

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕНАПРУГ У КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ ВИСОКОЇ НАПРУГИ З ТРАНСПОЗИЦІЄЮ ЕКРАНІВ

*У роботі розроблена математична модель кабельної лінії електропередачі з транспозицією екранів для дослідження та аналізу хвильових процесів імпульсів перенапруги при транспозиції екранних контурів. Запропоновано еквівалентні та розрахункові схеми при транспозиції екранів кабельної лінії, для яких отримано аналітичні вирази для розрахунку максимумів перенапруги. На основі проведеного аналізу хвильових процесів, що відбуваються в транспонованих екранах трифазної системи, встановлено, що при оцінці максимуму напруги на екранах кабельної лінії допустимо не враховувати хвилі, що відбиваються від вузлів, розташованих за вузлом, що розглядається, в напрямку проходження хвилі. Навпаки, рекомендується враховувати взаємний вплив фаз, якщо приблизно прийняти хвильовий опір каналу екран-земля, що дорівнює хвильовому опору міжекранного каналу. Встановлено, що облік взаємного впливу фаз призводить до зменшення амплітуди імпульсу та скорочення часу його впливу, отже, для розрахунку максимумів перенапруги необхідно враховувати взаємовплив між каналами екран-екран сусідніх фаз.*

**Ключові слова:** математична модель, хвильові процеси, кабельна лінія, транспозиція екранів, імпульс перенапруги.

**Вступ.** Основу широких класів електричних кіл з розподіленими параметрами складають трифазні електричні кола з розподіленими параметрами типу високовольтних кабельних ліній електропередачі. Саме перехідні і сталі процеси в таких колах визначають надійність і стійкість роботи енергосистеми.

У науково-технічній літературі приділяється велика увага теоретичному аналізу та інженерним методам розрахунку електромагнітних перехідних процесів в електричних колах з розподіленими параметрами.

Однак урахування розподілених параметрів та вплив взаємоіндукції однофазних кабелів трифазної лінії призводить до складності досліджуваного кола, посилення вимог до точності і швидкості їх розрахунку, а також складний характер самих процесів, які зумовлюють необхідність подальшого вдосконалення методів їх аналізу.

Використання класичної теорії електротехніки і точних аналітичних методів розрахунку перехідних процесів для складних кіл стає все більш проблематичним. Відомі наближені аналітичні методи мають, як правило, обмежену придатність і не в змозі охопити широкий спектр завдань пов'язаних з дослідженням і аналізом електромагнітних перехідних процесів.

Найбільш перспективними для таких цілей дослідження і аналізу є методи, повністю орієнтовані на застосування комп'ютера, тобто універсальні по відношенню до типів елементів і складності електричних кіл, типу високовольтних кабельних ліній з отриманням зображень струмів і напруги для розрахунку і дослідження їх оригіналів.

При чисельному аналізі електромагнітних перехідних процесів в кабельних ліній, її основною математичною моделлю є диференціальні рівняння. Відомі загальні алгоритми формування цих рівнянь, які сумісні з багатьма чисельними методами та їх подальшими рішеннями.

Однак ці алгоритми досить складні (особливо при наявності в колі взаємоіндуктивного зв'язку), вимагають виконання невиправдано громіздких математичних перетворень, додаткової логічної обробки вихідних даних і результату [1 – 5].

**Мета та завдання.** Розробка математичної моделі кабельної лінії електропередачі з транспозицією екранів для дослідження та аналізу хвильових процесів імпульсів перенапруги при транспозиції екранних контурів.

**Матеріали і результати досліджень.** У процесі експлуатації на ізоляцію кабельної лінії впливають комутаційні та атмосферні перенапруги. Крім того, у разі виникнення короткого замикання за межами лінії, струм КЗ, що проходить по жилі, індукує ЕРС в екрані, значення якої, як правило, перевищує випробувальну напругу екрану кабелю [6].

Оскільки максимальна напруга на ізоляції екрана виникає до моменту приходу хвиль, які відбиваються від заземленого екрану в кінці лінії, тому аналіз процесів можна проводити моделюючи кабельну лінію у вигляді нескінченної довгої лінії.

Для спрощення математичної моделі для виявлення основних фізичних закономірностей у роботі знехтуємо вплив двох інших фаз трифазної кабельної лінії на процеси у каналі екран-земля фази, на початку якого відбулося коротке замикання.

Аналіз параметрів електромагнітних полів, ініційованих елементами кабельної лінії, дозволяє записати телеграфні рівняння для напруги і струмів у жилі та екрані кабелю:

$$\begin{bmatrix} -\frac{d\underline{U}_{\mathcal{J}}}{dx} \\ -\frac{d\underline{U}_E}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{\mathcal{J}} \\ \underline{I}_E \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} -\frac{d\underline{I}_{\mathcal{J}}}{dx} \\ -\frac{d\underline{I}_E}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_1 & -\underline{Y}_1 \\ -\underline{Y}_1 & \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{\mathcal{J}} \\ \underline{U}_E \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $\underline{Z}$  – поперечні опори та  $\underline{Y}$  – продольні провідності, що пов’язані з проникненням електромагнітного поля в жилу та екран кабелю. Наближені розрахункові формули для визначення  $\underline{Z}$ ,  $\underline{Y}$  представлені у роботі [7].

Розглянемо хвильові рівняння (1) в операторній формі, можна отримати аналітичні вирази для операторних зображень напруги між жилою та екраном ( $\underline{U}_{\mathcal{J}E}$ ), екраном та землею ( $\underline{U}_{E3}$ ):

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\mathcal{J}}(x) &= \underline{U}_{\mathcal{J}E}(x) - \underline{U}_{E3}(x) = \frac{E}{p} \left( \frac{\underline{Z}_1 \underline{Y}_1 - \gamma_2^2}{\gamma_1^2 - \gamma_2^2} e^{-\gamma_1 x} - \frac{\underline{Z}_1 \underline{Y}_1 - \gamma_1^2}{\gamma_1^2 - \gamma_2^2} e^{-\gamma_2 x} \right), \\ \underline{U}_E(x) &= \frac{E}{p} \frac{\underline{Z}_M \underline{Y}_1}{\gamma_1^2 - \gamma_2^2} \left( e^{-\gamma_2 x} - e^{-\gamma_1 x} \right), \\ \gamma_{1,2}^2 &= \frac{\underline{Z}_1 \underline{Y}_1 + \underline{Z}_2 \underline{Y}_2}{2} \pm \sqrt{\left( \frac{\underline{Z}_1 \underline{Y}_1 + \underline{Z}_2 \underline{Y}_2}{4} \right)^2 + \underline{Z}_M^2 \underline{Y}_1 \underline{Y}_2}, \end{aligned}$$

де  $\underline{Z}_M$  – взаємний опір між каналами жила-екран та екран-земля.

При проектуванні кабельних ліній електропередачі виникає потреба оцінки максимумів перенапруги за спрощеними математичними моделями без поглибленого аналізу та облік всіх можливих впливів на хвильові процеси при виникненні імпульсів перенапруги. Для рішення подібних задач допускається знехтування зовнішнім опором жили, що обумовлено електромагнітним полем в жилі кабелю, опором екрану, що визначається падінням напруги на внутрішній стороні екрану від струму, що повертається через землю, так активною складовою опору, що обумовлений проникненням електромагнітного поля в землю та індуктивною складовою взаємного опору між каналами жила-екран та екран-земля. Ці припущення не вносять суттєвих змін на дослідження хвильових процесів та приводить до відносно незначним похибкам при оцінюванні максимуму напруги на ізоляції екрану. Після внесення вище перелічених допущень хвильові рівняння коаксіального кабельної лінії запишуться у вигляді:

$$\begin{bmatrix} -\frac{d\underline{U}_{\mathcal{J}}}{dx} \\ -\frac{d\underline{U}_E}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \cdot \text{Im}[\underline{Z}_1] & 0 \\ \text{Re}[\underline{Z}_{1,2}] & p \cdot \text{Im}[\underline{Z}_2] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{\mathcal{J}} \\ \underline{I}_E \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{d\underline{I}_{\mathcal{J}}}{dx} \\ -\frac{d\underline{I}_E}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \cdot \text{Im}[\underline{Y}_1] & 0 \\ 0 & p \cdot \text{Im}[\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{\mathcal{J}} \\ \underline{U}_E \end{bmatrix}.$$

Розв’язуємо хвильові рівняння (2) в операторній формі, знаходимо оригінали, можна отримати аналітичні вирази для напруги між жилою та екраном, екраном та землею:

$$\underline{U}_{\mathcal{J}}(x) = E \cdot \delta_0(t - \tau_{1x}),$$

$$\underline{U}_E(x) = E \cdot \frac{C_1 R E}{1/V_2^2 - 1/V_1^2} \left[ (t - \tau_{1x})^2 \delta_0 - (t - \tau_{2x})^2 \delta_0 \right],$$

де  $\delta_0(t - \tau_{1x})$  – узагальнена одинична функція;  $V_1 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$ ,  $V_2 = 1/\sqrt{L_2 C_2}$  – швидкості розповсюдження хвиль по каналах жила-екран та екран-земля;  $\tau_{1x} = x/V_1$ ;  $\tau_{2x} = x/V_2$  – час проходження хвиль по відповідним каналам до точки з координатою  $x$ .

Представлена математична модель розрахунку значень струмів і напруги у жилах і екранах кабелів трифазної системи однофазного виконання отримана за умови двостороннього заземлення екранів лінії. Однак, з метою боротьби з поздовжніми струмами, що індукуються в екранах, у більшості випадків, застосовується їх одно стороннє розземлення і транспозиція, для яких хвильові процеси розповсюдження імпульсів перенапруги будуть мати інший характер через зміни хвильових опорів і електричної схеми кабельної лінії електропередачі.

Для оцінки максимумів перенапруги на екранах у вузлах транспозиції також можна не враховувати відбиті хвилі, взаємний вплив фаз враховується заміною в еквівалентній схемі величини зовнішнього індуктивного опору жили на величину хвильового опору каналу екран-екран –  $Z_{22}$ . При цих допущеннях еквівалентна розрахункова схема для визначення максимальної напруги на екрані у вузлах транспозиції, що розташована першою за напрямом поширення електромагнітної хвилі, та розповсюджується по каналу жила-екран однієї фази представлена на рис.1.

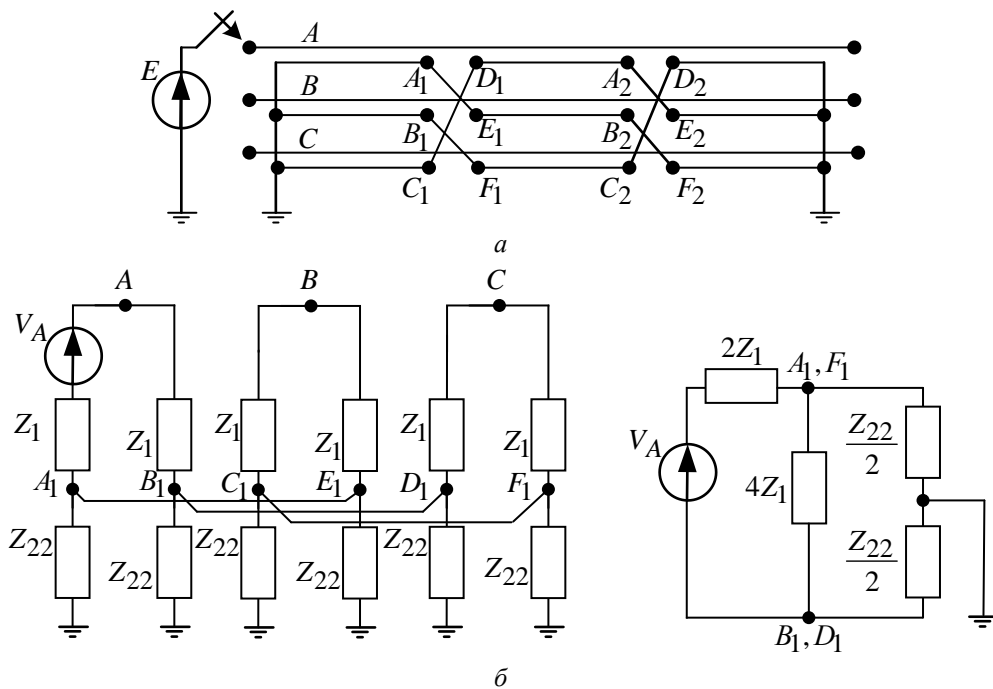


Рисунок 1 – Схема кабельної лінії з транспозицією екранів (а), еквівалентна розрахункова схема (б)

Згідно рис.1, максимуми напруги між жилою та екраном однієї і тієї ж фази у вузлу транспозиції рівні подвоєному значенню напруги на екрані відносно землі:

$$U_{E \max} = U_{C1 \max} - U_{A1 \max} = \frac{E}{1.5 + 2 \frac{Z_1}{Z_{22}}} = \frac{2U_{\text{відб.А}}}{1.5 + 2 \frac{Z_1}{Z_{22}}}$$

Проведений аналіз показав, що перенапруги на екранах кабелю збільшуються зі зменшенням співвідношення  $Z_1/Z_{22}$ . Оскільки зі збільшенням поперечного перерізу кабелю хвильовий опір коаксіального каналу  $Z_1$  зменшується, то рівень перенапруги на ізоляції екрану збільшується зі збільшенням поперечного перерізу. На рис.2 приведена залежність  $U_{E \max}/E = f(Z_1/Z_{22})$ , яка розрахована за попередньо представленими виразами. Як видно із розрахунку, при транспозиції екранів, перенапруги, що виникають у вузлах транспозиції на ізоляції екрану перевищують її імпульсну допустиму напругу  $U_{\text{імп.доп}}$ . Зменшення рівня перенапруги на ізоляції екрану можна досягти шляхом збільшення хвильового опору  $Z_{22}$ , шляхом зближення фаз кабельної лінії.

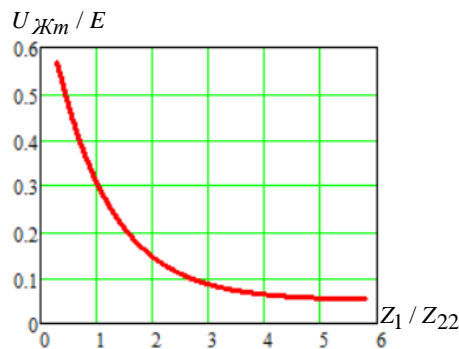


Рисунок 2 – Рівень перенапруги на ізоляції екрану кабельної лінії при транспозиції екранів

На рис.3 представлені результати розрахунку перенапруги на екрані кабельної лінії у вузлах транспозиції екранів при врахуванні взаємного впливу сусідніх фаз.

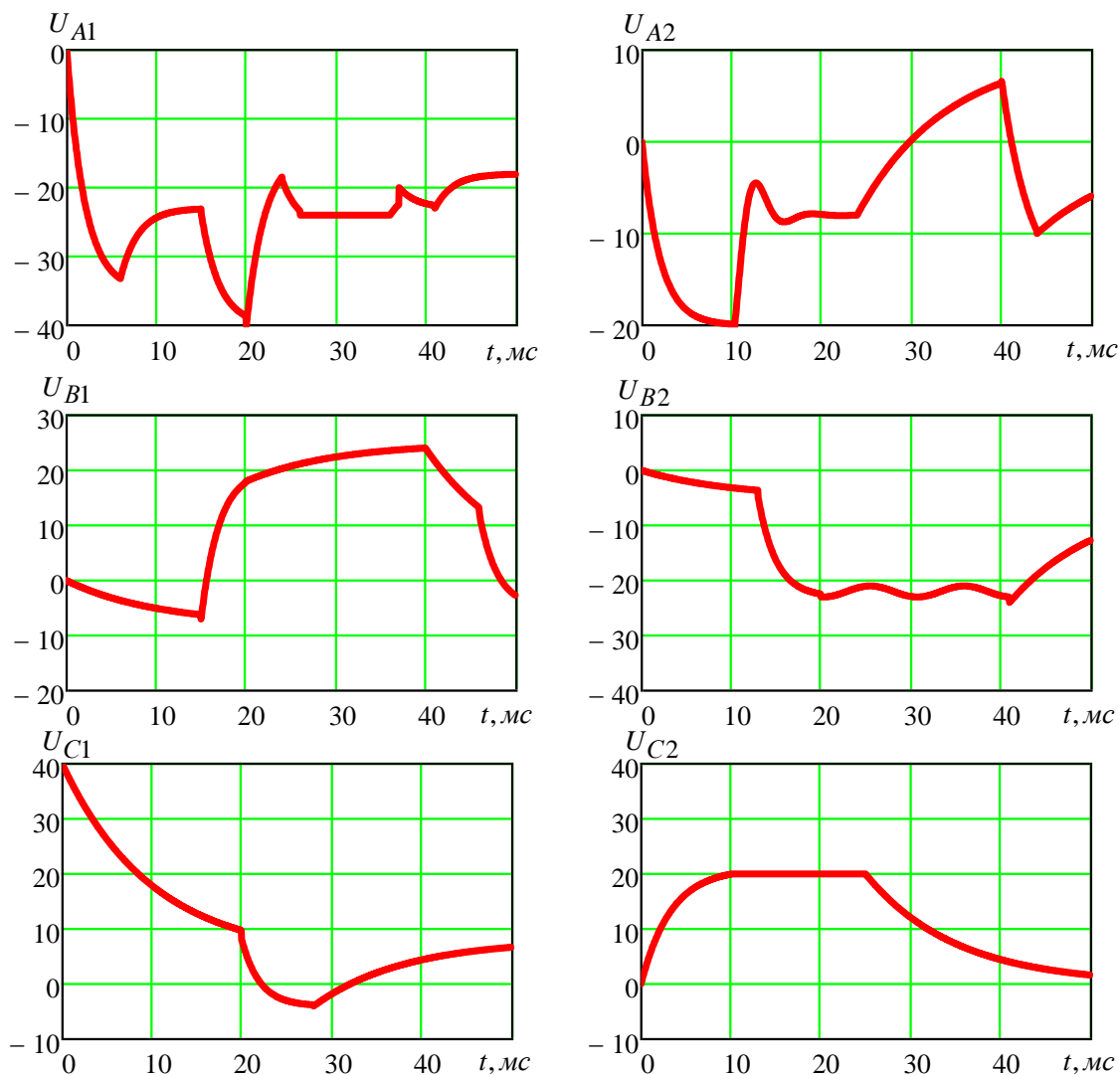


Рисунок 3 – Розрахункові осцилограми перенапруги на екрані кабельної лінії у вузлах транспозиції екранів

Аналіз розрахункових осцилограм рис. 3 показав, що максимуми перенапруги на екрані у першому вузлі транспозиції, відповідають моменту приходу в цей вузол хвилі по каналу, швидкість розповсюдження хвиль в якому не залежить від інших фаз.

Зниження напруги на екрані фази А у першому вузлі настає в момент приходу по каналу хвилі, що відбивається від другого вузла транспозиції. Сумарна довжина імпульсу напруги визначається

моментом приходу по каналу екран-земля у перший вузол транспозиції хвилі, що відбивається від заземлення екрану в кінці циклу транспозиції.

На основі проведеного аналізу можна при оцінці максимуму напруги на оболонках КЛ не враховувати відбиті хвилі від вузлів, розташованих за вузлом, що розглядається, по ходу руху хвилі і, навпаки, рекомендується враховувати взаємний вплив фаз, якщо хвильовий опір каналу екран-земля прийняти рівним хвильовому опору міжкранного каналу.

#### **Висновок.**

Запропоновано еквівалентні та розрахункові схеми при транспозиції екранів кабельної лінії, для яких отримано аналітичні вирази для розрахунку максимумів перенапруги.

На основі проведеного аналізу хвильових процесів, що відбуваються в транспонованих екранах трифазної системи, встановлено, що при оцінці максимуму напруги на екранах кабельної лінії допустимо не враховувати хвилі, що відбиваються від вузлів, розташованих за вузлом, що розглядається, в напрямку проходження хвилі. Навпаки, рекомендується враховувати взаємний вплив фаз, якщо приблизно прийняти хвильовий опір каналу екран-земля, що дорівнює хвильовому опору міжкранного каналу.

Встановлено, що облік взаємного впливу фаз призводить до зменшення амплітуди імпульсу та скорочення часу його впливу, отже, для розрахунку максимумів перенапруги необхідно враховувати взаємний вплив між каналами екран-екран сусідніх фаз, щоб раціонально вибирати захисні методи під час проектування.

#### **Список використаної літератури**

1. Schött-Szymczak A., Walczak, K. Impact of Cable Configuration on the Voltage Induced in Cable Screen during Work with One-Sidedly Ungrounded Cable Screen. *Energies*, 14(14), 4263. doi.org/10.3390/en14144263
2. Santos M., Calafat M. A. (2019). Dynamic simulation of induced voltages in high voltage cable sheaths: Steady state approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 105, 1-16. doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.08.003
3. Lobodzinskiy V. Transient Analysis in Three-Phase Cable Lines with the Transposition Phase Cables Conductive Screens During Short Circuit Fault. *IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2021. p. 413-416. doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9575468
4. Lobodzinskiy Vadim, Chybelis Valeriy, Petruchenko Oleg, et al. Features of Transient Research in Three-Phase High-Voltage Power Transmission Cable Lines. *Grail of Science*, 2021, №6. pp. 132-145. doi.org/10.36074/grail-of-science.25.06.2021.025.
5. 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.
6. Бойко В.С., Бойко В.В., Видолуб 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.
7. Wedepohl, L. M., & Wilcox, D. J. Transient analysis of underground power-transmission systems. System-model and wave-propagation characteristics. In *Proceedings of the institution of electrical engineers*. 1973, Vol. 120, No. 2, pp. 253-260. doi.org 10.1049/piee.1973.0056

V. Lobodzinskiy<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-1167-824X

M. Buryk<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-7114-1084

<sup>1</sup>National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## RESEARCH OF IMPULSE OVERVOLTAGES IN HIGH VOLTAGE CABLE LINES WITH CROSS BONDING CABLE SHEATH

*In the paper, a mathematical model of a power transmission cable line with cross bonding of screens is developed for the study and analysis of wave processes of overvoltage pulses during the cross bonding of screen contours. Equivalent and calculation schemes for the cross bonding of cable line shields are proposed, for which analytical expressions for calculating overvoltage maxima are obtained. Based on the analysis of the wave processes occurring in cross bonding cable shields of the three-phase system, it was established that when estimating the maximum voltage on the shields of the cable line, it is permissible not to take into account the waves reflected from the nodes located behind the node under consideration in the direction of wave travel. On the contrary, it is recommended to take into account the mutual influence of the phases, if we approximately accept the wave resistance of the screen-earth channel, which is equal to the wave resistance of the inter-screen channel. It has been established that taking into account the mutual influence of the phases leads to a decrease in the amplitude of the pulse and a reduction in the time of its influence, therefore, in order to calculate the overvoltage maxima, it is necessary to take into account the mutual influence between the screen-screen channels of neighboring phases.*

**Keywords:** *mathematical model, wave processes, cable line, cross bonding cable sheath, surge impulse.*

### References

1. Schött-Szymczak A., Walczak, K. Impact of Cable Configuration on the Voltage Induced in Cable Screen during Work with One-Sidedly Ungrounded Cable Screen. *Energies*, 14(14), 4263. doi.org/10.3390/en14144263
2. Santos M., Calafat M. A. (2019). Dynamic simulation of induced voltages in high voltage cable sheaths: Steady state approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 105, 1-16. doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.08.003
3. Lobodzinskiy V. Transient Analysis in Three-Phase Cable Lines with the Transposition Phase Cables Conductive Screens During Short Circuit Fault. *IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2021. p. 413-416. doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9575468
4. Lobodzinskiy Vadim, Chybelis Valeriy, Petruchenko Oleg, et al. Features of Transient Research in Three-Phase High-Voltage Power Transmission Cable Lines. *Grail of Science*, 2021, №6. pp. 132-145. doi.org/10.36074/grail-of-science.25.06.2021.025.
5. Lobodzinsky V.Y., Chybelis 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.
6. 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 «Politekhnik», 2004. – Vol. 3. – 244 p.
7. Wedepohl, L. M., & Wilcox, D. J. Transient analysis of underground power-transmission systems. System-model and wave-propagation characteristics. In *Proceedings of the institution of electrical engineers*. 1973, Vol. 120, No. 2, pp. 253-260. doi.org 10.1049/piee.1973.0056

Надійшла: 15.11.2023

Received: 15.11.2023