

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ В РЕЖИМАХ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТА НЕРОБОЧОГО ХОДУ

Віталій Левонюк, к. т. н.

*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/agroengineering2022.26.094>

Левонюк В. Моделювання перехідних електромагнітних процесів у лінії електропередачі в режимах короткого замикання та неробочого ходу

У статті здійснено аналіз наукових публікацій, які стосуються математичного моделювання перехідних електромагнітних процесів у довгих лініях електропередачі. Аналіз показав, що сьогодні не існує єдино прийнятих підходів до дослідження згаданих процесів, натомість наявна велика кількість методів і засобів для їх відтворення, які ґрунтуються на спрощених підходах. Зокрема, дослідники використовують заступні електричні схеми, при цьому втрачаючи саму суть фізичних процесів, а також використовують рівняння довгої лінії без урахування активних опорів та провідностей лінії, що може призвести до неточних результатів.

На основі теорії електромагнітного поля та варіаційних підходів, з використанням модифікованого принципу Гамільтона – Остроградського, побудовано математичну модель електротехнічної системи пересилання енергії, яка складається зі силового трансформатора та довгої лінії електропередачі надвисокої напруги, що розглядаються у симетричних режимах. Запропоновано для розв'язання диференціального рівняння довгої лінії з частинними похідними використовувати крайові умови другого роду (умови Неймана). Здійснено пошук напруг у фіктивних вузлах на початку та в кінці лінії електропередачі для режиму короткого замикання і неробочого ходу лінії. На підґрунті розробленої математичної моделі написано програмний код алгоритмічною мовою програмування Visual Fortran, за допомогою якого проаналізовано перехідні електромагнітні процеси під час вмикання лінії в режимі неробочого ходу та віддаленого короткого замикання в кінці лінії електропередачі. Представлено результати комп'ютерної симуляції перехідних електромагнітних процесів у вигляді рисунків, які аналізуються.

Ключові слова: перехідні електромагнітні процеси, довга лінія, математична модель, принцип Гамільтона – Остроградського, варіаційні підходи.

Levoniuk V. Modeling of transient electromagnetic processes in a power transmission line in the short-circuit and non-operation modes

The article analyzes scientific publications related to mathematical modeling of transient electromagnetic processes in long power lines. The analysis shows that today there are no uniformly accepted approaches to the study of the mentioned processes, however, there is a large number of methods and means for their reproduction, which are based on simplified approaches. In particular, researchers use surrogate electrical circuits, while losing the very essence of physical processes, and also use the equation of a long line without taking into account the active resistances and conductances of the line, which can lead to inaccurate results.

Based on the theory of the electromagnetic field and variation approaches, with the use of the modified Hamilton-Ostrogradsky principle, a mathematical model of the electrotechnical energy transmission system, which consists of a power transformer and a long ultra-high voltage power transmission line considered in symmetrical modes, is built. It is proposed to use boundary conditions of the second kind (Neumann conditions) to solve the differential equation of a long line with partial derivatives. The search for voltages in fictitious nodes at the beginning and end of the power transmission line for the short-circuit mode and non-operational course of the line was carried out. On the basis of the developed mathematical model, a program code was written in the algorithmic Visual Fortran programming language was used to analyze the transient electromagnetic processes during the switching on of the line in the mode of idle operation and remote short circuit at the end of the power line. The results of the computer simulation of transient electromagnetic processes are presented in the form of drawings that are analyzed.

Key words: transient electromagnetic processes, long line, mathematical model, Hamilton – Ostrogradsky principle, variation approaches.

Постановка проблеми. Однією з найважливіших стратегічних галузей будь-якої держави є електроенергетика, невід'ємною частиною якої є

електричні мережі високої напруги. Призначенням останніх є з'єднання між собою джерел електроенергії (електричних станцій) та споживачів у

єдину електроенергетичну систему. Зазвичай згадані лінії мають велику протяжність і при зміні режиму їх роботи в них виникають перехідні хвильові електромагнітні процеси [1]. Останні і входять у коло наших наукових досліджень, зокрема в режимах неробочого ходу та симетричного короткого замикання лінії електропередачі.

Режим неробочого ходу лінії електропередачі виникає при відключенні навантаження, при включенні лінії на напругу в перші години після її монтажу, а також у період синхронізації (включення на паралельну роботу) електроенергетичних систем за допомогою об'єднання їх лініями електропередачі. Для досягнення високої надійності електропостачання під час проєктування та в процесі експлуатації ліній електропередачі виконують низку розрахунків, які забезпечують оптимальні параметри режимів як у нормальних, так і в аварійних режимах роботи, для чого досліджують перехідні процеси в стані трифазного симетричного короткого замикання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У науковій літературі є велика кількість праць, присвячених дослідженню перехідних електромагнітних процесів у лініях електропередачі, розглянемо деякі з них, близькі до нинішньої праці.

У публікації [4] розглянуто математичну модель лінії електропередачі у фазних координатах. За допомогою останньої аналізують електромагнітні перехідні процеси в лінії. Також на підставі цієї математичної моделі можна створити комп'ютерну модель лінії для дослідження як перехідних, так і усталених процесів з отриманням миттєвих значень фізичних величин.

У праці [9] запропоновано досліджувати перехідні процеси в трифазних електричних системах шляхом еквівалентності кожної фази окремою коловою заступною схемою. Така методика не завжди ефективна, оскільки позбавлена польового підходу до побудови моделі лінії, а тому в ній втрачається сама суть протікання фізичних процесів.

У праці [10] представлено деякі результати моделювання електромагнітних перехідних процесів у лініях електропередачі, які викликані прямими ударами блискавки. Дослідження було здійснено із застосуванням розробленої математичної моделі, яка ґрунтується на використанні частотно-го методу.

Існують праці, які присвячені розробкам математичних моделей дво- та трипровідних ліній електропередачі змінного струму, за допомогою яких аналізують різного характеру перехідні процеси, використовуючи при цьому програмні комплекси АТР-EMTP, MATLAB/Simulink та ін. [8].

Аналіз доступної літератури показав, що здебільшого дослідження перехідних процесів у лініях електропередачі зводиться до заміни хвильового рівняння коловим еквівалентом, що не завжди є ефективним. Існують також ще й польові підходи, наприклад, метод блукаючих хвиль та метод д'Аламбера. Однак для розв'язання за допомогою згаданих методів рівнянь з частинними похідними необхідно в явному вигляді представити крайові умови на початку й у кінці лінії, а останні зазвичай є невідомими. Наші ж підходи дають змогу знаходити згадані умови виходячи з єдиної системи диференціальних рівнянь електромагнітного стану моделі. Тобто крайові умови задані неявно. Зазвичай ми використовуємо крайові умови другого та третього родів.

Оскільки для моделювання електротехнічних систем пересилання енергії досить часто потрібно використовувати моделі різноманітних електротехнічних пристроїв складної конструкції (вимикачі, механічні компенсатори тощо), ми в наших дослідженнях використовуємо інтердисциплінарні підходи, зокрема модифікований принцип Гамільтона – Остроградського.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи є аналіз неусталених електромагнітних процесів у лінії електропередачі в режимах неробочого ходу та короткого замикання на основі інтердисциплінарних підходів до моделювання.

Виклад основного матеріалу. У праці пропонується модель електротехнічної системи пересилання енергії, яка складається із силового трансформатора та довгої лінії електропередачі з розподіленими параметрами (рис. 1). Для побудови згаданої моделі використаємо метод інтердисциплінарного моделювання, який ґрунтується на модифікованому принципі Гамільтона – Остроградського [5].

Оскільки ми досліджуємо лише симетричні режими роботи лінії електропередачі, то це дає підстави розглядати трифазну систему в однолінійному виконанні з параметрами її елементів для прямої послідовності [1].

Функціонал дії за Гамільтоном – Остроградським виглядатиме так [5]:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \left(L^* + \int_l L_l dl \right) dt, \quad I = \int_l L_l dl, \quad (1)$$

де S – дія за Гамільтоном – Остроградським, L^* – модифікована функція Лагранжа, L_l – лінійна густина модифікованої функції Лагранжа, I – енергетичний функціонал.

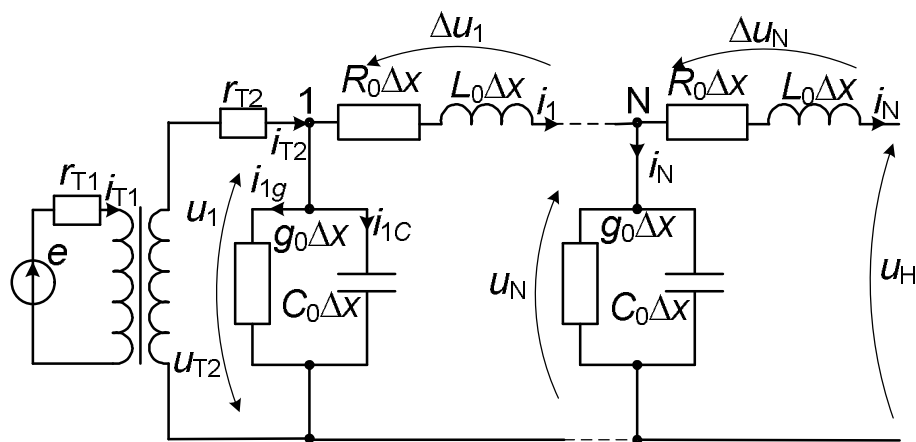


Рис. 1. Заступна схема досліджуваної електротехнічної системи пересилання енергії в режимі неробочого ходу
Fig. 1. Substitute diagram of the studied electrotechnical system of energy transmission in the non-working mode

Ключовим елементом модифікованого принципу Гамільтона – Остроградського є розширений неконсервативний лагранжіан. Представимо його аналітичний вигляд [5]:

$$\begin{aligned} L^* &= \tilde{T}^* - P^* + \Phi^* - D^*, \\ L_l &= \tilde{T}_l - P_l + \Phi_l - D_l \end{aligned} \quad (2)$$

де \tilde{T}^* – кінетична коенергія, P^* – потенціальна енергія, Φ^* – енергія дисипації, D^* – енергія сторонніх непотенціальних сил, \tilde{T}_l^* – лінійна густина кінетичної коенергії, P_l^* – лінійна густина потенціальної енергії, Φ_l^* – лінійна густина енергії дисипації, D_l^* – лінійна густина енергії сторонніх непотенціальних сил.

Запишемо елементи розширеної функції Лагранжа для системи, представленої на рис. 1. Ми вже згадували, що лінія розглядається як система з розподіленими параметрами, тоді елементи модифікованої функції Лагранжа для лінії будуть не енергетичними функціями, а їхніми відповідними лінійними густинами [5]:

$$\begin{aligned} T^* &= \int_0^{i_{T1}} \Psi_{T1} di_{T1} + \int_0^{i_{T2}} \Psi_{T2} di_{T2}, \\ \Phi^* &= \frac{1}{2} \int_0^t (r_{T1} i_{T1}^2 + r_{T2} i_{T2}^2); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} D^* &= \int_0^t e i_{T1} dt, \quad P^* = 0, \quad e \equiv u_{T1}, \\ u_1 &\equiv u(x, t)|_{x=0} = u_{T2}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial x} \equiv T_l = \frac{L_0 Q_t^2(x, t)}{2},$$

$$\frac{\partial P^*}{\partial x} \equiv P_l = \frac{1}{2C_0} Q_x^2(x, t); \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi^*}{\partial x} \equiv \Phi_l = \Phi_{l3} - \Phi_{lB} =$$

$$= \int_0^t \left(\frac{R_0}{2} Q_t^2(x, t) - \frac{g_0}{2C_0^2} Q_x^2(x, t) \right) dt, \quad (6)$$

а також приймаємо таке [5]:

$$\frac{\partial T^*}{\partial Q_j} = u_j, \quad (7)$$

де $i(x, t)$ – струм у лінії; R_0, g_0, C_0, L_0 – параметри лінії; Φ_{l3} – зовнішня дисипація енергії; Φ_{lB} – внутрішня дисипація енергії; $Q(x, t)$ – функція заряду лінії; r_{T1}, r_{T2} – активні опори відповідно первинної та вторинної обмоток трансформатора; L_{T1}, L_{T2} – індуктивності відповідно первинної та вторинної обмоток трансформатора; i_{T1}, i_{T2} – струми відповідно первинної та вторинної обмоток трансформатора; u_{T1}, u_{T2} – напруги відповідно первинної та вторинної обмоток трансформатора; u_1 – напруга вузла № 1 просторової дискретизації лінії; Ψ – потокозчеплення.

Ознайомитися з методикою отримання рівнянь подібного плану можна, наприклад, у наших працях [2; 3; 6]. Тому задля зменшення обсягу матеріалу пропонуємо готові рівняння електромагнітного досліджуваного стану об'єкта, представленого на рис. 1:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = (C_0 L_0)^{-1} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - (g_0 L_0 + C_0 R_0) v - g_0 R_0 u \right), \quad \frac{\partial u}{\partial t} = v; \quad (8)$$

$$\frac{d\Psi_{T1}}{dt} = u_{T1} - r_{T1}i_{T1}, \quad \frac{d\Psi_{T2}}{dt} = u_{T2} - r_{T2}i_{T2}. \quad (9)$$

Замінивши рівняння Ψ -типу трансформатора (9) на рівняння A -типу [5], отримаємо:

$$\frac{di_{T1}}{dt} = A_{11}(u_{T1} - r_{T1}i_{T1}) + A_{12}(u_{T2} - r_{T2}i_{T2}); \quad (10)$$

$$\frac{di_{T2}}{dt} = A_{21}(u_{T1} - r_{T1}i_{T1}) + A_{22}(u_{T2} - r_{T2}i_{T2}), \quad (11)$$

де A_{kmP} – коефіцієнти, що залежать від обернених індуктивностей трансформатора [5]:

$$A_{11} = \frac{\alpha_{\sigma 1}(\alpha_{\sigma 2} + \rho)}{\alpha_{\sigma 1} + \alpha_{\sigma 2} + \rho},$$

$$A_{12} = A_{21} = -\frac{\alpha_{\sigma 1}\alpha_{\sigma 2}}{\alpha_{\sigma 1} + \alpha_{\sigma 2} + \rho}; \quad (12)$$

$$A_{22} = \frac{\alpha_{\sigma 2}(\alpha_{\sigma 1} + \rho)}{\alpha_{\sigma 1} + \alpha_{\sigma 2} + \rho}, \quad \rho = \frac{\partial i_m}{\partial \Psi_m},$$

$$i_m = i_{T1} + i_{T2}. \quad (13)$$

Як крайові умови до рівняння (8) ми використаємо крайові умови другого та третього родів, зокрема другий закон Кірхгофа для електричних кіл із розподіленими параметрами [2; 7]:

$$-\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = R_0 i(x,t) + L_0 \frac{\partial i(x,t)}{\partial t}. \quad (14)$$

Далі, для лінії електропередачі рівняння (8) та (14) запишемо в дискретному просторі (дискретизуємо за методом прямих):

$$\frac{dv_j}{dt} = \frac{1}{C_0 L_0} \left(\frac{u_{j-1} - 2u_j + u_{j+1}}{(\Delta x)^2} - \right.$$

$$\left. -(g_0 L_0 + C_0 R_0)v_j - g_0 R_0 u_j \right); \quad (15)$$

$$-\frac{u_{j+1} - u_{j-1}}{2\Delta x} = R_0 i_j + L_0 \frac{di_j}{dt}; \quad (16)$$

$$\frac{du_j}{dt} = v_j, \quad j = 1, \dots, N. \quad (17)$$

Невідомі напруги у фіктивних вузлах дискретизації u_0 та u_{N+1} знаходимо так.

Запишемо рівняння стаціонарних зв'язків на основі законів електротехніки (див. рис. 1):

$$i_{T2} - i_1 - i_{1C} - i_{1g} = 0, \quad i_{1g} = \Delta x g_0 u_1,$$

$$i_{1C} = \Delta x C_0 \frac{du_1}{dt} = \Delta x C_0 v_1, \quad (18)$$

де i_{1C} , i_{1g} – струми витоку вузла № 1 просторової дискретизації лінії.

Далі продиференціюємо вирази у (18) за часом з урахуванням початкових умов [5]:

$$\frac{di_{T2}}{dt} - \frac{di_1}{dt} - \frac{di_{1C}}{dt} - \frac{di_{1g}}{dt} = 0, \quad \frac{di_{1g}}{dt} = \Delta x g_0 v_1,$$

$$\frac{di_{1C}}{dt} = \Delta x C_0 \frac{dv_1}{dt}. \quad (19)$$

Тепер на підставі (16) запишемо рівняння для визначення струму в першій та останній дискретних гілках лінії:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_0} \left(\frac{u_0 - u_2}{2\Delta x} - R_0 i_1 \right),$$

$$\frac{di_N}{dt} = \frac{1}{L_0} \left(\frac{u_{N-1} - u_{N+1}}{2\Delta x} - R_0 i_N \right). \quad (20)$$

Підставивши у перший вираз з (19) рівняння (11), перше рівняння з (20), друге та третє рівняння з (19) (з урахуванням рівняння (15), записаного для першого дискретного вузла лінії), після чого виразивши звідти напругу фіктивного вузла u_0 , отримаємо:

$$u_0 = \frac{2\Delta x L_0}{3} \left[A_{21}(u_{T1} - r_{T1}i_{T1}) + A_{22}(u_{T2} - r_{T2}i_{T2}) - \Delta x g_0 v_1 + \right.$$

$$\left. + \frac{(2u_1 - u_2)}{L_0 \Delta x} + \frac{\Delta x (g_0 L_0 + C_0 R_0)}{L_0} v_1 + \right.$$

$$\left. + \frac{\Delta x g_0 R_0}{L_0} u_1 + \frac{u_2}{2L_0 \Delta x} + \frac{R_0}{L_0} i_1 \right]. \quad (21)$$

Ми вже згадували, що нас цікавлять такі режими роботи лінії, як неробочий хід та коротке замикання. Тому репрезентуємо пошук крайової напруги з правого боку лінії залежно від режиму роботи.

У режимі неробочого ходу струм в останній гілці лінії i_N дорівнюватиме нулю, оскільки лінія не навантажена. Тому вираз (16), записаний для N -го дискретного вузла лінії, матиме такий вигляд:

$$-\frac{u_{N+1} - u_{N-1}}{2\Delta x} = 0. \quad (22)$$

Виразивши з (22) напругу u_{N+1} на фіктивному вузлі, отримаємо:

$$u_{N+1} = u_{N-1}. \quad (23)$$

У режимі короткого замикання навантаження відсутнє, а виводи лінії замкнені накоротко. Тому, записавши за другим законом Кірхгофа рівняння для заступної схеми, представленої на рис. 1, отримаємо:

$$\frac{di_N}{dt} = \frac{1}{L_0 \Delta x} (u_N - R_0 \Delta x i_N). \quad (24)$$

Прирівнявши між собою друге рівняння з (20) та рівняння (24), отримаємо:

$$\frac{1}{L_0 \Delta x} (u_N - R_0 \Delta x i_N) = \frac{1}{L_0} \left(\frac{u_{N-1} - u_{N+1}}{2\Delta x} - R_0 i_N \right). \quad (25)$$

Тоді

$$u_{N+1} = -2\Delta x \left[R_0 i_N + \frac{1}{\Delta x} (u_N - R_0 \Delta x i_N) \right] + u_{N-1}. \quad (26)$$

Для знаходження струму в дискретних гілках лінії використовуємо вираз (16):

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{1}{2L_0\Delta x}(u_{j-1} - u_{j+1}) - \frac{R_0}{L_0}i_j, \quad j=1, \dots, N. \quad (27)$$

Сумісному інтегруванню підлягає така система диференціальних рівнянь: (10), (11), (15), (17), (27) з урахуванням (12), (13), (21), (23), (26).

На основі розробленої математичної моделі, мовою програмування Visual Fortran, було написано програмний код, який дає змогу проводити комп'ютерні симуляції. Комп'ютерна симуляція здійснювалася для двох дослідів. У першому досліді відбувався запуск лінії в режимі неробочого ходу, а в другому – у режимі віддаленого короткого замикання (виводи лінії замкнені накоротко). Для розрахунків взято реальну лінію електропередачі 750 кВ, яка з'єднує ПС «Західноукраїнська» (Україна) з ПС «Альбертгірша» (Угорщина); трансформатор типу АОДЦТН-333000/750/330, напруга живлення трансформатора $e = 279 \cdot \sin(\omega t)$ кВ. Лінія має такі параметри: $l = 476$ км, $R_0 = 1,9 \cdot 10^{-5}$ Ом/м, $L_0 = 9,24 \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $C_0 = 1,3166 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, $g_0 = 3,25 \cdot 10^{-11}$ См/м. При дискретизації рівнянь за просторовою координатою крок був рівний $\Delta x = l/20 = 23,8$ км. Дискретизовані рівняння електромагнітного стану є досить жорсткими, тому інтегрування здійснювалося неявним методом Гіра другого порядку.

На рис. 2 і 3 репрезентовано просторові розподіли функцій напруги та струму в момент часу $t = 0,005$ с у режимі неробочого ходу та короткого замикання відповідно. Ці рисунки дуже добре відображають перебіг хвильових електромагнітних процесів у лінії електропередачі. Проаналізуємо ці рисунки.

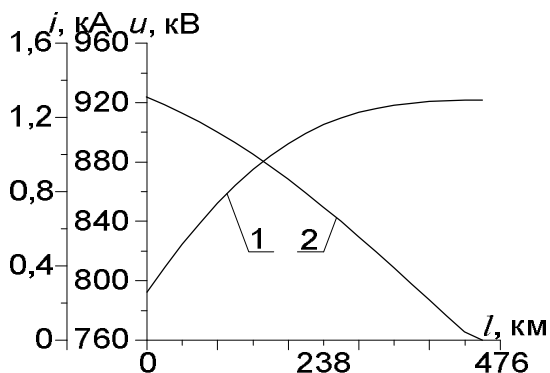


Рис. 2. Просторовий розподіл функції напруги (1) та функції струму (2) в момент часу $t = 0,005$ с у режимі неробочого ходу

Fig. 2. Spatial distribution of the voltage function (1) and the current function (2) at the moment of time $t = 0,005$ s in the non-working mode

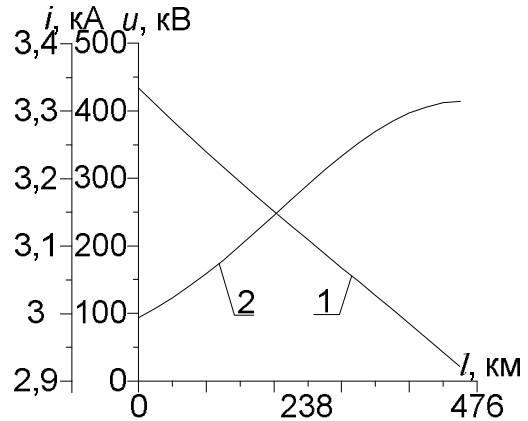


Рис. 3. Просторовий розподіл функції напруги (1) та функції струму (2) в момент часу $t = 0,005$ с у режимі короткого замикання

Fig. 3. Spatial distribution of the voltage function (1) and the current function (2) at the moment of time $t = 0.005$ s in the short-circuit mode

Під час запуску лінії електропередачі в режимі неробочого ходу (див. рис. 2) (цей режим є присутнім практично завжди перед синхронізацією роботи енергосистем) у момент часу $t = 0,005$ с напруга на початку лінії мала значення 795 кВ, поступово збільшуючись уздовж лінії до значення 920 кВ у кінці. Іншу картину бачимо з просторовим розподілом функції струму. Тут струм на початку лінії мав значення 1,3 кА, поступово зменшуючись уздовж лінії до нуля (лінія працює в режимі неробочого ходу).

Зовсім протилежна ситуація просторових розподілів функцій струму та напруги в той самий час у режимі короткого замикання (див. рис. 3). Тут, навпаки, функція напруги найбільше значення мала на початку лінії – 430 кВ, поступово зменшуючись до нуля в кінці (лінія в кінці замкнена накоротко). Стосовно картини розподілу струму, то він на початку лінії має значення 3 кА, а в кінці – 3,3 кА.

На рис. 4 і 5 подано часові розподіли функції напруги посередині лінії та функції струму в передостанній гілці дискретизованої лінії в режимі неробочого ходу. Аналізуючи перехідний процес напруги (див. рис. 4), бачимо, що її фазне миттєве амплітудне значення сягає 810 кВ, що становить $1,26U_{MP}$. Вищенаведені значення напруги свідчать про наявність у лінії ефекту Ферранті. Це явище легко пояснюється режимом роботи лінії та відсутністю реакторів на її кінцях. Стосовно картини фазного струму (див. рис. 5), то він після закінчення перехідного процесу набуває усталеного амплітудного значення 40 А. Попри те, що лінія працює в режимі неробочого ходу, струми витоку

та струми в елементах лінії будуть присутніми. Власне, причина цього – це ємнісні струми між проводами лінії. Очевидно, що в кінці лінії електропередачі струм дорівнюватиме нулю, оскільки вона ненавантажена.

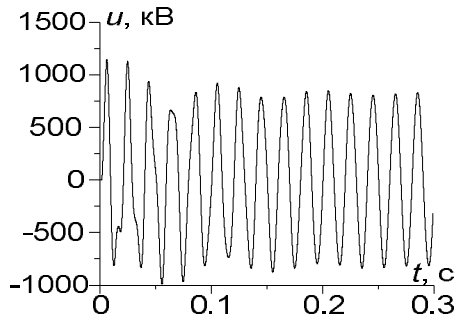


Рис. 4. Напруга на N -му вузлі дискретизованої лінії в режимі неробочого ходу

Fig. 4. Voltage at the N^{th} node of the discretized line in the non-working mode

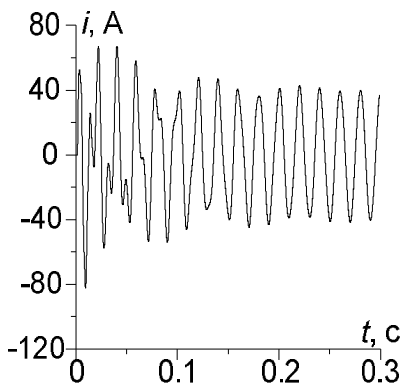


Рис. 5. Струм передостанньої гілки дискретизованої лінії в режимі неробочого ходу

Fig. 5. The current of the penultimate branch of the discretized line in the non-working mode

Рис. 6 і 7 репрезентують часові розподіли функцій напруги та струму посередині лінії в режимі короткого замикання (цей режим присутній практично завжди при неуспішному автоматичному повторному ввімкненні). З рис. 6 бачимо, що після завершення перехідного процесу напруга посередині лінії набуває усталеного амплітудного значення 280 кВ. Аналізуючи перехідний процес струму короткого замикання, бачимо, що під час ввімкнення лінії ударний струм сягнув значення 6 кА, також видно, що в ньому присутня значна аперіодична складова.

Дуже інформативними є рис. 8 та 9, вони репрезентовані в 3D форматі. Родзинкою їх інформативності є те, що часові та просторові розподіли

функцій струму (див. рис. 8) та напруги (див. рис. 9) об'єднані воедино і відтворюють рух електромагнітної хвилі в просторі й часі.

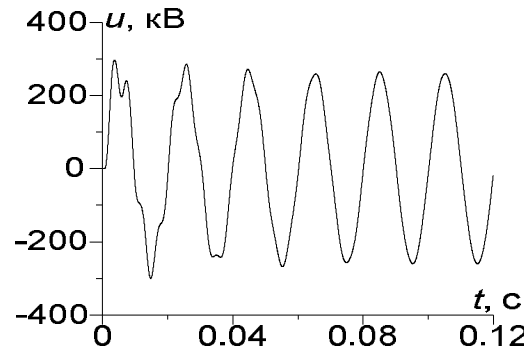


Рис. 6. Напруга посередині лінії в режимі короткого замикання

Fig. 6. Voltage along the middle of the line in the short-circuit mode

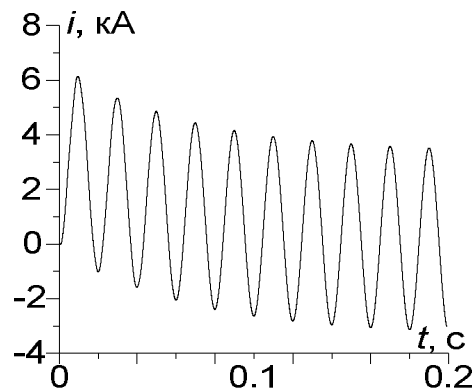


Рис. 7. Струм посередині лінії в режимі короткого замикання

Fig. 7. Current in the middle of the line in the short-circuit mode

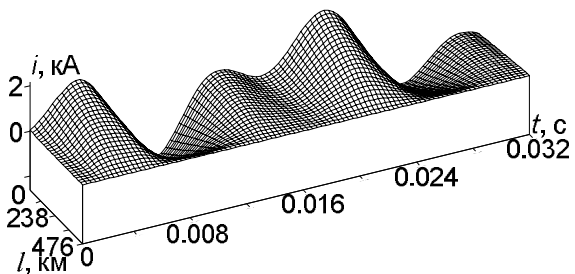


Рис. 8. Часово-просторовий розподіл функції струму в лінії у момент часу $t \in [0; 0,032]$ с для режиму неробочого ходу

Fig. 8. Time-spatial distribution of the current function in the line at the time $t \in [0; 0,032]$ s for the non-working stroke

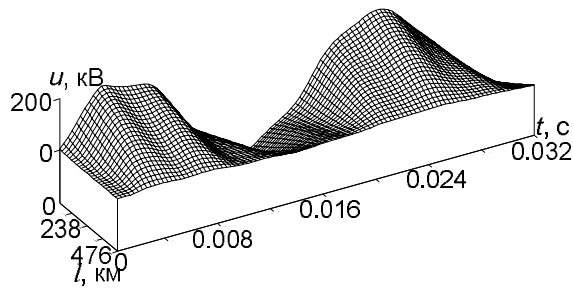


Рис. 9. Часово-просторовий розподіл функції напруги в лінії у момент часу $t \in [0; 0,032]$ с для режиму короткого замикання

Fig. 9. Time-spatial distribution of the voltage function in the line at the time $t \in [0; 0,032]$ s for short-circuit conditions

Рис. 8 доцільно аналізувати разом із рис. 2, 4 та 5, а рис. 9 – з рисунками 3, 6 і 7.

Висновки. 1. Використання варіаційних підходів до моделювання перехідних процесів у електротехнічних системах пересилання енергії уможливило побудову математичних моделей їх елементів виходячи виключно з єдиного енергетичного підходу, що спрощує роботу вузького спеціаліста, не потребуючи розширення його фаху. Натомість побудова моделі досліджуваного об'єкта зводиться лише до формування розширеного функціоналу дії з подальшою мінімізацією останнього.

2. Досвід показує, що дослідження перехідних процесів в електротехнічних системах пересилання енергії з довгими лініями зазвичай здійснюється шляхом еквівалентності відомого диференціального рівняння довгої лінії за допомогою колових заступних схем. Такий підхід дещо спрощує реальну картину фізичних процесів у лінії, зокрема не дає змоги врахувати такий важливий чинник, як швидкість руху електромагнітної хвилі у лінії. Застосування апарату чисельно-методного інтегрування диференціального рівняння довгої лінії дає змогу розв'язувати згадані рівняння як

крайову або змішану задачу, що, зрозуміло, потребує наявності крайових умов, які не завжди явно представлені.

Бібліографічний список

1. Кирик В. В. Електричні мережі та системи. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 130 с.
2. Левонюк В. Математичне моделювання перехідних електромагнітних процесів у мостовій системі випрямлення трифазного змінного струму на основі варіаційних підходів. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2019. № 23. С. 67-74.
3. Левонюк В. Р. Методи та засоби аналізу комутаційних перехідних процесів у лініях електропередачі надвисокої напруги на основі варіаційних підходів: дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2019. 209 с.
4. Рудевіч Н. В. Математична модель лінії електропередач в фазних координатах для дослідження електромагнітних перехідних процесів. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2013. № 59. С. 117-123.
5. Чабан А. В. Принцип Гамільтона – Остроградського в електромеханічних системах. Львів: Вид-во Тараса Сороки, 2015. 488 с.
6. Czaban A., Szafraniec A., Levoniuk V. Mathematical modelling of transient processes in power systems considering effect of high-voltage circuit breakers. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2019. Nr 1. P. 49-52.
7. Model matematyczny układu energetycznego składającego się z transformatora mocy, linii długiej oraz obciążenia RLC / A. Czaban, M. Lis, K. Klatow, M. Patro, A. Gastolek. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2017. Nr 1. P. 133-136.
8. Nayir A. Simulation of transient processes on overvoltage in electric transmission lines using ATP-EMTP. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2013. No 5. P. 1553- 556.
9. Nobre D. M., Boaventura W. C., Neves W. L. Phase-Domain Network Equivalents for Electromagnetic Transient Studies. *International Conference on Power Systems Transients: materials of the conference (Montreal, June 19-23, 2005)*. Montreal, 2005. Paper No. IPST05-180.
10. Soares A., Schroeder M. A. O., Visacro S. Transient voltages in transmission lines caused by direct lightning strikes. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20, iss. 2. P. 1447-1452.

Стаття надійшла 05.09.2022