

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ ВІД НОМІНАЛЬНОГО ЗНАЧЕННЯ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА

*Дмитро Гречин, к. т. н., Іван Дробот, Маркіян Гошко, к. т. н.,
Орест Какула, Віталій Філіпович*

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: hrechynd@ukr.net; dim39.2017@gmail.com; m121314@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.101>

Гречин Д., Дробот І., Гошко М., Какула О., Філіпович В. Дослідження відхилення напруги від номінального значення у системі електропостачання підприємства

Під якістю електроенергії розуміють ступінь відповідності фактичних значень параметрів електроенергії значенням, зазначеним у ГОСТ 13109-97. У нашому дослідженні йдеться про відхилення напруги, нормальні значення яких становлять +5 або -5 %, а граничні – +10 або -10 % за ГОСТ 13109-97. Коливання напруги в мережі залежать від потужності джерела живлення, потужності, що втрачається під час електропередачі, та потужності електрообладнання. Найпоширенішими споживачами електроенергії є асинхронні двигуни, потужність яких пропорційна квадрату напруги, тому втрати значно більші. При втраті напруги швидкість обертання двигуна також зменшується, що спричиняє збільшення ковзання. Струм також збільшується, ефективність знижується, а ізоляція зношується швидше. При зниженні напруги пусковий момент двигуна і механічні характеристики погіршуються.

В електрообладнанні втрати напруги призводять до зниження потужності, збільшення витрат часу на технічні та виробничі процеси, а отже, до погіршення продуктивності та якості продукції. У разі зниження напруги освітлення також погіршується, оскільки світловий потік залежить від значення напруги. З підвищенням напруги ККД лампи зростає, але термін її служби зменшується.

Наше дослідження присвячене актуальним питанням експлуатації електромережі підприємства. Сучасні дослідницькі та аналітичні методи дали змогу досягти чудових результатів у різних сферах. Зокрема, програмне забезпечення MATLAB/Simulink дозволяє аналізувати різні параметри роботи електромереж у різних режимах, для розрахованого електропостачання підприємства побудувати модель системи електропостачання і на ній дослідити відхилення напруги від номінального значення.

У статті представлено побудовану модель розрахованої системи електропостачання підприємства у середовищі MATLAB/Simulink. Проведено дослідження роботи системи електропостачання на цій моделі. Моделювання проведено при зміні навантаження в межах від $0,2S_n$ до $1,2S_n$. Дослідження проведено на предмет відхилення напруги в різних точках схеми від номінального значення, для трьох випадків, при зміні коефіцієнта трансформації на трансформаторі 10/0,4 кВ, для значень 400 В, $400 \cdot 1,025$ В, $400 \cdot 1,05$ В.

Аналіз отриманих результатів показав, що схема спроектована на належному рівні, оскільки здебільшого відхилення перебувають у межах гранично допустимої норми, проте для забезпечення точнішого дотримання рівня напруги можна здійснити регулювання напруги на трансформаторі за допомогою перемикання обмотки або у першій лінії збільшити переріз проводу живлення.

Ключові слова: електропостачання, модель, напруга, гранично допустиме значення відхилення напруги.

Hrechyn D., Drobot I., Hoshko M., Kakula O., Filipovych V. Study of voltage deviation from the nominal value in the electrical supply systems of the enterprise

The quality of electricity refers to how closely the actual values of electrical parameters align with the values specified in GOST 13109-97. This study focuses on voltage deviations, which have normal values of +5% or -5% and limit values of +10% or -10%, according to GOST 13109-97. The power of the power source influences voltage fluctuations in the network, the power lost during transmission, and the power consumed by electrical equipment. Asynchronous motors are among the most common consumers of electricity, and their power consumption is proportional to the square of the voltage. This means that losses are significantly higher when voltage decreases. A drop in voltage leads to a decrease in the motor's rotational speed, which increases slippage. Additionally, current increases, efficiency declines, and insulation deteriorates faster. Lower voltage also negatively impacts the motor's starting torque and mechanical characteristics.

In electrical equipment, voltage losses result in reduced power, increased time for technical and production processes, and ultimately a decline in productivity and product quality. Furthermore, a decrease in voltage adversely affects lighting, as the luminous flux is directly related to voltage levels. While an increase in voltage enhances lamp efficiency, it can also shorten the lamp's service life.

The efficiency of converting electrical energy into other forms is partially influenced by the quality of the electricity itself. Research on electrical networks, power losses, oscillatory processes, and voltage levels continues to be relevant. Modern research methods frequently employ modeling techniques.

This work addresses significant issues associated with the operation of the company's power grid. Advances in research and analytical methods have led to impressive results across various fields. In particular, MATLAB/Simulink software facilitates the analysis of power network operating parameters under different conditions.

The article presents a model of the company's power supply system constructed in the MATLAB/Simulink environment. A study of the power supply system's operation was conducted using this model. The simulation covered load variations from 0.2Sn to 1.2Sn. The investigation focused on voltage deviations at different circuit points from the nominal value across three scenarios: when the transformer's transformation ratio is 10/0.4 kV, with values of 400 V, 400•1.025 V, and 400•1.05 V.

Analysis of the results indicates that the system has been designed satisfactorily, as most deviations remain within the maximum allowable limits. However, to achieve more precise compliance with the voltage level, voltage on the transformer can be adjusted by switching the winding, or alternatively, by increasing the cross-section of the power wire in the first line.

Keywords: power supply, model, voltage, maximum allowable value of voltage deviation.

Постановка проблеми. Під якістю електроенергії розуміють ступінь відповідності фактичних значень параметрів електроенергії значенням, зазначеним в ГОСТ 13109-97. У нашому дослідженні йдеться про відхилення напруги, нормальні значення яких становлять +5 або -5%, а граничні – +10 або -10 % за ГОСТ 13109-97. Коливання напруги в мережі залежать від потужності джерела живлення, потужності, що втрачається під час електропередачі, та потужності електрообладнання. Найпоширенішими споживачами електроенергії є асинхронні двигуни, потужність яких пропорційна квадрату напруги, тому втрати значно більші. При втраті напруги швидкість обертання двигуна також зменшується, що спричиняє збільшення ковзання. Струм також збільшується, ефективність знижується, а ізоляція зношується швидше. При зниженні напруги пусковий момент двигуна і механічні характеристики погіршуються.

В електрообладнанні втрати напруги призводять до зниження потужності, збільшення витрат часу на технічні та виробничі процеси, а отже, до погіршення продуктивності та якості продукції. У разі зниження напруги освітлення також погіршується, оскільки світловий потік залежить від значення напруги. З підвищенням напруги ККД лампи зростає, але термін її служби зменшується.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективність перетворення електричної енергії в інші види певною мірою залежить від якості самої електроенергії. Дослідження спрямовані на аналіз процесів в електричних мережах, втрат електроенергії, коливних процесів, рівня напруги тощо, зберігають актуальність. Сучасні методи дослідження ґрунтуються здебільшого на використанні моделювання [1-19].

Зміни режиму роботи притаманні енергетичним процесам, що відбуваються в електроустановках, і можуть визначатися змінними в часі значеннями основних параметрів цього процесу.

Зміна режиму роботи джерела живлення залежить від двох режимів, в яких напруга підвищується або знижується: режим мінімального навантаження і режим максимального навантаження. У першому випадку напруга в енергетичному центрі зростає, а в другому – зменшується. Зміни вихідної потужності джерела електричної енергії відбуваються в результаті реактивного або неточного регулювання реактивної потужності. Це відбувається шляхом зміни струму в обмотці збудження генератора за допомогою спеціальних пристроїв автоматичного регулювання збудження (АРЗ). Однофазні навантаження розподіляються пофазно відповідно до загальної потужності. Вплив ударних навантажень викликає великі і дуже швидкі зміни напруги у вузлах мережі.

Регулювання напруги відбувається в мережах живлення та розподілу і відбувається незалежно. Однак основне завдання регулювання напруги зовсім інше. У мережі живлення важливо зменшити втрати потужності, а в розподільчій мережі необхідно підтримувати нормовані значення відхилень напруги в з'єднаннях приймачів.

Розрізняють центральне регулювання напруги та місцеве регулювання напруги. У першому випадку регулювання напруги відбувається в центрі живлення і змінює напругу в мережі. В останньому випадку регулювання відбувається безпосередньо споживачем, а значення напруги змінюється тільки в локальній ділянці мережі. Регулювати напругу в мережі можна за допомогою спеціального обладнання та різних засобів. Регулювання коефіцієнта трансформації трансформаторів і автотрансформаторів здійснюється перемиканням контактів регулюючої гілки, яка оснащена обмоткою. Ці перемикання можна проводити, не порушуючи правил улаштування електроустановок, тобто відключаючи трансформатор від мережі або під навантаженням.

Постановка завдання. Наше дослідження присвячене актуальним питанням експлуатації електромережі підприємства. Сучасні дослідни-

цькі та аналітичні методи дали змогу досягти чудових результатів у різних сферах. Зокрема, програмне забезпечення MATLAB/Simulink дозволяє аналізувати різні параметри роботи електромереж у різних режимах, для розрахованого електропостачання підприємства побудувати модель системи електропостачання і на ній дослідити відхилення напруги від номінального значення.

Виклад основного матеріалу. Модель системи електропостачання підприємства складається із трансформатора живлення 10/0,4 та чотирьох ліній електропостачання із споживачами електроенергії. Згідно з розрахованими значеннями складаємо структурно-математичну модель у середовищі MATLAB/Simulink і вводимо параметри системи електропостачання (рис. 1).

Основними елементами моделі є споживачі енергії, що отримують живлення по

чотирьох лініях електропостачання від трьох фідерів, трансформатора 10/0,4 кВ, джерела живлення. Для проведення вимірів у моделі використовуємо вольтметри, зокрема напруги на навантаженні, спадів напруги в лініях живлення та на виході трансформатора; амперметр для виміру сумарного струму на трансформаторі.

Проведемо дослідження відхилення напруги в системі електропостачання.

Дослід передбачає проведення зміни навантаження у межах від $0,2S_N$ до $1,2S_N$ при напрузі 400 В. При цьому вимірюємо параметри: на виході трансформатора, значення напруги на навантаженні та значення струму у вторинній обмотці трансформатора, значення спаду напруги в лініях таблиці, визначаємо значення відхилення напруги від нормованого значення (табл. 1).

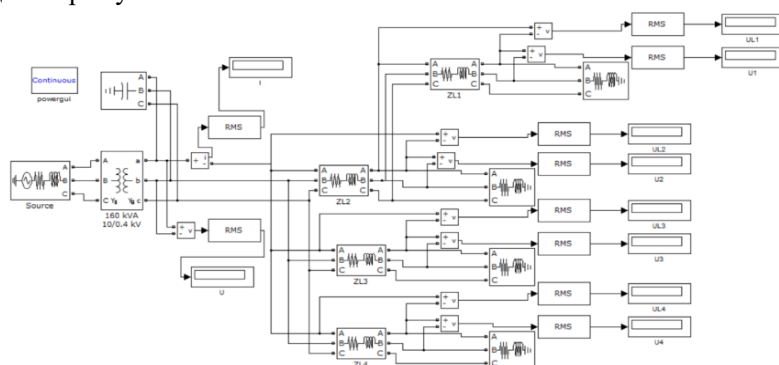


Рис. 1. Модель мережі електропостачання підприємства в середовищі MATLAB/Simulink

Fig. 1. Model of the enterprise's power supply network in the MATLAB/Simulink environment

Таблиця 1. Значення відхилення напруги на навантаженні та виході трансформатора, %

Table 1. The value of voltage deviation on the load and output of the transformer, %

| Номер лінії | Навантаження | | | | | |
|------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 0,2 S_N | 0,4 S_N | 0,6 S_N | 0,8 S_N | 1,0 S_N | 1,2 S_N |
| ΔU_1 , % | 0,79 | -0,53 | -7,11 | -5,53 | -7,89 | -10,53 |
| ΔU_2 , % | 2,89 | 1,05 | -0,79 | -2,63 | -4,47 | -6,32 |
| ΔU_3 , % | 2,89 | 0,79 | -1,05 | -2,63 | -4,74 | -6,58 |
| ΔU_4 , % | 2,89 | 0,79 | -1,05 | -2,89 | -7,37 | -6,84 |
| ΔU , % | 3,42 | 2,11 | 1,05 | -0,26 | -1,58 | -2,63 |

Після проведеного дослідження, аналізуючи значення табл. 1 та рис. 2, слід відзначити, що при зміні навантаження від $0,2S_N$ до $1,2S_N$ похибка відхилення напруги перебуває в межах від 3,42 % до -10,53 %. Основна частина значень відхилення напруги лежить у гранично допустимих межах, лише при перевантаженні у межах $1,2 S_N$, у першій лінії відхилення напруги сягає 10,53 %, що є більше гранично допустимого значення, а саме 10 %. Криві, які описують похибки в різних місцях схеми, лежать купчасто, відповідно в загальному мережа розрахо-

вана добре. Попри те, лінія перша (ряд 1) та напруга на виході трансформатора (ряд 5) відділені від основної групи кривих, а відповідно можна було б збільшити переріз лінії живлення першої для зближення цієї характеристики з іншими кривими. Це передбачає збільшення вартості мережі. При номінальному навантаженні (точка 5) відхилення напруги є в межах від -1,58 % до -7,89 %, тобто в допустимих межах. Діапазон відхилення становить сумарно 13,95 %, а в номінальному режимі 6,31%.

На трансформаторі живлення можна збільшувати або зменшувати напругу на 2,5 % чи на 5 % від номінального значення. Проводимо аналогічний дослід при збільшеному значенні напруги на 2,5 %. Результат моделювання показано в табл. 2. Після проведеного дослідження, аналізуючи значення табл. 6 та рис. 3, слід зазначити, що при зміні навантаження від $0,2S_n$ до $1,2S_n$, похибка відхилення напруги перебуває в межах від 6,05 % до -9,21 %. Усі відхилення напруги лежать у гранично допустимих межах. Криві, які описують похибки в різних місцях схеми, лежать купчасто, відповідно в загальному мережа розрахована добре. При номінальному навантаженні (точка 5) відхилення напруги є в межах від 0,53 % до -6,05 %, тобто перебуває в допустимих межах. Загальний діапазон відхилення напруги від номінальної становить

15,21%, а в номінальному режимі 6,58 %, що є більше, ніж у попередньому випадку.

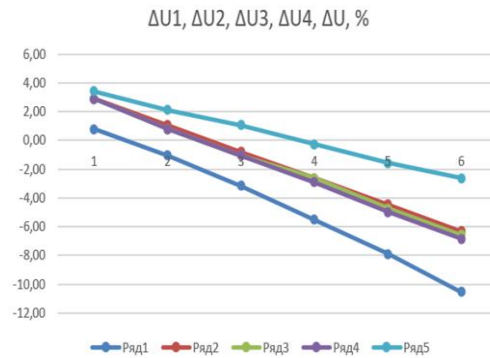


Рис. 2. Графічна залежність результату моделювання відхилення напруги від номінального значення при напрузі 400 В
Fig. 2. Graphical dependence of the simulation result of the voltage deviation from the nominal value at a voltage of 400 V

Таблиця 2. Значення відхилення напруги на навантаженні та виході трансформатора %
Table 2. The value of voltage deviation on the load and output of the transformer %

| Номер лінії | Навантаження | | | | | |
|------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 0,2 S_n | 0,4 S_n | 0,6 S_n | 0,8 S_n | 1,0 S_n | 1,2 S_n |
| $\Delta U_1, \%$ | 4,47 | 1,84 | -0,79 | -3,42 | -6,05 | -9,21 |
| $\Delta U_2, \%$ | 5,26 | 3,42 | 1,32 | -0,53 | -2,37 | -4,21 |
| $\Delta U_3, \%$ | 5,26 | 3,42 | 1,32 | -0,79 | -2,63 | -4,74 |
| $\Delta U_4, \%$ | 5,26 | 3,16 | 1,05 | -0,79 | -2,89 | -4,74 |
| $\Delta U, \%$ | 6,05 | 4,47 | 3,16 | 1,84 | 0,53 | -0,79 |

А тепер проведемо дослідження за умови збільшення напруги на 5 %. Результат проведеного дослідження показано в табл. 3.

Після проведеного дослідження, аналізуючи значення табл. 3 та рис. 4, слід зазначити, що при зміні навантаження від $0,2S_n$ до $1,2S_n$ похибка відхилення напруги перебуває в межах від 8,68 % до -6,84 %. Усі відхилення напруги лежать у гранично допустимих межах.

Криві, які описують похибки в різних місцях схеми, лежать купчасто, відповідно в загальному мережа розрахована добре. При номінальному навантаженні (точка 5) відхилення напруги є в межах від 2,63 % до -4,21 %, тобто в допустимих межах. Загальний діапазон відхилення напруги від номінальної становить

15,52%, а в номінальному режимі 6,84 %, що є більше, ніж у попередньому випадку.

Висновки. Побудовано модель системи електропостачання підприємства і проведено її дослідження на предмет відхилення напруги в різних точках схеми від номінального значення. Аналіз отриманих результатів показав, що схема спроектована на належному рівні, оскільки в основному відхилення є в межах гранично допустимої норми, проте для забезпечення точнішого дотримання рівня напруги можна здійснити регулювання напруги на трансформаторі за допомогою перемикачів обмотки або у першій лінії збільшити переріз проводу живлення.

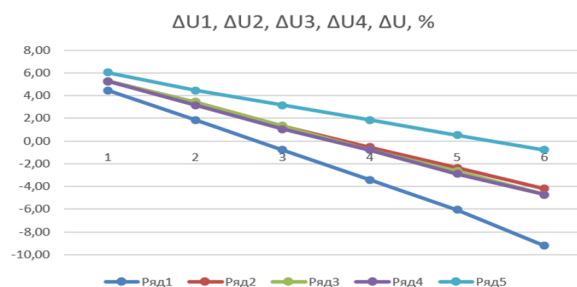


Рис. 3. Графічна залежність результату моделювання відхилення напруги від номінального значення при напрузі $400 \cdot 1,025$ В

Fig. 3. Graphical dependence of the simulation result of the voltage deviation from the nominal value at a voltage of $400 \cdot 1,025$ V

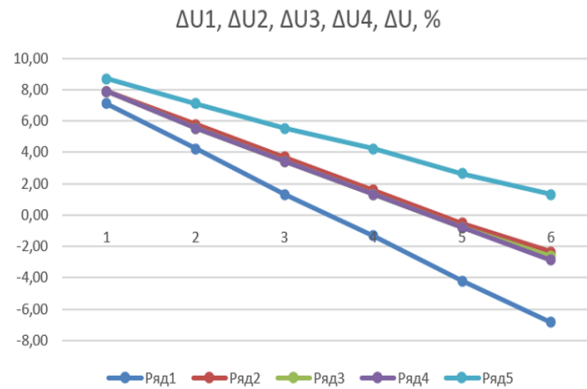


Рис. 4. Графічна залежність результату моделювання відхилення напруги від номінального значення при нарузі 400•1,05 В

Fig. 4. Graphical dependence of the simulation result of the voltage deviation from the nominal value at a voltage of 400•1.05 V

Таблиця 3. Значення відхилення напруги на навантаженні та виході трансформатора, %
Table 3. The value of voltage deviation on the load and output of the transformer, %

| Номер лінії | Навантаження | | | | | |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 0,2S _н | 0,4S _н | 0,6S _н | 0,8S _н | 1,0S _н | 1,2S _н |
| ΔU1, % | 7,11 | 4,21 | 1,32 | -1,32 | -4,21 | -6,84 |
| ΔU2, % | 7,89 | 5,79 | 3,68 | 1,58 | -0,53 | -2,37 |
| ΔU3, % | 7,89 | 5,53 | 3,42 | 1,32 | -0,79 | -2,63 |
| ΔU4, % | 7,89 | 5,53 | 3,42 | 1,32 | -0,79 | -2,89 |
| ΔU, % | 8,68 | 7,11 | 5,53 | 4,21 | 2,63 | 1,32 |

Бібліографічний список

1. Воротницький В. Э., Загорский Я. Т., Апрыткин В. Н. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. *Электрические станции*. 2000. № 5. 154 с.
2. Галанов В. П., Галанов В. В. Влияние качества электроэнергии на уровень ее потерь в сетях. *Электрические станции*. 2001. 63 с.
3. Гоголюк О. П. Дослідження електропередачі в сучасних комп'ютерних середовищах. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. № 671. С. 24-31.
4. Гречин Д., Дробот І. Дослідження відхилень напруги у мережі електропостачання підприємства при експлуатації електрообладнання. *Вісник Львівського національного університету природокористування: агроінженерні дослідження*. 2023. № 27. С. 61-69.
5. Золотарев М. В., Обозный А. Л. Новые отечественные разработки в области силовых кабелей. *Вісник НТУ ХПИ*. 2006. Вип. 34. С. 129-132.
6. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины / В. В. Лях, В. М. Молчанов, И. В. Судакова, И. В. Павличенко. *Электрические сети и системы*. 2009. № 3. С. 16-21.
7. Левонюк В. Порівняльний аналіз математичних моделей перехідних електромагнітних процесів в елементах електроенер-

гетичних систем. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2016. № 20. С. 155-161.

8. Математическая модель электрической напряженности изолированных жил силовых кабелей / В. В. Золотарев, В. П. Карпушенко, А. А. Науменко, С. В. Бузько. *Физические и компьютерные технологии: тр. 12 Междунар. науч.-техн. конф. Харьков: ХНПК «ФЭД»*, 2006. С. 239-240.

9. Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу / А. В. Чабан, В. Р. Левонюк, І. М. Дробот, А. Ф. Герман. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 3. С. 30-35.

10. Основи електропостачання агропромислового комплексу: навч. посіб. / Б. В. Дурняк, В. О. Чумакевич, І. М. Лях, А. М. Яцун. Львів: Укр. акад. друкарства, 2017. 544 с.

11. Стабілізація напруги вузла електричного навантаження за допомогою двоопераційних тиристорів / А. Чабан, Є. Федів, О. Сівакова, І. Дробот. *Вісник Львівського національного університету природокористування: агроінженерні дослідження*. 2022. № 26. С. 101-108.

12. Чабан А., Левонюк В. Аналіз неусталених електромагнітних процесів у фрагменті електроенергетичної системи на основі класичних підходів до моделювання. *Вісник Львівського національного аграрного універси*

тету: агроінженерні дослідження. 2017. № 21_С. 167-177.

13. Шестеренко В. Є. Системи ефект-роспоживання та електропостачання промислових підприємств: підручник. Вінниця: Нова кн., 2004. 656 с.

14. Щерба А. А., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Электромагнитные процессы в кабельной линии с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ. *Техн. електродинаміка*. 2013. № 1. С. 9-15.

15. An application of the Hamilton-Ostrogradsky principle to the modeling of an asymmetrically loaded three-phase power line / A. Chaban, M. Lis, A. Szafraniec, V. Levoniuk. *Energies*. 2022. Vol. 15, issue 21. P. 8255 – 8273. doi: org/10.3390/en15218255.

16. Including shield wires in the analysis of transient processes occurring in HVAC transmission lines / A. Chaban, A. Popenda, A.

Szafraniec, V. Levoniuk. *Energies*. 2023. Vol. 16, issue 23. P. 7870-7889. doi: 10.3390/en16237870.

17. Mathematical Modelling of Transient Processes in a Three Phase Electric Power System for a Single Phase Short-Circuit / A. Chaban, M. Lis, A. Szafraniec, V. Levoniuk. *Energies*. 2022. Vol. 15, issue 3. P. 1126-1143. doi: 10.3390/en15031126.

18. Mathematical Modeling of Transient Processes in the Susceptible Motion Transmission in a Ship Propulsion System Containing a Shaft Synchronous Generator / A. Chaban, T. Perzyński, A. Popenda, R. Figura, V. Levoniuk. *Energies*. 2022. Vol. 15, issue 9. P. 3266-3274.

19. Perzynski T., Levoniuk V., Figura R. Transient Electromagnetic Processes Analysis in High Voltage Transmission Lines during Two-Phase Short Circuits. *Sensors*. 2023. No 1. P. 298. doi: 10.3390/s23010298.

Стаття надійшла 15.07.2024