

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ
В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

УДК 621.311.1

**АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ
З ГРОЗОЗАХИСНИМИ ТРОСАМИ ПІД ЧАС КЕРОВАНОЇ КОМУТАЦІЇ**

Віталій Левонюк, к. т. н., доцент

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н,
Львівська обл., Україна,
e-mail: vitaliy_levoniuk@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.051>

Левонюк В. Аналіз перехідних процесів у лінії електропередачі з грозозахисними тросами під час керованої комутації

У статті здійснено аналіз наукових публікацій, які стосуються дослідження перехідних процесів в елементах електротехнічних систем пересилання енергії під час керованих комутацій електричними та газовими вимикачами. Аналіз показав, що питання дослідження перехідних процесів під час керованих комутацій є актуальним, однак недостатньо розкритим щодо перехідних процесів у грозозахисних тросах.

Розроблено математичну модель фрагмента електротехнічної системи пересилання енергії, ключовим елементом якого є довга лінія електропередачі з грозозахисними тросами надвисокої напруги з урахуванням розподіленості параметрів. Розроблена математична модель ґрунтується на рівнянні довгої лінії з частинними похідними другого порядку. Для розв'язку згаданого рівняння запропоновано використати крайові умови Неймана та Пуанкаре. Рівняння довгої лінії з частинними похідними другого порядку розв'язуються методом прямих з використанням поняття центральної похідної. Здійснено пошук напруг у фіктивних вузлах лінії електропередачі та представлено їх вигляд для фазних проводів у кінці лінії електропередачі та грозозахисних тросів на початку та кінці лінії електропередачі. На основі розробленої математичної моделі написано програмний код алгоритмічною мовою програмування *Visual Fortran*, з допомогою якого здійснено два числових експерименти. У першому експерименті досліджувалися перехідні процеси у лінії електропередачі без урахування керованої комутації, а в другому – з урахуванням. Представлено результати комп'ютерної симуляції перехідних електромагнітних процесів у фазних провадках лінії та грозозахисних тросах у вигляді рисунків, які аналізуються. Функціональні залежності, які на осцилограмах позначено жовтим кольором стосуються фази А, зеленим – фази В та червоним – фази С.

Ключові слова: перехідні електромагнітні процеси, керована комутація, довга лінія, грозозахисні троси, математична модель, крайові умови.

Levoniuk V. Analysis of transient processes in a power transmission line with lightning protection cables during controlled switching

The article analyzes scientific publications related to the study of transient processes in the elements of electrotechnical systems of energy transmission during controlled commutations by electric and gas switches. The analysis shows that the issue of researching transient processes during controlled switching is relevant, but insufficiently explored with respect to transient processes in lightning protection cables.

The author has developed a mathematical model of a fragment of an electrotechnical energy transmission system with the key element of which is a long power transmission line with lightning protection cables of ultra-high voltage, taking into account the parameters distribution. The developed mathematical model is based on the equation of a long line with partial derivatives of the second order. Neumann and Poincaré boundary conditions are proposed to solve the mentioned equation. Equations of a long line with second-order partial equations are solved by the method of straight lines using the concept of the central derivative. The search for voltages in fictitious nodes of the power transmission line was carried out and their appearance was presented for the phase wires at the end of the power transmission line and lightning protection cables at the beginning and end of the power transmission line. Based on the developed mathematical model, a program code was written in the algorithmic programming language *Visual Fortran*, with the help of which two numerical experiments were carried out. In the first experiment, transient processes in the power transmission line were studied without considering the controlled switching, and in the second – with it. The results of the computer simulation of transient electromagnetic processes in the phase wires of the line and lightning protection cables are presented in the form of drawings that are analyzed. Functional dependences marked in yellow on the oscillograms refer to phase A, green to phase B, and red to phase C.

Key words: transient electromagnetic processes, controlled switching, long line, lightning protection cables, mathematical model, boundary conditions.

Постановка проблеми. Починаючи з 80-х років минулого століття електротехнічні компанії у якості ізоляційних матеріалів взяли на озброєння елегаз. Йому швидко знайшли застосування в комутаційних апаратах через його надзвичайно хороші діелектричні властивості. Сьогодні у високорозвинених та економічно лідируючих країнах вже неможливо зустріти електричні комутаційні апарати з такими ізоляційними матеріалами, як олива чи повітря. Зміни торкнулися й електричних мереж України. Попри наявність великої кількості старих вимикачів, українські електричні мережі надзвичайно швидкими темпами переходили на елегазові вимикачі, особливо це стосується мереж надвисокої напруги. Це пов'язано з багатьма факторами, найголовнішим із яких є відсутність запасних частин, які необхідні для ремонту старих вимикачів, адже їх виготовлення вже давно зупинили [1]. У довоєнний період модернізація відбувалася швидкими темпами. Старі повітряні вимикачі, які вийшли з ладу, замінювали новими елегазовими, під час реконструкції та зведенні нових підстанцій встановлювалися тільки елегазові вимикачі, а в післявоєнний період і поготів буде шалене впровадження цієї техніки в електричних мережах України, адже вони зазнали великих руйнацій внаслідок енергетичного терору зі сторони агресора.

Сучасні елегазові вимикачі високих та надвисоких напруг комплектуються пристроями керованої комутації. Ці пристрої виконуються на основі механізмів та електронних систем, які виконують чітко визначені керовані дії, щоб забезпечити безпечне та ефективне комутування струму, шляхом керування рухом контактів при увімкненні/вимкненні вимикача. Окрім цього, здійснюється контроль за швидкістю і послідовністю замикання/розмикання контактів, моніторинг струму і напруги під час комутації, регулювання демпфування та інші параметри для забезпечення стабільної і надійної комутації струму.

Керування увімкненням та вимкненням вимикачів відбувається схоже, різниця полягає лише в тому, що увімкнення відбувається, коли синусоїда напруги набуває нульового значення, а вимкнення – коли синусоїда струму знаходиться в околі нуля. Ці моменти часу, коли напруга або струм перетинають нульову лінію, називаються «нульовим перетином» або «нульовим кросом». Застосування керованої комутації дає змогу уникнути виникнення великих перенапруг та дугових розрядів (ву дугогасильних камерах вимикачів), які можуть виникати при комутації великих струмів.

Основною метою керованої комутації є уникнення перехідних процесів. З точки зору фізики, перехідні процеси – це перерозподіл нако-

пиченої енергії в ємнісних та індуктивних елементах системи щоразу, коли відбувається зміна її стану. Таким чином, керована комутація є методом оптимізації моменту перемикачів, що призводить до мінімального перерозподілу енергії [12].

Керована комутація має вагомe значення у високовольтних системах, оскільки важливо уникати перенапруг, коливань і потенційно шкідливих ефектів при вмиканні струму. Використання керованої комутації призводить до покращання якості електричного захисту, знижує згенеровані шуми і завади, а також захищає електричні пристрої від надмірного зношування.

Наші останні праці [2; 6; 7] стосувалися дослідження впливу аварійних режимів роботи ліній електропередач надвисокої напруги на перехідні процеси у грозозахисних тросах лінії. Під час проведення числових експериментів було помічено, що при виникненні аварійних станів, у грозозахисних тросах лінії індуктувалися струми. Це пов'язано з несиметричним режимом роботи лінії електропередачі. Тепер, якщо покроково проаналізувати кероване вмикання лінії, яке відбувається пофазно, з почерговим увімкненням фаз лінії, то виходить, що під час вмикання лінії присутні несиметричні режими її роботи, зокрема спочатку однофазний, пізніше двофазний, а вже після комутації третьої фази настане симетричний режим роботи. Ми вирішили більш детально дослідити це питання, тому основним лейтмотивом нинішньої праці є дослідження перехідних процесів у лінії електропередачі надвисокої напруги з грозозахисними тросами при керованому увімкненні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цілком очевидно, що проведення натурних експериментів на таких об'єктах, як лінії електропередач надвисоких напруг, є неможливим, а поготів у нинішній воєнний період, через значну стратегічну важливість об'єкта. Тому ми свої дослідження будемо здійснювати на основі математичного моделювання. У науковій літературі є велика кількість робіт, присвячених дослідженню перехідних електромагнітних процесів у лініях електропередач, розглянемо деякі з них, близькі до нинішньої праці.

У статті [9] докладно описано теорію керованої комутації вимикачів змінного струму (HVAC), які використовуються сьогодні. Обговорюються переваги контрольованого перемикачів та наводяться приклади осцилограм напруг і струмів із практичного застосування керованої комутації шунтувальних конденсаторів, шунтувальних реакторів, трансформаторів та ліній електропередач. Також представлено рекомендації з вибору оптимального часу перемикачів для

зменшення тривалості перехідних процесів.

У публікації [10] представлено результати аналізу різних варіантів увімкнення та вимкнення трансформаторів та шунтових реакторів. Зокрема, розкрито всі можливі варіанти, включаючи групи і схеми з'єднань трансформаторів, та представлено результати комп'ютерних симуляцій. Також автори статті дають свої рекомендації з використання керуваної комутації вимикачів.

У праці [16] представлено результати детального аналізу проблеми хибної керуваної комутації елегазового вимикача. Аналіз проводиться на основі реальних даних, отриманих із ресстратора вимикача. Автор представив недоліки налаштування системи та показав результати після виправлення помилок у налаштуванні.

Також існують роботи, які присвячені дослідженню керуваних комутацій на основі розроблених математичних моделей з використанням відомих програмних комплексів, таких як *MATLAB/Simulink*, *PSCAD* та *EMTP-RV*.

Авторами статті [4] запропоновано методологію проведення керуваної комутації для зменшення перенапруг та ударних струмів під час увімкнення не скомпенсованих шунтувальними реакторами ліній електропередач. Ефективність методології оцінювалася шляхом проведення комп'ютерних симуляцій фрагмента електричної мережі 400 кВ у програмному комплексі *PSCAD/EMTDC*. Встановлено, що запропонована методика дає змогу зменшити перенапруги та ударні струми на 33 %.

У праці [17] досліджувалися перехідні процеси, які спричинені керуваною та некеруваною комутацією контурів високої напруги. Представлено перехідні процеси при увімкненні та автоматичному повторному увімкненні лінії електропередачі 400 кВ. Також досліджувалися перехідна відновлювальна напруга та розподіл напруги між контактами вимикача. Дослідження проводили на розроблених математичних моделях у програмному комплексі *EMTP-RV*. Отримані результати показали, що керувана комутація значно зменшує пускові струми та зменшує комутаційні перенапруги.

У праці [11] пропонується детальна модель вимикача високої напруги. Ця модель враховує не лише зміну діелектричної міцності міжконтактного проміжку, а й швидкість цієї зміни, що суттєво впливає на відтворення перехідних комутаційних процесів під час їх моделювання. Модель також враховує явище повторного запалювання дуги та вплив фізичних параметрів, які можуть змінити час роботи первинних та допоміжних контактів. Цю математичну модель розроблено в програмному комплексі *PSCAD*.

У статті [8] в програмному комплексі *MatLab/Simulink* розроблено структурно-матема-

тичну модель для дослідження перехідних процесів під час керуваних комутацій елементів електричних мереж високої напруги. Представлено результати комп'ютерних симуляцій перехідних процесів під час близьких та віддалених коротких замикань. Дано рекомендації із застосування керуваної комутації.

У статті [13], на підґрунті викладеної теорії керуваної комутації, у програмному комплексі *MatLab/Simulink* розроблено математичну модель вимикача надвисокої напруги. Було проаналізовано перехідні процеси під час увімкнення лінії з різними видами навантаження та при комутації струмів коротких замикань залежно від місця їх виникнення (близькі чи віддалені). Отримані результати комп'ютерної симуляції повністю підтвердилися проведеними натурними експериментами, а запропоновані рекомендації впроваджено у використання на електричній станції.

Авторами статті [15] у програмному комплексі *MatLab/Simulink* розроблено модель частини електроенергетичної системи. Досліджено перехідні процеси при різних режимах роботи, включаючи аварійні. Окремо розглядається питання керуваних комутацій при вимкненні коротких замикань та представлено результати порівняння отриманих симуляцій з реальними осцилограмами перехідних процесів.

Аналіз доступної літератури показав, що питання дослідження перехідних процесів під час керуваних комутацій є актуальним і цікавить науковців, однак аналізу впливу керуваної комутації на перехідні процеси у грозозахисних тросах уваги приділено недостатньо. Тому це питання потребує додаткового вивчення.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи є дослідження впливу керуваного увімкнення лінії електропередачі надвисокої напруги з грозозахисними тросами на перехідні процеси, які протікають у цій лінії.

Виклад основного матеріалу. Ми вже згадували, що дослідження перехідних процесів будемо здійснювати на основі математичного моделювання. Тому представимо розробку математичної моделі досліджуваного фрагмента електротехнічної системи пересилання енергії.

На рис. 1 представлено заступну схему фрагмента досліджуваної електротехнічної системи пересилання енергії. Цей фрагмент складається з лінії електропередачі, яка представлена як лінія з розподіленими параметрами з урахуванням двох грозозахисних тросів, яка працює на еквівалентоване симетричне активно-індуктивне навантаження. Лінія електропередачі представлена як п'ятипровідна – грозозахисні

троси $T1$, $T2$ та фази A , B , C . Еквівалентоване активно-індуктивне навантаження представлено активними опорами r_H та індуктивностями L_H . До початку лінії електропередачі прикладається

напруга живлення. Грозозахисні троси $T1$ та $T2$ з'єднані між собою у кінці лінії та розімкнені на її початку, тобто утворюють розімкнений контур із заземленням троса $T2$ на початку лінії.

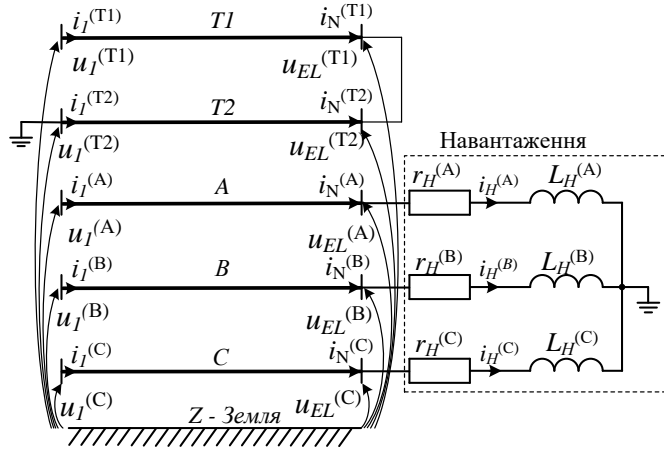


Рис. 1. Заступна схема фрагмента досліджуваної електротехнічної системи пересилання енергії
Fig. 1. Substitute diagram of the studied electrotechnical system of energy transmission

Використавши основні закони електротехніки, можемо записати рівняння електромагнітного стану досліджуваного об'єкта:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\mathbf{LC})^{-1} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} - (\mathbf{Lg} + \mathbf{rC}) \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mathbf{rgu} \right), \quad \frac{d\mathbf{i}_H}{dt} = \mathbf{L}_H^{-1} (\mathbf{u}_{EL}^H - \mathbf{r}_H \mathbf{i}_H). \quad (1)$$

У першому рівнянні (1) координатами режиму є вектори напруг відносно землі та струмів тросів і фаз лінії з розподіленими параметрами як функції від відстані x та часу t , вони мають вигляд:

$$\mathbf{u} = \text{colon}(u^{(T1)}, u^{(T2)}, u^{(A)}, u^{(B)}, u^{(C)}), \quad \mathbf{i} = \text{colon}(i^{(T1)}, i^{(T2)}, i^{(A)}, i^{(B)}, i^{(C)}), \quad (2)$$

а матриці з погонними параметрами лінії електропередачі мають такий вигляд:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{T1} & M_{TT} & M_{TF} & M_{TF} & M_{TF} \\ M_{TT} & L_{T2} & M_{TF} & M_{TF} & M_{TF} \\ M_{FT} & M_{FT} & L_A & M_{FF} & M_{FF} \\ M_{FT} & M_{FT} & M_{FF} & L_B & M_{FF} \\ M_{FT} & M_{FT} & M_{FF} & M_{FF} & L_C \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C1 & -C_{TT} & -C_{TF} & -C_{TF} & -C_{TF} \\ -C_{TT} & C1 & -C_{TF} & -C_{TF} & -C_{TF} \\ -C_{FT} & -C_{FT} & C2 & -C_{FF} & -C_{FF} \\ -C_{FT} & -C_{FT} & -C_{FF} & C2 & -C_{FF} \\ -C_{FT} & -C_{FT} & -C_{FF} & -C_{FF} & C2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_{T1} + r_Z & r_Z & r_Z & r_Z & r_Z \\ r_Z & r_{T2} + r_Z & r_Z & r_Z & r_Z \\ r_Z & r_Z & r_A + r_Z & r_Z & r_Z \\ r_Z & r_Z & r_Z & r_B + r_Z & r_Z \\ r_Z & r_Z & r_Z & r_Z & r_C + r_Z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} G1 & -g_{TT} & -g_{TF} & -g_{TF} & -g_{TF} \\ -g_{TT} & G1 & -g_{TF} & -g_{TF} & -g_{TF} \\ -g_{FT} & -g_{FT} & G2 & -g_{FF} & -g_{FF} \\ -g_{FT} & -g_{FT} & -g_{FF} & G2 & -g_{FF} \\ -g_{FT} & -g_{FT} & -g_{FF} & -g_{FF} & G2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C1 = C_{T1T2} + 3C_{TF} + C_{TZ}, \quad C2 = 2C_{FT} + 2C_{FF} + C_{FZ}, \quad G1 = g_{T1T2} + 3g_{TF} + g_{TZ}, \quad G2 = 2g_{FT} + 2g_{FF} + g_{FZ}. \quad (4)$$

де $u^{(T1)}$, $u^{(T2)}$, $u^{(A)}$, $u^{(B)}$, $u^{(C)}$ – напруги грозозахисних тросів $T1$, $T2$ відносно землі та фазні напруги фаз A , B , C відповідно; $i^{(T1)}$, $i^{(T2)}$, $i^{(A)}$, $i^{(B)}$, $i^{(C)}$ – струми грозозахисних тросів $T1$, $T2$ та проводів фаз A , B , C відповідно; L_{T1} , L_{T2} , L_A , L_B , L_C – погонні індуктивності грозозахисних тросів $T1$, $T2$ та проводів фаз A , B , C відповідно; M_{TT} , M_{FT} , M_{FF} – погонні коефіцієнти взаємодукції «трос-трос», «трос-фаза», «фаза-фаза» відповідно; R_{T1} , R_{T2} , R_A , R_B , R_C , R_Z – погонні опори грозозахисних тросів $T1$, $T2$, проводів фаз A , B , C та землі відповідно; C_{TT} , C_{TF} , C_{FF} , g_{TT} , g_{TF} , g_{TF} – ємності та провідності між грозозахисними тросами, між грозозахисними тросами і фазними проводами та між фазними проводами відповідно.

У другому рівнянні (1) вектори напруг, струмів та матриці погонних параметрів мають такий вигляд:

$$\mathbf{i}_H = \text{colon}(i_H^{(A)}, i_H^{(B)}, i_H^{(C)}), \mathbf{u}_{EL}^H = \text{colon}(u_{EL}^{(A)}, u_{EL}^{(B)}, u_{EL}^{(C)}),$$

$$\mathbf{r}_H = \text{diag}(r_H^{(A)}, r_H^{(B)}, r_H^{(C)}), \mathbf{L}_H = \text{diag}(L_H^{(A)}, L_H^{(B)}, L_H^{(C)}), \quad (5)$$

де $i_H^{(A)}, i_H^{(B)}, i_H^{(C)}$ – фазні струми гілок еквівалентованого активно-індуктивного навантаження; r_H, L_H – активні опори та індуктивності фазних гілок еквівалентованого активно-індуктивного навантаження.

Рівняння (1) описують електромагнітний стан досліджуваного фрагмента електротехнічної системи пересилання енергії. Перше рівняння в (1) описує перехідні хвильові електромагнітні процеси у довгій лінії електропередачі з розподіленими параметрами. Воно представлено як диференціальне рівняння з частинними похідними другого порядку. Для його розв'язку потрібно мати крайові умови, зокрема напруги на початку та в кінці лінії електропередачі. У нашому випадку напруги фазних проводів на початку лінії електропередачі є заданими функціями, ці напруги виступають крайовими умовами першого роду. Щодо напруг грозозахисних тросів на початку і в кінці лінії та напруг фазних проводів у кінці лінії, то вони є невідомими, що спричинено конфігурацією з'єднання грозозахисних тросів та фазних проводів лінії з іншими елементами досліджуваного фрагмента електротехнічної системи пересилання енергії. Для пошуку цих напруг ми пропонуємо використати крайові умови другого та третього родів. Щодо другого рівняння в (1), то це звичайне диференціальне рівняння. Його розв'язок здійснюється будь-яким числовим методом без зайвих труднощів.

Детальніше ознайомитися з процедурою пошуку крайових умов до диференціального рівняння довгої лінії з частинними похідними для задач подібного плану можна, наприклад, у таких наших працях [5; 14]. Задля уникнення перевантаження статті математичними виведеннями ми лише представимо ключові етапи та результати пошуку крайових умов.

Як крайову умову до першого рівняння в (1) ми пропонуємо використати таке рівняння:

$$-\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} = \mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{i}}{\partial t} + \mathbf{r} \mathbf{i}. \quad (6)$$

Рівняння (6) легко отримується на основі другого закону Кірхгофа для електричних кіл з розподіленими параметрами. За означенням воно може бути використане як крайова умова до першого рівняння в (1).

Якщо здійснити дискретизацію першого рівняння в (1) та рівняння (6), використавши метод прямих та поняття центральної похідної [3], отримаємо:

$$\frac{d\mathbf{v}_j}{dt} = (\mathbf{LC})^{-1} \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} (\mathbf{u}_{j-1} - 2\mathbf{u}_j + \mathbf{u}_{j+1}) - (\mathbf{Lg} + \mathbf{rC}) \mathbf{v}_j - \mathbf{rgu}_j \right), \quad \frac{d\mathbf{u}_j}{dt} = \mathbf{v}_j, \quad j=1, \dots, N; \quad (7)$$

$$\frac{d\mathbf{i}_j}{dt} = \mathbf{L}^{-1} \left(\frac{1}{2\Delta x} (\mathbf{u}_{j-1} - \mathbf{u}_{j+1}) - \mathbf{r} \mathbf{i}_j \right), \quad j=1, \dots, N, \quad (8)$$

де Δx – крок дискретизації, N – кількість дискретних вузлів.

Аналізуючи рівняння (7) та (8), бачимо, що для знаходження напруг першого ($j=1$) та останнього ($j=N$) дискретних вузлів лінії та струмів у першій та останній дискретних гілках лінії потрібно знати напруги фіктивних вузлів на початку (\mathbf{u}_0) та в кінці (\mathbf{u}_{N+1}) лінії.

Ми вже згадували, що напруги фазних проводів на початку лінії є відомими, напруги $u_1^{(A)}, u_1^{(B)}, u_1^{(C)}$ – задано (напруги живлення лінії). Також нам є відомою напруга грозозахисного троса $T2$ на початку лінії. Вона рівна нулю $u_1^{(T2)} = 0$, оскільки грозозахисний трос $T2$ на початку лінії електропередачі заземлений. Тому невідомою напругою на початку лінії залишається напруга грозозахисного троса $T1$. Щодо напруг у кінці лінії, то жодна з напруг нам не відома.

Грозозахисний трос $T1$ на початку лінії перебуває в розімкненому стані (стан неробочого

ходу). Для знаходження напруги $u_1^{(T1)}$ грозозахисного троса $T1$ на початку лінії з допомогою рівнянь (7), потрібно знайти фіктивну напругу для грозозахисного троса $T1$ на початку лінії $u_0^{(T1)}$. Здійснимо пошук цієї напруги $u_0^{(T1)}$. Процедура пошуку цієї напруги детально нами описана у праці [7]. Представимо кінцевий вигляд цієї фіктивної напруги:

де $\mathbf{A} = \mathbf{L}^{-1}$; $\mathbf{K} = \mathbf{L}^{-1}\mathbf{r}$; $\mathbf{P} = (\mathbf{LC})^{-1}$; $\mathbf{D} = \mathbf{Prg}$; $\mathbf{F} = \mathbf{P}(\mathbf{Lg} + \mathbf{rC})$; $g_{T1,m}, C_{T1,m}$ – питомі часткові власні і взаємні активні провідності і ємності між тросом $T1$ та тросом $T2$, фазами A, B, C лінії і землею Z ; $u^{(T1,m)}$ – напруги між тросом $T1$ та тросом $T2$, фазами A, B, C лінії і землею Z першого вузла дискретизації лінії відповідно; C_{11}, G_{11} – елементи матриць \mathbf{C} та \mathbf{G} відповідно; $m = T2, A, B, C, Z$; $k = 1, 2, 3, 4, 5$; k – номер стовпців матриць та рядків векторів.

$$\begin{aligned}
 u_0^{T1} = & \frac{2\Delta x}{2C_{11}P_{11} + \Lambda_{11}} \left\{ \frac{1}{2\Delta x} \left(\sum_{k=1}^5 (\Lambda_{1,k} u_2^{(k)}) - \sum_{k=2}^5 (\Lambda_{1,k} u_0^{(k)}) \right) + \right. \\
 & + \sum_{k=1}^5 (K_{1,k} i_1^{(k)}) - \Delta x \left(G_{11} v_1^{(T1)} - \sum_{m=T2}^C \left(g_{T1,m} v_1^{(m)} + C_{T1,m} \frac{dv_1^{(m)}}{dt} \right) \right) - \\
 & + \sum_{k=1}^5 (K_{1,k} i_1^{(k)}) - \Delta x \left(G_{11} v_1^{(T1)} - \sum_{m=T2}^C \left(g_{T1,m} v_1^{(m)} + C_{T1,m} \frac{dv_1^{(m)}}{dt} \right) \right) - \\
 & - \Delta x C_{11} \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} \left(\sum_{k=1}^5 (P_{1,k} i_1^{(k)} + P_{1,k} u_2^{(k)}) \right) - \right. \\
 & \left. \left. - \frac{2}{(\Delta x)^2} \sum_{k=1}^5 (P_{1,k} u_1^{(k)}) - \sum_{k=1}^5 (F_{1,k} v_1^{(k)} + D_{1,k} u_1^{(k)}) \right) \right\}, \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\mathbf{u}_{N+1} = \mathbf{u}_{N-1} + 2(\mathbf{u}_{EL} - \mathbf{u}_N), \quad \mathbf{u}_{EL} = \text{colon} (u_{EL}^{(T1)}, u_{EL}^{(T2)}, u_{EL}^{(A)}, u_{EL}^{(B)}, u_{EL}^{(C)}). \quad (10)$$

Аналогічно попередньому випадку представимо кінцеві вирази для знаходження напруг у кінці лінії.

Оскільки грозозахисні троси в кінці лінії з'єднані між собою (див. рис. 1), то їх напруги в кінці лінії будуть однаковими, $u_{EL}^{(T1)} = u_{EL}^{(T2)} = u_{EL}^{(T)}$.

$$u_{EL}^{(T)} = \frac{1}{2} \left\{ u_N^{(T2)} + u_N^{(T1)} - \Delta x \left(\sum_{m=T2, n=T1}^{C,C} \left(M_{T1,m} \frac{di_N^{(m)}}{dt} + M_{T2,n} \frac{di_N^{(n)}}{dt} \right) + 2r_Z (i_N^{(A)} + i_N^{(B)} + i_N^{(C)}) \right) \right\}. \quad (11)$$

де m, n – найменування грозозахисних тросів або фазних проводів ($n = T1, A, B, C$); $i_N^{(Z)}$ – струм в землі останньої дискретної гілки ($i_N^{(Z)} = i_N^{(A)} + i_N^{(B)} + i_N^{(C)}$).

Напруги в кінці лінії для фазних проводів будуть мати такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 u_{EL}^{(A)} = & -\frac{\Delta x L_A L_H^{(A)}}{\Delta x L_A - L_H^{(A)}} \left\{ -\frac{1}{\Delta x L_A} \left[u_N^{(A)} + \Delta x \left(\sum_{q=T1}^C \left(M_{A,q} \frac{di_N^{(q)}}{dt} \right) + \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. + (r_A + r_Z) i_N^{(A)} + r_Z \sum_{q=B}^C (i_N^{(q)}) \right) \right] - \frac{r_H^{(A)} i_H^{(A)}}{L_H^{(A)}} \right\}; \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{EL}^{(B)} = & -\frac{\Delta x L_B L_H^{(B)}}{\Delta x L_B - L_H^{(B)}} \left\{ -\frac{1}{\Delta x L_B} \left[u_N^{(B)} + \Delta x \left(\sum_{d=T1}^C \left(M_{T1,d} \frac{di_N^{(d)}}{dt} \right) + \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. + (r_B + r_Z) i_N^{(B)} + r_Z \sum_{d=T2}^C (i_N^{(d)}) \right) \right] - \frac{r_H^{(B)} i_H^{(B)}}{L_H^{(B)}} \right\}; \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{EL}^{(C)} = & -\frac{\Delta x L_C L_H^{(C)}}{\Delta x L_C - L_H^{(C)}} \left\{ -\frac{1}{\Delta x L_C} \left[u_N^{(C)} + \Delta x \left(\sum_{p=T1}^B \left(M_{T1,p} \frac{di_N^{(p)}}{dt} \right) + \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. + (r_C + r_Z) i_N^{(C)} + r_Z \sum_{p=T2}^C (i_N^{(p)}) \right) \right] - \frac{r_H^{(C)} i_H^{(C)}}{L_H^{(C)}} \right\}, \quad (14)
 \end{aligned}$$

де d, p, q – найменування грозозахисних тросів або фазних проводів ($d = T1, T2, A, C$; $p = T1, T2, A, B$; $q = T1, T2, B, C$).

При розрахунках значення виразів (12) – (14) вносять до відповідних елементів векторів \mathbf{u}_{EL} та \mathbf{u}_{EL}^H .

Інтегруванню підлягає така система диференціальних рівнянь: друге рівняння в (1), (7), (8) з урахуванням (3), (4), (9), (10) та (11) – (14).

На підґрунті розробленої математичної моделі мовою програмування *Visual Fortran* було написано програмний код. Цей програмний код дає змогу здійснювати комп'ютерні симуляції, зокрема відтворювати перехідні електромагнітні

процеси в досліджуваному фрагменті електротехнічної системи пересилання енергії.

Комп'ютерна симуляція здійснювалася для двох числових експериментів. У першому досліді симулювалося увімкнення лінії без урахування керованої комутації, а в другому – імітувалося кероване увімкнення. Кероване увімкнення імітувалося шляхом пофазного увімкнення фаз ліній з урахуванням початку синусоїд функцій напруг від нуля у відповідні моменти часу. Моделювання вимикача у нинішній статті не відбувалося, оскільки це не входить до завдань цієї статті. Симуляція увімкнення лінії проводилася з моменту часу $t = 0$ с. При пофазному увімкненні фаза A вмикалася у момент часу $t = 0,009027$ с, фаза $B - t = 0,005694$ с, фаза $C - t = 0,002361$ с.

Для розрахунків прийнято реальну лінію електропередачі 750 кВ, яка з'єднує ПС «Західно-українська» (Україна) з ПС «Альбертірша» (Угорщина) з такими параметрами: $r_{0F} = 1,9 \cdot 10^{-5}$ Ом/м, $r_{0T} = 4,28 \cdot 10^{-4}$ Ом/м, $r_{0Z} = 5 \cdot 10^{-5}$ Ом/м, $L_{0F} = 1,647 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $L_{0T} = 2,4049 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $M_{0FF} = 7,41 \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $M_{0FT} = 7,4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $M_{0TT} = 7,05 \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $g_{0F} = 3,253 \cdot 10^{-11}$ См/м, $g_{0FF} = g_{0FT} = 3,253 \cdot 10^{-13}$ См/м, $g_{0T} \approx 0$, $g_{0TT} \approx 0$, $C_{0F} = 0,8647 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, $C_{0FF} = 0,103 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, $C_{0FT} = 0,0723 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, $C_{0T} = 0,3501 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, $C_{0TT} = 0,04162 \cdot 10^{-11}$ Ф/м. Лінія працювала на симетричне еквівалентоване активно-індуктивне навантаження з $r_H = 550$ Ом, $L_H = 0,9$ Гн. Симуляція здійснювалася з такими координатами режиму: $u_1^{(A)} = 630 \sin(\omega t + 18^\circ)$ кВ, $u_1^{(B)} = 630 \sin(\omega t - 102^\circ)$ кВ, $u_1^{(C)} = 630 \sin(\omega t + 138^\circ)$ кВ, $\omega = 314,15$ с⁻¹. При дискретизації рівнянь за просторовою координатою крок був рівний $\Delta x = l/20 = 23,8$ км. Рівняння електромагнітного стану інтегрувалися неявним методом Гіра другого порядку.

Функції напруг та струмів, відображені жовтим кольором, стосуються фази A , зеленим – фази B , червоним – фази C , а чорним – грозозахисних тросів лінії.

На рис. 2 представлено функції фазних напруг по середині лінії електропередачі для першого експерименту. Бачимо, що під час увімкнення лінії без урахування керованої комутації присутні значні перенапруги, зокрема миттєве максимальне значення напруги фази A складало 731 кВ, фази $B - 955$ кВ, фази $C - 655$ кВ. В усталеному режимі напруги мали амплітудні значення 610 кВ. Бачимо, що при увімкненні лінії електропередачі без задіявання керованої комутації у лінії мали місце перенапруги, які на фазі B сягали $1,48 U_{MP}$.

На рис. 3 репрезентовано функції струмів фаз лінії на її початку для першого експерименту. Аналізуючи рисунок, бачимо, що максимальне значення ударного струму фази A становило 2,1 кА, фази $B - 2,4$ кА, а фази $C - 2,3$ кА. В

усталеному режимі функції струмів мали амплітудні значення 1,33 кА.

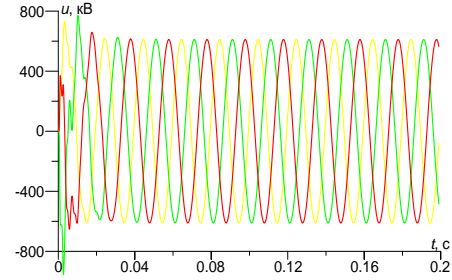


Рис. 2. Часовий розподіл функції фазних напруг по середині лінії для першого експерименту

Fig. 2. Time distribution of the phase voltage function along the middle of the line for the first experiment

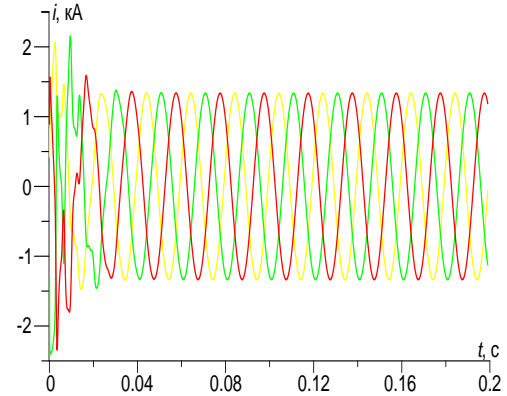


Рис. 3. Часовий розподіл функції струмів на початку лінії для першого експерименту

Fig. 3. Time distribution of the current function at the beginning of the line for the first experiment

На рис. 4 зображено часовий розподіл функції напруги грозозахисного троса $T1$ на початку лінії для першого експерименту. Бачимо, що на початку лінії напруга грозозахисного троса $T1$ під час увімкнення сягає максимального значення 100 В, а в усталеному режимі – 50 В.

На рис. 5 показано часовий розподіл функції струму грозозахисного троса $T1$ на початку лінії (перша дискретна гілка) для першого експерименту. Оскільки грозозахисний трос $T1$ на початку лінії перебуває в розімкненому стані (режим неробочого ходу), то в ньому будуть протікати лише струми витоків. Бачимо, що амплітудне значення струму витоків першої дискретної гілки становить 0,1 А.

Рисунки 6 та 7 репрезентують часові розподіли функції напруги за 24 км від початку лінії (другий дискретний вузол) та струму на початку лінії (перша дискретна гілка). Аналізуючи ці рисунки, бачимо, що у грозозахисному тросі $T2$, так як і у $T1$, присутні незначні напруги та струми. Це легко пояснюється симетричним режимом роботи лінії електропередачі, оскільки лінія живиться симетричною системою трифазних напруг та працює на симетричне активно-індуктивне навантаження. Тому індукування у грозозахисних тросах не відбувається.

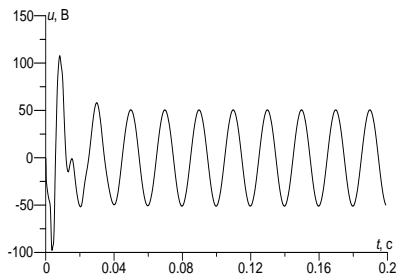


Рис. 4. Часовий розподіл функції напруги грозозахисного троса $T1$

на початку лінії для першого експерименту
Fig. 4. Time distribution of the voltage of the lightning protection cable $T1$ at the beginning of the line for the first experiment

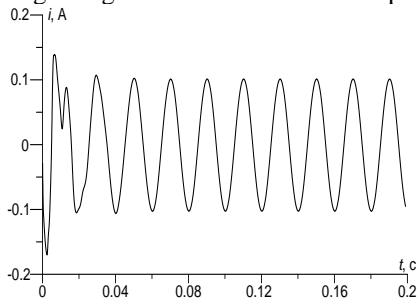


Рис. 5. Часовий розподіл функції струму грозозахисного троса $T1$ на початку лінії (перша дискретна гілка) для першого експерименту

Fig. 5. Time distribution of the current function of the lightning protection cable $T1$ at the beginning of the line (first discrete branch) for the first experiment

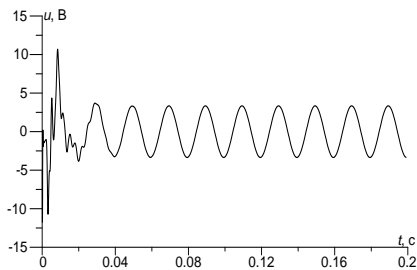


Рис. 6. Часовий розподіл функції напруги грозозахисного троса $T2$ за 24 км від початку лінії (другий дискретний вузол) для першого експерименту

Fig. 6. Time distribution of the voltage function of the lightning protection cable $T2$ 24 km from the beginning of the line (the second discrete node) for the first experiment

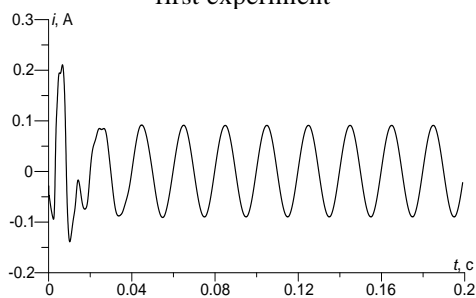


Рис. 7. Часовий розподіл функції струму грозозахисного троса $T2$ на початку лінії (перша дискретна гілка) для першого експерименту

Fig. 7. Time distribution of the current function of the lightning protection cable $T2$ at the beginning of the line (first discrete branch) for the first experiment

На рис. 8 представлено часовий розподіл функцій фазних напруг по середині лінії для другого експерименту. Бачимо, що характер перехідного процесу під час увімкнення лінії із застосуванням керованої комутації суттєво змінився порівняно з першим експериментом (див. рис. 2), зникли суттєві перенапруги. Тепер, під час увімкнення, напруги мали такі максимальні значення: фаза A – 682 кВ, фаза B – 685 кВ, а фаза C – 687 кВ, що становить $1,06U_{MP}$ порівняно з $1,48U_{MP}$ у першому експерименті. В усталеному режимі напруги мають такі самі значення, як і в першому експерименті.

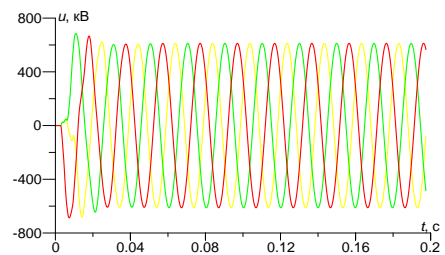


Рис. 8. Часовий розподіл функцій фазних напруг по середині лінії для другого експерименту

Fig. 8. Time distribution of the phase voltage function along the middle of the line for the second experiment

На рис. 9 представлено часовий розподіл функцій струмів на початку лінії для другого експерименту. Тут порівняно з першим експериментом під час увімкнення лінії ударні струми теж зменшилися. Максимальні значення ударних струмів були такі: фази A – 1,85 кА, фази B – 1,95 кА, фази C – 1,65 кА. Усталені амплітудні значення струмів такі самі, як у першому експерименті.

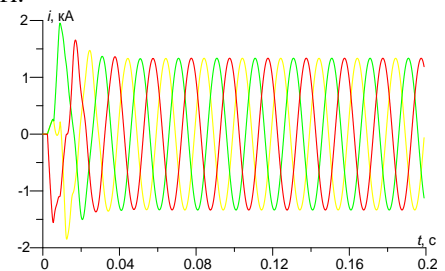


Рис. 9. Часовий розподіл функцій струмів на початку лінії для другого експерименту

Fig. 9. Time distribution of the current functions at the beginning of the line for the second experiment

На рис. 10 представлено часовий розподіл функції напруги грозозахисного троса $T1$ на початку лінії для другого експерименту. Бачимо, що керована комутація спричинила значну несиметрію в лінії електропередачі, що призвело до

значних перенапруг у грозозахисних тросах. Перенапряга грозозахисного троса $T1$ на початку лінії сягнула максимального значення 200 кВ, а після виходу в усталений режим набула очікуваного нульового значення.

Аналогічна ситуація зі струмом грозозахисного троса $T1$ на початку лінії (рис. 11). Бачимо, що в другому експерименті ударний струм сягнув максимального значення 350 А, а після закінчення перехідного процесу набув нульового значення.

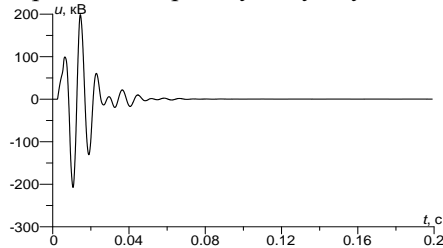


Рис. 10. Часовий розподіл функції напруги грозозахисного троса $T1$ на початку лінії для другого експерименту

Fig. 10. Time distribution of the voltage function of the lightning protection cable $T1$ at the beginning of the line for the second experiment

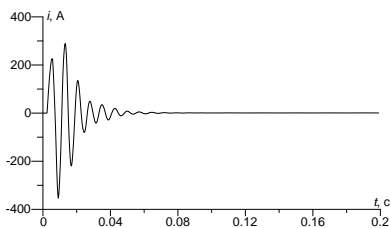


Рис. 11. Часовий розподіл функції струму грозозахисного троса $T1$ на початку лінії (перша дискретна гілка) для другого експерименту

На рис. 12 і 13 представлено часові розподіли функцій напруги за 24 км від початку лінії (другий дискретний вузол) та струму на початку лінії (перша дискретна гілка) для грозозахисного троса $T2$. Оскільки грозозахисний трос $T2$ на початку лінії заземлений, то його напруга є суттєво меншою від напруги грозозахисного троса $T1$ на початку лінії. Максимальне значення напруги грозозахисного троса $T2$ становило 11 кВ. Щодо струму (рис. 13), то тут, навпаки, він має очікувано більше значення, ніж у грозозахисному тросі $T1$. Максимальне значення ударного струму грозозахисного троса $T2$ на початку лінії становило 440 А.

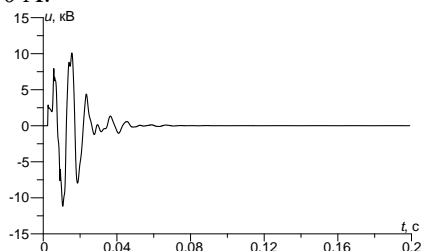


Рис. 12. Часовий розподіл функції напруги грозозахисного троса $T2$ за 24 км від початку лінії (другий дискретний вузол) для другого експерименту

Fig. 12. Time distribution of the voltage function of the lightning protection cable $T2$ 24 km from the beginning of the line (the second discrete node) for the second experiment

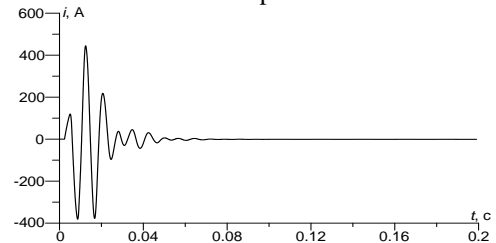


Рис. 13. Часовий розподіл функції струму грозозахисного троса $T2$ на початку лінії (перша дискретна гілка) для другого експерименту

Fig. 13. Time distribution of the current function of the lightning protection cable $T2$ at the beginning of the line (first discrete branch) for the second experiment

Висновки. 1. Аналіз доступної літератури показав, що питання дослідження перехідних процесів під час керованих комутацій ліній електропередач є актуальним, однак впливу керованих комутацій на перехідні процеси в лініях електропередач надвисокої напруги з грозозахисними тросами уваги приділено недостатньо.

2. Результати комп'ютерної симуляції показали, що керована комутація позитивно впливає на перехідні процеси напруг та струмів у фазних проводах лінії. За такого увімкнення перенапруги у фазних проводах лінії практично відсутні і становлять приблизно 685 кВ. Те саме стосується й ударних струмів, вони під час увімкнення лінії становили в середньому 1,8 кА. Однак за такого увімкнення у лінії виникають короточасні несиметричні режими, що призводить до виникнення значних напруг та струмів у грозозахисних тросах. Так, під час увімкнення на грозозахисному тросі $T1$ зафіксовано перенапругу, яка становила 200 кВ, та ударний струм 350 А. Тому при використанні керованих комутацій для грозозахисних тросів потрібно передбачувати додаткові засоби захисту.

3. Отримані результати комп'ютерної симуляції підтверджуються теоретичними положеннями теорії пересилання електричної енергії, що говорить про адекватність розробленої математичної моделі лінії електропередачі із грозозахисними тросами надвисокої напруги з розподіленими параметрами.

Бібліографічний список

1. Кучанський В. В. Керована комутація елегазовими вимикачами в магістральних електричних мережах. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2017. Вип. 48. С.

38–42.

2. Левонюк В. Аналіз перехідних процесів у довгій лінії електропередачі з грозозахисними тросами. *Технічні вісти*. 2022. № 55. С. 30 – 33.
3. Чабан А. В. Принцип Гамільтона-Остроградського в електромеханічних системах. Львів: Вид-во Тараса Сороки, 2015. 488 с.
4. Bhatt K., Bhalja B., Parikh U. Controlled switching technique for minimization of switching surge during energization of uncompensated and shunt compensated transmission lines for circuit breakers having pre-insertion resistors. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2018. Vol. 103. P. 347 – 359.
5. Chaban A., Lis M., Szafraniec A., Levoniuk V., Chaban V. An analysis of transient processes in a three-phase long power supply line including an asymmetric RLC load. *Przegląd elektrotechniczny*. 2022. № 12. P. 209 – 212.
6. Chaban A., Lis M., Szafraniec A., Levoniuk V. Mathematical modelling of transient processes in a three phase electric power system for a single phase short-circuit. *Energies*. 2022. Vol. 15. Iss. 3. P. 1126 – 1143.
7. Chaban A., Szafraniec A., Lysiak H., Levoniuk V., Lysiak V. A mathematical model of an ultrahigh voltage transmission line taking into account overhead ground wires. *Przegląd elektrotechniczny*. 2022. № 6. P. 27 – 31.
8. Ciulica D. Research on the transient regime of SF6 circuit breakers in MATLAB. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1426 (2020). 012054.
9. Goldsworthy D., Roseburg T., Tziouvaras D., Pope J. Controlled switching of HVAC circuit breakers: application, examples and benefits. *Annual Conference for Protective Relay Engineers*: materials of the conference (College Station, April 01-03, 2008). College Station, 2008.
10. Kumar A., Perveen R., Parikh U. Controlled switching of power transformer and shunt reactors for minimization of switching transients: a review. *Journal of The Institution of Engineers*. 2021. 103(2). P. 1013 – 1024.
11. Kumar U., Tale S., Panda S., Verma A. Modeling of circuit breaker for controlled switching applications using EMTDC/PSCAD. *National Power Systems Conference: materials of the conference* (Tiruchirappalli, December 14-16, 2018). Tiruchirappalli, 2018.
12. Panda S., Bahirat H., Stanek M. Controlled switching of power circuit breakers. *International Conference on Power System Technology*: materials of the conference (Wollongong, September 28 – October 01, 2016). Wollongong, 2016.
13. Panoiu C., Ciulica D., Panoiu M., Mezinescu S. Research based on modeling and simulation of the transient regime in controlled switching with high power switches. *Machines*. 2021. 9. P. 99.
14. Perzynski T., Levoniuk V., Figura R. Transient electromagnetic processes analysis in high voltage transmission lines during two-phase short circuits. *Sensors*. 2023. № 1. P. 298.
15. Smolarczyk A., Lapczynski S., Szulborski M., Kolimas L., Kozarek L. The real-time simulator using MATLAB/Simulink software for closed-loop coordination protection devices testing. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2021. Vol. 69(4). Paper No. e137413.
16. Stanek M. Analysis of circuit breaker controlled switching operations – from manual to automatic. *50th International Universities Power Engineering Conference*: materials of the conference (Stoke-on-Trent, September 1-4, 2015). Stoke-on-Trent, 2015. Paper No 353.
17. Uglesic I., Filipovic-Grcic B., Bojic S. Transients caused by uncontrolled and controlled switching of circuit breakers. *The International Symposium on High-Voltage Technique «Höfler's Days»*: materials of the conference (Portoroz, November 7-8, 2013). Portoroz, 2013.

Стаття надійшла 12.07.2023