - e_c + z_c \cdot i_c - z_{bc} \cdot i_{bc} - z_b \cdot i_b = 0$$

$$e_a - e_c + z_c \cdot i_c + z_{ca} \cdot i_{ca} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$e_a - e_b + z_b \cdot i_b + z_{nb} \cdot i_{nb} - z_{na} \cdot i_{na} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$e_a - e_c + z_c \cdot i_c + z_{nc} \cdot i_{nc} - z_{na} \cdot i_{na} - z_a \cdot i_a = 0$$

$$i_{na} + i_{nb} + i_{nc} = 0$$

$$i_a - i_{ab} + i_{ca} + i_{nb} + i_{nc} = 0$$

$$i_b + i_{ab} - i_{bc} - i_{nb} = 0$$

$$i_c + i_{bc} - i_{ca} - i_{nc} = 0$$

$$x := \text{Find}(i_a, i_b, i_c, i_{ab}, i_{bc}, i_{ca}, i_{na}, i_{nb}, i_{nc})$$

	0
0	7.7540445 +2.1290028i·10 ⁻⁷
1	-3.8770222 -6.7151998i
2	-3.8770223 +6.7151996i
3	-14.5299813 +26.6569028i
4	9.8437164 -0.2416673i
5	-0.9699739 -1.5886762i
6	21.3140519 -28.2455788i
7	-28.2507199 +20.1833703i
8	6.9366679 +8.0622084i

$$i_a := x_0 \quad i_b := x_1 \quad i_c := x_2 \quad i_a = 7.754 + 2.129i \times 10^{-7} \quad i_b = -3.877 - 6.715i \quad i_c = -3.877 + 6.715i$$

$$i_{na} := x_6 \quad i_{nb} := x_7 \quad i_{nc} := x_8 \quad i_{na} = 21.314 - 28.246i \quad i_{nb} = -28.251 + 20.183i \quad i_{nc} = 6.937 + 8.062i$$

$$i_{ab} := x_3 \quad i_{bc} := x_4 \quad i_{ca} := x_5 \quad i_{ab} = -14.53 + 26.657i \quad i_{bc} = 9.844 - 0.242i \quad i_{ca} = -0.97 - 1.589i$$

$$\arg(i_a) - \arg(e_a) = 2.746 \times 10^{-8} \quad \arg(i_b) - \arg(e_b) = 2.61 \times 10^{-8} \quad \arg(i_c) - \arg(e_c) = 7.283 \times 10^{-11}$$

АМПЛІТУДИ ФАЗНИХ СТРУМІВ:

$$|i_a| = 7.754 \quad |i_b| = 7.754 \quad |i_c| = 7.754$$

КУТИ МІЖ СТРУМАМИ І ЖИВИЛЬНИМИ НАПРУГАМИ:

КОСІНУСИ КУТІВ ЗСУВУ ФАЗНИХ СТРУМІВ

$$\cos(\arg(x_0) - \arg(e_a)) = 1 \quad \cos(\arg(x_1) - \arg(e_b)) = 1 \quad \cos(\arg(x_2) - \arg(e_c)) = 1$$

НАПРУГИ НА ЗАТИСКАЧАХ НАВАНТАЖЕННЯ

$$U_a := e_a - (r_a + j \cdot w \cdot l_a) \cdot x_0 \quad U_a = 99.225 - 2.436i \quad |U_a| = 99.254 \quad \arg(U_a) \cdot \frac{180}{\pi} = -1.406$$

$$U_b := e_b - (r_b + j \cdot w \cdot l_b) \cdot x_1 \quad U_b = -51.722 - 84.713i \quad |U_b| = 99.254 \quad \arg(U_b) \cdot \frac{180}{\pi} = -121.406$$

$$U_c := e_c - (r_c + j \cdot w \cdot l_c) \cdot x_2 \quad U_c = -47.503 + 87.149i \quad |U_c| = 99.254 \quad \arg(U_c) \cdot \frac{180}{\pi} = 118.594$$

Рисунок 3.5 – Розрахунок режиму повної компенсації реактивної потужності за допомогою конденсаторного симетро-компенсувального пристрою

НАПРУГИ НА ЗАГАЛЬНОМУ ВУЗЛІ НАВАНТАЖЕННЯ ВІДНОСНО ЗАГАЛЬНОГО ВУЗЛА ДЖЕРЕЛ:

$$U_0 := U_a - z_{na} \cdot x_6 \quad U_0 = 39.937 - 16.144i \quad U_{U0} := U_b - z_{nb} \cdot x_7 \quad U_{U0} = 39.937 - 16.144i$$

$$U_{UU0} := U_c - z_{nc} \cdot x_8 \quad U_{UU0} = 39.937 - 16.144i \quad |U_0| = 43.076 \quad \arg(U_0) \cdot \frac{180}{\pi} = -22.011$$

ПОВНІ ПОТУЖНОСТІ, ЩО ВІДДАЮТЬСЯ ДЖЕРЕЛАМИ ПО ФАЗАХ:

$$S_a := 0.5 \cdot e_a \cdot \overline{i_a} = 387.702 - 0i \quad S_b := 0.5 \cdot e_b \cdot \overline{i_b} = 387.702 - 0i \quad S_c := 0.5 \cdot e_c \cdot \overline{i_c} = 387.702$$

$$\text{с у м а р н і: } S_{\text{sum}} := S_a + S_b + S_c \quad S_{\text{sum}} = 1163.107 - 0i \quad |S_{\text{sum}}| = 1163.107$$

ВТРАТИ НА ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ:

$$S_{ta} := 0.5 \cdot z_a \cdot \overline{i_a \cdot i_a} = 3.006 + 9.444i \quad S_{tb} := 0.5 \cdot z_b \cdot \overline{i_b \cdot i_b} = 3.006 + 9.444i \quad S_{tc} := 0.5 \cdot z_c \cdot \overline{i_c \cdot i_c} = 3.006 + 9.444i$$

СУМАРНІ:

$$S_t := S_{ta} + S_{tb} + S_{tc} = 9.019 + 28.333i$$

ПОТУЖНОСТІ, ЩО СПОЖИВАЮТЬСЯ НЕСИМЕТРИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ:

$$S_{na} := 0.5 \cdot z_{na} \cdot \overline{i_{na} \cdot i_{na}} = 438.236 + 983.398i \quad S_{nb} := 0.5 \cdot z_{nb} \cdot \overline{i_{nb} \cdot i_{nb}} = 602.736 + 1893.55i$$

$$S_{nc} := 0.5 \cdot z_{nc} \cdot \overline{i_{nc} \cdot i_{nc}} = 113.117 + 710.732i$$

$$\text{с у м а р н і: } S_n := S_{na} + S_{nb} + S_{nc} = 1154.088 + 3587.681i \quad |S_n| = 3768.736$$

ПОТУЖНОСТІ, ЩО СПОЖИВАЮТЬСЯ КОМПЕНСУВАЛЬНИМИ КОНДЕНСАТОРАМИ:

$$S_{Cab} := 0.5 \cdot z_{ab} \cdot \overline{i_{ab} \cdot i_{ab}} = -2609.625i$$

$$S_{Cbc} := 0.5 \cdot z_{bc} \cdot \overline{i_{bc} \cdot i_{bc}} = -846.39i$$

$$S_{Cca} := 0.5 \cdot z_{ca} \cdot \overline{i_{ca} \cdot i_{ca}} = -159.999i$$

$$\text{с у м м а р н і: } S_C := S_{Cab} + S_{Cbc} + S_{Cca} = -3616.014i$$

ПЕРЕВІРКА БАЛАНСУ ПОТУЖНОСТЕЙ:

$$S_t + S_n + S_C = 1163.107 - 0i \quad S_{\text{sum}} = 1163.107 - 0i$$

Продовження рисунку 3.5

Ці результати доцільно порівняти з відповідними показниками, розрахованими для несиметричного некомпенсованого режиму.

З порівняння видно, що амплітуди струмів, що віддаються джерелами живлення і протікають у лініях електропередачі, істотно знизилися. Струм фази А зменшився в $31,494/7,754$, тобто в 4,062 рази, фази В – у $30,995/7,754 = 3,997$ рази, фази С – у $10,342/7,754 = 1,334$ рази. Оскільки потужність, що виділяється струмом на двополюснику, пропорційна квадрату струму, що протікає через нього, то відповідні теплові втрати зменшаться відповідно в 16,5 (фаза А), 15,98 (фаза В), 1,78 (фаза С) раз, що істотно поліпшить ефективність роботи лінії електропередачі. Помітно покращилася напруга на навантаженні порівняно з несиметричним режимом. Раніше амплітуди напруг на вузлах навантаження щодо загального вузла джерел становили 90,3 В, 90,546 В, 96,593 В. За повної компенсації реактивної потужності амплітуди напруг всіх трьох фаз однакові та дорівнюють 99,254 В, тобто ці напруги складають абсолютно симетричну систему, напруга якої незначно (лише на 0,746 %) зменшилася порівняно з напругою на затискачах генератора. Унаслідок цього покращилося споживання

електроенергії навантаженнями: у несиметричному режимі повна потужність навантаження становила $934,438 + j2960,03$, а за повної компенсації реактивної потужності ця величина склала $1154,088 + j3587,68$. Особливо потрібно відзначити поліпшення роботи джерел електроенергії: у несиметричному режимі комплексна сумарна потужність становила $1037,412 + j3283,532$ ВА, під час під'єднання симетро-компенсувального пристрою потужність джерел склала 1163,107 Вт, крім того ця потужність рівномірно (по 387,702 Вт) розподілилася між усіма трьома джерелами і передається при граничній одиничній величині коефіцієнта потужності, оскільки струми в кожній з фаз повністю збігалися фазовими кутами з їхньою напругою. Крім того важливо, що синхронний генератор, що виробляє електроенергію, звільняється від небажаного впливу реактивної потужності з боку навантаження і лінії електропередач, величина якої в цьому випадку в три рази перевищує корисну активну потужність. Усе це свідчить про надзвичайну ефективності симетрування і повної компенсації реактивної потужності, здійснені під час точного розрахунку симетро-компенсувального пристрою та відповідного режиму запропонованим методом пошукової оптимізації.

Для порівняння наведемо результати аналітичного розрахунку параметрів симетро-компенсувального пристрою за методикою, викладеною в [164].

3.4 Аналітичний розрахунок ємностей симетрувальних конденсаторів

Описаний в [164] метод визначення параметрів симетрувальних елементів полягає у такому. Попередньо, за амплітудами несиметричних струмів, знайдений струм зворотної послідовності, а потім, відповідно до методики [164] – амплітуди струмів I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} , які протікають у вітках симетрувальних елементів для подавлення струму зворотної послідовності. Це і повинно забезпечити симетрування струмів у лініях електропередачі. Зауважимо, що в наведеному розрахунку запропоновано числовий розв'язок задачі, що дозволяє не враховувати необхідність розгляду трьох варіантів розташування вектора струму компенсувальної зворотної послідовності, як це пропонується в [164]. Рішення, отримане за допомогою оператора given-find, передбачає варіант симетрування двома конденсаторами, про що свідчить малий струм I_{ca} в отриманому рішенні. Опори конденсаторів визначені згідно із законом Ома, після чого з урахуванням частоти живильних джерел знайдені їхні ємності.

На рисунку 3.6 наведені результати розрахунку режиму в симетрованій по вказаній методиці системі електропостачання.

Аналітичне розв'язання задачі симетрування з використанням формул В. А. Венікова

$$ia = 19.156 - 24.998i \quad ib = -25.845 + 17.11i \quad ic = 6.688 + 7.888i$$

$$lpr := \frac{ia + a \cdot ib + a^2 \cdot ic}{3} \quad lob := \frac{ia + a^2 \cdot ib + a \cdot ic}{3}$$

$$lpr = 6.916 - 21.89i \quad lob = 12.24 - 3.107i$$

$$|lpr| = 22.957 \quad |lob| = 12.628$$

$$Mlob := |lob| \quad Mlob = 12.628 \quad Arpr := \arg(lpr) \quad Arob := \arg(lob)$$

$$Arpr = -1.265 \quad Arob = -0.249 \quad Arpr_gr := \frac{Arpr \cdot 180}{\pi} \quad Arob_gr := \frac{Arob \cdot 180}{\pi}$$

$$Arpr_gr = -72.466 \quad Arob_gr = -14.244$$

Перевірки лінійних струмів, що виражені симетричними складовими;

$$lpr + lob = 19.156 - 24.998i \quad ia = 19.156 - 24.998i$$

$$a^2 \cdot lpr + a \cdot lob = -25.845 + 17.11i \quad ib = -25.845 + 17.11i$$

$$a \cdot lpr + a^2 \cdot lob = 6.688 + 7.888i \quad ic = 6.688 + 7.888i$$

$$ia + ib + ic = 0$$

Обчислення струмів симетрувальних елементів:

$$lab := 1 \quad lbc := 1 \quad lca := 1 \quad j = i$$

Given

$$lob = \frac{j}{\sqrt{3}} \cdot (lbc + a \cdot lca + a^2 \cdot lab)$$

$$\text{Im}(lab) = 0 \quad \text{Im}(lbc) = 0 \quad \text{Im}(lca) = 0$$

$$\text{Re}(lab) > 0 \quad \text{Re}(lbc) > 0 \quad \text{Re}(lca) > 0$$

$$T = \begin{pmatrix} 24.48 \\ 6.858 \\ 2.474 \times 10^{-9} \end{pmatrix}$$

$$T := \text{Find}(lab, lbc, lca)$$

$$lab := T_0 \quad lab = 24.48 \quad lbc := T_1 \quad lbc = 6.858 \quad lca := T_2 \quad lca = 2.474 \times 10^{-9}$$

Визначення параметрів симетрувальних елементів:

$$zab := \frac{|ea - eb|}{lab \cdot j} \quad zab = -7.075i \quad Cab := \frac{1}{|zab| \cdot w} \quad Cab = 4.499 \times 10^{-4}$$

$$zbc := \frac{|eb - ec|}{lbc \cdot j} \quad zbc = -25.256i \quad Cbc := \frac{1}{|zbc| \cdot w} \quad Cbc = 1.26 \times 10^{-4} \quad zca = 1 \times 10^7$$

$$ia := 30 - j \cdot 30 \quad ib := -36 + j \cdot 21 \quad ic := 4 + j \cdot 9$$

$$ina := 30 - j \cdot 30 \quad inb := -36 + j \cdot 21 \quad inc := 4 + j \cdot 9$$

$$jab := j \quad jbc := j \quad jca := j \quad zca = 1 \times 10^7$$

Розрахунок симетрованого режиму:

Given

$$ea - eb + zb \cdot ib - zab \cdot iab - za \cdot ia = 0$$

$$eb - ec + zc \cdot ic - zbc \cdot ibc - zb \cdot ib = 0$$

$$ea - ec + zc \cdot ic + zca \cdot ica - za \cdot ia = 0$$

$$ea - eb + zb \cdot ib + znb \cdot inb - zna \cdot ina - za \cdot ia = 0$$

$$ea - ec + zc \cdot ic + znc \cdot inc - zna \cdot ina - za \cdot ia = 0$$

$$ina + inb + inc = 0$$

Рисунок 3.6 – Аналітичний розрахунок параметрів симетрувального пристрою

$$ia - iab + ica + inb + inc = 0$$

$$ib + iab - ibc - inb = 0$$

$$ic + ibc - ica - inc = 0$$

	0	
0	9.4046017	-6.7222931i
1	-9.5212944	-1.3444552i
2	0.1166927	+8.0667483i
3	-11.4758633	+20.694386i
4	6.700943	-0.0789061i
5	-1.4442509·10 ⁻⁵	+8.8041519i·10 ⁻⁶
6	20.8804506	-27.4166704i
7	-27.6981007	+19.428837i
8	6.8176501	+7.9878334i

x := Find (ia, ib, ic, iab, ibc, ica, ina, inb, inc)

$$ia := x_0 \quad ib := x_1 \quad ic := x_2$$

$$ia = 9.405 - 6.722i \quad ib = -9.521 - 1.344i \quad ic = 0.117 + 8.067i$$

$$iab := x_3 = -11.476 + 20.694i \quad ibc := x_4 = 6.701 - 0.079i \quad ica := x_5 = -1.444 \times 10^{-5} + 8.804i \times 10^{-6}$$

Розрахунок кутів між точками і живильними напругами:

$$\arg(ia) - \arg(ea) = -0.621$$

$$\frac{\arg(x_3) \cdot 180}{\pi} = 119.01$$

$$\arg(ib) - \arg(eb) = -0.907$$

$$\frac{\arg(x_4) \cdot 180}{\pi} = -0.675$$

$$\arg(ic) - \arg(ec) = -0.538$$

Амплітуди фазних струмів:

$$|ia| = 11.56 \quad |ib| = 9.616 \quad |ic| = 8.068$$

Косинуси кутів зсуву фазних струмів відносно живильних напруг:

$$\cos(\arg(x_0) - \arg(ea)) = 0.81354029$$

$$\cos(\arg(x_1) - \arg(eb)) = 0.6161745933$$

$$\cos(\arg(x_2) - \arg(ec)) = 0.85870261832$$

Напруги на затискачах навантаження відносно загального вузла джерел:

$$U_a := ea - (ra + j \cdot w \cdot la) \cdot x_0 \quad U_a = 96.948 - 2.282i \quad |U_a| = 96.975$$

$$U_b := eb - (rb + j \cdot w \cdot lb) \cdot x_1 \quad U_b = -49.47 - 83.477i \quad |U_b| = 97.035$$

$$U_c := ec - (rc + j \cdot w \cdot lc) \cdot x_2 \quad U_c = -47.477 + 85.759i \quad |U_c| = 98.024$$

Напруги на загальному вузлі навантаження відносно загального вузла джерел:

$$U_0 := U_a - z_{na} \cdot x_6 \quad U_0 = 39.265 - 15.89i$$

$$U_{U0} := U_b - z_{nb} \cdot x_7 \quad U_{U0} = 39.265 - 15.89i$$

$$U_{UU0} := U_c - z_{nc} \cdot x_8 \quad U_{UU0} = 39.265 - 15.89i \quad |U_0| = 42.359 \quad \arg(U_0) \cdot \frac{180}{\pi} = -22.032$$

Повні потужності, що віддаються джерелами по фазах:

$$S_a := 0.5 \cdot ea \cdot \overline{ia} \quad S_a = 470.230086 + 336.114655i$$

$$S_b := 0.5 \cdot eb \cdot \overline{ib} \quad S_b = 296.249 + 378.673i$$

$$S_c := 0.5 \cdot ec \cdot \overline{ic} \quad S_c = 346.383 + 206.722i$$

$$\text{с у м м а р н і: } S_{sum} := S_a + S_b + S_c \quad S_{sum} = 1112.862 + 921.509i \quad |S_{sum}| = 1444.867$$

Втрати на лінії електропередачі:

$$S_{ta} := 0.5 \cdot z_a \cdot \overline{ia} \cdot ia \quad S_{ta} = 6.682 + 20.991i \quad S_{tb} := 0.5 \cdot z_b \cdot \overline{ib} \cdot ib \quad S_{tb} = 4.623 + 14.524i$$

Продовження рисунку 3.6

$$\underline{S_{tc}} := 0.5 \cdot z_c \cdot \overline{ic \cdot ic} \quad S_{tc} = 3.254 + 10.224i$$

$$\text{с у м а р н и е : } \underline{S_t} := S_{ta} + S_{tb} + S_{tc} \quad S_t = 14.559 + 45.739i$$

Потужності, що споживаються несиметричним навантаженням:

$$S_{na} = 415.683 + 932.792i$$

$$\underline{S_{nb}} := 0.5 \cdot z_{nb} \cdot \overline{x_7 \cdot x_7} \quad S_{nb} = 572.332 + 1798.035i$$

$$\underline{S_{nc}} := 0.5 \cdot z_{nc} \cdot \overline{x_8 \cdot x_8} \quad S_{nc} = 110.286 + 692.946i$$

$$\text{с у м а р н і : } \underline{S_n} := S_{na} + S_{nb} + S_{nc} \quad S_n = 1098.302 + 3423.773i \quad |S_n| = 3595.62$$

Потужності, що споживаються компенсувальними конденсаторами:

$$S_{Cab} := 0.5 \cdot z_{ab} \cdot \overline{iab \cdot iab} = -1980.903i \quad S_{Cbc} := 0.5 \cdot z_{bc} \cdot \overline{ibc \cdot ibc} = -567.099i$$

$$S_{Cca} := 0.5 \cdot z_{ca} \cdot \overline{ica \cdot ica} = 1.43 \times 10^{-3}$$

$$\text{с у м а р н і : } S_C := S_{Cab} + S_{Cbc} + S_{Cca} = 0.001 - 2548.003i$$

Перевірка балансу потужностей:

$$S_t + S_n + S_C = 1112.862 + 921.509i \quad S_{sum} = 1112.862 + 921.509i$$

Закінчення рисунку 3.6

Як видно з отриманого рішення, струми в лініях істотно знизилися, проте повного симетрування не досягнуто. Це пояснюється, з одного боку, прийнятим допущенням про те, що під час симетрування напруги на навантаженні дуже близькі до номінальної напруги [164]. Однак це не зовсім коректно, тому що навіть за повної компенсації реактивної потужності на лінії будуть спостерігатися деякі втрати напруги. З іншого боку, в аналітичній методиці не враховується реактивна потужність, обумовлена індуктивним характером опору самих ліній передач. При точному виконанні завдання конденсатори компенсують і цю реактивну потужність.

Проведені дослідження і розрахунки показують, що аналітичний метод не забезпечує точного симетрування режиму в трифазній системі. Це пояснюється неточностями у визначенні напруг симетрованого режиму під час розрахунків величин симетрувальних елементів, а також не враховуються реактивні втрати в лініях електропередачі. До оптимального рішення веде режим точної компенсації реактивної потужності у всій системі, здійснений на основі числових оптимізаційних методів. Варто зазначити, однак, що аналітичний розрахунок можна використовувати для визначення початкового наближення числового розрахунку, що може скоротити витрати комп'ютерного часу для досягнення оптимального рішення повного симетрування і компенсації реактивної потужності.

3.5 Розрахунок параметрів пристрою компенсації реактивної потужності з використанням SPS-моделі та пошукової оптимізації

У попередніх розділах була розглянута можливість повної компенсації реактивної потужності та симетрування фазних струмів мережі, які були засновані на розробці спеціальної математичної моделі, реалізованої за допомогою програми MathCAD. Такий підхід вимагає складання рівнянь моделі та реалізації в ній умов повної компенсації реактивної потужності. Використання системи SimPowerSystem (SPS) дозволяє виключити етап запису рівнянь, оскільки рівняння формуються автоматично за видом візуальної моделі [188, 189].

На рисунку 3.7 наведена комп'ютерна модель трифазної системи електропостачання за несиметричного активно-індуктивного навантаження, реалізована в SimPowerSystem. Модель складається з джерел напруг, значення напруг і струмів з яких знімаються віртуальними вольтметрами і амперметрами. З вимірювальних приладів значення передаються на пристрій розрахунку активної і реактивної потужностей. Значення індуктивностей, опорів z_a , z_b , z_c і навантаження z_{na} , z_{nb} , z_{nc} встановлені відповідно до зазначених вище параметрів. Для визначення впливу несиметрії на роботу системи електропостачання в моделі шляхом встановлення властивостей міжфазних конденсаторів Open circuit було вимкнено компенсувальний пристрій.

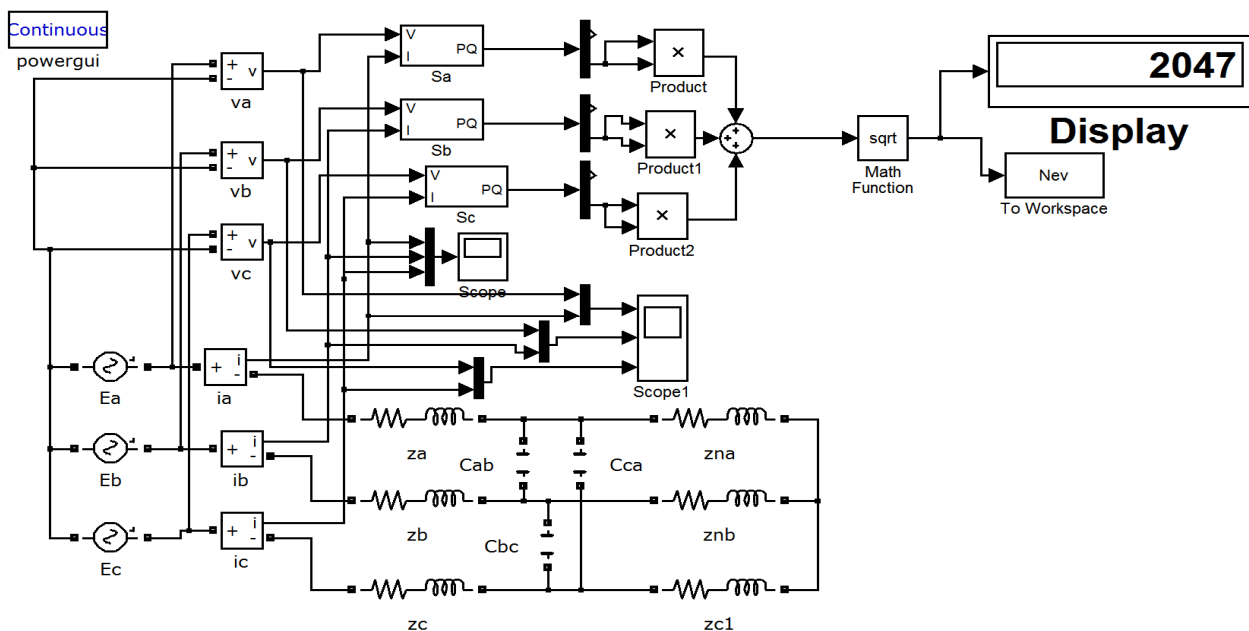


Рисунок 3.7 – Візуальна модель трифазної СЕП у несиметричному режимі за відсутності пристрою компенсації реактивної потужності

Модель дозволяє вимірювати струми і напруги, а також виводить їх миттєві значення на віртуальні осцилографи. На осцилографі Scope відображаються значення миттєвих струмів мережі, а на Scope1 виводяться одночасно струми і напруги джерел кожної окремої фази. На реєстратор Display виводиться середньоквадратичний функціонал реактивних потужностей. Він складений за формулою $\sqrt{Q_a^2 + Q_b^2 + Q_c^2}$, і це значення дозволяє робити висновки про величину реактивної потужності в трифазній системі електропостачання. Під час роботи моделі використовувався метод stiff 23s Розенброка. При цьому крок інтегрування дорівнював 0,0001 с. Час прогону моделі складав 0,06 с, що є достатнім для виходу струмів і напруг на сталий режим.

На рисунку 3.8 наведені часові діаграми струмів у лініях електропередачі для несиметричного режиму, які свідчать про значні амплітуди цих струмів і їх істотну несиметрію: в фазах А і В амплітуди струмів перевищують 30 А, а в фазі С – більше 10 А.

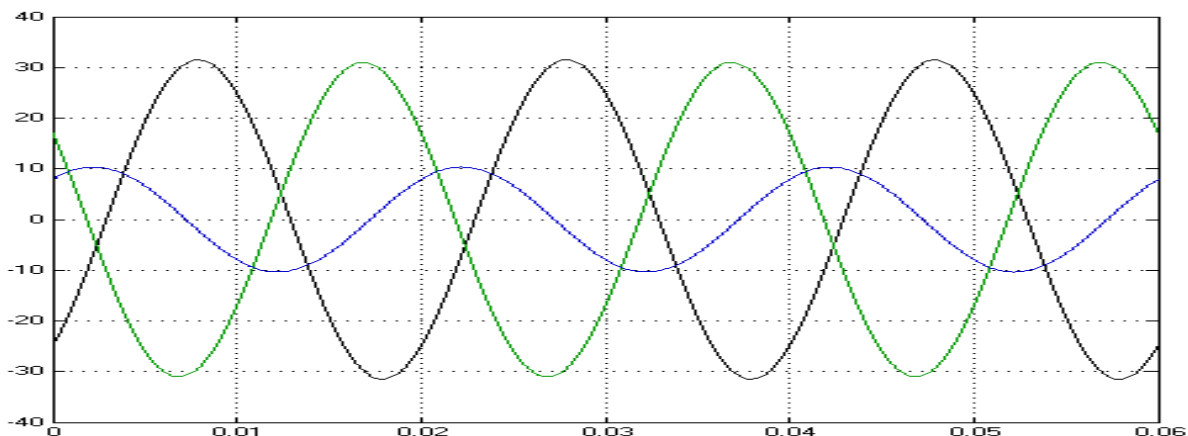


Рисунок 3.8 – Струми у фазах системи електропостачання за відсутності компенсації реактивної потужності

Ці значення в точності збігаються з відповідними значеннями, отриманими за допомогою розрахунку в системі MathCAD, поданого в попередніх розділах. Значення середньоквадратичного функціоналу досягає значної величини (2047 Var). Усі ці показники свідчать про достатньо несприятливий режим роботи системи електропостачання за несиметричного навантаження. На рисунку 3.9 наведена комп'ютерна модель трифазної системи електропостачання з пристроєм компенсації реактивної потужності, яка дозволяє визначити оптимальні умови компенсації. Конденсатори під'єднані до затискачів навантаження за схемою трикутника. Ємності конденсаторів представлені змінними – C_{ab} , C_{bc} , C_{ca} . Ці параметри, з одного боку, присутні у вікні властивостей кожного з конденсаторів, з іншого – використовуються в програмних модулях як змінні оптимізації.

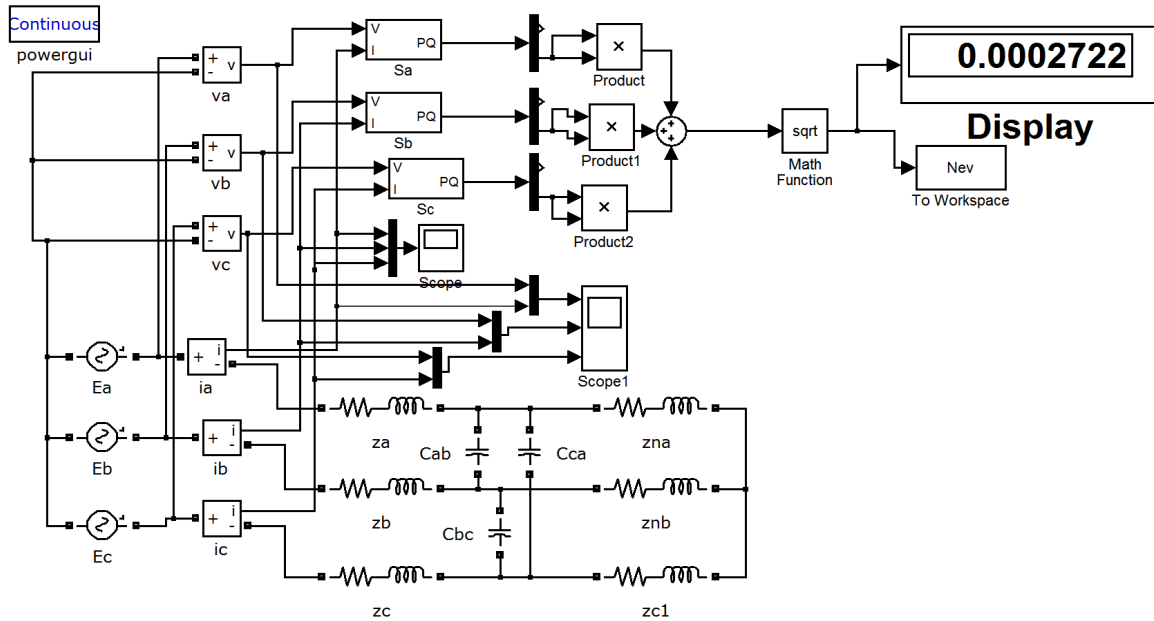


Рисунок 3.9 – Візуальна модель трифазної системи електропостачання з симетро-компенсувальним пристроєм після виконання пошукової оптимізації

Модель працює спільно з програмними модулями, написаними на мові програмування MATLAB. Зміст програмних модулів подано на рисунку 3.10.

warning off

global Cab Cbc Cca Nst Nev

Nst=0

Y=fminsearch('func_s3fnesim',[7 10 20])

Nst

function Nev=func_s3fnesim(x)

global Cab Cbc Cca Nst Nev

Cab=abs(x(1)*1E-6)

Cbc=abs(x(2)*1E-6)

Cca=abs(x(3)*1E-6)

sim s3fnesim3

Nev

Nst=Nst+1

1)

2)

Рисунок 3.10 – Тексти програм: 1) – головна функція; 2) – файл-функція

Викликаюча функція оголошує глобальними всі змінні, необхідні для роботи моделі і файл-функції, що доставляє значення цільової функції, яка підлягає оптимізації. До них належать параметри симетро-компенсувальних конденсаторів, величина цільової функції Nev і кількість обчислень цільової функції Nst. Далі йде виклик вбудованої файл-функції `fminsearch()`, яка практично і запускає процес пошукової оптимізації. Параметрами функції `fminsearch()` у мінімальній їхній кількості є ім'я файл-функції 'func_s3fnesim', що обчислює значення цільової функції, а також вектор початкових значень параметрів оптимізації, які можуть задаватися довільними значеннями. У цьому випадку використано вектор [7 10 20].

У файл-функції значення цільової функції присвоюється глобальній змінній `NeV`, що впливає із заголовка цієї функції. Рядок із деклараціями глобальних змінних фактично скопійований з викликаючої програми. Наступні три оператора привласнюють значення вектора x , що є параметром файл-функції, ємностям конденсаторів, що утворюють симетрично-компенсувальний пристрій. Як видно з тексту програми, це присвоєння здійснюється з коефіцієнтом масштабування 10^{+6} . Це дозволяє програмі оптимізації не оперувати малими величинами ємностей, вираженими у фарадах, а оперувати відносно великими значеннями цих ємностей, вираженими в мікрофарадах. Таким чином, змінні оптимізації нормуються, а в модель передаються дійсні значення ємностей компенсувальних конденсаторів. Крім того, значення, що присвоюються, беруться по модулю, що знімає обмеження на знак змінних оптимізації, укладених у векторі x . Це дозволяє точці пошуку в програмі оптимізації за необхідності плавно переходити в область негативних значень складових вектора x .

Після завдання значень ємностей компенсувальних конденсаторів запускається візуальна модель системи електропостачання за допомогою оператора `sim s3fnesim3`, що вказує ім'я робочого листа з цією візуальною моделлю. У процесі роботи моделі здійснюється інтегрування диференціальних рівнянь системи електропостачання, які автоматично формуються програмою за структурою візуальної моделі. Після досягнення кінцевого моменту часу роботи моделі, обчислене значення цільової функції `NeV` передається у файл-функцію за допомогою елемента `To Workspace`, далі воно надходить у викликаючу програму в розпорядження вбудованої файл-функції `fminsearch()`, яка здійснює процес оптимізації за алгоритмом деформованого багатогранника [33, 34].

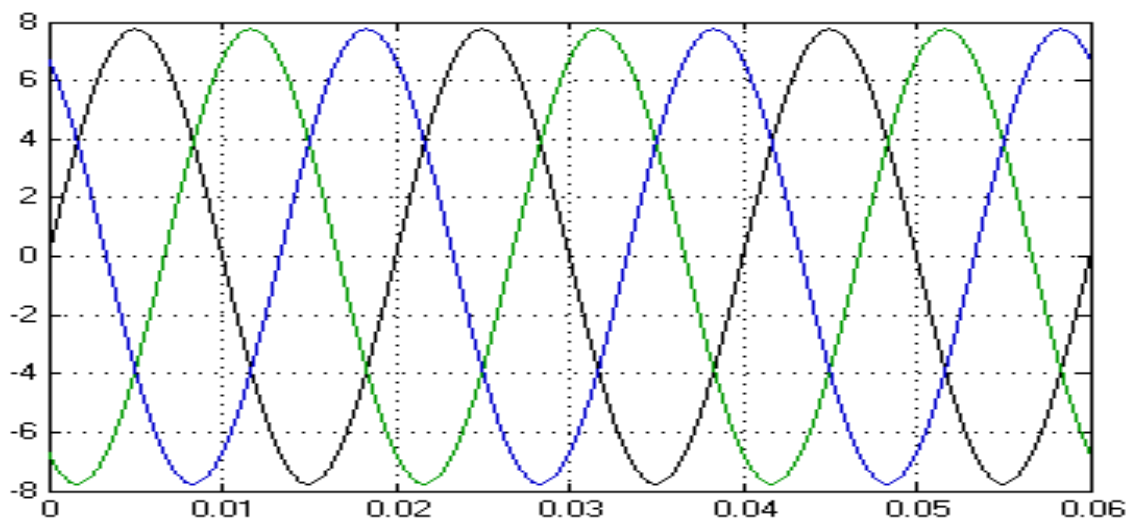
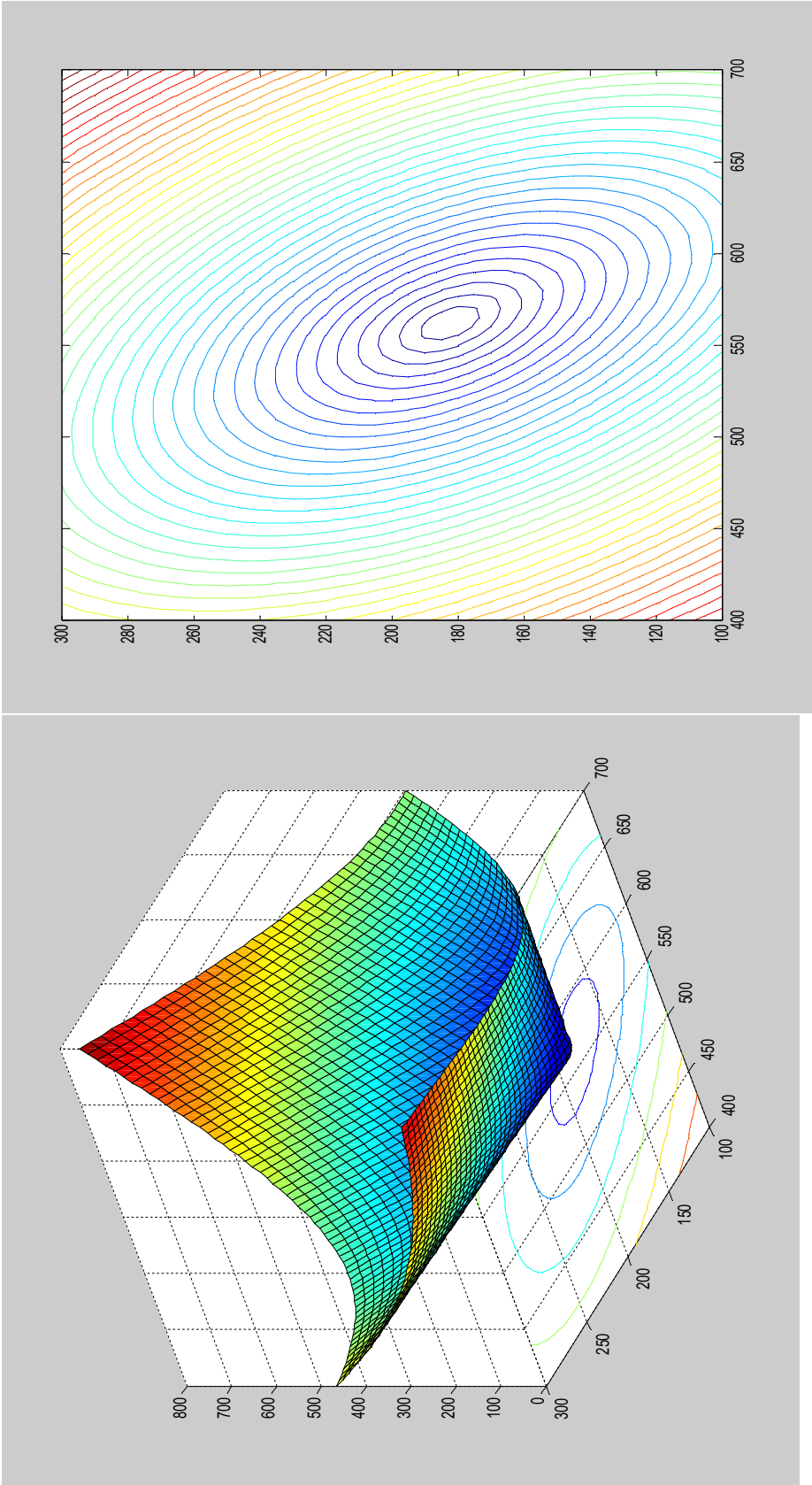


Рисунок 3.11 - Часові діаграми фазних струмів після компенсації реактивної потужності

У процесі оптимізації значення цільової функції зменшилося до 0,000 272 2 ВАр. Знайдені значення ємностей компенсувальних конденсаторів: $C_{ab} = 5,6209E-4$ Ф, $C_{bc} = 1,8229E-4$ Ф, $C_{ca} = 3,4461E-5$ Ф. Ці значення практично до 4-5 значущої цифри збігаються з тими значеннями ємностей симетро-компенсувальних конденсаторів, які були обчислені за допомогою MathCAD у попередніх розділах. На рисунку 3.11 наведені часові діаграми фазних струмів у компенсованій системі, яка змодельована в системі СИМПАТ [303]. Амплітуди фазних струмів абсолютно однакові та складають величини 7,754 А, що також збігається зі значеннями, знайденими за допомогою оптимізації в системі MathCAD. Відповідно зменшаться втрати в лініях електропередачі порівняно з несиметричним режимом. Були досліджені також поверхні, що відповідають процесу оптимізації в розв'язаній задачі. Для побудови поверхонь фіксувалось значення ємності одного з компенсувальних конденсаторів, а значення ємностей двох других конденсаторів використовувались як координат площини змінних параметрів, що відбивались на графіках горизонтальними вісями. Вертикальна вісь відображує значення цільової функції N_{ev} відповідно до значень координати на горизонтальній площині. Результати моделювання поверхонь наведені на рисунках 3.12, 3.13, 3.14.

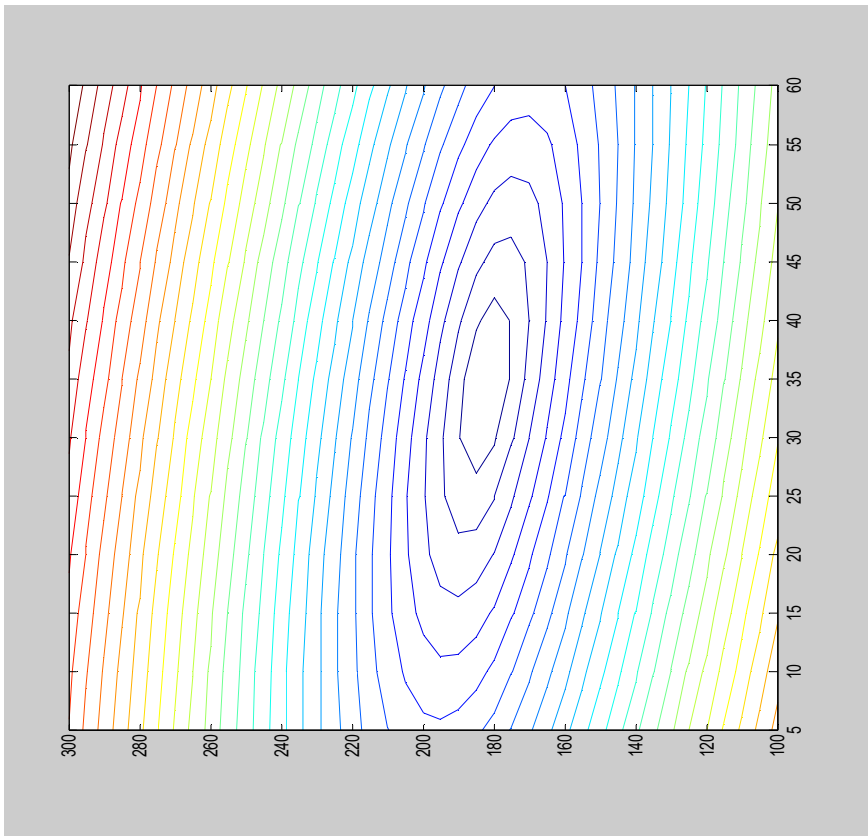
В усіх випадках поверхня оптимізації торкається найнижчою точкою горизонтальної площини в точці з координатами, що відповідають параметрам симетро-компенсувальних пристроїв за умови повної симетризації і компенсації реактивної потужності в системі (рис. 3.12, а, рис. 3.13, а, рис. 3.14, а). До цих же точок звужуються і лінії рівного рівня (рис. 3.12, б, рис. 3.13, б, рис. 3.14, б). Поводження поверхней оптимізації і ліній рівного рівня свідчить про те, що найкращою з погляду регулярності є поверхня для випадку фіксації найменшої ємності C_{ca} . Якщо ж залишати цей параметр і фіксувати інші, то в поверхні з'являються ознаки яру, які ускладнюють і сповільнюють процес пошуку оптимальної точки.



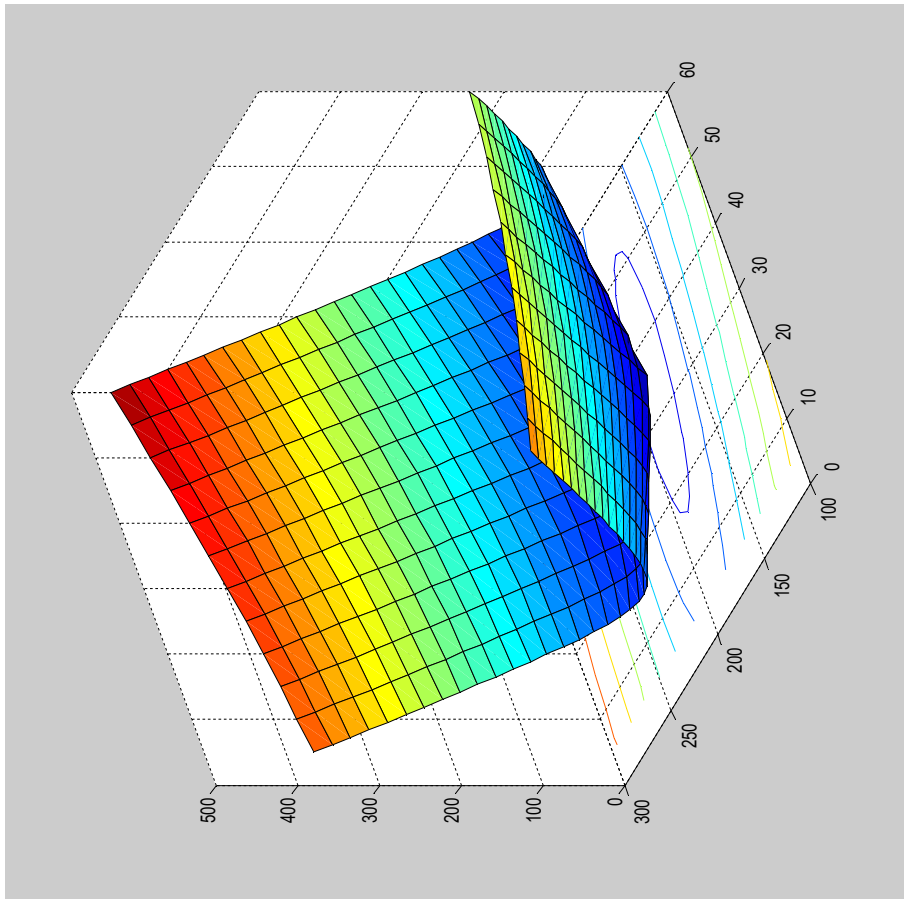
б

а

Рисунок 3.12 – Поверхня оптимізації (а) і лінії рівного рівня (б) при фіксації C_{sa}

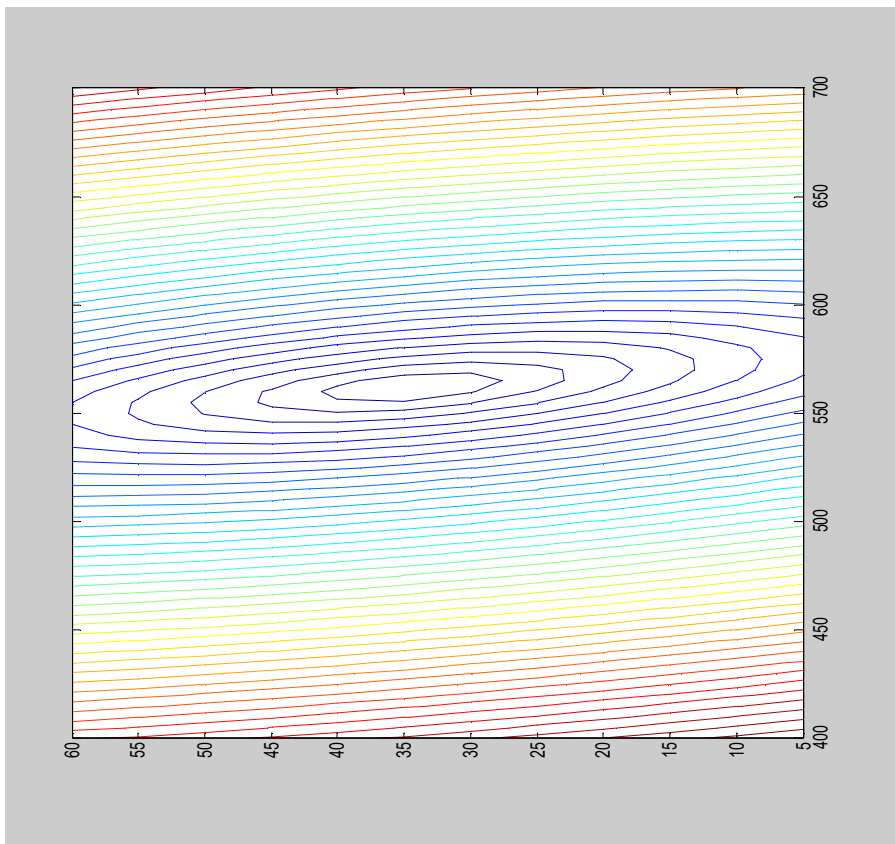


б

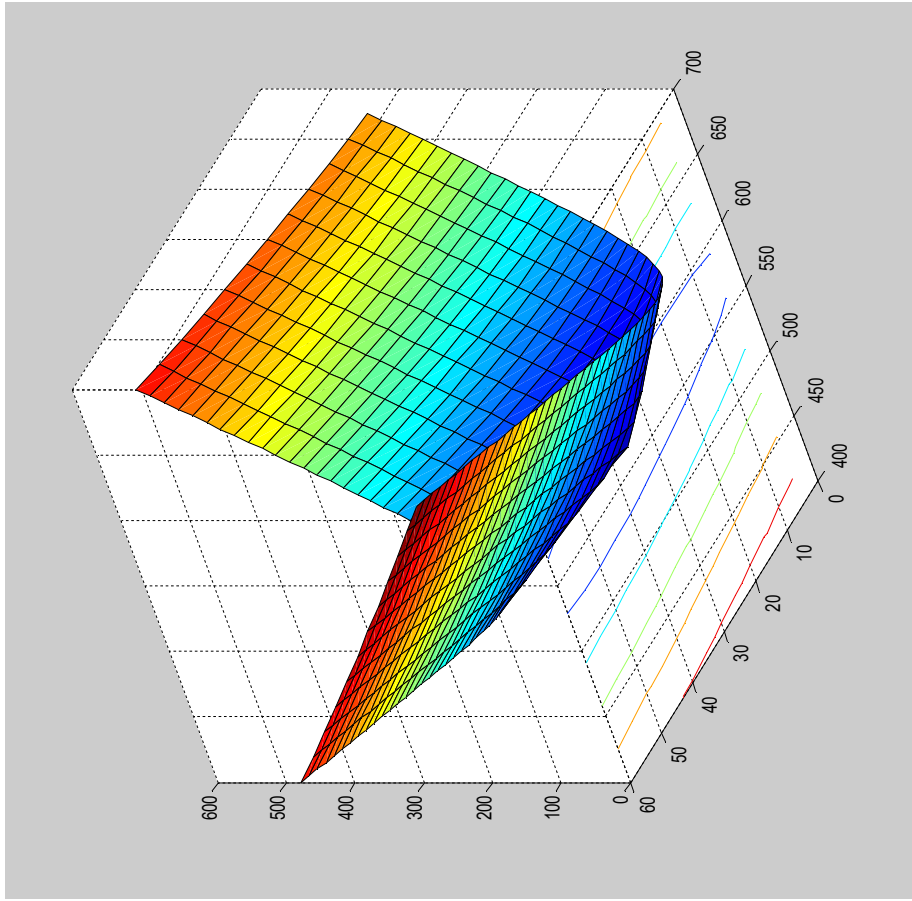


а

Рисунок 3.13 – Поверхня оптимізації (а) і лінії рівного рівня (б) при фіксації S_{ab}



б



а

Рисунок 3.14 – Поверхня оптимізації (а) і лінії рівного рівня (б) при фіксації C_{bc}

Хід процесу оптимізації наочно демонструють графіки залежності величини цільової функції від номеру звернення функції оптимізації до моделі, яка обчислює саме значення цільової функції (рис. 3.15).

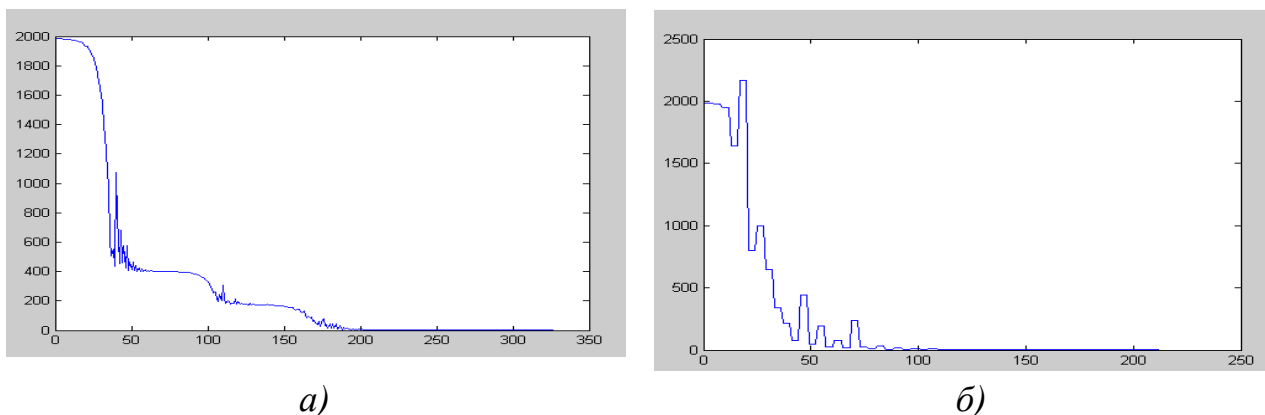


Рисунок 3.15 – Хід процесів оптимізації при застосуванні *fminsearch* (а) та *fminunc* (б).

На завершення можна відзначити, що запропонований метод використання візуальної моделі спільно з пошуковою оптимізацією для точного розрахунку параметрів пристрою компенсації реактивної потужності дає можливість отримати рішення числовими методами з будь-якою завгодно заданою точністю. Разом із тим не потрібно попередньо складати рівняння, що описують модель досліджуваної системи електропостачання. Запропонована методика перспективна для дослідження не тільки лінійних систем електропостачання, а і для систем з нелінійними елементами, зокрема з силовими напівпровідниковими приладами.

Контрольні запитання до розділу 3

1. Який вигляд має узагальнена трифазна трипровідна система електропостачання?
2. Як можна задати несиметричне навантаження системи електропостачання?
3. Як формується орієнтований граф трифазної системи електропостачання?
4. Яким має бути виділене з орієнтованого графу дерево трифазної системи електропостачання?
5. Як формується матриця «контур-вітка» трифазної трипровідної системи електропостачання?
6. Запишіть повну систему рівнянь за допомогою топологічної матриці для трифазної трипровідної системи електропостачання.

7. Як виключити вплив симетро-компенсуючого пристрою для знаходження параметрів несиметричного режиму?
8. Яким засобом пошукової оптимізації оснащений математичний пакет MathCAD?
9. Як обчислюються потужності, що віддаються джерелами по фазах і втрати на лінії електропередачі?
10. Як несиметричне навантаження впливає на енергетичні показники системи електропостачання?
11. Який критерій застосовується для виконання умови компенсації реактивної потужності в трифазній системі?
12. Як задаються умови реалізації компенсуючого пристрою виключно реактивними елементами?
13. Наскільки зменшуються теплові втрати в системі електропостачання після виконання компенсації реактивної потужності?
14. У чому полягає сутність розглянутого аналітичного методу розрахунку ємностей симетрувальних конденсаторів?
15. Чим можна пояснити те, що при аналітичному розрахунку ємностей симетрувальних конденсаторів не вдалося досягнути повного симетрування живильних струмів?
16. Як можна скористуватися результатами аналітичного розрахунку?
17. У чому полягають переваги використання системи SimPowerSystem (SPS)?
18. З яких блоків SPS можна скласти модель трифазної системи електропостачання?
19. Які вимірювальні блоки SPS застосовуються для реалізації критерію оптимізації?
20. Які параметри має функція оптимізації `fminsearch()`?
21. Який алгоритм реалізує файл-функція `fminsearch()`?
22. Яким оператором запускається модель у тілі програми?
23. Яку роль у візуальній моделі відіграє елемент `To Workspace`?

РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТРИФАЗНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З НУЛЬОВИМ ПРОВОДОМ

4.1 Визначення режиму компенсації реактивної потужності за допомогою SPS-моделі і пошукової оптимізації

Трифазні системи електропостачання, що містять нульовий провід, схильні до дії негативних чинників, пов'язаних із виникненням у системі реактивної потужності [168, 170, 171, 175, 176, 182]. Її наявність за лінійного навантаження пов'язана не тільки з реактивним характером навантаження, але і з наявністю в навантаженні несиметрії. Зокрема, системи споживання електроенергії в комунальній сфері та в сільському господарстві передбачають живлення від однієї з фаз трифазної системи через нульовий провід [195]. Підключення до окремих фаз навантаження зазвичай нерівномірні. Це викликає так званий перекіс фаз, який призводить не тільки до нераціональних режимів передачі електроенергії, а й до небезпечних режимів для тих споживачів, які чутливі до відхилень напруги живлення від номінальних значень. Тому симетрування режимів і компенсація реактивної потужності є надзвичайно актуальне завдання, вирішення якого містить у собі важливий резерв підвищення енергоефективності загалом.

Завдання розрахунку симетрувальних пристроїв пов'язана з визначенням як параметрів їхніх елементів, так і електричних величин, пов'язаних із ними, тому в загальному випадку доводиться вирішувати нелінійні рівняння. Для спрощення рішень потрібно вводити спрощувальні припущення, вважаючи, наприклад, що напруги на навантаженні і симетрувальному пристрої збігаються з напругою живильних джерел трифазної системи. Істотним є також питання про типи елементів, що становлять симетрувальний пристрій. Це питання має вирішуватися кожного разу для конкретного складу навантаження і при цьому використовуватися попередньо обчислені діапазони симетрування залежно від параметрів несиметричного навантаження. Особливо актуально це в разі чотирипровідної несиметричної системи електропостачання, що становить найбільші труднощі для симетрування [138, 143].

Тим часом розвиток сучасних обчислювальних методів і засобів дає можливість вирішення зазначених завдань синтезу, симетрування і компенсації реактивної потужності за допомогою чисельних методів, досягаючи заданої точності [73–75].

Метою розділу є застосування числових оптимізаційних методів у поєднанні з математичною моделлю чотирипровідної трифазної системи електропостачання на змінному синусоїдальному струмі з несиметричним

навантаженням для аналізу оптимального режиму і синтезу симетрувального пристрою, що забезпечує одночасно і повну компенсацію реактивної потужності в системі.

Розглянемо узагальнену трифазну систему електропостачання з нульовим проводом (рис. 4.1). Джерела живлення представляються джерелами синусоїдальних напруг з однаковими амплітудами ($E_m = 100$ В), з частотою 50 Гц і фазовими зрушеннями 120 ел. град. відносно один одного. До навантаження енергія живлення доставляється через симетричну лінію електропередачі з активно-індуктивним комплексним опором ($r = 0,1$ Ом; $L = 0,001$ Гн). Навантаження з'єднано в зірку, яка через нульовий провід з'єднується із зіркою джерел напруги. Опір нульового проводу приймається рівним потроєному опору однієї фази лінії електропередачі ($r_0 = 0,3$ Ом; $L_0 = 0,003$ Гн). Навантаження по фазах нерівномірні, і також активно-індуктивного: $R_a = 1,5$ Ом; $L_a = 0,025$ Гн; $R_b = 1,0$ Ом; $L_b = 0,01$ Гн; $R_c = 2,0$ Ом; $L_c = 0,04$ Гн. Необхідно визначити структуру і параметри симетро-компенсувального пристрою, що забезпечує симетрування системи електропостачання та повну компенсацію у ній реактивної потужності.

На рисунку 4.1 наведена модель системи електропостачання для несиметричного режиму. Елементи симетро-компенсувального пристрою вимкнені зі структури моделі за допомогою опції Open circuit у вікні властивостей кожного елемента. Прилади фіксують параметри несиметричного режиму, за якого повні потужності, що віддаються джерелами по фазах А, В і С, відповідно дорівнюють $191,29 + j592,7$; $320,35 + j1170$ і $34,419 + j418,1$ ВА.

Цей режим відповідає коефіцієнтам потужності по фазах відповідно: 0,307; 0,264 та 0,082.

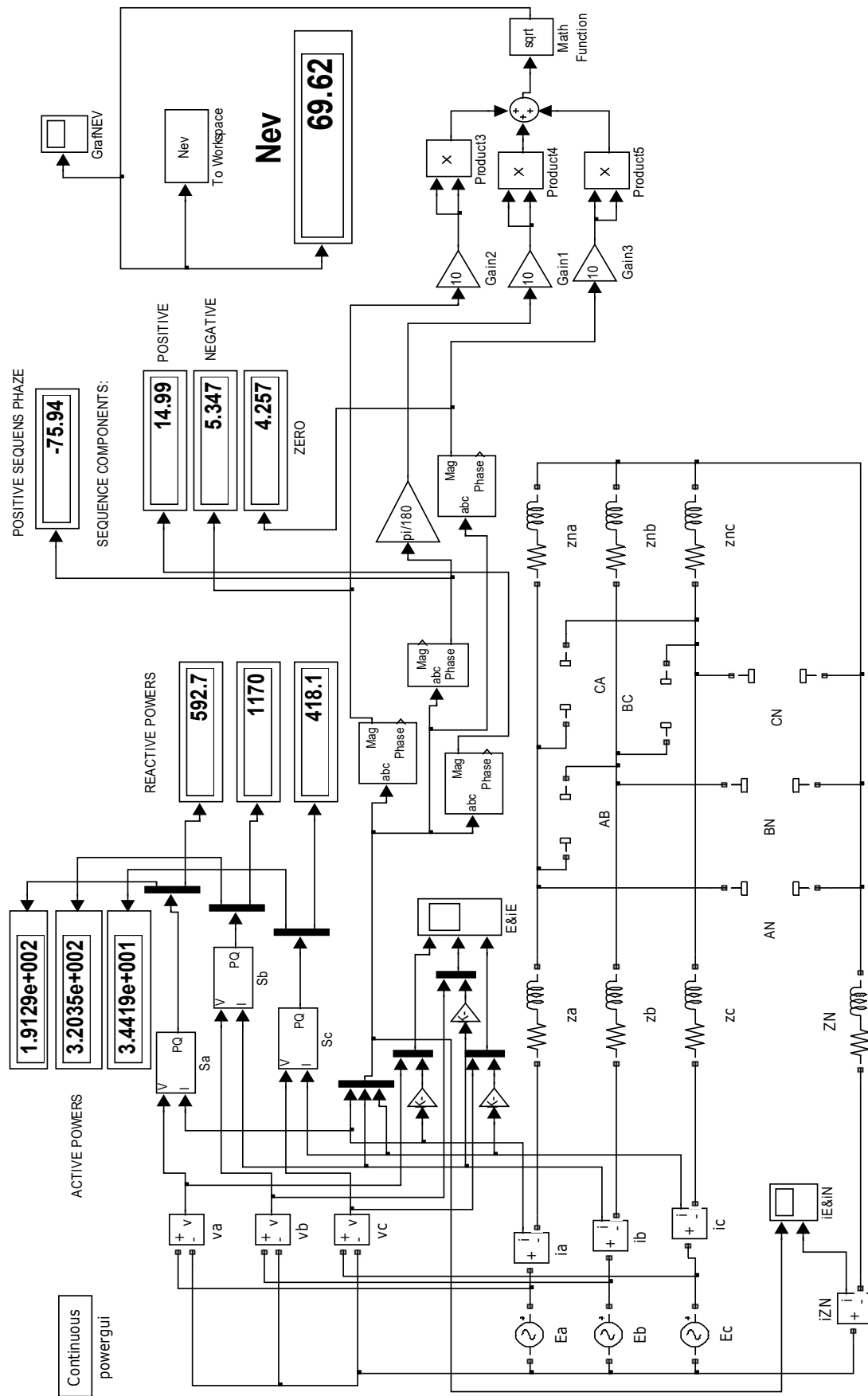


Рисунок 4.1 – Модель досліджуваної системи за відсутності симетро-компенсаційного пристрою

На рисунку 4.2 показані струми у фазах А, В, С і нульовому проводі для несиметричного режиму системи. Амплітуди струмів у фазах складають 12,46; 24,26 і 8,39 А відповідно. Амплітуда струму в нульовому проводі становить 12,772 А, що можна порівняти з амплітудами струмів у самих фазах. Аналізатори симетричних складових струмів у фазах і навантаженні дають такі значення амплітуд прямої, зворотної та нульової симетричних складових: $I_1 = 14,99$ А; $I_2 = 5,347$ А; $I_0 = 4,257$ А. Фазовий зсув прямої симетричної складової визначається величиною $\phi_1 = -75,94$ ел. град.

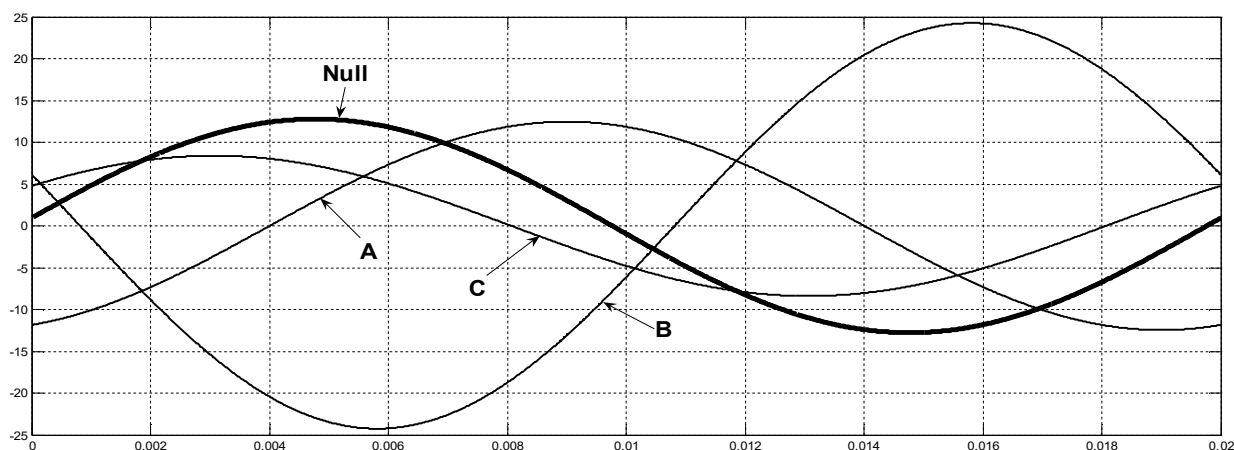


Рисунок 4.2 – Струми в фазах (А, В, С) і в нульовому проводі (Null) для несиметричного режиму

Таким чином, несиметрія навантаження обумовлює в цій системі важкий режим електропостачання, що характеризується великою нерівномірністю завантажень фаз, низькими енергетичними показниками і суттєвим струмовим перевантаженням нульового проводу.

Пошукова оптимізація [40] передбачає використання методів оптимізації для автоматизації конструювання симетро-компенсувального пристрою. З цією метою в моделі, використовуваної в процесі пошукової оптимізації, необхідно обчислити цільову функцію. Ця функція може бути сформована різними способами, однак у будь-якому випадку її мінімізація повинна привести до шуканого оптимального режиму, що забезпечує в цьому випадку симетрування і повну компенсацію реактивної потужності. Для формування цільової функції для системи синусоїдального струму в модель введені прилади вимірювання симетричних складових, що містяться в бібліотеці SimPowerSystem [188, 189, 257]. Вимірювання струмів у джерелах живлення (вони ж є струмами ліній електропередачі) здійснюється за допомогою віртуальних приладів вимірювання струмів. Ці значення через мультиплексор з'єднуються і однією шиною подаються на три аналізатора симетричних складових, налаштованих на аналіз прямої, зворотної і нульової послідовностей струмів у лініях

електропередачі. Для формування цільової функції з шести одержуваних вихідних величин аналізаторів використовуються лише три: амплітуди J_2 зворотного і J_0 нульової послідовностей, а також фаза ϕ_1 прямої послідовності. Фактично в цьому разі спостерігається багатокритеріальна оптимізація, що потребує формування узагальненого критерію оптимізації. З цих величин, пронормованих за допомогою коефіцієнтів ранжирування, конструюється цільова функція як кульова метрика. Значення цільової функції через робочу область системи моделювання передається в основну підпрограму-функцію пошуку оптимального рішення `fminsearch ()` через блок "To workspace", позначений на схемі візуальної моделі Nev. У результаті оптимізації значення цільової функції має бути зведено до нуля, що можливо за умов рівності нулю кожної зі складових кульової метрики. Фізично це буде означати повне симетрування системи електропостачання та повну компенсацію у ній реактивної потужності.

Як параметри оптимізації повинні виступати величини параметрів елементів симетро-компенсувального пристрою. На шляху його синтезу потрібно розв'язання задач структурного і параметричного синтезу [37, 38, 42]. Структурний аналіз передбачає завдання топології пристрою з урахуванням затискачів підключення його до системи електропостачання, у якій потрібно забезпечити симетрування і компенсацію реактивної потужності. У [15] показано, що для трифазної системи електропостачання з нульовим проводом необхідним і достатнім є п'ятиелементний варіант симетро-компенсувального пристрою, у якому три елементи під'єднуються між фазами, а решта два – між фазами і нульовим проводом. Для визначення місць під'єднання та типів реактивних елементів, що під'єднуються, запропоновані різні варіанти схем і аналітичні вирази, які залежно від діапазонів зміни фазних кутів навантаження визначають, зі свого боку, діапазони симетрування. У запропонованому комп'ютерному методі оптимізації застосувати аналітичні формули без втрати спільності неможливо. Тому задамося, наприклад, під'єднанням трьох реактивних елементів між фазами і двох реактивних елементів між кожною з фаз А, В і нульовим проводом із боку навантаження. Будемо вважати, що всі п'ять реактивних елементів симетро-компенсувального пристрою є конденсаторами. Простежимо за процесом пошукової оптимізації, який, як зазначалося раніше, повинен виявити неправильно призначений тип елемента шляхом його витискання. Сигналом на витискання елемента є прагнення процесу оптимізації дати параметру оптимізації граничне значення. Водночас величина цільової функції перестає змінюватися, не досягаючи свого оптимального значення. У цьому випадку необхідно або виключити елемент

шляхом його розірвання (закорочування), або замінити тип реактивного елемента на дуальний.

Після декількох уточнень і дуальних замін реактивних елементів були отримані результати, які характеризуються такими параметрами симетро-компенсувального пристрою: $L_{ab} = 0,1512$ Гн; $C_{bc} = 122,67$ мкФ; $L_{ca} = 6,315$ Гн; $C_{an} = 440,13$ мкФ; $C_{bn} = 779,75$ мкФ. Величина цільової функції зафіксувалася на значенні 4,905, не досягнувши необхідного нульового значення. У процесі оптимізації спостерігалось збільшення параметра L_{ca} , опір якого на основній частоті досяг значення 1983,915 Ом, що свідчить про мале споживання електроенергії цим елементом і про його витіснення в процесі оптимізації. Після заміни цієї індуктивності на конденсатор C_{ca} , задамо його початкове значення 1 мкФ і відновимо процес пошукової оптимізації, визначивши значення параметрів у кінцевій точці останньої оптимізації як початкові значення нового процесу. З урахуванням коефіцієнтів нормування 10^{-6} і 10^{-2} для конденсаторів і індуктивностей відповідно, початкові значення параметрів оптимізації задаються у вигляді вектора $x = [15,12 \ 122,67 \ 1 \ 440,13 \ 779,75]$. На рисунку 4.3 зображена візуальна модель системи електропостачання з нульовим проводом і показаннями, відповідними завершенню процесу оптимізації, а на рисунку 4.4 часові діаграми лінійних струмів і струму в нульовому проводі після під'єднання синтезованого симетро-компенсувального пристрою.

На завершення останнього процесу оптимізації отримані такі значення параметрів симетро-компенсувального пристрою: $L_{ab} = 0,235 \ 605 \ 202 \ 0$ Гн; $C_{bc} = 138,547 \ 657$ мкФ; $C_{ca} = 27,356 \ 465 \ 9$ мкФ; $C_{an} = 416,3018323$ мкФ; $C_{bn} = 778,478 \ 352 \ 6$ мкФ. Величина цільової функції досягла близького до нуля значення: $N_{ev} = 4,78E-5$, амплітуда зворотної симетричної складової $I_{обр} = 1,299E-6$, амплітуда нульової симетричної складової $I_o = 4,534E-6$, фазовий кут прямої симетричної складової $\varphi_{np} = 4,415E-5$. Настільки ж незначні величини реактивних потужностей, що віддаються кожним із джерел живлення: $Q_a = 0,000 \ 29$ ВАр; $Q_b = 0,000 \ 36$ ВАр; $Q_c = 0,000 \ 16$ ВАр, у той час як активні потужності, що віддаються джерелами, зрівнялися і склали такі величини $P_a = P_b = P_c = 212,156$ Вт.

Амплітуди струмів, що віддаються кожним із джерел, рівні амплітуді прямої симетричної складової струмів у лініях електропередачі: $I_{am} = I_{bm} = I_{cm} = I_{np} = 4,243$ А, і ці значення в кілька разів менші, ніж у несиметричному режимі (12,46; 24,26 і 8,39 А).

Амплітуда струму в нульовому проводі дорівнює потроєній амплітуді нульової симетричної складової: $I_{nm} = 3I_o = 13,602E-6$, що становить близьку до нуля величину.

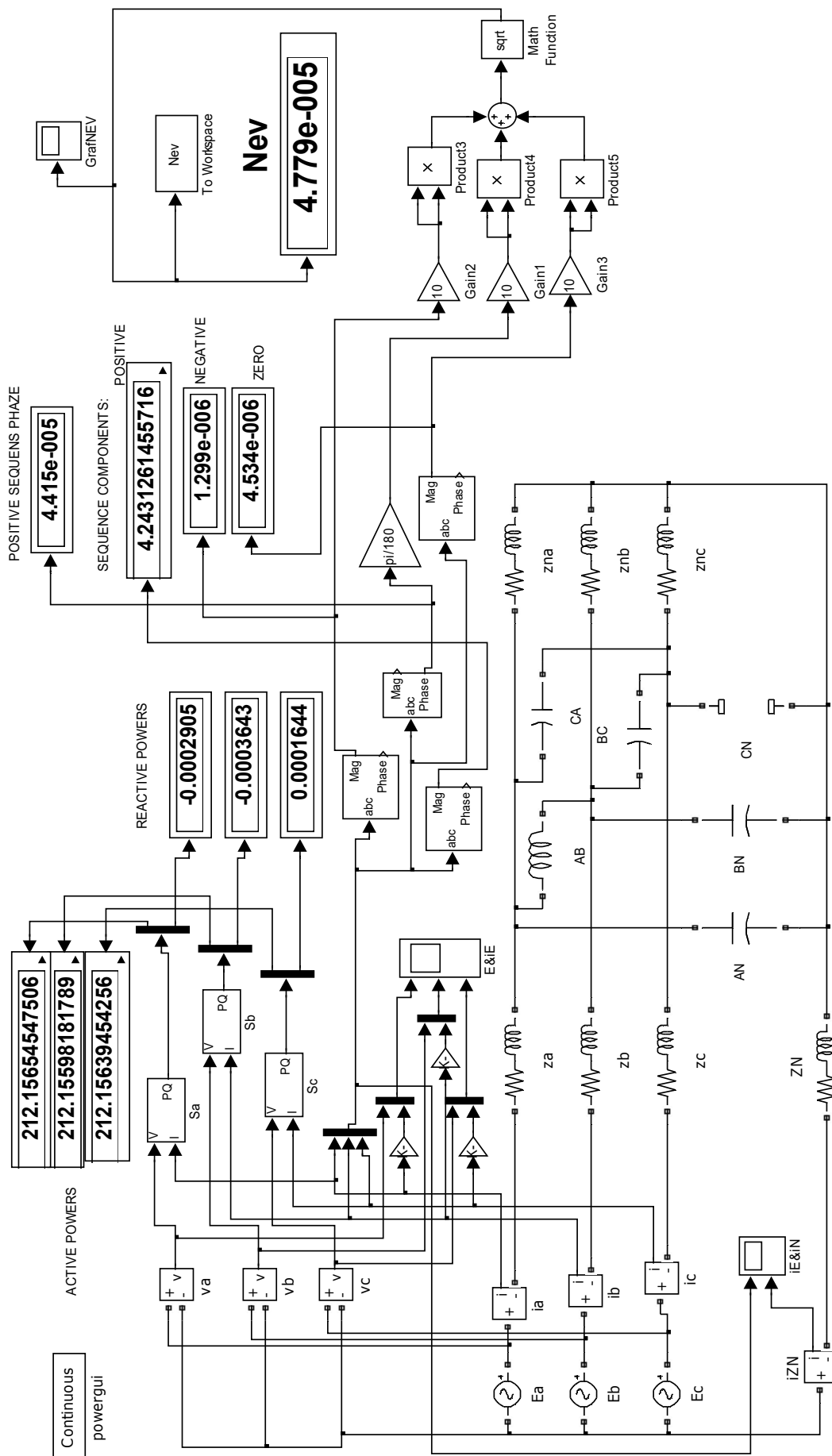


Рисунок 4.3 – Візуальна модель системи після завершення процесу пошукової оптимізації

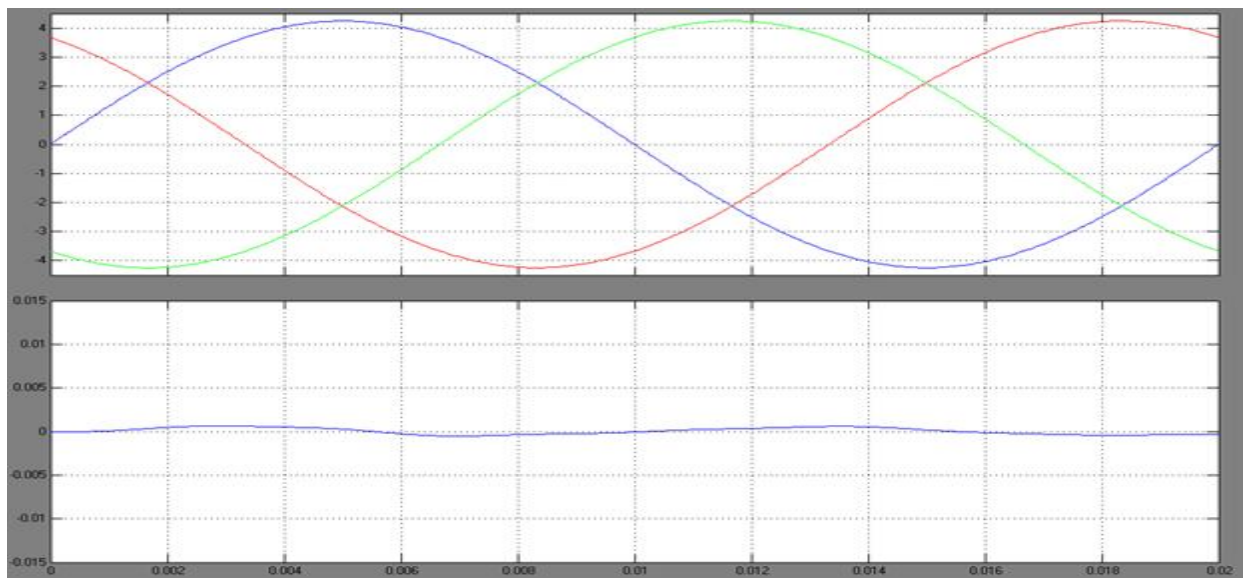


Рисунок 4.4 – Часові діаграми лінійних струмів і струму в нульовому проводі

Ці результати свідчать про високу точність розрахунку параметрів симетро-компенсувального пристрою та оптимального режиму, що виникає під час під'єднання цього пристрою.

4.2 Визначення режиму компенсації реактивної потужності під час звільнення параметрів оптимізації

Результати попереднього розділу наочно показали, що процес пошукової оптимізації має чудову властивість – у процесі розрахунків адаптуватися до умов досягнення оптимуму, а значення параметрів елементів вказують на їхню відповідність умовам рішення завдання. Однак використання цієї властивості змушує розробника активно супроводжувати процес пошукової оптимізації: він повинен змінювати структуру синтезованого пристрою, складу елементів, типів цих елементів, способу їх під'єднання і початкових значень параметрів оптимізації, які також впливають на траєкторії зображувальної точки і витрати часу для досягнення шуканого рішення.

Застосування описаного вище принципу звільнення параметрів оптимізації (див. підрозділ 2.5) дозволяє завдяки збільшенню числа параметрів оптимізації виключити необхідність втручання розробника в процес пошукової оптимізації та перекласти весь обсяг обчислювальної роботи і прийняття рішень на комп'ютер. Після досягнення локального оптимуму в цьому випадку необхідно буде перерахувати результати в область реальних параметрів.

Для звільнення параметрів стосовно розглядуваної задачі будемо виходити з варіанта надлишкового шестиелементного набору симетро-компенсувального пристрою (СКП), у якому три реактивних елементи під'єднанні між кожною парою фаз, а решта три – між кожною фазою і нульовим проводом. Крім того,

потрібно було б вирішити, який саме тип реактивного елемента (конденсатор або котушка індуктивності) має бути увімкнений на кожній вітці СКП. У цьому випадку пропонується використовувати штучний прийом увімкнення в кожній вітці СКП пари конденсаторів, що шунтують один одного, і котушки індуктивностей. Вони, фактично, утворюють узагальнений реактивний елемент з можливістю одночасної зміни параметрів обох елементів у процесі оптимізації. Тим самим процес оптимізації позбавляється від необхідності втручання в нього з метою коригування структури або типів елементів СКП. Зрозуміло, кількість параметрів оптимізації подвоюється, однак водночас оптимальне рішення може бути досягнуто за безлічі поєднань параметрів кожної пари, що входить у кожен узагальнений елемент. Таким чином, процес оптимізації завершується після досягнення будь-якого з нескінченної множини утворених локальних мінімумів. Після цього вирішується питання про заміну пари кожного узагальненого реактивного елемента одним реактивним елементом, тип якого легко визначається залежно від превалювання реактивності в узагальненому елементі, що замінюється.

На рисунку 4.7 показана модель системи електропостачання з підключеним СКП. Він представлений у вигляді шестиелементної групи узагальнених реактивних елементів, включених між фазами (AB, BC, CA) і приєднаних до нульового проводу (AN, BN, CN). Ця модель викликається функцією формування цільової функції N_{ev} , текст якої наведено на рисунку 4.5:

```
function Nev=func_s3fnesim(x)
global Cab Cbc Cca Can Cbn Ccn Lab Lbc Lca Lan Lbn Lcn Nst Nev
Cab=abs(x(1)*1E-6)
Lab=abs(x(2)*1E-2)
Cbc=abs(x(3)*1E-6)
Lbc=abs(x(4)*1E-2)
Cca=abs(x(5)*1E-6)
Lca=abs(x(6)*1E-2)
Can=abs(x(7)*1E-6)
Lan=abs(x(8)*1E-2)
Cbn=abs(x(9)*1E-6)
Lbn=abs(x(10)*1E-2)
Ccn=abs(x(11)*1E-6)
Lcn=abs(x(12)*1E-2)
sim s3fnesim3a
x
Nst=Nst+1
```

Рисунок 4.5 – Текст програми функції формування цільової функції

У тексті функції параметри елементів СКП оголошені глобальними змінними, а далі розміщені оператори присвоювання значень ємностей і індуктивностей з нормуючими коефіцієнтами $1E-6$ для конденсаторів і $1E-2$ для індуктивностей. Ці коефіцієнти зменшують розкид значень вектора x , який є фактичним матричним параметром для функції оптимізації.

Функція оптимізації *fminsearch()* викликається в основній програмі, текст якої наведено на рисунку 4.6.

```
global Cab Cbc Cca Can Cbn Ccn Lab Lbc Lca Lan Lbn Lcn Nst Nev
Nst=0
options=optimset('MaxFunEvals',10000,'MaxIter',10000,'TolX',1e-3,'Tolfun',1e-3);
Y=fminsearch('func_s3fnesim',[100 200 100 200 100 200 100 200 100 200 100 200],options)
Nst
```

Рисунок 4.6 – Текст основної програми

Глобальні змінні повторюються, задані опції по точності оптимізації, безпосередньо здійснений виклик функції оптимізації. Змінна *Nst* відстежує число ітерацій при оптимізації. У процесі роботи моделі на інтервалі 0,02, максимально допустимий крок інтегрування приймався рівним $1E-5$ с, метод інтегрування – *ode23s* (*stiff / Mod. Rosenbrock*).

На рисунку 4.7 віртуальні вимірювальні прилади показують стан системи після завершення оптимізації. Цільова функція зменшилася від величини 69,62 за несиметричного режиму до близького до нуля значення – 0,001 343 за дії СКП. Активні потужності, що віддаються кожним джерелом живлення, становлять 212,15 Вт, а їх реактивні потужності – 0,016 42; 0,002 64 і 0,013 4 ВАр, тобто близькі до нуля. Близькі до нуля і амплітуди зворотної та нульової симетричних складових, а також кут зсуву прямої симетричної складової щодо фази *A* системи живильних напруг: $I_2 = 0,000\ 110\ 6$ А; $I_0 = 0,000\ 056\ 69$ А; $\varphi_1 = -0,002\ 922$ ел. град.

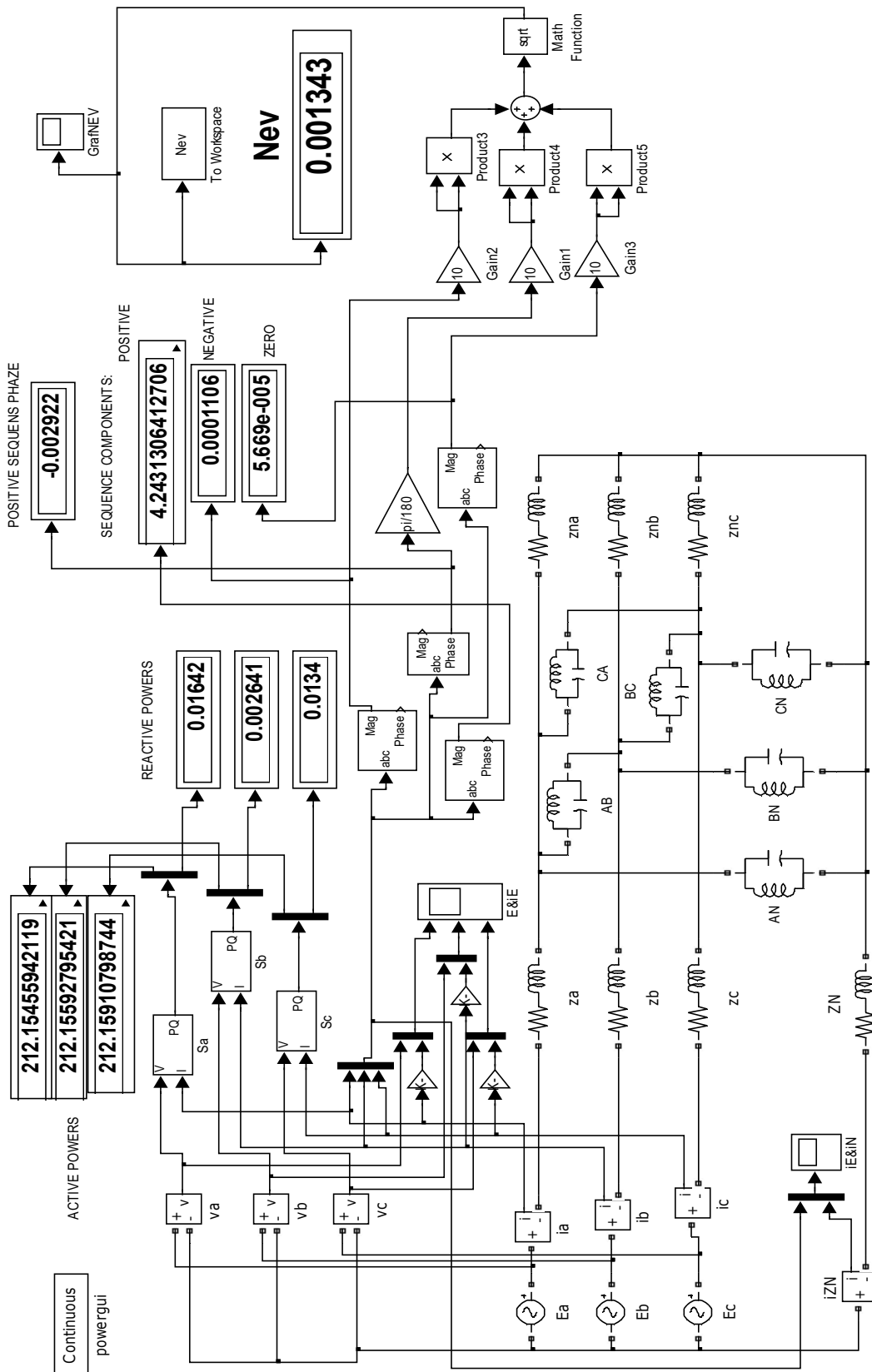


Рисунок 4.7 – Модель досліджуваної системи після оптимізації СКП

Амплітуди струмів у всіх трьох фазах визначаються амплітудою прямої симетричної складової $I_1 = 4,243\ 130\ 641\ 270\ 6\ \text{A}$, вони в 2 – 6 разів менші, ніж у несиметричному режимі. Струм у нульовому проводі дорівнює потроєній амплітуді нульовий складової та практично відсутній, тобто нульовий провід повністю розвантажений. Про це ж свідчать часові діаграми струмів у розрахунковому режимі повної симетризації і компенсації, що наведені на рисунку 4.8.

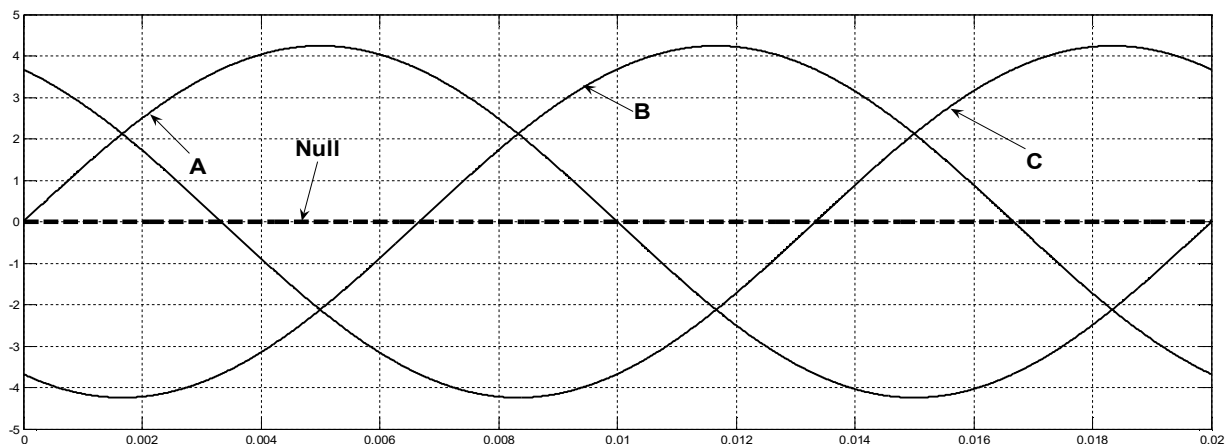


Рисунок 4.8 – Струми у фазах (А, В, С) і в нульовому проводі (Null) для скомпенсованого режиму

Знайдений вектор x , який є параметром оптимізації, представлений наступними значеннями: $x = [218,2532\ 629,3048\ 401,0210\ 358,7305\ -289,3894\ 424,7741\ -142,6967\ 2,0050\ -0,6514\ 921,5297\ -4,7847\ 1,2928]$.

Ці значення з робочої області перенесені в електронну таблицю 4.1, подану нижче, з урахуванням зазначених нормуючих коефіцієнтів у стовпцях 1 і 2. З урахуванням кругової частоти розраховані провідності Y_C ємнісного і Y_L індуктивного елементів кожної вітки шестиелементного СКП з узагальненими реактивними елементами. У колонці 5 провідності ємнісної і індуктивної складових підсумовані, а в стовпці 6 обчислені зворотні їм величини – опори кожного узагальненого реактивного елемента. З огляду на знак опору можемо зробити висновок, що елементи АВ, ВС і СА мають ємнісний характер, а АN, ВN і СN – індуктивний (стовпець 7). Параметри елементів розраховані і поміщені в останній восьмий стовпчик. Заміна кожного узагальненого реактивного елемента в моделі системи електропостачання на один реактивний елемент із певним типом елемента і його параметром дає можливість перевірити працездатність схеми з реальними параметрами СКП. Проведені розрахунки показали повний збіг у цьому випадку результатів зі знайденим шляхом оптимізації рішенням. Ступінь збігу визначається лише точністю перенесення значущих цифр із таблиці у модель як параметрів реактивних елементів шестиелементного СКП.

Таблиця 4.1 – Параметри симетро-компенсувального пристрою

1	2	3	4	5	6	7	8
Capacitor	Inductance	YC	YL	YC+YL	ZCL	type	value
2.1825E-04	6.29305E+00	6.8566E-02	5.05812E-04	6.80605E-02	14.69282	AB: C	2.166432E-04
4.0102E-04	3.58731E+00	1.2598E-01	8.87323E-04	1.25097E-01	7.99379	BC: C	3.981966E-04
2.8938E-04	4.2477E+00	9.0914E-02	7.49363E-04	9.0165E-02	11.09078	CA: C	2.870041E-04
1.4269E-04	2.00500E-02	4.4829E-02	1.58758E-01	1.13929E-01	8.77743	AN: L	0.027939429
6.5140E-07	9.21530E+00	2.0464E-04	3.45415E-04	1.40771E-04	7103.71899	BN: L	22.61183982
4.7847E-06	1.29280E-02	1.5031E-03	2.46217E-01	2.44714E-01	4.08640	CN: L	0.01300741

Крім того, розглядаючи параметри СКП, звернемо увагу на параметри елемента, що під'єднуються між фазою В і нульовим проводом N: це – котушка з індуктивністю +22,611 839 82 Гн, її опір становить 7 103,718 99 Ом. Цей опір на три порядки перевищує опір інших елементів СКП, і, отже, цей елемент практично не впливає на роботу СКП та може бути виключений з неї. Таким чином, можемо перейти до п'ятиелементної схеми СКП відповідно до теоретичних положень, що викладені в [131]. Потрібно все ж мати на увазі, що просте вимкнення надлишкового елемента СКП, строго кажучи, в певній мірі зміщує точку рішення. Зокрема у нашому випадку розрахунок показав, що амплітуда прямої симетричної складової дорівнює 4,243 692 196 551 7, а цільова функція – 0,054 51. Значення активних потужностей джерел по фазах А, В і С склали відповідно 22,084 4; 212,184 2 і 212,284 7 Вт, а амплітуда струму в нульовому проводі збільшилася до 0,007 35 А. Настільки малі відхилення обумовлені значним опором надлишкового елемента. У загальному випадку ці відхилення можуть бути більш суттєвими. За такого варіанта уточнені значення можна отримати, виконуючи оптимізаційний розрахунок повторно. Ця процедура спрощується трьома обставинами: по-перше, структура і типи елементів вже чітко визначені; по-друге, кількість параметрів зменшилася до п'яти; по-третє, знайдені значення параметрів – це вже є гарне наближення до точки вирішення. Таким чином, уточнювальний розрахунок виконується швидко, без істотних витрат комп'ютерного часу. Для нашого прикладу уточнювальний розрахунок п'ятиелементного СКП подано наступними результатами (значення скопійовані з робочої області з максимальною кількістю значущих цифр):

$$C_{ab}=+0,000\ 216\ 493\ 842\ 415; \quad C_{bc}=+0,000\ 398\ 047\ 577\ 256;$$

$$C_{ca}=+0,000\ 286\ 855\ 106\ 222; \quad L_{an}=+0,027\ 974\ 913\ 313\ 993;$$

$$L_{cn}=+0,013\ 015\ 028\ 665\ 648.$$

Цей варіант симетро-компенсувального пристрою відрізняється за структурою і типами елементів від варіанта, знайденого в 4.1. Однак оптимальний режим з погляду основних елементів системи електропостачання, тобто джерел, ліній електропередачі і навантаження, виявився ідентичним. Це свідчить про неоднозначність вирішення завдання синтезу симетро-

компенсувального пристрою для трифазної системи електропостачання з нульовим проводом.

На завершення відзначимо, що запропонований метод дає можливість здійснити чисельне розв'язання задачі оптимізації режиму трифазної чотирипровідної системи електропостачання за допомогою методу пошукової оптимізації, що дозволяє не використовувати складних символічних перетворень. Сформульовано критерії оптимізації при вирішенні завдання симетрування і компенсації реактивної потужності в системі електропостачання, які дозволяють сформулювати цільову функцію, мінімізація якої призводить до вирішення поставленого завдання із заданою точністю. Введено поняття узагальненого реактивного елемента, використання якого в структурі симетро-компенсувального пристрою дозволяє звести задачу оптимізації до знаходження лише одного локального мінімуму з безліччю всіх утворюваних локальних мінімумів, що полегшує знаходження оптимального рішення. Запропоновано методику переходу від узагальненого реактивного елемента до одного елемента, тип якого визначається за превалювальною реактивності кожного узагальненого реактивного елемента. Обґрунтована можливість знаходження рішення для випадку шестиелементного симетро-компенсувального пристрою, а надлишковий реактивний елемент виключається після зіставлення величин параметрів пристрою. Описано процес реалізації запропонованої методики, що складається в комплексному використанні програмних функцій і SPS-моделі системи електропостачання, показан їх взаємний зв'язок. Проведені розрахунки показали універсальність, працездатність і високу точність запропонованої методики.

Контрольні запитання до розділу 4

1. З якими проблемами пов'язано завдання розрахунку симетрувальних пристроїв в чотирипровідній трифазній системі електропостачання?
2. З яких елементів складається візуальна модель несиметричної трифазної системи електропостачання із нульовим проводом?
3. До яких негативних наслідків призводить несиметричний розподіл навантаження в трифазній системі із нульовим проводом?
4. Як формується цільова функція під час оптимізації режиму трифазної системи електропостачання із нульовим проводом?
5. Скільки елементів входить у склад симетро-компенсувального пристрою для трифазної чотирипровідної системи електропостачання?

6. Як визначаються типи елементів, що входять у склад симетро-компенсувального пристрою для трифазної системи електропостачання із нульовим проводом?

7. Як можна автоматизувати процес синтезу симетро-компенсувального пристрою для трифазної системи електропостачання із нульовим проводом?

8. Що становить узагальнений реактивний елемент?

9. Як вирішується питання про заміну узагальненого реактивного елемента одним реактивним елементом?

10. Як розподіляється енергія в оптимальному режимі роботи трифазної системи електропостачання з нульовим проводом?

11. Як можна виключити із складу симетро-компенсувального пристрою зайвий елемент?

РОЗДІЛ 5 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ З ІНДУКТИВНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

Системи з індуктивними зв'язками широко застосовуються в електротехнічних системах та комплексах. Найпоширенішим елементом з індуктивними зв'язками є трансформатор, без якого практично не обходиться жодна система передачі та перетворення електричної енергії.

Адекватність моделювання таких систем багато в чому залежить від того, наскільки точно вдається відобразити властивості і характеристики реального трансформатора, перетворивши їх в параметри його математичної моделі. Останнім часом питання про параметри схем заміщення трансформаторів активно обговорюється [183, 185]. Це пояснюється тим, що в системах моделювання електричних і електронних систем застосовуються різні способи представлення моделей трансформаторів. Зокрема в системах PSPICE, Micro-CAP-V, EWB-5.12, Desigh-Lab-8.0, OrCAD-9.2 використовуються трансформатори у вигляді котушок індуктивностей, магнітно пов'язаних одна з одною [186, 187]. Під час моделювання силових електричних систем у системі Simulink [188, 189] у вікно властивостей моделі трансформатора потрібно ввести параметри T-подібної схеми заміщення трансформатора. У той же час у Simulink містяться і моделі індуктивно зв'язаних котушок. У системі СИМПАТ [190] можна вводити інформацію про декілька індуктивностей, кожна з яких індуктивно пов'язана з усіма іншими.

5.1 Підвищення енергетичних показників мережі електропостачання з трансформатором на візуальній моделі

Одним із найбільш економічних способів компенсації реактивної потужності є застосування конденсаторних установок [164]. Перевага їхнього використання полягає в невеликих експлуатаційних витратах і простоті монтажу та обслуговування. Раніше була розглянута можливість повної компенсації реактивної потужності в системі з несиметричним активно-індуктивним навантаженням на основі використання компенсувального пристрою, що складається з міжфазних конденсаторів. Однак не розглядався випадок, коли напруга в лініях електропередачі може істотно перевищувати напругу, що подається на навантаження. У такому випадку використовується трансформатор, і несиметричне навантаження на вторинній обмотці створює небажаний режим несиметричної роботи самого трансформатора. Значення вторинних напруг можуть становити кілька десятків кіловольт.

Це спостерігається, наприклад, у системах електропостачання залізничного транспорту. Увімкнення високовольтних конденсаторів за таких напруг не

завжди можливе. У зв'язку з цим можна запропонувати під'єднання симетро-компенсувального пристрою через понижувальний трансформатор, що дозволяє скористатися тільки низьковольтними компенсувальними конденсаторами.

Отже, необхідно розрахувати параметри симетро-компенсувального пристрою, що під'єднується до затисків навантаження через трансформатор за допомогою пошукової оптимізації, використовуючи комп'ютерну модель трифазної системи електропостачання.

Схема досліджуваної системи електропостачання подана на рисунку 5.1. Амплітуди фазних напруг джерел мережі нескінченної потужності дорівнюють: $U_a = U_b = U_c = 100\text{В}$. Опори й індуктивності в лінії електропередачі (далі ЛЕП) відповідно прийняті такими: $r_{0a} = r_{0b} = r_{0c} = 0,1\text{Ом}$ і $L_{0a} = L_{0b} = L_{0c} = 0,001\text{Гн}$. .

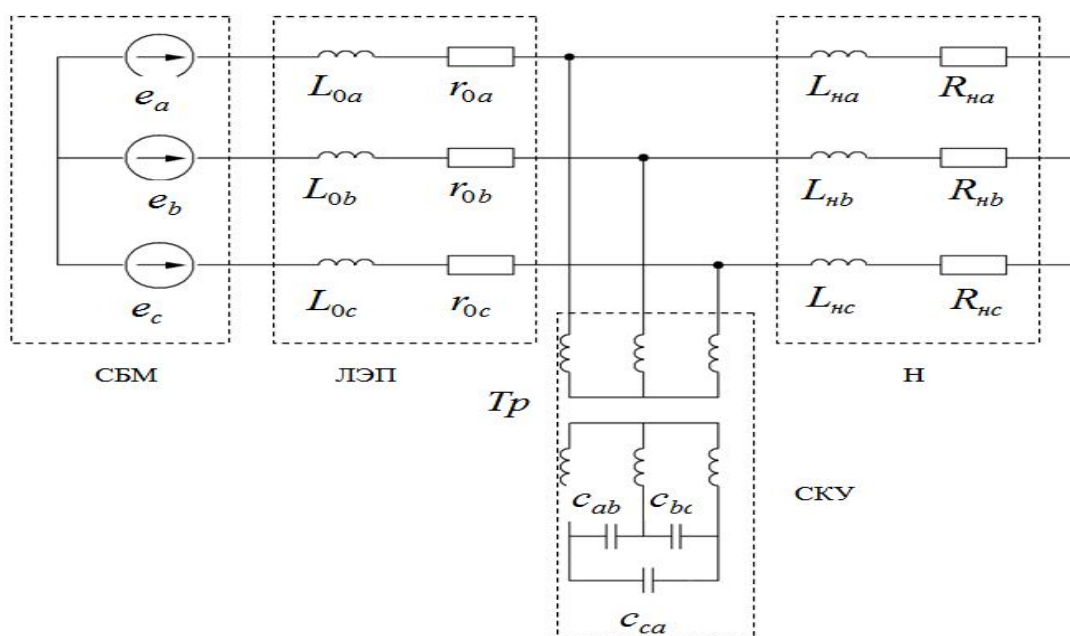


Рисунок 5.1 – Трифазна електрична мережа з симетро-компенсувальним конденсаторним пристроєм компенсації реактивної потужності, під'єднаним через трансформатор

Навантаження Н по фазах розподілено нерівномірно і характеризується такими значеннями опорів і індуктивностей:

$$R_a = 0,7\text{ Ом}; L_a = 0,005\text{ Гн}; R_b = 1\text{ Ом}; L_b = 0,01\text{ Гн}; R_c = 2\text{ Ом}; L_c = 0,04\text{ Гн}.$$

Первинні та вторинні обмотки трансформатора з'єднані в зірку, а конденсатори трикутником.

Для моделі розрахуємо номінальні параметри трансформатора потужність, активні й індуктивні опори обмоток. Розрахунок будемо здійснювати, використовуючи розраховані раніше значення ємностей симетрувальних

конденсаторів за схемою без під'єднання трансформатора. Розрахунок номінальних параметрів трансформатора здійснюється на підставі максимального струму навантаження трансформатора під час розгляду схеми системи електропостачання без трансформатора. Шляхом оптимізації були отримані такі величини ємностей симетрувальних конденсаторів:

$$C_{ab} = 563 \text{ мкФ}; C_{bc} = 182 \text{ мкФ}; C_{ca} = 34,46 \text{ мкФ}.$$

Під час розрахунку параметрів трансформатора використовуємо формули, наведені в додатку А. Розроблений метод дозволяє розрахувати параметри Т-подібної схеми заміщення трансформатора для SPS-моделі, у якій за паспортними даними визначаються дані схеми заміщення. Перевірка правильності розрахунків була підтверджена на SPS-моделях для однофазного трансформатора і для магнітно-зв'язаних котушок зібраних за схемою заміщення з попередньо розрахованими параметрами в програмі MathCAD.

Під час розрахунку потужності трансформатора орієнтуємося на конденсатор C_{ab} з найменшим опором:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \times 5,6209} 10^6 = 5,664 \text{ Ом}.$$

Амплітудне значення струму цього конденсатора

$$I_m = \frac{U_n}{x_c} = \frac{100\sqrt{3}}{5,664} = 30,5807 \text{ А}.$$

Потужність в одній фазі представлена добутком лінійного струму і лінійної міжфазної напруги:

$$P_a = \frac{I_m U_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} = \frac{30,5807 \times 100}{2} = 2\,648,363.$$

Номінальне значення потужності трансформатора:

$$2\,648,363 \times 3 = 7\,945,088 \text{ Вт}.$$

Прийmemo номінальну потужність трансформатора такою, що дорівнює типовій 10 000 Вт.

Здійснимо розрахунок внутрішніх опорів і індуктивностей трансформатора, лінійно підключених до лінії електропередачі з коефіцієнтом трансформації 4:1, струм холостого ходу, становить 2 %, а напруга короткого замикання – 7 %. Активні втрати під час випробування холостого ходу прийняті $P_x = 70$ Вт, активні втрати в випробуванні короткого замикання $P_k = 600$ Вт.

Розрахуємо діючу лінійну напругу первинної обмотки:

$$U_{1н} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_\phi}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3} \times 100}{\sqrt{2}} 122,45 \text{ В}.$$

Діючи лінійну напругу вторинної обмотки розрахуємо на основі коефіцієнта трансформації: $U_{2H} = \frac{U_{1H}}{k} = \frac{122,45}{4} = 30,619 \text{ В}$

Потужність, яка припадає на одну фазу: $S_1 = \frac{S_H}{3} = \frac{10\,000}{3} = 3\,333,33 \text{ Вт}$.

Діюче значення напруги на первинній обмотці трансформатора

$$U_{1f} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{m}} = \frac{122,48}{\sqrt{3}} = 70,71 \text{ В}.$$

Номінальний струм первинної обмотки трансформатора знаходимо зі співвідношення номінальної потужності і номінальної фазної напруги:

$$I_{1H} = \frac{S_1}{U_{1f}} = \frac{3\,333,33}{70,71} = 47,14 \text{ А}.$$

Номінальний струм у вторинній обмотці

$$I_{2H} = \frac{I_{1H} \cdot U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{47,14 \times 122,474}{30,619} = 188,562 \text{ А}.$$

Розрахуємо фазну напругу короткого замикання:

$$U_{kf} = \frac{e_k \cdot U_{1f}}{100} = \frac{7 \times 70,71}{100} = 4,95 \text{ В}.$$

Повний опір короткого замикання знаходимо як відношення напруги короткого замикання до номінального струму:

$$Z_k = \frac{U_{kf}}{I_{1ном}} = \frac{4,95}{47,14} = 0,105 \text{ Ом}.$$

Активну складову опору короткого замикання розраховуємо за такою формулою: $R_k = \frac{P_k}{3I_{1ном}^2} = \frac{600}{3 \times 47,14^2} = 0,09 \text{ Ом}$.

Знайдемо реактивну складову короткого замикання:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{0,105^2 - 0,09^2} = 0,054 \text{ Ом}.$$

Активні й індуктивні опори первинної обмотки трансформатора будемо вважати рівними половині активного й індуктивного опору короткого замикання:

$$R_1 = \frac{R_k}{2} = 0,045 \text{ Ом}; \quad X_1 = \frac{X_k}{2} = 0,027 \text{ Ом}.$$

Активний опір вторинної обмотки в Т-подібній схемі заміщення:

$$R_2 = \left(\frac{U_{2H}}{U_{1H}} \right)^2 \cdot R_1 = 0,002\,813 \text{ Ом}.$$

Індуктивність розсіювання первинної обмотки в Т-подібній схемі заміщення $L_{1s} = \frac{X_1}{\omega} = 0,000\ 086\ 08\ \text{Гн}$.

Індуктивність розсіювання вторинної обмотки в Т-образній схемі

$$L_{2s} = \left(\frac{U_{2H}}{U_{1H}} \right)^2 \cdot L_{1s} = 0,000\ 005\ 38\ \text{Гн}.$$

Струм холостого ходу в первинній обмотці: $I_x = \frac{i_x \cdot I_{1H}}{100} = 0,942\ 81\ \text{А}$.

Повний опір холостого ходу: $Z_x = \frac{U_{1\phi}}{I_x} = 75\ \text{Ом}$.

Активний опір холостого ходу: $R_x = \frac{P_x}{m \cdot I_x^2} = 26,25\ \text{Ом}$.

Обчислимо індуктивний опір холостого ходу: $X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2} = 70,256\ \text{Ом}$.

Розрахуємо активний опір, що відповідає втратам у сталі сердечника: $R_\mu = R_x - R_1 = 26,205\ \text{Ом}$. Індуктивний опір послідовної намагнічувальної витки: $X_\mu = X_x - X_{1s} = 70,229\ \text{Ом}$.

Обчислимо параметри паралельної намагнічувальної витки:

$$R_m = R_\mu + \frac{X_\mu^2}{R_\mu} = 214,419\ \text{Ом}; \quad X_m = X_\mu + \frac{R_\mu^2}{X_\mu} = 80,007\ \text{Ом}.$$

Таким чином, обчислені всі параметри трансформатора, які далі будуть підставлені в моделі MATLAB.

Реалізація комп'ютерної моделі трифазної системи електропостачання з компенсувальною системою, яка дозволяє визначити оптимальні умови компенсації реактивної потужності, наведена на рисунку 5.2.

Миттєві значення струмів і напруг у моделі вимірюються віртуальними амперметрами і вольтметрами та передаються на спеціальні блоки розрахунку реактивних потужностей фаз – Sa, Sb і Sc. Потім обчислюється середньоквадратичний функціонал реактивних потужностей, для чого використовуються блоки помножувачів і суматора, який і приймається як цільова функція. Значення цільової функції передається в робочий простір MATLAB, де використовується вбудована файл-функція оптимізації *fminsearch* () [257]. У процесі оптимізації значення цільової функції зводиться до мінімуму за допомогою зміни значень ємностей конденсаторів Cab, Cbc і Cca.

Під час проведення комп'ютерних експериментів був використаний метод stiff23s Розенброка, крок інтегрування 0,000 1 с, що дозволило проводити

розрахунки з високою точністю. Час прогону моделі становить 0,06 с, що є достатнім для виходу моделі на усталений режим.

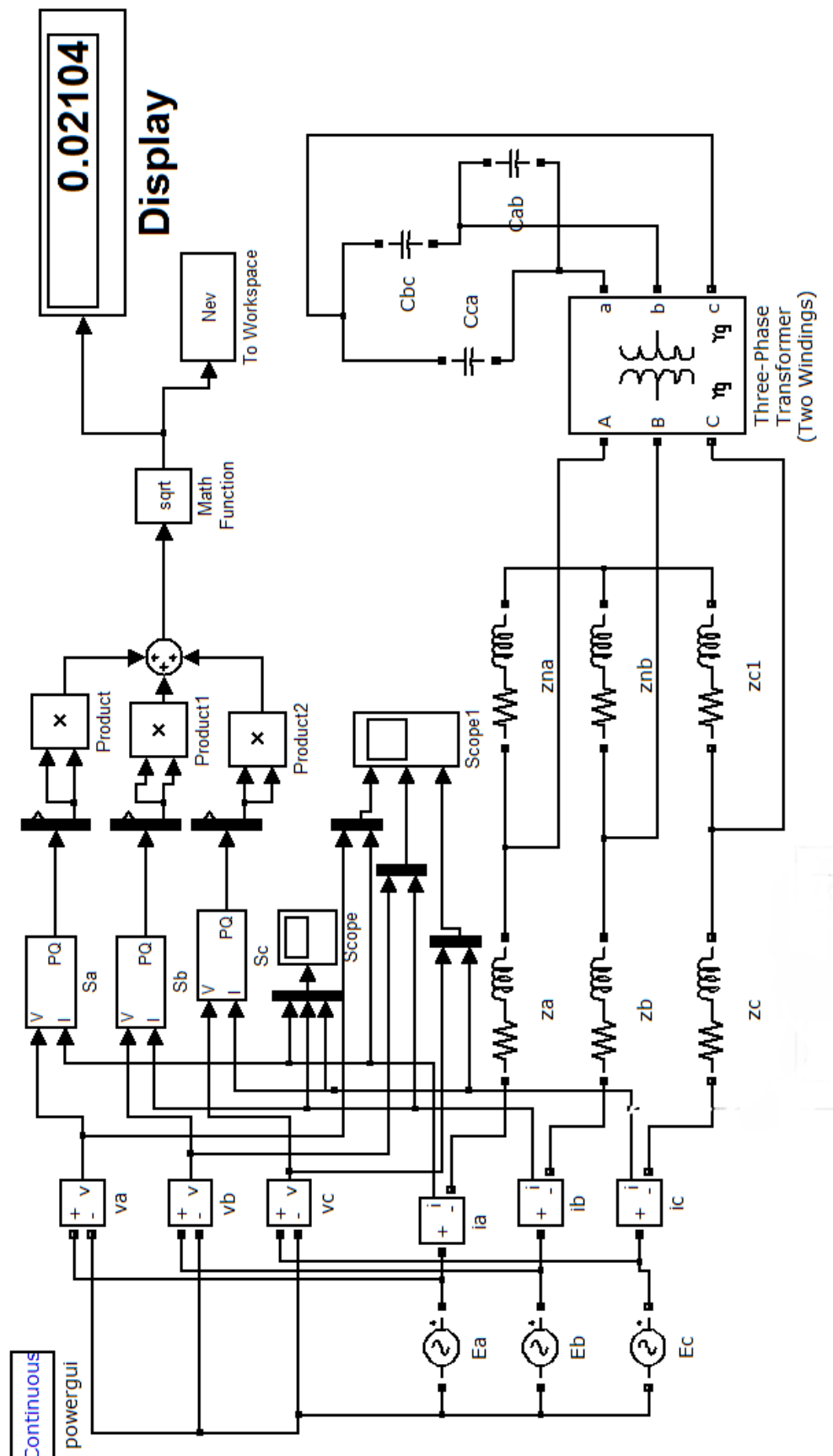


Рисунок 5.2 – Візуальна модель трифазної системи електропостачання з симетрувальним пристроєм, під'єднаним через трансформатор

Початкові значення параметрів оптимізації приймаються такими, що дорівнюють 10 мкФ, а початкове значення цільової функції становить 1 199.

Спостерігається великий розкид у значеннях амплітуд струмів у фазах, а значення амплітуд струмів більше 30 А (рис. 5.3).

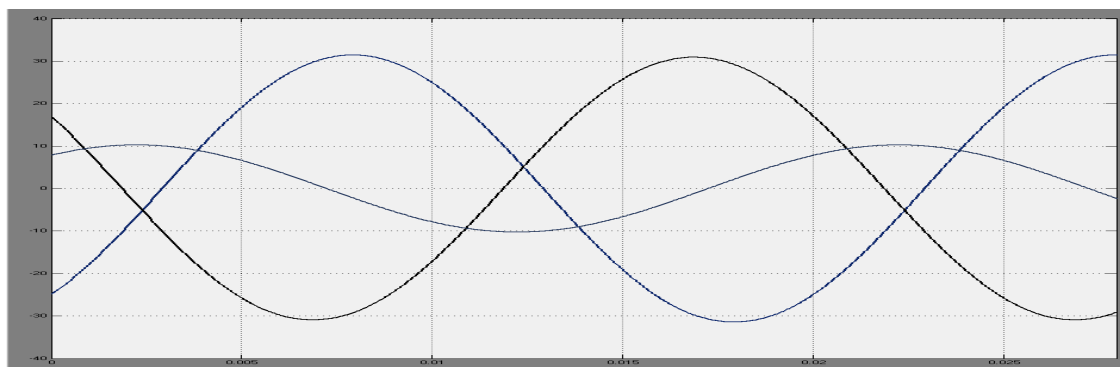


Рисунок 5.3 - Часові діаграми мережесих струмів до виконання оптимізації

Оптимізувалися кілька варіантів роботи моделі, у яких змінювався коефіцієнт трансформації трансформатора. Результати оптимізації зведені в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1. – Результати моделювання та оптимізації режимів

Коефіцієнт трансформації	C_{ab}	C_{bc}	C_{ca}
1:1	5,598 0e-004	2,074 1e-004	4,023 0e-005
2:1	0,0022	8,2962e-004	1,609 2e-004
4:1	0,009 0	0,003 3	6,439 7e-004

Проведені дослідження показали, що зниження коефіцієнта трансформації призводить до зростання значень ємностей конденсаторів (рис. 5.4).

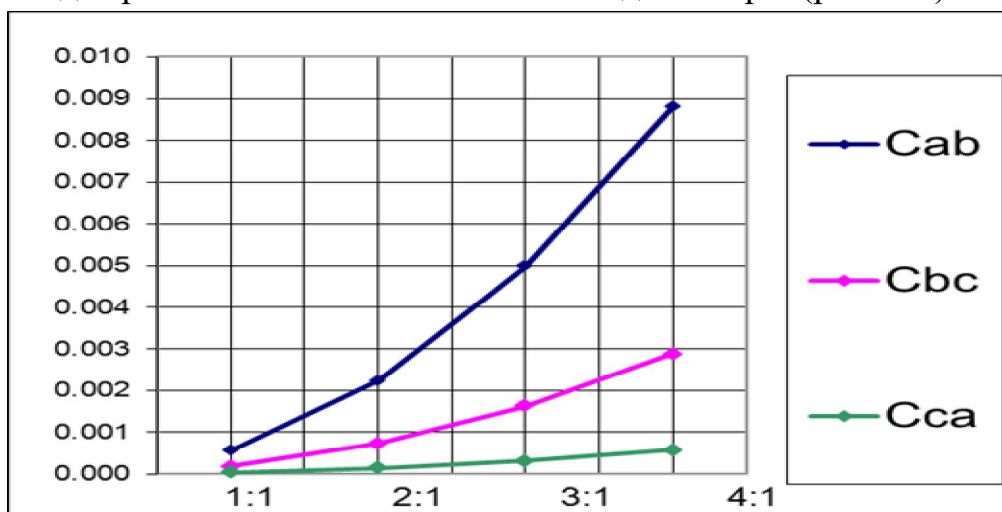


Рисунок 5.4 - Залежність значень ємностей конденсаторів від коефіцієнта трансформації

На рисунку 5.5 подано графіки фазних струмів після встановлення режиму компенсації. Вони показують, що амплітуди стали рівними за величиною (7,8 A), а фази в точності збігаються з фазами живильних напруг, що свідчить про те, що джерела віддають лише активну потужність.

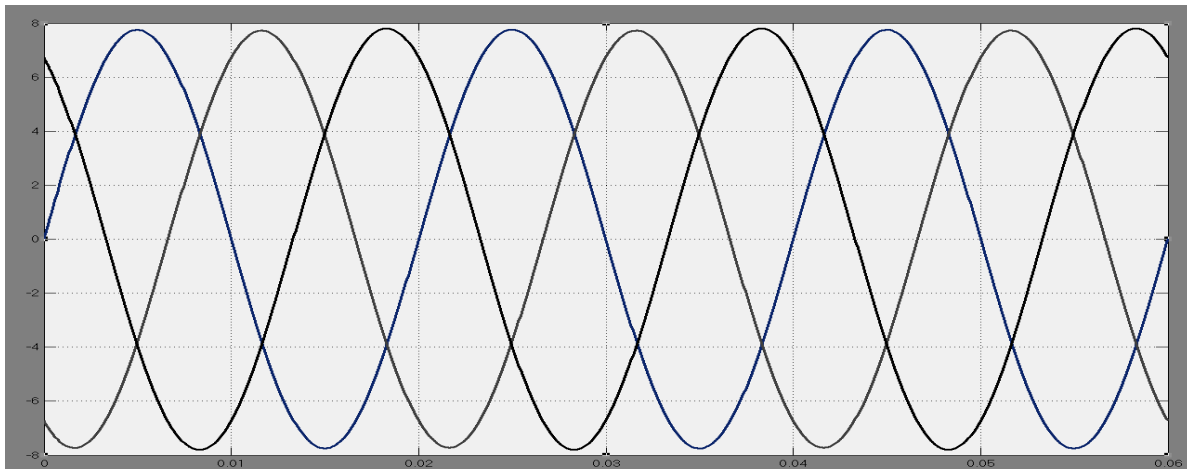


Рисунок 5.5 - Часові діаграми мережевих струмів після виконання оптимізації за коефіцієнта трансформації 4:1

Отже, проведені дослідження показали, що симетро-компенсувальний конденсаторний пристрій можна під'єднати до системи електропостачання через понижувальний трансформатор, що можна використовувати в тих випадках, коли напруга системи висока. Шляхом моделювання та за допомогою алгоритмів пошукової оптимізації в досліджуваній системі електропостачання досягнута компенсація реактивної потужності і повне симетрування. Розраховані запропонованим методом параметри симетро-компенсувального пристрою забезпечують довершені симетрування і компенсацію реактивної потужності, враховуючи реактивність і несиметричність навантаження, а також реактивності лінії електропередачі і трансформатора симетро-компенсувального пристрою. Результати розрахунків, подані у вигляді графіків, згідно з прийнятим навантаженням відображають зміни ємностей конденсаторів залежно від коефіцієнта трансформації трансформатора, через який під'єднано симетро-компенсувальний пристрій.

5.2 Компенсація реактивної потужності в тяговій системі змінного струму

Електрифікація залізниць є природним процесом, пов'язаним із підвищенням показників якості обслуговування пасажирських і вантажних перевезень. Водночас забезпечуються високі показники щодо швидкості, пропускної здатності, екології та комфорту пасажирів. Статистика показує, що на більшій частині електрифікованих залізниць використовуються системи

електропостачання на змінному струмі промислової частоти 50 Гц за напруги 27,5 кВ [199–204]. Будучи потужними споживачами електроенергії, тягові системи залізничного транспорту істотно впливають на мережу живлення. Цей вплив негативний, оскільки знижуються такі показники, як коефіцієнти симетрії і потужності. Основною схемою живлення тягового навантаження на залізниці є схема живлення від трифазної мережі через трансформатор. Первинна обмотка трансформатора з'єднується в зірку, а вторинна – у трикутник. Живлення тягового електроприводу здійснюється від однієї із сторін вторинного трикутника за схемою однофазного навантаження [199]. Таким чином, системи електропостачання змінного струму відрізняються істотною несиметрією навантаження. Це, зі свого боку, призводить до появи в системі реактивної потужності.

Для часткового ослаблення несиметрії використовують схеми так званого гвинта, коли на кількох підстанціях змінного струму змінюються точки під'єднання і фазування тягового навантаження. Але ці заходи не вирішують проблему несиметрії тягового навантаження і появи реактивної потужності повністю, оскільки збільшуються втрати і знижується коефіцієнт корисної дії.

В останні роки різко збільшився інтерес до питань симетрування і компенсації реактивної потужності в мережах електропостачання залізниць [203–205], проте в зазначених роботах немає детального аналізу режимів устаткування, зокрема трансформаторного, а також точного визначення параметрів симетрувальних і компенсувальних елементів. У зв'язку з цим необхідно розробити методи зниження несиметрії і компенсації реактивної потужності в системі електропостачання залізничної тяги. Для цього потрібно проаналізувати режими і електромагнітні процеси в системі живлення тягового навантаження змінного струму, визначити параметри симетро-компенсувального пристрою (СКП) на реактивних елементах, які дозволяють мінімізувати реактивну потужність і несиметрію в системі, а також переконатися в тому, що оптимізований режим дійсно має вищі показники за умовами роботи обладнання системи електропостачання.

Розглянемо систему електропостачання залізничної тяги на змінному струмі з однофазним навантаженням на прикладі одного складу на лінії. Цей варіант відповідає випадку найбільш різко вираженої несиметрії в системі електропостачання. Розрахункова схема зображена на рисунку 5.6. Джерела синусоїдальної напруги імітують мережу живлення необмеженої потужності, якою в цілому можна вважати енергосистему, від якої живиться тягова підстанція. Елементи L_0 і r_0 становлять опори ліній електропередачі, що підводить енергію до тягового трансформатора. Первинні обмотки цього трансформатора з'єднані в зірку, а вторинні – у трикутник (за схемою 11 групи

з'єднання). Виходи вторинної обмотки *a*, *b*, *c* використовуються для живлення тягових навантажень. Фаза С заведена на рейку, а фаза А – на контактний провід. Опір Z_H відображає тягове навантаження, для якого будемо вважати загальноприйняте значення $\cos \varphi = 0,8$.

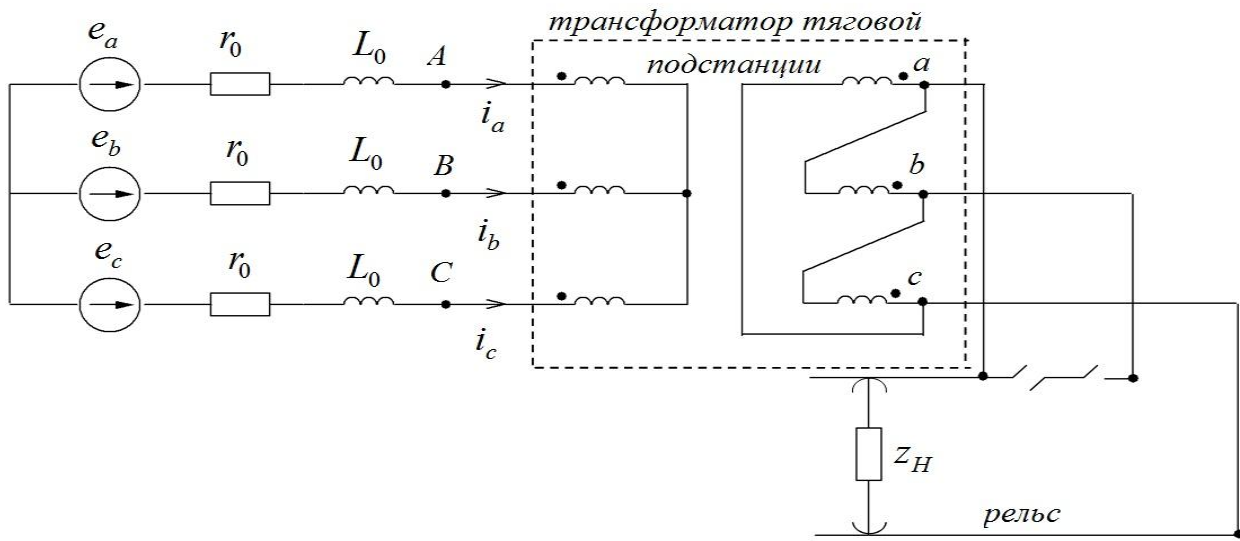


Рисунок 5.6 – Живлення змінним струмом залізничного тягового навантаження

Розглянемо випадок живлення тягового навантаження від тягового трансформатора типу ТДНЖ-25000/110, параметри якого (паспортні дані) такі: номінальна потужність – 25 мВА, напруга первинної сторони – 110 кВ, напруга вторинної сторони – 27,5 кВ, частота напруги живлення – 50 Гц, напруга короткого замикання – 10,5 %, втрати короткого замикання – 120 кВт, струм холостого ходу – 0,7 %, втрати холостого ходу – 30 кВт.

Розрахунок параметрів еквівалентної схеми заміщення для візуальної моделі дав такі результати:

- активний опір первинної обмотки – 1,161 6 Ом;
- індуктивність розсіювання первинної обмотки – 0,080 798 Гн;
- активний опір вторинної обмотки – 0,072 6 Ом;
- індуктивність розсіювання вторинної обмотки – 0,005 05 Гн;
- індуктивність намагнічування – 223,316 Гн;

опір, що відображає втрати на перемагнічування, увімкнено паралельно індуктивності намагнічування – 403 078,81 Ом. Ці параметри в подальшому використовуються у вікні властивостей візуальної моделі трифазного трансформатора, який живить тягове навантаження.

Для визначеності розглянемо струм навантаження близький 180 А, відповідний середньому ступеню навантаження, що забезпечує рух одного складу. За необхідності можна розрахувати будь-який інший варіант тягового навантаження. Моделювання процесів здійснюємо за допомогою візуальної Simulink-моделі (рис. 5.7).

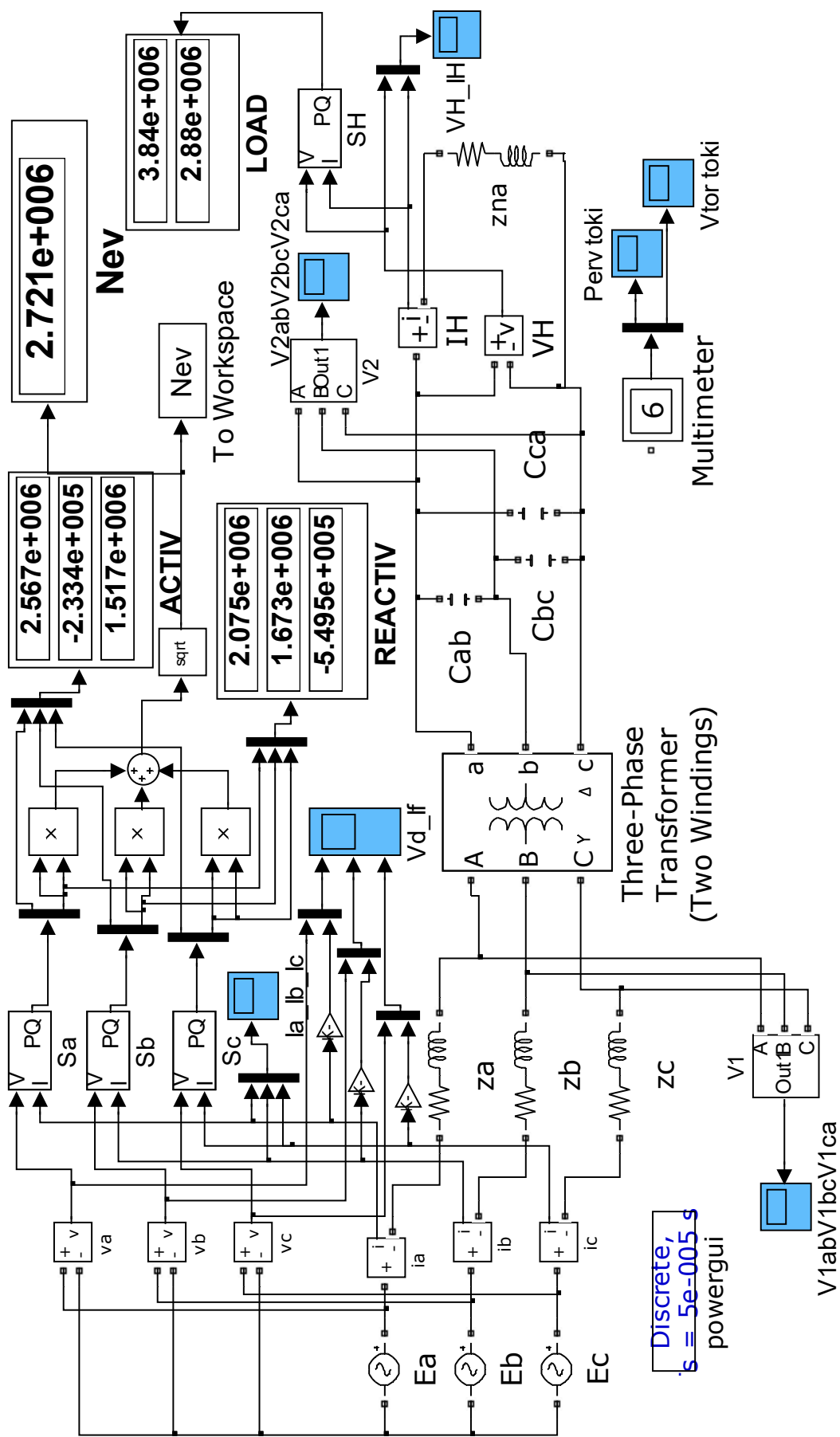
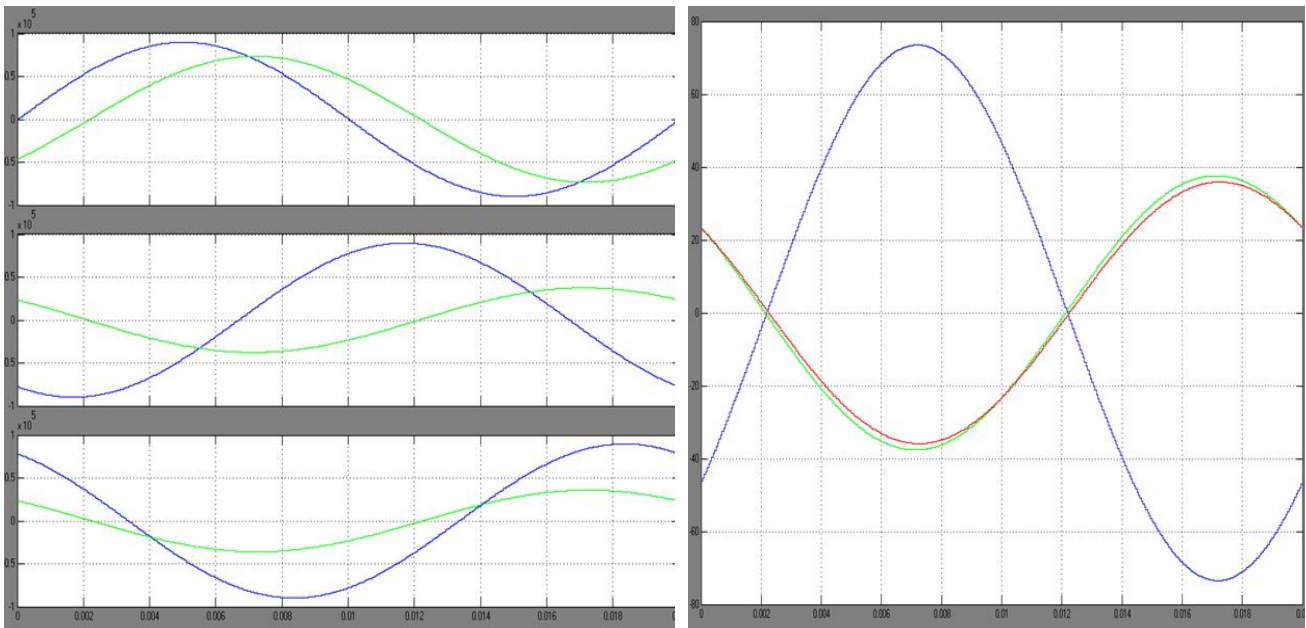


Рисунок 5.7 – Модель системи електропостачання змінним струмом (несиметричне навантаження системи)

Параметри лінії електропередачі та навантаження такі: $r_0 = 1$ Ом; $L_0 = 0,01$ Гн; $R_n = (121 + 90,75j)$ Ом. Під час роботи моделі використовується метод дискретних моделей елементів, що забезпечує подолання явища жорсткості системи диференціальних рівнянь. Крок інтегрування моделі прийнятий рівним $0,000\ 05$ с.

Під час моделювання на віртуальні осцилографи виводяться струми в лініях електропередачі (вони ж є струмами в джерелах електроенергії і первинних обмотках трансформатора), напруги на затискачах трансформатора, а також струми і напруги навантаження. За допомогою віртуальних вимірювальних приладів фіксуються активні і реактивні потужності, що віддаються кожним джерелом електроенергії, і передача цих значень на цифрові вимірювачі. Результати моделювання усталеного процесу за несиметричного навантаження подано на рисунку 5.8. Діаграми свідчать про несприятливі умови роботи електрообладнання за несиметричного навантаження на вторинних обмотках тягового трансформатора. На рисунку 5.8, а наведені напруги кожного джерела спільно із струмом цього джерела (масштаб для струмів збільшений в 1 000 разів для поліпшення наочності). Видно, що від фази А відбирається струм, що відстає, відповідний індуктивному характеру навантаження на цю фазу. Віртуальний вимірювач потужностей показує, що повна потужність, що віддається фазою А, має значення: $S_A = 2.567E6 + j2.075E6$. Для фази В значення повної потужності $S_B = -2.334E5 + j1.673E6$, а діаграми напруги і струму (рис. 5.8, а середня) свідчать про те, що джерело фази В працює в режимі споживання потужності. У фазі С (рис. 5.8, а нижня діаграма) струм дещо випереджає напругу, що свідчить про ємносний характер потужності, що віддається, а значення повної потужності $S_C = 1.517E6 - j5.495E5$. Із значень реактивних потужностей складено середньоквадратичний функціонал, значення якого для несиметричного режиму $N_{ev} = 2.721E6$ Вар. Надалі цей функціонал буде прийматися як цільова функція при проведенні пошукової оптимізації.

На діаграмі рисунка 5.8, б зображені струми в лініях електропередачі (вони ж струми в первинних обмотках трансформатора). Амплітуда струму фази А становить величину 73,492 А, а струми в фазах В і С майже збігаються – їхні амплітуди дорівнюють 35,89 А і 37,614 А відповідно. Таку саму пропорцію складають і амплітуди струмів вторинних обмоток трансформатора – 167,94 А, 83,97 А. і 83,97 А.



a

б

Рисунок 5.8 - Діаграми для несиметричного режиму: а – струми і напруги джерел; б – струми в лініях електропередачі

Це показує, що обмотки стрижня фази А перевантажені, а інші недовантажені, і трансформатор працює з великим перекосом струмів обмоток. Це, зі свого боку, обумовлює і несиметрію напруг між виводами трансформатора: на первинній стороні трансформатора амплітуди напруг дорівнюють 15 520, 15 556 і 15 540 В; на вторинній стороні трансформатора – 38 305, 39 057 і 38 102 В. Повна потужність на тяговому навантаженні $S_H = 3.84E6 + j2.88E6$. Можна зробити висновок, що кожен елемент електрообладнання системи електропостачання працює при різкій несиметрії в нерациональному режимі.

Пошук параметрів компенсатора реактивної потужності здійснюється за допомогою пошукової оптимізації на основі алгоритму методу деформованого багатогранника [33, 34], що реалізується в системі MATLAB спільно з Simulink-моделлю. Методика організації такого пошуку розглянута раніше стосовно узагальненої трифазної системи електропостачання.

У досліджуваному випадку як параметри оптимізації прийняті величини параметрів елементів, що під'єднуються в цій системі електропостачання для симетрування режиму та компенсації реактивної потужності. Як СКП обрана схема з трьох реактивних елементів, що під'єднуються за схемою трикутника до виводів вторинної обмотки тягового трансформатора. Оскільки заздалегідь невідомо, який саме елемент має бути під'єднаний у схемі СКП, під'єднуємо в кожную сторону трикутника СКП конденсатори, що реалізується шляхом встановлення відповідного варіанта за допомогою списку у вікні властивостей

кожного елемента. Такий вибір цілком обґрунтований, оскільки навантаження має індуктивний характер, і, як показав досвід дослідження подібної схеми, три конденсатора в СКП здатні відсиметрувати лінійні струми і повністю компенсувати реактивну потужність у системі електропостачання змінного струму. Однак у цьому випадку рішення не привело до очікуваного ефекту. Насправді в процесі проведення пошукової оптимізації цільова функція після деякої кількості циклів перестала зменшуватися, а величина ємності конденсатора C_{bc} стала зменшуватися і прагнула досягти нескінченно малої величини. Цей елемент, отже, витісняється процесом пошукової оптимізації. Це стало сигналом для заміни відповідного конденсатора СКП на дуальний елемент – індуктивність. Після цього цільова функція звелася до величини, близької до нуля. Це означає, що реактивна потужність у системі повністю скомпенсована, а лінійні струми утворили цілковито симетричну систему.

На рисунку 5.9 подана модель системи електропостачання після закінчення процесу пошукової оптимізації. Цей режим досягнутий за таких параметрів СКП: $C_{ab} = 1,0031113E-05$ Ф; $L_{bc} = 1,076\ 718\ 5$ Гн; $C_{ca} = 1,2937435E-05$ Ф. Водночас значення цільової функції надзвичайно мале $N_{ev} = 4,226E-6$. Прилади показують відсутність у системі реактивної потужності, а кожне з джерел віддає лише активну потужність $1,332E6$ Вт.

Повна потужність у навантаженні визначається значенням $S_H = 3,996E6 + j2,996E6$, що означає збільшення активної потужності на тяговому навантаженні порівняно з несиметричним режимом за відсутності СКП. Унаслідок вмикання СКП коефіцієнти потужності джерел усіх трьох фаз стають одиничними, первинні і вторинні фазні струми вирівнюються між собою по фазах за амплітудами, і таким чином трансформатор працює у винятково симетричному режимі. Це покращує умови роботи трансформаторів і збільшує термін їхньої безаварійної роботи. Зменшення амплітуд струмів в обмотках трансформатору суттєво зменшує теплові втрати в системі електропостачання.

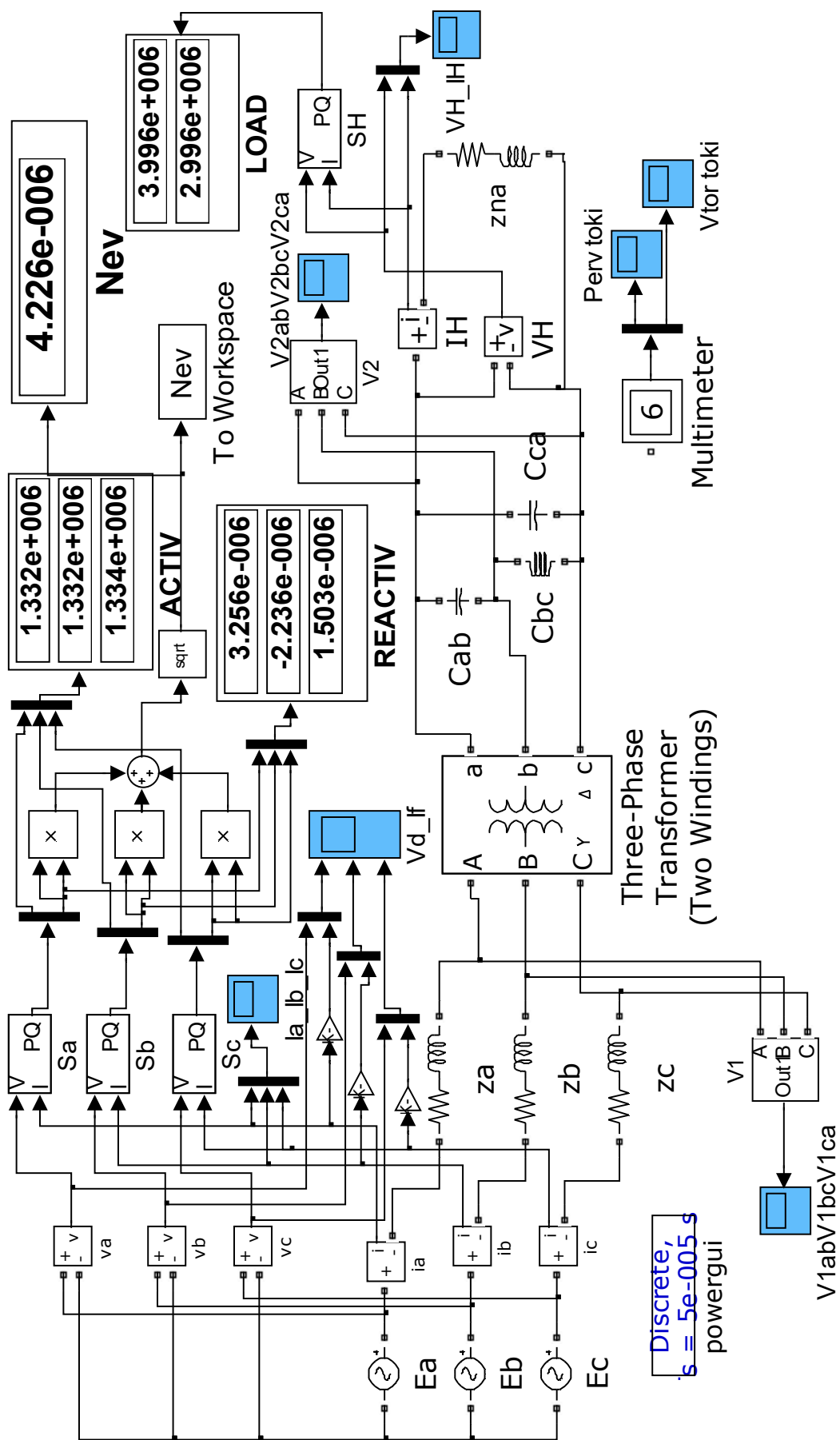


Рисунок 5.9 – Модель системи після знаходження параметрів за відсутності симетричного компенсуючого пристрою

На рисунку 5.10 подано діаграми струмів і напруг, які ідентичні рисунку 5.8, але відповідають симетричному режиму з повною компенсацією реактивної потужності.

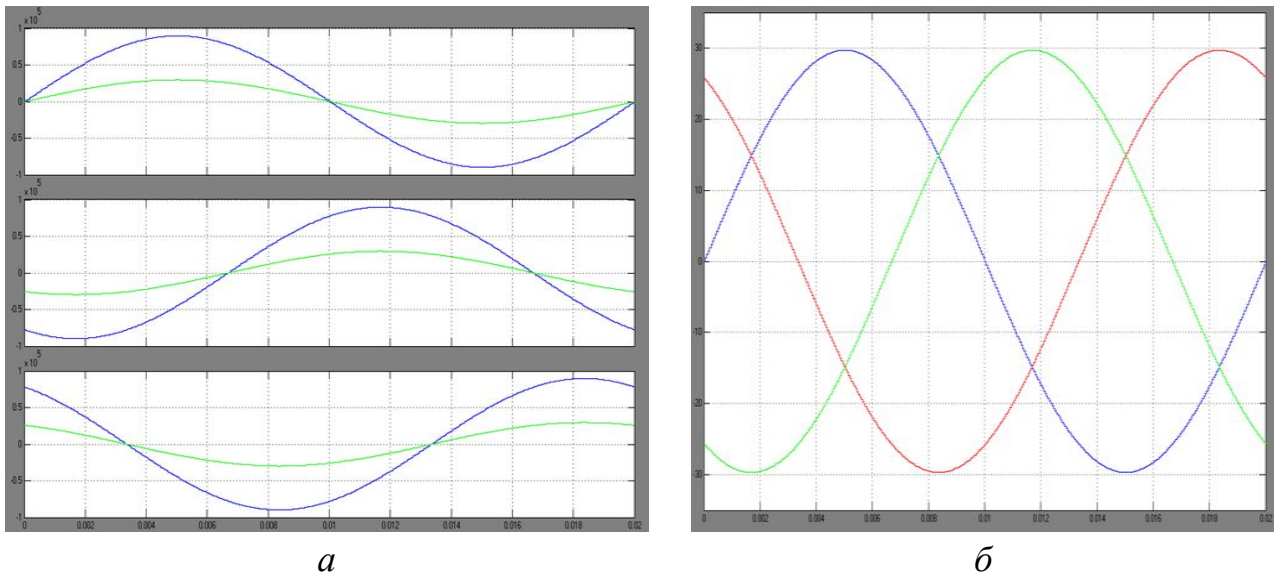


Рисунок 5.10 - Діаграми для симетричного режиму з повною компенсацією реактивної потужності: а – струми і напруги джерел; б – струми в лініях електропередачі

З рисунка 5.10, а видно, що струми в джерелах живлення абсолютно збігаються за фазою з їх задавальними напругами. З рисунка 5.10, б зрозуміло, що і лінія, і трансформатор навантажуються струмами абсолютно рівномірно. Лінійні напруги на первинній та вторинній стороні зрівнялися і їхні амплітуди відповідно склали 155 510 і 38 865 В. Аналогічно зрівнялися і струми трансформатора і лінії електропостачання, амплітуди яких відповідно дорівнюють 29,68 і 68,63 А. Ці значення набагато менші тих, що відповідають несиметричному вихідному режиму.

Зменшення струмів лінії електропередачі по фазах А, В, С означає зменшення втрат у лініях електропередачі, яке відповідає квадратичній залежності від струмів. Це забезпечує економію електроенергії, а крім того, тяговий трансформатор працює в абсолютно симетричному режимі. Це свідчить про можливість досягти енергозбереження на залізниці шляхом оптимізації режимів тягових підстанцій змінного струму за допомогою відносно простого додаткового електроустаткування СКП.

Таким чином, дослідження показало, що несиметричний режим, що виникає в традиційній системі електропостачання залізниць на змінному струмі, характеризується значними рівнями реактивної потужності в системі і несиметрією як струмів, так і напруг. Використання розробленої візуальної моделі і запропонованого методу пошукової оптимізації дозволяє визначити

параметри симетро-компенсувального пристрою для реального випадку. У процесі пошукової оптимізації з'явилась можливість виявити тип кожного реактивного елемента, який повинен під'єднуватися до складу симетро-компенсувального пристрою для повної компенсації реактивної потужності в системі електропостачання. Під'єднання симетро-компенсувального пристрою з певними в процесі дослідження параметрами забезпечує повне симетрування системи і компенсацію в ній реактивної потужності. Це істотно покращує умови роботи основного обладнання тягової підстанції змінного струму і підвищує коефіцієнт корисної дії системи загалом. Перспективним для подальшого дослідження є розрахунок параметрів СКП для ряду значень тягових навантажень, зокрема і розгляд варіантів навантажень системи електропостачання від декількох споживачів, що під'єднуються на обидві робочі фази вторинних обмоток силового трансформатора.

5.3 Розрахунок параметрів симетрувального пристрою в тяговій системі електропостачання змінного струму за навантаження, що змінюється

Електропостачання залізничного транспорту на змінному струмі має низку переваг порівняно з електропостачанням на постійному струмі [199 – 202]. Зокрема, можна відзначити зменшення втрат енергії, оскільки її передача здійснюється більш високою напругою за меншого струму. Крім того, відпадає необхідність в обслуговуванні випрямних установок тягових підстанцій, що містять силові напівпровідникові прилади, які дуже чутливі до перевантажень. Одним із недоліків систем електропостачання залізничного транспорту змінним струмом є істотна несиметрія струмів у лініях електропередачі трифазних систем і в обмотках живильних трифазних трансформаторів. Це обумовлено тією обставиною, що відбір енергії від вторинної обмотки тягового трансформатора, сполученої за схемою трикутника, здійснюється лише від однієї обмотки, якщо підстанції навантажуються двигунами одного поїзда, або від двох обмоток, коли від підстанції живляться два потяги. Найбільша ступінь несиметрії, як показують дослідження, відповідає випадку одноплечевого навантаження. Разом із тим в аномальному режимі по споживанню і генерації реактивної потужності виявляється не тільки трансформатор підстанції, а й живильна мережа. Це викликає значні амплітуди струмів у лініях електропередачі, що призводить до збільшення незворотних теплових втрат і зниження коефіцієнта корисної дії. Тому симетрування і компенсація реактивної потужності в системах тягового електропостачання змінного струму становить важливий резерв енергозбереження, особливо якщо врахувати, що

системи електропостачання транспорту є одними з найпотужніших електроенергетичних споживачів.

Комп'ютерне моделювання з використанням сучасних методів пошукової оптимізації показало, що симетрувати систему електропостачання способом вирівнювання амплітуд струмів у трифазній лінії електропередачі можна шляхом приєднання до вторинної сторони трансформатора реактивних елементів, які не вносять активних втрат у систему. Для випадку найбільшої несиметрії під час живлення одного поїзда до складу симетро-компенсувального пристрою необхідно під'єднати два конденсатора й одну індуктивність. Величини параметрів симетро-компенсувального пристрою повинні змінюватися залежно від навантаження, тому необхідна інформація про характер зміни цих параметрів залежно від навантаження. Ця інформація потрібна для керування симетро-компенсувальними пристроями в межах заданих похибок з метою оптимізації режимів роботи тягової підстанції.

Для ослаблення впливу несиметрії використовують схеми так званого «гвинта» [199]. Водночас для декількох підстанцій змінного струму, що живляться від однієї високовольтної лінії електропередачі, змінюють точки під'єднання і фазування тягового навантаження. Однак ці заходи не дозволяють повністю вирішити проблему несиметрії тягового навантаження і появи реактивної потужності і не дозволяють повною мірою знизити втрати і збільшити коефіцієнт корисної дії.

В останні роки спостерігається значний інтерес до питань симетрування і компенсації реактивної потужності в системах електропостачання залізниць [203, 204], однак у зазначених роботах відсутній детальний аналіз режимів обладнання, а також точне визначення параметрів симетрувальних і компенсувальних елементів. Завдання точного визначення параметрів симетро-компенсувального пристрою можна вирішити узагальненими методами з використанням комп'ютерних моделей і методів оптимізації. Завдяки такій постановці задачі рішення забезпечується самим комплексом автоматизованого проектування, а результати характеризуються високою точністю і малими витратами часу на отримання самого рішення. У [6] таке рішення отримано для тягової системи електропостачання змінного струму за фіксованого навантаження. Цікавим є однак рішення цього завдання для широкого діапазону зміни навантаження на тягову підстанцію змінного струму й узагальнення результатів. Така інформація може бути корисна для проектування автоматичних пристроїв компенсації реактивної потужності з використанням мікропроцесорної техніки. Зокрема, для прискорення прийняття рішення в пам'ять мікроконтролера може бути введена інформація, отримана за результатами розрахунків, у вигляді табличних масивів даних або

апроксимуючих математичних виразів. Комп'ютерна модель тягової системи електропостачання наведена на рисунку 5.11.

Розглянемо, як можна здійснити визначення параметрів симетро-компенсувального пристрою, що під'єднується на затискачах вторинної обмотки тягового трансформатора, за допомогою методу пошукової оптимізації та використанням комп'ютерної моделі системи електропостачання при навантаженні на тягову підстанцію змінного струму, що змінюється. Тут відсутні реактивні елементи симетро-компенсувального пристрою, які відключені зі схеми за допомогою опції Open Circuit. Таким чином, модель відтворює роботу системи електропостачання в несиметричному режимі одноплечевого навантаження. Тут джерела синусоїдальної напруги імітують мережу живлення необмеженої потужності, якою можна вважати в цілому енергосистему, від якої живиться тягова підстанція. Елементи, які відображатимуть опори ліній електропередачі до тягового трансформатора, утворюють комплексні опори $(1 + j\omega 0,01)$ Ом. Первинні обмотки цього трансформатора з'єднані в зірку, а вторинні – у трикутник (за схемою 11 з'єднання). Затискачі вторинної обмотки використовуються для живлення тягових навантажень. Фаза С приєднана до рейки, а фаза А – до контактного проводу.

Опір RL Load відображає тягове навантаження, для якого будемо вважати значення $\cos \varphi = 0,8$. Воно забезпечується елементом типу Series RLC Load, у якому задаються активна потужність і реактивна індуктивна складова повної потужності, а ємнісна складова покладається нульовою. Повна потужність SH , споживана навантаженням, задається як частина повної потужності SH_{mp} тягового трансформатора: $SH = kSH_{mp}$, де будемо вважати дискретно мінливий коефіцієнт завантаження $k = 0,1; 0,2; \dots 1$.

Будемо розглядати реальний випадок живлення тягового навантаження від тягового трансформатора типу ТДНЖ-25000/110. Паспортні дані цього трансформатора такі: номінальна потужність 25 мВА, напруга первинної сторони 110 кВ, напруга вторинної сторони 27,5 кВ. Частота напруги живлення 50 Гц; напруга короткого замикання становить 10,5 %, втрати короткого замикання 120 кВт; струм холостого ходу складає 0,7 %; втрати холостого ходу 30 кВт.

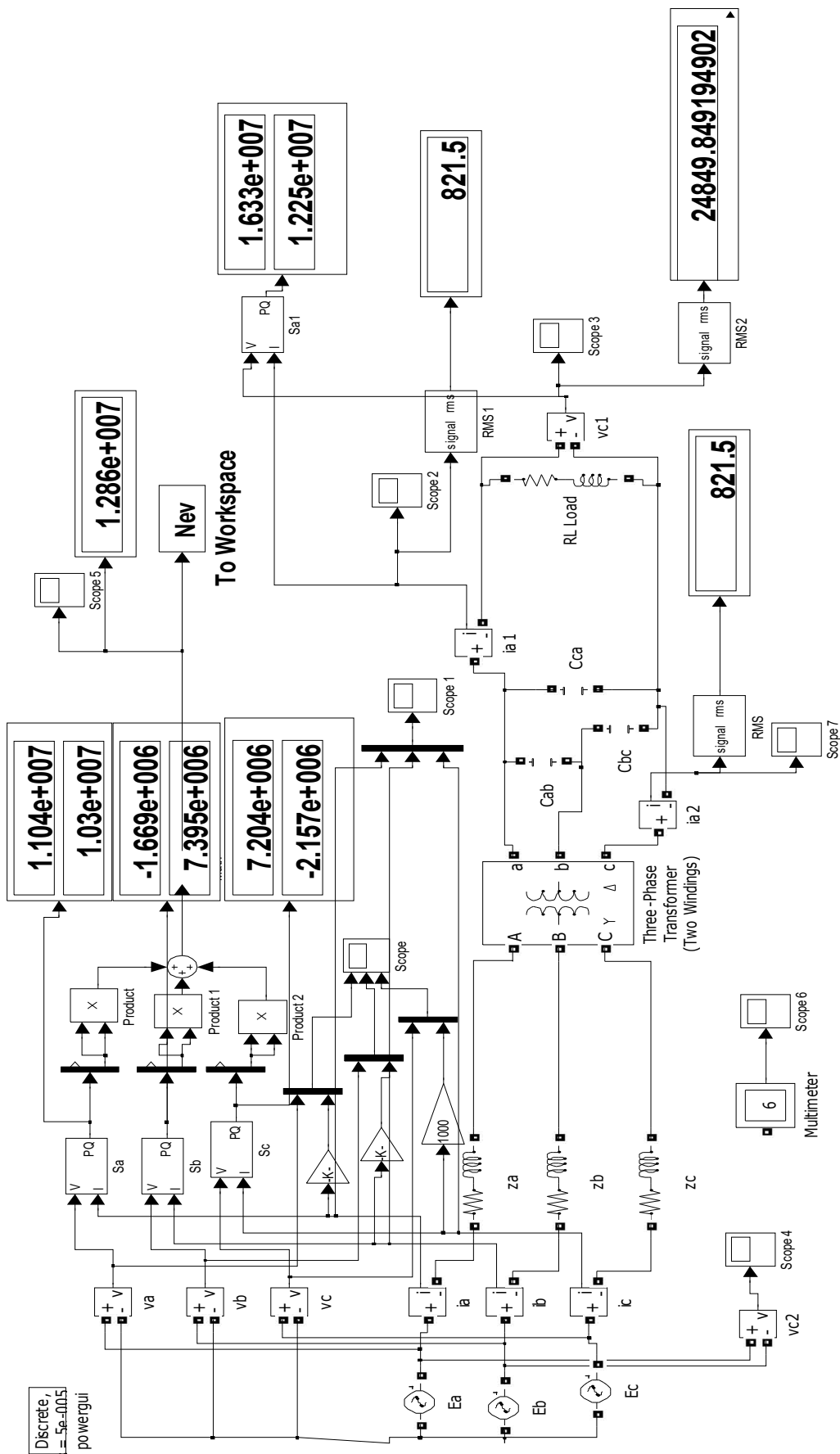


Рисунок 5.1.1 – Комп’ютерна модель тягової системи електропостачання змінного струму за відсутності симетро-компенсувального пристрою

Розрахунок параметрів еквівалентної схеми заміщення для візуальної моделі трансформатора за допомогою розробленої програми дав такі результати: активний опір первинної обмотки 1,1616 Ом; індуктивність розсіювання первинної обмотки 0,080 798 Гн; активний опір вторинної обмотки 0,0726 Ом; індуктивність розсіювання вторинної обмотки 0,005 05 Гн; індуктивність намагнічування 223,316 Гн; активний опір, що відображає втрати на перемагнічування, що включається за вимогами SPS-моделі трансформатора паралельно індуктивності намагнічування (згідно з розрахунком за допомогою згаданої вище програми) складає величину 403 078,81 Ом. Ці параметри записуються у вікні властивостей візуальної моделі трифазного трансформатора, який живить тягове навантаження. У цьому вікні список, що розкривається, має бути виставлений на опцію, відповідну поїменованим одиницям.

Під час роботи моделі будемо використовувати метод дискретних моделей елементів, що забезпечує подолання явища жорсткості системи диференціальних рівнянь. Крок дискретизації моделі прийнятий таким, що дорівнює 0,000 05 с.

У процесі моделювання на віртуальні осцилографи виводяться струми в лініях електропередачі (вони ж є струмами в джерелах електроенергії і первинних обмотках трансформатора), напруги на затискачах трансформатора, а також струми і напруги навантаження. За допомогою віртуальних вимірювальних приладів спостерігаються активні і реактивні потужності, що віддаються кожним джерелом електроенергії з передачею цих значень на цифрові вимірювачі. З реактивних складових цих потужностей в моделі обчислюється кульова метрика, яка використовується як цільова функція під час оптимізації. Як видно з показань приладів моделі (рис. 5.11), у разі відсутності пристрою симетрування і компенсації реактивної потужності режим характеризується вкрай незадовільними показниками, що характеризують споживання електричної енергії від джерел.

Наведений варіант відповідає одиничному значенню коефіцієнта завантаження k , тобто потужність споживача встановлена рівною номінальній потужності живильного трансформатора. Знаки перед складовими повної потужності фаз показують, що фаза А віддає активну потужність і реактивну потужність індуктивного характеру, фаза В споживає активну потужність і віддає реактивну потужність індуктивного характеру, фаза С віддає активну потужність і реактивну потужність ємнісного характеру.

Ця обставина, обумовлена значною несиметрією струмів, може призводити до неправильних трактувань обліку електроенергії, споживаної тяговою підстанцією. Чинне значення споживаного струму становить величину 821,5 А,

що призводить до суттєвих втрат напруги на навантаженні, діюче значення якого становить величину 24 849,85 В, що дуже відрізняється від номінальної напруги 27 500 В і характеризується 10 % втратами напруги. Таке зниження напруги на контактному проводі може різко зменшити зусилля, що розвивається тяговими двигунами [199, 202].

Пошук параметрів компенсатора реактивної потужності здійснюється за допомогою пошукової оптимізації на підставі алгоритму методу деформованого багатогранника, що реалізується в системі MATLAB спільно з Simulink-моделлю.

Параметрами оптимізації вважаються величини параметрів елементів, що під'єднуються для симетрування режиму та компенсації реактивної потужності в цій системі електропостачання. Як симетро-компенсувальний пристрій обрана схема з трьох реактивних елементів, що під'єднуються за схемою трикутника до затискачів вторинної обмотки тягового трансформатора. Порядок увімкнення і типи реактивних елементів визначені в процесі попереднього дослідження. На рисунку 5.12 наведена модель системи електропостачання після закінчення процесу пошукової оптимізації для прийнятих параметрів і одиничного коефіцієнта завантаження. Цей режим досягнутий за таких параметрів симетро-компенсувального пристрою: $C_{ab} = 50,569E-6$ Ф; $L_{bc} = 0,2173$ Гн; $C_{ca} = 65,103E-06$ Ф.

Разом із тим значення цільової функції надзвичайно мале: $N_{ev} = 9,859E-5$. Прилади показують відсутність у системі реактивної потужності, і кожне з джерел віддає лише активну потужність $6,675E + 6$ Вт. Повна потужність у навантаженні визначається значенням $SH = 19,91E6 + j14,93E6$, що означає збільшення активної потужності на тяговому навантаженні порівняно з несиметричним режимом за відсутності симетро-компенсувального пристрою. Напруга на контактному проводі зросла до значення 27 439,02 В, що близько до номінального значення, оскільки втрати напруги становлять лише 0,2 % у цьому випадку.

Відповідно збільшився до 907,1 А і струм у навантаженні, що обумовлює збільшення моменту тягових двигунів. Унаслідок під'єднання симетро-компенсувального пристрою майже вдвічі зменшився струм у вторинній обмотці фази С: раніше він становив величину 821,5 А, після компенсації – 420 А. Це свідчить про високу ефективність симетрування і компенсації реактивної потужності в системі електропостачання.

На підставі описаної методики проведена серія розрахунків, у процесі яких за різних навантажень здійснювалася повна компенсація реактивної потужності і вирівнювання струмів ліній електропередачі та трансформатора. Дані цих розрахунків зведені в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати пошукової оптимізації при різних навантаженнях

Коефіцієнт навантаження k	Струм навантаження в несиметричному режимі	Параметри симетро-компенсувального пристрою		
		C_{ab} (мкФ)	L_{bc} (Гн)	C_{ca} (мкФ)
0,1	89,96	5,119 6	2,202 3	6,573
0,2	178,1	10,032	1,076 9	12,938
0,3	264,5	14,978	0,714 4	19,338
0,5	432,0	24,974	0,428 8	32,241
0,8	670,6	40,226	0,269 9	51,854
1,0	821,5	50,569	0,217 3	65,103

На рисунку 5.13 наведені графіки, що відповідають показаним у таблиці результатам пошукової оптимізації з використанням комп'ютерної моделі.

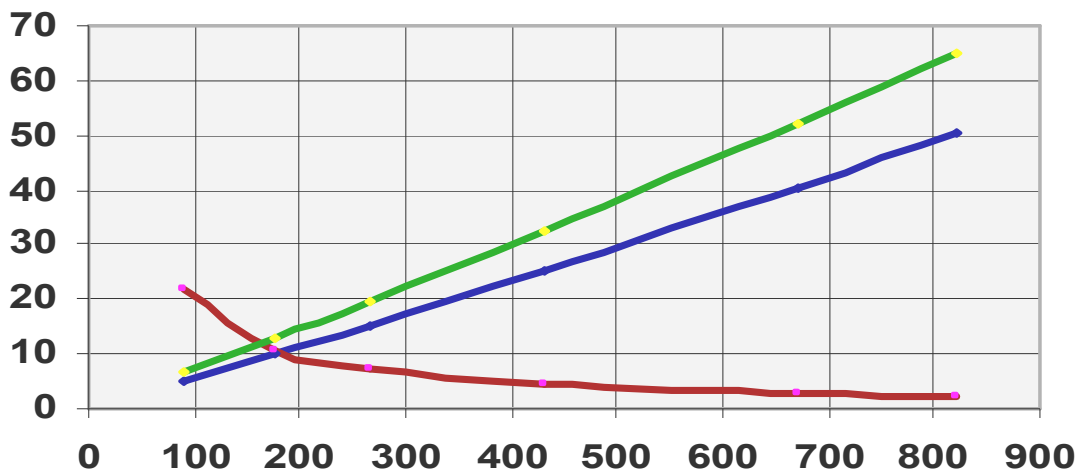


Рисунок 5.13 - Графіки зміни параметрів симетро-компенсувального пристрою залежно від струму, споживаного тяговим навантаженням у несиметричному режимі

Тут крива, що спадає, показує значення індуктивності L_{bc} (у десятикратному збільшенні для збереження наочності), наростаючі графіки відображають значення компенсувальних ємностей (нижня – для конденсатора C_{ab} , а верхня – C_{ca}). Ці графіки дозволяють знаходити параметри симетро-компенсувального пристрою за будь-яких значень струму, споживаного електровозом у несиметричному режимі. Як приклад задамо коефіцієнт навантаження $k = 0,6$. Під час моделювання несиметричного режиму діюче значення струму в тяговому навантаженні становить величину 513,2 А. За графіками (рис. 5.13) знайдемо: $C_{ab} = 30$ мкФ; $L_{bc} = 0,365$ Гн; $C_{ca} = 38,6$ мкФ. Під час моделювання процесів у схемі з під'єднаним симетро-

компенсувальним пристроєм при зазначених параметрах отримуємо режим, дуже близький до режиму повної компенсації реактивної потужності.

На рисунку 5.14, а наведені часові діаграми струмів у лініях електропередачі (вони ж – струми в первинних обмотках напруги трансформатора) при заданих параметрах навантаження і симетро-компенсувального пристрою. Діаграми свідчать про достатньо високий ступінь симетрування струмів і компенсації реактивної потужності. Під час розгляду цих же струмів в збільшеному масштабі (рис. 5.14, б) можна помітити відносно невеликі відмінності амплітуд струмів, що говорить про наявність деякої похибки, викликаній візуальною помилкою визначення параметрів симетро-компенсувального пристрою графічним способом.

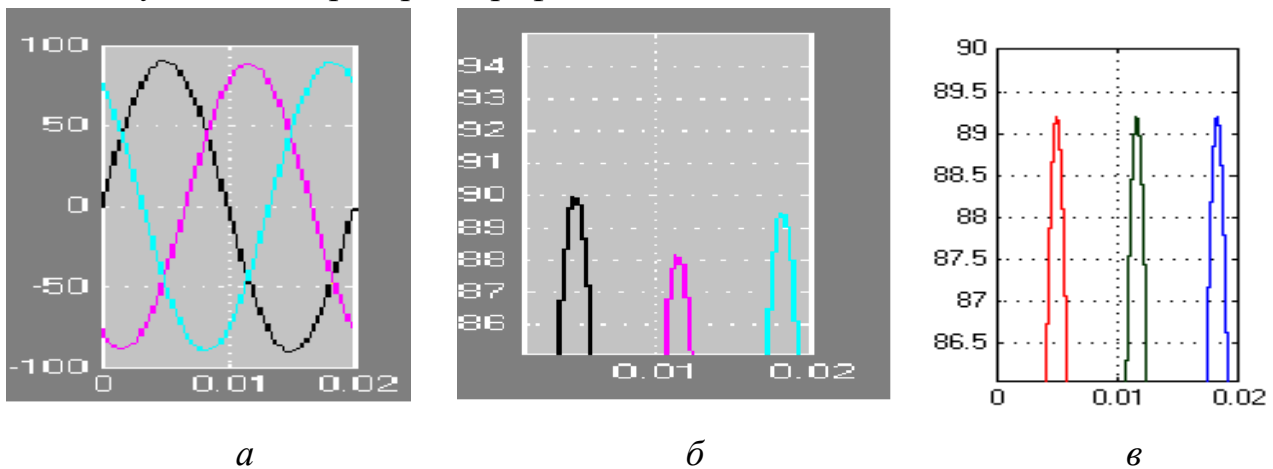


Рисунок 5.14 – Діаграми струмів у лініях електропередачі для коефіцієнта навантаження $k = 0,6$

Пошукова оптимізація для заданих параметрів дозволила знайти уточнені параметри: $C_{ab} = 30,023 \text{ 2 мкФ}$; $L_{bc} = 0,358 \text{ Гн}$; $C_{ca} = 38,743 \text{ 9 мкФ}$. Порівняння амплітуд струмів для цих параметрів (рис. 5.14, в) свідчить про точне симетрування струмів і повну компенсацію реактивної потужності в цьому випадку. У той же час уточнені параметри незначно відрізняються від параметрів симетро-компенсувального пристрою, визначених за графіками.

Таким чином, був досліджений несиметричний режим, що виникає в системі електропостачання залізниць на змінному струмі. Для цього режиму характерні значні рівні реактивної потужності та несиметрія як струмів, так і напруг. Показано, що використання візуальної моделі та методу пошукової оптимізації дозволяє з високою точністю визначити параметри симетро-компенсувального пристрою. Під'єднання симетро-компенсувального пристрою зі знайденими в процесі оптимізації параметрами забезпечує симетрування системи і повну компенсацію реактивної потужності в системі. Проведено розрахунки параметрів симетро-компенсувального пристрою для різних значень потужності, споживаної тяговим навантаженням. Отримані

результати розрахунків подані у табличному і графічному вигляді, що дозволяє визначати параметри симетро-компенсувального пристрою для будь-яких значень коефіцієнта завантаження в розрахованому діапазоні. Перспективою подальшого дослідження може бути розрахунок параметрів симетро-компенсувального пристрою для випадку одночасного живлення двох електропоїздів для різних варіантів завантаження тягової підстанції. Питання оптимізації режиму при навантаженні обох фідерів, що живляться від одного тягового трансформатора, вирішується за допомогою методу суперпозиції з наступним перерахунком еквівалентних параметрів одного симетро-компенсувального пристрою, який одночасно враховує обидва навантаження [30].

5.4 Урівноваження і балансування системи електропостачання з нейтралером

Нейтралер становить трансформатор, у якого первинні і вторинні обмотки під'єднуються за схемою зірка-зигзаг [198]. Первинною обмоткою нейтралер під'єднується до точок приєднання несиметричного навантаження. Загальний вузол вторинних обмоток утворює штучну нульову точку, до якої може під'єднуватися загальний вузол несиметричного трифазного навантаження за схемою зірки як за наявності нульового проводу (рис. 5.15), так і за його відсутності (рис. 5.16).

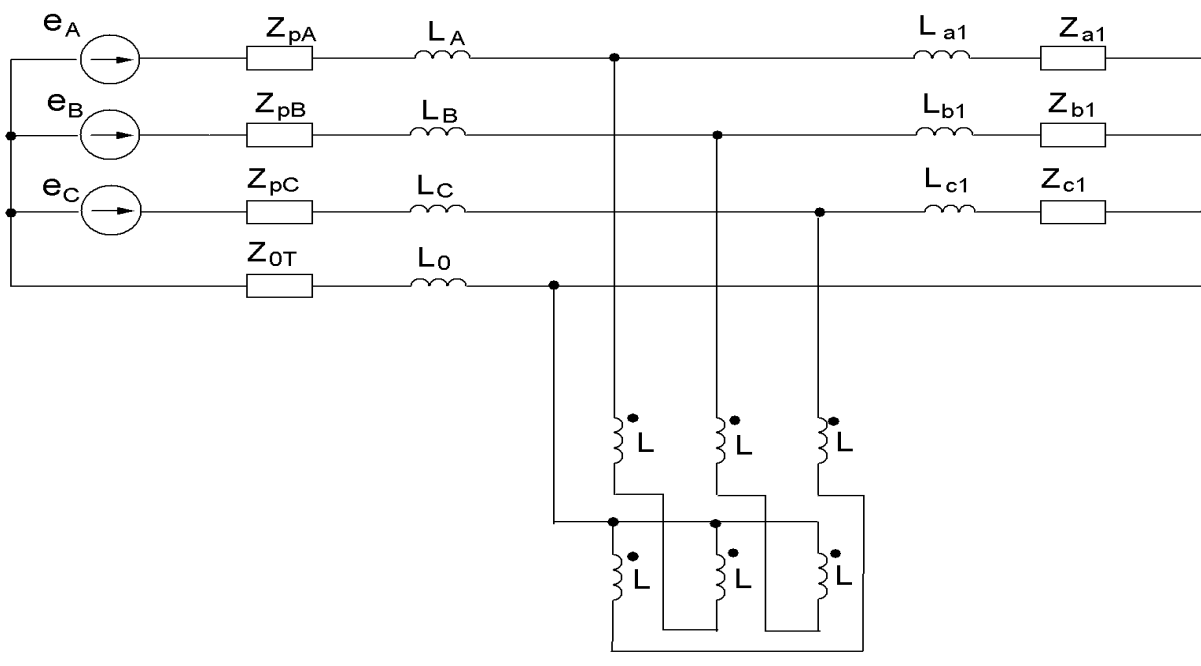


Рисунок 5.15 - Система електропостачання з нейтралером, під'єднаним до нульового проводу

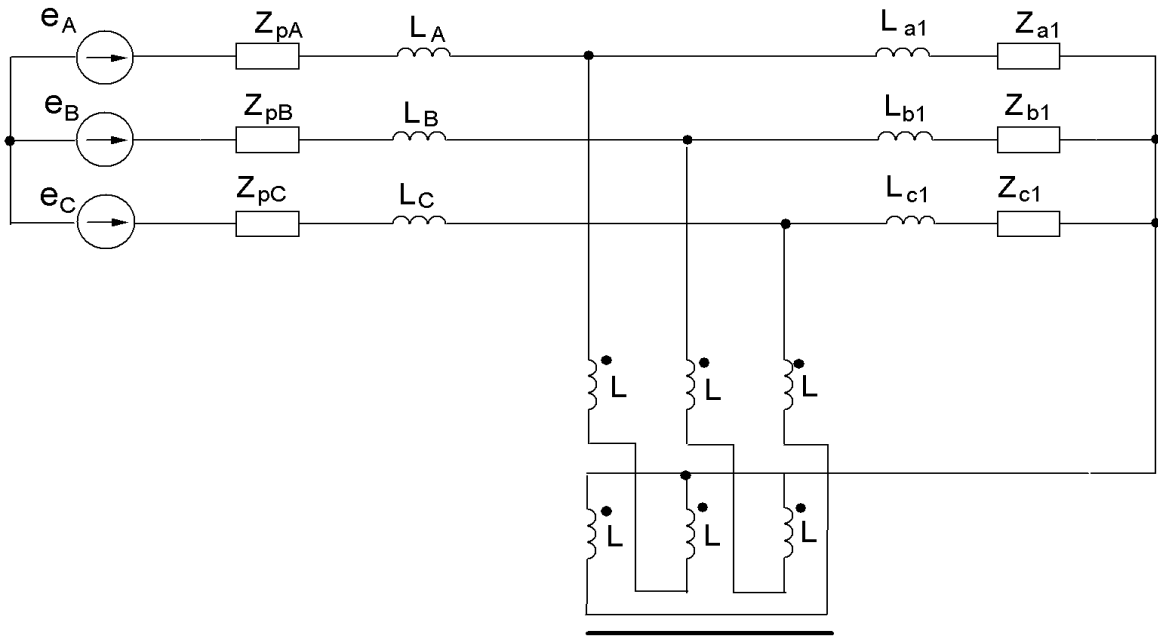


Рисунок 5.16 - Система електропостачання з нейтралером, увімкненим для створення штучної нульової точки

Перша інформація про нейтралер з'явилася в [178], однак інтерес до цього засобу врівноваження трифазних систем електропостачання зберігається і донині як у вітчизняній технічній літературі [132, 137, 149, 198], так і в зарубіжній [199]. Нейтралер володіє малим опором для нульової симетричної складової, завдяки чому потенціал штучної нульової точки наближається до нуля. Саме ця обставина дозволяє використовувати нейтралер для створення нульової точки в трипровідних системах електропостачання, а також під'єднувати його нульовим вузлом до нейтрального проводу в чотирипровідній трифазній системі електропостачання, що істотно зменшує струм, який протікає через нейтральний провід.

Будемо розглядати візуальну модель чотирипровідної трифазної системи електропостачання (рис. 5.17). Тут симетрична трифазна мережа представлена джерелами напруги E_a , E_b , E_c з амплітудами 100 В і частотою 50 Гц. Потужність мережі обмежується комплексними активно-індуктивними опорами ліній електропередачі $z_a = z_b = z_c = (0,1 + j\omega 0,001)$ Ом. Комплексні опори несиметричних навантажень по фазах складають значення $z_{na} = (0,7 + j\omega 0,005)$ Ом, $z_{nb} = (1 + j\omega 0,01)$ Ом, $z_{nc} = (2 + j\omega 0,04)$ Ом. Опір нейтралі прийнято рівним опору лінії електропередачі $z_N = (0,1 + j\omega 0,001)$ Ом. Встановлені віртуальні вимірювачі напруг джерел і струмів через них, сигнали з яких подаються на віртуальні обчислювачі активної і реактивної потужностей.

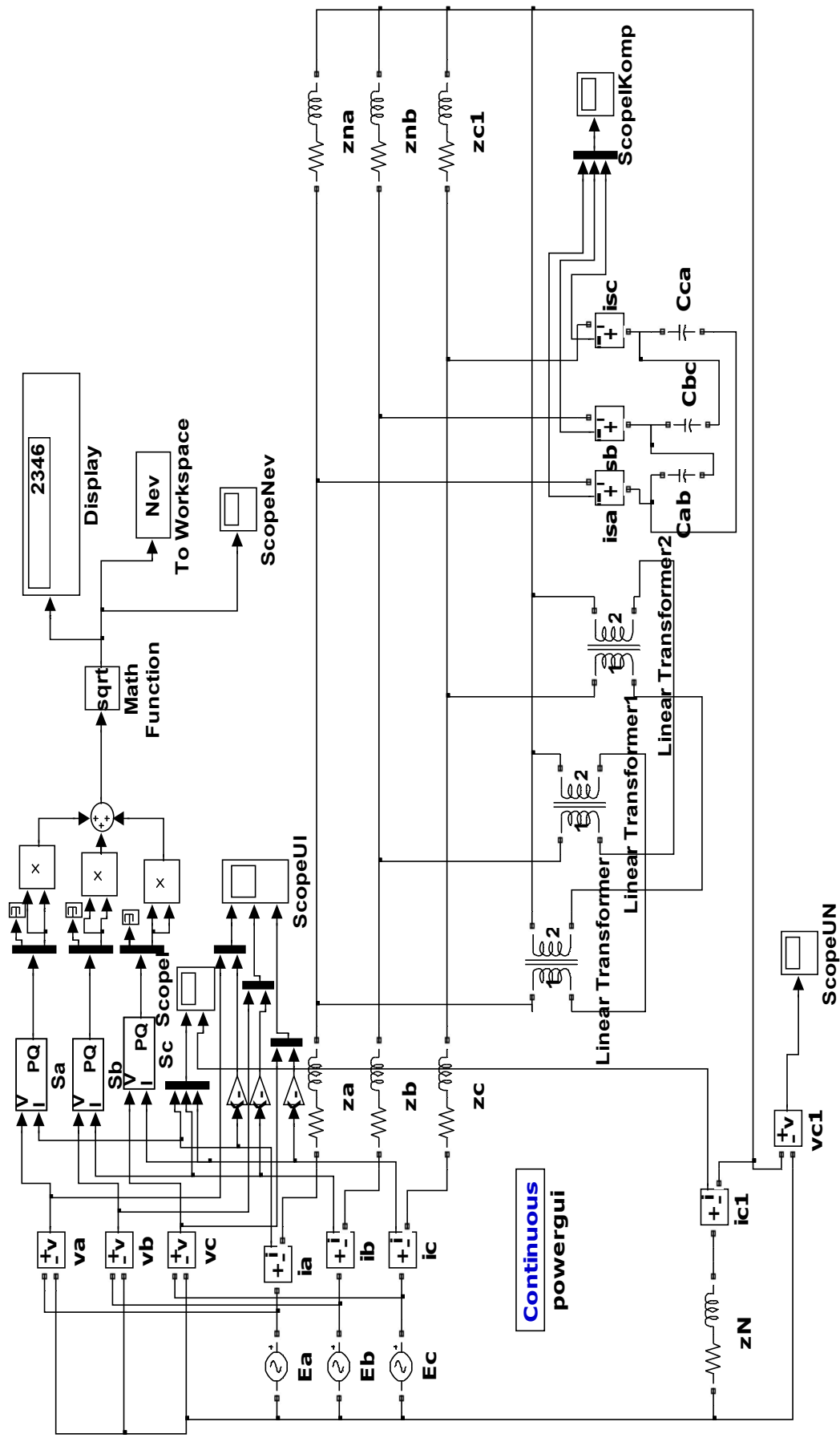


Рисунок 5.17 – Система електропостачання з нейтралером

Для формування цільової функції будуть використовуватися лише значення реактивних потужностей джерел у кожній фазі.

Модель нейтралера зібрана на трьох однофазних трансформаторах, так що дуже слабкий магнітний зв'язок між обмотками різних стрижнів нейтралера фактично не враховується. Потужність кожного трансформатора вибрана виходячи з потужності навантаження і становить 4 кВА, активні опори обмоток і індуктивності розсіювання прийняті відносно малими і складають відповідно значення 10^{-5} Ом і 10^{-4} Гн, індуктивність намагнічування - 0,2 Гн. Група симетрувальних конденсаторів увімкнена за схемою трикутника, їхні ємності будуть визначені далі методом пошукової оптимізації виходячи з критерію компенсації реактивної потужності, що віддається джерелами електричної енергії.

Запуск моделі при вимкнених нейтралері і симетрувальних конденсаторах показує, що система електропостачання працює в істотно несиметричному режимі. На рисунку 5.18 наведені діаграми струмів у лініях електропередачі (рис. 5.18, а) і струму в нейтралі (рис. 5.18, б).

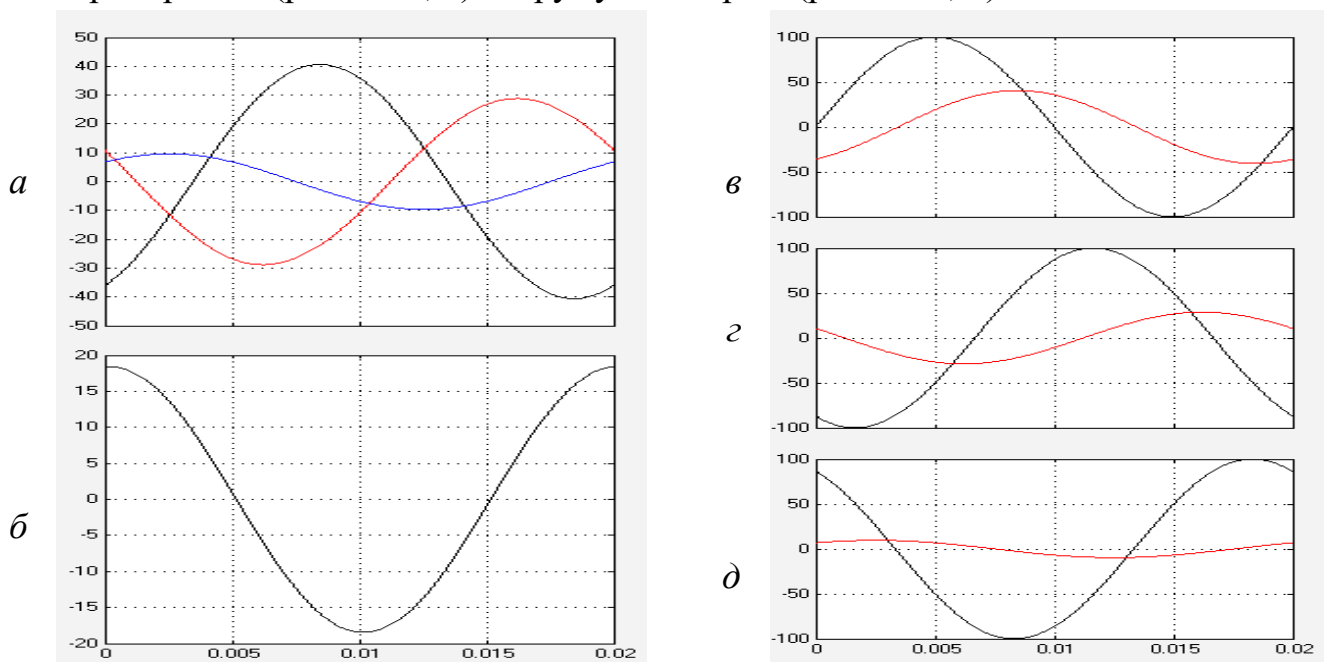


Рисунок 5.18 - Діаграми струмів і напруг у системі при вимкнених конденсаторах і нейтралері

Амплітуди струмів у фазах А, В, С складають відповідно 40,635 А, 28,81 А, 9,65 А. Амплітуда струму в нейтралі становить величину 18,437 А. На рисунку 5.18, в, г, д показані пари часових діаграм фазних напруг і струмів. Тут видно, що струми істотно зсунуті щодо своїх напруг, що означає роботу системи з низьким коефіцієнтом потужності і значними рівнями реактивної потужності, що віддається джерелами (кульова метрика реактивних потужностей становить відносно велику величину 2346 ВАр).

На другому етапі був під'єднаний нейтралер, а конденсатори залишалися вимкненими. Відповідні часові діаграми наведені на рис. 5.19.

Тут видно, що струм у нейтральному проводі (рис. 5.19, б) істотно зменшився – його амплітуда становить тепер 0,693А, що в 26,6 рази менше, ніж за відсутності нейтралера. Отже, нейтралер виконав свою функцію подавлення нульової симетричної складової струмів у лініях електропередачі, і система може вважатися практично врівноваженою.

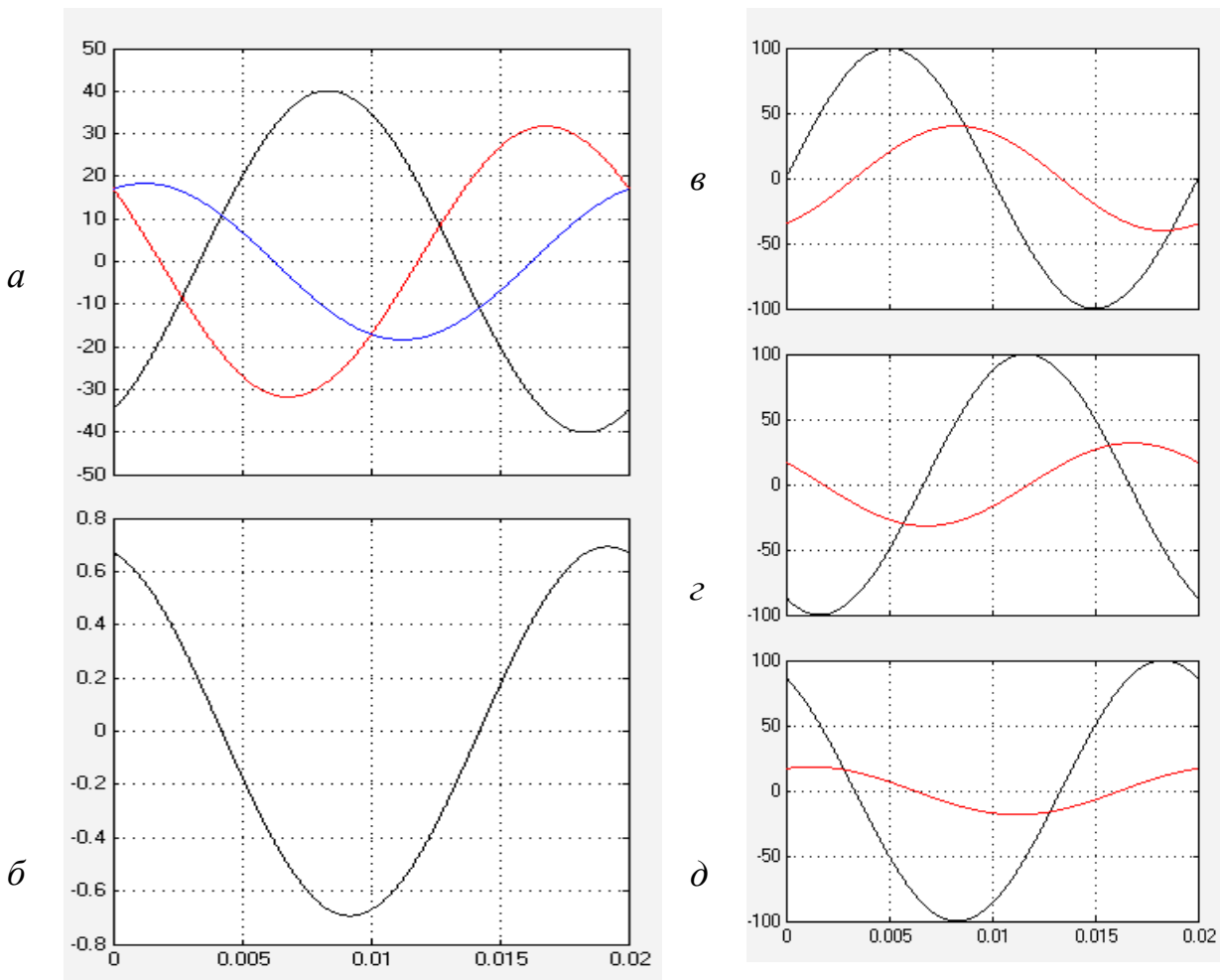


Рисунок 5.19 - Діаграми струмів і напруг системи електропостачання з під'єднаним нейтралером

Зворотна симетрична складова практично не зазнала змін. Струми ліній електропередачі у фазах А, В, С складають величини 40,1 А, 31,775 А, 18,35 А, що відповідає, як і раніше, високому ступеню несиметрії в системі. Зсуви струмів джерел щодо їхніх напруг залишаються значними (рис. 5.19, в, г, д), і кульова метрика для реактивних потужностей джерел становить величину 2468 ВАр.

Для симетрування врівноваженої системи паралельно затискачам точки під'єднання навантаження потрібно увімкнути конденсаторні батареї за схемою трикутника. На моделі системи електропостачання ці конденсатори позначені

Cab, Cbc, Cca, а у вікні властивостей на місці параметра, що відображає ємність конденсатора, поставлені однойменні змінні, які в програмі відповідають глобальним змінним. Саме ці параметри утворюють змінні оптимізації. Визначення їхніх величин, за яких кульова метрика з реактивних потужностей джерел електричної енергії досягне нульового значення, і є власне смислом процесу пошукової оптимізації. Тексти програм, що забезпечують пошукову оптимізацію в системі MATLAB з використання візуальної моделі, наведені на рисунку 5.20.

<pre>warning off global Cab Cbc Cca Nst Nev Nst=0 options=optimset('MaxFunEvals',10000,'MaxIter', 10000,'TolX', 1e-3, 'Tolfun',1e-3); Y=fminsearch('func_s3fnesim',[10 10 10],options) Nst</pre>	<pre>function Nev=func_s3fnesim(x) global Cab Cbc Cca Nst Nev Cab=abs(x(1)*1E-6) Cbc=abs(x(2)*1E-6) Cca=abs(x(3)*1E-6) sim s3fnesim3Nejtraller Nev x Nst=Nst+1</pre>
<i>a</i>	<i>б</i>

Рисунок 5.20 - Програмні модулі для здійснення пошукової оптимізації

З цих текстів видно, що, крім змінних оптимізації, до глобальних змінних головної програми (рис. 5.20, а) і файл-функції обчислення цільової функції (рис. 5.20, б) віднесені також значення цільової функції Nev і число кроків оптимізації Nst. Проміжними змінними, на множині яких шукається в дійсності мінімум, є складові вектора x, початкові значення яких [10 10 10] задаються в операторі виклику вбудованої функції оптимізації за методом деформованого багатогранника *fminsearch()* другого фактичного параметра. Як перший фактичний параметр указано ім'я файл-функції 'func_s3fnesim', якою доставляється в головну програму значення цільової функції. У тексті файл-функції здійснюється виклик на прогін візуальної моделі системи електропостачання з нейтраллером з ім'ям s3fnesim3Nejtraller. У процесі прогону моделі використовується метод ode15s (stiff / NDF), що забезпечує інтегрування жорсткої системи диференціальних рівнянь для моделі системи електропостачання. Крок інтегрування прийнятий таким, що дорівнює 10^{-5} с, інтервал прогону моделі становить 0,02 с.

Перед запуском візуальної моделі розраховуються дійсні значення параметрів симетрувальних конденсаторів шляхом масштабування змінних оптимізації в векторі x за допомогою коефіцієнта 10^{-6} . При роботі візуальної моделі вимірювачі активної і реактивної потужностей кожного джерела обчислюють протягом періоду відповідні значення для кожної фази. Для формування цільової функції відбираються лише значення реактивних

потужностей, зокрема формується кульова метрика, яка і представляє шукану цільову функцію. Це значення обчислюється в самій моделі засобами Simulink. Далі через блок To Workspace значення цільової функції передається в робочий простір обчислювальної системи, звідки воно стає доступно програмним модулям розробленої системи пошукової оптимізації. Хід процесу оптимізації ілюструє графік спадання значень цільової функції залежно від номера кроку оптимізації (рис. 5.21).

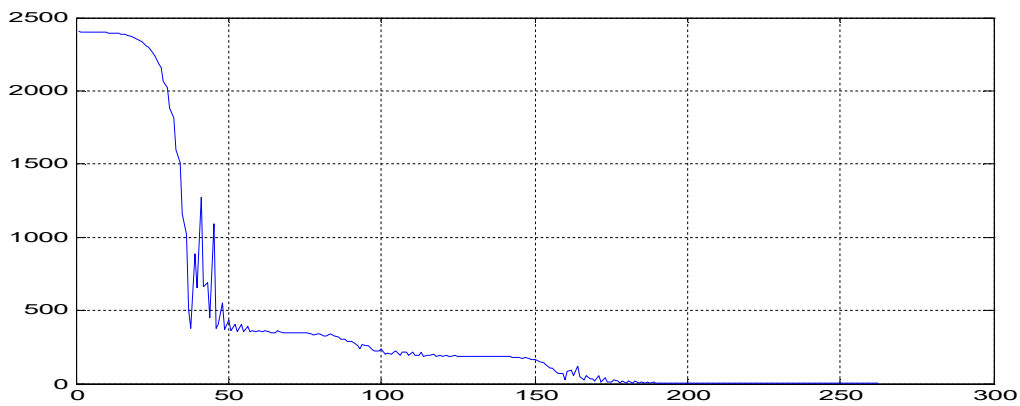


Рисунок 5.21 - Хід процесу оптимізації

Після завершення процесу пошукової оптимізації були отримані такі значення ємностей симетрувальних конденсаторів: $C_{ab} = 651,009\ 9\ \mu\text{кФ}$; $C_{bc} = 126,505\ 1\ \mu\text{кФ}$; $C_{ca} = 202,419\ 4\ \mu\text{кФ}$.

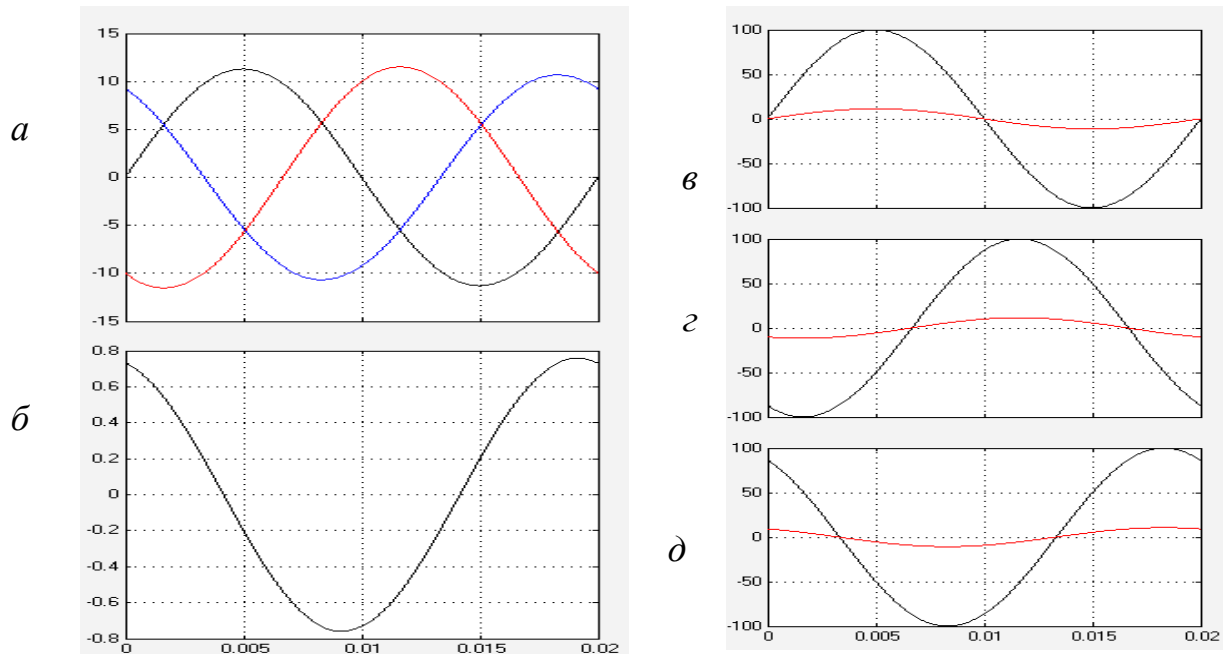


Рисунок 5.22 - Діаграми струмів і напруг системи електропостачання з під'єднаними нейтралером і симетрувальними конденсаторами

Значення цільової функції склало $N_{ev} = 0,000\ 818\ 5\ \text{ВАр}$. Відповідні часові діаграми для цього варіанта подано на рисунку 5.26. Тут струми через

джерела електричної енергії (рис. 5.22, а) практично повністю симетровані. Їхні амплітуди по фазах А, В, С складають значення відповідно 11,293 А, 11,52 А, 10,672 А. Амплітуда струму через нейтральний провід системи становить, як і раніше, малу величину 0,758 А. Таким чином, система електропостачання врівноважена і збалансована, тобто працює в оптимальному режимі. Варто зауважити, що точне рішення для такої чотирипровідної системи електропостачання, виконане за допомогою методу пошукової оптимізації [5], дає такі значення комплексних опорів симетро-компенсувального пристрою: $z_{ab} = -4,009j$; $z_{bc} = -4,457j$; $z_{ca} = -9,313j$; $z_{bN} = + 2,395j$; $z_{cN} = 2,404j$. Це відповідає під'єднанню трьох конденсаторів $C_{ab} = 793,939$ мкФ, $C_{bc} = 714,244$ мкФ, $C_{ca} = 341,804$ мкФ і двох індуктивностей $L_{bN} = 0,007\ 622$ Гн; $L_{cN} = 0,007\ 652$ Гн. Амплітуди струмів у лініях електропередачі за такого точного зрівноважування (з нульовим струмом у нейтральному проводі) і симетрування складають 11,255 А. Порівняння показників системи з нейтралером і точного рішення з п'ятьма симетро-компенсувальними реактивними елементами показує, що сумарна ємність симетрувальних конденсаторів у системі з нейтралером у 1,89 рази менша. На рисунку 5.22, в, г, д наведені пари часових діаграм напруг джерел і їхніх струмів, звідки видно повний збіг фаз струмів із фазами відповідних напруг. Це свідчить про повну компенсацію реактивної потужності у врівноваженій і збалансованій системі електропостачання, що містить нейтралер і симетрувальні конденсатори.

Встановлена потужність симетрувальних конденсаторів у разі застосування нейтралера скорочується майже вдвічі порівняно з варіантом п'ятиелементного симетро-компенсувального пристрою.

5.5 Моделювання процесів компенсації реактивної потужності в системі електропостачання асинхронного двигуна

Одним з основних джерел реактивної потужності є обертові електричні машини, зокрема, на частку асинхронних двигунів доводиться до 70 – 80 % реактивної потужності в системах електропостачання промислових підприємств. У зв'язку з цим питання компенсації реактивної потужності в системах живлення асинхронних двигунів є надактуальними зокрема для таких сфер використання, як привод верстатів, сільськогосподарських механізмів, підйомних пристроїв.

Розглянемо систему живлення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором безпосередньо від трифазної системи електропостачання, у якій компенсація реактивної потужності може бути досягнута шляхом шунтування статорних обмоток косинусними конденсаторами [69, 73]. Визначити оптимальні умови компенсації реактивної потужності будемо за допомогою

методу пошукової оптимізації, використовуючи модель системи електропостачання, представлену на рисунку 5.23. Живлення здійснюється безпосередньо від симетричної трифазної системи напруг E_a , E_b , E_c . Як випробуваний з бібліотеки моделей SPS системи обраний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором типу 20HP. Як цільова функція використовується модуль реактивної потужності. Функція обчислюється в усталеному процесі за допомогою віртуального PQ-вимірювача. Оскільки розглядається симетрична система, достатньо проводити вимірювання тільки в одній з фаз системи електропостачання. Виміряне значення реактивної потужності фази А передається через віртуальний прилад To Workspace в робочу область, де використовується основною програмою як критерій оптимізації. Як процедура оптимізації використана вбудована підпрограма пошуку оптимального рішення на основі методу деформованого багатогранника Нелдера – Міда.

Параметрами оптимізації є ємності компенсувальних конденсаторів C , що вмикаються симетрично за схемою трикутника між фазами лінії електропередачі. Змінна C описується як глобальна, тому вона доступна як в основній програмі, так і в процедурі обчислення цільової функції, а також у самій SPS-моделі.

Робота системи пошукової оптимізації на кожному кроці визначається такими етапами:

1. Запуск SPS-моделі системи електропостачання і прогін її протягом інтервалу часу, достатнього для встановлення процесу.
2. Передача значення модуля реактивної потужності з SPS-моделі в робочу область.
3. Обчислення критерію оптимізації у відповідній процедурі.
4. Здійснення стратегії пошуку оптимального рішення за методом деформованого багатогранника і корегування значення компенсувальної ємності
5. Передача знайденого значення скоригованої ємності в робочий простір SPS-моделі для подальшого її запуску.

Під час реалізації моделі були встановлені такі параметри:

Для двигуна: номінальна потужність 14 920 Вт, частота 60 Гц, лінійна напруга 460 В, активний опір і індуктивність розсіювання статора 0,276 1 Ом і 0,002 191 Гн, для ротора 0,164 5 Ом і 0,002 191 Гн, взаємна індуктивність 0,761 4 Гн, момент інерції 0,1 кгм², коефіцієнт тертя 0,017 71. Обернено навантажувальний момент 20 кгм. Час моделювання до встановлення процесів $t = 7$ с, крок інтегрування $\Delta t = 10^{-4}$, метод інтегрування - ode23t (mod. Stiff / Trapezoidal).

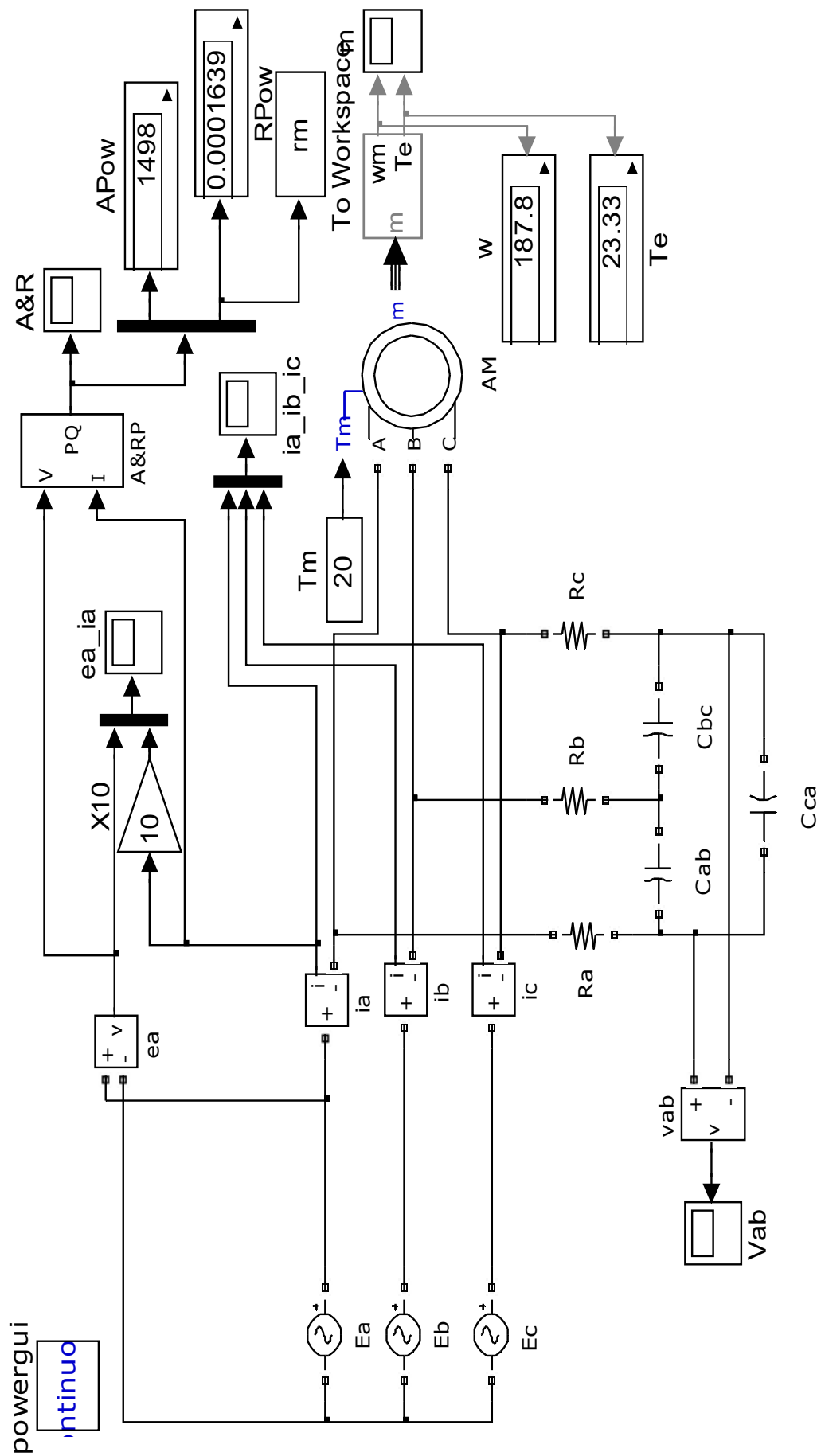


Рисунок 5.23 – SPS-модель электропитания асинхронного двигателя

Для забезпечення умов роботи моделі необхідно було ввести резистори, через які трикутник компенсувальних конденсаторів приєднується до ліній електропередачі. Водночас усувалися топологічні виродження другого роду. Початкові значення ємностей конденсаторів приймалися такими, що дорівнювали 10^{-7} Ф, оскільки нульові значення призводять до переповнення комірок при обчисленнях правих частин рівнянь стану, в яких ємності конденсаторів знаходяться в знаменниках. При зазначених умовах за 73 ітерації було знайдено рішення, за якого реактивна потужність на одній фазі зменшилася з початкового значення 241 4 Вар до $1,057E-4$ вар. За амплітуди живильної фазної напруги $U_m = 375$ В знайдена в результаті оптимізації ємність конденсаторів $C = 30,09$ мкФ. Струми в лініях електропередачі за таких умов повної компенсації збігаються по фазі з відповідними напругами.

Їхні амплітуди зменшилися від початкового значення 15,126 А (за відсутності компенсації реактивної потужності) до 7,97 А (за повної компенсації реактивної потужності). Це означає, що втрати в лінії електропередачі зменшуються приблизно в чотири рази, а коефіцієнти потужності стали одиничними.

Необхідно зауважити, що кількість кроків оптимізаційного процесу в реальному випадку може бути істотно зменшена, оскільки не потрібно підвищеної точності. Повна компенсація реактивної потужності не може бути реалізована з такою високою точністю за допомогою комплексу косинусних конденсаторів внаслідок дискретності величин ємностей конденсаторів.

Проведене на SPS моделі дослідження із залученням пошукової оптимізації показало ефективність запропонованого підходу. Продемонстрована також дієвість компенсації реактивної потужності на рівні споживача електроенергії під час роботи асинхронного двигуна безпосередньо від мережі. Крім того, показана можливість побудови на підставі запропонованого підходу системи управління пристроєм автоматичного вибору режиму роботи конденсаторних пристроїв компенсації реактивної потужності в системі електроживлення асинхронного двигуна.

Контрольні запитання до розділу 5

1. За якою схемою під'єднуються до трифазної системи електропостачання низьковольтні конденсатори симетро-компенсувального пристрою?
2. Як виконується перерахунок паспортних даних трансформатора у параметри Т-подібної схеми заміщення, які використовуються у програмі MATLAB?

3. Яка залежність спостерігається між збільшенням коефіцієнта трансформації та величинами ємностей компенсувальних конденсаторів?
4. Як змінюються амплітудні значення живильних струмів після виконання оптимізації?
5. За якою схемою здійснюється живлення тягового навантаження на залізниці?
6. Яких рис набуває несиметричний режим у системі електропостачання, що живить один склад на залізниці?
7. Які типи реактивних елементів використовуються в СКП для системи живлення тягового навантаження на залізниці?
8. Як розподіляються струми і потужність в джерелах живлення при змінному тяговому навантаженні на залізниці?
9. Яка існує залежність між величинами параметрів елементів симетро-компенсувального пристрою та коефіцієнтом завантаження?
10. Що уявляє собою нейтралер та яку функцію він виконує?
11. Чи виконує нейтралер функцію повної компенсації реактивної потужності?
12. Як можна скомпенсувати реактивну потужність у системі електропостачання із асинхронним двигуном?

РОЗДІЛ 6 СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З НЕЛІНІЙНИМИ ТА СИЛОВИМИ НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

6.1 Розроблення комп'ютерної моделі для розрядних ламп високого тиску і оптимізація режиму живлення лампи

Розрядні лампи високого тиску широко застосовуються для зовнішнього та внутрішнього освітлення. Як відносно потужні споживачі електричної енергії, вони становлять собою різновид навантажень, що істотно впливають на режими роботи систем електропостачання. Підвищити енергетичні показники систем електропостачання неможливо без урахування енергії, споживаної освітлювальними лампами високого тиску. Разом із тим важливо досліджувати як усталені процеси, які супроводжують довготривалу роботу освітлювальних установок, так і перехідні процеси, що виникають під час пуску освітлювальних установок, у разі зміни умов електроживлення та інших нестаціонарних умовах. Використання різних пускорегулювальних пристроїв також вимагає проведення аналізу умов роботи з урахуванням особливостей роботи лампи високого тиску [211, 215–217]. Проектування і дослідження освітлювальних комплексів повинно здійснюватися на підставі системного підходу, коли робота освітлювального приладу розглядається в комплексі з роботою живильної системи і пускорегулювальної апаратури. Ця апаратура забезпечує важливі функції надійного пуску лампи, роботи в тривалому усталеному режимі з мінімальними втратами, захисту лампи і напівпровідникової частини пускорегулювальної апаратури від аварійних ситуацій [217]. У той же час сама лампа високого тиску відрізняється наявністю в ній складних нелінійних явищ у просторі, де присутній газовий розряд [218]. Математичні рівняння, що описують поведінку лампи, в умовах, коли враховується рух частинок у середовищі з газовим розрядом, становлять нелінійні диференціальні рівняння в часткових похідних. Саме так можна врахувати електричні, газодинамічні та теплові процеси, що відбуваються в замкнутому просторі, обмеженому колбою лампи. Вирішити такі рівняння в аналітичному символічному вигляді неможливо, а застосування чисельних методів вимагає великих обчислювальних витрат комп'ютерного часу. Крім того, ускладнено визначення різних коефіцієнтів, що здійснюється емпіричним шляхом [219, 220]. Під час використання інженерного підходу як системного для системи електроживлення важливо адекватно представити вольт-амперні характеристики ламп, внаслідок чого доходимо до нелінійних звичайних диференціальних рівнянь [221]. Отримати символічні рішення і в цьому випадку проблематично, проте час для проведення чисельних розрахунків істотно

скорочується і порівнюється з часом, що витрачається комп'ютером на розрахунок процесів у лінійній частині системи електроживлення лампи.

Розвиток обчислювальної техніки і програмного забезпечення зумовив актуальність застосування математичного моделювання як основного засобу дослідження та проектування електротехнічного устаткування, тому першочерговим завданням є розробка наочних і зручних для практичного використання математичних моделей ламп високого тиску. У низці робіт запропоновані диференціальні рівняння, а також способи їхньої реалізації в обчислювальному середовищі MATLAB з використанням мови програмування і вбудованих функцій цього середовища [221]. Однак для уніфікації та прискорення процесу розробки моделей і їхнього налагодження перспективним видається використання сигнальних графів і підсистеми Simulink, що дозволяє здійснити так зване візуальне моделювання [43, 300].

Розглянемо процес розробки математичної моделі розрядної лампи високого тиску в підсистемі Simulink з подальшим аналізом її роботи при живленні від промислової мережі змінного струму через обмежувальний дросель.

В роботі [220] сформульовані вимоги до рівнянь диференціальної моделі лампи. Зокрема, відзначається обмеженість моделей, заснованих на алгебраїчній апроксимації. Диференціальні математичні моделі дозволяють врахувати початкові умови розвитку розряду, а також інерційність процесу розвитку цього розряду. Диференціальні моделі мають бути точними і простими. Істотною умовою є можливість вимірювання параметрів, що визначають поведінку моделі. Ці параметри повинні легко вимірюватися або розраховуватися з достатньою для інженерних досліджень точністю. Запропоновані для використання визначальні параметри пов'язані з поведінкою частинок, які здатні запасати енергію в будь-якому вигляді, відповідному електричним, магнітним і тепловим процесам, а також процесам іонізації атомів.

Саме ці процеси істотно впливають на основний (з погляду мережі живлення) параметр лампи – її еквівалентну електричну провідність. Засновані на обліку цих факторів моделі можуть успішно використовуватися під час дослідження перехідних і сталих процесів у колах з лампами (зокрема і режимів) як з наявністю пауз струму, так і режимів без цих пауз.

Для уточнення моделей на основі визначальних параметрів пропонується їхнє поступове ускладнення шляхом нарощування структури моделі на підставі теоретичних і експериментальних досліджень. У лампах високого тиску як основні види енергії, що враховуються, використовуються енергія іонізованих

атомів ртуті та енергія руху заряджених і нейтральних частинок. У загальному випадку такими частинками є електрони, іони і нейтральні атоми.

Для ламп високого тиску найбільш прийнятні результати моделі, представленої системою двох нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку [220, 221]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dg_n}{dt} = A_n U_0^2 \frac{\left(\frac{i_n}{\beta U_0}\right)^2 - g_n^2}{1 + k_1 \left(\frac{|i_n|}{\beta g_n U_0} - 1\right)}, \\ \frac{d\beta}{dt} = [k_2 + k_3 \left(\frac{|i_n|}{\beta g_n U_0}\right)^{k_4}] \cdot [1 + k_1 \left(\frac{|i_n|}{\beta g_n U_0} - 1\right) - \beta], \end{array} \right. \quad (6.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dg_n}{dt} = A_n U_0^2 \frac{\left(\frac{i_n}{\beta U_0}\right)^2 - g_n^2}{1 + k_1 \left(\frac{|i_n|}{\beta g_n U_0} - 1\right)}, \\ \frac{d\beta}{dt} = [k_2 + k_3 \left(\frac{|i_n|}{\beta g_n U_0}\right)^{k_4}] \cdot [1 + k_1 \left(\frac{|i_n|}{\beta g_n U_0} - 1\right) - \beta], \end{array} \right. \quad (6.2)$$

де g_n – приведена провідність лампи, що враховує середнє значення концентрації електронів;

β – безрозмірний коефіцієнт, що змінюється в часі та враховує рухливість електронів;

i_n – струм, що протікає через лампу;

U_0 – номінальна напруга на лампі;

A_n – коефіцієнт, який визначається конструкцією лампи;

$k_1 - k_4$ – електричні коефіцієнти, які визначаються для конкретного типу лампи.

Як приклад розглянемо лампу ДРЛ-400, для якої

$$k_1 = 0,6; k_2 = 1,5 \times 10^4; k_3 = 3 \times 10^4; k_4 = 1,5; U_0 = 131; A_n = 5,5.$$

Провідність лампи G_n може бути визначена за формулою:

$$G_n = \beta g_n. \quad (6.3)$$

Вона змінюється в часі, оскільки β і g_n , за свого боку, є змінними в часі.

Миттєві значення струму і напруги лампи можна зв'язати по закону Ома, виразивши напругу на лампі через струм і її провідність:

$$U_n = \frac{i_n}{G_n}. \quad (6.4)$$

При живленні лампи через індуктивний обмежувач рівняння лампи (6.2) і (6.3) необхідно доповнити рівнянням згідно із законом Кірхгофа для напруг, з огляду на те, що через всі елементи, з'єднані послідовно, протікає один і той же струм:

$$e_c(t) = R i_n + L \frac{di_n}{dt} + U_n, \quad (6.5)$$

де $e_c(t) = E_m \sin(\omega t + \alpha)$ – напруга живильної мережі;

L , R – відповідно індуктивність і активний опір обмежувального дроселя.

Щоб представити рівняння (6.5) у формі задачі Коші, виразимо похідну від струму лампи через змінні стану і задаючі величини джерел:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}[e_C(t) - Ri_L - U_L]. \quad (6.6)$$

На основі системи диференціальних рівнянь (6.1), (6.2) для лампи високого тиску складається візуальна модель лампи з використанням стандартного набору обчислювальних блоків підсистеми Simulink. Разом із тим система диференціальних рівнянь подана у формі задачі Коші, а модель самої лампи за допомогою двох інтеграторів g і $beta$, з виходів яких знімаються сигнали g і B , що відображають наведену провідність лампи і рухливість електронів (рис. 6.1). Сигнали, що подаються на входи зазначених інтеграторів, формуються за допомогою обчислювальних блоків, що відображають нелінійні залежності похідних в правих частинах рівнянь (6.1) і (6.2), що описують процеси в лампі. Для врахування роботи лампи в системі електроживлення з обмежувальним дроселем до моделі власне лампи приєднано частину моделі, що враховує рівняння (6.6). Вона відображена за допомогою третього інтегратора $ilamp$, з виходу якого знімається сигнал iL , що моделює струм лампи. Напруга на лампі U_{lamp} визначається відповідно до рівнянь (6.3) і (6.4). Напруга живильної мережі 220 В з частотою 50 Гц в моделі представлена джерелом синусоїдального сигналу Sine Wave, для якого у вікні властивостей встановлені відповідні параметри. Попередньо для отриманої системи диференціальних рівнянь був складений сигнальний функціональний граф, за яким легко можна сформулювати візуальну модель системи електроживлення лампи, враховуючи її нелінійність.

З огляду на особливості модельованих математичних залежностей, обумовлених наявністю змінних в знаменниках математичних виразів, для цих змінних у відповідних інтеграторах потрібно встановити ненульові малі початкові значення. Таким чином, виключаються ситуації переповнення при діленні на нуль, що призводять до аварійної зупинки роботи моделі на початковому етапі її функціонування.

Для спостереження за результатами роботи моделі використовується віртуальний осцилограф $E_C-iL-UL$, на який виводяться графіки напруги мережі, струму і напруги самої лампи.

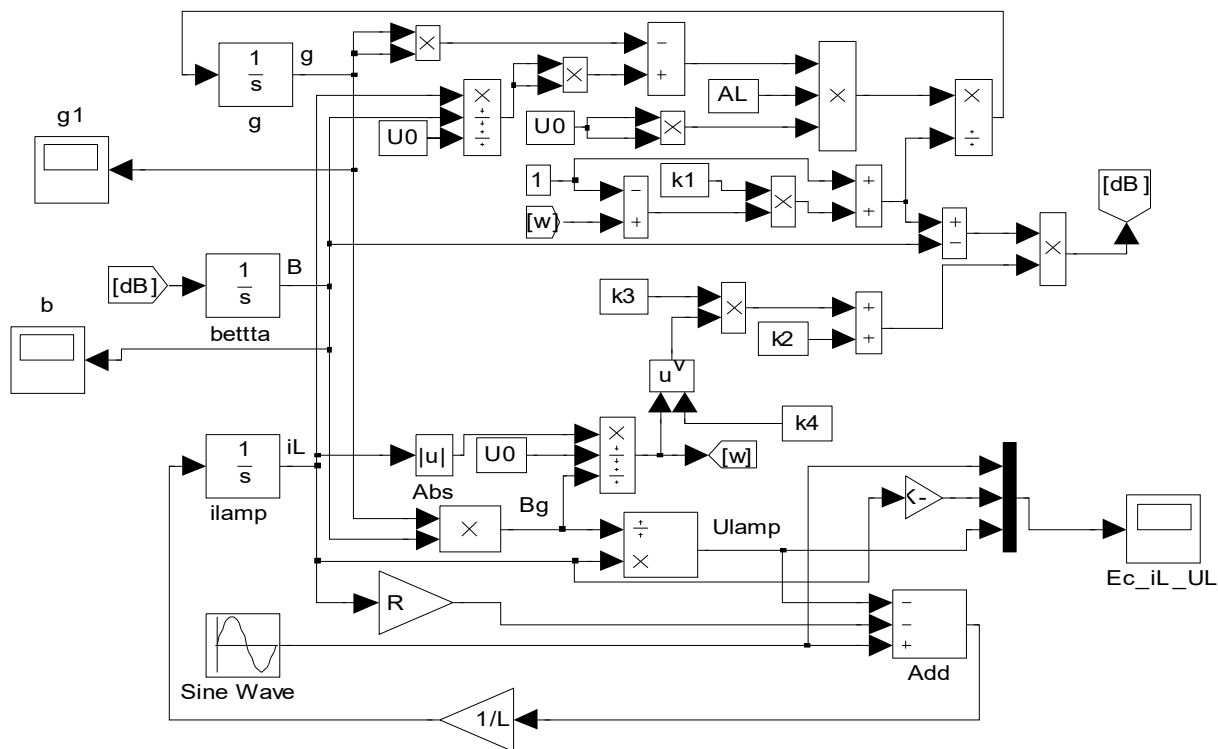


Рисунок 6.1 - Візуальна модель лампи високого тиску

Діаграми перехідного процесу увімкнення лампи у вигляді живильної синусоїдальної напруги мережі, напруги і струму лампи подано на рисунку 6.2.

Розроблена візуальна математична модель лампи високого тиску заснована на відносно простих і адекватних диференціальних рівняннях. Ці рівняння правильно відображають нелінійні і динамічні властивості лампи під час її живлення від мережі через обмежувальний дросель. За допомогою стандартних обчислювальних блоків модель може бути реалізована в будь-якій системі візуального динамічного моделювання. Параметри моделі для певного типу ламп можна обчислити шляхом аналізу конструктивних особливостей лампи або обробки серії експериментів із лампою. Отримані за допомогою моделі часові діаграми струму і напруги в ній адекватно і точно відображають реальні електромагнітні процеси в системі електроживлення лампи. Модель можна використовувати для дослідження перехідних і сталих процесів у системах електроживлення ламп високого тиску, а також для знаходження оптимальних умов роботи систем освітлення з погляду енергетичних показників цієї системи.

Оптимізацію режиму в системі електроживлення лампи здійснимо за таким саме алгоритмом, який використаний в попередньому розділі для системи з дуговим розрядом. На рисунку 6.3 зображена модель системи живлення лампи змінним струмом.

Модель лампи (рис. 6.1) представлена у вигляді підсистеми LAMP. Вона живиться від джерела змінної напруги E через обмежувальний дросель

DROSSEL, модель якого враховує активний опір. Індуктивність дроселя – 0,175 Гн, активний опір – 5 Ом. У разі відсутності компенсувального конденсатора $S_{\text{комр}}$ від джерела споживається потужність $S_e = 337,7 + j428,6$ ВА.

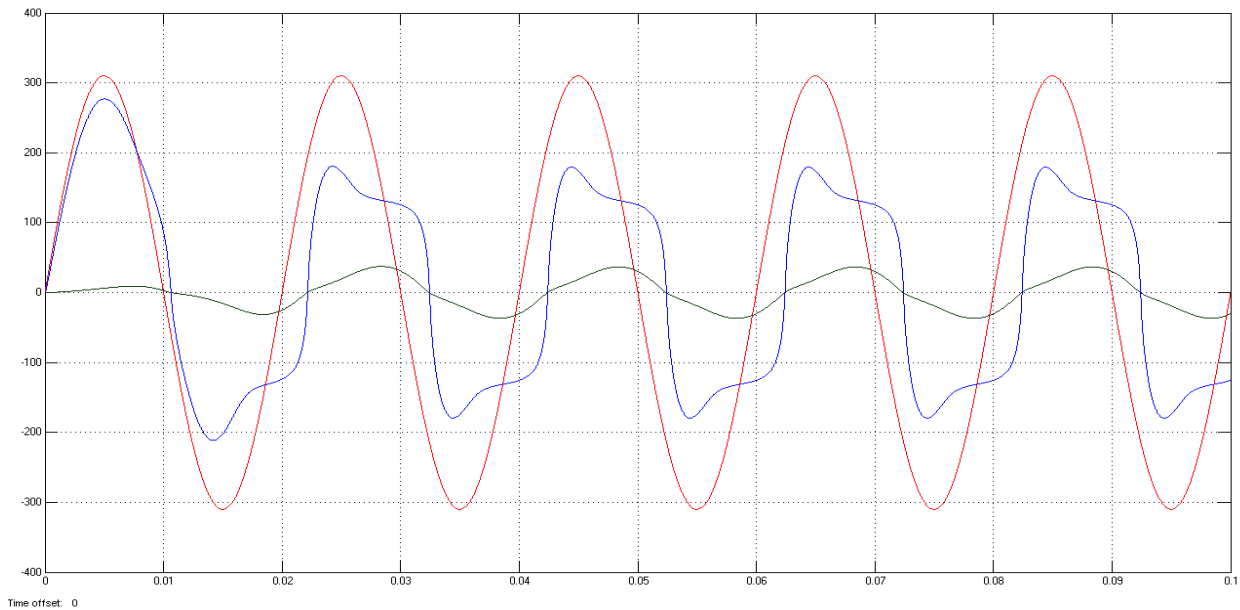


Рисунок 6.2 - Діаграми процесу пуску системи електроживлення лампи

Амплітуда першої гармоніки струму мережі становить 3,52 А, а її фазовий зсув – $-51,77$ ел. град., що відповідає струму, що відстає від напруги. Це відставання зумовлено особливостями роботи лампи через необхідність досягнення напруги запалювання дуги, а також наявністю в ланцюзі обмежувального дроселя. Чинне значення струму в лінії електропередачі, що обумовлює теплові втрати, складає величину 2,503 А. Робота цієї системи електропостачання характеризується низьким коефіцієнтом зсуву: $\cos(51,77^\circ) = 0,6188$.

Модель системи живлення лампи за наявності пристрою компенсації реактивної потужності подана на рисунку 6.4.

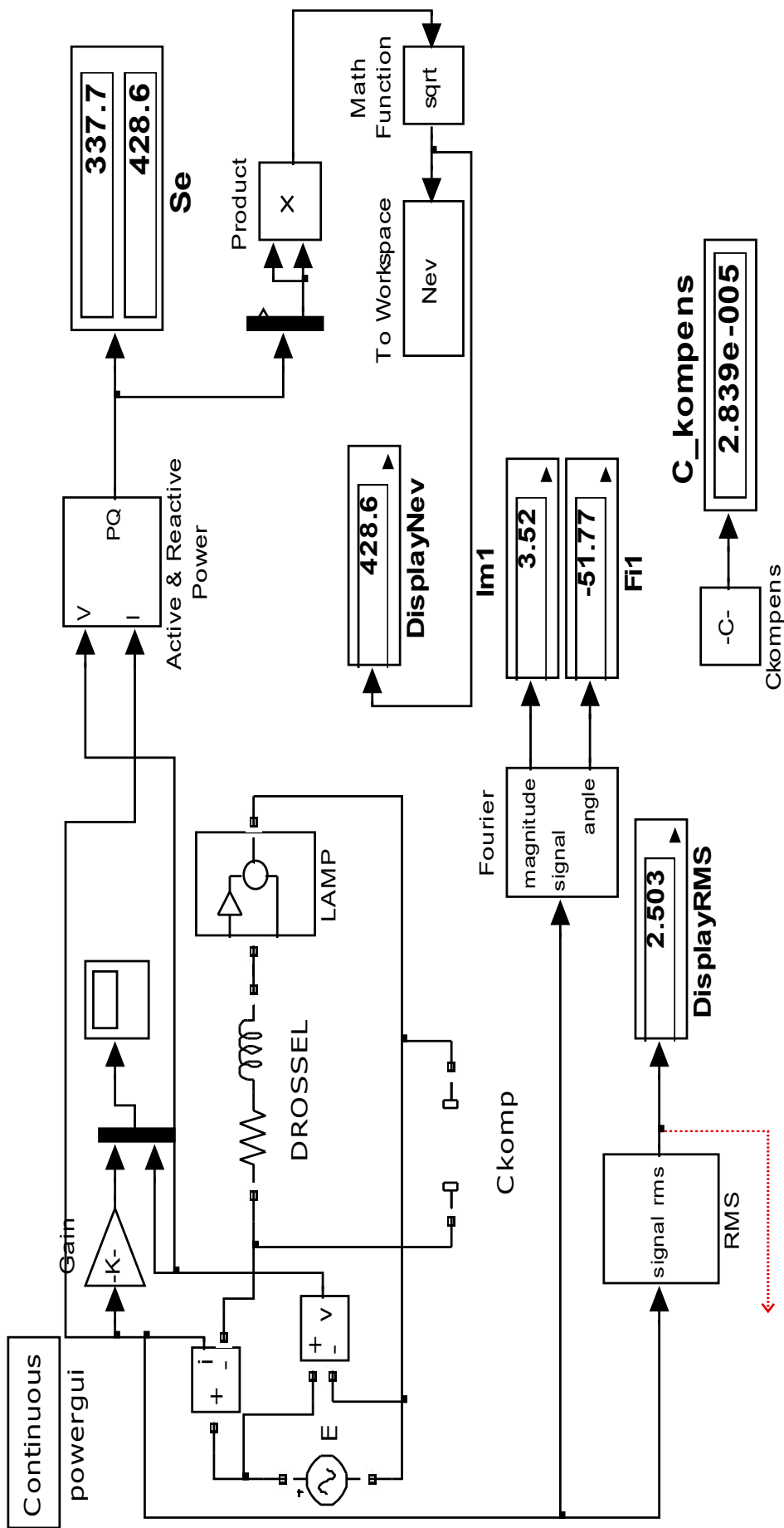


Рисунок 6.3 – Модель системи живлення лампи змінним струмом без пристрою компенсації реактивної потужності

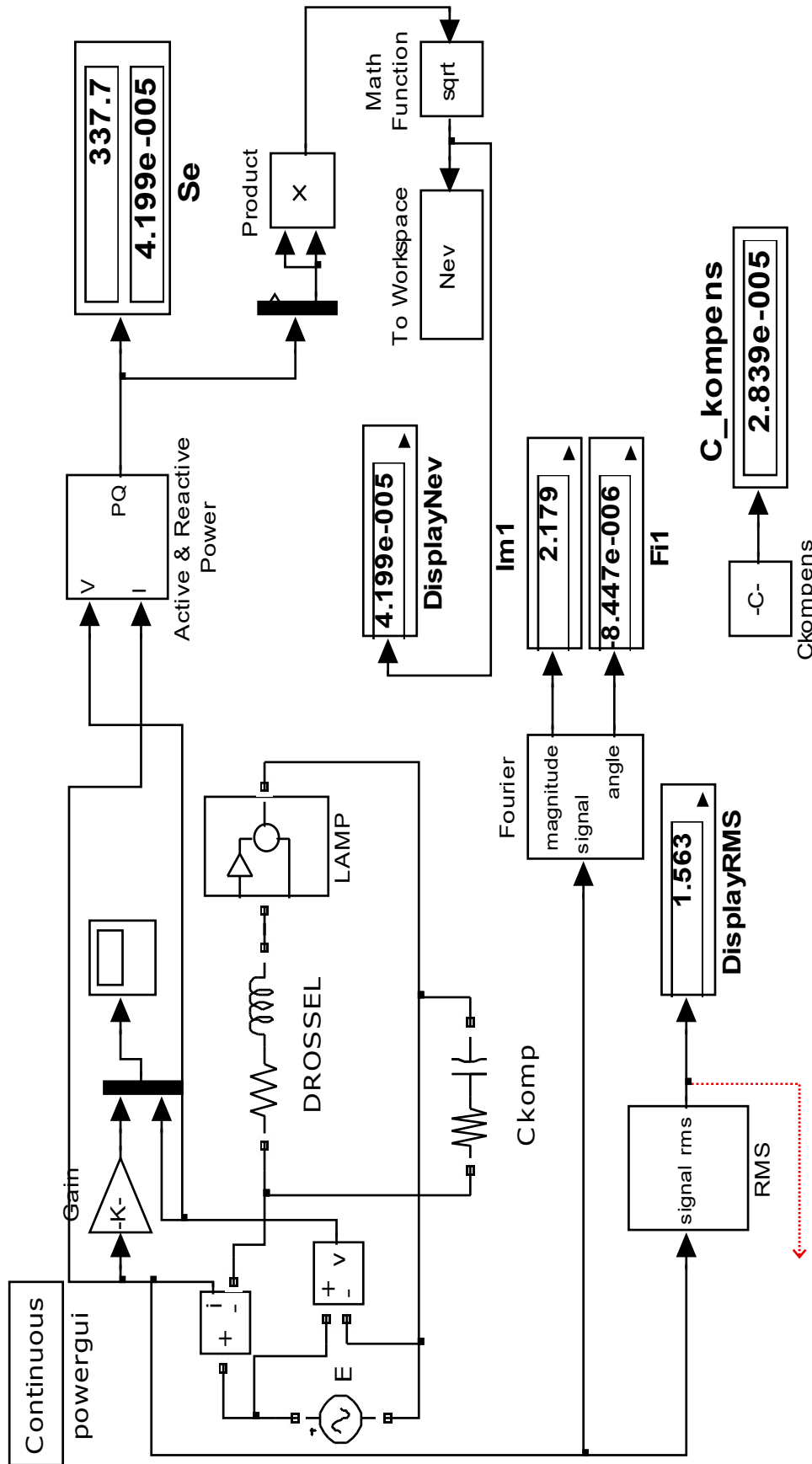


Рисунок 6.4 – Модель системи живлення лампи за наявності пристрою компенсації реактивної потужності

Для компенсації реактивної потужності в систему під'єднаний конденсатор S_{comp} . Послідовно з ним введений резистор з малим опором для розв'язки топологічного виродження, зумовленого утворенням контуру, який складається з джерела напруги й ідеального конденсатора.

Як критерій оптимізації використовується модуль реактивної складової повної потужності, що віддається джерелом. Змінною оптимізації виступає величина ємності компенсувального пристрою. Віртуальні вимірювальні прилади, наведені на рисунку 6.3, відображають показання, отримані після мінімізації реактивної потужності, що віддається джерелом напруги. За наявності компенсувального конденсатора S_{comp} ємністю 28,39 мкФ від джерела споживається потужність $S_e = 337,7 + j4,199E-5$ ВА. Амплітуда першої гармоніки струму мережі становить 2,179 А, а її фазовий зсув $-8,447E-6$ ел. град., що відповідає практично повному збігу струму у фазі з його напругою. Діюче значення струму в лінії електропередачі, що обумовлює теплові втрати, істотно зменшилося і становить величину 1,563. Тепер робота системи електропостачання характеризується одиничним коефіцієнтом зсуву: $\cos(-8,447E-6^\circ) = 1,0$. На рисунку 6.5, а, б зображені відповідно часові діаграми напруги фазної напруги, що має синусоїдальну форму, і струму в живильній фазі (збільшений в 100 разів для наочності), що відрізняється несинусоїдною формою.

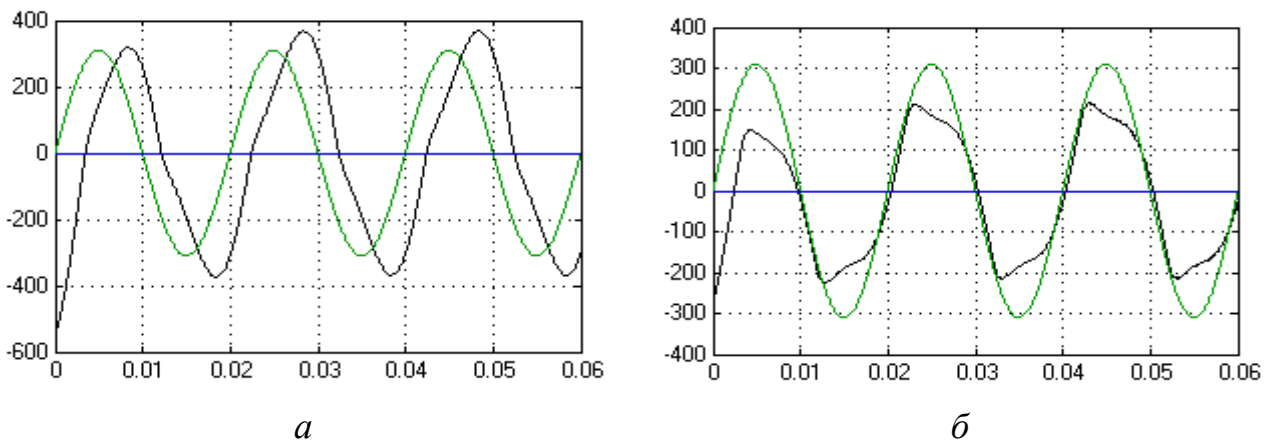


Рисунок 6.5 – Часові діаграми струмів і напруг у мережі живлення
 а – напруга і струм ($\times 100$) у мережі живлення лампи без компенсації реактивної потужності; б – те саме в режимі компенсації реактивної потужності

На цих діаграмах добре видно, що після введення компенсувального пристрою помітно знижується амплітудне значення струму, а фаза струму прагне наблизитися до фази живильної фазної напруги.

6.2 Оптимізація процесів у тиристорному компенсаторі реактивної потужності

Тиристорні компенсатори реактивної потужності є перспективними пристроями, що дозволяють значно поліпшити умови споживання електроенергії [165, 166] завдяки плавному регулюванню реактивної потужності. Їхнє застосування дозволяє скоротити втрати дефіцитної електроенергії і знизити навантаження на лінії електропередачі, підвищити запаси стійкості системи і поліпшити коефіцієнт потужності [167]. Застосування в компенсувальних пристроях лінійних накопичувачів енергії спричиняє істотне збільшення потужності використовуваних елементів і, крім того, не дозволяє точно компенсувати реактивну потужність у системі. Введення керованих реакторів дозволяє домогтися точної компенсації реактивної потужності зсуву в системі задяки керуванню кутами відмикання і тривалістю інтервалів провідності тиристорів. Модель тиристорного компенсатора реактивної потужності подана на рисунку 6.6. Розглядається трифазна несиметрична система електропостачання з різко несиметричним активно-індуктивним навантаженням. Це обумовлює циркуляцію в системі реактивної потужності, зокрема числі і відповідну появу несиметрії і симетричних складових зворотної послідовності. Зазначені обставини істотно ускладнюють аналітичний розрахунок компенсувальних і симетрувальних пристроїв. У розглянутій схемі такі пристрої під'єднанні між фазами у вигляді батарей конденсаторів, а їхні ємності встановлені так, щоб забезпечити деяку надлишкову компенсацію реактивної потужності індуктивного характеру. Насправді це відповідає дискретності параметрів компенсувальних батарей конденсаторів і в зв'язку з цим неможливо здійснити точну компенсацію реактивної потужності. Щоб її забезпечити, використовують три керованих реактора із зустрічно-паралельно увімкнутими тиристорами.

Управління тиристорами здійснюється від джерел періодичних імпульсів із відповідними часовими зсувами щодо моментів перетину лінійними напругами часової вісі. Необхідно підкреслити, що налаштування системи керування тиристорами ускладнюється ще й тією обставиною, що лінійні напруги на навантаженні сильно спотворені через несиметрію навантаження, завдяки чому зміщуються і напруги на тиристорах. Це, зі свого боку, впливає на можливість відмикання тиристора в момент часу, що розраховується. Водночас імпульс, що відмикає тиристор, може бути поданий в потрібний момент часу, проте тиристор може не відкритися, оскільки його анодна напруга буде негативна.

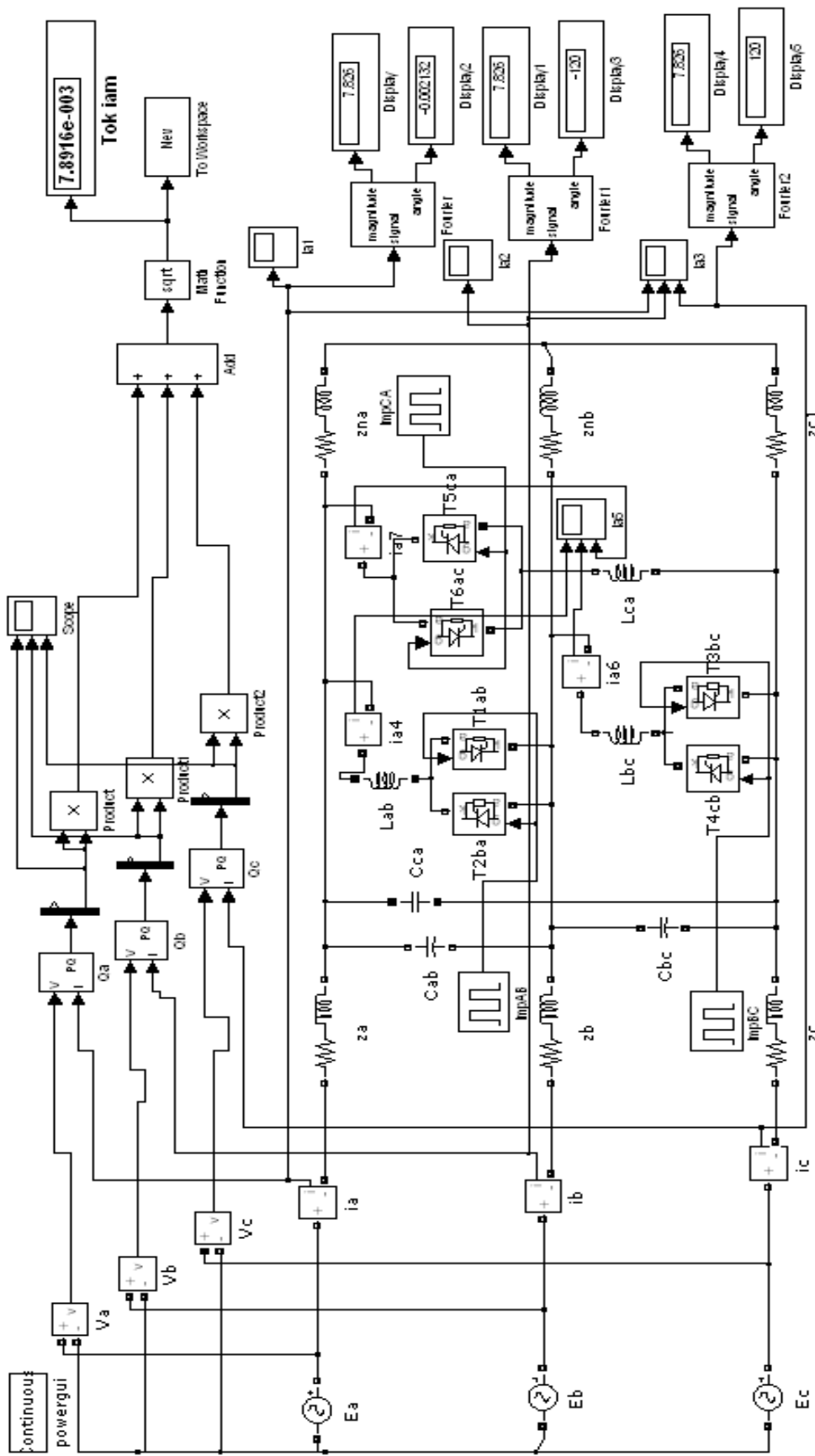


Рисунок 6.6 – Візуальна модель системи електропостачання з тиристорно-реакторним компенсатором реактивної потужності

Для отримання рішення за допомогою оптимізаційних методів у моделі введені додаткові обчислювальні блоки, що забезпечують обчислення необхідних показників, формування цільової функції і параметрів оптимізації, що здійснюється вбудованою функцією MATLAB, за допомогою якої реалізується симплекс-метод за алгоритмом Нелдера – Міда.

Як видно зі структури моделі, у кожен фазу системи електропостачання під'єднанні обчислювальні блоки для визначення реактивної потужності. Із цих значень формується критерій оптимізації у вигляді кульової метрики, і отримане значення передається в загальну пам'ять робочого простору MATLAB. У ролі параметрів оптимізації використовуються часові зміщення керуючих імпульсів, заведені у властивості відповідних блоків генерації імпульсів у вигляді змінних. Значення цих змінних модель отримує знову-таки через загальну пам'ять робочого простору MATLAB після відповідного кроку обробки функції, що виконує оптимізацію.

Для контролю фазні струми подаються на обчислювальні блоки Фур'є-аналізаторів, налаштованих на першу гармоніку з частотою живильної напруги, і за допомогою яких можна оцінити амплітуди перших гармонік і їхні фазові зрушення.

Модель налаштовується на прогін декількох періодів, достатніх для встановлення квазіусталеного режиму, за якого всі вимірювальні блоки дають стійкі показники. Крок інтегрування і метод встановлені такими, щоб подолати проблеми жорсткості систем диференціальних рівнянь, притаманним перетворювальним схемам.

Програмні блоки складаються з основної програми, що викликає функцію оптимізації MATLAB, і додаткової функції, що обчислює нев'язку. Процес оптимізації складається з кроків, всередині кожного з яких послідовно працює модель і функція оптимізації. Процес оптимізації має бути закінчений після досягнення цільовою функцією доволі малого значення.

На рисунку 6.7 показані результати оптимізації. Комп'ютерні експерименти проводилися за таких параметрів системи. Живильні напруги задавалися рівними 100 В за амплітудою і 50 Гц за частотою. Активний опір лінії електропередачі в кожній фазі становить 0,1 Ом, а індуктивності по 0,001 Гн. Активні опори навантажень у фазах А, В і С відповідно становили 0,7; 1 і 2 Ом, а відповідні індуктивності навантажень 0,005; 0,01 і 0,04 Гн. Компенсувальні конденсатори між лініями АВ, ВС і СА відповідно задавалися 0,008; 0,004 і 0,001 Ф, а всі індуктивності реакторів приймалися рівними по 0,3 Гн.

Як видно з результатів оптимізації, поданих на рисунку 6.7, в інформаційному вікні MATLAB (лівій частині рис. 6.7) виведені значення

зсувів керуючих імпульсів для реакторів, під'єднаних між лініями АВ, ВС і СА відповідно. Вони дорівнюють 0,006 9; 0,003 9 і 0,000 6, а вилучені з робочої області з більш високою точністю – 0,006 864; 0,003 937 і 0,000 622. За такого управління цільова функція, яка відображає наявність реактивної потужності, що циркулює в системі, склала дуже мале значення $6,019\text{E}-4$, що практично дорівнює нулю. Показання цих приладів представлені середньою частиною рисунка 6.7, де також видно, що амплітуди перших гармонік всіх фазних струмів вирівнялися і стали дорівнювати 7,826 А, а їх фазові зсуви досягли значень 0, -120 і 120 ел. град., що свідчить про повне симетрування цих гармонік і збігу їх за фазою з живильними фазними напругами. У правій частині рисунка 6.7 представлені діаграми струмів через керовані компенсувальні реактори (вони представлені в різних масштабах по вісях струмів).

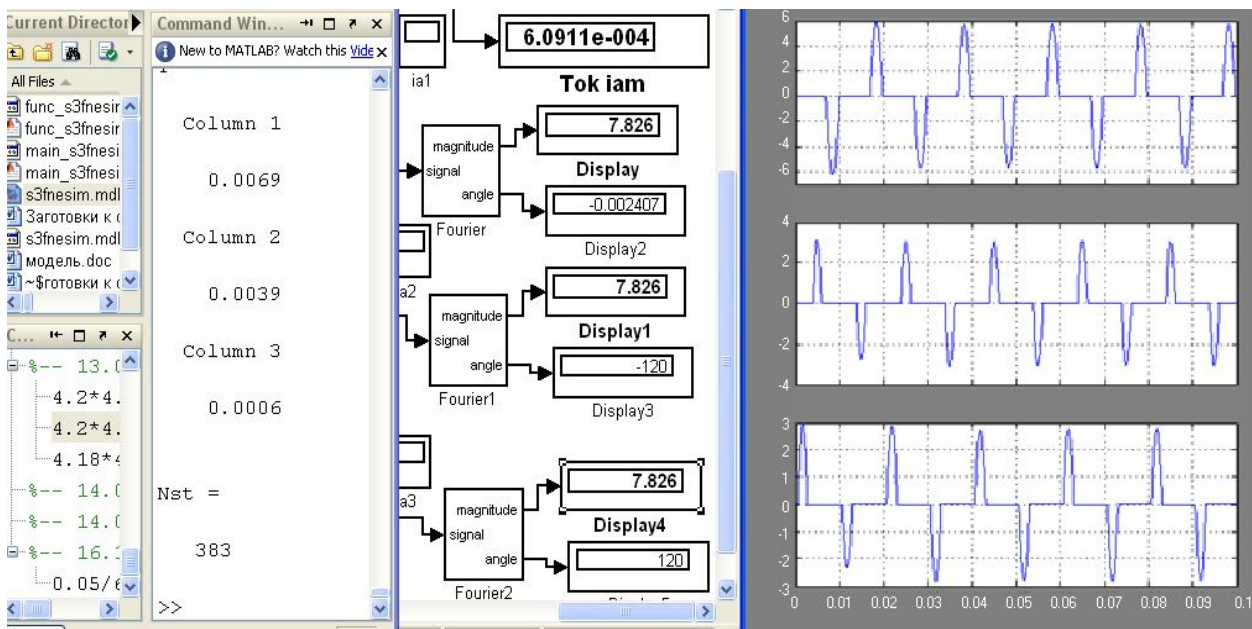


Рисунок 6.7 – Результати оптимізації системи електропостачання з тиристорним компенсатором реактивної потужності

6.3 Моделювання системи електропостачання з активним фільтром, керованим за оптимізаційним алгоритмом

Використання силових активних фільтрів на керованих ключах дозволяє ефективно компенсувати реактивну потужність і звести зрушення фаз практично до нульового значення. В [228, 251] наведено детальний порівняльний аналіз використання традиційних пасивних і сучасних активних фільтрів. У [231] розглядається можливість застосування гібридних фільтрів для поліпшення якості електричної енергії і гармонійного складу струму. Наразі як активні силові фільтри застосовуються інвертори на IGBT-

транзисторах, управління якими може становити достатньо складні алгоритми [224, 225, 232, 233, 244, 245], зокрема алгоритми, засновані на теорії миттєвої потужності з перетворенням сигналів трифазної системи в двофазну [125, 234 - 238, 246 – 249].

Раціональним методом управління ключами інвертора є використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), для формування якої використовується метод гистерезисної модуляції струму [225, 239].

Для спрощення алгоритму управління фільтром у системі електропостачання доцільно застосувати алгоритми пошукової оптимізації.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

- розроблення візуальної моделі однофазної мережі електропостачання та силового активного фільтра з керуванням за оптимізаційним алгоритмом;
- визначення параметрів оптимізації і формування алгоритмів обчислення цільової функції в процесі моделювання;
- застосування пошукової оптимізації для визначення оптимального режиму роботи мережі електропостачання.

Досліджувана система електропостачання подана на рисунку 6.8.

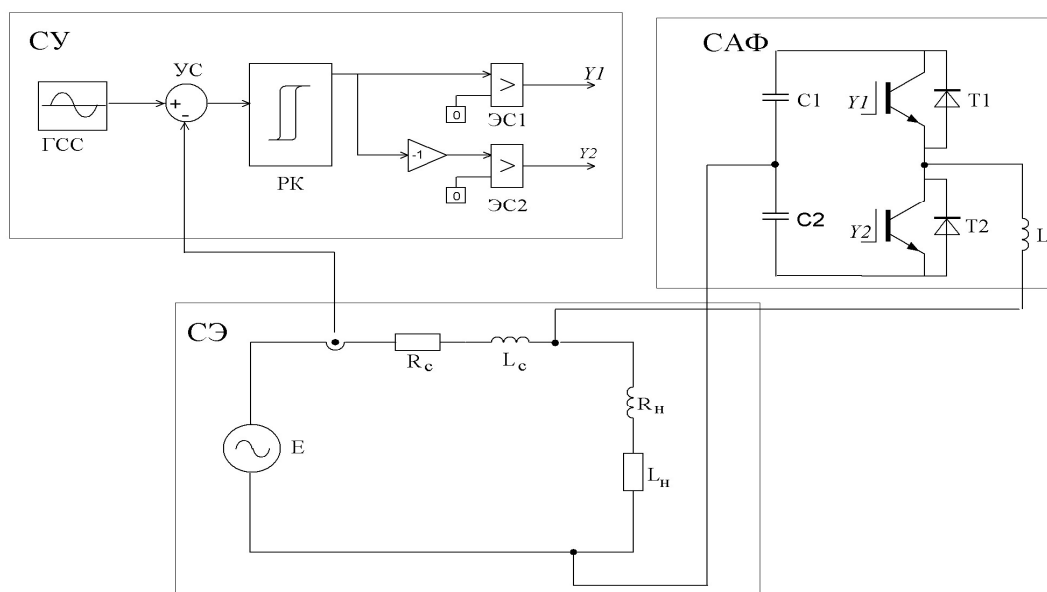


Рисунок 6.8 – Схема однофазної системи електропостачання з активним фільтром, керованим за релейним принципом

Вже згадана система складається з трьох основних модулів: СЭ – однофазна система електропостачання з активно-індуктивним навантаженням R_H, L_H і активно-індуктивним опором лінії електропередач R_C, L_C ; САФ – силовий активний фільтр, який становить напівмостовий інвертор; СУ – система управління фільтром, яка побудована на основі ШІМ за релейним принципом.

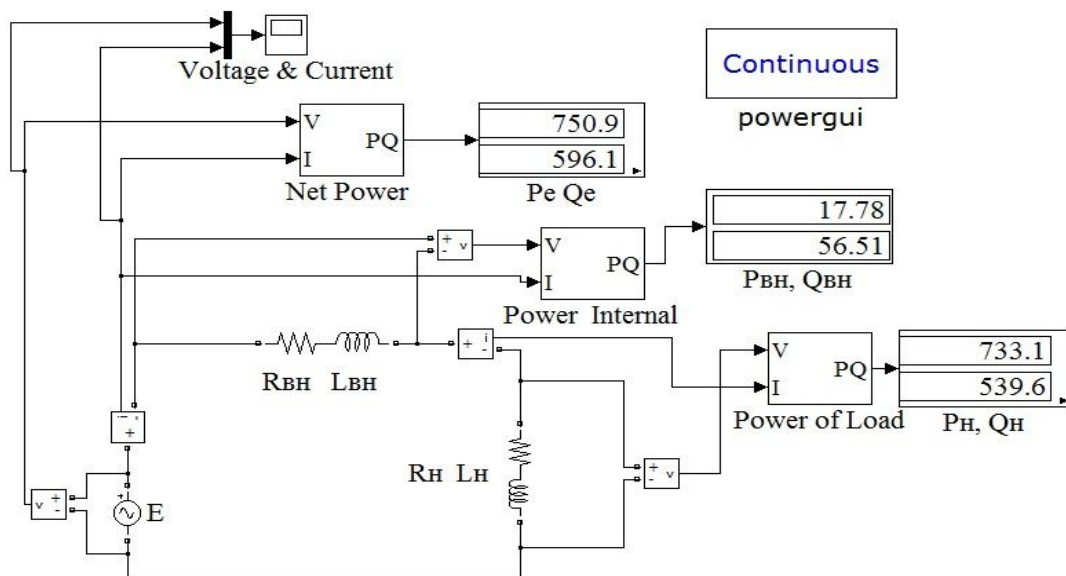
Прийняті параметри: амплітудне значення джерела напруги $E_m = 100\text{ В}$, частота - $f = 50\text{ Гц}$. Параметри лінії електропередачі: $R_c = 0,1\text{ Ом}$, $L_c = 0,001\text{ Гн}$, активний і індуктивний опори навантаження - $R_H = 4\text{ Ом}$, $L_H = 3/100/\pi\text{ Гн}$.

Інвертор складається з двох конденсаторів і двох ключів, що становлять IGBT-транзистори. Ємності конденсаторів $C_1 = C_2 = 500\text{ мФ}$, індуктивність дроселя - $L = 0,5/100/\pi\text{ Гн}$. Керування ключами здійснюється ШІМ зі зворотним зв'язком по струму із застосуванням релейного принципу, так званої гістерезисної або Δ -модуляцією.

У структурній схемі СУ амплітуда генератора синусоїдального сигналу (далі ГСС) визначається в процесі оптимізації. Вузол порівняння (далі – УС) здійснює порівняння еталонного струму з реальним значенням струму в лінії електропостачання. У релейному компараторі (далі – РК) ширина гістерезисної петлі задає ширину смуги відхилення струму мережі, шляхом формування імпульсів, які керують ключами. Елементи порівняння ЕС1 і ЕС2 порівнюють сигнал, що надходить, з нулем і далі формують і розподіляють імпульси так, щоб вони знаходилися в протифазі.

Розглянута вище структурна схема однофазної системи електропостачання з вказаними параметрами реалізована у вигляді моделі в середовищі MATLAB і її розширень Simulink і SimPowerSystems [65–67].

На рисунку 6.9 подана модель однофазної системи електропостачання без під'єднання активного фільтра.



Рисунк 6.9 – Комп'ютерна модель однофазної системи електропостачання

Блоки Power of Net, Power Internal, Power of Load обчислюють активну і реактивну потужності мережі лінії електропередачі. Час прогону моделі становить 0,1 с, що достатньо для встановлення режиму моделі.

Діаграми віртуального осцилографа (рис. 6.10) демонструють значний зсув фаз струму мережі щодо напруги живлення.

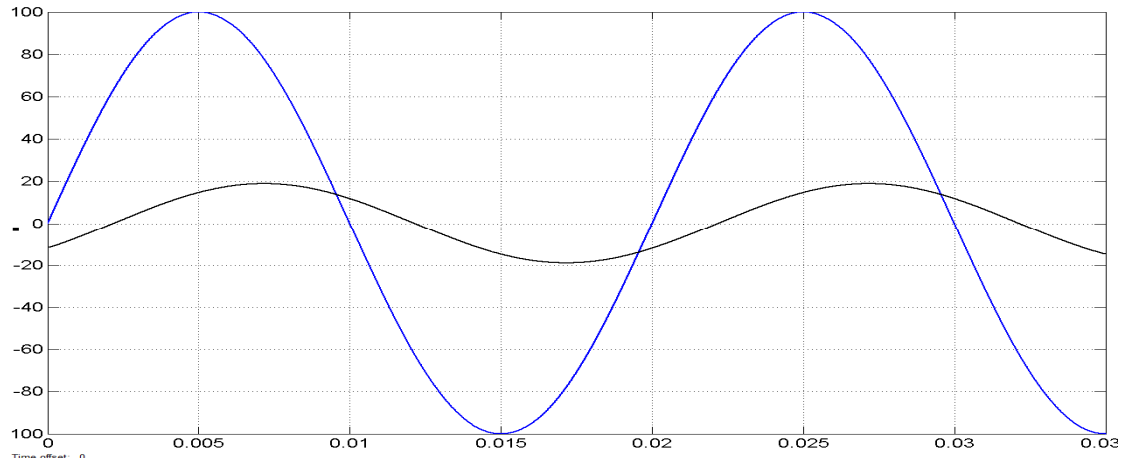


Рисунок 6.10 – Часові діаграми мережевого струму і напруги живлення однофазної мережі до під'єднання активного фільтра (I – мережевий струм, V – напруга живлення)

На рисунку 6.11 подана комп'ютерна модель системи електропостачання за під'єднання активного фільтра.

У комп'ютерній моделі система управління реалізована за допомогою блоків модуля Simulink. Блок SineWave реалізує еталонний синусоїдальний сигнал, який за фазою збігається з напругою живлення, блок Relay задає межі відхилень струму, блоки порівняння з нулем формують імпульси управління ключами і розподіляють їх так, щоб IGBT-транзистори працювали в протифазі. Напівмостовий інвертор складається з конденсаторів C1 і C2 і IGBT-транзисторів T1 і T2. Початкові напруги на конденсаторах дорівнюють 150 В.

Вплив роботи релейного регулятора струму на форму струму в мережі показаний на рисунку 6.12, де зображені часові діаграми імпульсів, що керують транзисторами, і струму мережі з урахуванням впливу струму активного фільтра.

У перехідному режимі системи спостерігається нестабільність напруг на конденсаторах.

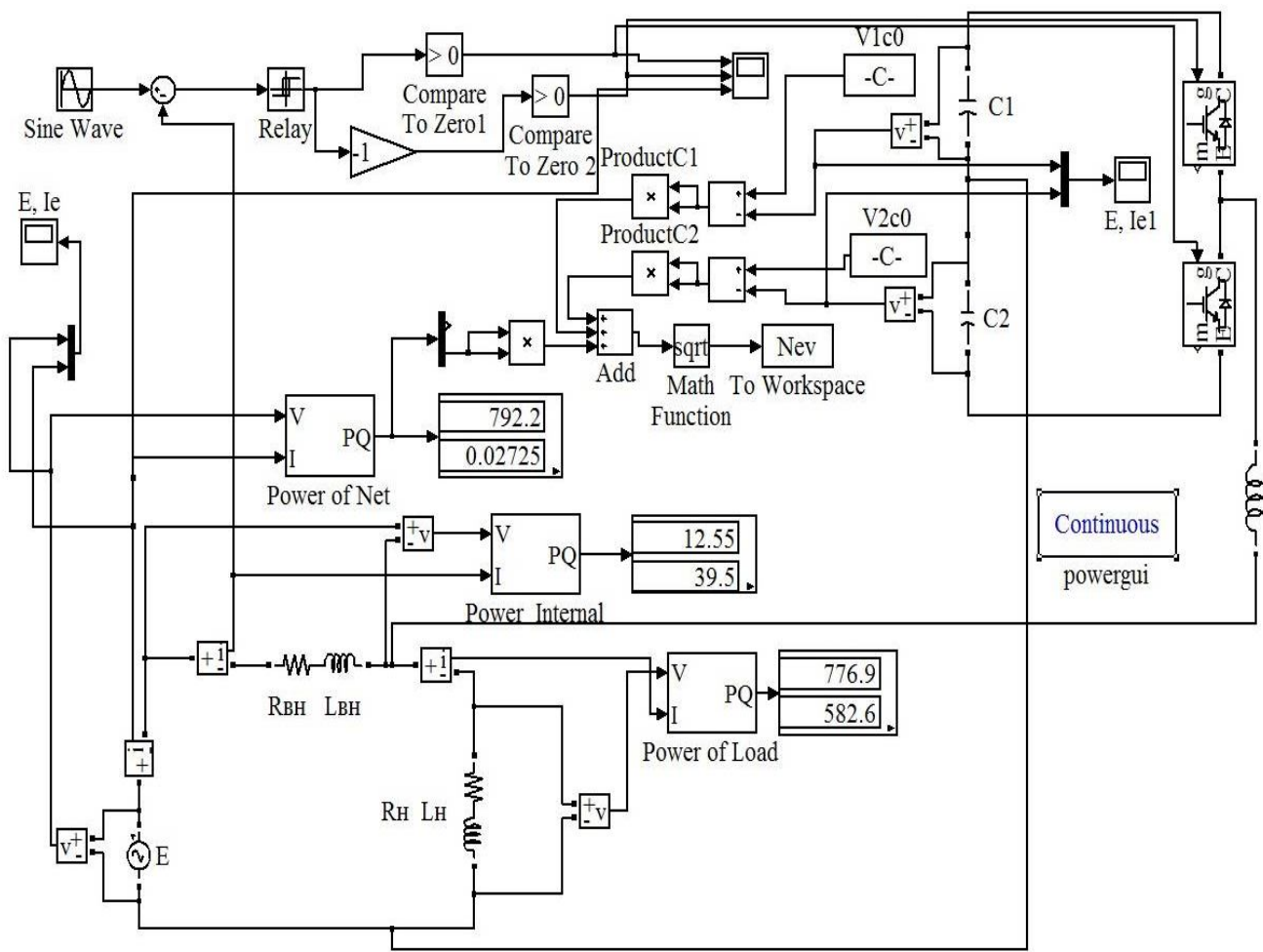


Рисунок 6.11 – Комп’ютерна модель системи електропостачання з під’єднанням силового фільтра після виконання пошукової оптимізації

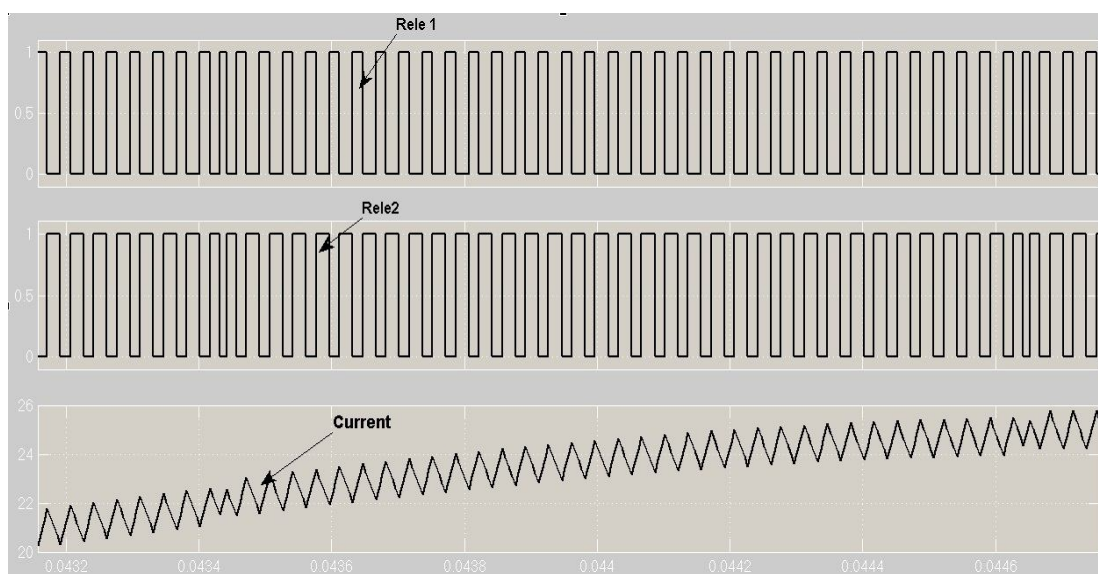


Рисунок 6.12 – Часові діаграми струму мережі та імпульсів керування транзисторами

На рисунках 6.13 і 6.14 напруги на конденсаторах зростають протягом декількох періодів за початкових значень напруг конденсаторів і початкового значення амплітуди струму мережі.

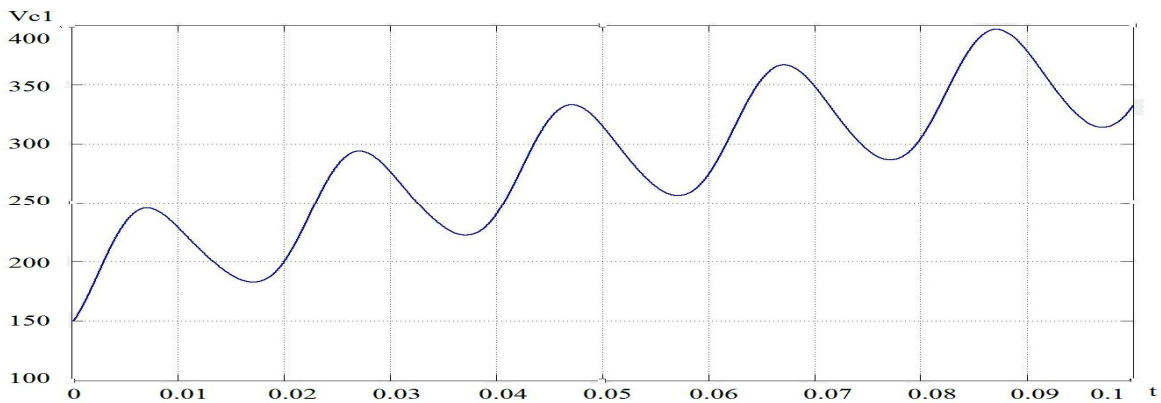


Рисунок 6.13 – Часова діаграма напруги на конденсаторі С1 при заданих напругах $V_{C01} = V_{C02} = 150 \text{ В}$ перед виконанням оптимізації

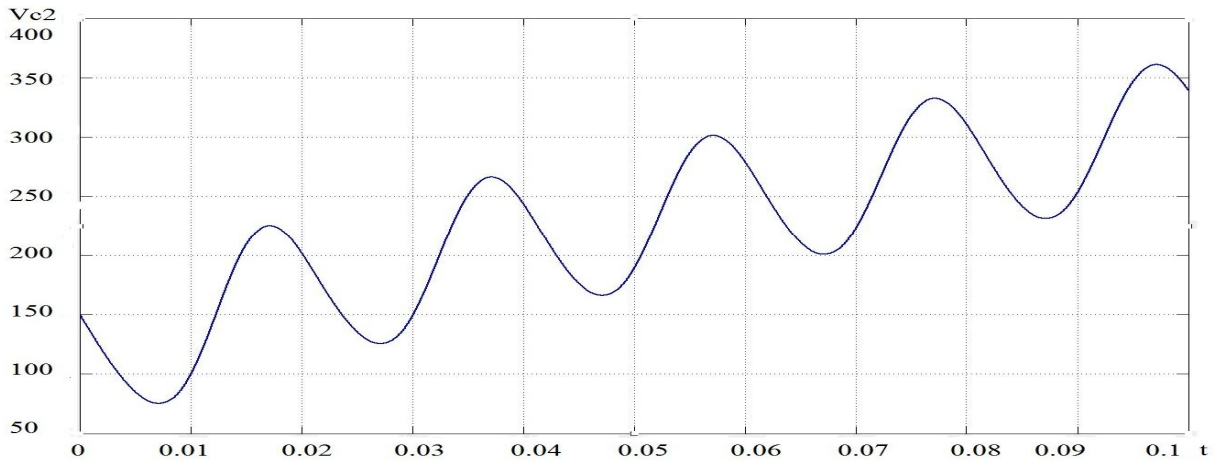


Рисунок 6.14 – Часова діаграма напруги на конденсаторі С2 при заданих напругах $V_{C01} = V_{C02} = 150 \text{ В}$ перед виконанням оптимізації

Отже, метою оптимізації є пошук оптимальних значень напруг конденсаторів і еталонного значення амплітуди струму джерела електроенергії за умови стабілізації напруги на конденсаторах.

Цільову функцію доцільно обчислювати як середньоквадратичний функціонал, сконструйований за формулою:

$$N = \sqrt{(V_{Ck1} - V_{C01})^2 + (V_{Ck2} - V_{C02})^2 + Q_E^2}, \quad (6.7)$$

де $V_{Ck1}, V_{Ck2}, V_{C01}, V_{C02}$ – напруги на конденсаторах на початку і в кінці моделювання;

Q_E – реактивна потужність, яка вимірюється на джерелі напруги.

Значення цільової функції (6.7) обчислюється в середовищі MATLAB з використанням блока обчислення суми квадратів добутоків Add, значення на який надходять із помножувачів ProductC1 і ProductC2 і вимірювача активної та

реактивної потужностей Power of Net. На елементи ProductC1 і ProductC2 надходять сигнали, що дорівнюють різниці значень напруг на конденсаторах у початковий і кінцевий моменти інтервалу роботи моделі.

Значення цільової функції передається в робочий простір MATLAB, де мінімізується вбудованою у MATLAB файл-функцією оптимізації *fminsearch()* шляхом пошуку значень параметрів оптимізації.

Текст програми, що здійснює пошукову оптимізацію, наведено на рисунку 6.15.

```
warning off
global Im Vc01 Vc02 Nst V1 V2
Nst=0
Y=fminsearch('func_s3fnesim',[25 150 150])
Nst
```

Рисунок 6.15 – Текст основної програми

```
function Nev=func_s3fnesim(x)
global Im Vc01 Vc02 Nst
Im=abs(x(1)*1E-0)
Vc01=abs(x(2)*1E-0)
Vc02=abs(x(3)*1E-0)
sim model
x
Nst=Nst+1
```

Рисунок 6.16 – Текст додаткової файл-функції

В основній програмі у другому рядку вхідні параметри оптимізації задаються як глобальні змінні. Ці ж змінні передаються до відповідних блоків. У четвертому рядку здійснюється виклик вбудованої файл-функції оптимізації із зазначенням додаткової функції, що здійснює виклик цільової функції, і початкових значень параметрів оптимізації.

На рисунку 6.16 наведено текст викликаної додаткової функції. У першому рядку тексту файл-функції присвоєно ім'я файлу. У другому рядку задаються вхідні параметри оптимізації та номер ітерації Nst. Рядки 3 – 5 привласнюють глобальним змінним абсолютні значення. Ці значення використовуються як початкові значення на конденсаторах і задавального струму для моделі. Далі, у рядку 7, програма здійснює виклик моделі, у рядку 8 друкуються обчислені значення вхідних параметрів, а рядок 9 збільшує номер ітерації.

На рисунку 6.17 зображені часові діаграми мережевого струму і напруги живлення після завершення процесу оптимізації, що демонструють відсутність зсуву фаз струму мережі щодо напруги живлення. Разом із тим амплітудне значення струму мережі відповідає знайденому значенню генератора синусоїдального сигналу, що дорівнює 15,79 А, а напруги на конденсаторах стабілізуються, що представлено на часових діаграмах на рисунках 6.18 і 6.19. Початкові значення напруг, визначені шляхом оптимізації, складають величини $V_{C01} = 183,374 \text{ 9 В}$; $V_{C02} = 165,518 \text{ 2 В}$.

Отже, унаслідок виконання пошукової оптимізації були знайдені такі значення амплітуди напруги генератора синусоїдального сигналу і початкові напруги на конденсаторах, які зменшили зсув струму мережі щодо напруги живлення до нуля і максимально можливо зменшили величину струму мережі.

Перевагами розглянутого методу є простота його реалізації і точність роботи. Увімкнення напівмостового активного фільтра автоматично компенсує реактивну потужність у мережі, а оптимізація знижує мережевий струм.

Результати проведеного дослідження можуть застосовуватися для підвищення якості електричної енергії в мережах загального призначення, у системах електропостачання залізниць та мережах технологічних об'єктів. Таким чином, була розроблена і досліджена комп'ютерна модель системи електропостачання, у якій споживання реактивної потужності від мережі знижується практично до нуля завдяки під'єднанню силового активного фільтра.

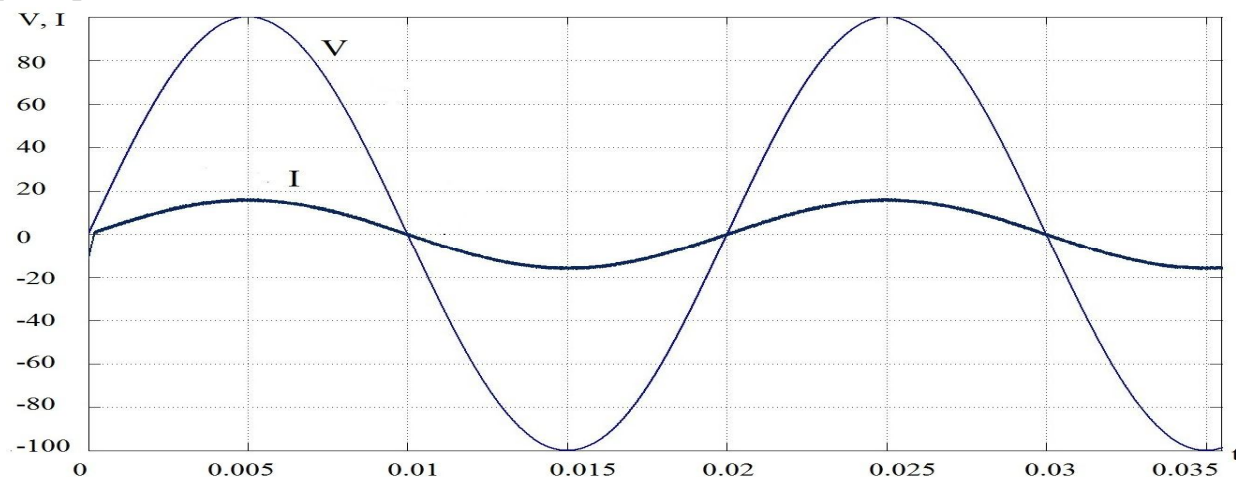


Рисунок 6.17 - Часові діаграми мережевого струму і напруги живлення після проведення оптимізації: I – мережевий струм; V – напруга живлення

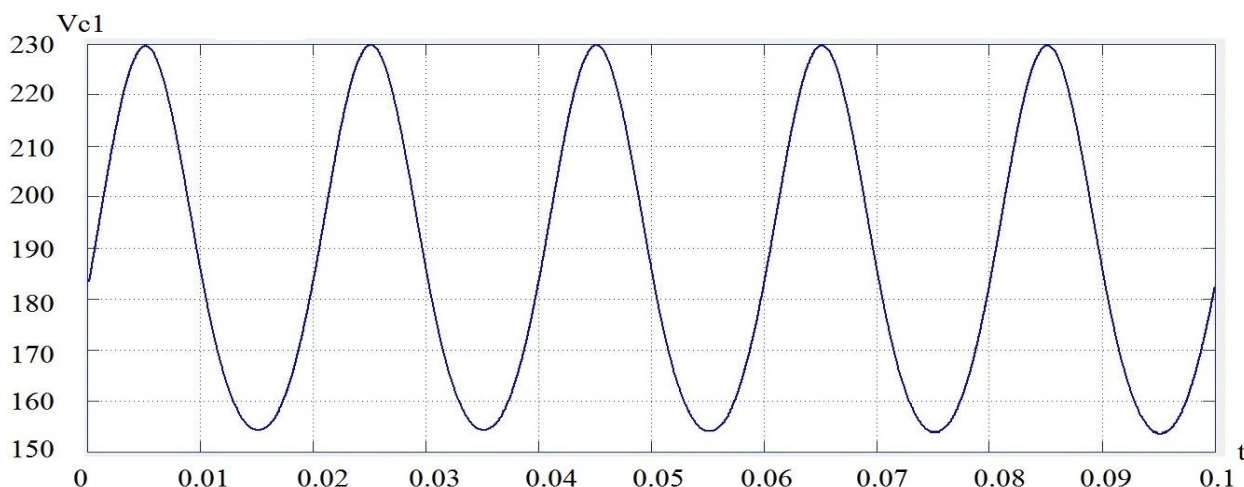


Рисунок 6.18 - Часова діаграма напруги на конденсаторі С1 напівмостового інвертора після виконання оптимізації

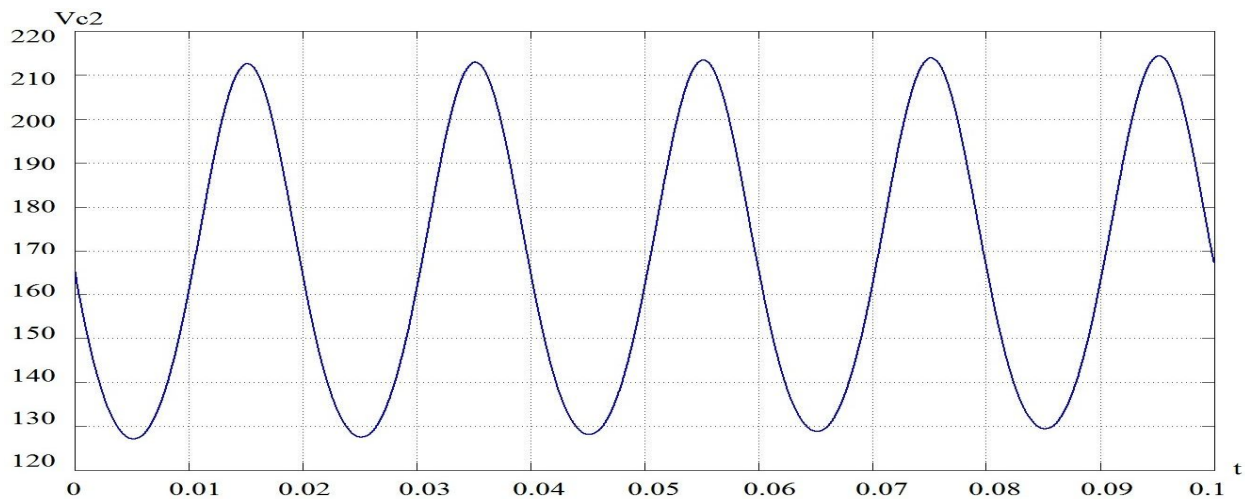


Рисунок 6.19 - Часова діаграма напруги на конденсаторі С2 напівмостового інвертора після виконання оптимізації

У досліджуваній моделі фільтр становить напівмостовий інвертор, управління яким здійснюється ШІМ за оптимізаційним алгоритмом. Дослідження показало, що для управління активним фільтром можна застосувати пошукову оптимізацію. Обґрунтовано спосіб формування цільової функції, що не вимагає складних обчислень і обробки інформації. Параметрами оптимізації є значення амплітуди струму мережі та початкові напруги на конденсаторах. У процесі проведення пошукової оптимізації автоматично визначається раціональний режим роботи системи електропостачання, що характеризується підвищенням коефіцієнта потужності, зменшенням амплітуди споживаного від мережі струму та істотним зниженням втрат у системі електропостачання. Разом із тим реактивна потужність повністю компенсується, а амплітудне значення струму мережі істотно знижується, мінімізуючи втрати електроенергії.

6.4 Активний фільтр для трифазної електричної системи з несиметричним навантаженням і управлінням за оптимізаційним алгоритмом за критерієм балансу активних потужностей

Силові структури активних фільтрів побудовані за відносно нескладним схемами мостових інверторів з широтно-імпульсною модуляцією [54], живильною напругою яких є напруга на накопичувальному конденсаторі. Заряд цього конденсатора забезпечується через кола зворотних діодів керованих вентилів інвертора. Однак система управління силовим активним фільтром становить доволі складний інтелектуальний пристрій, що реалізовується на мікроконтролерах за спеціальними алгоритмами. Останні здійснюють ряд

проміжних перетворень вимірюваних електричних величин у системі електропостачання. Системи управління повинні відстежувати зміни струмів у лінії електропередачі. За допомогою перетворень струмів і напруг за формулами Кларк і Парка на основі теорії миттєвої потужності обчислюються необхідні параметри управління інвертором напруги [122, 222, 225]. За такого управління за релейним принципом формуються струми інвертора, що забезпечують компенсацію реактивної потужності та симетрування струмів у лініях електропередачі.

Тим часом, використання оптимізаційних алгоритмів позитивно зарекомендувало себе під час розрахунків параметрів пасивних симетрокомпенсувальних пристроїв [296]. Оптимізація режиму системи електропостачання здійснювалася на моделі за допомогою алгоритмів пошукової оптимізації методом деформованого багатогранника і забезпечувала високу точність і спільність рішення завдання. Тому цілком обгрунтовано видається спроба застосувати ці алгоритми до систем електропостачання з трифазними силовими активними фільтрами.

Схема досліджуваної системи електропостачання у вигляді візуальної моделі подана на рисунку 6.20. Тут несиметричне навантаження живиться від трифазної системи напруг живлення через симетричну лінію електропередачі. Опори лінії електропередачі дорівнюють $j\omega 0,001$ Ом, опори навантажень по фазах А, В і С відповідно приймаються рівними $0,7 + j\omega 0,005$, $1,0 + j\omega 0,01$, $2,0 + j\omega 0,04$ Ом. Амплітуди напруги живлення прийняті 100 В, а частота – 50 Гц. Система живильних напруг симетрична, несиметрія режиму обумовлюється лише навантаженням. Попередньо був розрахований і змодельований несиметричний режим цієї системи. Часові діаграми струмів у лініях електропередачі, які є одночасно і струмами живильних джерел напруг, у несиметричному режимі наведені на рисунку 6.21. Вихідний несиметричний режим обумовлює велику різницю амплітуд струмів в лініях електропередачі, коли струми в фазах А і В у три рази перевершують струми у фазі С. Їхні амплітуди відповідно дорівнюють 31,494; 30,995 і 10,342 А, а значення коефіцієнтів потужності складають відповідно 0,608, 0,061 і 0,337. Симетричні складові струмів дорівнюють $I_1 = 22,96$ і $I_2 = 12,63$ А, а зсув величини напруги загальної точки з'єднання навантаження щодо нульової точки джерел напруги становить величину близько 40 В. Усе це свідчить про те, що система схильна до суттєвої несиметрії. Паралельно навантаженню під'єднаний силовий активний фільтр на IGBT-транзисторах із шунтуючими зворотними діодами. Струм у систему інжектується від силового активного фільтра через дроселі. Транзистори повинні управлятися так, щоб активний фільтр сформував

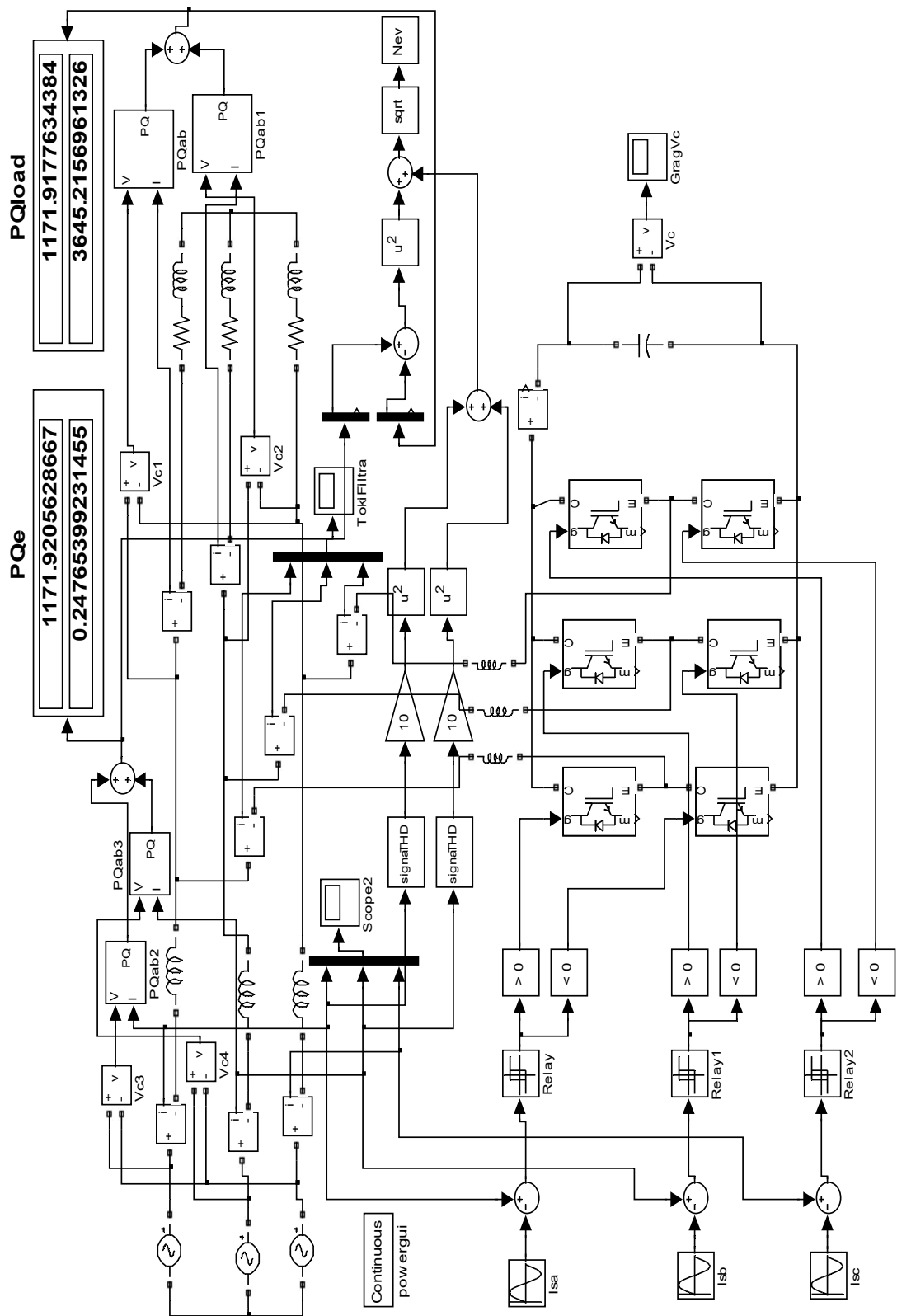
коригувальні струми, що забезпечують в цій системі мінімізацію реактивної потужності, що віддається джерелами живлення.

Разом із тим мають бути компенсовані складові реактивної потужності, зумовлені як реактивністю навантажень, так і їхньою несиметрією. Унаслідок повної компенсації реактивної потужності струми в лініях передачі та джерела повинні зрівнятися за амплітудами та фазами повністю збігтися з відповідними живильними напругами. У цьому режимі джерела генерують тільки активну потужність, яка споживається активними складовими опорів навантаження і лінії електропередачі.

Різниця величини струму фази живильного джерела і еталонного струму фази подається на гістерезисний елемент [257]. Він налаштовується так, щоб значення його вихідного сигналу склали $+1$ і -1 , а ширина зони гістерезису по вхідному сигналу була достатньо малою, щоб точно відтворити еталонний сигнал. У цьому випадку приймалися значення $(+0,1)$ і $(-0,1)$ А. Сигнал із виходу гістерезисного елемента подається на елементи порівняння з нулем, які фактично виділяють позитивну і негативну частини сигналу, одержуваного на виході гістерезисного елемента. Перша частина подається на верхній транзистор плеча відповідної фази інвертора, а друга – на нижній транзистор цього саме плеча цієї саме фази.

Можна відзначити, що запропонована модель системи управління широтно-імпульсної модуляції є найпростішою і надійнішою з усіх відомих авторам, до того ж вона забезпечується мінімумом обчислювальних блоків, тому економічна по обчислювальним витратам і проста для реалізації.

Запропонований принцип управління використовує зазначені особливості режиму, тому завдання виходу на режим компенсації реактивної потужності може розглядатися як забезпечення корегуючими струмами мінімізації різниці між активними потужностями джерел і навантаження. Для обчислення потужностей, що віддаються живильними джерелами, за допомогою віртуальних приладів вимірюються їх струми і напруги. Результати цих вимірювань передаються на віртуальні PQ-обчислювачі активної і реактивної складових повної потужності. Сумарна реактивна потужність джерел фіксується цифровим віртуальним приладом RMist, що дозволяє оцінити ефективність отриманого рішення. Аналогічні вимірювання повної потужності передбачені і для навантаження. Різниця між сумою активних потужностей джерел і навантаження утворюють складову по потужності для цільової функції. Параметром оптимізації є амплітуда струмів джерел, фази яких прив'язані до фаз напруг симетричною системи живлення.



PQe
 1171.9205628667
 0.24765399231455

PQload
 1171.9177634384
 3645.2156961326

Рисунок 6.20 – SPS-модель системи електропостачання з паралельним силовим активним фільтром

Для розглянутого випадку лінійного навантаження необхідно забезпечити також мінімізацію в кривих струмів джерел і коригувальних струмів вищих гармонік, що досягається включенням відповідних показників у цільову функцію. З цією метою струми активного фільтра піддаються гармонійному аналізу за допомогою віртуального аналізатора гармонік Fourier block. Для виділення кожної гармоніки аналізатор має бути налаштований на її частоту. Отримані в результаті аналізу амплітуди вищих гармонік утворюють складові цільової функції по гармонікам.

Для зрівнювання значущості цих складових передбачений підсилюючий коефіцієнт. Його величина у певний спосіб може впливати на швидкість збіжності до вирішення, тому передбачена можливість його зміни в процесі оптимізації. Комплексна цільова функція обчислюється як кульова метрика від зазначених складових.

Запуск процесу оптимізації може здійснюватися від деякого початкового значення напруги на накопичувальному конденсаторі інвертора. При нульовому значенні початкової напруги на конденсаторі протікає перехідний процес. Тривалість цього процесу може бути відносно великою, що уповільнює процес оптимізації. Тому доцільно ставити значення початкової напруги на конденсаторі близьким до сталого значення.

Орієнтовно це значення визначається як вихідна напруга еквівалентного мостового випрямляча, що заряджає накопичувальний конденсатор інвертора. Це значення також може бути включено як складова цільової функції, і в цьому випадку рішення буде знайдено, зокрема і для сталого значення цієї напруги.

На рисунку 6.22 зображені струми в лініях електропередачі після досягнення оптимального режиму. Знайдене значення амплітуд цих струмів становить 7,771 117 А, що наближається до точного розв'язання 7,814 224 4 А.

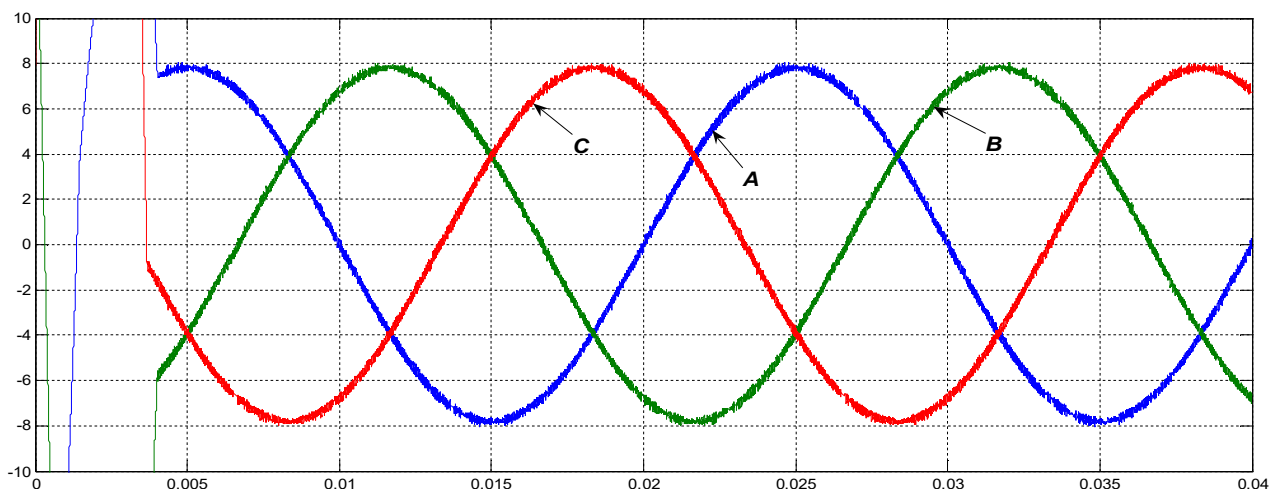


Рисунок 6.22 - Струми в джерелах після завершення оптимізації режиму

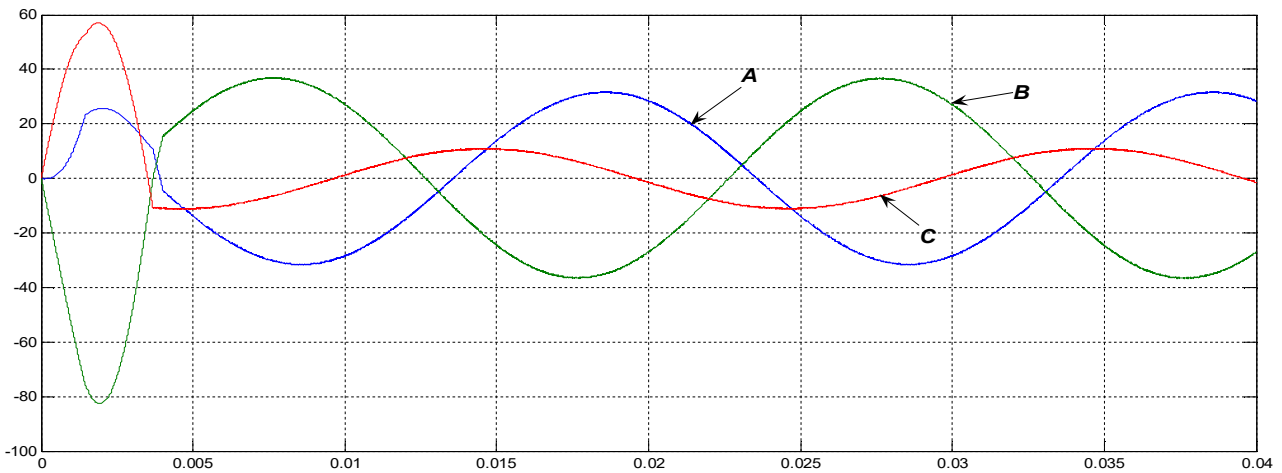


Рисунок 6.23 - Кориговальні струми, які генеруються силовим активним фільтром

На рисунку 6.24 подана часова діаграма напруги на накопичувальному конденсаторі силового активного фільтра. Початкове значення цієї напруги приймалося нульовим, тому в першу чверть періоду, як видно з діаграми, протікає перехідний процес заряду конденсатора через зворотні діоди, які шунтують силові транзистори активного фільтра.

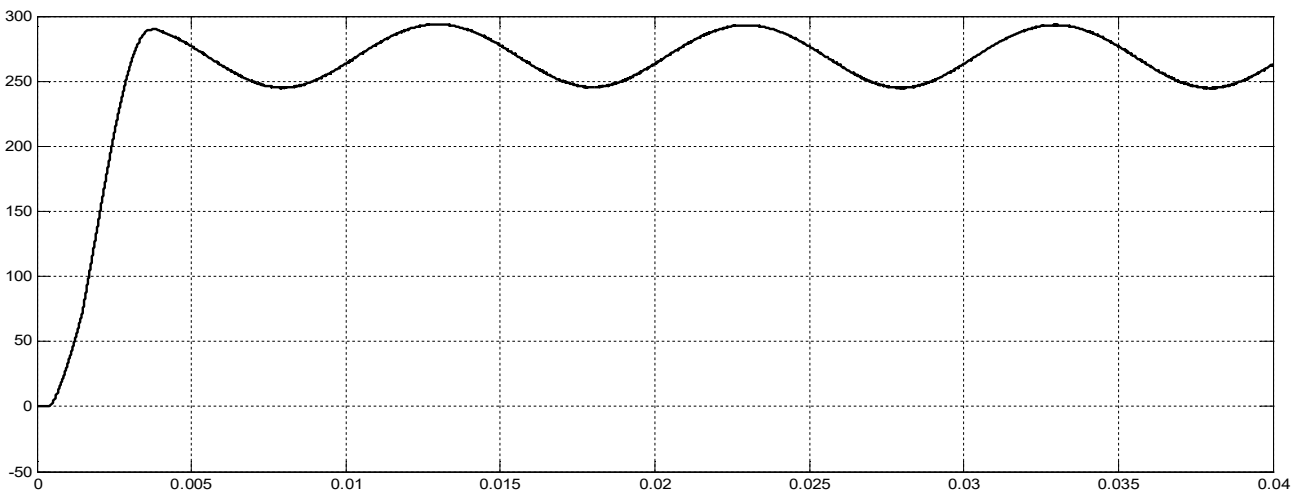


Рисунок 6.24 - Напруга на накопичувальному конденсаторі силового активного фільтра

На інтервалі цього перехідного процесу транзистори замкнені і на керуючі сигнали не реагують. Накопичувальний конденсатор забирає на себе енергію, запасену в дроселях активного фільтра, тому напруга на конденсаторі може істотно перевищувати амплітуду живильної напруги, що живить джерела енергії.

У разі знаходження рішення в процесі оптимізації після заряду конденсатора напруга на конденсаторі змінюється за періодичним законом. В інших випадках напруга на конденсаторі або наростає (якщо конденсатор отримує від джерел напруги живлення надлишкову енергію), або зменшується (якщо енергія від джерел недостатня для підтримки роботи активного фільтра).

Таким чином, запропонований принцип управління силовим активним фільтром на основі оптимізаційного алгоритму дозволяє не використовувати проміжні перетворення електричних величин у системі електропостачання. Критерієм оптимізації приймається різниця активних потужностей джерел і навантаження. Водночас критерій оптимізації може враховувати також фактор вищих гармонік, що забезпечує правильну роботу активного фільтра. Застосування запропонованого методу на моделі показало його працездатність і достатньо високу точність.

6.5 Силовий активний фільтр зі стабілізацією напруги на накопичувальному конденсаторі за дискретами за допомогою пошукової оптимізації

Розглянемо застосування пошукової оптимізації для аналізу режиму симетрування і компенсації реактивної потужності в трифазній системі електропостачання з несиметричними навантаженнями і силовим активним фільтром із керуванням шляхом стабілізації на заданому рівні напруги на накопичувальному конденсаторі активного фільтра.

Силові активні фільтри (САФ) традиційно зібрані за схемою мостового інвертора на IGBT-транзисторах із зворотними діодами, де джерелом живлення інвертора є накопичувальний конденсатор. Для забезпечення нормальної роботи силового активного фільтра необхідно підтримувати напругу на конденсаторі на певному рівні, що перевищує амплітуду лінійної напруги в трифазній системі на 20 – 30 % [125, 227]. Саме за такої умови забезпечується віддача модульованих струмів через буферні реактори активного фільтра у власне систему електропостачання і гарантується активний вплив фільтра на систему електропостачання. В іншому випадку спостерігається пасивна поведінка фільтра зі зміною напрямку потоку енергії, недостатнього втім для зарядки конденсатора через зворотні діоди до зазначеного рівня напруги.

Основними параметрами силової схеми САФ є величини індуктивностей буферних реакторів САФ і величина ємності накопичувального конденсатора САФ. Вибір величин буферних індуктивностей детально подано в [84]. Що ж стосується вибору накопичувального конденсатора, то теоретично його ємність може бути прийнята нескінченно великою, і в принципі він може бути

замінений джерелом постійної напруги, що живить інвертор САФ. Однак на практиці ємність накопичувального конденсатора, зрозуміло, кінцева. Обмінні енергетичні процеси, пов'язані з накопичувальним конденсатором, відбуваються за участю буферних реакторів САФ і транзисторних-діодного моста. Цим, зокрема, пояснюється заряд накопичувального конденсатора при під'єднанні САФ до мережі до напруги, що перевищує амплітуду лінійної напруги мережі [84]. Для стабілізації напруги на необхідному рівні в системах управління САФ передбачається спеціальний контур автоматичного регулювання [125, 225, 227].

Варто зважати на те, що при кінцевій величині ємності накопичувального конденсатора напруга на ньому буде піддана пульсаціям, амплітуда і форма яких визначаються як величиною ємності накопичувального конденсатора, так і характером (параметрами) навантаження. Зокрема, за відносно малої величини постійної складової напруги на конденсаторі та великій амплітуді пульсації миттєві значення напруги на конденсаторі можуть входити в зону, де вони не перевищують рівня амплітуд лінійних напруг системи електропостачання. У цьому випадку спостерігається істотне спотворення струмів САФ, і, як наслідок, фазних струмів у самій мережі. Небажаність виникнення таких режимів очевидна.

У той же час подібні спотворення можуть виникати через недостатні величини сигналів, вироблюваних у результаті порівняння струмів мережі, навантаження і фільтра, які здійснюються в системі управління і подаються далі для генерації імпульсів управління транзисторним мостом САФ.

Якщо виділити еталонні сигнали у вигляді окремої симетричною системи синусоїдальних сигналів прямої послідовності, то така система може бути прийнята як керуюча для системи управління САФ. Фази еталонних сигналів повинні збігатися з фазами напруг джерел живлення. Цим забезпечується одиничне значення коефіцієнта потужності. Амплітуди еталонних сигналів мають бути такими, щоб забезпечити баланс потужностей у системі. За таких умов чутливим елементом для визначення умови балансу потужності може виступати сам накопичувальний конденсатор САФ, ємність якого завжди кінцева в реальних умовах.

За надлишкової амплітуди еталонних сигналів спостерігається наростання напруги на накопичувальному конденсаторі, за недостатньої їхньої амплітуді напруга на конденсаторі прагне знизитися до нуля. Лише при оптимальному значенні амплітуд еталонних сигналів напруга на конденсаторі має періодично повторювану форму.

Таким чином, природним чином доходимо до необхідності вирішення завдання пошукової оптимізації. У ній як параметр оптимізації виступає

амплітуда еталонних сигналів системи управління САФ. Як критерій оптимізації має бути прийнята періодичність напруги на накопичувальному конденсаторі як чутливому елементі щодо виконання умови балансу потужностей.

Процес пошукової оптимізації організується в обчислювальному середовищі MATLAB шляхом взаємодії програмного забезпечення та візуальної моделі через робочий простір середовища моделювання. Модель системи електропостачання з несиметричним навантаженням подана на рисунку 6.25. У представленій моделі джерела напруги становлять симетричну систему з амплітудами 100 В і частотою 50 Гц. Індуктивності ліній електропередачі прийняті рівними $L = 0,001$ Гн.

Несиметричне активно-індуктивне навантаження мережі за фазами А, В і С представлена відповідними комплексними опорами $0,7 + j\omega 0,005$ Ом, $1,0 + j\omega 0,01$ Ом, $2,0 + j\omega 0,04$ Ом, де ω кругова частота живильної напруги. За таких умов несиметрії навантажень без впливу САФ амплітуди мережевих струмів фаз А, В і С складають відповідно 31,47, 30,99 і 10,34 А, істотними є і зсуви фаз мережевих струмів щодо живильних напруг [7]. У САФ ємність накопичувального конденсатора С прийнята 1 000 мкФ. Сформовані сигнали фільтра інжектуються в фази системи електропостачання через буферні реактори, індуктивні опори яких прийняті рівними 0,5 Ом. Управління ключами фільтра здійснюється з використанням широтно-імпульсної модуляції. Еталонні сигнали задаються джерелами синусоїдального сигналу А, В і С, фази і частоти яких співпадають з фазами і частотами відповідних джерел напруги живлення. Амплітуда для всіх джерел еталонного сигналу приймається однаковою, а її значення є змінною пошукової оптимізації.

Виходи вузлів порівняння струмів еталонного сигналу і струмів фази живильного джерела подаються на гістерезисні елементи, налаштовані так, що амплітуди вихідних імпульсів дорівнюють одиниці, а ширина гістерезисної зони задана рівною 0,5 А. Для виділення позитивної та негативної частин отриманого сигналу використовуються елементи порівняння сигналу з нулем. Далі відбувається розподіл отриманих сигналів на керуючі електроди IGBT-транзисторів.

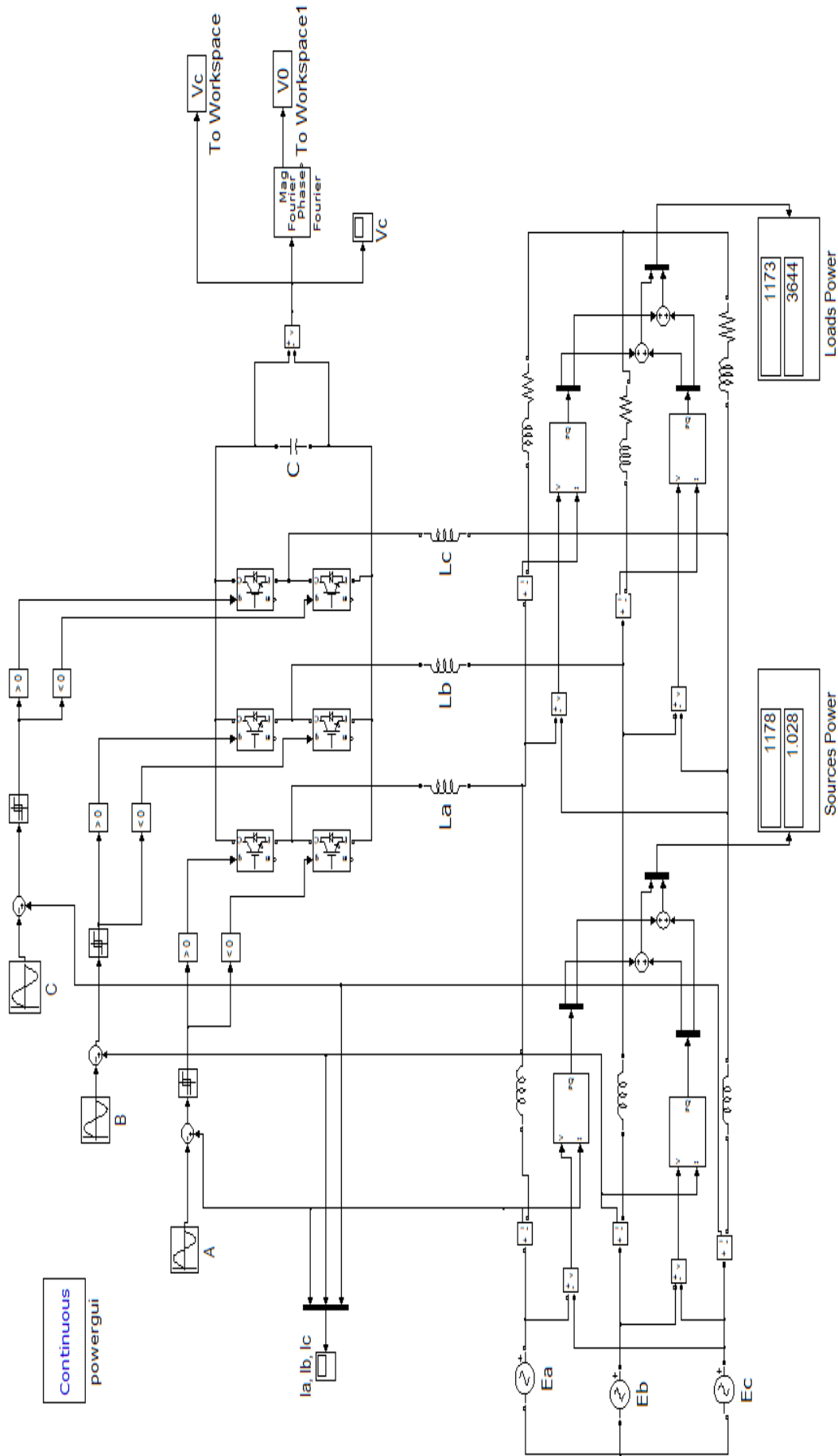


Рисунок 6.25 — Компьютерна модель несиметричної системи електропостачання з силовим активним фільтром

У головній програмі (рис. 6.26) як глобальні змінні задані параметри оптимізації – амплітуда еталонних струмів I і початкове значення на накопичувальному конденсаторі $VC0$, а так же номер ітерації Nst і середнє значення напруги на конденсаторі Vc . Змінна SOP задає в моделі ширину гістерезисної петлі, а L величину індуктивностей лінії електропередачі. Пошукова оптимізація здійснюється вбудованою файл-функцією $fminsearch()$. Параметрами цієї функції є початкове значення амплітуди еталонного сигналу і початкова напруга на накопичувальному конденсаторі. Текст файлу для обчислення цільової функції наведено на рисунку 6.27.

```
warning off
global I VC0 Nst Vc
SOP = 0.5
L = 0.001
Nst=0
Y=fminsearch('func_s3fnesim',[ 13.8984 150 ])

Nst
```

Рисунок 6.26 - Текст головної програми

```
function Nev=func_s3fnesim(x)
global I VC0 Nst Vc
I=abs(x(1)*1E-0)
VC0 = abs(x(2)*1E-0)

sim model1
Nev = sqrt((Vc(5)-Vc(4))^2+(Vc(4)-Vc(3))^2+(Vc(3)-Vc(2))^2+(V0-300)^2)
x
Nst=Nst+1
```

Рисунок 6.27 - Текст файлу для обчислення цільової функції

Для стабілізації напруги на конденсаторі на заданому рівні блок To Workspace Vc передає вектор дискретних значень напруг з моделі в програму. Цей блок налаштований так, що значення напруги на конденсаторі знімаються кожні 0,02 секунд. Отримані дані зберігаються в масиві робочого простору, з елементів якого далі і формується перша частина цільової функції Nev (рис. 6.27). Для завдання певного рівня напруги на накопичувальному конденсаторі цільова функція доповнена другою частиною, яка представляє квадрат різниці між значенням нульової гармоніки напруги і значенням, відповідним рівню напруги на конденсаторі, що задається. Реалізація такого розрахунку в моделі здійснюється блоком виділення нульовий гармоніки Fourier і блоком передачі даних з моделі в робочий простір MATLAB To Workspace у вигляді змінної з ім'ям $V0$. Цільова функція формується у вигляді кульової метрики:

$$Nev = \sqrt{(V_{C5} - V_{C4})^2 + (V_{C4} - V_{C3})^2 + (V_{C3} - V_{C2})^2 + (V_0 - 300)^2},$$

де $V_{C2}, V_{C3}, V_{C4}, V_{C5}$ – напруги на конденсаторі наприкінці 2, 3, 4 і 5 періодів;

V_0 – середнє значення напруги на конденсаторі.

Варто зазначити, що в цільовій функції не використовуються значення напруги в першій період коливання, тому що в цей момент часу відбувається перехідний процес, і дані з цього проміжку часу не є інформативними. Час

прогону моделі налаштоване на 0,1 с., метод розрахунку обраний ode23s (stiff / Mod. Rosenbrock), крок інтегрування заданий рівним 0,000 005 секунд.

Пошукова оптимізація була завершена після виконання 298 ітерацій, у результаті чого була визначена амплітуда еталонного сигналу, що дорівнює $I = 7,7875$ А, а також початкова напруга на конденсаторі $V_{C0} = 301,2154$ В. Водночас струми стали симетричними (рис. 6.28), а їх фази стали збігатися з відповідними фазами джерел напруг.

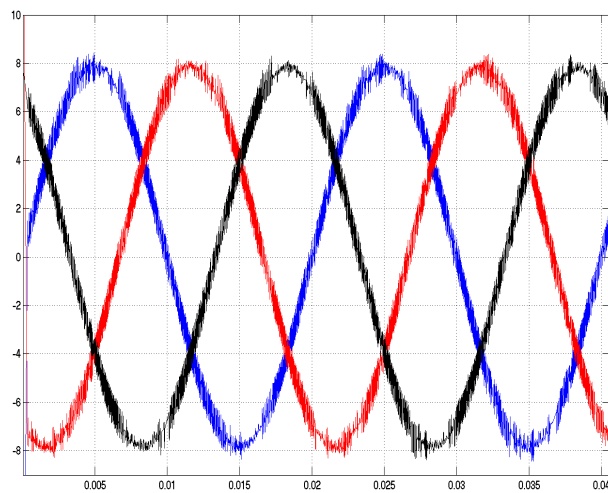


Рисунок 6.28 - Діаграми мережевих струмів під час роботи САФ

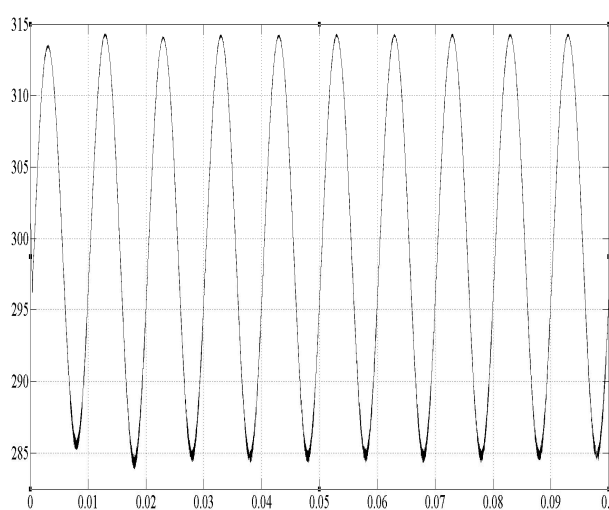


Рисунок 6.29 - Пульсації напруги на конденсаторі САФ

На рисунку 6.29 подана часова діаграма напруги на накопичувальному конденсаторі силового активного фільтра. Як видно з рисунка, напруга практично відразу встановилося на рівні 300 В, що забезпечує роботу фільтра в нормальному режимі. Активна потужність на боці джерел (1 178 Вт) відрізняється на 5 Вт від потужності на боці навантаження (1 173 Вт), що свідчить про те, що ця невелика частина активної потужності споживається самим САФ. Реактивна потужність на боці джерел стала практично рівною нулю (1,028 Вар), отже, можна зробити висновок про те, що джерела працюють в оптимальному режимі, віддаючи лише активну потужність 1 178 Вт.

Обґрунтовано критерій оптимізації, який забезпечує можливість стабілізації напруги на накопичувальному конденсаторі САФ на заданому рівні, що обумовлює оптимальну роботу САФ. З використанням комп'ютерної моделі трифазної системи електропостачання з несиметричним навантаженням і програми пошукової оптимізації за розробленим критерієм визначено еталонний струм системи управління САФ, за якого відбувається симетрування системи і повна компенсація реактивної потужності в системі. У результаті пошукової оптимізації фазні струми стали симетричними, їхні амплітуди істотно зменшилися, а джерела живлення стали працювати в режимі

рівномірного завантаження по фазах з віддачею лише активної потужності. Розроблений метод дозволяє визначити режим в трифазній системі електропостачання з паралельним САФ без використання щодо складної системи управління САФ. Крім того, запропоновані алгоритми можуть бути реалізовані в мікропроцесорній системі управління САФ, заснованої на застосуванні пошукової оптимізації.

6.6 Оптимізація режиму системи з несиметричним і нелінійним навантаженнями за допомогою силового активного фільтра, що керується за оптимізаційним алгоритмом

Розглянуті в попередніх розділах дослідження стосувалися вирішення завдання симетрування і компенсації реактивної потужності в системах електропостачання з декількома лінійними несиметричними навантаженнями. Пошукова оптимізація тут дозволила отримати рішення і вийти на оптимальний режим повної компенсації реактивної потужності в системі за допомогою симетро-компенсувальних пристроїв, складених винятково з реактивних елементів. У постановці завдання незмінним завданням було визначення як типів елементів, що становлять симетро-компенсувальний пристрій, так і величин їхніх параметрів. Вирішення цього завдання успішно здійснюється за допомогою пошукової оптимізації на основі використання математичних і візуальних моделей і запуску процесу нелінійної оптимізації за алгоритмом деформованого багатогранника.

Якщо до несиметрії навантаження додається ще і нелінійність, то до реактивних потужностей зсуву і несиметрії додається і потужність спотворень, обумовлена наявністю вищих гармонік. Скомпенсувати складову реактивної потужності, обумовлену нелінійністю навантаження, можливо у разі застосування силового активного фільтра.

Розглянемо застосування методів пошукової оптимізації для знаходження квазіусталеного режиму трифазної системи електропостачання з силовим активним фільтром паралельного типу за одночасного живлення трифазного несиметричного активно-індуктивного навантаження і нелінійного вентильного навантаження. Візуальна модель досліджуваної системи електропостачання наведена на рисунку 6.30.

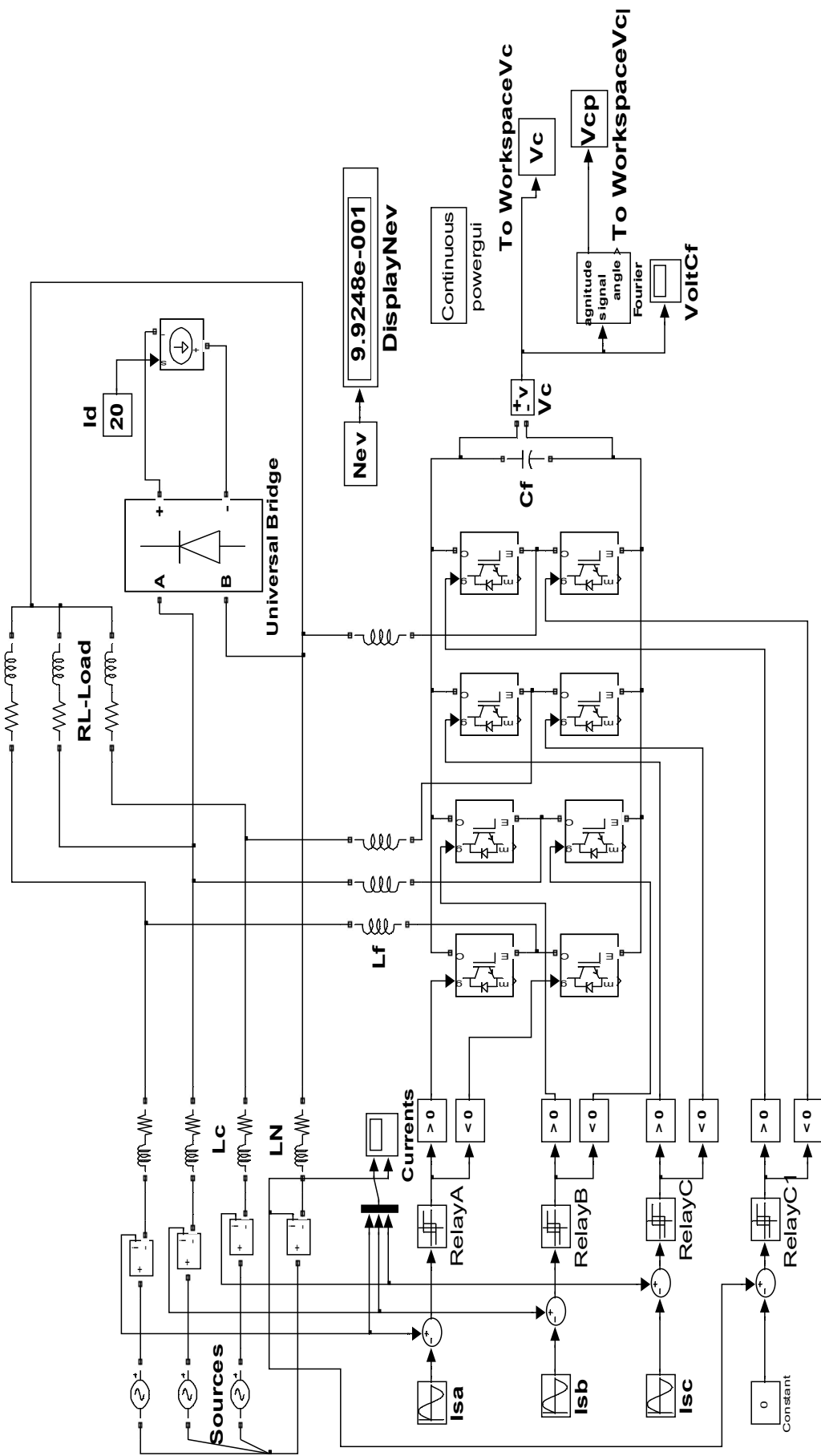


Рисунок 6.30 – Візуальна модель досліджуваної системи з несиметричним і нелінійним навантаженнями

Тут живильна трифазна симетрична мережа нескінченної потужності представлена джерелами напруги Sources, що мають нормовану амплітуду 100 В і частоту 50 Гц. Лінії електропередачі, на відміну від [2], не внесені в навантаження, а розглядаються окремо і, таким чином, не охоплюються силовим активним фільтром. Вони представлені активно-індуктивними елементами L_s , опори резисторів яких прийняті рівними 0,1 Ом, а індуктивності – 0,001 Гн. Опір і індуктивність нейтрального проводу LN втричі перевищують відповідні величини параметрів ліній електропередачі.

Трифазне несиметричне лінійне навантаження RL Load за схемою зірки, з'єднаної з нейтральним проводом, має такі величини параметрів за фазами: $R_a = 1,5$ Ом, $L_a = 0,025$ Гн, $R_b = 1,0$ Ом, $L_b = 0,01$ Гн, $R_c = 2,0$ Ом, $L_c = 0,04$ Гн. Нелінійне навантаження представлено однофазним мостовим випрямлячем Universal Bridge. Він приєднаний до фази В у точці під'єднання лінійного навантаження і до нейтрального проводу, таким чином, випрямляч живиться фазною напругою. Навантаження випрямляча здійснюється керованим джерелом постійного струму фіксованої величини $I_d = 20$ А. Силовий блок активного фільтра 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 активний фільтр, для чого необхідно забезпечити заряд цього конденсатора до напруги, що перевищує амплітуду лінійної напруги мережі в точках під'єднання навантажень. До цих точок через буферні реактори L_r підводяться коригувальні струми, що знімаються з точок діагоналей мостів інвертора. Ці струми повинні забезпечити в лініях електропередачі синусоїдальні струми, що збігаються по фазі з напругою фаз відповідних джерел живлення.

Система управління активним фільтром побудована за релейним принципом з широтно-імпульсною модуляцією. Вона реалізується за допомогою чотирьох релейних елементів Relay, з виходів яких сигнали поділяються на два канали за допомогою елементів порівняння з нулем. Отримані пари імпульсних сигналів подаються на транзистори верхнього і нижнього плеча відповідної фази. Таким чином здійснюється широтно-імпульсна модуляція, завдяки якій і формуються коригувальні струми активного фільтра. Для формування сигналів за релейним принципом за допомогою вимірювачів струмів знімаються струми в лініях електропередачі і нейтральному проводі. Далі з отриманих сигналів віднімаються еталонні сигнали, форму яких повинні повторити в результаті впливу коригувальних струмів фільтра струми в лініях навантаження і нейтральному проводі. Тому еталонні сигнали I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} для фаз А, В, С відповідно задані у вигляді трифазної симетричної системи синусоїд подібних

синусоїдам напруг живлення системи електропостачання. Оскільки нейтральний провід має бути абсолютно розвантажений, еталонний сигнал для нього заданий джерелом нульової константи. За таких умов для виходу на квазіусталений режим залишається невідомою лише амплітуда еталонних сигналів, що забезпечує цей режим.

Нескомпенсований режим при відключеному силовому активному фільтрі характеризується несинусоїдальністю і несиметрією струмів і напруг у системі, а також значним перевантаженням нейтрального проводу по струму. На рисунку 6.31 наведені діаграми трьох струмів в лініях електропередачі (верхні діаграми) і струму в нейтральному проводі (нижня діаграма). Тут видно, що струм у фазі В, яка довантажується випрямлячем, досягає амплітуди 40 А, а струм у нейтральному проводі – 25 А, що в два рази перевищує амплітуди лінійних струмів фаз А і С. Усі струми мають явно виражену несинусоїдальну форму, що означає присутність у системі струмів вищих гармонік і реактивної потужності спотворень.

Оптимізація режиму здійснюється за під'єданого силового активного фільтра програмними засобами MATLAB з використанням поданої візуальної моделі.

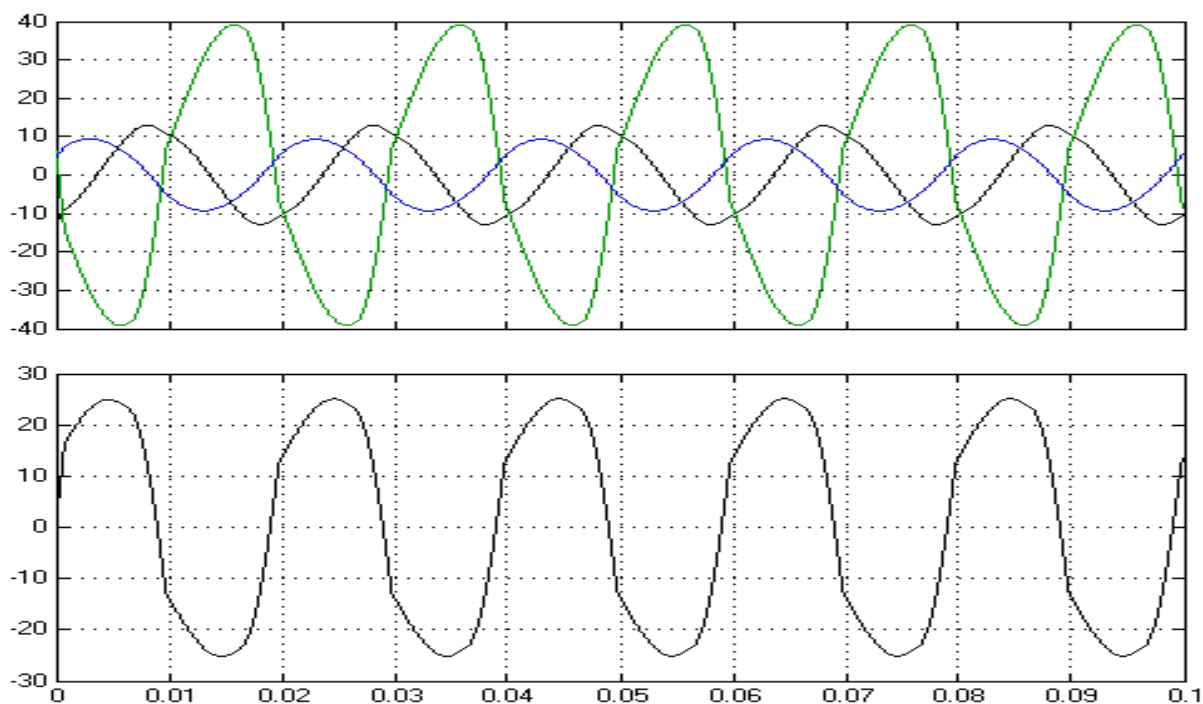


Рисунок 6.31 - Струми в нескомпенсованому режимі

Оптимізація заснована на вимозі завдання такого єдиного значення амплітуд еталонних сигналів для фаз, за якого в системі спостерігається 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. Постійна складова напруги на конденсаторі, як зазначено раніше, повинна перевершувати амплітуду лінійної напруги. Пульсації напруги на конденсаторі, що представляють змінну складову, залежать від навантаження і величини ємності накопичувального конденсатора. З погляду працездатності фільтра можна вважати, що ця ємність нескінченна, і в цьому випадку вона відіграє роль джерела напруги. У цьому випадку пульсації будуть відсутні. Однак на практиці ємність накопичувального конденсатора кінцева (в моделі її величина прийнята рівною 600 мкФ). При кінцевій величині ємності конденсатора напруга на ньому відображає відміну амплітуди еталонного сигналу від оптимальної величини. При перевищенні цієї величини в систему надходить надлишкова енергія і напруга на накопичувальному конденсаторі прагне наростати, досягаючи в асимптотиці деякого достатньо великого значення, що відповідає умовам балансу активних потужностей. У разі нестачі амплітуди еталонного сигналу напруга на накопичувальному конденсаторі прагне спадати через нестачу енергії, яка надходить у систему, досягаючи в асимптотиці нульового значення, що аж ніяк не відповідає нормальним умовам роботи силового активного фільтра. Таким чином, напруга на накопичувальному конденсаторі фільтра за умови кінцевої величини його ємності є свого роду індикатором досягнення оптимального скомпенсованого режиму в системі.

Програмні засоби оптимізації залучені із стандартної бібліотеки MATLAB, де є такі програми нелінійної оптимізації, як `fminsearch()`, що реалізує алгоритм деформованого багатогранника, і `fminunc()`, яка використовує метод спряжених градієнтів. Обидві програми легко взаємозамінні за зміною імені, по якому вони викликаються, оскільки аргументи у обох функцій можуть збігатися. Як змінні оптимізації використовуються амплітуда еталонного сигналу системи управління і початкова напруга на накопичувальному конденсаторі. Цільова функція формується з дискретних значень напруги на накопичувальному конденсаторі. Ці значення видаються на інтервалі прогону візуальної моделі протягом п'яти періодів напруги живлення з інтервалом дискретизації, що дорівнює періоду напруги живлення. Для формування цільової функції складаються різниці суміжних дискретних значень, з яких формується кульова метрика. Додатково введена також умова досягнення дискретними значеннями заданого рівня (в роботі він приймався таким, що дорівнює 400 В). Таким чином, при прогоні моделі дискретні значення передаються в робочу область MATLAB, де вони підхоплюються додатковою функцією, що здійснює прогін візуальної моделі з подальшим обчисленням значення цільової функції, яке далі

передається в головну програму, що викликає функцію оптимізації. На рисунку 6.29 показаний стан моделі після досягнення мінімуму, де можна бачити значення цільової функції у вигляді глобальної константи $N_{ev} = 0,99248$, що достатньо точно визначає скомпенсований режим у системі. Амплітуди еталонних сигналів склали величини $I_{sm} = 12,369$ А. З цього значення 4,243 А припадають, як це показано в [10], на живлення несиметричного лінійного навантаження, а інша частка 8,126 А доводиться на забезпечення живлення нелінійного навантаження випрямляча. Справедливість цього розподілу можна довести простим оцінним розрахунком частки активної потужності, споживаної випрямлячем. На рисунку 6.32 наведені діаграми струмів у лініях і нейтральному проводі в скомпенсованому режимі (аналогічні діаграми на рис. 6.31). тут видно, що амплітуди лінійних струмів зрівнялися, а їхні фази збігаються з фазами живильних напруг. Струм у нейтральному проводі практично зник. Це свідчить про повне симетрування і врівноваження режиму в системі електропостачання.

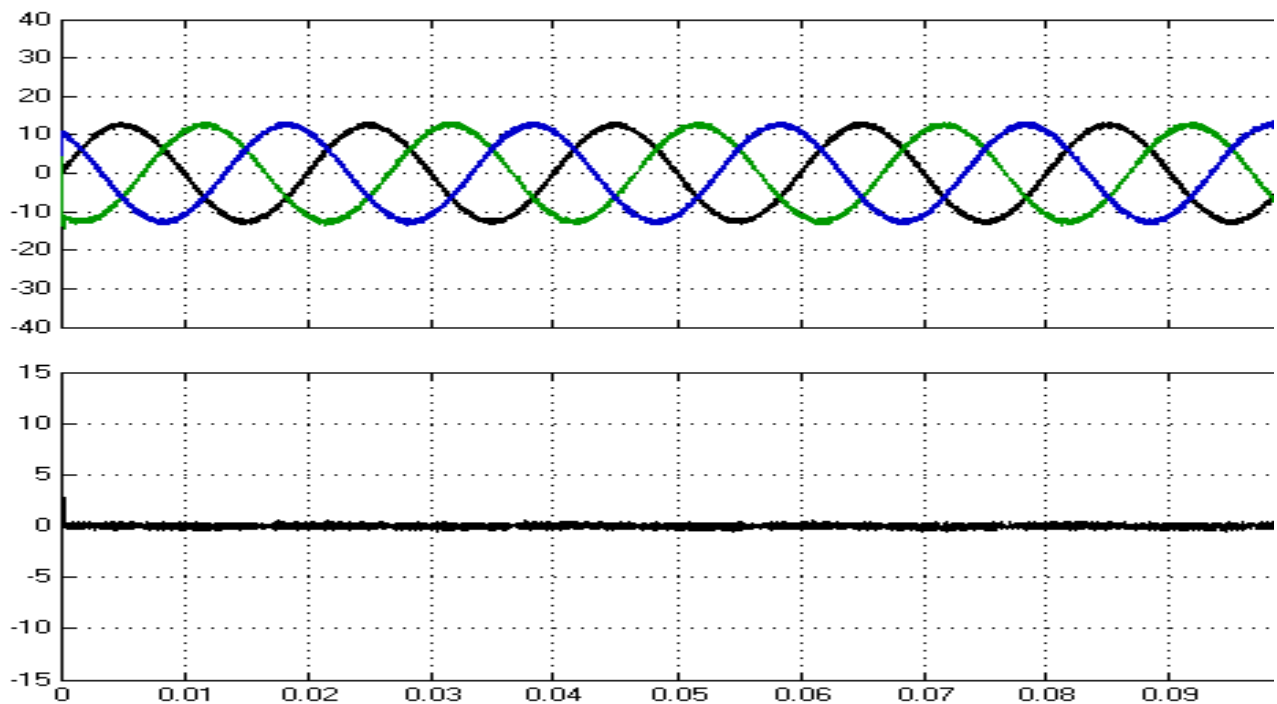


Рисунок 6.32 – Діаграми струмів у лінії і нейтралі за скомпенсованого режиму

На рисунку 6.33 наведена діаграма напруги на накопичувальному конденсаторі. Вона розпочинається із знайденої в ході пошукової оптимізації напруги в нульовий момент $V_{co} = 401,562$ В і утворює вектор дискретних величин $V_c = [400,099; 399,878; 399,885; 399,356; 399,179]$, які свідчать про забезпечення заданого режиму стабільної періодичної напруги на накопичувальному конденсаторі в межах заданої похибки.

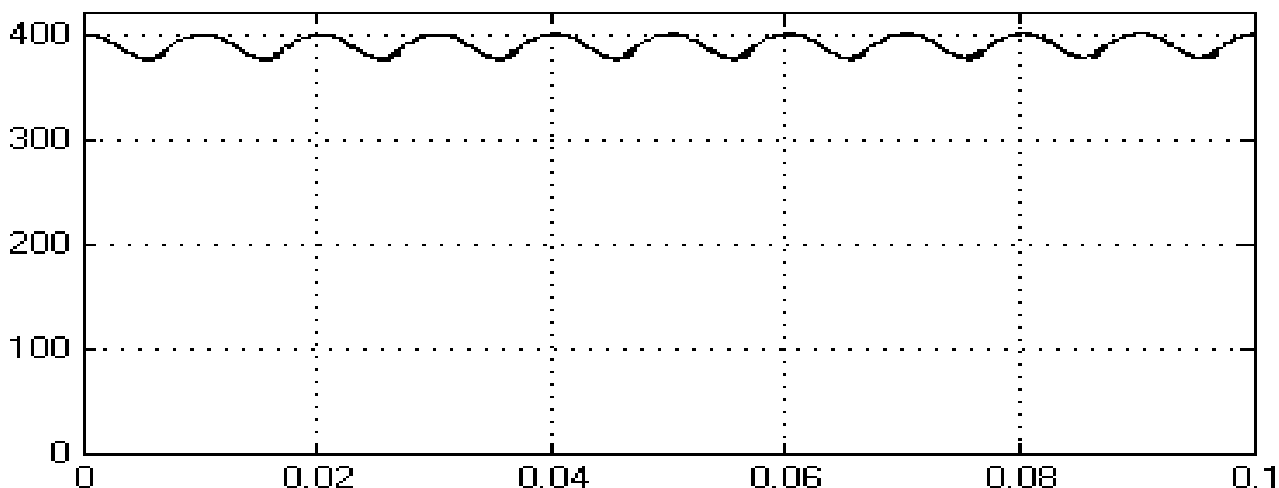


Рисунок 6.33 – Часова діаграма напруги на конденсаторі

Проведене дослідження показує, що запропонований алгоритм управління активним фільтром, заснований на застосуванні пошукової оптимізації спільно з візуальною моделлю системи електропостачання, дозволяє визначити квазіусталений режим системи і вийти на оптимальний режим повної компенсації всіх складових реактивної потужності за одночасного живлення несиметричних лінійного і нелінійного навантажень. Водночас видається можливим сформулювати цільову функцію з дискретних значень напруги на накопичувальному конденсаторі, а як змінні оптимізації використовувати амплітуду еталонного синусоїдального сигналу для запропонованої системи управління і початкове значення напруги на накопичувальному конденсаторі. Введення у вираз для цільової функції параметра стабілізації напруги на накопичувальному конденсаторі дозволяє також задати належний рівень перевищення напруги на конденсаторі над амплітудою лінійної напруги мережі, забезпечивши тим самим потрібний напрямок потоку енергії від фільтра до мережі.

Контрольні запитання до розділу 6

1. Які основні параметри характеризують лампу високого тиску?
2. Які рівняння використовуються для опису процесів у лампах високого тиску?
3. Яке рівняння застосовується під час живлення лампи через дросель?
4. З яких обчислювальних блоків складається візуальна модель лампи високого тиску?

5. Які параметри досліджуються під час роботи візуальної моделі лампи високого тиску?
6. Чим зумовлено відставання амплітуди першої гармоніки струму від напруги в системі живлення лампи високого тиску?
7. Як виглядає модель системи живлення лампи за наявності пристрою компенсації реактивної потужності?
8. Як впливає введення компенсуючого пристрою на живильний струм системи живлення лампи високого тиску?
9. Які переваги має використання тиристорних компенсаторів?
10. Які можливості надає введення керованих реакторів із зустрічно-паралельно увімкненими тиристорами?
11. Які параметри оптимізації використовуються при оптимізації режиму роботи системи з тиристорним компенсатором?
12. Які можливості надають силові активні фільтри?
13. Що уявляє собою силовий активний фільтр, що працює у складі однофазної системи електропостачання?
14. В чому полягає широтно-імпульсний метод управління інвертором?
15. Поясніть принцип управління ключами інвертора, що здійснюється за методом гістерезисної модуляції.
16. Як потрібно формулювати цільову функцію під час управління силовим активним фільтром?
17. Які змінні потрібно використовувати як параметри оптимізації під час управління силовим фільтром?
18. Яку електричну схему має силовий активний фільтр для трифазної електричної системи?
19. Які способи управління силовим активним фільтром Вам відомі?
20. У чому полягає сутність критерію балансу активних потужностей оптимізації режиму роботи системи електропостачання із застосуванням силового активного фільтра?
21. Як можна реалізувати стабілізацію напруги на накопичувальному конденсаторі силового фільтра за дискретами за допомогою пошукової оптимізації?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

Основні

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – [Введ. в Украине 01.01.2000]. – Минск: ИПК. Изд-во стандартов, 1998. – 30 с. – (Межгосударственный стандарт стран СНГ) ГОСТ 13109-97.
2. ГОСТ Р 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введен 01.06.2014. – М.: Стандартиформ, 2013. – 16 с.
3. ГОСТ Р 32145-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введен 01.01.2014.– М.: Стандартиформ, 2013. – 27 с.
4. IEEE, «IEEE C57.110 Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry- Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents», March 2008 – 37 p.
5. IEC 60050-161, ‘International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 161: Electromagnetic compatibility’, IEC publication, 09 – 1990 – 3 p.
6. IEC 868, ‘Flickermeter: Functional and design specifications’, International Standard, IEC publication, 1986 – 32 p.
7. IEC 61000-4-15, ‘Electromagnetic compatibility – Flickermeter – Functional and design specifications’, International Standard, IEC publication, 11 – 1997 – 6 p.
8. IEC 61000-4-30/2003, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. – 61 p.
9. IEEE Standard 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE, New York, NY, USA, 1993.
10. Recommendation G5/4, "Limits for Harmonics in the UK Electricity Supply System", The Electricity Council Chief Engineers Conference, United Kingdom.
11. Technical Report IEC 61000-3-6, "ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) – Part 3: Limits – Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems", International Electrotechnical Commission., October 1996.

12. European Standard EN 50160, "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", European Committee for Electrotechnical Standardization, November 1994.
13. IEEE, (1998) Recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment, IEEE std.1346
14. Electromagnetic compatibility (EMC), (2003) Part 4-30: testing and measurement techniques – power quality measurement methods. IEC 61000-4-30
15. IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, (1998) Tutorials on harmonics modeling and simulation. IEEE Power Engineering Society
16. IEEE, (1993) Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. IEEE, New York
17. ITTCC, (1963) Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electricity lines. International Communications Union, Geneva.
18. EN 50160/1999, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems.
19. IEC 61000-4-30/2003, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.
20. Жаркин А. Ф. Нормативные и технические аспекты обеспечения стандартных характеристик напряжения в системах электроснабжения Украины / А. Ф. Жаркин, В. А. Новский, С. А. Палачев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП». – 2012. – № 52 (958). – С. 76 – 83.
21. Кириленко О. В. Інтелектуальні системи керування потоками електроенергії у локальних об'єктах / О. В. Кириленко, Ю. С. Петергеря, Т. О. Терещенко і др. – Київ: Медіа ПРЕС, 2005. – 212 с.
22. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы / Под общей редакцией А. В. Кириленко. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2014. – 408 с.
23. Базюк Т. М. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими / Т. М. Базюк, І. В. Блінов, О. Ф. Буткевич та ін.; за заг. ред. акад. НАН України О. В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016.. – 400 с.
24. Сокол Е. И. Качество электрической энергии. В четырех томах. / Е. И. Сокол, Д. А. Гапон, О. Г. Гриб и др. – Харьков: Тим Паблиш Груп, 2014. Т. 1: Экономико-правовая база – 300 с.
25. Сокол Е. И. Качество электрической энергии. В четырех томах. Т.2: Контроль качества электрической энергии. / Е. И. Сокол, Д. А. Гапон,

О. Г. Гриб и др. – Харьков : Тим Паблиш Груп, 2014. Т. 2: Контроль качества электрической энергии. – 244 с.

26. Сокол Е. И. Качество электрической энергии. В четырех томах. / Е. И. Сокол, Д. А. Гапон, О. Г. Гриб и др. – Харьков: Тим Паблиш Груп, 2014. Т.3. Методы и средства повышения качества электрической энергии.– 292 с.

27. Сокол Е.И. Качество электрической энергии. В четырех томах. / Е. И. Сокол, Д. А. Гапон, О. Г. Гриб и др. – Харьков: Тим Паблиш Груп, 2014. Т.4. Определение долевого участия потребителей и поставщиков в ответственности за нарушение качества электрической энергии – 359 с.

28. Михальський В. М. Засоби підвищення якості електроенергії на вході і виході перетворювачів частоти та напруги з широтно-імпульсною модуляцією / В. М. Михальський. – К.: ІЕД НАНУ, 2013. – 340 с.

29. Пелисье Рене. Энергетические системы / Р. Пелисье – М.: Высшая школа, 1982. – 568 с.

30. Полак Э. Численные методы оптимизации: Единый подход. / Э. Полак – М.: Мир, 1974. - 376 с.

31. Аоки М. Введение в методы оптимизации. / М. Аоки – М.: Наука, 1977. – 344 с.

32. Денис Дж. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений / Дж. Денис, Р. Шнабель – М.: Мир, 1988. - 440 с.

33. Nelder J.A. A Simplex Method for Function Minimization. // J.A. Nelder, R.Mead – Computer J. – 1965. – №7. – p.308 – 313.

34. Дамбраускас А.П. Симплексный поиск./ А.П. Дамбраускас – М.: Энергия. – 1979. – 176 с.

35. Жилинскас А. Поиск оптимума./ А. Жилинскас, В. Шалтянис – М.: Наука, 1989. – 128 с.

36. Ректлейтис Г. Оптимизация в технике. / Г. Ректлейтис, А. Рейнвиндран, Київ : Рэгсдел – Т.1. – М.: Мир, 1986. -349 с.

37. Геминтерн В.И. Методы оптимального проектирования. / В.И. Геминтерн, Б.М. Каган – М.: Наука, 1980.- 160 с.

38. Черноруцкий И.Г. Оптимальный параметрический синтез: Электротехнические устройства и системы. / И.Г. Черноруцкий – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 128 с.

39. Черноруцкий И. Г. Методы оптимизации в теории управления : Учебное пособие / И. Г. Черноруцкий. — СПб.: Питер, 2004. — 256 с:

40. Батищев Д. И. Поисковые методы оптимального проектирования. / Д. И. Батищев – М.: Сов. радио, 1975. -216 с.

41. Батищев Д. И. Методы оптимального проектирования. / Д. И Батищев – М.: Радио и связь, 1984. -248 с.

42. Вермишев Ю.Х. Методы автоматического поиска решений при проектировании сложных технических систем. / Ю.Х. Вермишев – М.: Радио и связь, 1982. – 152 с.

43. Долбня В.Т. Топологический анализ и синтез электрических и электромеханических систем. / В.Т.Долбня – Харьков : НТУ «ХПИ», 2005.-356 с.

44. Малахов Ю.В. О стратегии и основных направлениях развития электроэнергетики Украины в первой половине XXI века / Энергетика и электрификация // Ю.В. Малахов, Н.Е. Шевченко, И.Е Воробьев. – 2001. – № 11.– С. 8–14.

45. Денисюк С.П. Реактивная мощность как критерий оценки потерь при передаче электроэнергии / С. П. Денисюк, Ю. А. Яценко // Силовые полупроводниковые преобразователи для энергосберегающих технологий / Киев : Инст. пробл. энергосбережения, Инст. Электродин. АН УССР. –1991.– С.173 – 183.

46. Ковалко М.П. Энергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / М. П. Ковалко, С. П. Денисюк – Київ : Українські енциклопедичні знання, 1998. – 512 с.

47. Железко Ю. С. Стратегия снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях / Ю.С. Железко // Электричество. – 1992. – № 5. – С. 6–12.

48. Железко Ю. С. Новые нормативные документы, определяющие взаимоотношения сетевых организаций и покупателей электроэнергии в части условий потребления реактивной мощности / Ю.С. Железко // Электрика: Москва. – 2008. – № 2. – С. 3–7.

Додаткові

49. Зорин В. В. Новые подходы при определении обоснованной степени компенсации реактивной мощности и оплаты за перетоки реактивной мощности / В. В. Зорин, С. В. Облакевич // Промэлектро. – 2006 . – №1.– С. 23–26.

50. Зорин В. В. Об оплате за перетоки реактивной энергии в условиях рыночных отношений / В.В. Зорин // Промэлектро. – 2004. – №4.– С. 22–23.

51. Зорин В. В. Концепция компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях / В. В. Зорин // Промэлектро.– 2005. – №3. – С. 24 – 26.

52. Праховник А. В. Энергозбереження нетрадиційний погляд та інша стратегія / А. В. Праховник // Энергетика та електрифікація.– 2008. –№4.– С.30–33

53. Кудрин Б. И. История компенсации реактивной мощности: комментарий главного редактора / Б. И. Кудрин // Москва : Электрика – 2001. – № 6. – С. 26–29.
54. Осика Л. К. Оплата за реактивную электроэнергию – важная составляющая рыночных отношений в энергетике / Л. К. Осика // Промышленная энергетика. – 2002. – №6. – С. 19–22
55. Розанов Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий. // Электротехника. 1998. – № 3. – С. 42–47.
56. Шишкин С. А. Компенсация реактивной мощности и потери электроэнергии в сельских распределительных сетях 6(10)/0,4 кВ / С. А. Шишкин // Механизация и электрификации сельского хозяйства. – 2003. – № 10. – С. 21 – 23.
57. Паули В.К. Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии / В.К. Паули, Р. А. Воротников // Энергоэксперт. – 2007. – № 2. – С. 16 – 22.
58. Arrillaga J, Power system quality assessment. / J Arrillaga, NR Watson, S Chen // – John Wiley – 2000.
59. Steinmetz C.P. Theory and calculation of electric circuits. / C.P. Steinmetz. – New York, 1917. – 361 с.
60. Fortescue C. L. Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks / C. L Fortescue // Trans. AIEE. –1918. – Vol. 37.– pp. 1027–1040.
61. Budeanu C. I. Reactive and Fictitious Powers / C. I Budeanu. // Romanian National Institute. Bucharest. – 1927. –Pub. No. 2. – pp. 35-46.
62. Frise S. Wirk - Blind-und Scheinleistung in elektnschen Stromkreisen mit nichtstinus formigen Verlauf von Strom und Spannung. / S. Frise // ETZ. – 1932. – H.25, s« 596-599; H.26, – S. 625–627.
63. Fryze S. Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current / S. Fryze // Przegląd Elektrotechniczny. – 1931. – No. 7. - Pp. 193–203.
64. Quade W. Uber Wechselstromе mit belibiger kurvenform in Dreiphasensystemen. / W. Quade - Archiv fur Elektrotechnik. – 1934. – HJ2, – s. 798–813.
65. Цицикян Г.Н. Работы Кваде и некоторые замечания по понятиям электрической мощности/ Г.Н. Цицикян //Электричество.– 2000.– №8.– С. 35–41.
66. Buchholz F. Das Begriffsystem Rechteistung, Wirkleistung, totale Blindleistung. / Buchholz F. – Munich, Germany: Selbstverlag, 1950.

67. Пухов Г.Е. Теория мощности системы периодических мгновенных фазных токов. / Г.Е. Пухов // Электричество. – 1953. – №2. – С. 56–61.
68. Новомески З. Мощность активная, реактивная, мощность искажения в электрических схемах с периодическими несинусоидальными процессами / З. Новомески // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1964. – №6. – С. 657-664.
69. Miller J. E. Reactive power controlled in electric systems / J. E. Miller. – John Willey & sons. – 1982. – 416 p.
70. Kundur. P. Power System Stability and Control / P. Kundur // EPRI, 1993. – P. 1175.
71. Lewis J. Blackburn. Symmetrical Components for Power Systems Engineering / Blackburn, J. Lewis // Electrical engineering and electronics, 1993. – P. 85.
72. Hector J. Altuve Ferrer. Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems / Hector J. Altuve Ferrer, Edmund O. Schweitzer III. 2010. – P. 359
73. Мадьяр Леон. Коэффициент мощности ($\cos \varphi$). / Леон Мадьяр. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 376 с.
74. Минин Г. П. Реактивная мощность / Г. П. Минин. – М.: Энергия, 1978. – 88 с.
75. Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических сетях / Н.А. Мельников – М.: Энергия, 1975.– 109 с.
76. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. / И. В Жежеленко. – М.: Энергия, 1977. – 128 с.
77. Жежеленко И. В. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках / И. В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – Мариуполь, ПГТУ.– 1996. – 173 с.
78. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях/ И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1986.–168 с.
79. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. / И. В Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
80. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко.–4-е изд., перераб. и доп. .– М.: Энергоатомиздат, 2005.–261 с.
81. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах/ Ю. С. Железко.– М.: Энергоиздат, 1981. –200 с.
82. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники / И. Ф. Домнин,

Г. Г. Жемеров, Е.И. Сокол і др. // Технічна електродинаміка. – Тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – Ч.1. – 2004. – С. 80–92.

83. Жемеров Г. Г. О понятиях «мгновенная активная мощность» и «мгновенная реактивная мощность» / Г. Г. Жемеров, Е. И. Сокол, Н. А. Ильина, О. В. Ильина // Технічна електродинаміка. – 2007. – Тем. вип., ч.1. – С.33–44.

84. Тугай Д. В. Методика выбора индуктивности фазных реакторов силового активного фильтра / Д. В. Тугай // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №6. – С. 31–38.

85. «Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники». / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, Е. И. Сокол і др. // Технічна електродинаміка. Темат. вип. – ч. I. – 2004. – С. 80–91.

86. Жемеров Г.Г. Энергосберегающий эффект компенсации пульсаций мгновенной активной мощности / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. – Тем. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – ч.4. – 2006. – С. 22–27.

87. Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощностей в трехфазной системе электроснабжения / Г. Г. Жемеров, И. Ф. Домнин, Д. В. Тугай и др. // Технічна електродинаміка. – 2007. – №1. – С. 52-57.

88. КПД системы электроснабжения постоянного напряжения и трехфазной симметричной системы синусоидальных напряжений / Г. Г. Жемеров, Е. И. Ковальчук, Е.И. Сокол і др. // Електротехніка і Електромеханіка. – 2010. – №3 – С. 51 –60.

89. Зиновьев Г.С. О реактивной мощности электрической цепи / Г. С. Зиновьев // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1986. – № 4. – С. 80–86.

90. Крогерис А.Ф. Мощность переменного тока / А. Ф. Крогерис, К. К.Рашенин, Є. И. Трейманис – Рига : Физ.-энерг. ин-т Латв.АН, 1993.– 294 с..

91. Кизиллов В.У. О понятии реактивная мощность. / В. У. Кизиллов, А. Д. Светельник // Энергетика и электрификация. – 2005. – №2. – С. 35 – 38.

92. Кизиллов В. У. О теории реактивной мощности / Н. Акаги, В.У. Кизиллов // Вісник ХДТУ сільського господарства ім. Петра Василенко. Електроенергетика и преобразовательная техника. – 2004. – Вип.27. – Т.1. – С. 58–61.

93. Кизиллов В. У. К вопросу о физическом смысле "реактивного тока" и "реактивной мощности"/ В.У. Кизиллов // Вестник НТУ "ХПИ".

Электроэнергетика и преобразовательная техника. – 2002. – № 9. – Т. 3. – С. 44–50.

94. Кизилов В. У. Оптимальная компенсация искажающих свойств трехфазного потребителя электроэнергии. / В. У. Кизилов // Вісник Приазовського державного технічного університету. – Вип. 15. – 2005. – С. 41–43.

95. Сиротин Ю. А. Неадекватность теории мгновенной реактивной мощности целям компенсации / Ю. А. Сиротин // Вісник НТУ «ХП». – 2006. – Вип. 28. – С. 122–131.

96. Сиротин Ю. А. Уравнение мощности и штрафные санкции за асимметричную нагрузку / Ю. А. Сиротин // Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий. Сб. тр. VI МНТК, EPQ-2008. – Мариуполь : Изд-во ПГТУ. – 2008. – С. 211–214.

97. Сиротин Ю. А. Δ -симметризатор – компенсатор Фризе / Ю. А. Сиротин // Вісник НТУ «ХП». Энергетика: надежность и энергоэффективность. – 2010. – №. 1. – С. 145–157.

98. Сиротин Ю. А. Схема симметризации Штейнметца как частный случай оптимального компенсатора Фризе / Ю. А. Сиротин // Электрика: Москва. – №1. – 2011. – С. 16–21

99. Сиротин Ю. А. Оптимальная компенсация пульсаций при несимметричном напряжении / Ю. А. Сиротин // Технічна електродинаміка. – 2013. – №3. – С. 73–80.

100. Czarnecki L. S. What is wrong with the budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned/ L. S. Czarnecki // IEEE Trans. Instr. Meas. – 1987. – IM-36. – no. 3. – pp. 834–837.

101. Czarnecki L.S. Adaptive balancing compensator / L.S. Czarnecki, S.M. Hsu, G., Chen // IEEE Trans. Pov. Del. – 1996. – vol. 10. – No. 3. – pp. 1663–1669.

102. Czarnecki L. S. On Some Misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory / L. S. Czarnecki // IEEE Trans. Power Electron. – 2004. – vol. 19. – May. – issue 4. – pp. 310–324

103. Czarnecki L. S. Instantaneous Reactive Power p-q Theory Power and Power Properties of the Three-Phase Systems / L. S. Czarnecki // IEEE Trans. Power Del. – 2006. – vol. 21. – Jan. – no. 2. – pp. 362–367.

104. Dai X. Generalized theory of instantaneous reactive quantity for multiphase power system / X. Dai, G. Liu, R. Gretsch // IEEE Trans. Power Del. – 2004. – vol. 19. – July. – no. 3. – pp. 965–972.

105. Баланс энергии в электрических цепях / [В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк и др.] – Киев: Наукова думка. – 1992. – 312 с.

106. Компенсация неактивных составляющих полной мощности в цепях несинусоидального тока и напряжения / [В.Е. Тонкаль, В.Я. Жуйков, Денисюк С.П. и др.] // Техническая электродинамика. – 1989. – №5. – 2013. – С.26–29.

107. Тропин В.В. Использование метода преобразования координат в теории компенсации реактивной мощности / В. В. Тропин // Изв. вузов. Электромеханика.– 1993.– №6.– С. 66 – 67.

108. Демирчан К.С. Реактивная мощность на случай несинусоидальных функций. Ортомощность / К. С. Демирчан // Изв. РАН. Энергетика и транспорт.– 1992.– № 1.– С. 15–27.

109. Демирчан К.С. Реактивная или обмена мощность? / К.С. Демирчан // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. - №2. – С. 66–72.

110. Демирчан К.С. Разложение мгновенной мощности на составляющие / К. С. Демирчан // Изв. РАН. Энергетика.– 1994.– №5.– С. 5–8.

111. Беркович Е.И. Реактивная мощность как информационное понятие / Е.И. Беркович // Электричество. – 1996. - №2. – С. 45–48.

112. Пухов Г. Е. Теория мощности системы периодических многофазных токов / Г. Е. Пухов // Электричество. – 1953. – № 2. – С. 56–61.

113. Воронов Р.А. Кажущаяся мощность электрической цепи / Р.А. Воронов, Г.Е. Пухов // Электричество. – 1954.–№4. – С. 81–86.

114. Лурье Л. С. Коэффициент мощности несимметричной трехфазной нагрузки / Л. С. Лурье // Электричество.–1952.–№ 3.– С. 52–58.

115. Жарков Ф.П. Об одном способе определения реактивной мощности / Ф.П. Жарков //Изв. АН СССР. Энергетика и трансп.–1984. – №2.– С.73 – 81.

116. Хусаинов Ш. Н. Мощностные характеристики несинусоидальных режимов / Ш. Н. Хусаинов // Электричество. – 2005. – № 9. – С. 63–67.

117. Цицикян Г. Н. Полная мощность трехфазной системы и стандарт IEEE 1459-2010 / Г. Н. Цицикян // Электричество. – 2012. – № 9. – С. 65 – 69.

118. Чаплыгин Е. Е. Теория мощности в силовой электронике/ Е. Е. Чаплыгин, Н. Г. Калугин. Учеб. пособие по специальности "Промышленная электроника". – М.: МЭИ (ТУ), 2006. – Режим доступа: promel2000.narod.ru/posobia/tm.doc

119. Akagi H. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three phase circuits. / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae// IPES' 83 – Int. Power Electronics Conf. – Tokyo, Japan. – 1983. – pp 1375 – 1386.

120. Akagi H. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae// IEEE Trans. Ind. Applicat. – May/June, 1984. –vol.20 – pp.625–630.

121. Kim H. S. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames. / H. S. Kim, H. Akagi // in Proc. IEEE/PEDS'99 Conf.– Hong Kong/ – July, 1999. – P. 422–427.

122. Akagi H./ The p-q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions / H. Akagi, A. Nabae // European Transactions on Electric Power.–1993–vol.3.– no.1.–P. 27–31.

123. Aredes M. Instantaneous New Algorithms for Series and Shunt Three-phase Four-wire Active Power Filter / M. Aredes, E. Watanabe // IEEE Trans. Power Del. – 1995.– vol.10. – July. – № 3. – pp. 1649–1656.

124. Akagi H. The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: A comprehensive approach / H. Akagi, S. Ogasawara, H. Kim // Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting. – 1999. – vol. 1. – pp. 431–439.

125. Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. / H. Akagi, E. Watanabe, M. Aredes. – Wiley-IEEE Press. – April. – 2007. – 379 p.

126. Милях А.Н. Принцип взаимности и обратимости явлений в электротехнике. / А.Н. Милях, А.К Шидловский. – Киев.: Наукова думка, 1967. – 316 с.

127. Милях А.Н. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных сетях / А.Н. Милях, А. К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – Киев: Наукова думка, 1973.–219 с.

128. Шидловський А.К. Симетруючі пристрої / А.К. Шидловський, О. Д. Музиченко. – Київ : Техніка, 1970. -145 с.

129. Шидловский А. К. Таблицы симметричных составляющих. / А. К. Шидловский, А. Д. Музиченко. – Київ : Наукова думка, 1976. - 201 с.

130. Шидловский А. К. Симметрирование однофазных и двухплечевых электротехнологических установок / А. К. Шидловский, Б. П. Борисов. – Киев: Наукова думка, 1977.–159 с.

131. Шидловский А. К. Анализ и синтез фазопреобразовательных цепей / А. К. Шидловский, И. В. Мостовяк, В. Г. Кузнецов. – Киев: Наукова думка, 1979. – 299 с.

132. Шидловский А.К. Симметрирующие устройства с трансформаторными фазосдвигающими элементами. / А. К. Шидловский, Г. А. Москаленко. - Киев: Наукова думка, 1981. – 202 с.

133. Шидловский А. К. Анализ режимов в трёхфазных электрических цепях с несимметричными элементами / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, В. Г. Николаенко. – Киев: ИЭД, 1983. – 232 с.

134. Шидловский А.К. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – Киев : Наукова думка, 1985. – 286 с.
135. Борисов Б. П. Электроснабжение электротехнологических установок / Б. П. Борисов, Т.Я. Вагин. – Киев : Наукова думка, 1985. – 224 с.
136. Шидловский А. К. Оптимизация несимметричных режимов систем энергоснабжения/ А. К. Шидловский, В. Г. Николаенко, В. Г. Кузнецов. – Киев: ИЭД, 1987.–176 с.
137. Шидловский А.К. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях / А. К. Шидловский, В. А. Новский, Н. Н. Каплычный. – Київ : "Наукова думка", 1989. – 312 с.
138. Шидловский А. К. Уравновешивание режимов многофазных цепей / А. К. Шидловский, А. Г. Мостовяк, А. Г. Москаленко– Киев : Наукова думка, 1990. –181 с.
139. Шидловский А. К. Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий / [А. К. Шидловский, Б. П. Борисов, Г.И. Вагин и др.] – Київ : Наук. думка, 1992. – 236 с.
140. Шидловский А. К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А. К. Шидловский, А. Ф. Жаркин. – Киев : Наукова думка, 2005. – 210 с.
141. Шидловский А. К. Регулируемые статические источники реактивной мощности / А. К. Шидловский, В. С. Федий // Электричество. – 2009. – № 1. – С. 15–20.
142. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. – К.: Наукова думка, 1992. – 240 с.
143. Кузнецов В.Г. Устройства повышения качества электрической энергии в низковольтных сетях с нулевым проводом / В.Г. Кузнецов // Электричество. – 1978. – № 10. – С. 6–10.
144. Кузнецов В. Г. Симметрирование напряжения в электрических сетях с изолированной нейтралью / В.Г. Кузнецов, В.Г. Николаенко // Электричество. – 1986. – № 11. – С. 7-12.
145. Кузнецов В. Г. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с несимметричными нагрузками / В. Г. Кузнецов // Электричество.–1983.– № 2. – С.64–67.
146. Кузнецов В. Г. Проблемы повышения качества энергии в электрических сетях и системах / В. Г. Кузнецов // Техн. Электродинамика.– 1991.–№2. – С. 84 – 92.

147. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. – К.: Наукова думка, 1992. – 240 с.
148. Кузнецов В.Г. Симметрирование режима трехфазной электрической сети с использованием метода пульсирующих мощностей /В.Г. Кузнецов, А.С. Григорьев, А.Т. Лысенко // Электричество.–1993.–№11.– С. 14–20.
149. Кузнецов В.Г. Фильтро–симметрирующие устройства для повышения качества электроэнергии в сетях / В. Г. Кузнецов, А. К. Шидловский // Электричество. – 1976.–№2.– С. 27-32
150. Гитгарц Д.А. Симметрирующие устройства для однофазных электротермических станков / Д. А. Гитгарц, Л. А. Мухин.– М.: Энергия, 1974. –119 с.
151. Гриб О.Г. Контроль и регулирование несимметричных режимов в системах : Уч. пособие / О. Г. Гриб –. – Харьков: ХНАГХ, 2004. – 180 с.
152. Минц М. Я. Комплексный метод одновременного симметрирования токов, уравнивания фазных напряжений и компенсации реактивной мощности трехфазных сетей / М. Я. Минц, В. Н. Чинков, О. Г. Гриб // Электричество.–1993.–№12. – С. 7–10.
153. Минц М. Я. Симметрирование системы токов трехфазной сети / М. Я. Минц, В. Н. Чинков, О. Г. Гриб //Энергетика. Изв. высш. учебн. зав.–1984.–№10.– с.16– 20.
154. Рожавский С. М. Потери мощности в проводах при неравномерной нагрузке фаз / С. М. Рожавский, В. П. Позняк, В. М. Зубко // Энергетика и электрификация. – 1970. - №1. – С. 24– 25.
155. Симметрирование токов и напряжений узлов электрических сетей с использованием компенсационных установок при несимметричном источнике питания / [М. И. Бурбело, А. В. Бабенко, О. М. Музык и др.] // Энергетика и электротехника. Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 1. – С.1–5.
156. Dugan R. C. Electrical Power Systems Quality, Second Edition. / R. C. Dugan. – McGraw-Hill, New York, 2002.
157. Roger C. Dugan. Electrical Power Systems Quality, Third Edition / Roger C. Dugan// McGraw-HillCompanies, Inc. – 2012. – P. 555.
158. Benysek G. Power Theories for Improved Power quality. / G. Benysek, M. Pasko – Springer-Verlag London. – 2012. – 213 p.
159. Strzelecki R. Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks. / R. Strzelecki, G. Benysek. – Springer - Verlag London Limited. – 2008. – 414 p.
160. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. / Ю. С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.

161. Маркушевич Н. С. Качество напряжения в городских электрических сетях. / Н. С. Маркушевич, Л. А. Солдаткина. – М.: Энергия, 1975. – 256 с.
162. Константинов Б. А. Компенсация реактивной мощности. / Б. А. Константинов, Г. З. Зайцев. – Л. : Энергия, 1976. – 104 с.
163. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей / О.А. Маевский – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
164. Веников В. А. Электрические сети / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков [и др.] – М.: Высшая школа, 1971. – 438 с.
165. Веников В.А. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях / В.А.Веников, Л.А.Жуков, И.И.Карташов [и др.] – М.: Энергия. – 1975. – 136 с.
166. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности / [под ред. Р. М. Матура] – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 160 с.
167. Кочкин В. И. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. / В. И. Кочкин, О. П. Нечаев. – М.: Изд-в НЦ ЭНАС. – 248 с.
168. Аввакумов В.Г. Уравновешивание электрической нагрузки в трехфазной четырехпроводной системе / Аввакумов В.Г. // Изв. Вузов. Энергетика. – 1978. – № 5. – С. 94-99
169. Мельников Н.А. Приближенное определение несимметричного режима / Н.А. Мельников, Д.В. Тимофеев // Промышленная энергетика. – 1972. – № 4. – С. 35–38.
170. Сиротин Ю. А. Неуравновешенный и несбалансированный режимы трехфазной четырехпроводной цепи / Ю. А. Сиротин // Вісник НТУ «ХП». Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів.– 2012. – №40. – С. 116–126.
171. Сиротин Ю. А. Структурное разделение процессов в трехфазной четырехпроводной цепи и компенсация тока нейтрали /Ю.А. Сиротин// Електротехніка і Електромеханіка. – № 6. – 2012. – С. 66–70.
172. Сиротин Ю. А. Неуравновешенный и несбалансированный режимы трехфазной трехпроводной системы /Ю.А. Сиротин // Наукові праці Дон. НТУ. Серія «Електротехніка та енергетика». – 2013. – №2(15). – С. 234–240.
173. Сиротин Ю. А. Расчет реактивных проводимостей компенсатора для трехпроводной сети /Ю.А. Сиротин // Електротехніка і електромеханіка.– 2014. – №1 – С.71–74.
174. Сиротин Ю. А. Энергетические режимы трехфазной трехпроводной цепи /Ю.А. Сиротин // Вісник НТУ «ХП». Энергетика: надежность и энергоэффективность.– 2013.—№. 17.– С. 129–143.

175. Троицкий А. И. Компенсация токов нулевой последовательности в сетях 0,4 кВ с несимметричными нагрузками / А. И. Троицкий, Н. В. Лисов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1997. – № 1-2. – С. 128–129.
176. Троицкий А.И. Об углах сдвига между токами прямой, обратной и нулевой последовательностей в сетях 0,4 кВ с несимметричной нагрузкой / А. И. Троицкий, В.А. Гудзовская // Изв. вузов. Электромеханика. – 1997.– № 1-2. – С. 23–28.
177. Кузнецов В.Г. Автоматическое симметрирование токов в четырехпроводных распределительных сетях / В.Г. Кузнецов, В.А. Новский. // Проблемы технической аэродинамики: Республ. межвед. сб. - Киев: Наукова думка – 1976. – № 59. – С. 20–25.
178. Куликовский А. А. Система городских распределительных сетей низкого напряжения с искусственными нейтральными точками / А.А.Куликовский // Электричество. – 1947. - №9. – С. 45-54.
179. Цицикян Г.Н. О методе преобразования для нахождения компенсирующих токов в трехфазной системе / Г.Н. Цицикян // Электричество.– 2009.–№ 5.– С.8–13.
180. Анчарова Т.В. Определение допустимой несимметрии нагрузок в системах электроснабжения / Т.В. Анчарова., М.В. Былкин, Е.Ю. Сафонова // Изв. вузов. Электромеханика. –1998.–№ 2-3. – С. 104–105.
181. Depenbrock M. Theoretical investigation of original and modified instantaneous power theory applied to four-wire systems / M. Depenbrock, V. Staudt, H. Wrede //IEEE Trans. Ind. Appl. – 2003.– July/August.– vol.39.– no.4.– pp.1160–1167
182. Домнин И.Ф., Активные и реактивные мощности в трехфазных четырехпроводных сетях с асимметричной нагрузкой / И.Ф. Домнин, Г.Г. Жемеров, О.В. Ильина // Технічна електродинаміка. Тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 4. – 2005. – С. 44–49.
183. Пентегов И.В. Связь между параметрами электромагнитных, принципиальных схем и схем замещения двухобмоточных трансформаторов / И.В. Пентегов, С.В. Рымар, И.В. Волков // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – №3. – С. 67– 79.
184. Taylor O. Transformer Principles and Applications / O. Taylor, J. Overmyer // By: In Partnership with NJATC, 2006. – P. 309.
185. Сахно Л.И. К вопросу о схеме замещения трехобмоточного трансформатора / Л.И. Сахно // Электричество. – 2003. – №8. – С. 25–33.
186. Хайнеманн Р. Визуальное моделирование электронных схем в PSPICE./ Р. Хайнеманн. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 336 с.

187. Гаврилов Л.П. Нелинейные цепи в программах схемотехнического моделирования./ Л.П. Гаврилов – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 368 с.
188. Герман-Галкин С.Г. Электрические машины / С.Г. Герман-Галкин, Г.А. Кардонов. – СПб.: КОРОНА пресс, 2003. – 256 с.
189. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. / И.В. Черных – М.: ДМК Пресс, СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
190. Ягуп В.Г. Автоматизированный расчет тиристорных схем./ Ягуп В.Г. – Харьков: Вища школа, 1986. – 160 с.
191. Копылов И.П. Электрические машины./ И. П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2004. – 607 с.
192. Наумов И.В. Практикум по электроснабжению сельского хозяйства: Учебное пособие. / И.В. Наумов, М.Р. Василевич, Г.В. Лукина. Иркутск: ИрГСХА, 2000. –106 с.
193. Наумов И.В. Несимметричная нагрузка в сети 0,38 кВ и потери мощности / И.В. Наумов, Ф.Д. Косоухов, Г.В. Лукина. // Электротехника (Объединенный научный журнал). –2002. № 2 . – С. 50–52.
194. Наумов И.В. Методы прогнозирования роста несимметричной нагрузки сельских электроприемников / И.В. Наумов, Г.В. Лукина. // Электротехника (Объединенный научный журнал). 2002. – № 2. – С. 52–55.
195. Наумов И.В. Организационно технические мероприятия в сельских распределительных сетях напряжением 0,38 кВ / И.В. Наумов, Г.В. Лукина, С.В. Сукъясов и до. // Электротехника (Объединенный научный журнал). – 2002. –№ 3. – С. 56–58.
196. Наумов И.В. Оптимизация несимметричных режимов системы сельского электроснабжения. / И.В. Наумов. – Иркутск: Изд - во «На Чехова», 2001. – 217 с.
197. Филиппов А.О. Снижение потерь электрической энергии в сельских сетях 0,38 кВ с помощью трансформаторного симметрирующего устройства. / А.О. Филиппов – Автореферат на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Санкт-Петербург- Пушкин: ЛГТУ, 2010. – 19 с.
198. Жаркин А.Ф. Особенности работы низковольтных локальных сетей в неполнофазных и аварийных режимах / [А.Ф. Жаркин, В.А. Новский, Н.Н. Каплычный и др.] – Технічна електродинаміка. -2012. - №3. – С.31-32.
199. Jou H.-L. Analysis of zig-zag Transformer applying in the three-phase four-wire distribution power system/ H.-L. Jou, J.-C. Wu, K.-D. Wu, W.-J. Chiang, and Y.-H. Chen // IEEE Trans. Power Del. – Apr. 2005.– vol. 20. – no. 2. – pt. 1. – pp. 1168–1173.

200. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
201. Справочник по электроснабжению железных дорог. Том 1. /Под ред. К.Г.Марквардта. – М.: Транспорт, 1981. – 390 с.
202. Справочник по электроснабжению железных дорог. Том 2. /Под ред. К.Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1981. – 392 с.
203. Гарро М. Электрическая тяга / М. Гарро. – М.: Гос. трансп. железнодорож. изд-во, 1959. – 387 с.
204. Закарюкин В. П. Анализ схем симметрирования на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Е. С. Иванова // Электрифікація транспорту. – 2013.– № 6. – С. 26–33.
205. Бардушко В. Д. Параметрический синтез систем параллельных емкостных компенсирующих устройств в тяговой сети в современных условиях / В. Д. Бардушко //– Электрифікація транспорту. – 2013. – № 6. – С. 8–13.
206. Хворост Н.В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития/ Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – №4. – С.104-113.
207. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах. / Р. Рюденберг –М.: Иностранная литература, 1955. -714 с..
208. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутациях электрических цепей./ Г.В. Буткевич – М.: Высшая школа, 1967. – 195 с
209. Лесков, Г.И. Электрическая сварочная дуга / Г.И. Лесков. – М: Машиностроение, 1970. – 215 с.
210. Чаплыгин Е. Е. Компенсация неактивных составляющих полной мощности дуговых сталеплавильных печей / Е. Е. Чаплыгин, О. С. Ковырзина //Электричество.–2009. –.№ 11. – С. 30–38.
211. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы./ Д. Уэймаус –М.: Энергия, 1977. – 344 с.
212. Финкельнбург В. Электрическая дуга и термическая плазма/ В. Финкельнбург, Г. Меккер –М.: ИЛ, 1961. -436 с.
213. ГОСТ 28249-93 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – Издательство стандартов, 1994. – 63 с.
214. Acha E. A Harmonic domain Computational Package for Nonlinear problems and Its Application to Electric Arcs/ E. Acha, A. Semlyen, N. Rajakovic // IEEE Transactions on Power Delivery. – vol. 5. – no. 3.– July. 1990. – pp. 1390–1397.

215. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю. Айзенберга. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 648 с.
216. Краснопольский А.Е. Пускорегулирующие аппараты для разрядных ламп. / А.Е. Краснопольский, В.Б. Соколов, А.М. Троицкий. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 207 с.
217. Афанасьева Е.И. Источники света и пускорегулирующая аппаратура. / Е.И. Афанасьева, В.М. Скобелев. – М.: Энергоатомиздан, 1986. – 272 с.
218. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. / В.Л. Грановский – М.: Гостехиздат, 1952 г. – 472 с.
219. Vasumi K. Bo H. Method of calculating of high pressure discharge lamps circuits / K. Vasumi // J. III. Eng. Inst. Jap. – 1975. – Vol. 59. №5. – P. 194–209.
220. Краснопольский А.Е. О дифференциальном уравнении газоразрядной лампы / А.Е. Краснопольский // Светотехника. – 1977. – № 12. – С. 13–15.
221. Харченко В.Ф. Модифицированная модель нестационарных режимов разрядной лампы высокого давления с индуктивным балластом. / В.Ф. Харченко, А.А. Якунин // Світлотехніка та електроенергетика. – 2012. – № 2(30). – С.4–12.
222. Розанов Ю.К. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк // Электротехника. – 1999. – № 4. – С. 28–32.
223. Жаркін А.Ф. Однофазні активні коректори коефіцієнта потужності для багатомодульних систем електроживлення [монографія] / А. Ф. Жаркін, А. Г. Пазєєв. – НАН України, Ін-т електродинаміки. – Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 2014. – 212 с.
224. Чопик В.В. Просторово-векторне керування паралельними активними фільтрами / В.В.Чопик, В.М.Михальський, С.Й.Поліщук ті інші. // Технічна електродинаміка. – 2013. - №4. – С.34–41.
225. Колб А. А. Система автоматического регулирования качества электроэнергии на основе полностью управляемых инверторов с релейно-векторным управлением / А. А. Колб // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2004. – Вип. 2/2004 (25). – С. 37–41.
226. Мустафа Г. М. Расчет мощности активного фильтросимметрирующего устройства для нормализации напряжения на шинах ПС 220 кВ Сковородино./ Г. М. Мустафа, С.И. Гусев, А.М. Ершов, И.Б. Луганская // Электрические станции. – 2005. – №3. – С. 46–53.
227. Мустафа Г.М. Активные фильтро-симметрирующие устройства для электроэнергетики. / Г.М.Мустафа, С.И.Гусев. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 114 с.

228. Akagi H. Modern active filters and traditional passive filters / H. Akagi // Bulletin of the Polish Academy of sciences, Technical sciences. – 2006. – V. 54. – P. 255 – 269.
229. Chen C.C. A novel approach to the design of a shunt active filter for an unbalanced three-phase four-wire system under nonsinusoidal conditions / C.C. Chen, Y.Y. Hsu // IEEE Trans. on Power Del.– 2000. – vol.15. – Oct. – no.4. – pp. 1258–1265.
230. Cristaldi L. Current decomposition in sym–metrical, unbalanced three-phase systems under nonsinusoidal conditions/ L. Cristaldi, A. Ferrero, G. Superti-Furga // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1993. – vol. 43.– Jun.– pp. 568–577.
231. Agrawal A.. Comparison of Various Configurations of Hybrid Active Filter With Three Different Control Strategies / A. Agrawal // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2014. – V. 3. – Issue 5. – P. 1672 –1678.
232. Dell’Aquila A. A current control for three-phase four-wire shunt active filters. /A. Dell’Aquila, A. Lecci// Automatika. –2003. – V. 44.– N 3-4. – P. 129–135.
233. Kale Murat An adaptive band current controller for shunt active power filter / Murat Kale, Engin Ozdemir// Electric Power Systems Research. – 2005 – N. 73. – P. 113 – 119.
234. Yiauw K. H. A Novel Three-Phase Power Filter / K.H. Yiauw, M.S Khanniche// Power Engineering. – 2001 – P.77 – 84.
235. Srinivasulu R. The Source Current Detection Technique Used To Implement The Shunt Active Power Filter / R. Srinivasulu, A. Kakarapalli // International Journal of Engineering Research & Technology. – Sept.. – 2012– Vol.1 – Issue 7.
236. Sozański K. Digital Control Circuit for Active Power Filter with Modified Instantaneous Reactive Power Control Algorithm / K. Sozański, R. Strzelecki, A. Kempski // 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference - PESC ‘02/ –Cairns, Australia – 2002.
237. Rajashekar1 B. Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with a New Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes Under Non-Equal Dc Link Voltages with Power Quality Enhancement. / B.Rajashekar1, T.Praveen Kumar, R.Ramesh. // IJIRSET. – Vol. 3. – Issue 9. – September, 2014. – P. 15857 – 15863.
238. Zahiraa. R. A Technical Survey on Control Strategies of Active Filter for Harmonic Suppression. / R. Zahiraa, A. Peer Fathimab. // Procedia Engineering 30. – 2012. – P. 686 – 693.
239. Rashid Muhammad H. Power Electronics Handbook. / H. Rashid Muhammad – Academic Press. – 2001. – 895 p.
240. Mircea E. Electric Power Systems: Electric Networks. / E. Mircea. – Academia Romana, Bucharest, 2005.

241. Machowski J. Power system dynamics and stability./ J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby. – John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 1997.
242. Helmut Spat. A general purpose definition of active current and non-active power based on German./ Spat Helmut. – Standart DIN 40110.
243. German Standart (2002) AC Quantities DIN 40110, part 2. Multiconductor circuits. – November 2002 (in German).
244. Peng F.Z. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems. / F.Z.Peng, J.S.Lai// IEEE Trans. Instrum. Meas. –1996.– – vol.45. no 1. – pp. 293–297.
245. Peng F. Z. Harmonics and reactive power compensation based on the Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems/ Z.F. Peng, G.W. Ott, D.J. Adams//.IEEE Trans. Power Electronics. – 1998. – vol.13. – no 6. – pp. 1174–1181.
246. Kim H.S. Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory./ H.S. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, L. Choi// IEEE Trans. Power Electronics./ – 2002. – vol. 17. – no 5. – pp. 701–710.
247. Rolf Grunbaum. SVC Light – a powerful new tool for power quality improvement. / Grunbaum Rolf, Johansson Tomas. – ABB Review 6/98.
248. Marquardt Rainer (DE) – Current rectification circuit for voltage source inverters with separate energy stores replaces phase blocks with energy storing capacitors./ Rainer Marquardt. – Publication number DE10103031, 2002- 07-25.
249. Lesnicar A. An Innovative Modular Multilevel Converter Topology Suitable for a Wide Power Range./ A. Lesnicar, R. Marquardt// IEEE PowerTech Conference, Bologna, Italy. – 2003. –June 23–26.
250. J. Lewis Blackburn. Symmetrical Components for Power Systems Engineering / Blackburn, J. Lewis// Electrical engineering and electronics, 1993. – P. 85.
251. Hector J. Altuve Ferrer. Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems / Hector J. Altuve Ferrer, Edmund O. Schweitzer III, 2010. – P. 359.
252. Сендерович Г. А. Анализ влияния потребителей на несимметрию по обратной последовательности в точке общего присоединения / Г. А. Сендерович // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 1/2 (13). – С. 89–94.
253. Сендерович Г. А. Актуальность определения ответственности за нарушение качества электроэнергии по показателям колебаний напряжения/ Г. А. Сендерович, А. В. Дяченко. // Електротехніка і Електромеханіка. - 2016. - №2. –С. 54-60.

254. Троицкий А.И. Основные принципы внутреннего симметрирования групповой нагрузки / А. И. Троицкий // Изв. вузов. Энергетика. –1988. – № 8. – С. 47–50.

255. Дерзкий В.Г., Расчет платы за реактивную мощность / В.Г.Дерзкий, В.Ф. Скиба // Энергетика та електрифікація. – 2010. – №2. – С. 53–57.

256. Саенко Ю. Л. Численный анализ математических моделей распределения фактических вкладов в несимметрию и отклонение напряжений в точках общего присоединения систем электроснабжения / Ю. Л. Саенко, Д. Н. Калюжный // Електротехніка і Електромеханіка. - 2016. - №2. –С. 47-53.

257. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.

258. Гурский Д. А. Вычисления в MathCAD / Д. А.Гурский. – Минск : Новое знание, 2003. – 814 с.

ДОДАТОК А

Визначення параметрів моделей індуктивно-зв'язаних систем та трансформаторів

Використовуємо традиційний набір паспортних даних трансформатора:
 S_H – номінальна повна потужність;

U_{1H}, U_{2H} – діючі значення первинної і вторинні номінальних лінійних напруг;

P_K, P_X – активні втрати в дослідах короткого замикання і холостого ходу відповідно;

e_K, i_X – напруга короткого замикання і струм холостого ходу, що визначаються в частках від номінальних значень первинної напруги та струму і задаються зазвичай у відсотках;

m – кількість фаз трансформатора;

f – частота живильної напруги.

Для Т-подібної схеми заміщення трансформатора з послідовною віткою намагнічування (рис. А.1) розрахунок параметрів здійснюємо в такому порядку:

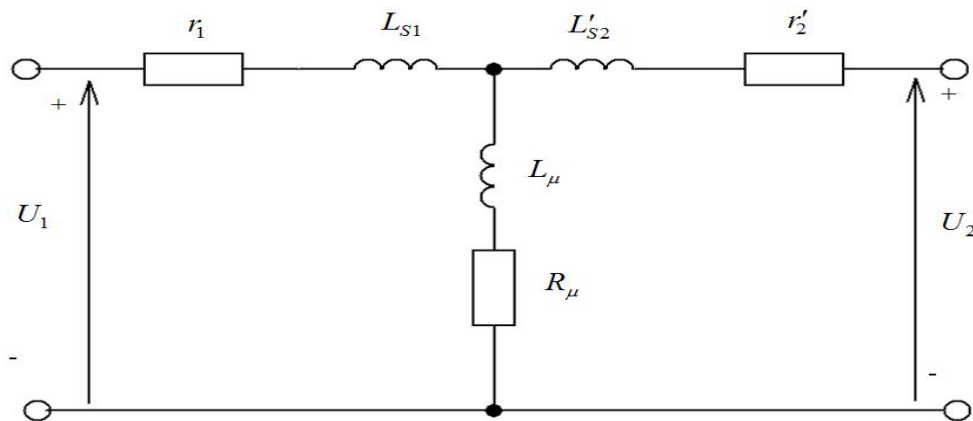


Рисунок А.1 – Еквівалентна Т-подібна схема заміщення однієї фази трансформатора з послідовною намагнічувальною віткою

1. Визначаємо номінальну повну потужність, що припадає на одну фазу:

$$S_{H1} = \frac{S_H}{m}.$$

2. Обчислюємо номінальне діюче значення фазної напруги на первинній стороні

$$U_\phi = \frac{U_{1H}}{\sqrt{m}}.$$

3. Діюче значення номінального первинного струму

$$I_{1H} = \frac{S_{1H}}{U_{\phi}}.$$

4. Діюче значення напруги короткого замикання на одній фазі: $U_{K3} = e_K U_{\phi}$.

5. У дослідженні короткого замикання в первинній обмотці протікає номінальний струм, і повний опір короткого замикання

$$z_{K3} = \frac{U_{K3}}{I_{1H}}.$$

Разом із тим через вітку намагнічування протікає струм, який в $\frac{1}{i_x e_K}$ разів менший номінального, і тому впливом зазначеної вітки нехтуємо.

6. Активний опір короткого замикання (далі – к. з.), що характеризує омичний опір проводів обмоток, визначається по тепловим втратам к. з. Потужність втрат к. з. на одну фазу

$$P_{K1} = \frac{P_K}{m},$$

і активний опір к. з.:

$$r_{K3} = \frac{P_{K1}}{I_{1H}^2} = \frac{P_K}{m I_{1H}^2}.$$

7. Індуктивний опір к. з. визначається за прямокутним трикутником опорів:

$$x_{K3} = \sqrt{z_{K3}^2 - r_{K3}^2}.$$

8. Активний і індуктивний опори розподіляються порівну між первинною і вторинною сторонами з урахуванням приведення вторинної сторони до первинної. $r_1 = r'_2 = 0,5 r_{K3}$; $x_{S1} = x'_{S2} = 0,5 x_{K3}$.

Звідси визначаємо індуктивності розсіювання первинної та вторинної обмоток:

$$L_{S1} = L'_{S2} = \frac{x_{S1}}{2\pi f} = \frac{0,5 x_{K3}}{2\pi f}.$$

Дійсне значення індуктивності розсіювання вторинної обмотки

$$L_{S2} = L'_{S2} \cdot n_{21}^2 = \left(\frac{U_{2H}}{U_{1H}}\right)^2 L'_{S2}$$

і її активний опір

$$r_2 = r'_2 \cdot n_{21}^2 = r_1 \cdot \left(\frac{U_{2H}}{U_{1H}}\right)^2.$$

9. Струм холостого ходу (далі – х. х.) знайдемо як відповідну частку повного струму: $I_{XX} = i_x \cdot I_{1H}$

10. Струм I_{xx} протікає в первинній обмотці при розімкнутій вторинній і при подачі від джерела номінальної первинної напруги. Опір х. х.:

$$z_{XX} = \frac{U_\phi}{I_{XX}} = \frac{U_{1H}^2}{i_x S_H}.$$

11. Активна частина r_{XX} повного опору x . x . визначається тепловими втратами при x . x . Втрати x . x . на одну фазу

$$P_{x1} = \frac{P_x}{m}.$$

Оскільки протікає струм I_{XX} , то активна складова опору x . x .

$$r_{XX} = \frac{P_{x1}}{I_{XX}^2} = \frac{P_x U_{1H}^2}{i_x^2 S_H^2}.$$

12. Реактивна складова повного опору x . x . обчислюється за трикутником опорів: $x_{XX} = \sqrt{z_{XX}^2 - r_{XX}^2}$

13. Індуктивність первинної обмотки

$$L_1 = \frac{x_{XX}}{2\pi f}.$$

14. Оскільки повний опір x містить вітку первинної обмотки r_1 -LS1 і вітку намагнічування L_μ R_μ , можна розрахувати параметри вітки намагнічування: $R_\mu = r_{xx} - r_1$; $L_\mu = L_1 - L_{S1}$

На цьому типовий розрахунок параметрів еквівалентної схеми заміщення трансформатора вважається закінченим [8]. Однак ця схема заміщення не цілком придатна для використання в моделюванні. Для переходу до еквівалентних параметрів індуктивно зв'язаних котушок індуктивності послідовна вітка намагнічування не раціональна. Дійсно, якщо індуктивності L_1 і L_2 з цієї схеми визначаються, а r_1 і r_2 можуть бути приєднані послідовно відносно цих індуктивностей як опори проводів котушок, то залишається невизначеним коефіцієнт зв'язку k_{12} , що характеризує взаємну індуктивність $\mu_{12} = k_{12} \sqrt{L_1 L_2}$. Триполюсник, складений з L_{S1} , L'_{S2} і L_m , не дає повного уявлення про коефіцієнт зв'язку, оскільки після його перетворення в систему двох магнітно-зв'язаних котушок індуктивностей залишається не зрозумілим, куди потрібно вмикати опір R_m активних втрат на x . x . Тому доцільно перейти до паралельної вітки намагнічування $R_m - L_m$, де обидва елементи R_m і L_m приєднані до однієї пари вузлів. На користь цього говорить і еквівалентна схема трансформатора, яка використовується в системі SimPowerSystem [188, 189] (рис. А.2).

Для обчислення параметрів паралельного кола намагнічування $L_m - R_m$ скористаємося рівнянням, у якому провідності паралельної і послідовної віток однакові:

$$\frac{1}{R_m} + \frac{1}{jx_m} = \frac{1}{R_\mu + jx_\mu}.$$

Вирішуючи це рівняння щодо R_m і x_m , отримаємо:

$$R_m = \frac{R_\mu^2 + x_\mu^2}{R_\mu} = \frac{R_\mu^2 + (\omega L_\mu)^2}{R_\mu};$$

$$x_m = \frac{R_\mu^2 + x_\mu^2}{x_\mu} = \frac{R_\mu^2 + (\omega L_\mu)^2}{\omega L_\mu} = \omega L_m,$$

звідки:

$$L_m = \frac{x_m}{\omega} = \frac{R_\mu^2 + (\omega L_\mu)^2}{\omega^2 L_\mu}.$$

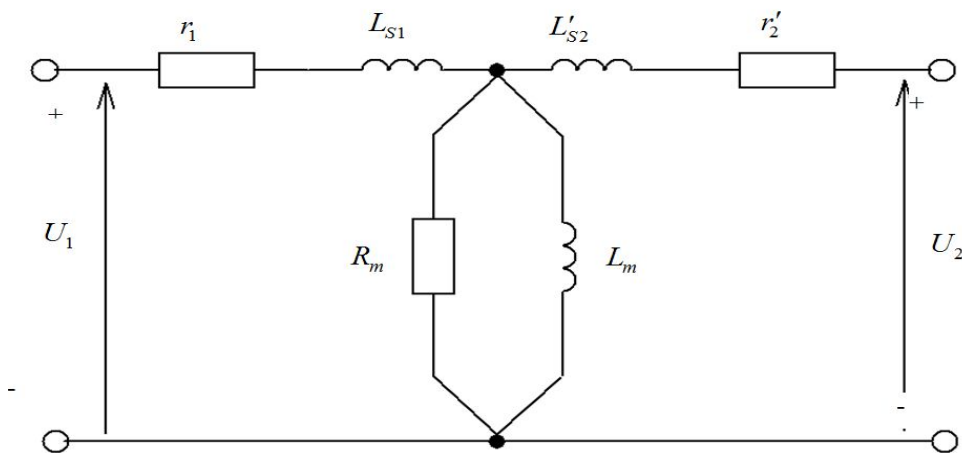


Рисунок А.2 – Еквівалентна Т-подібна заступна схема однієї фази трансформатора з паралельною віткою намагнічування

Позначимо $R_0 = R_m + r_1$ і винесемо цей резистор на входні затискачі (рис. А.3).

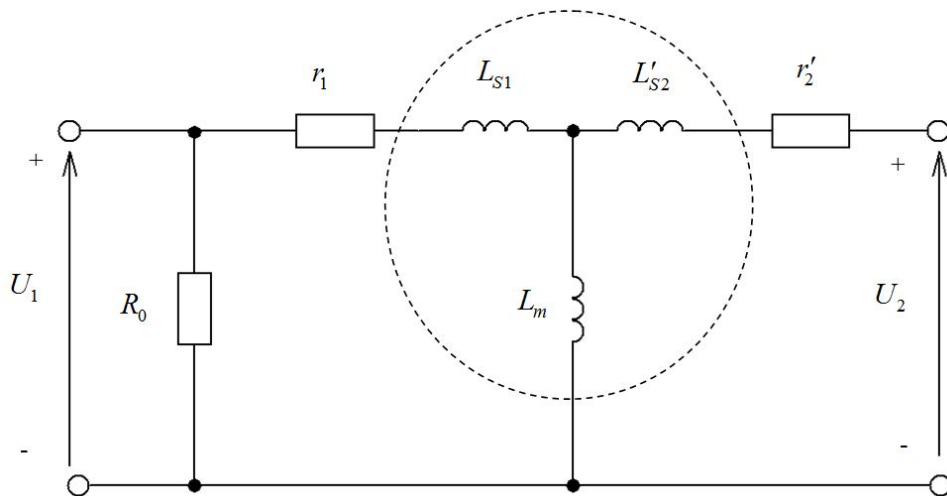


Рисунок А.3 – Заступна схема трансформатора з виділеним індуктивним триполюсником

Триполюсник, що складається з індуктивностей (на рис. А.3 окреслено пунктирною лінією), визначає параметри взаємно зв'язаних котушок індуктивностей:

$$L_1 = L_{S1} + L_m;$$

$$L_2 = n_{21}^2 L_1 = \left(\frac{U_{2H}}{U_{1H}}\right)^2 L_1.$$

Коефіцієнт зв'язку котушок індуктивностей:

$$k_{12} = \frac{L_m}{L_1} = \frac{L_m}{L_m + L_{S1}}.$$

Взаємна індуктивність:

$$M = k_{12} \sqrt{L_1 L_2} = k_{12} L_1 \frac{U_{2H}}{U_{1H}}.$$

Запропонована методика реалізована в системі MathCAD, робочий лист з відповідною програмою наведено на рисунку А.4.

ПОСЛІДОВНИЙ РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ ДЛЯ СИСТЕМ МОДЕЛЮВАННЯ

ВИХІДНІ ДАНІ:

$$S_n := 25000 \quad U_{1n} := 10000 \quad U_{2n} := 400 \quad m := 3$$

$$f := 50 \quad e_k := 4.7 \quad i_x := 3.2 \quad P_k := 0690 \quad P_x := 0125 \quad w := 2 \cdot \pi \cdot f = 314.159$$

БЛОК ОБЧИСЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРА:

Потужність, що припадає на одну фазу:

$$S_1 := \frac{S_n}{m} = 8.333 \times 10^3$$

Напруга на первинній обвитці

$$U_{1f} := \frac{U_{1n}}{\sqrt{m}} = 5.774 \times 10^3$$

Номинальний струм у первинній обмотці: $I_{1n} := \frac{S_1}{U_{1f}} = 1.443$

Напруга короткого замикання: $U_{kf} := \frac{U_{1f} \cdot e_k}{100} = 271.355$

Повний опір короткого замикання: $Z_k := \frac{U_{kf}}{I_{1n}} = 188$

Активна складова опору к. з $R_k := \frac{P_k}{m \cdot I_{1n}^2} = 110.4$

Реактивна складова опору к. з: $X_k := \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 152.17$

Активний опір первинної обмотки в Т-подібній схемі заміщення:

$$R_1 := \frac{R_k}{2} = 55.2$$

Рисунок А.4 - Програма в системі MathCAD для розрахунку параметрів моделі трансформатора

Індуктивний опір розсіювання первинної обмотки в Т-подібній схемі заміщення:

$$X_{1s} := \frac{X_k}{2} = 76.085$$

Індуктивність розсіювання первинної обмотки в Т-подібній схемі заміщення:

$$L_{1s} := \frac{X_{1s}}{w} = 0.242$$

Струм к.к. в первинній обмотці: $I_x := \frac{i_x \cdot I_{1n}}{100} = 0.04619$

Повний опір к.к.: $Z_x := \frac{U_{1f}}{I_x} = 1.25 \times 10^5$

Активний опір холостого ходу:

$$R_x := \frac{P_x \cdot 10000}{3 \cdot (i_x \cdot I_{1n})^2} = 1.953 \times 10^4$$

Індуктивний опір холостого ходу:

$$X_x := \sqrt{Z_x \cdot Z_x - R_x \cdot R_x} = 1.235 \times 10^5$$

Активний опір, що відображає втрати в сталі осердя:

$$R_\mu := R_x - R_1 = 1.948 \times 10^4$$

Індуктивний опір послідовної намагнічувальної вітки:

$$X_\mu := X_x - X_{1s} = 1.234 \times 10^5$$

Параметри паралельної намагнічувальної вітки:

$$R_m := R_\mu + \frac{X_\mu^2}{R_\mu} = 8.012 \times 10^5 \quad X_m := X_\mu + \frac{R_\mu^2}{X_\mu} = 1.265 \times 10^5$$

Індуктивність розсіювання первинної обмотки:

$$L_{1s} := \frac{X_{1s}}{w} = 0.242$$

Індуктивність вітки намагнічування: $L_m := \frac{X_m}{w} = 402.543$

Індуктивність котушки первинної обмотки:

$$L_1 := L_m + L_{1s} = 402.786$$

Індуктивність котушки вторинної обмотки:

$$L_2 := \frac{U_{2n}^2 \cdot L_1}{U_{1n}^2} = 0.644$$

Коефіцієнт зв'язку котушок трансформатора:

$$k := \frac{X_m}{X_m + X_{1s}} = 0.999398$$

Взаємна індуктивність котушок:

$$M := k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} = 16.102$$

Опір резистора, що шунтує обмотку і враховує втрати в сталі трансформатора:

$$R_o := R_m + R_1 = 8.012 \times 10^5$$

Продовження рисунка А.4

Параметри моделі для Simulink:

$$S_n = 2.5 \times 10^4 \quad U_{1n} = 1 \times 10^4 \quad U_{2n} = 400 \quad f = 50$$

$$L_{1s} = 0.242 \quad L_m = 402.54 \quad R_1 = 55.2 \quad R_m = 8.012 \times 10^5$$

Параметри взаємоз'єднаних котушок індуктивності, що представляють трансформатор:

$$L_1 = 402.786 \quad L_2 = 0.644 \quad k = 0.999399 \quad M = 16.102 \quad R_o = 8.012 \times 10^5$$

Закінчення рисунка А.4

У програмі розглядається контрольний приклад для трифазного трансформатора типу ТМ-25/10 з такими паспортними даними: $S_H = 25 \text{ кВА}$; $f_H = 50 \text{ Гц}$; $U_{1H} = 10 \text{ кВ}$; $U_{2H} = 400 \text{ В}$; $e_K = 4,7 \%$; $i_x = 3,2 \%$; $P_K = 690 \text{ Вт}$; $P_x = 125 \text{ Вт}$. Обидві обмотки з'єднані в зірку. Отримані розрахункові дані для Т-подібної схеми заміщення такі:

$$R_1 = 55,2 \text{ Ом}; L_{S1} = 0,242187 \text{ Гн}; R_2 = 0,08832 \text{ Ом}; L_{S2} = 3,875 \times 10^{-4} \text{ Гн}; \\ R_\mu = 19480 \text{ Ом}; L_\mu = 388,338 \text{ Гн}; R_m = 800000 \text{ Ом}; L_m = 402,592978 \text{ Гн}.$$

Параметри трифазного трансформатора для моделі SimPowerSystem:
 $S_H = 25000 \text{ ВА}$; $f = 50 \text{ Гц}$;

- перша обмотка: $V_{1H} = 10000 \text{ В}$; $R_1 = 55,2 \text{ Ом}$; $L_1 = 0,242187 \text{ Гн}$;
- друга обмотка: $V_{2H} = 400 \text{ В}$; $R_2 = 0,08832 \text{ Ом}$; $L_2 = 0,0003875 \text{ Гн}$;
- вітка намагнічування: $R_m = 801200 \text{ Ом}$; $L_m = 402,592978 \text{ Гн}$.

Параметри для магнітно-зв'язаних котушок індуктивності:

- первинна котушка: $R_1 = 55,2 \text{ Ом}$; $L_1 = 402,835 \text{ Гн}$;
- вторинна котушка: $R_2 = 0,08832 \text{ Ом}$; $L_2 = 0,644536 \text{ Гн}$;
- коефіцієнт зв'язку: $K_{12} = 0,99939879$;
- взаємна індуктивність: $M = 16,103719 \text{ Гн}$.

Опір резистора, що шунтує первинну котушку і враховує втрати на перемагнічування сталі буде таким: $R_0 = 801200 \text{ Ом}$.

Для перевірки точності представлення еквівалентних схем заміщення в системі SimPowerSystems (далі SPS) складена динамічна модель, зображена на рисунку А.5.

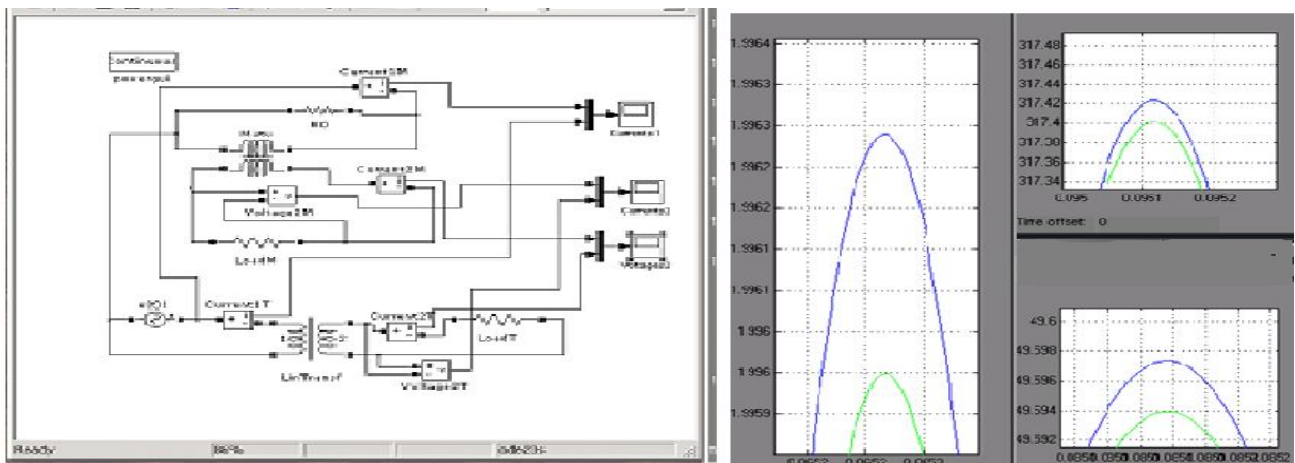


Рисунок А.5 – SPS-модель для перевірки точності запропонованої методики

На рисунку А.5 подані однофазні варіанти живлення однакових активних навантажень, включених на вторинних сторонах, при живленні первинних обмоток від одного джерела синусоїдальної напруги. У верхній частині використана SPS-модель двох взаємно зв'язаних котушок індуктивностей, а в нижній – SPS-модель трансформатора. Результати роботи обох моделей в процесі моделювання протягом декількох періодів напруги живлення виводяться на три віртуальні осцилографи. Разом із тим вимірюються первинний і вторинний струми, а також напруга на навантаженні. Одноименні електричні величини за допомогою Simulink-мультиплексорів подаються на загальний віртуальний осцилограф і будуються в загальних осях. Кожна з контрольованих пар зазначених величин практично зливається одна з одною. Лише у разі значного збільшення графіків можна розрізнити незначну розбіжність графіків.

На рисунку А.5 в правій частині наведені фрагменти часових діаграм віртуальних осцилографів у разі їхнього значного збільшення. Під час розгляду цих діаграм зрозуміло, що їхня розбіжність обумовлена лише п'ятою значущою цифрою. Значення амплітуд первинних струмів дорівнюють 1,996 0 і 1,996 3 А, для вторинних струмів – 49,594 і 49,597 А, для вторинних напруг – 317,40 і 317,42 В. Це свідчить про високу точність запропонованої методики визначення параметрів моделей трансформаторів.

Навчальне видання

**ЯГУП Валерій Григорович,
ЯГУП Катерина Валеріївна**

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ СИСТЕМ
ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Відповідальний за випуск *П. П. Рожков*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *К. В. Ягуп*

Дизайн обкладинки *Т. А. Лазуренко*

Підп. до друку 07.06.2019. Формат 60×84/16
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 10,5
Тираж 50 пр. Зам. № 10140

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.