

ЯГУП ВАЛЕРІЙ ГРИГОРОВИЧ ✉ – доктор технічних наук, професор, професор кафедри енергетичних систем та бізнес-аналітики, Західноукраїнський національний університет; м. Тернопіль, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7019-3499>; e-mail: yagup.walery@gmail.com.

ЯГУП КАТЕРИНА ВАЛЕРІЇВНА – доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних систем управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9305-8169>; e-mail: kata3041@gmail.com.

МИХАЙЛОВА ЛЮДМИЛА МИХАЙЛІВНА – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри електротехніки, електромеханіки і електротехнологій, Подільський державний університет; м. Кам'янець-Подільський, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3419-5446>; e-mail: mihajlovaimesg@gmail.com.

КАМИШЛОВ ВІТАЛІЙ ГЕОРГІЙОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри енергетичних систем та бізнес-аналітики, Західноукраїнський національний університет; м. Тернопіль, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6839-7890>; e-mail: v.kamyshlov@wunu.edu.ua.

ПОДОБАЙЛО ВІТАЛІЙ ГНАТОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри енергетичних систем та бізнес-аналітики, Західноукраїнський національний університет; м. Тернопіль, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2867-408X>; e-mail: v.podobailo@wunu.edu.ua.

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗМІЩЕННЯ ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Стаття присвячена дослідженню режимів компенсації реактивної потужності в електроенергетичній системі за допомогою комп'ютерного моделювання електромагнітних процесів. Розглядається електрична мережа в симетричному режимі в однолінійному варіанті топології системи. Живлення забезпечується від джерела змінної синусоїдальної напруги стандартної промислової частоти. Параметри системи про нормовані і вважаються заданими. До числа вихідних даних віднесені комплексні опори ліній електропостачання та навантаження у вузлах відбору електричної енергії. Для компенсації реактивної потужності передбачені батареї косинус них конденсаторів, які умикаються у вузлах електроспоживання. Для моделювання процесів в мережі складена комп'ютерна модель в системі MATLAB/Simulink/SimPowerSystem. Для інтегрування диференціальних рівнянь моделі використовуються чисельні методи, які здібні з явищем жорсткості досліджуваних систем. В моделі встановлені віртуальні вимірювачі напруг і струмів в елементах системи, що дозволяє оцінювати кількісні показники споживання електроенергії навантаженнями, самою мережею і джерелом. Вимірювання віртуальним приладом активної і реактивної потужностей джерела дає змогу контролювати коефіцієнт потужності. Крім того, при прогоні моделі протягом періоду забезпечує обчислення цільової функції для проведення оптимізації варіантів режимів з компенсацією реактивної потужності за допомогою косинус них конденсаторів, встановлених у вузлах споживання. Оптимізація здійснюється спеціальною програмою на мові MATLAB із застосуванням вбудованих функцій оптимізації. Проведення комп'ютерних експериментів за допомогою розробленої моделі з використанням оптимізації дозволило провести порівняльний аналіз варіантів компенсації і знайти оптимальні режими функціонування електричної мережі з точки зору коефіцієнта потужності.

Ключові слова: електрична мережа; комп'ютерна модель; реактивна потужність; батарея конденсаторів; оптимальних режим.

Вступ і постановка задачі. Підвищення якості постачання та споживання електричної енергії займають важливе місце в теорії і практиці електричних систем і комплексів. Ці питання включають широкий спектр проблем, пов'язаних з викривленнями форм напруг і струмів в системах з нелінійними навантаженнями. В той же час невід'ємною задачею в енергетичному плані є наявність врахування споживачів з реактивним навантаженням. Такі споживачі породжують генерацію реактивної потужності в системах, що призводить до суттєвого зниження енергетичних показників роботи системи енергоживлення в цілому. Тому проблема компенсації реактивної потужності є надзвичайно важливою задачею як в суто технічних, так і економічних аспектах [1–4]. Традиційними в електроенергетиці способами компенсації реактивної потужності є застосування батарей косинусних конденсаторів [5–10], які в широкій номенклатурі виробляються і поставляються на ринок електричних компонентів. Комбінуючи ємності батарей конденсаторів, можна досягти симетрування

споживаних струмів при несиметричному навантаженні трифазних електричних мереж. При цьому компенсується так звана реактивна потужність несиметрії. Але найчастіше на практиці використовуються однакові для всіх фаз комплекти батарей конденсаторів з метою часткового зниження споживання реактивної потужності [1, 5–7, 11, 12]. При цьому керуються часовими графіками споживання електричної енергії групи споживачів, і ємності батарей розраховують достатньо приблизно, маючи на меті досягти компенсації лише частини реактивної потужності в мережі. Визначення ємностей батарей конденсаторів виходить з необхідності компенсувати реактивну потужність лише у вузлі споживання і не враховує взаємного впливу батарей на інші вузли навантаження. Між тим, застосування мікропроцесорної техніки для контролю і управління енергосистемами надає широкі можливості як до повної автоматизації процесів управління засобами компенсації реактивної потужності, так і до підвищення вимог до точності технологічних процесів, що властиві самій компенсації реактивної потужності

© В. Г. Ягуп, К. В. Ягуп, Л. М. Михайлова, В. Г. Камишов, В. Г. Подобайло, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

[12–17]. Зокрема, раціональним представляється застосування комп'ютерного моделювання для прогнозування, визначення і оптимізації режимів компенсації реактивної потужності в електричних системах [18, 19].

Мета статті полягає в розробці комп'ютерної моделі електричної мережі на основі візуальних блоків SimPowerSystem і можливістю знаходження оптимального режиму компенсації реактивної потужності для дослідження варіантів розміщення пристроїв компенсації у вузлах споживання електроенергії мережі.

Основний матеріал дослідження. Дослідженню підлягає замкнена розгалужена електрична мережа з живленням від джерела синусоїдальної напруги стандартної частоти. Структура мережі наочно відображається на візуальній комп'ютерній моделі, яка представлена на рис. 1.

В моделі живлення системи здійснюється джерелом напруги E_a . Амплітуда напруги нормована і складає 100 В, частота 50 Гц, фазовий зсув нульовий. Мережу створюють лінії електропередачі комплексними опорами $Z_0 = Z_{12} = Z_{23} = Z_{34} = Z_{14}$. Активні опори кожної лінії передачі прийняті в моделі 0,3 Ом, індуктивності ліній вважаються рівними 0,003 Гн. Навантаження представлені активно-індуктивними опорами, які увімкнені до вузлів відбору електроенергії з номерами 1, 3, 4 і зв'язані між собою і джерелом живлення через контур заземлення. Комплексні опори навантажень обрані $Z_{N1} = (0,7 + j\omega 0,005)\text{Ом}$; $Z_{N3} = (1 + j\omega 0,01)\text{Ом}$; $Z_{N4} = (2 + j\omega 0,04)\text{Ом}$. Віртуальні вимірювачі напруги і струму джерела живлення дають змогу визначити активну і реактивну потужності, що їх споживає джерело. Ці значення реєструються дисплеєм PaQa. Значення Q_a використовується для обчислення цільової функції при подальшій оптимізації. Воно передається у робочий простір MATLAB за допомогою блоку To Workspace як параметр з іменем Nev.

Амплітуда струму джерела і його фаза фіксуються дисплеями IEn і Fi, а коефіцієнт потужності – дисплеєм CosFi. Напруги вузлів вимірюються віртуальними амперметрами та перетворюються в амплітудні значення вузлових напруг, які показуються дисплеями Vuz1, Vuz2, Vuz3, Vuz4. Для компенсації реактивної потужності використовуються конденсатори Ca, Cb, Cc. Поточні значення ємностей цих конденсаторів виводяться на дисплеї Display_Ca, Display_Cb, Display_Cc, де ємності приводяться в мікрофарадах.

На рис. 1 показано стан моделі при відсутності компенсації реактивної потужності. Для цього ємності конденсаторів прийняті 10^{-9} Ф, тобто, настільки малими, що вони практично не впливають на електромагнітні процеси в мережі. Як видно із значень амплітуд вузлових напруг $V_{uz1} = 53,75$ В; $V_{uz2} = 46,88$ В, $V_{uz3} = 40,01$ В; $V_{uz4} = 45,15$ В. Ці значення вдвічі менше напруги, яка генерується джерелом, що свідчить, що маємо випадок «слабкої» мережі, яка перевантажена споживачами. Струм джерела має амплітуду 46,81 А і фазовий зсув ($-70,36$ ел. град.), що в свою чергу обумовлює низьке значення коефіцієнту потужності $\text{Cos } \varphi = 0,3661$. Про це ж свідчать показники споживаних активної і реактивної потужностей відповідно: $P_a = 786,7$ Вт і $Q_a = 2204$ ВАр. Дані по режиму підтверджуються протоколом віртуального приладу PowerGUI із застосуванням інструменту SteadyState (рис. 2).

MEASUREMENTS:

- 1: 'U_vb20' = 46.88 V -1.59°
- 2: 'U_vb10' = 53.75 V -1.71°
- 3: 'U_vb40' = 45.15 V -1.27°
- 4: 'U_vb30' = 40.01 V -1.44°
- 5: 'U_va ' = 100.00 V 0.00°
- 6: 'I_ia ' = 46.81 A -70.36°

Рисунок 2 – Протокол дослідження усталеного некомпенсованого режиму мережі

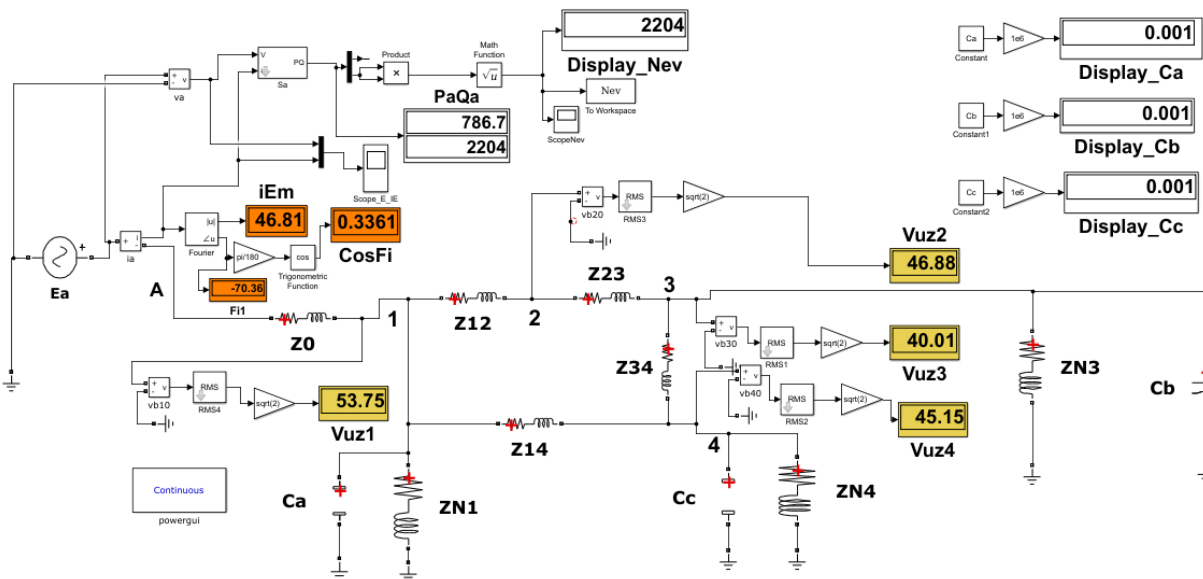


Рисунок 1 – Візуальна модель мережі при відсутності компенсації реактивної потужності

Для компенсації реактивної потужності будемо розглядати розміщення батарей конденсаторів у вузлах мережі. При цьому шляхом пошукової оптимізації будемо знаходити такі сукупності ємностей конденсаторів, що вони забезпечують мінімум реактивної потужності, пов'язаної з джерелом живлення. Для реалізації процесу оптимізації використовується інструмент Optimization Toolbox, в складі якого є функції багатовимірної нелінійної оптимізації, зокрема, функція `fminsearch`. Ця функція реалізує метод деформованого багатогранника і при звертанні до неї слід визначити додаткову функцію, яка обчислює значення цільової функції. Це значення формується самою моделлю при прогоні її протягом періоду живильної напруги як модуль реактивної потужності джерела живлення. Через блок `To Workspace` це значення передається в робочий простір, звідки підхоплюється допоміжною функцією для відповідної обробки і далі вже передається до самої програми оптимізації. В процесі оптимізації алгоритм передбачає формування багатогранника в багатовимірному просторі, який рухається в напрямі мінімуму, піддаючись при цьому змінам кінцевих точок багатогранника, тобто, деформується належним чином для забезпечення збіжності алгоритму до точки мінімуму. В якості змінних оптимізації в моделі використовуються значення ємностей, виражені в мікрофарадах. Перед запуском моделі ці значення переводяться в фаради і передаються у вікна властивостей самих блоків конденсаторів в моделі. Хід оптимізації контролюється накопиченням значень цільової функції на кожному кроці оптимізації. Процес оптимізації завершується при досягненні заданої точності рішення.

Розглянемо розміщення однієї батареї конденсаторів, яка увімкнена до вузлу 3 у вигляді ємності C_b . Хід процесу оптимізації показано на рис. 3.

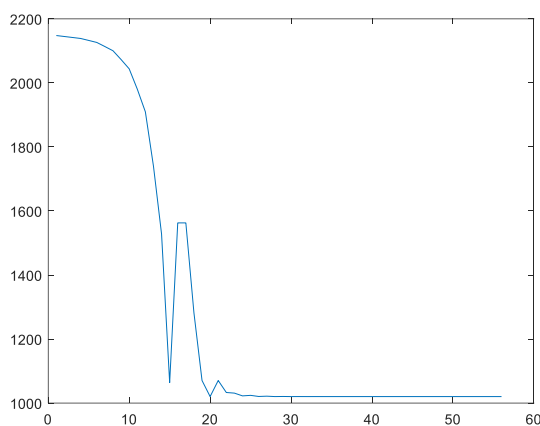


Рисунок 3 – Графік зміни цільової функції в залежності від кроку ітерації для випадку одно конденсаторної компенсації

На цьому графіку видно, що процес обчислення мінімуму закінчився за 56 ітерацій, і мінімум так і не досяг нульового значення. Вже на 30 кроці практично досягнуто мінімальне значення 1020 і далі практично не змінюється. Потрібна ємність конденсатора складає величину $C_b = 2390$ мкФ. Таким чином, повної компенсації не можливо досягнути. Протокол з

показниками віртуальних приладів моделі для цього випадку зображено на рис. 4.

MEASUREMENTS:

- 1: 'U_vb20' = 93.69 V -37.10°
- 2: 'U_vb10' = 75.75 V -25.13°
- 3: 'U_vb40' = 90.23 V -36.78°
- 4: 'U_vb30' = 114.37 V -45.00°
- 5: 'U_va' = 100.00 V 0.00°
- 6: 'I_ia' = 45.47 A -26.66°

Рисунок 4 – Протокол дослідження усталеного режиму мережі при одноконденсаторній компенсації

З протоколу видно, що напруги на всіх вузлах вдалося підняти, особливо у вузлі 3, де розміщено компенсувальний конденсатор, і де напруга навіть перевищує напругу джерела. Але при цьому активна потужність, споживана від джерела, складає величину 2032 Вт, а реактивна – 1020 Вар, що відповідає коефіцієнту потужності 0,8936, амплітуді струму джерела 45,47 А з кутом зсуву (-26,66 ел.град.). Зауважимо, що аналогічні результати дають інші варіанти розміщення батареї конденсаторів в решті вузлів

Розглянутий варіант розміщення двох конденсаторів C_a і C_c відповідно у вузлах 1 і 4 показав, що процес оптимізації привів до режиму повної компенсації, коли від джерела електричної енергії споживається лише активна потужність, а реактивна потужність зменшується до нуля, циркулюючи при цьому понад джерелом живлення. Процес оптимізації збігається при цьому за 165 ітерацій. Ємності батарей конденсаторів при такій компенсації дорівнюють $C_a = 2566$ мкФ, $C_c = 457,3$ мкФ, амплітуда струму від джерела 32,03 А, від джерела споживається лише активна потужність 1601 Вт. Протокол з показниками напруг і струмів приведено на рис. 5.

MEASUREMENTS:

- 1: 'U_vb20' = 85.28 V -18.84°
- 2: 'U_vb10' = 95.30 V -18.46°
- 3: 'U_vb40' = 87.84 V -19.76°
- 4: 'U_vb30' = 75.27 V -19.31°
- 5: 'U_va' = 100.00 V 0.00°
- 6: 'I_ia' = 32.02 A -0.00°

Рисунок 5 – Протокол дослідження усталеного режиму мережі при дво конденсаторній компенсації

Як видно з показників віртуальних вимірювачів, в цьому варіанті спостерігається зниження споживаного від джерела струму, а також відсутня перекомпенсація із перевищенням при цьому напруг у вузлах споживання порівняно з напругою джерела живлення. Важливо, що при цьому досягається одينية значення коефіцієнта потужності.

При розміщенні трьох конденсаторів C_a , C_b , C_c відповідно у вузлах 1, 3, 4 увімкнення споживачів також досягається повна компенсація реактивної потужності в мережі. Стан мережі після оптимізації показаний на рис. 6.

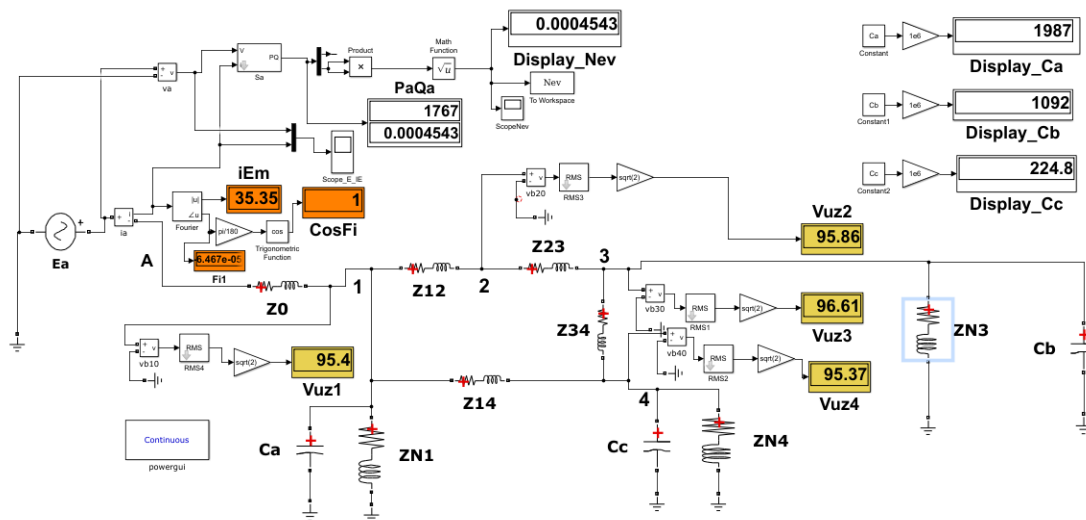


Рисунок 6 – Візуальна модель мережі при повній компенсації реактивної потужності

Оптимізація була завершена за 167 кроків ітерації. Ємності конденсаторних батарей для цього режиму складають $C_a = 1987$ мкФ; $C_b = 1092$ мкФ; $C_c = 224,8$ мкФ. Амплітуда струму джерела 35,35 А, споживана від джерела потужність є виключно активною з величиною 1767 Вт. Протокол з показниками вимірювачів струмів і напруг для цього варіанту наведено на рис. 7.

MEASUREMENTS:

- 1: 'U_vb40' = 95.37 V -23.86°
- 2: 'U_vb30' = 96.61 V -26.71°
- 3: 'U_vb20' = 95.86 V -23.59°
- 4: 'U_vb10' = 95.40 V -20.44°
- 5: 'U_va' = 100.00 V 0.00°
- 6: 'I_ia' = 35.35 A -0.00°

Рисунок 7 – Протокол дослідження усталеного режиму мережі при триконденсаторній компенсації

З аналізу цих показників видно, що при цьому варіанті компенсації спостерігається найбільш рівномірне підвищення напруг у вузлах споживання, а на споживачах розвиваються умови споживання, наближені до номінальних режимів, оскільки зменшення амплітуд напруг у вузлах споживачів не перевищує 5% від напруги генератора. Тому цей режим можна вважати оптимальним за всіма показниками, включаючи і такий важливий, як коефіцієнт потужності, для якого забезпечене одиничне значення.

Висновки. В межах представленої статті розроблено комплексний підхід до комп'ютерного моделювання усталених процесів в електричних мережах з можливістю пошуку оптимальних режимів при компенсації реактивної потужності за допомогою батарей косинус них конденсаторів.

Розроблена модель складається із стандартних компонентів SimPowerSystem із забезпеченням можливості знаходження оптимальних варіантів компенсації реактивної потужності за критерієм підвищення коефіцієнта потужності.

Запропонована програмна реалізація, яка зв'язує модель з вбудованими інструментами оптимізації

програмного комплексу MATLAB через взаємодію функцій з робочим простором. При цьому забезпечується контроль збіжності процесу оптимізації.

Проведені дослідження різних варіантів розміщення батарей конденсаторів у вузлах навантажень з одночасним знаходженням оптимальних величин їх ємностей по критерію максимуму коефіцієнта потужності. В результаті доведено, що зосередження всього комплексу ємностей в одному вузлі не призводить до повної компенсації реактивної потужності в мережі. Показано, що оптимальний режим забезпечується при розосередженні ємностей по всім вузлам мережі за умови оптимізації ємностей кожного комплексу батарей.

Список літератури

1. Miller T. J. E. Reactive power control in electric systems. New York : Wiley, 1982. 381 p.
2. European Commission: Directorate-General for Research and Innovation. European Smart Grids Technology Platform: vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2006. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a2ea8d86-7216-444d-8ef5-2d789fa890fc>.
3. Про затвердження Змін до Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії: Наказ Міністерства енергетики України від 30.11.2020 № 764. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0109-21#Text>.
4. Мельничук Л. М. Визначення економічного еквівалента реактивної потужності та механізми його застосування в системі оплати за передавання реактивної електроенергії. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2014. № 1/2014 (25). С. 95–101.
5. Зайцев І. М. Про компенсацію реактивної потужності електрообладнання. *Енергозбереження. Енергетика. Енергодит*. 2010. № 11 (81). С. 66–69.
6. Особливості вибору установок компенсації реактивної потужності для систем електропостачання військових аеродромів / Г. І. Лагутін та ін. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2023. № 4 (49). С. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.30748/ntps.2022.49.03>.
7. Дорошенко О. І., Дручина Т. О., Сарахман Ю. Г. Компенсація реактивної потужності неробочого ходу силових трансформаторів із вторинною напругою 0,4 кВ. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2018. № 28 (104). С. 154–160. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.28.104.2018.18>.
8. Хоменко І. В., Піскурьов М. Ф., Стасюк І. В. До питання компенсації реактивної потужності в електричних

- системах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 2018. № 32 (1308). С. 71–76. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2018.32.13>.
9. Компенсація реактивної потужності в системах електрозабезпечення промислових і цивільних об'єктів / С. М. Балюта та ін. *Наукові праці Національного університету харчових технологій.* 2021. Т. 27, № 4. С. 117–128. DOI: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2021-27-4-13>.
 10. Один із аспектів компенсації реактивної потужності в сільських мережах 0,4 кВ / Ю. П. Гончаренко та ін. *Вісник Хмельницького національного університету Серія: «Технічні науки».* 2021. Т. 301, № 5. С. 87–91. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2021-301-5-87-91>.
 11. Демов О. Д., Бабенко О. В. Моделі компенсації реактивної потужності в електричних мережах на основі просторово-часової декомпозиції. *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* 2021. Т. 159, № 6. С. 77–81. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-159-6-77-81>.
 12. Автоматична конденсаторна установка компенсації реактивної потужності. *Енергіс Україна.* URL: <https://www.enersys.com.ua/vyrobnytstvo/kondensatorna-ustanovka.html>.
 13. Компенсація реактивної потужності. Схемні рішення на базі контролера DCRK/DCRJ. *СВ АЛТЕРА. Електротехніка & Автоматизація.* URL: <https://www.svaltera.ua/press-center/articles/4351.php>.
 14. Системи компенсації реактивної потужності. *ЛВ Маркет - Приватне науково-виробниче підприємство.* URL: <http://www.lvmarket.com.ua/PFC>.
 15. Bhattacharyya B., Goswami S. K., Bansal R. C. Hybrid fuzzy particle swarm optimization approach for reactive power optimization. *Journal of Electrical Systems.* 2009. Vol. 5, no. 3. P. 1–15.
 16. Sen O. An improved catastrophic genetic algorithm and its application in reactive power optimization. *Energy and Power Engineering.* 2010. Vol. 02, no. 04. P. 306–312. DOI: <https://doi.org/10.4236/epe.2010.24043>.
 17. Durairaj S., Devaraj, Kannan P. S. Improved genetic algorithm approach for multi-objective contingency constrained reactive power planning. *2005 Annual IEEE India Conference - Indicon, Chennai, India,* 11–13 December 2005. P. 510–515. DOI: <https://doi.org/10.1109/indcon.2005.1590223>.
 18. 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/teched2016.01.060>
 19. Ягуп В. Г., Ягуп К. В. Моделирование та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання: навчальний посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 183 с.
 - electrical equipment].” *Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit,* no. 11, pp. 66–69, 2010. (in Ukrainian)
 6. G. Lagutin, A. Panchenko, V. Uvarov, and V. Tabunenko, “Features of the choice of reactive power compensation units for power supply systems of military airfields,” *Science and Technology of the Air Force of Ukraine,* no. 4 (49), pp. 23–29, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.30748/nitps.2022.49.03> (in Ukrainian)
 7. I. Doroshenko, T. Druchyna, and Yu. G. Sarahman, “Reactive power compensation minimum load transformers with a secondary voltage 0,4 kV,” *Electrical and Computer Systems,* no. 28 (104), pp. 154–160, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.15276/eltecs.28.104.2018.18> (in Ukrainian)
 8. I. V. Khomenko, M. F. Piskurev, and I. V. Stasiuk, “On the issue of reactive power compensation in electrical systems,” *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice,* no. 32 (1308), pp. 71–76, Nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2018.32.13> (in Ukrainian)
 9. S. Baluta, V. Jovbak, L. Kopilova, and I. Kuievda, “Compensation of reactive power in electrical supply systems of industrial and civil facilities,” *Scientific Works of National University of Food Technologies,* vol. 27, no. 4, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2021-27-4-13> (in Ukrainian)
 10. Yu. Honcharenko, O. Kononov, I. Poleshchuk, V. Priadko, and I. Hunko, “One aspect of reactive power compensation in 0.4 kV rural networks,” *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences,* vol. 301, no. 5, pp. 87–91, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2021-301-5-87-91> (in Ukrainian)
 11. O. D. Demov and O. V. Babenko, “Models of reactive power compensation in electrical networks on the basis of spatial-temporal decomposition,” *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute,* vol. 159, no. 6, pp. 77–81, 2021, doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-159-6-77-81> (in Ukrainian)
 12. “Avtomatychna kondensatorna ustanovka kompensatsii reaktyvnoi potuzhnosti [Automatic capacitor unit for reactive power compensation].” *Enersys Ukraina.* [Online]. Available: <https://www.enersys.com.ua/vyrobnytstvo/kondensatorna-ustanovka.html> (in Ukrainian)
 13. “Kompensatsiia reaktyvnoi potuzhnosti. Skhemni rishennia na bazi kontrolera DCRK/DCRJ [Reactive power compensation. Circuit solutions based on the DCRK/DCRJ controller].” *SV ALTERA. Elektrotehnika & Avtomatyzatsiia.* [Online]. Available: <https://www.svaltera.ua/press-center/articles/4351.php> (in Ukrainian)
 14. “Systemy kompensatsii reaktyvnoi potuzhnosti [Reactive power compensation systems].” *LV Market - Pryvatne naukovo-vyrobnyche pidpriemstvo.* [Online]. Available: <http://www.lvmarket.com.ua/PFC> (in Ukrainian)
 15. B. Bhattacharyya, S. K. Goswami, and R. S. Bansal, “Hybrid fuzzy particle swarm optimization approach for reactive power optimization,” *Journal of Electrical Systems,* vol. 5, no. 3, pp. 1–15, 2009.
 16. O. Sen, “An improved catastrophic genetic algorithm and its application in reactive power optimization,” *Energy and Power Engineering,* vol. 02, no. 04, pp. 306–312, 2010 doi: <https://doi.org/10.4236/epe.2010.24043>
 17. S. Durairaj, Devaraj, and P. S. Kannan, “Improved genetic algorithm approach for multi-objective contingency constrained reactive power planning,” in *2005 Annual IEEE India Conference - Indicon, Chennai, India,* Dec. 11–13, 2005. IEEE, pp. 510–515, doi: <https://doi.org/10.1109/indcon.2005.1590223>
 18. V. G. Yagup and K. V. Yagup, “Determination of reactive power compensation mode in four-wire three-phase electric power supply system using search engine optimization,” *Tekhnichna Elektrodynamika,* no. 1, pp. 60–66, Jan. 2016, doi: <https://doi.org/10.15407/teched2016.01.060> (in Russian)
 19. V. H. Yahup and K. V. Yahup, *Modeliuvannia ta optymizatsiia rezhymiv system enerhopostachannia ta elektrospozhyvannia [Modelling and optimisation of power supply and electricity consumption systems].* Kharkiv: O. M. Beketov Nat. Univ. Urban Economy Kharkiv, 2019. (in Ukrainian)

Надійшло (received) xx.xx.20xx

References

1. T. J. E. Miller, *Reactive Power Control in Electric Systems.* New York: Wiley, 1982.
2. European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, “European smart grids technology platform: Vision and strategy for Europe’s electricity networks of the future,” Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, EUR 22040, 2006. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a2ea8d86-7216-444d-8ef5-2d789fa890fc>
3. Ukraine, Ministry of Energy of Ukraine. (2020, Nov. 30). *Order of the Ministry of Energy of Ukraine no. 764, Pro zatverdzhennia Zmin do Metodyky obchyslennia platy za peretikannia reaktyvnoi elektroenerhii [On approval of Amendments to the Methodology for calculating fees for reactive electricity flow].* [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0109-21#Text> (in Ukrainian)
4. L. Melnychuk, “Determining the economic equivalent of reactive power and mechanisms of its application in the payment of transmission reactive power,” *Electromechanical and Energy Saving Systems,* no. 1/2014 (25), pp. 95–101, 2014. (in Ukrainian)
5. I. M. Zaitsev, “Pro kompensatsiiu reaktyvnoi potuzhnosti elektroobladnannia [About compensation of reactive power of

UDC 621.314

YAGUP VALERIY HRYHOROVYCH ✉ – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Energy Systems and Business Analytics, Western Ukrainian National University; Ternopil, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7019-3499>
e-mail: yagup.valery@gmail.com.

YAGUP KATERYNA VALERIYIVNA – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Software Engineering and Intelligent Control Systems, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9305-8169>; e-mail: kata3041@gmail.com.

MYKHAYLOVA LYUDMYLA MYKHAYLIVNA – Candidate of Technical Sciences (PhD), Professor of the Department of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrical Technologies, Podillia State University; Kamianets-Podilskyi, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3419-5446>; e-mail: mihajlovaimesg@gmail.com.

KAMYSHLOV VITALIY GEORGIYOVYCH – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Energy Systems and Business Analytics, Western Ukrainian National University; Ternopil, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6839-7890>; e-mail: v.kamyshlov@wunu.edu.ua.

PODOBAILO VITALIY GNATOVYCH – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Energy Systems and Business Analytics, Western Ukrainian National University; Ternopil, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2867-408X>. e-mail: v.podobailo@wunu.edu.ua.

COMPUTER MODEL FOR STUDYING THE PLACEMENT OF REACTIVE POWER COMPENSATION DEVICES IN ELECTRICAL NETWORK

The article is devoted to the study of reactive power compensation modes in the electric power system using computer simulation of electromagnetic processes. The considered electric network in symmetrical mode in a single-line version of the system topology. Power is provided from a source of alternating sinusoidal voltage of standard industrial frequency. System parameters are normalized and considered given. The input data include complex resistances of power supply lines and loads in electrical energy collection nodes. To compensate for reactive power, batteries of cosine capacitors are provided, which are switched on in electrical consumption nodes. To simulate processes in the network, a computer model was compiled in the MATLAB/Simulink/SimPowerSystem system. Numerical methods are used to integrate the differential equations of the model that are capable of dealing with the phenomenon of rigidity of the systems under study. The model has virtual meters of disturbances and currents in the system elements, which allow to estimate quantitative indicators of electricity consumption by loads, the network itself and the source. Measuring the active and reactive power of the source with a virtual device allows you to control the power factor. In addition, when running the model during the period, it provides the calculation of the objective function for optimizing the options for modes with reactive power compensation using cosine capacitors installed in the consumption nodes. Optimization is carried out by a special program in the MATLAB language using built-in optimization functions. Conducting computer experiments using the developed model using optimization allowed us to conduct a comparative analysis of compensation options and find the optimal modes of operation of the electrical network in terms of power factor.

Keywords: electrical network; computer model; reactive power; capacitor bank; optimal mode.