

**К. В. ЯГУП**, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; Харків, Україна; e-mail: kata3140@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/orcid.org/0000-0002-9305-8169>

**В. Г. ЯГУП**, доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри комп'ютерних систем; м. Харків, Україна; e-mail: yagup.walery@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>

## ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ ЕЛЕМЕНТІВ СИМЕТРО-КОМПЕНСУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ НЕСИМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З НУЛЬОВИМ ПРОВОДОМ

У статті досліджується можливість використання нейронних мереж у галузі підвищення енергетичних показників чотирипровідної системи електропостачання з нерівномірним навантаженням у фазах. Нерівномірне навантаження у фазах спричиняє несиметрію струмів у мережі і сприяє зростанню струму в нульовому проводі, що вкрай негативно впливає, як на саму мережу, так і на її споживачів. Для усунення несиметрії і зниження струму в нульовому проводі можна підключити симетро-компенсувальний пристрій. Такий пристрій представляє собою набір реактивних елементів, параметри яких визначаються шляхом пошукової оптимізації. Для визначення типу необхідного елемента виконується перерахунок визначених параметрів. Тобто вирішення такої задачі складається з двох складових підзавдань – структурного та параметричного синтезу. Такий підхід надає високу точність розрахунків, але має суттєвий недолік – обчислення представляються громіздкими і затратними. Задля спрощення вирішення задачі синтезу має сенс визначити тип елементів за допомогою нейронних мереж, що дозволить значно скоротити час та ресурси, що витрачаються на розрахунок величин параметрів симетро-компенсувального пристрою. Предметом дослідження статті є вивчення можливості використання нейромереж з метою прогнозування типів реактивних елементів симетро-компенсувального пристрою. У ході дослідження було визначено параметри і тип нейронної мережі, що забезпечують найточніше прогнозування топології структури симетро-компенсувального пристрою. Вхідні параметри нейромережі формувалися з наборів, що складаються з восьми параметрів – опорів та індуктивностей ліній передач і нульового дроту. Матриця цілей формувалася з множини наборів даних, що складаються з шести елементів, що містять інформацію про типи елементів, що підключаються (0 – конденсатор, 1 – індуктивність) між фазами та між фазами та нульовим проводом. У ході дослідження були отримані результати квазірішення, значення яких виявилися співрозмірними з точними розрахунками визначення структури симетро-компенсувального пристрою системи електропостачання з нульовим проводом. Це свідчить про високу якість роботи розробленої нейромережі. Застосування мінімаксної стратегії до отриманих результатів надає можливість звести отримані значення до 0 та 1, щоб забезпечити наявність отриманих нейромережею результатів.

**Ключові слова:** нейронна мережа, Байєсівська регуляризація, структурний та параметричний синтез, мінімаксна стратегія, система електропостачання з нульовим проводом.

**Вступ.** Підвищення якості електричної енергії дозволяє значно зекономити ресурси, що витрачаються на електроенергію, і тому є актуальним завданням. У даний час найбільш поширеним типом системи електропостачання є трифазна мережа з нульовим проводом. Якість електричної енергії в такій мережі значно знижується при несиметрії струмів та за наявності струму в нульовому проводі. Вирішенням такої проблеми може бути підключення спеціального симетро-компенсувального пристрою. Такий пристрій представляє собою набір реактивних елементів – конденсаторів або котушок індуктивностей, які підключаються між фазами та між фазами і нульовим проводом [1, 2]. Однак правильне визначення належного типу елемента або можливості його виключення зі схеми вимагає вирішення комплексного завдання структурного і параметричного синтезу [1, 2]. Завдання вирішується у декілька етапів. На першому етапі підключається симетро-компенсувальний пристрій, що складається з 12 елементів, де між фазами і між кожною фазою і нульовим проводом підключаються паралельно підключені конденсатор і котушка індуктивності, що шунтують один одного. Такий прийом штучного збільшення вдвічі елементів використовується для подальшого визначення кінцевого типу елемента, виходячи із значень параметрів цих

елементів після виконання оптимізації та відповідних перерахунків [2]. На наступному етапі змінюється топологія схеми симетро-компенсувального пристрою, яка складається вже не з 12, а з шести чи п'яти елементів. Якщо визначено надлишковий елемент і симетро-компенсувальний пристрій містить п'ять елементів, то виконується повторна оптимізація параметрів системи електропостачання, яка знаходить кінцеві значення параметрів встановлених реактивних елементів. Слід зазначити, що розв'язання задачі дає точне значення, але потребує великих витрат часу та ресурсів для проведення розрахунків та оптимізації при виконанні пошукової оптимізації в системі електропостачання із 12-елементним симетрувальним пристроєм. Крім того, процес є не автоматичним і вимагає втручання людини для зміни топології симетро-компенсувального пристрою. Таке завдання можна автоматизувати шляхом застосування нейронних мереж, які заздалегідь визначають необхідні типи елементів [3–11].

**Метою статті** є дослідження можливості застосування нейронних мереж для визначення типів реактивних елементів у симетро-компенсувальному пристрої трифазної системи електропостачання з нульовим проводом.

© Ягуп К. В., Ягуп В. Г., 2024



**Дослідницька стаття:** Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



**Основна частина.** На рис. 1 зображено модель чотирипровідної системи електропостачання із симетро-компенсувальним пристроєм, що створена за допомогою пакета SimPowerSystem програми MATLAB.

Нерівномірне навантаження у фазах, що задається за допомогою елементів  $z_{na}$ ,  $z_{nb}$ ,  $z_{nc}$  при відсутності симетро-компенсувального пристрою створює несиметричний режим у фазах та спричиняє зростання струму в нульовому дроті (рис. 2), що є вкрай негативним явищем як для самої мережі, так і для її споживачів.

Спеціальна програма запускаючи модель виконує оптимізацію методом Нелдера – Міда, здійснюючи пошук значень параметрів реактивних елементів симетро-компенсувального пристрою, який задовольняє такому критерію оптимізації, що струми у фазах стають симетричними, а струм у нульовому проводі дорівнює нулю. Після цього виконуються спеціальні розрахунки, що визначають типи елементів і їх значення.

Наступним етапом є заміна шунтувальних конденсаторів і котушок індуктивностей відповідним єдиним елементом із визначеним типом [1]. Такий підхід забезпечує високу точність розрахунків, однак визначення значень параметрів 12 елементів методом оптимізації займає забагато часу і ресурсів (від 800 до 5000 ітерацій).

Сучасні дослідження у сфері нейромереж надають широку можливість визначити практично одразу вихідні параметри системи [3–11]. Тому в таких розрахунках є доцільним розробити спеціальну нейронну мережу, яка б одразу визначала топологію симетро-компенсувального пристрою.

У проведеному дослідженні в якості інструменту машинного навчання побудови нейромережі було обрано спеціальний пакет Neural Network Toolbox у системі MATLAB. Цей засіб для роботи з нейромережами дозволяє моделювати нейронні мережі та корегувати їх основні параметри, застосовуючи методи Байєсівська регуляризація, метод Левенберга – Марквардта

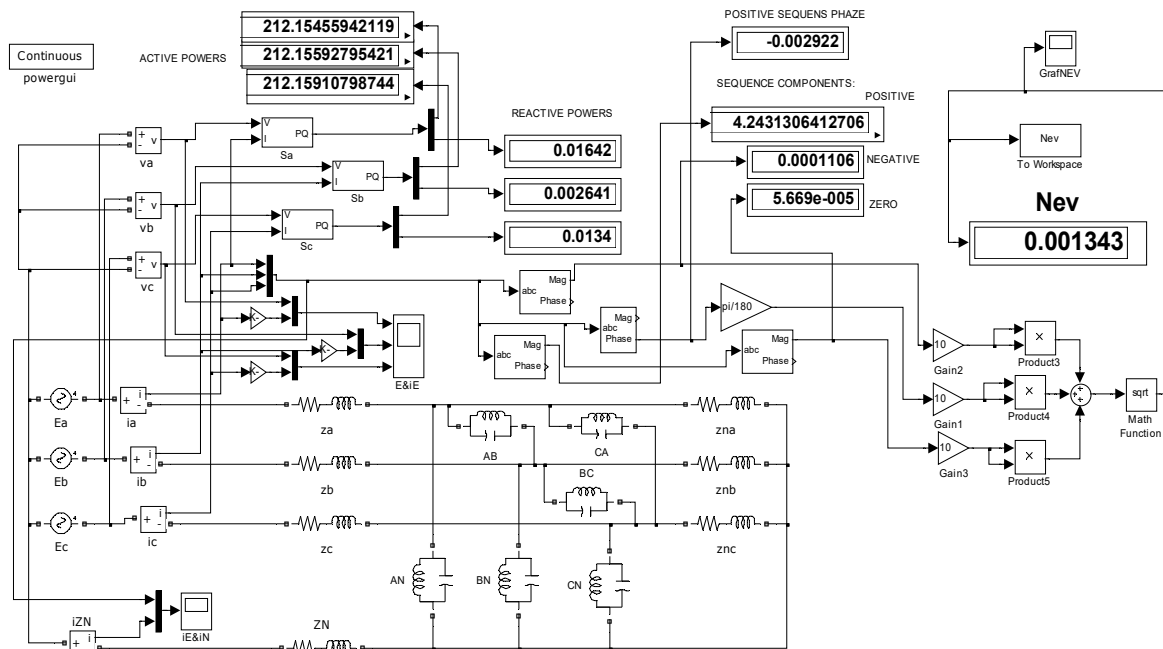


Рис. 1. Модель трифазної системи із нульовим проводом з підключеним симетро-компенсувальним пристроєм

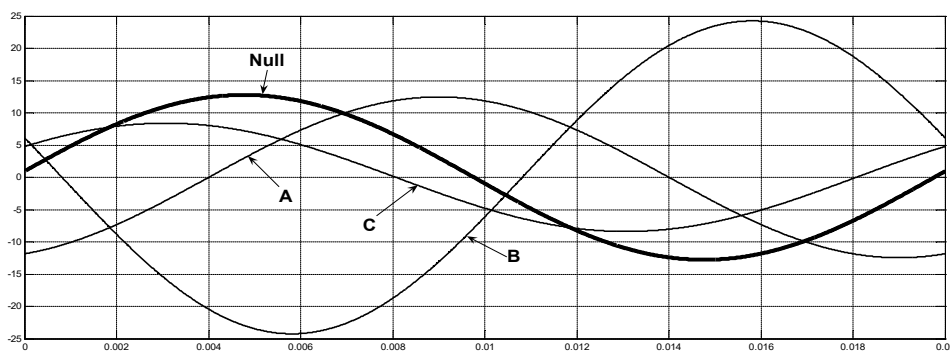


Рис. 2. Струми у фазах (A, B, C) і в нульовому проводі (Null) для несиметричного режиму

та конгруентний градієнт, що масштабується. Для тренування мережі було попередньо проведено 300 експериментів з результатами, які надали можливість сформувати кортежі вхідних та вихідних даних. Матриця вхідних даних представляє собою набір значень резисторів та котушок індуктивностей у фазах, при цьому значення навантаження в нульовому проводі залишалося незмінним. Матриця цілей представляє собою кортеж із шести значень, які приймають значення 0, якщо елемент визначений як конденсатор, і 1, якщо елемент привалює до індуктивності. Експериментальним шляхом було встановлено, що найбільш точну відповідь формує нейронна мережа, створена із застосуванням методу Байєсівської регуляризації, що складається із 22 шарів.

У табл. 1 наведено низку результатів проведених експериментів, із аномальними параметрами, які не входили до даних, при формуванні нейромережі. У другій колонці таблиці, наведені точні данні, які були отримані в результаті оптимізації і перерахунків, які визначали тип реактивного елемента. А третя колонка містить данні, отримані в результаті їх визначення за допомогою створеної нейромережі. Якщо порівнювати результати двох колонок, можна побачити закономірність, що значення елементів, визначених нейромережею, які мають бути конденсаторами значно менші тих, що мають бути представленими індуктивностями. Логічним у цій ситуації є подальше застосування мінімаксної стратегії, яка має для наявності округлювати відповідним чином отримані значення до 0 чи 1.

**Висновки.** Сформована методом Байєсівської регуляризації нейромережа надає можливість визначити топологію симетро-компенсувального пристрою, що значно скорочує час розрахунків і спрощує задачу синтезу. Для обробки результатів цільової матриці має сенс застосувати мінімаксну стратегію для округлення результатів, щодо визначення типу елемента.

#### Список використаної літератури

1. Ягуп Е. В. Определение режима компенсации реактивной мощности в четырехпроводной трехфазной системе электроснабжения с помощью поисковой оптимизации. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 60–66.
2. Ягуп К. В., Ягуп В. Г. *Моделирование та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання. Навчальний посібник*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 183 с.
3. Ягуп К. В., Ягуп В. Г. Application of Bayesian regularization for improving the quality of electrical energy in the electrical supply system. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*.

- Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ». 2023. №2 (10). С. 15–20.
4. Hu W., Liu B., Gomes J. *Strategies for Pre-training Graph Neural Networks*. URL: <https://arxiv.org/abs/1905.12265> (дата звернення: 01.11.2023).
  5. Dahl G., Jaitly N., Salakhutdinov R. *Multi-task neural networks for QSAR predictions*. URL: <https://arxiv.org/abs/1406.1231> (дата звернення: 01.11.2023).
  6. Graves A., Wayne G., Danihelka I. *Neural Turing machines*. URL: <https://arxiv.org/abs/1410.5401> (дата звернення: 01.11.2023).
  7. Haykin S. *Neural networks: A comprehensive foundation*. New York: McMillan College Publ., 1994. 696 p.
  8. Глибовець М. М., Олецкий О. В. *Штучний інтелект*. Київ: КМ Академія, 2002. 366 с.
  9. Xianjun Ni Research of Data Mining Based on Neural Networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2008. Vol. 39. P. 381–384.
  10. Wyner A. J., Olson M., Bleich J., Mease D. Explaining the success of adaboost and random forests as interpolating classifiers. *The Journal of Machine Learning Research*. 2017. Iss. 18, vol. 1. P. 1558–1590.
  11. Opper M., Archambeau C. The variational gaussian approximation revisited. *Neural Computation*. 2009. Vol. 21, iss. 3. P. 786–792.

#### References (transliterated)

1. Yagup E. V. Opredelenie rezhima kompensatsii reaktivnoy moschnosti v chetyrehprovodnoy trehfaznoy sisteme elektrosnabzheniya s pomoschyu poiskovoy optimizatsii. [Determination of reactive power compensation mode in a four-wire three-phase power supply system using search optimization]. *Tekhnichna elektrodinamika* [Technical electrodynamic]. 2016, no. 1, pp. 60–66. (In Russ.).
2. Yagup K. V., Yagup V. H. *Modeliuvannya ta optymizatsiia rezhymiv sistem enerhopostachannia ta elektrospozhyvannia. Navchalnyi posibnyk* [Modeling and optimization of modes of energy supply and electricity consumption systems. Tutorial]. Kharkiv, KhNAME after O. M. Beketov Publ., 2019. 183 p. (In Ukr.).
3. Yagup K. V., Yagup V. H. Application of Bayesian regularization for improving the quality of electrical energy in the electrical supply system. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. *Seriia: Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, management and information technologies]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 2 (10), pp. 15–20.
4. Hu W., Liu B., Gomes J. *Strategies for Pre-training Graph Neural Networks*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1905.12265> (accessed 01.11.2023).
5. Dahl G., Jaitly N., Salakhutdinov R. *Multi-task neural networks for QSAR predictions*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1406.1231> (accessed 01.11.2023).
6. Graves A., Wayne G., Danihelka I. *Neural Turing machines*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1410.5401> (accessed 01.11.2023).
7. Haykin S. *Neural networks: A comprehensive foundation*. New York, McMillan College Publ., 1994. 696 p.
8. Glybovets M. M., Oletsnyi O. V. *Shtuchnyi intelekt* [Artificial intelligence]. Kyiv, KM Akademiia Publ., 2002. 366 p. (In Ukr.).
9. Xianjun Ni Research of Data Mining Based on Neural Networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2008, vol. 39, pp. 381–384.

Таблиця 1 – Результати дослідження роботи створеної нейромережі

Вхідні параметри мережі	Значення, отримані в ході оптимізації і перерахунків	Матриця цілей
1.2 0.025 1 0.01 2 0.04 0.3 0.003	0 0 0 0 0 1	0.0847 0.0491 –0.0529 0.0196 0.2773 0.6523
1.0 0.010 5 0.07 8 0.01 0.3 0.030	0 1 0 0 0 0	–0.0731 0.6278 0.0227 0.1415 0.1817 0.2131
1.0 0.010 4 0.07 5 0.06 0.3 0.003	0 0 0 0 1 1	–0.0330 0.0621 0.0232 –0.0766 0.9714 0.2931
0.5 0.070 5 0.06 9 0.03 0.3 0.003	1 1 0 0 0 0	0.5832 1.1574 –0.0858 –0.1204 0.1654 –0.0345
0.5 0.060 5 0.07 10 0.03 0.3 0.003	0 1 0 0 0 0	0.1404 0.8871 –0.0144 0.1105 –0.1202 –0.0515

10. Wyner A. J., Olson M., Bleich J., Mease D. Explaining the success of adaboost and random forests as interpolating classifiers. *The Journal of Machine Learning Research*. 2017, iss. 18, vol. 1, pp. 1558–1590.
11. Opper M., Archambeau C. The variational gaussian approximation revisited. *Neural Computation*. 2009, vol. 21, iss. 3, pp. 786–792.

Надійшла (received) 27.05.2024

UDC 004.89

**K. V. YAGUP**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies;

Kharkiv, Ukraine; e-mail: kata3140@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9305-8169>

**V. G. YAGUP**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kharkov National Automobile and Highway University, Professor at the Department of Computer Systems; Kharkiv, Ukraine; e-mail: yagup.walery@gmail.com;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>

### APPLICATION OF A NEURONETWORK FOR DETERMINING THE TYPE OF ELEMENTS OF A SYMMETRICAL COMPENSATION DEVICE OF AN UNSYMMETRICAL SYSTEM WITH A ZERO WIRE

In article the possibility of using neural networks in the field of increasing the energy performance of a four-wire power supply system with an uneven load in the phases is being investigated. An uneven load in the phases causes asymmetry of currents in the network and contributes to the increase in the current in the neutral wire, which has an extremely negative effect on both the supply itself and its consumers. To eliminate asymmetry and reduce the current in the neutral wire, you can connect a symmetrical compensating device. Such a device is a set of reactive elements, the parameters of which are determined by search optimization. To determine the type of the required element, the defined parameters are recalculated. That is, the solution of such a problem consists of two component sub-problems – structural and parametric synthesis. This approach provides a high accuracy of calculations, but has a significant drawback: the calculations are cumbersome. In order to simplify the solution of the synthesis problem, it makes sense to determine the type of elements using neural networks, which will significantly reduce the time and resources spent on calculating the values of the parameters of the symmetrical compensating device. The subject of the article is the study of the possibility of using neural networks to predict the types of reactive elements of the symmetrical compensating device. During of the study, the parameters and type of neural network were determined, which provide the most accurate prediction of the topology of the structure of the symmetric-compensating device. The input parameters of the neural network were formed from sets consisting of eight parameters – resistances and inductances of the transmission lines and the neutral wire. The target matrix was formed from a set of data sets consisting of six elements containing information on the types of elements connected (0 – capacitor, 1 – inductance) between phases and between phases and the neutral wire. During research, the results of a quasi-solution were obtained, the values of which turned out to be commensurate with the accurate calculations for determining the structure of the symmetrical compensating device of the power supply system with a zero wire. This indicates the high quality of the developed neural network. Applying the minimax strategy to the received results provides an opportunity to reduce the received values to 0 and 1 to ensure clarity of the results obtained by the neural network.

**Keywords:** neural network, Bayesian regularization, structural and parametric synthesis, minimax strategy, zero-wire power supply system.

*Повні імена авторів / Author's full names*

**Автор 1 / Author 1:** Ягуп Катерина Валеріївна, Yagup Kateryna Valeriivna

**Автор 2 / Author2:** Ягуп Валерій Григорович, Yagup Valery Grygorovych