

## ПОШУКОВА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПОВНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

В.Г. Ягуп<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, К.В. Ягуп<sup>2\*\*</sup>, докт. техн. наук

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна,  
e-mail: [yagup.walery@gmail.com](mailto:yagup.walery@gmail.com).

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна.

*Статтю присвячено дослідженню режимів компенсації реактивної потужності в замкненій електричній мережі, яка суттєво навантажена активно-індуктивними елементами у вузлах споживання електроенергії. Вихідний режим без компенсації співставлено з режимами часткової та повної компенсації реактивної потужності за допомогою батарей конденсаторів. Режим повної компенсації повністю позбавляє джерело живлення від реактивної потужності. Показано як визначити цей режим за допомогою пошукової оптимізації із застосуванням візуальної моделі електричної мережі. Наведено кількісні показники режимів, що співставленні, які переконливо демонструють переваги повної компенсації реактивної потужності в електричній мережі. Бібл. 15, рис. 9, табл. 1.*

**Ключові слова:** електрична мережа, реактивна потужність, повна компенсація, пошукова оптимізація, коефіцієнт потужності, коефіцієнт корисної дії.

**Вступ.** В умовах воєнного стану, викликаного військовою агресією РФ по відношенню до нашої країни, спостерігаються руйнівні бомбардування критичної інфраструктури України. На сьогоднішній день значна частка генерації електроенергії і мереж електропостачання України виведено з ладу. Це викликає перевантаження як генераторів на електростанціях, так і самих електричних мереж. Компенсація реактивної потужності є важливим резервом підвищення енергоефективності електричних систем [1]. Для цієї мети використовуються як правило батареї так званих косинусних конденсаторів [2]. Ці батареї підключаються до вузлів живлення окремих навантажень або цілих груп навантажень [3, 4]. Призначення цих конденсаторів полягає в тому, щоб повністю або частково компенсувати реактивну потужність навантажень, які вони шунтують [5–7]. Таку компенсацію прийнято називати поперечною [8]. Таким чином вдається компенсувати лише ту реактивну потужність, яка обумовлена навантаженнями. Однак за такого підходу залишаються не скомпенсовані складові реактивної потужності, зумовлені реактивними опорами ліній електропередачі. За системного підходу необхідно прагнути до того, щоб повністю компенсувати реактивну потужність у системі в цілому [1, 2]. Задля компенсації реактивної потужності в лініях електропередачі застосовують послідовне включення конденсаторів [9–11]. Таку компенсацію прийнято називати повздовжньою, і зазвичай вона застосовується для компенсації реактивної потужності в лініях електропередач високої напруги та великої протяжності [11]. Саме у розподільчих мережах низької напруги компенсації реактивної потужності не приділяється належної уваги. У той же час слід зауважити, що протяжність низьковольтних розподільчих мереж може не поступатися протяжності високовольтних мереж [2, 6, 8]. І тому втрати від реактивної потужності у розподільчих мережах можуть сягати значних величин. Водночас у ряді робіт авторів було показано, що засіб поперечної компенсації може використовуватися не тільки для компенсації реактивної потужності навантажень, але й для компенсації реактивної потужності лінії електропередачі [12, 13]. В такий спосіб може досягатися режим повної компенсації реактивної потужності в системі. Цей режим характеризується відсутністю реактивної потужності, пов'язаної з джерелом живлення. Для цього необхідно, щоб струм, споживаний від джерела живлення, мав синусоїдальну форму і збігався по фазі з напругою, що генерується [13].

Під час дослідження реактивної потужності в електричних мережах навантаження вважаються лінійними, і вся система загалом вважається лінійною. Під час дослідження та проектування електроенергетичних систем трифазної системи розглядається зазвичай як однофазні і при цьому досліджуються режими, що встановилися [1, 2, 7]. Навантаження вважаються активно-індуктивними із

заданими коефіцієнтами потужності. Завдання підвищення коефіцієнта потужності розглядаються як завдання розміщення конденсаторів, що компенсують реактивну потужність. При цьому повинні бути визначені ємності батарей, що компенсують, і місця їхнього розміщення в мережі [7]. За системному підходу це завдання може розглядатися як оптимізаційна задача, яка вирішується методом пошукової оптимізації [12-14]. Змінними оптимізації можуть бути ємності батареї конденсаторів. Критерієм оптимізації може бути реактивна потужність джерела живлення, що зведена до нуля в процесі пошукової оптимізації.

**Метою роботи** є дослідження та оптимізація режимів електричної мережі з детермінованими параметрами та навантажень задля досягнення повної компенсації реактивної потужності в системі під час розміщення батарей конденсаторів у вузлах навантажень.

**Основний зміст статті.** Будемо розглядати замкнену електричну систему, структура якої зрозуміла з вигляду моделі, що зображена на рис. 1. Модель створено в підсистемі SimPowerSystem комп'ютерної системи MATLAB.

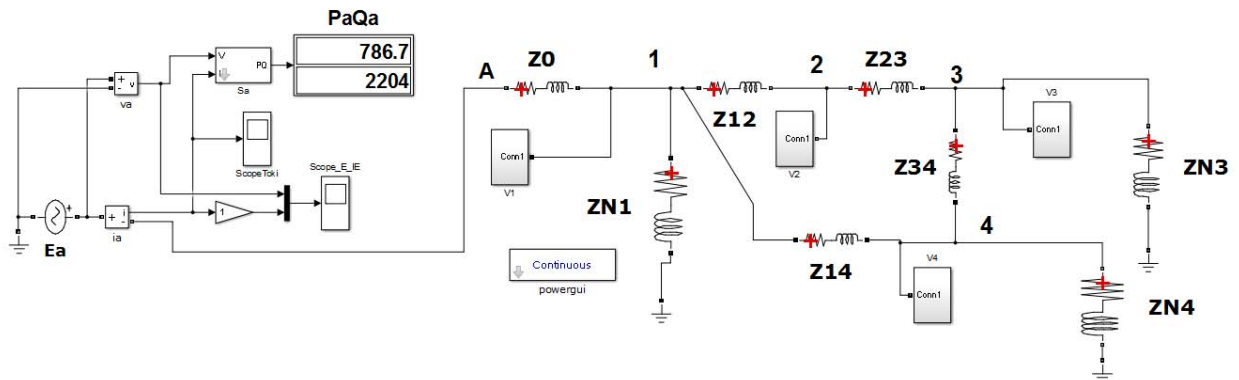


Рис. 1

Джерело живлення відображається джерелом синусоїдальної напруги  $E_a$  з нормованою амплітудою 100 В, нульовим фазовим зсувом і частотою  $f=50$  Гц, що відповідає круговій частоті  $\omega=2\pi f$  сек<sup>-1</sup>. Джерело живлення приєднане до мережі у вузлі А, а саму мережу створено активно-індуктивними елементами  $Z_0, Z_{12}, Z_{23}, Z_{34}, Z_{14}$ , комплексні опори кожного із них дорівнюють величині  $(0,3+j\omega 0,003)$  Ом. Навантаженнями мережі слугують активно-індуктивні елементи, увімкнені між вузлами 1, 3, 4 і загальним заземленим вузлом та мають задані комплексні опори:  $Z_{n1}=(0,7+j\omega 0,005)$  Ом,  $Z_{n3}=(1+j\omega 0,01)$  Ом,  $Z_{n4}=(2+j\omega 0,04)$  Ом. Напруга джерела і споживаний від нього струм вимірюються віртуальними приладами. Показники цих приладів дають змогу обчислити активну та реактивну потужності, пов'язані з джерелом, за допомогою віртуального приладу *PaQa*. Часові діаграми напруги і струму джерела спостерігаються за допомогою віртуальних осцилографів. Чотири підсистеми *Conn1*, що приєднані до вузлів мережі, призначені для визначення амплітуд напруг в цих вузлах, завдяки чому можна вирахувати потужності навантаження і самої мережі. Модель функціонує в режимі *Continuous*, що задається віртуальним пристроєм *powergui*. Запуск моделі здійснюється протягом інтервалу модельного часу довжиною в період живильної напруги. Крок інтегрування задано рівним 0,0001с, а метод чисельного інтегрування рівнянь стану – Розенброка, який передбачає інтегрування жорстких систем диференціальних рівнянь зі змінним кроком інтегрування.

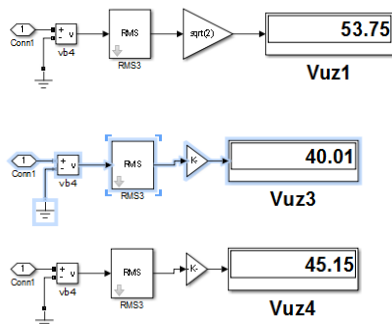


Рис. 2

**Дослідження некомпенсованого режиму.** Під час дослідження некомпенсованого режиму косинусні конденсатори є відсутніми, як це і показано на рис. 1. Прогін моделі призводить до результатів, що відображено на рис. 2. На ньому показано вигляд віртуальних вимірювачів амплітуд напруг тих вузлів, з яких постачаються навантаження мережі. Як видно із структури підсистеми, миттєві значення напруги вузла відносно загального заземленого вузла вимірюються віртуальними вольтметрами і далі обробляються блоками RMS. Отримане діюче значення напруги далі за допомогою блоку підсилення з коефіцієнтом  $\sqrt{2}$  перетворюється в амплітудне значення напруги відповідного вузла. Таким чином, згідно отриманих результатів маємо ампліту-

ди напруг вузлів з навантаженнями:  $Um1=53,75\text{В}$ ;  $Um3=40,01\text{В}$ ;  $Um4=45,15\text{В}$ .

Маючи наведені значення, можна вираховувати повні потужності, що споживані кожним навантаженням. Для цього достатньо поділити квадрат амплітуди відповідної вузлової напруги на подвійний спряжений комплекс опору навантаження. Для навантаження  $Zn1$  повна потужність визначається виразом

$$S_{n1} = \frac{53,75^2}{2 \cdot (0,7 - j \cdot \omega \cdot 0,005)} = 341.912 + j \cdot 767.249, \quad (1)$$

$$S_{n3} = \frac{40,01^2}{2 \cdot (1,0 - j \cdot \omega \cdot 0,01)} = 73.637 + j \cdot 231.336, \quad (2)$$

$$S_{n4} = \frac{45,15^2}{2 \cdot (2,0 - j \cdot \omega \cdot 0,04)} = 12.59 + j \cdot 79.106. \quad (3)$$

Повну потужність, що споживається усіма навантаженнями, отримуємо шляхом підсумовання потужностей окремих навантажень

$$S_n = S_{n1} + S_{n3} + S_{n4} = 428.139 + j \cdot 1077.692. \quad (4)$$

Повна потужність, пов'язана із джерелом живлення, визначена віртуальним приладом  $PaQa$  і складає величину

$$S_E = 786.7 + j \cdot 2204. \quad (5)$$

Повна потужність, яка споживається власне мережею, вираховується різницею між потужностями джерела і навантажень

$$S_N = S_E - S_n = 358.561 + j \cdot 1126.308. \quad (6)$$

Коефіцієнт потужності обчислимо з трикутника потужностей, пов'язаних із джерелом живлення,

$$\cos \varphi = \frac{786.7}{\sqrt{786.7^2 + 2204^2}} = 0.336. \quad (7)$$

Коефіцієнт корисної дії системи знайдемо як відношення активної потужності, що споживається всіма навантаженнями, до активної потужності, що віддається джерелом живлення,

$$\eta = \frac{\text{Re}(S_n)}{\text{Re}(S_E)} = \frac{428.139}{786.7} = 0.544. \quad (8)$$

Враховуючи, що повна потужність джерела дорівнює половині добутку напруги джерела і його струму, знайдемо комплексне значення струму джерела живлення

$$I_E = \frac{2 \cdot S_E}{E} = \frac{2 \cdot (786.7 + j \cdot 2204)}{100} = 15.734 + j \cdot 44.08, \quad (9)$$

звідки амплітуда струму джерела  $I_{mE} = 46.804$ .

Фазовий зсув струму джерела відносно його напруги у часовому просторі знайдемо за формулою

$$\varphi_t = \frac{\arccos(\cos \varphi) \cdot 0.01}{\pi} = 0.00391. \quad (10)$$

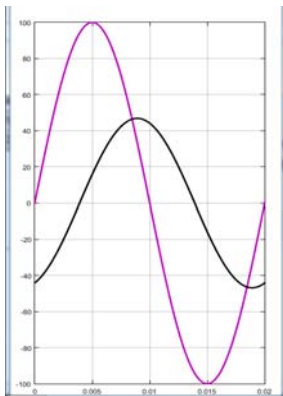


Рис. 3

На рис. 3 наведено часові діаграми напруги і струму джерела живлення мережі, які підтверджують вищезазначені розрахунки.

Аналізуючи некомпенсований режим мережі, можна зауважити, що мережа суттєво перевантажена. Падіння напруги на елементах мережі досягає майже половини від напруги джерела електроенергії. Тому навантаження змушені споживати лише біля чверті від номінальної потужності, якщо її вважати споживаною при 100% від напруги джерела, тобто, за 100 В. Відповідно маємо низькі енергетичні показники, що характеризуються коефіцієнтами потужності  $nf$  корисної дії, а також великі втрати енергії саме на елементах мережі.

**Дослідження частково компенсованого режиму.** Задля здійснення поперечної компенсації увімкнемо конденсатори паралельно кож-

ному навантаженню, як це показано на моделі на рис. 4.

У

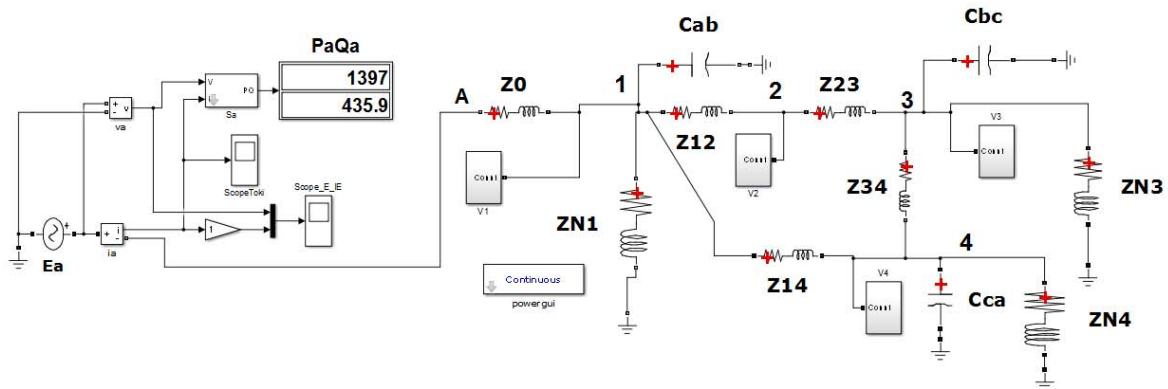


Рис. 4

Задля досягнення часткової компенсації розрахуємо величини ємностей компенсувальних конденсаторів таким чином, аби конденсатор компенсував індуктивну реактивну складову комплексного опору саме навантаження. Так, для навантаження  $Z_{1n} = (0,7 + j\omega 0,005)$  Ом еквівалентна провідність

$$Y_{1n} = \frac{1}{Z_{1n}} = 0.2367 - j \cdot 0.5311.$$

Необхідна ємність для часткової компенсації вираховується з очевидного виразу

$$C_{ab} = \frac{-\text{Im}(Y_{1n})}{\omega} = \frac{0.5311}{314.1592} = 0.00169067 \text{ Ф.}$$

Аналогічно вираховуються ємності інших конденсаторів:  $C_{bc} = 0.00092$  Ф,  $C_{ca} = 0.00024705$  Ф. Зашунтовані конденсаторами навантаження тепер складають загальні комплексні опори з відсутніми уявними частинами, і їхні значення відповідно вузлам 1, 3, 4 складають 4.2249, 10.8696, 80.9568 Ом. Амплітуди напруг означених вузлів після прогону моделі з увімкненими конденсаторами складають значення відповідно 86.71, 83.90 і 85.06 В. Оцінка потужностей, що споживаються тепер навантаженнями за формулами (1)–(3) призводить до результатів:  $S_{1n} = 889.808 + j1996.724$ ,  $S_{3n} = 323.802 + j1017.256$ ,  $S_{4n} = 44.686 + j280.768$ . Повна потужність, споживана усіма навантаженнями, дорівнює  $S_n = 1258.296 + j3294.747$  ВА.

Оскільки до системи додалися конденсатори, що компенсують реактивність навантажень, слід враховувати їхній вклад в баланс потужностей. Задля врахування впливу косинусних конденсаторів обчислимо споживану потужність кожного з них як половину добутка квадрата амплітуди напруги на конденсаторі на спряжений комплекс провідності конденсатора. Для конденсатора  $C_{ab}$  споживана реактивна потужність

$$Q_{Cab} = 0.5 \cdot U_{m1}^2 \cdot (-j\omega C_{ab}) = -j1996.724 \text{ ВА.}$$

Для конденсаторів  $C_{bc}$  і  $C_{ca}$  споживані потужності наступні:

$$Q_{Cbc} = -j1017.256 \text{ ВА; } Q_{Cca} = -j280.7677 \text{ ВА.}$$

Як видно з наведених результатів, кожний з конденсаторів повністю компенсує реактивну складову повної потужності відповідного навантаження. Сумарна потужність, споживана усіма конденсаторами,

$$Q_C = Q_{Cab} + Q_{Cbc} + Q_{Cca} = -j3294.747 \text{ ВА.}$$

Повна потужність, що споживається від джерела електроенергії,  $S_E = 1397 + j435.9$ . Повна потужність, що споживається мережею,

$$S_N = S_E - S_n - Q_C = (138.704 + j435.9) \text{ ВА.}$$

Коефіцієнт потужності та коефіцієнт корисної дії складають величини

$$\text{Cos } \varphi = \frac{1397}{\sqrt{435.9^2 + 1397^2}} = 0.955,$$

$$\eta = \frac{\operatorname{Re}(S_n)}{\operatorname{Re}(S_E)} = \frac{1258.296}{1397} = 0.90071.$$

Комплексна величина струму джерела електроенергії

$$I_E = \frac{2 \cdot S_E}{E} = \frac{2 \cdot (1397 + j435.9)}{100} = 27.94 + j8.718,$$

а амплітуда цього струму  $I_{mE} = 29.269$  А.

Фазовий зсув струму джерела відносно його напруги у часовому просторі

$$\varphi_t = \frac{\arccos(\cos \varphi) \cdot 0.01}{\pi} = 0.00096.$$

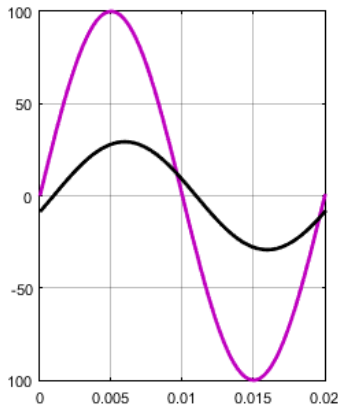


Рис. 5

На рис. 5 наведено часові діаграми напруги і струму джерела електроенергії, які підтверджують результати розрахунків.

Аналіз результатів моделювання та розрахунків режиму з частковою компенсацією демонструє суттєве покращення енергетичних показників системи. Напруги у вузлах навантажень підвищуються на відносно великі величини у порівнянні з варіантом відсутності компенсації. Однак амплітуди цих напруг не досягають навіть 10% відхилення напруги від номінальної напруги джерела.

**Дослідження повністю компенсованого режиму.** Модель для дослідження повністю компенсованого режиму зображено на рис. 6.

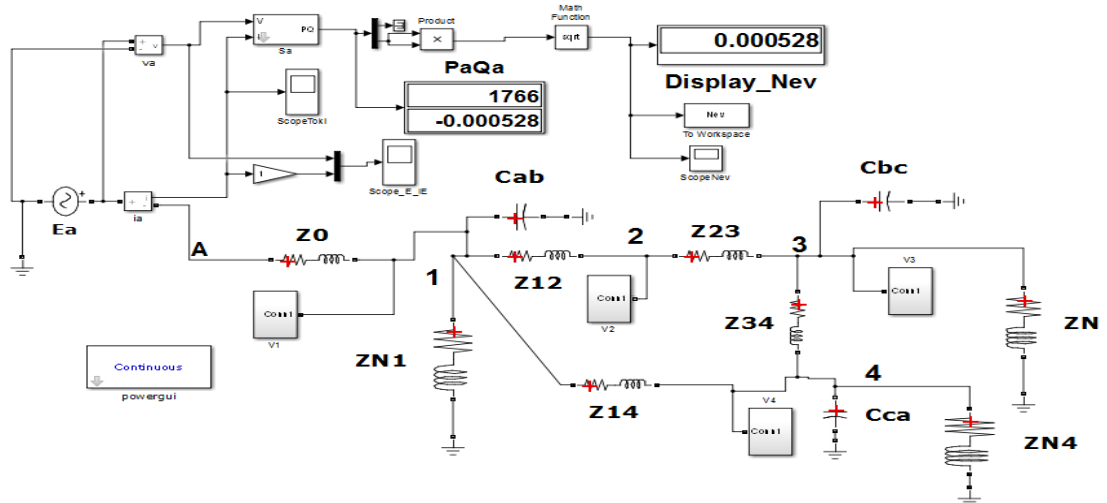


Рис. 6

У порівнянні з попередньою моделлю в цьому випадку модель доповнено віртуальними блоками, що формують значення цільової функції та передають знайдене значення у робочий простір Work Space програми MATLAB для наступної обробки вбудованою оптимізаційною програмою. Пошуковій оптимізації призначається знайти такі значення ємностей, що компенсують реактивну потужність, аби реактивна потужність, споживана джерелом електроенергії, звелася до нульового значення. Тому з цієї постановки задачі оптимізації впливає, що параметрами оптимізації виступають ємності конденсаторів, а критерій оптимізації полягає у відсутності споживання від джерела реактивної потужності. Як видно з моделі, для обчислення значення цільової функції використовується значення реактивної потужності. При цьому застосовується так звана кульова метрика. Для цього значення реактивної потужності спочатку зводиться в квадрат, а потім вилучається корінь. Це дає змогу уникнути в процесі проведення оптимізації заходу в область негативних значень реактивної потужності.

Отримане таким чином значення цільової функції через віртуальний пристрій To Workspace передається в робочу область MATLAB. Така передача потрібна для подальшого використання визначеної величини цільової функції в програмній частині створеного комплексу для реалізації пошукової оптимізації.

Програмна складова цього комплексу наведена на рис. 7 і 8 у вигляді текстів програм на алгоритмічній мові програмування в системі MATLAB. Текст головної програми (рис. 7) на початку містить оголошення параметрів оптимізації і  $C_{ab}$ ,  $C_{bc}$ ,  $C_{ca}$  та значення цільової функції  $Nev$  як глобальних змінних. Це забезпечує доступність цих змінних всіма іншими компонентами створеного комплексу пошукової оптимізації. Так параметри оптимізації закладені у вікнах властивостей моделей самих конденсаторів як їхні ємності, які мають таким чином змінюватися в процесі пошукової оптимізації аж до досягнення своїх оптимальних значень. Особливістю визначення цільової функції є обчислення її значення в процесі прогону візуальної моделі з використанням віртуальних вимірювальних приладів, як це описано вище. Для оптимізації використовується вбудована функція оптимізації за методом деформованого багатогранника  $fminsearch()$ , яка викликається в головній програмі. За умови використання цієї функції в числі її параметрів вказано ім'я файл-функції, текст якої приведено на рис. 8. Тут можна побачити, що по факту змінні оптимізації містяться у векторі  $[x]$ , значення елементів якого представляють собою ємності конденсаторів, виражені у мікрофарадах. Тому перед запуском візуальної моделі здійснюється перерахунок ємностей у фаради. Запуск моделі виконує оператор  $sim$  зі вказівкою імені самої візуальної моделі при цьому. Ім'я файл-функції є першим фактичним параметром під час виклику функції  $fminsearch()$ . Як другий фактичний параметр вказано початкові значення елементів вектора  $[x]$ . Третій параметр задає опції для процесу оптимізації відносно точності, що може бути досягнута. Ці параметри попередньо призначаються оператором  $options$ .

```

global Cab Cbc Cca Nst Nev MN
Cab=1E-7
Cbc=1E-7
Cca=1E-7
sim s3fnesim3
plot(ScopeToki.time, Scope-
Toki.signals.values)
grid on
pause
Nst=0
op-
tions=optimset('MaxFunEvals',10000,'M
axIter',10000,'TolX', 1e-3, 'Tol-
fun',1e-3);
Y=fminsearch('func_s3fnesim',
[2 2.1 1],options)
Nst

```

Рис. 7

```

function Nev=func_s3fnesim(x)
global Cab Cbc Cca Nst Nev MN
Cab=abs(x(1)*1E-6);
Cbc=abs(x(2)*1E-6);
Cca=abs(x(3)*1E-6);
sim s3fnesim3
plot(ScopeToki.time, Scope-
Toki.signals.values)
grid on
x
pause(1/2)
Nst=Nst+1
MN(Nst)=Nev;

```

Рис. 8

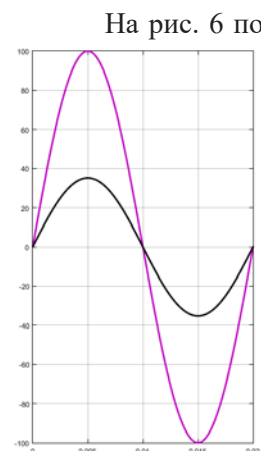


Рис. 9

На рис. 6 показники віртуального вимірювача активної і реактивної потужностей відображають стан моделі після завершення процесу пошукової оптимізації. Тут видно, що реактивна потужність близька до нуля, і джерело електроенергії пов'язано із наданням системі лише активної потужності. Про це ж свідчать і часові діаграми напруги та струму джерела (рис. 9), що демонструють абсолютне співпадіння цих величин за фазами. Знайдені значення ємностей конденсаторів, що забезпечують режим повної компенсації, складають такі величини:  $C_{ab}=1998.75$  мкФ,  $C_{bc}=1097.56$  мкФ,  $C_{ca}=205.727$  мкФ.

Слід зауважити, що це рішення отримано під час завдання як початкового значення змінних оптимізації у вигляді вектора  $[2 \ 2.1 \ 1]$ , як це і прописано у тексті головної програми (рис. 7) у разі звернення до вбудованої функції оптимізації  $fminsearch()$  у другому фактичному параметрі. Розрахунки показників режиму повної компенсації реактивної потужності в системі проведені аналогічно до двох попередніх режимів, а результати за усіма трьома проаналізованими режимами зведені у таблиці. Із таблиці видно, що сумарна ємність конденсаторів за часткової компенсації складає 2857.7 мкФ. Сумарна ємність конденсаторів за повної

компенсації становить 3302.1 мкФ. Таким чином, абсолютне значення збільшення сумарної ємності задля досягнення повної компенсації складає 444.4 мкФ, що становить 15,5% у порівнянні з сумарною ємністю для часткової компенсації. За повної компенсації реактивної потужності в системі амплітуди усіх вузлових напруг перевищують 95 В, що відповідає 5 % відхиленню амплітуд вузлових напруг від напруги джерела електроенергії. Відповідно суттєво зросли потужності, які споживаються кожним з навантажень. В зв'язку з підвищенням споживання навантажень збільшуються струми в гілках самої мережі, і саме тому дещо підвищуються втрати активної потужності в мережі та знижується коефіцієнт корисної дії у порівнянні з режимом часткової компенсації.

| Параметр, величина | Одиниці виміру | Без компенсації | Часткова компенсація | Повна компенсація |
|--------------------|----------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| $C_{ab}$           | мкФ            | 0               | 1690.673             | 1998.75           |
| $C_{bc}$           | мкФ            | 0               | 919.996              | 1097.56           |
| $C_{ca}$           | мкФ            | 0               | 247.045              | 205.727           |
| $U_{m1}$           | В              | 53.75           | 86.71                | 95.40             |
| $U_{m3}$           | В              | 40.01           | 83.90                | 96.50             |
| $U_{m4}$           | В              | 45.15           | 85.06                | 95.05             |
| $P_E$              | Вт             | 786.7           | 1397                 | 1766              |
| $Q_E$              | ВА             | +2204           | +435.9               | 0                 |
| $P_n$              | Вт             | 428.139         | 1258.296             | 1561.257          |
| $Q_n$              | ВА             | +1077.69        | +3294.747            | +4113.32          |
| $Q_C$              | ВА             | 0               | -3294.747            | -4754.853         |
| $P_N$              | Вт             | 358.561         | 138.704              | 204.743           |
| $Q_N$              | ВА             | +1126.30        | +435.9               | +641.525          |
| $\cos \varphi$     |                | 0.336           | 0.955                | 1.0               |
| $\eta$             |                | 0.54422         | 0.90071              | 0.88406           |
| $I_{me}$           | А              | 46.804          | 29.269               | 35.32             |

збільшуючися на 5 % у порівнянні з режимом часткової компенсації. Слід зазначити, що з огляду на енергосистему країни у цілому, збільшення коефіцієнта потужності навіть на один відсоток має великий економічний ефект [1–10].

**Перерахунок на реальну напругу.** Проведені вище дослідження, розрахунки та моделювання наведені для випадку нормованої напруги джерела живлення з нормованою амплітудою 100 В. Така величина зручна для відсоткової оцінки напруг в системі. Реальні значення напруг джерел відрізняються від нормованої та складають величини, передбачені директивними документами [1, 2]. Маючи результати оптимізації для нормованих параметрів, можна легко розрахувати режимні параметри у разі зміни напруги. Для цього достатньо застосувати співвідношення, відомі з теорії подібності відносно електричних систем [15]. Тут у разі нормування параметрів і величин визначаються так звані базові величини, і нормована величина отримується діленнями реальної величини на базову. Під час визначення базових величин слід лише враховувати фундаментальні співвідношення для них, які відомі із теоретичної електротехніки. Розглянемо випадок живлення розглянутої системи від джерела з фазною напругою 220 В (ефективне значення), що відповідає низьковольтній розподільчій мережі для живлення промислових і комунальних споживачів. Амплітудне значення напруги джерела  $E_m=311.13$  В, що відповідає базовій напрузі  $U_0=3.1113$  В. Оскільки опори і частота не змінюються, то залишаємо базовий опір  $R_0=1$  Ом і базовий час  $t_0=1$  с. Фундаментальне співвідношення  $I_0=U_0/R_0=3.1113$  А показує, у скільки разів збільшаться всі струми в реальній системі. Фундаментальне співвідношення  $t_0=R_0C_0$  або  $C_0=t_0/R_0=1$  Ф вказує, що величини ємностей залишаються незмінними. Для потужностей  $P_0=U_0I_0=9.68$  ВА воно вказує, у скільки разів збільшаться всі потужності під час переходу до зазначеної напруги. Прогон моделі за зазначеної реальної напруги джерела живлення дав наступні значення амплітуд напруг у вузлах навантажень:  $U_{m1}=296.81$  В,  $U_{m3}=300.25$  В,  $U_{m4}=295.73$  В (дійсні значення напруг становлять 209.88, 212.31, 209.11 В відповідно). Амплітуда струму джерела  $I_{me}=109.86$  А (ефективне значення 77.68 А). Виключно активна потужність, що споживається від джерела, дорівнює  $P_E=17.095$  кВт. Ці результати підтверджують правильність перерахунку на основі співвідношень за теорією подібності. Проведення процесу пошукової оптимізації також незалежно від перерахунків приводить до абсолютно таких же результатів, що додатково свідчить про правильність результатів перерахунку з реальним значенням фазної напруги мережі.

#### Висновки.

1. Для режиму без компенсації реактивної потужності характерні вкрай низькі енергетичні показники, великі втрати енергії на елементах самої мережі та занижені величини напруг у вузлах споживання електричної енергії навантаженнями.

2. Застосування часткової компенсації реактивної потужності, коли ємність батарей конденсаторів визначається з міркувань компенсації реактивної потужності лише навантажень у вузлах споживання, дещо поліпшує енергетичні показники. Однак при цьому можуть не досягатися напруги у вузлах споживання електроенергії, які потрібні для нормальної роботи навантажень.

3. Метод пошукової оптимізації, реалізований в системі MATLAB, дає змогу визначити режим повної компенсації реактивної потужності в системі. Цей режим може бути досягнутий через використання тієї ж самої поперечної компенсації, яка застосовується для часткової компенсації, тобто тими ж самими технічними засобами.

4. Режим повної компенсації реактивної потужності має найліпші енергетичні показники і забезпечує повноцінне споживання навантаженнями електричної енергії. При цьому генератор електроенергії повністю розвантажується від реактивної потужності, що сприяє стійкості його режиму. Реактивні потужності елементів самої мережі також компенсуються, що розвантажує мережу і суттєво знижує втрати в ній.

5. Реалізація режимів повної компенсації реактивної потужності не зустрине принципових перепон в інтелектуальних повністю керованих електричних мережах, і застосування методу пошукової оптимізації може становити невід'ємну частину таких систем.

1. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. М.: Интермет Инжиниринг, 2006. 672 с.
2. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. Ростов-Дон: Феникс, 2006. 720 с.
3. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях. Киев: Наукова думка, 1985. 286 с.
4. Шидловский А.К., Борисов Б.П., Вагин Г.И., Куренный Э.Г. Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий. К.: Наукова думка, 1992. 236 с.
5. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Данилюк В.Б. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях. К.: Наукова думка, 1992. 240 с.
6. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 2005. 261 с.
7. Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.А., Солдаткина Л.А. Электрические сети. М.: Высшая школа, 1971. 440 с.
8. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
9. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
10. Miller J.E. Reactive power controlled in electric systems. John Willey & Sons, 1982. 416 p.
11. European Smart Grids Technology Platform: vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. European Commission, 2006. 44 p.
12. Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Определение режима компенсации реактивной мощности в четырехпроводной трехфазной системе электроснабжения с помощью поисковой оптимизации. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.060>
13. Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Расчет параметров симметрично-компенсирующего устройства трехфазной системы электроснабжения на основе декомпозиции системы. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 6. С. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.020>.
14. Ягуп В.Г., Ягуп К.В. Дослідження режимів компенсації реактивної потужності в узагальненій системі електропостачання. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 6. С. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.063>.
15. Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). М.: Высшая школа, 1976. 479 с.



## RESEARCH OPTIMIZATION OF THE MODE OF FULL REACTIVE POWER COMPENSATION IN THE ELECTRICAL NETWORK

V.G. Yagup<sup>1</sup>, K.V. Yagup<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kharkiv National Automobile and Highway University,  
25, Yaromlav Mudryi str., 61002, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: [yagup.walery@gmail.com](mailto:yagup.walery@gmail.com).

<sup>2</sup> National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",  
2, Kyrpychova str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

*The article is devoted to the investigation of reactive power compensation modes in a closed electrical network, which is significantly loaded with active-inductive elements in the nodes of electricity consumption. The initial mode without compensation is compared with the modes of partial and full compensation of reactive power using capacitor compensation banks. It is shown how to determine this mode using search optimization using a visual model of the electrical network. Quantitative indicators of the compared modes are presented, which convincingly demonstrate the advantages of full reactive power compensation in the electrical network. References 15, figures 9, table 1.*

**Key words:** electrical network, reactive power, full compensation, search optimization, power factor, efficiency factor.

1. Kudrin B.I. Power supply of industrial enterprises. Moskva: Internet Inzhiniring, 2006. 672 p. (Rus)
2. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. Transmission and distribution of electrical energy. Rostov-Don: Phenix, 2006. 720 p. (Rus)
3. Shidlovsky A.K., Kuznetsov V.G. Improving the quality of electricity in electrical networks. Kyiv: Naukova Dumka, 1985. 286 p. (Rus)
4. Shidlovsky A.K., Borisov B.P., Vagin G.I., Kurenyy E.G. Electromagnetic compatibility of electrical receivers of industrial enterprises. Kyiv: Naukova Dumka, 1992. 236 p. (Rus)
5. Kuznetsov V.G., Grigoriev A.S., Danilyuk V.B. Reducing the asymmetry and non-sinusoidality of voltages in electrical networks. Kyiv: Naukova Dumka, 1992. 240 p. (Rus)
6. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. The quality of electricity at industrial enterprises. Moskva: Energoatomizdat, 2005. 261 p. (Rus)
7. Venikov V.A., Glazunov A.A., Zhukov L.A., Soldatkina L.A. Electrical networks. Moskva: Vysshaya shkola, 1971. 440 p. (Rus)
8. Zhelezko Yu.S. Reactive power compensation and improvement of the quality of electricity. Moskva: Energoatomizdat, 1985. 224 p. (Rus)
9. Zhelezko Yu.S. Loss of electricity. Reactive power. Electricity quality. Guide for practical calculations. Moskva: ENAS, 2009. 456 p. (Rus)
10. Miller J.E. Reactive power controlled in electric systems. John Wiley & Sons, 1982. 416 p.
11. European Smart Grids Technology Platform: vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. European Commission, 2006. 44 p.
12. Yagup V.G., Yagup K.V. Determination of reactive power compensation mode in four-wire three-phase electric power supply system using search engine optimization. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 1. Pp. 60-66. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.060> (Rus).
13. Yagup V.G., Yagup E.V. Calculation of the parameters of a symmetrical-compensating device of a three-phase power supply system based on the decomposition of the system. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 6. Pp. 20-26. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.020> (Rus).
14. Yagup V.G., Yagup E.V. Power compensation modes research in generalized electrical supply system. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 6. Pp. 63-71. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.063> (Ukr).
15. Venikov V.A. Theory of similarity and modeling (in relation to the tasks of the electric power industry) Moskva: Vysshaya shkola, 1976. 479 p. (Rus)

Надійшла 08.11.2022  
Остаточний варіант 15.06.2023