

I. В. ХОМЕНКО, О. А. ПЛАХТІЙ, С. П. ІГЛІН, Д. А. ШЕЛЕСТ, О. В. ДАНИЛЕЙКО

РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ «РЕЖИМ»

В статті представлений програмний комплекс для розрахунку режимів електричної мережі. Представлені теоретичні основи розрахунку, загальна інформація про програмний комплекс, рекомендації по роботі з ним. Показано, що теоретичною основою програмного комплексу є вузлові рівняння та модифікації методу Ньютона. За допомогою вузлових рівнянь модулюються різноманітні режими електричних мереж (сталі, післяварійні, обтяжливі). За допомогою нелінійних рівняння вузлових напруг описують сталий режим електричної системи при завданні нелінійних джерел струму. Рівняння вузлових напруг представлені в формі балансу потужності та матричному запису. В якості змінних при вирішенні рівнянь сталого режиму використовуються модуль і фази напруги у вузлах U і δ . Розкривається, як нелінійна систему рівнянь сталого режиму вирішується за методом Ньютона, де на кожному кроці ітераційного процесу вирішується лінеаризована система рівнянь. При цьому, контроль збіжності здійснюється по вектору небалансів. Алгоритм комп'ютерної програми реалізується за допомогою модуля вхідних масивів, базового модуля, модуля виводу результатів. Розглянуто основні умови виконання програми, що мають мінімальний склад технічних та програмних засобів. До складу технічних засобів повинен входити персональний комп'ютер. Системні програмні засоби, використовувани програмною, повинні бути представлені версією операційної системи починаючи з Windows 95 і вище. Оператор, що використовує програму, повинен мати практичні навички роботи із графічним інтерфейсом операційної системи. Базовий модуль є головним і складається з процедури обробки початкових даних та виводу інформації за бажанням користувача. Базовий модуль дозволяє оперативну виконувати зміну значень початкових даних та виконувати розрахунок з новими значеннями. Програмний комплекс дозволяє проводити розрахунки в режимі реального часу. Програма розроблена та модернізована на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет». Програмний комплекс впроваджено в навчальний процес та наукову діяльність кафедри.

Ключові слова: розрахунок режимів електричних мереж, вузлові рівняння, метод Ньютона, розрахунковий алгоритм, алгоритм програми, модуль початкових даних, програмний модуль.

I. V. KHOMENKO, O. A. PLAKHTII, S. P. IGLIN, D. A. SHELEST, O. V. DANYLEYKO

CALCULATION OF ELECTRIC NETWORK MODES IN REAL-TIME USING THE “REZHYM” SOFTWARE SUITE

The article presents a software suite for calculating the modes of an electrical network. Theoretical foundations of calculation, general information about the software suite, and recommendations for working with it are provided. It is shown that the theoretical basis of the software suite includes nodal equations and modifications of the Newton's method. Nodal equations are used to model various modes of electrical networks (steady-state, post-fault, heavy load). Nonlinear nodal voltage equations describe the steady-state operation of the electrical system with nonlinear current sources specified. The nodal voltage equations are presented in the form of power balance equations and matrix notation. In solving the equations for steady-state operation, the variables used are the magnitude and phase angles of voltage at nodes (U and δ). The article explains how the nonlinear system of steady-state equations is solved using the Newton's method, where a linearized system of equations is solved at each iteration step, with convergence control based on the vector of mismatches. The computer program's algorithm is implemented through input data module, the basic module, and the results output module. The article discusses the main conditions for running the program, which include a minimum requirement for technical resources such as a personal computer. The system software used by the program should be an operating systems starting from Windows 95 and above. The operator using the program should have practical skills in working with the graphical user interface of the operating system. The article highlights the significance of the basic module, which is the main component consisting of initial data processing procedures and information output as per the user's request. The basic module allows for real-time changes in initial data values and calculations with new values. The software suite enables calculations to be conducted in real-time. The program was developed and modernized at the Department of Electrical Power Transmission of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. The programs have been implemented in the educational process and scientific activities of the department.

Keywords: calculation of modes of electrical networks, nodal equations, Newton's method, calculation algorithm, software algorithm, initial data module, software module.

Мета та завдання дослідження. Розрахунок режимів електричної мережі є основою для її проектування та експлуатації. Питання надійності, якості та ефективності електропостачання вирішується на основі результатів цих розрахунків. Крім того, актуальні задачі з оптимізації режимів, проблеми енергозбереження, зменшення втрат та інші вирішуються завдяки таким розрахункам. Ці розрахунки проводяться на основі спеціальних математичних програм. В них відображені моделі електричної мережі (системи рівнянь) та засоби їх вирішення, як правило, це різноманітні модифікації метода Ньютона. Над розробкою такого програмного забезпечення працюють багато організацій та фахівців

як в Україні, так і за кордоном. Серед наших співвітчизників виділяються роботи інституту Електродинаміки [1], Вінницького та Харківського політехів [2, 3].

Державні установи, обленерго часто використовують програмне забезпечення досвідчених зарубіжних фірм виробників, наприклад, PowerFactory, Console, Maxwell та інші. В залежності від поставлених задач, наприклад, промислове використання чи використання в навчальному процесі, ці програми суттєво відрізняються можливостями та технічними характеристиками [4, 5].

В той же час, в останні роки, підвищився інтерес провідних фахівців до розробки теоретичних аспектів

© I. В. Хоменко, О. А. Плахтій, С. П. Іглін, Д. А. Шелест, О. В. Данилейко, 2023

цього питання [6–8]. Треба відзначити, що сьогодні питання розробки програмного забезпечення, його впровадження, освоєння та коректного використання залишається достатньо важливою та непростою науково-технічною проблемою [9–11]. В останніх публікаціях проглядається тенденція уніфікації цього питання [12]. Крім того, в умовах широкого використання нетрадиційних джерел енергії, фахівці цьому питанню приділяють особливу увагу. Справа в тому, що протягом якогось часу вузли навантаження можуть перетворюватися на вузли генерації і суттєво впливати на перерозподіл потоків потужності електричної мережі. При цьому структура електричної мережі майже не змінюється, або змінюється частково [13, 14]. Крім того, питання перспективного розвитку електричних мереж України, стає ще складнішим в зв'язку з неоднозначністю таких питань, як впровадження напруги 20 кВ або комплексної оптимізації реактивної потужності [15, 16].

Класичні методи розрахунку режимів електричної мережі часто адаптуються для спеціальних розрахунків, що мають велике практичне значення. Прикладами таких програм, таких розрахунків можуть служити методи розрахунку надійності, або рівнів вищих гармонік електричних мереж [16, 17].

Мета статті полягає в створенні ефективного, технологічного та досить доступного (на студентському рівні) програмного продукту для розрахунків режимів електричної мережі в режимі реального часу.

Основна частина. Теоретичні положення.

Теоретичною основою програмного комплексу є вузлові рівняння та модифікації методу Ньютона. За допомогою вузлових рівнянь модулюються різноманітні режими електричних мереж (сталі, післяаварійні, обтяжливі), а вирішуються вони методом Ньютона. Ця інформація використовується для керування режимами електричних мереж (ЕМ).

Нелінійні рівняння вузлових напруг описують сталий режим електричної системи при завданні нелінійних джерел струму. У схемах заміщення електричних систем нелінійні джерела струму відповідають генераторам з постійною потужністю або навантаженням споживачів, заданих статичною характеристикою або постійною потужністю. Якщо потужність навантаження споживача або генератора в вузлі k постійна, то вузловий струм, кА, дорівнює:

$$j_k(\dot{U}_k) = \frac{S_k^*}{\sqrt{3}U_k^*} \quad (1)$$

де S_k^* – постійна трифазна потужність k вузла, МВА; U_k^* – лінійна напруга k вузла, кВ; $j_k(\dot{U}_k)$ – нелінійне джерело струму, що залежить від напруги.

Рівняння вузлових напруг в формі балансу потужності та матричного запису мають вигляд:

$$U_{\text{diag}}^*(Y_y U + Y_\delta U_\delta) = S, \quad (2)$$

де U_{diag}^* – діагональна матриця k -діагонального елемента, який дорівнює парному комплексу напруги k вузла; S – вектор-стовпець, k елемент якого дорівнює парному комплексу потужності ш вузла.

Рівняння балансу потужностей для k вузла можливо отримати у вигляді:

$$\dot{\omega}_{Sk} = -Y_{kk} \dot{U}_k U_k^* - U_k \sum_{j=1}^{n+1} Y_{kj} + \dot{U}_j + S_k = 0, \quad (3)$$

де функція $\dot{\omega}_{Sk}$ відповідає небалансу потужності в k вузлі, $k = 1, \dots, n$.

В якості змінних при вирішенні рівнянь сталого режиму використовуються модуль і фази напруги у вузлах U і δ .

Рівняння балансу потужностей для k вузла при змінних U , δ можна отримати в наступному вигляді:

$$\omega_{Pk} = P_k - g_{kk} U_k^2 - U_k \sum_{j=1}^{n+1} U_j (g_{kj} \cos \delta_{kj} - b_{kj} \sin \delta_{kj}); \quad (4)$$

$$\omega_{Qk} = Q_k - b_{kk} U_k^2 - U_k \sum_{j=1}^{n+1} U_j (b_{kj} \cos \delta_{kj} + g_{kj} \sin \delta_{kj}). \quad (5)$$

Нелінійну систему рівнянь сталого режиму в спрощеному вигляді можна записати в такий спосіб:

$$W(X) = 0, \quad (6)$$

де $W(X)$ – вектор-функція порядку n ; X – вектор залежних змінних порядку n .

При вирішенні (6) за методом Ньютона на кожному кроці ітераційного процесу вирішується лінеаризована система

$$\frac{\partial W}{\partial X}(X^{(i)}) \Delta X^{(i+1)} = -W(X^{(i)}), \quad (7)$$

де матриця похідних (матриця Якобі)

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \omega_1}{\partial X_1} & \frac{\partial \omega_1}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \omega_1}{\partial X_n} \\ \frac{\partial \omega_2}{\partial X_1} & \frac{\partial \omega_2}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \omega_2}{\partial X_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \omega_n}{\partial X_1} & \frac{\partial \omega_n}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \omega_n}{\partial X_n} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Контроль збіжності здійснюється по вектору небалансів, тобто умова має виконуватися для всіх небалансів.

$$\omega_k(X^{(i)}) \leq \varepsilon \quad (9)$$

Якщо в якості змінних при розрахунку усталеного режиму було встановлено модулі і фази напруг U_k, δ_k , то

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial W_p}{\partial U} & \frac{\partial W_p}{\partial \delta} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial U} & \frac{\partial W_Q}{\partial \delta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

В (10) $\frac{\partial W_p}{\partial \delta}, \frac{\partial W_p}{\partial \delta}, \frac{\partial W_p}{\partial \delta}, \frac{\partial W_p}{\partial \delta}$ – матриці-клітини приватних похідних небалансів P і Q по модулях і фазам напруг вузлів.

Призначення комп'ютерної програми.

Призначенням комп'ютерної програми є реалізація алгоритму розрахунку нормальних режимів електричних систем.

Алгоритм комп'ютерної програми реалізується за допомогою наступних модулів:

- модуль вхідних масивів;
- базовий модуль;
- модуль виводу результатів.

Розглянемо основні умови виконання програми.

Вони мають мінімальний склад технічних засобів та мінімальний склад програмних засобів.

До складу технічних засобів повинен входити IBM-сумісний персональний комп'ютер, що включає в себе:

- процесор з тактовою частотою не менш 650 МГц;
- обсяг оперативної пам'яті не менш 512 Мб;
- вільний дисковий простір не менш 10 Мб;
- монітор;
- миша.

Системні програмні засоби, використовувани програмною, повинні бути представлені ліцензійною версією операційної системи починаючи Windows 95, та вище.

Оператор, що використовує програму, повинен мати практичні навички роботи із графічним інтерфейсом операційної системи.

Робота з програмою виконується наступним чином.

Завантаження програми здійснюється за допомогою запуску файлу skubko_pr.exe, який повинен знаходитись в папці SKUBKO.

У випадку успішного запуску програми на робочому столі буде відображене вікно програми (рис. 1).



Рисунок 1 – Головне вікно програми

Модуль вхідних даних – це один з трьох файлів початкових даних DAN.DAT, S1.DAT чи S2.DAT. В

цих файлах повинна бути інформація про лінії та вузли (рис. 2).

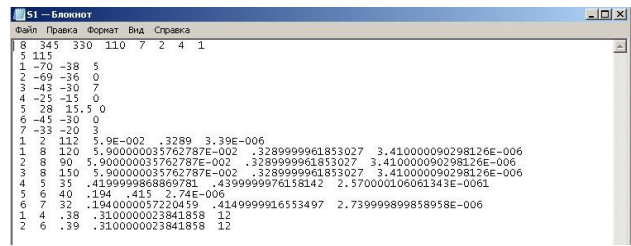


Рисунок 2 – Модуль вхідних даних

Базовий модуль є головним. Він складається з процедури обробки початкових даних та виводу інформації за бажанням користувача.

Базовий модуль дозволяє оперативно виконувати зміну значень початкових даних та виконувати розрахунок з новими значеннями. Головне меню програми представлено на рис. 3

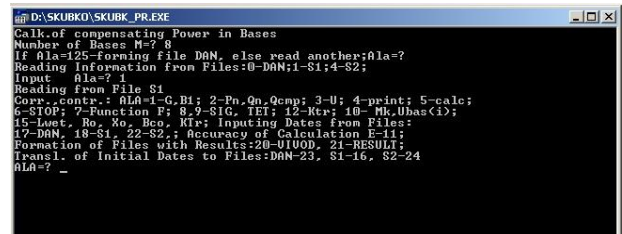


Рисунок 3 – Головне меню програми

Вивід результатів здійснюється, за бажанням користувача, у один з двох файлів даних VIVOD.DAT або RESULT.DAT. Файл вихідних даних виглядає наступним чином (рис. 4).

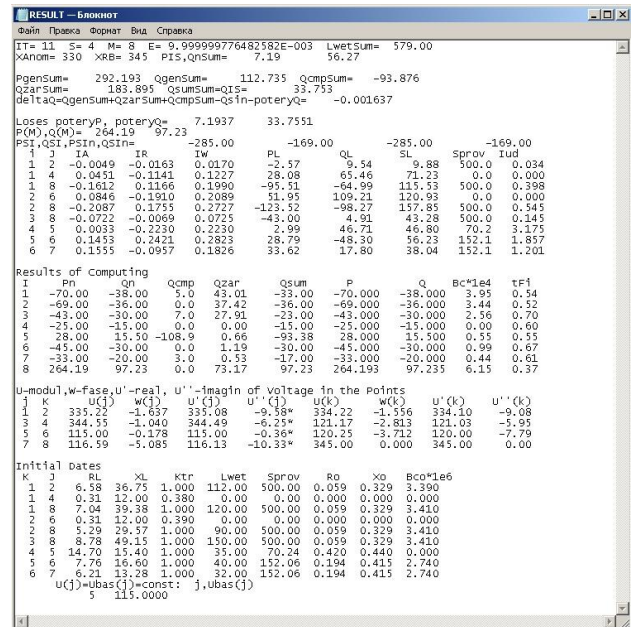



Рисунок 4 – Вивід результатів

Завершення роботи програми можливо з головного вікна програми кожним з перерахованих нижче способів:

- натисканням сполучення клавіш Alt+F4;

- натисканням кнопки ;
- вводом цифри 6 в головному меню програми.

Програма розроблена та модернізована на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет». Перші версії написані на мові Basic, останні на Python. Програми впроваджено в учбовий процес та наукову діяльність кафедри. Програмний продукт використовувався в навчальній роботі інших вузів (Український державний університет залізничного транспорту, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова та інші). На початкових етапах розвитку програмного комплексу суттєвий вклад в розробку програмного забезпечення було внесено доцентом кафедри передачі електричної енергії Скубко В. А.

Висновки. В статті розглянуті матеріали, що дозволяють освоїти основні принципи роботи з програмним комплексом «Режим». Він використовується для розрахунків нормальних режимів електричних мереж. Теоретичні засади розкривають основні принципи розрахунків. Вони базуються на вузлових рівняннях, що вирішуються методом Ньютона. Цей матеріал складає алгоритм розрахункового комплексу. Загальна характеристика програмного комплексу розкриває принципи функціонування програмного комплексу. На завершених, приведено висновки по використанню програмного комплексу, що допомагає вирішувати різноманітні науково-технічні питання.

Програмний комплекс «Режим» впроваджено в навчальний процес Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет». За його допомогою студенти старших курсів проводять розрахунки курсових та дипломних проєктів. В той же час, співробітники використовують цей програмний продукт в своїй науково-дослідній роботі. Порівняльний аналіз результатів розрахунків проведених за допомогою програмного комплексу «Режим» та іншими загально прийнятими програмами дають хороші результати збігу.

Список літератури

1. Базюк Т. М., Блінов І. В., Буткевич О. Ф. та ін. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: монографія. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
2. Лежнюк П. Д., Шулле Ю. А. Оперативне прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з використанням їх фрактальних властивостей: монографія. Вінниця: Вінницький Національний Технічний Університет, 2015. 104 с.
3. Khomenko I., Stasiuk I., Iglın S. On the influence of electromagnetic processes of power transformer on parameters of normal regime of electric network operation. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, Ukraine, 10–14 September 2018. P. 248–252. DOI: <https://doi.org/10.1109/ieps.2018.8559528>.
4. Lu C., Shi B., Wu X., Sun H. Advancing China's smart grid: phasor measurement units in a wide-area management system. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2015. Vol. 13, no. 5. P. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.1109/mpe.2015.2432372>.
5. Guerrero-Rodríguez N. F., Herrero-de Lucas L. C., de Pablo-Gómez S., Rey-Boué A. B. Performance study of a synchronization algorithm for a 3-phase photovoltaic grid-connected system under harmonic distortions and unbalances. *Electric Power Systems Research*. 2014. Vol. 116. P. 252–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.06.013>.
6. Кулик М. М., Горбулін В. П., Кириленко О. В. Концептуальні підходи до розвитку енергетики України (аналітичні матеріали). Київ: Інститут загальної енергетики Національної академії наук України, 2017. 78 с.
7. Vepryk Y. M. Ways to improve the efficiency of computer simulation of electrical systems modes based on equations in phase coordinates. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2017. No. 1. P. 63–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2017.1.10>.
8. Говоров П. П., Новський В. О., Говоров В. П., Кіндінова А. К. Керування режимами розподільних електромереж міст в умовах слабкої кореляції графіків активної та реактивної потужностей. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.060>.
9. Павловський В. В., Стелюк А. О. Оцінка впливу частотних автоматик енергоблоків атомних електростанцій на живучість та стійкість ОЕС України за частотою. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 6. С. 53–57.
10. Power Systems Research and Operation / ed. by O. Kyrylenko, A. Zharkin, O. Butkevych, I. Blinov, I. Zaitsev, A. Zaporozhets. Cham: Springer International Publishing, 2022. Vol. 388: Studies in Systems, Decision and Control. 174 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1>.
11. Буткевич О. Ф., Левконюк А. В., Стасюк О. І. Підвищення надійності моніторингу допустимості завантаження контрольованих перетинів енергосистем. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 2. С. 56–66.
12. Кириленко О. В., Сеґеда М. С., Буткевич О. Ф., Мазур Т. А. Математичне моделювання в електроенергетиці: підручник. 2-ге вид. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 608 с.
13. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В., Лесько В. О., Нетребський В. В. Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями: монографія. Вінниця: Вінницький Національний Технічний Університет, 2018. 136 с.
14. Кулапін О. В., Махотіло К. В. Моделювання смарт-мережі споживачів-просьюмерів з фотоелектричними системами. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2019. № 14 (1339). С. 61–66.
15. Шаповал І. А., Михальський В. М., Артеменко М. Ю., Поліщук С. Й., Чопик В. В. Комплекси генерування електроенергії з функціями компенсації реактивної потужності та активної фільтрації на базі машини подвійного живлення: монографія. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2020. 241 с.
16. Khomenko I., Plakhtii O., Stasiuk I. Investigation of the electromagnetic effect of asynchronous motor toothed harmonics on the operating mode of power supply systems. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 12–14 May 2020. P. 36–41. DOI: <https://doi.org/10.1109/ess50319.2020.9160261>.
17. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mykhalkiv S., Hordiienko D., Shelest D., Khomenko I. Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse width modulation. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 13–17 September 2021. P. 422–427. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek53812.2021.9570071>.

References

1. T. M. Baziuk et al., *Intelektualni Elektrychni Merezhi: Elementy Ta Rezhymy [Smart Grids: Elements and Modes]*. Kyiv: Inst. Electrodyn. Nat. Acad. Sci. Ukraine, 2016. (in Ukrainian)
2. P. D. Lezhniuk and J. A. Shulle, *On-Line Forecasting of Electric Energy Consumption Systems Electric Loads, Using Their Fractal Properties*. Vinnytsya: Vinnytsia Nat. Tech. Univ., 2015. (in Ukrainian)
3. I. Khomenko, I. Stasiuk, and S. Iglın, “On the influence of electromagnetic processes of power transformer on parameters of

- normal regime of electric network operation”, in *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, Ukraine, Sep. 10–14, 2018. pp. 248–252, doi: <https://doi.org/10.1109/ieps.2018.8559528>.
4. C. Lu, B. Shi, X. Wu, and H. Sun, “Advancing China’s smart grid: Phasor measurement units in a wide-area management system”, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 13, no. 5, pp. 60–71, Sep. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/mpe.2015.2432372>.
 5. N. F. Guerrero-Rodríguez, L. C. Herrero-de Lucas, S. de Pablo-Gómez, and A. B. Rey-Boué, “Performance study of a synchronization algorithm for a 3-phase photovoltaic grid-connected system under harmonic distortions and unbalances”, *Electric Power Systems Research*, vol. 116, pp. 252–265, Nov. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2014.06.013>.
 6. M. M. Kulyk, V. P. Horbulin, and O. V. Kyrylenko, *Kontseptualni Pidkhody Do Rozvytku Enerhetyky Ukrainy (Analytychni Materialy) [Conceptual Approaches to the Development of the Energy Sector of Ukraine (Analytical Materials)]*. Kyiv: General Energy Inst. Nat. Acad. Sci. Ukraine, 2017. (in Ukrainian)
 7. Y. M. Vepryk, “Ways to improve the efficiency of computer simulation of electrical systems modes based on equations in phase coordinates”, *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 63–66, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2017.1.10>.
 8. P. P. Govorov, V. O. Novskiy, V. P. Govorov та A. K. Kindinova, “Management of modes of distributive electric networks of cities under conditions of weak correlation of graphics of active and reactive power”, *Technical Electrodynamics*, no. 4, p. 60–66, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.060>. (in Ukrainian)
 9. V. V. Pavlovsky and A. O. Steliuk, “Influence estimation of the frequency protection of nuclear power plant units on system survivability and frequency stability of Ukrainian power system”, *Technical Electrodynamics*, no. 6, pp. 53–57, 2015. (in Ukrainian)
 10. O. Kyrylenko, A. Zharkin, O. Butkevych, I. Blinov, I. Zaitsev, and A. Zaporozhets, Eds., *Power Systems Research and Operation*, vol. 388, *Studies in Systems, Decision and Control*. Cham: Springer Int. Publishing, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1>.
 11. O. F. Butkevych, A. V. Levkonyuk, and O. I. Stasiuk, “Increasing reliability of monitoring of acceptability of loading of power system’s controlled cutsets”, *Technical Electrodynamics*, no. 2, pp. 56–66, 2014. (in Ukrainian)
 12. O. V. Kyrylenko, M. S. Sehedá, O. F. Butkevych, and T. A. Mazur, *Matematychné Modeliuvannia v Elektroenerhetytsi [Mathematical Modelling in the Electric Power Industry]*, 2nd ed. Lviv: Lviv Polytech. Publishing House, 2013. (in Ukrainian)
 13. P. D. Lezhniuk, V. O. Komar, S. V. Kravchuk, V. O. Lesko, and V. V. Netrebskyi, *Balansova Nadiimist Elektrychnoi Merezhi Z Fotoelektrychnymy Stantsiiamy [Balance Reliability of the Power Grid With Photovoltaic Power Plants]*. Vinnytsya: Vinnytsia Nat. Tech. Univ., 2018. (in Ukrainian)
 14. O. V. Kulapin and K. V. Makhotilo, “Modeling smart grid of prosumers with photovoltaic systems”, *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 14 (1339), pp. 61–66, 2019. (in Ukrainian)
 15. I. A. Shapoval, V. M. Mykhalskyi, M. Y. Artemenko, S. Yu. Polishchuk, and V. V. Chopyk, *Kompleksy heneruvannia elektroenerhii z funktsiamy kompensatsii reaktivnoi potuzhnosti ta aktyvnoi filtratsii na bazi mashyny podviinoho zhyvlyennia [Power generation complexes with reactive power compensation and active filtering functions based on a dual power supply machine]*. Kyiv: Inst. Electrodyn. Nat. Acad. Sci. Ukraine, 2020. (in Ukrainian)
 16. I. Khomenko, O. Plakhtii, and I. Stasiuk, “Investigation of the electromagnetic effect of asynchronous motor toothed harmonics on the operating mode of power supply systems”, in *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, May 12–14, 2020. pp. 36–41, doi: <https://doi.org/10.1109/ess50319.2020.9160261>.
 17. O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, S. Mykhalkiv, D. Hordiienko, D. Shelest, and I. Khomenko, “Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse width modulation”, in *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, Sep. 13–17, 2021. pp. 422–427, doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek53812.2021.9570071>.

Надійшла (received) 10.10.2023

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Хоменко Ігор Васильович (Igor Khomenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5141-5391>; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Плахтій Олександр Андрійович (Oleksandr Plakhtii) – кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1535-8991>; e-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.

Іглін Сергій Петрович (Sergii Iglin) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри прикладної математики; м. Харків, Україна; e-mail: sergii.iglin@khp.edu.ua.

Шелест Дмитро Андрійович (Dmytro Shelest) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6095-658X>; e-mail: dmytro.shelest@iee.khp.edu.ua.

Данилейко Олег Валентинович (Oleh Danyleiko) – магістрант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: oleh.danyleiko@iee.khp.edu.ua.