

## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.315.2.016.2

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/04>

### **Лободзинський В.Ю.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### **Бурик М.П.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### **Спінул Л.Ю.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### **Чибеліс В.І.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### **Ілліна О.О.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ СИСТЕМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ ЕКРАНІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

*Наукові задачі розрахунку перехідних процесів, що виникають в трифазних кабельних лініях електропередачі під час режимних та аварійних змінень пропускної потужності, відносяться до найбільш складних у сучасній електротехніці. Вони додатково ускладнюються при наявності міжфазних електромагнітних та ємнісних зв'язків. У статті аналізуються несправності перехресного з'єднання високовольтних кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену напругою 330 кВ, а для моделювання використовується програмне забезпечення для електромагнітних перехідних процесів реалізованого за допомогою Matlab/Simulink. Результати моделювання підсумовують характеристики змін струму короткого замикання при різних пошкодженнях ізоляції кабелю. Чим довша кабельна лінія, тим струм короткого замикання буде більшим, а застосування транспозиції екранів може зменшити наведений струм. Програмне забезпечення для моделювання Matlab/Simulink використовується для створення імітаційної моделі перехідного електромагнітного процесу, яка може моделювати різні можливі несправності системи при струмах короткого замикання в екранах кабелів. Розрахунок та прогнозування перехідних електромагнітних процесів являє собою не просту задачу. Перехідні процеси, які протікають в багатофазних електричних колах, якими являються кабельні лінії електропередачі, потребують поглибленого дослідження. Крім того, ця задача є статичною, що потребує розгляду великої кількості варіантів, в яких змінюються різні фактори та їх сполучення. Розгляд таких задач та доведення їх до технічного рішення не завжди представляється можливим без використання сучасних обчислювальних засобів. Результати можуть забезпечити теоретичну основу для виявлення несправностей системи при використанні транспозиції екранів кабелю.*

*Дослідження у цій статті можуть забезпечити теоретичну основу виявлення пошкоджень екрану кабелю високої напруги. Зокрема, топологія побудованої моделі може бути використана в майбутньому для дослідження двофазних, трифазних та інших складних замикань у кабельній лінії електропередачі.*

**Ключові слова:** *перехідні процеси, комп'ютерне моделювання, трифазні електричні схеми, кабельна лінія, коротке замикання, взаємна індукція.*

**Постановка проблеми.** Завдяки особливій структурі високовольтний кабель з ізоляцією із зшитого поліетилену (СПЕ) має лише однофазний змінний струм, що протікає через його серцевину, і змінне магнітне поле навколо нього буде створюватися великим струмом. Величина індукованої напруги пропорційна довжині кабелю. Чим довше кабель, тим вище індукована напруга на екрані. Надмірна індукована напруга загрожує безпечній експлуатації кабелю. Правилами експлуатації передбачено, що напруга захисного екрану не може перевищувати 50 В або 100 В і щоб індукована напруга на екрані кабелю не була занадто високою, екран кабелю повинен бути заземлений.

Важливим способом захисту високовольтних кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену є перехресне з'єднання металевих екранів – транспозиція, що зменшує індуковану напругу та циркулюючий струм оболонки, але цей метод заземлення створює великі труднощі для визначення виду несправності. Технологія он-лайн моніторингу використовує високовольтні датчики струму для постійного збору даних про струм заземлення високовольтних кабелів. Завдяки моніторингу струму, що протікає по екрану, потенційні несправності в високовольтних кабельних лініях можна виявити завчасно, ефективно уникаючи незапланованих відключень електроенергії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** 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 напруг для розрахунку і дослідження їх оригіналів [1].

При чисельному аналізі електромагнітних перехідних процесів в кабельних лініях, її основною математичною моделлю є диференціальні рівняння. Відомі загальні алгоритми формування цих рівнянь, які сумісні з багатьма чисельними методами та їх подальшими рішеннями [2].

Однак ці алгоритми досить складні (особливо при наявності в колі взаємоіндуктивних зв'язків),

вимагають виконання невиправдано громіздких математичних перетворень, додаткової логічної обробки вихідних даних і результату [3-5].

**Постановка завдання.** У цій роботі метод аналізу струму короткого замикання між жилою та екраном високовольтного кабелю використовується для розрізнення несправностей при застосуванні транспозиції екранів кабелю, що відрізняється від поточних методів виявлення несправностей. На основі аналізу циркулюючого струму в екрані ми використовуємо програму моделювання електромагнітних перехідних процесів *Matlab/Simulink* для моделювання та розрізнення несправностей при транспозиції екранів високовольтного кабелю на напругу 330 кВ. В роботі узагальнюються характеристики змін струму короткого замикання при різних пошкодженнях ізоляції між жилою та екраном кабелю, що забезпечує теоретичну основу для ідентифікації несправностей системи при струмах короткого замикання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** При розробленні математичної моделі для розрахунку струмів і напруг у струмоведучих жилах та електромагнітних екранах трифазних кабельних ліній однофазного виконання з СПЕ ізоляцією для нормальних і аварійних режимів роботи потрібно враховувати способи заземлення екранів кабелю. При заземленні екранів кабелю з двох сторін виникають струми індукції, що призводить до появи значних поздовжніх струмів, що супроводжуються втратами енергії, в свою чергу це призводить до зниження пропускної спроможності лінії. Найбільш дієвим способом обмеження поздовжніх струмів в екранах є транспозиція, що знижують струми до десятків ампер. При збільшенні довжини КЛ в вузлах транспозиції виникає збільшення діючого значення напруги, яка може перевищувати допустиму електричну міцність ізоляції, зниження якої досягається збільшенням кількості циклів транспозиції [6-8].

Електрична схема у вигляді еквівалентного багатополосника на рис. 1 з урахуванням взаємних індуктивних зв'язків, що існують між індуктивностями жил і екранів.

Ця модель дає можливість розглядати значення напруг і струмів на початку або в кінці лінії. Для аналізу розподілу напруги та струму вздовж лінії ліній розглядалася як ланцюговий еквівалентний контур. Описана модель є спрощеною, оскільки не враховує динамічні характеристики джерел енергії та навантажень. Однак, використовуючи зручний для користувача інтерфейс *Simulink*, відкрита

структура моделі дозволяє швидко змінювати її топологію та параметри блоків в залежності від конкретного завдання. Досліджена високовольтна лінія електропередач має живлення 330 кВ, з навантаженням, обраним з урахуванням номінального струму (750 А) в жилі кабелю, довжина лінії 3000 м. Параметри схеми лінії розраховані з урахуванням геометричних параметрів однофазного кабелю  $r_1=17.4$  мм,  $r_2=42.8$  мм,  $r_3=46.5$  мм,  $r_4=52.5$  мм [6]. Полноси екранів з'єднують за типом транспозиції.

Розглядається випадок несправності у першому вузлі транспозиції, коли через 0.017 с, після виходу системи в усталений режим, відбувається замикання між жилою кабелю фази А та екраном. Через 0.03 с від початку короткого замикання лінії, після нетривалого перехідного процесу, повертається в попередній усталений режим (рис. 2).

Як видно з рис. 2, а показані часові залежності струмів в фазах трифазної кабельної лінії при замиканні короткому замиканні між жилою та екраном кабелю. Струм фази А різко зростає, при цьому з'являється аперіодична складова. Стрибок струму фази А обумовлений дією напруги джерела і зміною запасу енергії магнітного поля в індуктивності, а також замиканню струму жили на землю через екран кабелю.

Підвищення струму в екрані в момент комутації (рис. 2, б), обумовлено зміною запасу енергії магнітного поля індуктивності жили і дією взаємодуції між жилою і екраном. В наслідок збільшення взаємної індукції жили фази А на екрані, ЕРС взаємодуції збільшується, і в тран-

спонованих екранах починають протікати індуквані струми порівнянні з струмами короткого замикання фази, що може призвести до перегріву струмоведучих частин та до термічного руйнування екрану. Коливання струмів непошкоджених фаз В, С викликано наведенням з боку пошкодженої фази А, що пояснюється наявністю взаємної індуктивності між фазами кабельної лінії електропередачі.

На рис. 2, в не спостерігаються великих стрибків струмів в момент комутації, так як весь струм короткого замикання з фази А через екран проходить у землю. В свою чергу амплітуда струму фази А в перший момент часу характеризується появою високочастотних коливань викликаних наявністю в колі безлічі  $RLC$ -контурів, що виникають при послідовному з'єднанні еквівалентних багатополосників. Коливання напруги виникають під час розряду ємностей поперечних віток схем заміщення ділянок кабельної лінії. Це пояснюється тим, що при короткому замиканні в пошкодженій фазі А залишається заряд, який рівномірно розподіляється уздовж фази в результаті перехідного коливального процесу, після загасання якого на фазі встановлюється потенціал (напруга залишкового заряду).

**Висновки.** У статті аналізується механізм генерації струму в жилах та екранах кабелю та взаємозв'язок між струмом заземлення екрану та струмом навантаження. Чим довша кабельна лінія, тим більше буде наведений струм у екрані, а використання транспозиції екранів кабелю може зменшити наведений струм. Програмне забезпе-

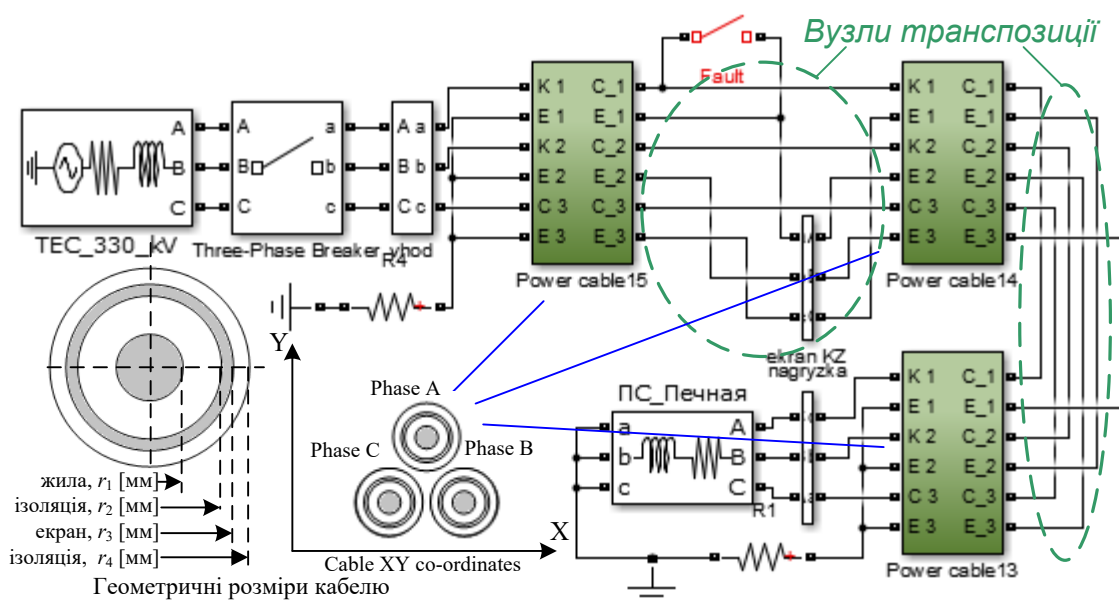
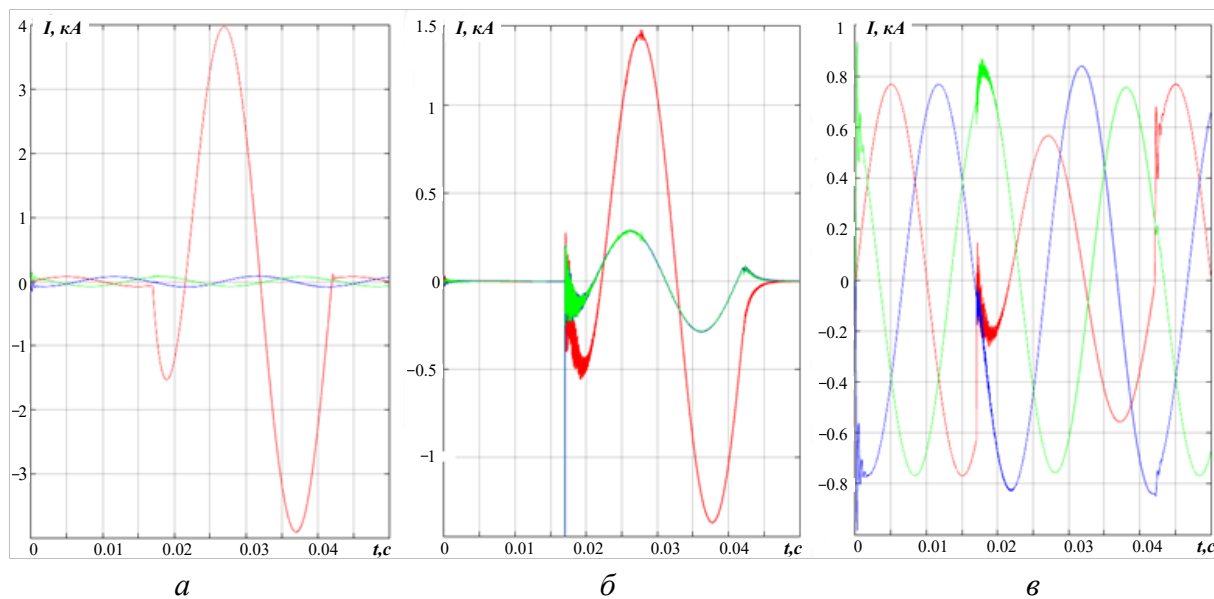


Рис. 1. Схема імітаційної моделі



**Рис. 2. Осцилограми струмів під час короткого замикання між жилою та екраном кабелю:**  
**а) струми в жилі кабелю на початку лінії; б) струми в екрані кабелю у першому вузлі транспозиції;**  
**в) струми в жилі кабелю на навантаженні**

чення для моделювання Matlab/Simulink використовується для створення імітаційної моделі електромагнітного перехідного процесу трифазної кабельної лінії, яка може моделювати різні можливі несправності системи.

Дослідження у цій статті можуть забезпечити теоретичну основу виявлення пошкоджень екрану кабелю високої напруги. Зокрема, топологія побудованої моделі може бути використана в майбут-

ньому для дослідження двофазних, трифазних та інших складних замикань у кабельній лінії електропередачі. Ця модель також дозволяє комплексно вивчати показання віртуальних приладів при включенні в модель паралельних вузлів і навантажень з динамічно змінними параметрами, що дозволяє здійснювати розрахунки різних режимів роботи енергосистеми даного типу на початкових етапах проектування.

#### Список літератури:

1. Jing Yang, XiaoLin Zhu, XiangDong, etal. On-line Monitoring and Diagnosis of HV Cable Faults Based on Sheath Current. *High Voltage Engineering*. 2016. vol.42,no.11. pp.3616-3625.
2. Xinggan Lang, Yuli Wang, Lei Zhang. Sheath overvoltage characteristics for single-phase ground fault in 220KV power cable. *Engineering Journal of Wuhan university*. 2013. vol.46,no.6. pp.747- 751.
3. Yanling Yuan, Hao Zhou, JieDong, etal. Sheath Current in HV Cable systems and Its on-line Monitoring for Cable Fault diagnosis. *High Voltage Engineering*. 2015. vol.41, no.4. pp.1194-1203.
4. Bangle He, YongHuang, TingYe,etal. Temperature prediction of power cable joint based on PSO-LSSVM predict mode. *Electric Power Engineering Technology*. 2019. vol.38,no.1. pp.37-41.
5. Lobodzinskiy Vadim, Chybelis Valeriy, Petruchenko Oleg, etal. Features of Transient Research in Three-Phase High-Voltage Power Transmission Cable Lines. 2021. *Grail of Science*. № 6. pp. 132-145.
6. 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.
7. MathWorks. Three-phase AC power cable. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/accablethreephase.html> дата звернення: 30.03.2022 р.)
8. Schött-Szymczak A., Walczak K. Analysis of overvoltages appearing in one-sidedly ungrounded MV power cable screen. Poznan University of Technology, Poznan, Poland, 2020.

**Lobodzinskiy V.Yu., Buryk M.P., Spinul L.Yu., Chybelis V.I., Illina O.O. Fault Identification of High-voltage Cable Shield Grounding System Based on Short Circuit Current analysis**

*Scientific problems of calculation of transients occurring in three-phase cable transmission lines during conditional and emergency changes in throughput are among the most complex in modern electrical engineering. They are further complicated by the presence of interfacial electromagnetic and capacitive connections. The article analyzes the cross-connection faults of high-voltage XLPE 330 kV cables, and Matlab/Simulink software for electromagnetic transients is used for modeling. The simulation results summarize the characteristics of changes in short-circuit current with different damage to the cable insulation. The longer the cable line, the greater the short-circuit current, and the use of screen transposition can reduce the induced current. Matlab/Simulink simulation software is used to create a simulation model of the transient electromagnetic process, which can simulate various possible system faults with short-circuit currents in cable screens. Calculation and prediction of transient electromagnetic processes is not an easy task. Transients that occur in multiphase electrical circuits, which are cable transmission lines, require in-depth study. In addition, this problem is static, which requires consideration of a large number of options in which different factors and their combinations change. Consideration of such problems and bringing them to a technical solution is not always possible without the use of modern computing tools. The results can provide a theoretical basis for detecting system faults when using cable shield transposition.*

*The research in this article can provide a theoretical basis for detecting high-voltage cable shield damage. In particular, the topology of the constructed model can be used in the future to study two-phase, three-phase and other complex short circuits in the cable transmission line.*

**Key words:** *transients, computer modeling, three-phase electrical circuits, cable line, short circuit, mutual induction.*