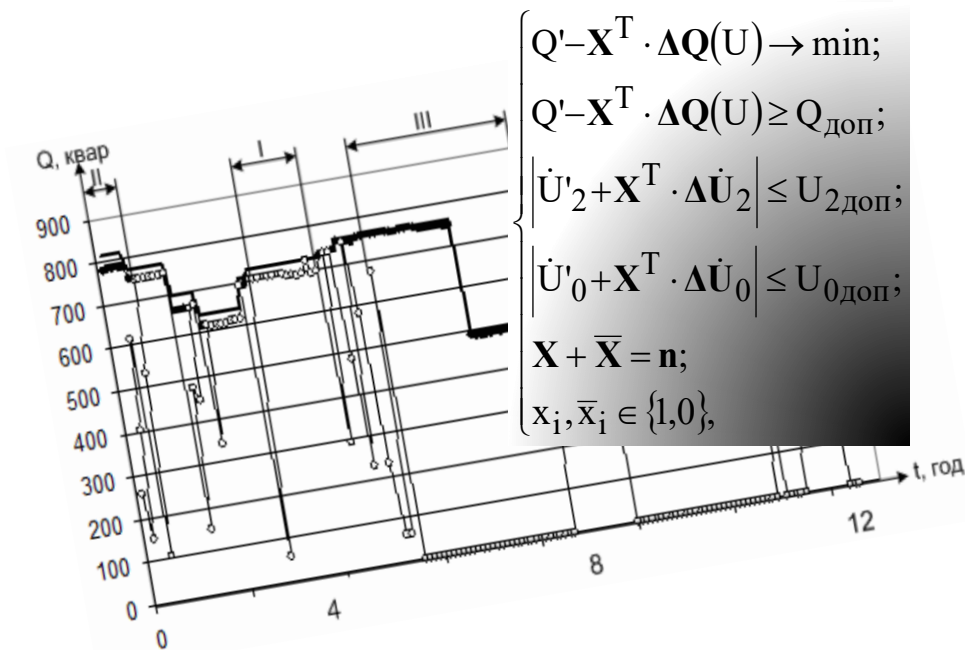


Л. Б. Терешкевич

Т. М. Червінська

Компенсація реактивної потужності в умовах несиметрії напруг в електричних мережах



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська

**КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
В УМОВАХ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ
В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2025

УДК 621.316.13

Т 35

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 26.12.2024 р.)

Рецензенти:

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор, ВНТУ

С. М. Балюта, доктор технічних наук, професор, НУХТ

Терешкевич, Л. Б.

Т 35 Компенсація реактивної потужності в умовах несиметрії напруг в електричних мережах: монографія [Електронний ресурс] / Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – (PDF, 117 с.)

ISBN 978-617-8163-33-4 (PDF)

В монографії розглянуті впливи несиметрії напруг на роботу батарей статичних конденсаторів, що використовуються для компенсації реактивних навантажень, та наведені обґрунтування необхідності їх врахування на практиці. Запропоновано ряд математичних моделей оптимального керування реактивним навантаженням, які враховують несиметрію напруг. Ефективність впровадження на практиці виконаних розробок досліджена шляхом комп'ютерного моделювання.

Книга розрахована на науковців, аспірантів та інженерів, які займаються питаннями компенсації реактивної потужності

УДК 621.316.13

ISBN 978-617-8163-33-4 (PDF)

© Л. Терешкевич, Т. Червінська, 2025

© ВНТУ, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ З ПИТАНЬ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	9
1.1 Компенсація реактивної потужності за допомогою БСК	9
1.2 Багатофункціональні властивості БСК та їх робота при несиметричній напрузі	13
1.3 Наукові роботи з проблеми керування БСК та їх практична реалізація	16
1.4 Наукові задачі, що залишаються не достатньо дослідженими, та потребують їх вирішення	24
РОЗДІЛ 2. РОБОТА БАТАРЕЇ СТАТИЧНИХ КОНДЕНСАТОРІВ ПРИ ЇЇ ПІД'ЄДНАННІ ДО НЕСИМЕТРИЧНОЇ НАПРУГИ	27
2.1 Впливи на режими електроспоживання	27
2.1.1 Вплив на несиметрію напруг в мережі	28
2.1.2 Вплив БСК на значення додаткових втрат активної потужності	33
2.1.3 Вплив на відхилення напруги та його специфіка	36
2.2 Вплив, що здійснюється БСК на асинхронний двигун	38
2.3 Про показники для оцінювання впливу БСК на несиметрію напруг у вузлі під'єднання	45
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РЕАКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ, ЩО ВРАХОВУЮТЬ НЕСИМЕТРІЮ НАПРУГ	51
3.1 Задача оптимального керування реактивними навантаженнями та підхід до її вирішення, реалізований в роботі	51
3.2 Обґрунтування критерію ефективності та технічних обмежень при прийнятті керуючих рішень	54
3.3 Математичні моделі, що враховують несиметрію напруг при керуванні БСК	58

3.4 Математичні моделі, що враховують значення відхилень напруг по фазах при керуванні БСК	59
3.5 Алгоритм аналізу розроблених математичних моделей	61
3.6 Математична модель, яка враховує несиметрію напруг при керуванні секціями БСК, що перемикаються із схеми трикутник в зірку з нулем	67
3.7 Математична модель симетрування напруг для БСК, що має симетрувальні секції	71
3.8 Тестування обчислювального методу та аналіз отриманих результатів	72
РОЗДІЛ 4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РЕАКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ	78
4.1 Модель системи керування реактивною потужністю в електрич- ній мережі	78
4.2 Оптимальне керування реактивним навантаженням в реальних умовах та аналіз його результатів	86
4.2.1 Технологія комп'ютерного моделювання, вхідна інформація та результати керування	86
4.2.2 Результати оптимального керування реактивним навантаженням, якщо БСК має секції з однаковими міжфазними ємностями	88
4.3 Система технічних заходів для ефективного оптимального керування реактивним навантаженням	93
ВИСНОВКИ	96
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	98
ДОДАТКИ	109
Додаток А. Алгоритм аналізу математичної моделі	110
Додаток Б. Результати розрахунків вектора керування	113
Додаток В. Параметри стану електричного режиму до та після реалізації вектора керування (фрагменти)	115

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- БСК – батарея статичних конденсаторів
- КРП – компенсація реактивної потужності
- СЕП – система електропостачання
- ТП – трансформаторна підстанція
- АД – асинхронний двигун
- ОН – однофазне навантаження
- СН – симетричне навантаження

ВСТУП

Використання керованих компенсуючих пристроїв, а саме батарей статичних конденсаторів (БСК), для керування реактивною потужністю є одним з високоефективних засобів, який дозволяє зменшити втрати активної потужності, знизити плату постачальнику за спожиту електроенергію та підвищити її якість [1 – 18].

Як свідчать експериментальні дослідження, проведені різними дослідниками, в мережах енергопостачальних компаній та споживачів електроенергії має місце несиметрія напруг, яка виникає внаслідок під'єднання електроприймачів однофазного виконання [19 – 24]. В окремих випадках показники, якими нормується несиметрія напруг [25], наближаються, а іноді перевищують нормально та гранично допустимі значення. З ряду причин (відсутність коштів у енергопостачальної компанії та споживачів; зростання потужності і кількості однофазних електроприймачів, наприклад, в побуті; впровадження нових технологій) встановилася стійка тенденція до зростання несиметрії напруг в електричних мережах [19 – 24].

В розподільних мережах широко використовуються БСК різного виконання: симетричні, тобто з однаковими параметрами на фазу, та несиметричні, в тому числі і неповнофазні.

Існуючі методи та способи керування реактивною потужністю за допомогою БСК, частина яких реалізована в технічних засобах [14, 16, 26, 27], здійснюють керування, забезпечуючи мінімум втрат активної потужності і енергії в мережі або необхідні рівні напруги. При такому керуванні до уваги можуть прийматись технічні обмеження: на величину напруги живлення, стійкість вузлів навантаження, фактичний рівень напруг у вузлі під'єднання БСК.

Задачами оптимального керування реактивною потужністю, створенням законів керування займалося багато науковців серед яких слід виділити Шидловського А. К., Ковальова І. Н., Зоріна В. В., Кузнєцова В. Г., Варецького Ю. О., Рогальського Б. С., Аввакумова В. Г., Жежеленка І. В., Желєзка Ю. С., Ільяшова В. П., Лежнюка П. Д. та багатьох інших, які отримали фундаментальні результати в цьому напрямку.

Однак більшість із них займались проблемами керування реактивними навантаженнями за допомогою БСК несиметричного або неповнофазного виконання забезпечуючи симетрування струмів або напруг, а також за допомогою БСК з однаковими міжфазними або фазними ємностями не враховуючи особливості її роботи в умовах несиметрії напруг.

Властивості БСК визначаються умовами, в яких вони працюють (відхиленням напруги, її несиметрією та несинусоїдальністю), і особливо, якщо відповідні параметри набувають значень, які наближаються до граничних, наприклад, визначених стандартами. Характеристики БСК за таких умов змінюються і, як наслідок, їх вплив на живильні мережі також буде іншим в порівнянні із тим, яким би він був при симетричній, синусоїдальній напрузі номінального значення. У вузлах з несиметричною напругою вони не тільки будуть зазнавати вплив цієї напруги, але і самі впливатимуть на якість електроенергії [21, 22, 28, 29].

Керування потужністю БСК, не враховуючи рівень несиметрії напруг у вузлі їх під'єднання, може привести до технічно недопустимих результатів, наприклад, таких, коли порушуються вимоги стандарту за показниками, які регламентують якість електроенергії.

Наукових робіт, в яких вивчається вплив БСК на електричні мережі при їх під'єднанні до несиметричної напруги та які дозволяють на практиці реалізувати ефективне керування реактивною потужністю за допомогою БСК в умовах несиметрії напруг не достатньо. Кількісного аналізу (залежностей від характеристик параметрів несиметрії напруг, параметрів елементів мережі, можливих кінцевих значень такого впливу) в науковій літературі не знайдено.

Тому однією із актуальних задач, що підвищить ефективність роботи БСК, є удосконалення методів керування реактивним навантаженням та розробка математичних моделей для сучасних систем прийняття керуючого рішення, які забезпечують процес керування із врахуванням несиметрії напруг на конденсаторній установці, що дозволить виключити небажані (недопустимі) впливи на показники якості електроенергії.

ВИСНОВКИ

У роботі наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення актуальної науково-практичної задачі оптимального керування реактивним навантаженням за допомогою БСК в умовах несиметрії режиму, що дозволить знизити втрати активної потужності в мережах, не погіршуючи стан якості електроенергії за показниками, якими нормується несиметрія та відхилення напруги.

1. Існуючі методи і способи керування реактивною потужністю за допомогою БСК здійснюють керування, забезпечуючи мінімум активних втрат в мережі або необхідні рівні напруги, не враховуючи рівень несиметрії напруг в вузлі електричної мережі.

2. Зростання показників несиметрії та відхилення напруг, яке має місце при ввімкненні БСК, може досягнути значень недопустимих за ГОСТ 13109-97 або за умов експлуатації технологічного або електротехнічного обладнання. Такий вплив БСК на електричний режим потрібно враховувати в залежності від вихідного значення відхилення напруги, напруги зворотної та нульової послідовностей у вузлі під'єднання БСК, їх потужності і опору мережі.

3. Оптимальне керування реактивним навантаженням в умовах несиметрії напруг доцільно виконувати, використовуючи як критерії ефективності коефіцієнти несиметрії напруг по зворотній та нульовій послідовності (визначені як відношення відповідних напруг до напруги номінальної) або напруги зворотної та нульової послідовності, які найкраще відображають тенденції зміни збитків від несиметрії режиму.

4. Розроблено метод, за яким можуть визначатися обмеження на граничні значення параметрів, якими оцінюється несиметрія напруг, виходячи із умови допустимого нагрівання асинхронного двигуна.

5. Синтезовано цілочислові математичні моделі, які забезпечують знаходження оптимального вектора керування реактивною потужністю в умовах несиметрії напруг мережі з урахуванням впливу БСК на електричний режим.

6. Розроблено числовий метод розрахунку оптимального вектора керування, в основі якого модифікований метод динамічного програмування, який дозволяє враховувати як обмеження математичної моделі, так і післядію. Рекурентні співвідношення, за якими проводяться

розрахунки, не можуть бути використані для випадків, коли необхідно забезпечити генерацію реактивної потужності в живильну мережу.

7. Практична реалізація виконаних наукових розробок дозволить зменшити втрати активної потужності, виконати вимоги з компенсації реактивних навантажень, не порушуючи стан якості електроенергії за такими показниками як несиметрія та відхилення напруги.

8. Отримані наукові результати знайшли підтвердження при комп'ютерному моделюванні роботи системи оптимального керування реактивним навантаженням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] І. В. Жежеленко, Г. Г. Півняк, Г. Г. Трофімов, та Ю. А. Папаїка, *Реактивна потужність в електричних мережах*. Дніпро, Україна: НТУ “ДП”, 2020.
- [2] Ю. О. Варецький, *Реактивна потужність – означення та компенсація* Фізичний збірник НТШ. 1998, т. 3,
- [3] W. Hofmann, and J. Schlabbach, «Just Reactive Power Compensation,» *John Wiley & Sons*, 2012, p. 274.
- [4] Б. С. Рогальський, *Проблеми енергозбереження. Зниження втрат електроенергії в електричних мережах*. Вінниця, Україна, ВДТУ, 1996.
- [5] J. E. Miller, *Reactive power controlled in electric systems*. John Wiley & Sons, 1982.
- [6] О. Ю. Давидов, та О. В. Бялобржеський, «Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах,» *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*, № 3(62) Частина 1, с. 132-136. 2010. – ISSN 1995–0519.
- [7] В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай, та Д. А. Нікішин, «Оптимізація режимів сучасних систем електропостачання АПК,» *Вісник Харківського НТУ сільського господарства*. Харків, Вип. 164, с. 44-45. 2015.
- [8] Б. С. Рогальський, «Методи розрахунку електроспоживання і компенсуючи установок та системи управління ними (на промислових підприємствах, включаючи нерудні кар’єри).» дис. докт. техн. наук : 05.09.03 / Національна гірнича академія України. Дніпропетровськ. 1999.
- [9] A. Conejo, N. Alguacil, «Fernandes-Ruth G. Allocation of the cost of transmission losses using a radial equivalent net-work,» *IEEE Trans. PAS. Vol. 18. Pp. 1353-1356. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2003.818608>*.
- [10] L. S. Czarnecki, and P. M. Haley, «Unbalanced power in four-wire systems and its reactive compensation,» *IEEE Trans. on Power Delivery*, – vol. 30, no 1, p. 53-63. 2014.
- [11] European Smart Grids Technology Platform: vision and Strategy for Europe’s Electricity Networks of the Future. European Commission. 2006. 44 p.
- [12] G. Kron, *Diakoptics: the piecewise solution of large-scale systems*. London: MacDonald, 1963.
- [13] В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай, та Д.А. Нікішин, «Оптимізація режимів сучасних систем електропостачання,» *Вісник Харківського НТУ сільського господарства*. № 164, с. 44-45. 2015.

[14] Б. С. Рогальський, *Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління*. Ч. 1. Вінниця, Україна: ВДТУ, 2002.

[15] Б. С. Рогальський, *Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління*. Ч. 2. Вінниця, Україна: ВДТУ, 2006.

[16] Б. С. Рогальський В. М. Непийвода, П. В. Сосенко, та С. І. Вознюк, «Способи та технічні засоби керування компенсувальними установками нового технічного рівня,». *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 62-70. 2001.

[17] Н. Fujita, and Н. Akagi, «The unified power quality conditioner: The integration of series and shunt-active filters,» *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, no. 2, pp. 315-322, Mar. 1998.

[18] Ю. О. Варецький, М. Д. Федонюк, та В. Г. Гапанович, «Увімкнення конденсаторних батарей в системі електропостачання з частотно-регульованими електроприводами» *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи*. – № 707, с. 22-28. 2011. ISSN 0321–0499.

[19] V. E. Wagner, A. A. Andreshak, and J. P. Staniak, «Power quality and factory automation,» *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 26, no. 4, pp. 620-626, Jul./Aug. 1990. <https://doi.org/10.1109/28.55984>.

[20] Т. М. Червінська, «Оптимальне керування реактивним навантаженням в умовах несиметрії напруг електричних мереж» дис. канд. техн. наук, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2012.

[21] Л. Б. Терешкевич, та Т. М. Червінська, «Керування реактивною потужністю в умовах несиметрії напруги мережі,» *Промелектро*. № 5, с. 16-20. 2008.

[22] М. Й. Бурбело, Л. Б. Терешкевич, М. В. Кузьменко, та М. І. Цибульський, «Принцип симетрування електричного режиму для вузлів електричної мережі, розділених невеликим опором,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. № 3, с. 84-88. 2011.

[23] О. Г. Гриб, Г.А. Сендерович, О. М. Довгалюк, та Д. М. Калюжний, «Оцінка якості електроенергії в сільських електричних мережах,» *Вісник національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*, № 37. Том 2, с. 42-45. 2008.

[24] О. Г. Гриб, О. М. Довгалюк, та О. П. Лазуренко, «Забезпечення якості електричної енергії на спортивному комплексі «Металіст,» *Наукові праці Донецького національного технічного університету*, № 11(186), с. 107-111. 2011. – ISSN 2074–2630.

[25] Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення, ГОСТ 13109-97. Україна, 2012.

[26] Л. Б. Терешкевич, та Хінді Айман Тахер, «Математичні моделі та алгоритм оптимального управління графіком реактивної потужності промислового підприємства,» *Научные труды Кременчугского государственного политехнического университета «Проблемы создания новых машин и технологий»,* Вып. 1, с. 308-311. 2001.

[27] Л. Б. Терешкевич, та М. І. Цибульський, «Управління конденсаторними установками в системах електропостачання з урахуванням напруги у вузлах їх установки,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту,* № 6, с. 213-219. 2003.

[28] ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності, чинний з 1.10.2014. К.: Держстандарт України, 2014, 34 с.

[29] Якість електроенергії та її вплив на електроспоживання і надійність роботи електроустаткування // PATRIOT-NRG. Міжнародний портал з енергозбереження [Веб-сайт]. – Київ. – URL: <https://patriotnrg.com/content/yakist-elektroenergiyi-ta-yiyi-vplyv-na-elektrospozhyvannya-i-nadiynist-roboty> (дата звернення: 23.10.2023).

[30] Л. Б. Терешкевич, та Т. М. Червінська, «Аналіз впливу батарей статичних конденсаторів на роботу системи електропостачання з несиметричною напругою,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту,* № 2, с. 39-43. 2010.

[31] В. Г. Аввакумов, Л. Б. Терешкевич, та Т. М. Червінська, «Впливи, що здійснюються БСК на режими в системах електроспоживання,» на *III міжнародній наук.-техніч. конф. Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах,* Луцьк, 2010, с. 11-13.

[32] В. Г. Аввакумов, Л. Б. Терешкевич, та Т. М. Червінська, «Про показники для оцінювання впливу БСК на несиметрію режиму електричної мережі,» *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи,* № 666, с. 3-8. 2010. – ISSN 0321–0499.

[33] Л. Б. Терешкевич, та Т. М. Червінська, «Математична модель керування реактивною потужністю в електричних мережах з несиметричною напругою,» *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського,* № 3(62) Частина 1, с. 161-164. 2010. – ISSN 1995–0519.

[34] Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська, та М. В. Кузьменко, «Математичні моделі керування реактивною потужністю та несиметрією напруги в електричній мережі,» *Сборник научных трудов Дон-*

басского государственного технического университета, Выпуск 32, с. 406-415, 2010. ISSN 2077–1738.

[35] Л. Б. Терешкевич, та Т. М. Червінська, «Керування реактивною потужністю в умовах несиметрії напруги мережі,» *Промелектро*, № 5, с. 16-20. 2008.

[36] Л. Б. Терешкевич, та Т. М. Червінська, «Визначення граничних значень параметрів несиметрії електричного режиму із умови допустимого нагріву асинхронного двигуна,» *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, № 3, с. 28-42. 2011. – Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_3/2011-3.htm.

[37] Н. В. Терешкевич, Т. М. Червінська, та С. В. Сорокун, «Дослідження роботи асинхронного двигуна при під'єднанні його до несиметричної напруги,» на *III міжнародній. наук.-техн. конф. Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*, Луцьк, Луцький національний технічний університет. 2010. с. 187-190.

[38] Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська, та І. О. Бандура, «Дослідження впливу компенсувальних установок на додаткові втрати активної потужності від несиметрії режиму,» *Технічна електродинаміка*, № 4, с. 50-54. 2011. ISSN 0204–3599.

[39] Л. Б. Терешкевич, В. В. Захаров, та Т. М. Червінська, «Математичне моделювання керування реактивною потужністю та несиметрією режиму в електричній мережі,» на *II міжнарод. наук.-техніч. конф. Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*. – Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2008, с. 172-175.

[40] Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська, та Н. В. Терешкевич, «Керуючі впливи батареї статичних конденсаторів при її під'єднанні до вузла мережі з несиметричною напругою» на *наук. семін. Проблеми та перспективи енергозбереження комунального господарства і промислових підприємств*, Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2009, с. 148-150.

[41] Ю. О. Варецький, «Компенсація несиметрії статичними компенсаторами в мережах живлення змінних навантажень,» *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 66-70. 1998. – ISSN 0204–3599.

[42] Ю. О. Варецький, та Т. І. Наконечний, «Інтелектуальна система ідентифікації впливу компенсувальних засобів на несинусоїдний режим електричної мережі,» *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи*, № 654, с. 124-127. 2009. – ISSN 0321–0499.

[43] Z. Hanzelka, «Zastosowanie kompensatorów statycznych dla symetryzacji kompensacji asymetrycznych odbiorników energii

elektrycznej,» *Materiały konferencji “Jakość energii elektrycznej w warunkach krajowego systemu elektroenergetycznego.”* – Łódź, 1987.

[44] M. Minc, B. Czinkov, and O. Grib, «Simietrirovanje sistemy tokov triehfaznoj sieti,» *IZW Wysszych liczebnych Zavedenii.* – *Energetika*, 1984.

[45] M. Pasko, «Symetryzacja niesymetrycznego odbiornika trójfazowego zasilanego z symetrycznego źródła napięcia odkształconego za pomocą dwójników LC,» *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, "Elektryka"*. – Z. 122. – Gliwice, 1991.

[46] I. В. Жежеленко, та Ю. Л. Саєнко, *Теоретичні основи електромагнітної сумісності в системах електропостачання. Частина 2. Технічні засоби поліпшення електромагнітної сумісності: (Навч. посібник).* – К.: НМК ВО. 1993.

[47] О. Д. Музиченко, «Сучасний стан та шляхи встановлення відповідальності приймачів за погіршення якості електричної енергії,» *Технічна електродинаміка.* № 1, с. 61-65. – 1998.

[48] Ю. О. Сіротін, «Компенсація та облік реактивної потужності в електротехнічних системах з несиметричними режимами» авто-реф. дис. доктора техн. наук: 05.09.03; НТУ “ХП”, Харків, 2015.

[49] L. S. Czarnecki, «Effect of supply voltage asymmetry on IRP p-q based control of switching compensators,» *IET on Power Electronics*, vol. 3, no. 1, p. 11-17. 2010.

[50] Н. Л. Тютюнник, та Г. О. Шеїна, «Аналіз пристроїв регулювання напруги,» *Наукові праці ДонНТУ Всеукр. наук. зб. Покровськ, Серія : Електротехніка і енергетика,* № 2(23), с. 44-47. 2020.

[51] L. Cristaldi, A. Ferrero, and G. Superti-Furga, «Current decomposition in asymmetrical, unbalanced three-phase systems under nonsinusoidal conditions,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 43, issue 1, p. 63-68. 1994. DOI: 10.1109/19.286356.

[52] О. Г. Гриб, О. М. Довгалюк, та О. В. Саприка, «Ймовірність розподілу відхилення напруги в електричних мережах зовнішнього освітлення,» *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського,* № 4(63), Частина 1, с. 94-97. 2010. – ISSN 1995–0519.

[53] I. В. Жежеленко, А. К. Шидловський, Г. Г. Півняк, та Ю. Л. Саєнко, *Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник* Д. Нац. гірнич. ун-т, 2009.

[54] А. І. Купін, Ю. Г. Осадчук, О. І. Савицький, та Ю. В. Шерстньов, «До питання керування процесом компенсації реактивної потужності та підвищення якості напруги живлення підстанцій промислових підприємств,» *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* Том 33 (72), № 4, с. 149-159. 2022.

[55] Л. Б. Терешкевич, та М. І. Цибульський, «Математичні методи керування несиметрією напруг в системах електропостачання,» *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 65-67. 2006. – ISSN 0204–3599.

[56] A. Ferrero, and G. Superti-Furga, «A new approach to the definition of power components in three-phase systems under nonsinusoidal conditions,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 40, issue 3, p. 568-577. 1991. doi: 10.1109/19.87021.

[57] M. Pasko, «Dobór dwójników minimalizujących wskaźniki jakości energii elektrycznej dla układów trójfazowych zasilanych napięciem odkształconym,» *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, "Elektryka"*, z. 122, Gliwice, 1991.

[58] М. Й. Бурбело, та М. В. Кузьменко, «Умови керування двофазними симетрувальними установками,» *Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб.* – Вип. 82, с. 3-7. 2009.

[59] А. В. Журахівський, та І. В. Жежеленко, *Оптимізація режимів електроенергетичних систем: навч. посібник для вузів*. Львів – Маріуполь, Держ. ун-т “Львівська політехніка”; ПДТУ. каф. електропостачання пром. підприємств. 2000.

[60] Айман Тахер Алі Хінді, «Підвищення ефективності впровадження та керування конденсаторними установками в електричних мережах промислових підприємств.» автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси і системи». Вінниця, ВНТУ, 2004.

[61] H. Akagi, Y. Kanazava, та A. Nabae «Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components» in *IEEE Transaction Industry Applications*. 1984. Vol. 20, issue 3. P. 625-630. DOI: 10.1109/tia.1984.4504460.

[62] Ю. І. Тугай, О. Д. Демов, Д. А. Нікішин, та Ю. Ю. Півнюк, «Декомпозиція електричних мереж при оптимізації реактивних потужностей,» *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, № 50, с. 120-125. 2018.

[63] М. Й. Бурбело, Л. Б. Терешкевич, та О. В. Бабенко, «Аналіз алгоритмів керування симетрувальним трансформатором,» *Вісник Харківського національного технічного університету*, Вип. 37, с. 13-18. 2005.

[64] L. S. Czarnecki, «Constraints of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory» in *IET Power Electronics*, vol. 7, no 9, p. 2201-2208. 2014.

[65] M. Pasko, «Dobór dwójników kompensujących składową reaktancyjną prądu odbiornika liniowego zasilanego napięciem odkształconym,» *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. – "Elektryka"*, 117. – Gliwice. 1991.

[66] M. Pasko, and M. Dybek, «Komputerowe wyznaczanie struktur dwójników kompensujących składową reaktancyjną prądu źródła napięcia odkształconego zasilającego odbiornik liniowy,» *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, "Elektryka"*. – Z. 122. – Gliwice, 1991.

[67] А. В. Журахівський, та І. В. Жежеленко, *Оптимізація режимів електроенергетичних систем: навч. посібник для вузів*, Держ. ун-т “Львівська політехніка”; ПДТУ. КАФ. Львів, Маріуполь: [б. и.], 2000.

[68] О. В. Соломчак, «Методика вибору та порівняння варіантів компенсації реактивної потужності,» *Енергетика та електрифікація*, № 9, с. 23-27. 2004.

[69] А. О. Демов, О. Д. Демов, А. Ж. Войнаровський, та О. П. Паламарчук, «Особенности впровадження компенсуючих установок у електричні мережі споживачів у сучасних економічних умовах,» *Енергетика та електрифікація*, № 2, с. 12-15. 2006.

[70] І. В. Хоменко, М. Ф. Піскурьов, та І. В. Стасюк, «До питання компенсації реактивної потужності в електричних системах,» *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*, № 32, с. 71-76. 2018. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vsrudmash_2018_32_15.

[71] С. М. Балюта, В. Д. Йовбак, Л. О. Копилова, та Ю. В. Куєвда, «Компенсація реактивної потужності в системах електрозабезпечення промислових і цивільних об'єктів,» *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, Т. 27, № 4, с. 117-128. 2021. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2021_27_4_13.

[72] В. Г. Ягуп, та К. В. Ягуп, «Аналитичний метод визначення умов повної компенсації реактивної потужності в системі електропостачання,» *Електротехніка і Електромеханіка*, № 2, с. 75-80. 2024.

[73] Л. Б. Терешкевич, та І. О. Бандура, «Моделі та методи симетрування напруг та компенсації реактивної потужності в розподільних мережах енергопостачальних компаній,» Луцьк, Луцький НТУ, 107 с. 2013.

[74] І. О. Попова, «Контроль режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі,» автореф. дис. кандидата техн. наук, Мелітополь, 2003.

[75] О. В. Соломчак, «Методика вибору та порівняння варіантів компенсації реактивної потужності,» *Енергетика і електрифікація*, № 9, с. 23-26. 2004.

[76] В. Т. Заїка, та В. В. Самойленко, «Оцінка впливу відхилень напруги на рівень компенсації реактивних навантажень,» *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*, № 3(44), Частина 1, с. 100-102. 2007. – ISSN 1995–0519.

[77] О. Д. Демов, О. В. Бабенко, Л. Б. Терешкевич, та Ю. А. Шульс, «Автоматичний регулятор конденсаторних батарей,» *Патент на корисну модель № 152474 Україна, МПК G05F 1/70 (2006/01), 08.02.2023.*

[78] М. Й. Бурбело, Л. Б. Терешкевич, та О. В. Бабенко, «Пристрій для автоматичного симетрування струмів та напруг і стабілізації заданого коефіцієнта потужності трифазної системи,» *Пат 81482 Україна, МПК H02J 3/26, 2009*

[79] Б. С. Рогальський, О. Д. Демов, О. П. та О. П. Паламарчук «Автоматичний регулятор конденсаторних установок,» *Патент України No 40982, 2009.*

[80] Б. С. Рогальський, Ю. П. Войтюк, Ю. В. Грицюк, Ю. А. Лисогор, та І. П. Сосенко. «Регулятор реактивної потужності для мереж енергосистем.» *Пат. 39727 UA, МПК G05F 1/70, 2009.*

[81] П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, та Ю. Ю. Півнюк. «Автоматичний регулятор конденсаторних батарей,» *Пат. 127522 UA, МПК G05F 1/70, G05F 1/66, 2018.*

[82] П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, та Ю. Ю. Півнюк. «Автоматичний регулятор конденсаторних батарей,» *Пат. 134346 UA МПК G05F 1/00, G05F 1/70, 2019.*

[83] О. С. Яндульський, Ю. В. Щербина, О. І. Курсон, та А. В. Гнатовський. «Спосіб регулювання реактивної потужності компенсуючого пристрою,» *Пат. 40180 Україна 7 H02 J 3/18, H02 J 3/12, 2001.*

[84] Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, та С. П. Денисюк, «Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення,» *Технічна електродинаміка, № 6, с. 44-50. 2010.*

[85] Г. Г. Півняк, А. К. Шидловський, Г. А. Кігель, А. Я. Рибалко, та О. І. Хованська, *Особливі режими електричних мереж: Навчальний посібник.* Д, Україна: Національний гірничий університет, 2009.

[86] Г. Г. Півняк, Ф. П. Шкрабець, та В. П. Довгань, *Електричні машини. Навчальний посібник* Дніпропетровськ, Україна: Видавництво Національного гірничого університету, 2000.

[87] М. О. Осташевський, та О. Ю. Юр'єва, *Електричні машини і трансформатори: навч. Посібник,* В. І. Мілих. Ред. Київ, Україна: Каравела, 2018.

[88] О. Г. Пінчук, «Вплив несиметрії напруги живлення на тепловий стан асинхронного двигуна у тривалих та повторно-короткочасних режимах роботи.» дис. канд. техн. наук, Донецький національний технічний університет, Донецьк, 2008.

[89] М. М. Федоров, «Удосконалювання методів прогнозування теплового стану електродвигунів змінного струму при нестационарних

режимах їх роботи.» дис. докт. техн. наук Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2003.

[90] М. П. Яцун, Електричні машини, Львів. Україна: Львівська політехніка, 1994.

[91] М. О. Осташевський, О. М. Петренко, та О. Ю. Юр’єва, *Теплові розрахунки електричних машин*. Харків, Україна, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020.

[92] О. В. Губаревич, та І. В. Мелконова, «Імітаційне моделювання асинхронного електродвигуна для підвищення рівня діагностичних систем,» *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, № 1 (271), с. 18-22. 2022.

[93] О. І. Шеремет, та М. С. Пристінський, «Математичний опис асинхронного двигуна узагальненої електричної машини у двофазній системі координат,» *Научний вестник ДГМА*, № 2 (23Е), с. 113-117. 2017.

[94] О. В. Соломчак, В. А. Ровінський, та О. С. Возняк, «Дослідження режимів споживання реактивної потужності асинхронними електродвигунами зі змінним навантаженням,» *Промислова електроенергетика та електротехніка*, № 5, с. 33-38. 2005.

[95] О. В. Соломчак, О. С. Возняк, та М. М. Бабій, «Технологічна компенсація реактивної потужності в електроприводах штангових глибинних насосів,» *Промислова електроенергетика та електротехніка*, № 6, с. 59-63. 2006.

[96] О. В. Соломчак, «Зменшення споживання реактивної електроенергії буровими верстатами,» *Нафтогазова енергетика*, № 1, с. 104-110. 2006.

[97] L. S. Czarnecki, «Power related phenomena in three-phase unbalanced systems,» *IEEE Transaction on Power Delivery*, p. 1168-1176, 1995. doi: 10.1109/61.400893.

[98] L. S. Czarnecki, «Comments on active power flow and energy accounts in electrical systems with nonsinusoidal waveforms and asymmetry,» *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 11, issue 3, p. 1244-1250, 1996. doi: 10.1109/61.517478.

[99] A. T. Nabae, and T. A. Tanaka, «A new definition of instantaneous active – reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three – phase circuits,» *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 11, issue 3, p. 1238-1244. 1996. DOI: 10.1109/61.517477.

[100] F. Z. Peng, and J. S. Lai, «Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase systems,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 45, issue 1, p. 293-297. 1994. DOI: 10.1109/19.481350.

[101] L. S. Czarnecki «Minimization of reactive power under nonsinusoidal conditions,» *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, vol. AM-36, no 1, March, 1987.

[102] Ю. Н. Васьковський, Ю. А. Гайденко, та О. В. Нацик, «Дослідження методами теорії поля характеристик асинхронних двигунів при несиметрії параметрів ротора,» *Електротехніка і електромеханіка*, № 3, с. 19-22. 2007.

[103] О. Г. Пінчук, «Вплив несиметрії напруги живлення на тепловий стан асинхронного двигуна у тривалих та повторно-короткочасних режимах роботи.» дис. канд. техн. наук 05.09.01, Донецьк, 2007.

[104] Pirog S, «Kompensacja mocy biernej i symetryzacja cheiazeia odbioznikow tzojfazowych,» *Zeszyty Naukowe Akademia Gorniczo-Hutnicza im. Stanislaw Staszica*, № 8, pp. 38-44. 2021.

[105] О. Д. Демов, та О. П. Паламарчук, «Декомпозиція електричних мереж при розрахуванні компенсування реактивної потужності в них,» *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Електроенергетичні та електромеханічні системи*, № 637, с. 24-27. 2009.

[106] Ю. В. Лашко, М. С. Грабовський, В. Я. та Мастеровий, «Визначення і прогнозування теплового стану обмоток асинхронного двигуна,» *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*, № 3(32), с. 160-163. 2005. – ISSN 1995–0519.

[107] Л. Б. Терешкевич, та І. О. Бандура, «Математичні моделі керування несиметрією режиму у разі пріоритетного використання симетрувального пристрою для компенсації реактивних навантажень,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 69-74. 2012.

[108] О. Д. Демов, А. Б. Миндюк, та І. О. Бандура, «Розрахунок поетапного впровадження конденсаторних установок в розподільні мережі енергопостачальних компаній при дефіциті коштів,» *Новини енергетики*, № 4, с. 38-44. 2011.

[109] М. Федоров, «Удосконалювання методів прогнозування теплового стану електродвигунів змінного струму при нестационарних режимах їх роботи.» дис. докт. техн. наук, 05.09.01. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2003.

[110] M. Pasko, «Symmetrization of deformed three phase currents supplying asymmetrical receiver,» *ECCTD91*. – Lyngby, Denmark.

[111] В. К. Калініченко, «Якість електричної енергії як складова якості продукції,» *Електропанорама*, № 10, с. 21-22. 2003.

[112] В. Г. Кузнецов, О. Г. Полянський, та Н. А. Яремчук, «Узагальнений показник якості електроенергії в електричних мережах і системах,» *Технічна електродинаміка*, № 3, с. 46-51. 2011. – ISSN 0204–3599.

[113] Л. Б. Терешкевич, та М. І. Цибульський, «Математичні методи керування несиметрією напруг в системах електропостачання,» *Техн. Електродинаміка*, № 2, с. 64-67. 2006.

[114] О. Д. Демов, та О. В. Бабенко, «Моделі компенсації реактивної потужності в електричних мережах на основі просторово-часової декомпозиції,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 77-81. 2021.

[115] В. М. Дубовой, Р. Н. Кветний, О. І. Міхальов, та А. В. Усов, *Моделювання та оптимізація систем*, Вінниця, ПП «ТД» Едельвейс, 2017.

[116] Л. Б. Терешкевич, *Оптимізація режимів електроспоживання*, Вінниця, Україна, ВНТУ, 2020.

[117] Л. Б. Терешкевич, *АСУ в електроспоживанні*, Вінниця, Україна, ВНТУ, 2016.

[118] В. О. Милосердов, та Л. Б. Терешкевич, *Алгоритмізація оптимізаційних задач енергетики*, Вінниця, Україна, ВНТУ, 2004.

Електронне наукове видання

**Терешкевич Леонід Борисович
Червінська Тетяна Миколаївна**

**КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
В УМОВАХ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ
В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

Рукопис підготовлено *Л. Терешкевичем*

Оригал-макет виготовлено у РВВ ВНТУ

Підписано до видання 10.01.2025.
Гарнітура Times New Roman.
Зам. № P2025-006.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: rvv.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.