УДК 621.31 **DOI 10.20535/1813-5420.4.2025.341333**

В.Ю. Лободзинський[1], канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-1167-824X
М.П. Бурик[1], канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-7114-1084
В.В. Михайленко[1], канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-0973-4612
А.В. Петрученко[1], асистент, ORCID 0000-0003-1661-0455
Є.Д. Кримус[1], студент, ORCID 0009-0003-0339-6725
[1]Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНІХ ПРОЦЕСІВ У ТРИФАЗНИХ КОЛАХ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

Проблематика. *У статті розглядається актуальна проблема аналізу перехідних процесів у високовольтних кабельних лініях електропередачі з розподіленими параметрами. Зі збільшенням робочої напруги та протяжності таких ліній зростає важливість точного розрахунку та обмеження комутаційних перенапруг, що є критичним для забезпечення надійності та стабільності енергосистеми. Традиційні методи розрахунку часто виявляються недостатньо ефективними для складних систем з урахуванням взаємної індукції та розподілених параметрів, що зумовлює необхідність застосування сучасних комп'ютерних технологій та чисельних методів.* ***Мета дослідження.*** *Метою даної роботи є оцінка ступеня загасання хвиль під час їх поширення в кабельних лініях електропередачі для вирішення задач обмеження грозових і комутаційних перенапруг. Дослідження проводиться на прикладі поширення прямокутного імпульсу напруги, що дозволяє змоделювати вплив перехідних процесів, викликаних комутаціями та аварійними режимами, на кабельну лінію.* ***Методика реалізації.*** *Для аналізу поширення імпульсу напруги в кабельній лінії застосовано математичне моделювання на основі диференціальних рівнянь. Розв'язання рівнянь здійснюється з використанням частотного методу та чисельних методів, зокрема чисельного інтегрування. Розглядається двоканальна система (α- та 0-канали) для симетричної кабельної лінії, що дозволяє дослідити вплив частоти на характеристики поширення хвиль.* ***Результати дослідження.*** *Результати моделювання показують залежність швидкості поширення та коефіцієнтів загасання хвиль від частоти. Аналіз форми імпульсів після проходження певної відстані по лінії виявляє схожість спотворень в α- та 0-каналах. Це свідчить про відносно малий взаємний вплив між фазами, що пояснюється близькістю розташування зворотного провідника (землі) до струмопровідних жил кабелю.* ***Висновки.*** *Проведене дослідження підтверджує можливість спрощеного аналізу перенапруг на ізоляції провідник-екран без урахування взаємодії між фазами кабельної лінії. Однак, аналіз перенапруг на ізоляції екран-земля вимагає врахування взаємного впливу процесів у фазних колах екран-земля. Отримані результати є важливими для розробки ефективних методів захисту від перенапруг та забезпечення надійної експлуатації високовольтних кабельних ліній.*

Ключові слова: *математична модель, хвильові процеси, перехідні електромагнітні процеси, кабельна лінія, імпульс перенапруги.*

Вступ. Ключову роль серед різноманітних електричних кіл з розподіленими характеристиками відіграють трифазні системи, де параметри розподілені вздовж лінії. Прикладом таких систем є високовольтні кабельні лінії передачі електроенергії. Саме процеси, що відбуваються в усталеному та перехідному режимах у цих колах, є визначальними для надійності та стабільності функціонування енергетичної системи.

У науково-технічній літературі значна увага приділяється як теоретичному дослідженню, так і інженерним підходам до розрахунку електромагнітних перехідних процесів у електричних колах, параметри яких розподілені вдовж лінії.

Проте врахування розподілених параметрів та впливу взаємної індукції між однофазними кабелями, що складають трифазну лінію, ускладнює досліджувану схему. Це призводить до підвищених вимог щодо точності та швидкості обчислень, а також до складної природи самих процесів, що зумовлює необхідність подальшого розвитку методів їхнього аналізу.

Застосування класичної електротехніки та точних аналітичних методів для розрахунку перехідних процесів у складних електричних колах стає все більш складним завданням. Відомі наближені аналітичні методи часто мають обмежену сферу застосування та не можуть охопити широке коло задач, пов'язаних з вивченням та аналізом електромагнітних перехідних явищ.

Найбільш перспективними для дослідження та аналізу в таких випадках є методи, які повністю орієнтовані на використання комп'ютерних технологій. Такі методи є універсальними щодо типів елементів та складності електричних схем, а також типу високовольтних кабельних ліній, і дозволяють

отримувати графічні представлення струмів та напруг для їх подальшого розрахунку та дослідження в часовій області.

При числовому дослідженні електромагнітних перехідних процесів у кабельних лініях основною математичною моделлю слугують диференціальні рівняння. Існують загальні алгоритми для формування цих рівнянь, які можуть бути використані з різними чисельними методами та їх подальшими розв'язками.

Однак ці алгоритми є досить складними, особливо за наявності в колі взаємно індуктивних зв'язків. Вони вимагають виконання значного обсягу математичних перетворень, а також додаткової логічної обробки вхідних даних та отриманих результатів.

Розрахунок та аналіз електромагнітних перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами, зокрема в кабельних лініях електропередачі, що виникають під час комутації або аварійних ситуацій, як правило, зводяться до вивчення хвильових процесів у них [1-6]. Для підвищення точності обчислень та отримання не лише якісних, але й кількісних результатів, традиційні схеми заміщення ліній із зосередженими елементами часто замінюють ланцюговими схемами або моделями з розподіленими параметрами [7-10].

Мета та завдання. Для вирішення завдань обмеження грозових та комутаційних перенапруг у типових схемах застосування високовольтних кабельних ліній необхідно оцінити ступінь загасання хвиль під час їх пробігу кабельною лінією. Це завдання зручно розглядати на прикладі поширення прямокутного імпульсу напруги в кабельній лінії електропередачі.

Матеріали і результати досліджень. Зі зростанням робочої напруги та протяжності високовольтних кабельних ліній (КЛ) питання обмеження комутаційних перенапруг стає дедалі важливішим. У практиці проєктування та наукових дослідженнях виникає потреба у більш точних розрахунках перенапруг та визначенні оптимальних умов для їх мінімізації.

Трифазна кабельна лінія являє собою систему з трьох однофазних кабелів. Її первинні поздовжні параметри, такі як власні та взаємні індуктивності, а також активні опори, залежать від частоти через проникнення електромагнітного поля в провідні елементи (жили, екрани та землю). Відповідно, частота впливає і на хвильові характеристики КЛ, включаючи хвильовий опір, довжину хвилі та коефіцієнт загасання.

Моделювання хвильових процесів в однорідних кабельних лініях може здійснюватися за допомогою аналітичних методів із використанням різноманітних математичних перетворень та функцій. У випадку неоднорідної лінії, яка містить ділянку з пошкодженою ізоляцією, що характеризується параметрами, відмінними від неушкоджених частин, найбільш універсальним підходом до аналізу хвильових процесів є чисельне розв'язання системи хвильових рівнянь із застосуванням методу кінцевих елементів або кінцевих різниць.

Для вирішення задач, пов'язаних з обмеженням комутаційних перенапруг у типових схемах використання високовольтних кабельних ліній, необхідно оцінити ступінь згасання хвиль під час їхнього поширення по лінії електропередачі. Цю задачу зручно розглянути на прикладі проходження прямокутного імпульсу напруги через кабельну лінію [11].

Проаналізуємо поширення імпульсу напруги в симетричній КЛ на прикладі двоканальної системи: α-, 0-каналів. Розрахункова схема наведена на рис. 1.

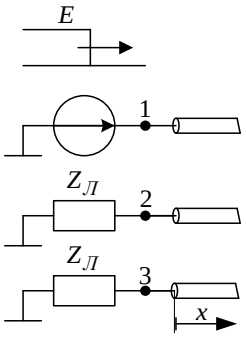


Рисунок 1 – *Розрахункова схема при дослідженні процесу поширення прямокутного імпульсу по кабельній лінії*

Ступінь загасання хвиль під час їхнього пробігу кабельною лінією досліджувався на прикладі поширення прямокутного імпульсу напруги. Поява такого імпульсу можлива на одній із фаз кабельної лінії внаслідок короткого замикання (КЗ) в енергосистемі. Якщо КЗ відбувається в момент досягнення робочою напругою максимального значення, то за умови невеликої тривалості розглядуваних процесів та малої довжини лінії, амплітуду хвилі протягом усього процесу можна вважати практично незмінною.

Рівняння кабельної лінії нескінченної довжини, записані щодо α -, 0 - складових, мають вигляд

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}_\alpha(x)}{dx^2} = \gamma_1^2 \dot{U}_\alpha(x), \frac{d^2\dot{I}_\alpha(x)}{dx^2} = \gamma_1^2 \dot{I}_\alpha(x) \\ \frac{d\dot{U}_0(x)}{dx^2} = \gamma_0^2 \dot{U}_0(x), \frac{d^2\dot{I}_0(x)}{dx^2} = \gamma_0^2 \dot{I}_0(x) \end{cases} \quad (1)$$

Рішення для рівнянь (1) будуть

$$\begin{cases} \dot{U}_\alpha(x) = A_\alpha e^{-\gamma_1 x}, Z_\alpha \dot{I}_\alpha(x) = A_\alpha e^{-\gamma_1 x} \\ \dot{U}_0(x) = A_0 e^{-\gamma_0 x}, Z_0 \dot{I}_0(x) = A_0 e^{-\gamma_0 x} \end{cases}$$

Граничні умови, згідно рис. 1, при неврахування взаємного зв'язку між фазами високовольтної кабельної лінії записані наступним чином:

$$\dot{U}_1(0) = \frac{E}{p};\ \dot{I}_2(0) = \frac{-\dot{U}_2(0)}{Z_{Л}};\ \dot{I}_3(0) = \frac{-\dot{U}_3(0)}{Z_{Л}}$$

або

$$A_\alpha + A_0 = \frac{E}{p};\ A_0 - \frac{A_\alpha}{2} = -Z_{Л}\left(\frac{A_0}{Z_0} - \frac{A_\alpha}{2Z_\alpha}\right).$$

Отже,

$$A_\alpha = \frac{E}{p}\left[\frac{1 + Z_л / Z_0}{1{,}5 + Z_л / Z_\alpha + Z_л / Z_0}\right];\ A_0 = \frac{E}{2p}\left[\frac{1 + Z_л / Z_\alpha}{1{,}5 + Z_л / 2Z_\alpha + Z_л / Z_0}\right].$$

Первинні повздовжні параметри кабельної лінії (власні та взаємні індуктивності та активні опори) із-за проникнення електромагнітного поля у провідне середовище (струмопровідна жила, екран та земля) є частотнозалежні. Тому від частоти також будуть залежати хвильові параметри кабельної лінії. Хвильовий опір каналів кабельної лінії залежить від частоти, тому отримані постійні інтегрування будуть також частотнозалежними. За допомогою частотного методу визначалися оригінали, що відповідають $\dot{U}_\alpha(x)$ та $\dot{U}_0(x)$

$$u_i(x,t) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty R_i(x,\omega)\frac{\sin t\omega}{\omega}d\omega =$$

$$= \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \mathrm{Re}\left[A_i(j\omega)e^{-\gamma_i(j\omega)x}\right]\frac{\sin t\omega}{\omega}d\omega =$$

$$= \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \mathrm{Re}\left[A_i(j\omega)e^{\left[-\alpha(\omega_i)+j\beta(\omega_i)\right]x}\right]\frac{\sin t\omega}{\omega}d\omega = \quad (2)$$

$$= \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \left|A_i(j\omega)\right|e^{-\alpha_i(\omega)x}\cos\left[\arg A_i(j\omega) - B_i(\omega)x\right]\frac{\sin t\omega}{\omega}d\omega,\ \ i = \alpha, 0$$

Залежності діючих частин постійних поширення α_i і швидкості поширення $v_i = \omega / \beta_i(\omega)$ хвилі α_i та 0- каналах від частоти показані на рис. 2. Тут показані залежності швидкостей поширення хвиль (пунктирна лінія) та коефіцієнт згасання загасання (суцільні лінії) α -каналі та 0-каналі кабельній лінії 330 кВ трифазного виконання.

Обчислення інтегралу (2) виконувалось у прикладному пакеті MathCad за допомогою чисельного інтегрування Філона. На рис. 3,а наведені форми імпульсів після пробігу хвилі 5 і 50 км по α - та 0-каналах кабельної лінії при впливі прямокутних одиничних хвиль. На рис. 3,б показані форми імпульсів напруги на фазах у схемі рис.1. Із рисунку видно, що характер спотворення хвиль α - складової і 0-складова каналів кабелю заданої конструкції приблизно однакові. Це пояснюється незначним взаємним впливом між фазами, що зумовлено близьким розташуванням зворотного провідника (землі) до струмопровідних жил кабелю.

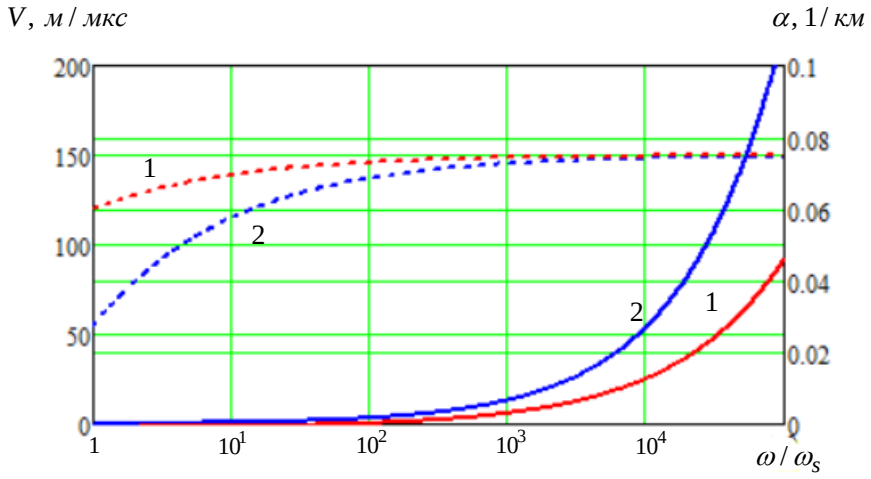
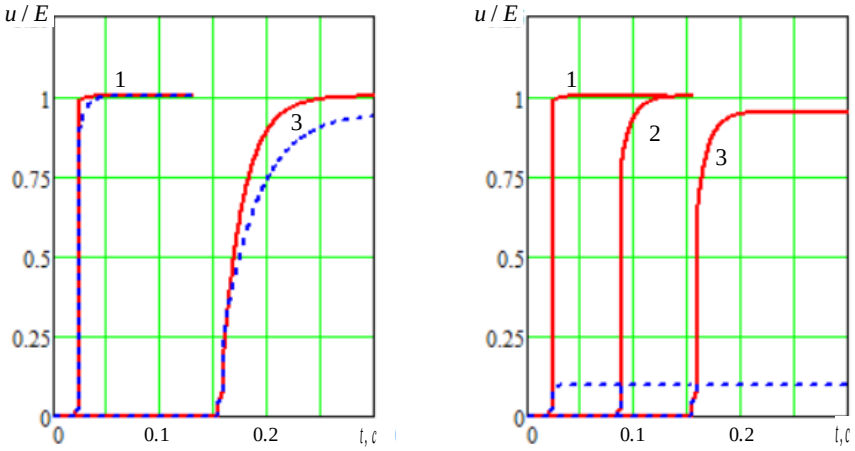


Рисунок 2 – *Залежність швидкостей поширення хвиль (пунктирні лінії) і коефіцієнтів загасання (суцільні лінії) в α -каналі (1) та 0-каналі (2) у кабельній лінії 330 кВ трифазного виконання*



а б

Рисунок 3 – *Поширення прямокутного імпульсу по КЛ*
а – поширення α - складової (суцільні лінії) і 0-складова (пунктирні лінії);
б – поширення імпульсу по фазах кабельної лінії (суцільні лінії – по фазі 1; пунктирні – по фазах 2 і 3);
1 - $x = 5$ км; 2 - $x = 25$ км; 3 - $x = 50$ км.

Висновок. Проведений аналіз залежності характеристик хвильових каналів від частоти показує, що при наближеному розгляді дослідження грозових перенапруг, що виникають між жилою та екраном ізоляції, може здійснюватися без урахування взаємодії між фазами кабельної лінії. Водночас, аналіз перенапруг, що діють на ізоляцію між екраном та землею, вимагає обліку взаємного впливу процесів, що відбуваються в фазних контурах екран-земля. Результати розрахунків дозволяють зробити висновок, що вивчення грозових перенапруг у даній розрахунковій конфігурації для всіх типів кабельних ліній може проводитися в однофазній постановці задачі без значної втрати точності. Це пояснюється відносно низьким рівнем взаємного впливу між фазами кабельної лінії як однофазного, так і трифазного виконання.

Список використаної літератури

1.Haohao C., Jing L., Ping C. Design of fault location algorithm based on online distributed travelling wave for HV power cable //PloS one. – 2024. – Т. 19. – №. 1. – С. 1-41. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296513

2.Jameson M. et al. Modelling and simulation of structural dynamics of high-voltage cables //Results in Engineering. – 2025. – Т. 26. – С. 104623. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104623

3.Li L. et al. Experimental study on underwater cylindrical acoustic wave generated by high-voltage pulse excited cable //IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2024. – Т. 49. – №. 2. – С. 487-495. https://doi.org/10.1109/JOE.2023.3337908

4.Bialobrzheskyi O. et al. Cable line equivalent circuit parameters determination using the instantaneous power components //Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk. – 2024. – №. 2. – С. 96-103. https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-2/096

5.Jiang Z. et al. Active Fault-Locating Scheme for Hybrid Distribution Line Based on Mutation of Aerial-Mode Injected Pulse //Energies. – 2024. – Т. 17. – №. 10. – С. 2248. https://doi.org/10.3390/en17102248

6.Лободзинський В.Ю., Чибеліс В.І. Аналіз перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками на прикладі високовольтної кабельної лінії. Енергетика: економіка, технології, екологія, 2021 №3. С. 64-69. doi.org/10.20535/1813-5420.3.2021.251207.

7.Perzyński, Tomasz, Vitaliy Levoniuk, and Radosław Figura. "Transient electromagnetic processes analysis in high voltage transmission lines during two-phase short circuits." Sensors 23.1 (2022): 298. https://doi.org/ 10.3390/s23010298

8.Czaban, Andriy, et al. "A mathematical model of an ultrahigh voltage transmission line taking into account overhead ground wires." Przeglad elektrotechniczny 98.6 (2022). https://doi.org/ 10.15199/48.2022.06.05

9.Seheda, M. S., et al. "Mathematical model for the management of the wave processes in three-winding transformers with consideration of the main magnetic flux in mining industry." Journal of Sustainable Mining 23 (2024). https://doi.org/10.46873/2300-3960.1402

10.Zhang, Ru, et al. "Mathematical modeling of EMI spectrum envelope based on switching transient behavior." IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 10.2 (2021): 2497-2515. https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3109040

11.Бойко В.С., Бойко В.В., Видолюб Ю.Ф., Курило І.А., Шеховцов В.І., Шидловська Н.А. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004. – Т. 3. – 244 с.

V. Lobodzinskiy[1], Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-1167-824X
M. Buryk[1], Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-7114-1084
V. Mihaylenko[1], Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-0973-4612
A. Petruchenko[1], Assistant, ORCID 0000-0003-1661-0455
Y. Krymus[1], student, ORCID 0009-0003-0339-6725
[1]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

RESEARCH ON TRANSIENT ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THREE-PHASE CIRCUITS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS AND ELECTROMAGNETIC COUPLINGS

Background. *The article considers the current challenge in analyzing transient phenomena in high-voltage cable transmission lines with distributed parameters. With an increase in the operating voltage and length of such lines, the importance of accurate calculation and limitation of switching overvoltages increases, which is critical for ensuring the reliability and stability of the power system. Traditional calculation methods are often insufficient for complex systems considering mutual induction and distributed parameters, requiring the use of modern computer technologies and numerical methods.* ***Objective****. The purpose of this work is to assess wave attenuation during propagation in cable transmission lines to solve the problems of limiting lightning and switching overvoltages. The study is carried out on the example of the propagation of a rectangular voltage pulse, which allows modeling the impact of transients caused by switching and emergency modes on the cable line.* ***Methods****. Mathematical modeling based on differential equations was used to analyze voltage pulse propagation in a cable line. The equations are solved using the frequency method and numerical methods, in particular, numerical integration techniques. A two-channel system (α- and 0-channels) for a symmetrical cable line is considered to allow for the study of the influence of frequency on the characteristics of wave propagation.* ***Results.*** *Modeling results demonstrate the frequency dependence of propagation velocity and wave attenuation coefficients. Analysis of the pulse shape after passing a certain distance along the line reveals the similarity of distortions in the α- and 0-channels. This indicates a relatively small mutual influence between the phases, explained by the proximity of the return conductor (ground) to the current-carrying conductors of the cable.* ***Conclusions.*** *This study confirms the possibility of simplified analysis of overvoltages on the conductor-shield insulation without considering the interaction between the phases of the cable transmission lines. However, the analysis of overvoltages on the shield-ground insulation requires taking into account the mutual influence of processes in the shield-ground phase circuits. These results are important for developing effective methods of protection against overvoltages and ensuring reliable operation of high-voltage cable transmission lines.*

Keywords: *mathematical model, wave processes, transient electromagnetic processes, cable line, surge impulse.*

References

1.Haohao C., Jing L., Ping C. Design of fault location algorithm based on online distributed travelling wave for HV power cable //PloS one. – 2024. – Т. 19. – №. 1. – С. 1-41. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296513

2.Jameson M. et al. Modelling and simulation of structural dynamics of high-voltage cables //Results in Engineering. – 2025. – Т. 26. – С. 104623. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104623

3.Li L. et al. Experimental study on underwater cylindrical acoustic wave generated by high-voltage pulse excited cable //IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2024. – Т. 49. – №. 2. – С. 487-495. https://doi.org/10.1109/JOE.2023.3337908

4.Bialobrzheskyi O. et al. Cable line equivalent circuit parameters determination using the instantaneous power components //Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk. – 2024. – №. 2. – С. 96-103. https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-2/096

5.Jiang Z. et al. Active Fault-Locating Scheme for Hybrid Distribution Line Based on Mutation of Aerial-Mode Injected Pulse //Energies. – 2024. – Т. 17. – №. 10. – С. 2248. https://doi.org/10.3390/en17102248

6.Lobodzinsky V.Y., Chibelis V.I., Analysis of transients in three-phase electrical circuits with distributed parameters and interphase connections on the example of a high-voltage cable line. Energy: economics, technology, ecology, 2021, №3. p. 64-69. https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2021.251207

7.Perzyński, Tomasz, Vitaliy Levoniuk, and Radosław Figura. "Transient electromagnetic processes analysis in high voltage transmission lines during two-phase short circuits." Sensors 23.1 (2022): 298. https://doi.org/ 10.3390/s23010298

8.Czaban, Andriy, et al. "A mathematical model of an ultrahigh voltage transmission line taking into account overhead ground wires." Przeglad elektrotechniczny 98.6 (2022). https://doi.org/ 10.15199/48.2022.06.05

9.Seheda, M. S., et al. "Mathematical model for the management of the wave processes in three-winding transformers with consideration of the main magnetic flux in mining industry." Journal of Sustainable Mining 23 (2024). https://doi.org/10.46873/2300-3960.1402

10.Zhang, Ru, et al. "Mathematical modeling of EMI spectrum envelope based on switching transient behavior." IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 10.2 (2021): 2497-2515. https://doi.org/10.1109/JESTPE.2021.3109040

11.Boiko V.S., Boiko V.V., Vydoliub Yu.F., Kurylo I.A., Shekhovtsov V.I., Shydlovska N.A. Theoretical foundations of electrical engineering: Textbook in 3 vol. Kyiv, Vydavnytstvo «Politekhnika», 2004. – Vol. 3. – 244 p.

Надійшла: 08.05.2025
Received: 08.05.2025