

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ І МІЖФАЗНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ НА ПРИКЛАДІ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ

У роботі проведено аналіз перехідних процесів у трифазних електричних колах, що дозволило розглянути зміни перехідних складових струмів і напруг кожної фази трифазного кабельної лінії електропередачі і оцінити рівень перенапруги і амплітуди струмів короткого замикання в екранах з урахуванням транспозиції. У середовищі MatLab/Simulink розроблено програмні засоби і методику чисельного розрахунку перехідних електромагнітних процесів у спроектованій кабельній лінії 330 кВ для аналізу рівня напруг на екранах і струмів у жилах кабелю при різних комутаційних режимах. Проведено розрахунки конкретної кабельної лінії на 330 кВ протяжністю 13 км, вперше прокладеної в Україні для електропостачання електросталеливарного комплексу. Проведено розрахунок виникаючих перехідних електромагнітних процесів у такій лінії при різних умовах її підключення до трифазної мережі електроживлення. Це дозволяє рекомендувати результати роботи для розробки методик визначення допустимих і аварійних режимів аналогічних трифазних кабельних ліній електропередачі та вибору раціональних схемо-конструктивних рішень при їх проектуванні.

Ключові слова: кола з розподіленими параметрами, трифазні електричні кола, багатополіусник, перехідні процеси, міжфазні зв'язки, кабельна лінія.

Вступ. Одним із сучасних методів підвищення надійності та безпеки кабельних ліній електропередачі високої і надвисокої напруги є застосування в них кабелів зі зшитого поліетиленовою (СПЕ) ізоляцією, яка відрізняється підвищеними експлуатаційними характеристиками, особливо в місцевостях з щільною забудовою і розгалуженими комунікаціями. Повітряні і кабельні лінії мають суттєво різні зосереджені і розподілені реактивні параметри, сукупність яких в електричних колах високої і надвисокої напруги можуть викликати перехідні процеси і закономірності, які до сих пір не досліджувалися. Мало відомі також діапазони зміни розподілених параметрів сучасних високовольтних і надвисоковольтних кабелів зі СПЕ ізоляцією при їх експлуатації в різних режимах.

У нормальному режимі передачі потужності ці коливальні властивості не проявляються. Однією з причин виникнення в кабельних лініях короткочасних перенапруг або надструмів при планових і випадкових комутаціях є накопичення електричної і магнітної енергій в реактивних елементах електричного кола. Кожна комутація викликає перехідний процес, який може привести до перекриття ізоляції.

Багато видів комутаційних перенапруг підлягають обмеженню. Техніко-економічні обґрунтування заходів захисту від перенапруг включають в себе оцінку статистичних характеристик збитку внаслідок пошкодження, простого або позачергового ремонту електроустановки кабельної лінії, а так само внаслідок порушення технологічного процесу у споживачів [1, 2, 4].

Сказане вище обумовлює актуальність моделювання та аналізу електромагнітних процесів, що виникають при підключенні і комутаціях кабельних ліній в надвисоковольтних трифазних електричних колах.

На сьогоднішній день в Україні вперше розроблено і знаходиться в стадії реалізації проект кабельної лінії електропередачі на напругу 330 кВ (КЛ 330 кВ) з ізоляцією із зшитого поліетилену, для електропостачання електросталеливарного комплексу заводу "Дніпросталь" загальною довжиною лінії 13 км [2].

Вибір кабелю такого типу для такої лінії 330 кВ відповідає світовій тенденції розвитку кабельних ліній електропередачі. В даний час в промислово розвинених країнах практично 100% ринку силових кабелів високої і надвисокої напруги 150 кВ і вище займають кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену.

Зшитий поліетилен являє собою полімер, створений молекулами поліетилену, які з'єднані між собою додатковим поперечними зв'язками. Широке використання зшитого поліетилену в якості ізоляції силових кабелів обумовлено чудовими діелектричними властивостями (висока діелектрична міцність,

низький tgσ, низька діелектрична проникність ϵ_r) і високою температурною стабільністю, що дозволяє збільшити струмові навантаження, як в режимі експлуатації, так і режимі короткого замикання.

Розробка і реалізація спеціальних проектів таких надвисоковольтних трифазних кабельних ліній електропередачі потребує виконання значних попередніх науково-технічних розробок, електротехнічних розрахунків по вибору внутрішнього перерізу струмоведучих жил кабелю для забезпечення пропускної здатності у лінії, втратам напруги, допустимим тривалим навантаженням за умови нагріву у нормальних та аварійних режимах.

В даний час для електротехнічних розрахунків все частіше використовуються спеціальні прикладні комп'ютерні програми. Одним з найпопулярніших математичних пакетів такого типу є MatLab/Simulink, який дозволяє створювати структурні схеми для розрахунку, дослідження та аналізу перехідних електромагнітних процесів у трифазних електричних колах, що включають в себе ділянки кабельної лінії електропередачі [1–5].

Мета та завдання. Метою роботи є розробка в середовищі MatLab/Simulink програмних засобів і методики чисельного розрахунку перехідних електромагнітних процесів у спроектованій кабельній лінії 330 кВ для аналізу рівня напруг та струмів у жилах кабелю при різних комутаційних режимах.

Матеріали і результати досліджень. У статті проведено розрахунок виникаючих перехідних електромагнітних процесів у високовольтній трифазній кабельній лінії при різних умовах її підключення до трифазної мережі електроживлення. Для цього у середовищі Matlab/Simulink було створено комп'ютерну модель діючої кабельної лінії довжиною майже 13 км на напругу до 330 кВ, схема прокладки якої показана на рис. 1.

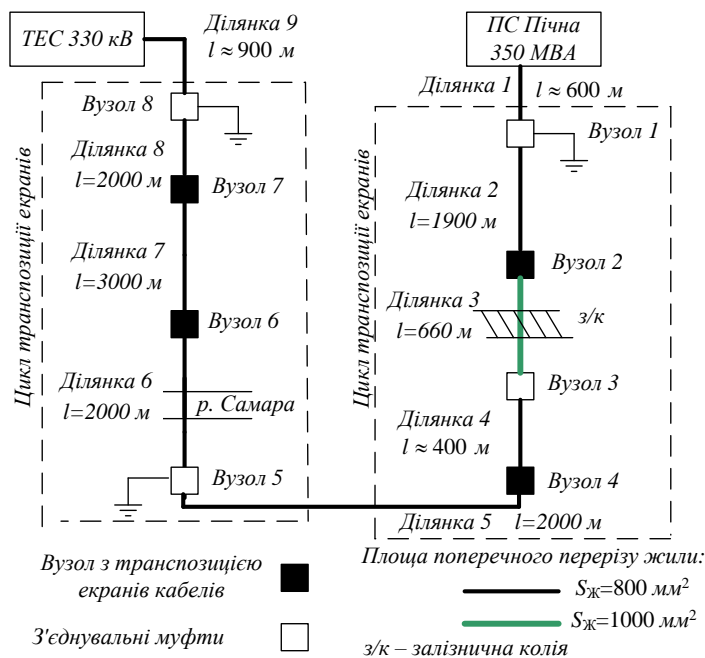


Рисунок 1 – Схема прокладки кабельної лінії 330 кВ

Комп'ютерна модель кабельної лінії, що показана на рис. 2 і відповідає схемі прокладки рис. 1 складається з 9 ділянок, кожна з яких модулюється еквівалентними багатополіусниками, які є ланками довжиною l ланцюгової схеми заміщення (номер ділянки та довжина в метрах показані на рис. 1). Еквівалентні багатополіусники (рис. 3) мають дванадцять полюсів (по шість з кожної сторони), що відповідають трьом струмоведучим жилам та трьом електромагнітним екранам кожної фази трифазної кабельної лінії. Полюси екранів з'єднуються по схемі транспозиції екранів кабелю [5, 6].

Для того щоб забезпечити передачу по лінії заданої потужності навантаження 350 МВт, з дотриманням необхідних температурних режимів, потрібно кабель з номінальним перетином струмоведучих жил 800 мм². Однак, на ряді ділянок вибраного перерізу недостатньо, так як питомий тепловий опір ґрунту і глибина прокладки кабелю по трасі відрізняються від базових. Для збільшення пропускної здатності кабелів застосовується транспозиція екранів кабелів по всій довжині лінії. При правильній організації транспозиції екранів (транспозиційна довжина кабелю розділена на три рівні частини) струми в екранах відсутні. На розглянутій кабельній лінії 330 кВ організувати ідеальну транспозицію не представляється можливим. На довжині лінії 11.5 км використовується два цикли

транспозиції. Підходи КЛ до ТЕС (900 м) і ПС Грубна (600 м) організовані без транспозиції, крім того підходи заземлені тільки з одного боку, що може привести до великих напруженням на незаземленій кінцях. Це становить небезпеку для ізоляції кабелю. Також лінія проходить під залізною дорогою (близько 0,5 км) та під річкою Самарою (близько 0,5 км). Фази кабелю прокладаються зімкнутим трикутником, що зменшує паразитні втрати в жилах кабелів. На ділянці кабельної лінії під залізною дорогою для забезпечення допустимих температурних режимів роботи, використовується кабель з перерізом струмоведучої жили 1000 мм² [3].

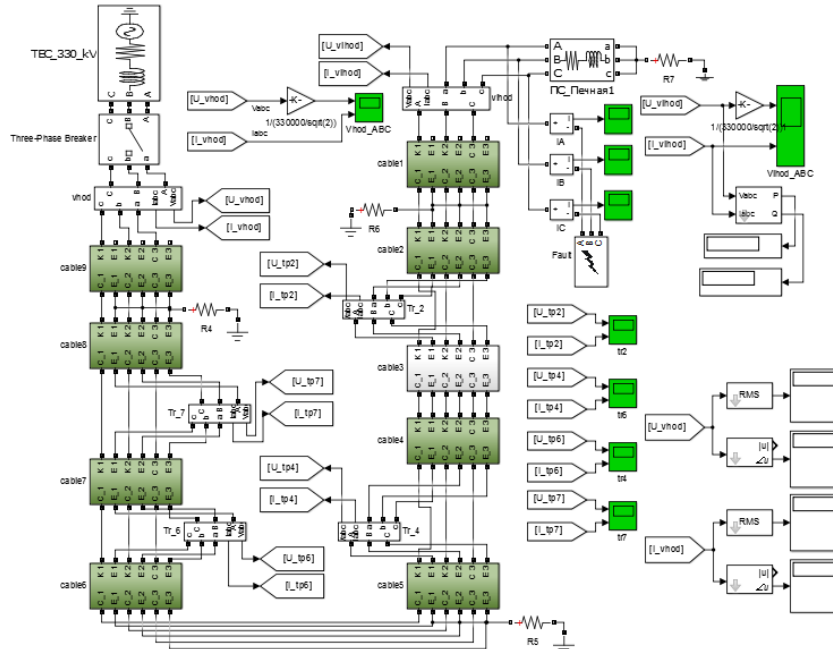
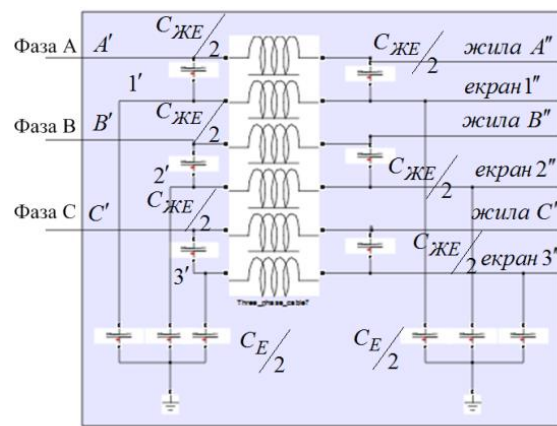


Рисунок 2 – Комп’ютерна модель трифазної кабельною лінією електропередачі 330 кВ



Багатополіусник

Рисунок 3 – Еквівалентний багатополіусник

В комп’ютерній моделі (рис. 2) на ділянках 2-5 та 6-8 виконувалася транспозиція екранів кабелів, довжини яких показані на рис. 1. Транспозиція не ідеальна і вибирається з умови, щоб в режимі однофазного короткого замикання напруга на екрані не перевищувала 3.5 кВ. Розрахунок параметрів лінії розраховувався по геометричним розмірам однофазного кабелю трифазної кабельної лінії для марки кабелю A2XS(FL)2Y 1x800 RM/150/190/330kV та A2XS(FL)2Y 1x1000 RM/150/190/330kV [3].

Перехідні електромагнітні процеси, що відбуваються в високовольтній кабельній лінії напругою 330 кВ, досліджувались засобами комп’ютерного моделювання. За основу для комп’ютерної моделі взята схема прокладки, зображена на рис. 1. На рис. 2 представлена відповідна Simulink-модель.

В режимі роботи лінії без навантаження (холостого ходу) (рис. 4) на вході лінії відбувається перехідний процес, протягом якого заряджаються всі ємнісні та індуктивні елементи лінії. В момент максимум напруги, напруги фази *B* (синій колір) та *C* (зелений колір) досягають 1.5 в.о., при частоті вільних коливань 620 Гц. Це пов'язане з початковим кутом включення.

Стрибок струму (рис. 5) досягає 2 кА, при усталеному режимі 150 А. Таке велике значення початкового струму, пов'язане з протіканням ємнісних струмів, що протікають по контуру жила-скран-земля. Струм на виході лінії рівний нулю, що підтверджує, що весь струм який надійшов на вхід лінії замикається на землю через ємнісні контури.

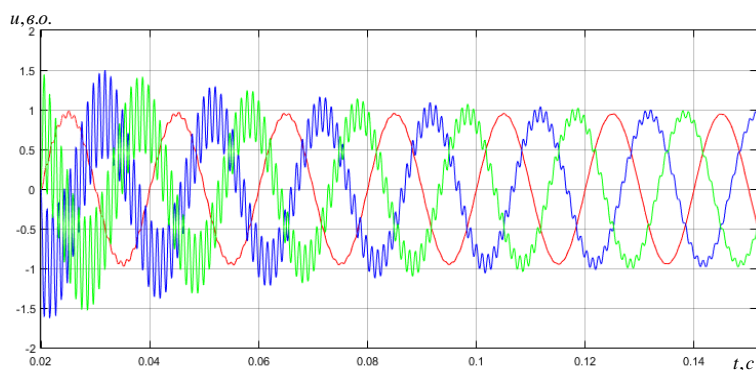


Рисунок 4 – Напряга на вході трифазної лінії в режимі холостого ходу

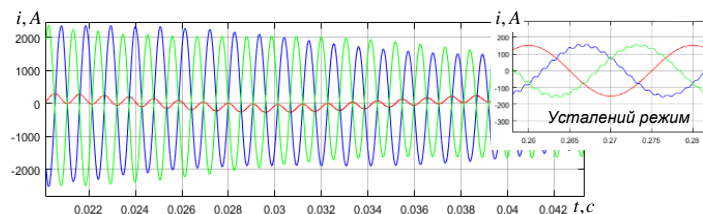


Рисунок 5 – Струм на вході трифазної лінії в режимі холостого ходу

При однофазному короткому замиканні (рис. 6) напруга на пошкодженій фазі *A* зменшується із за падіння напруги на джерелі, а напруги в фазах *B* та *C* збільшуються до лінійних значень, у нейтральній точці потенціал рівний ЕДС пошкодженої фази.

В свою чергу амплітуда струму фази при однофазному короткому замиканні в перший момент часу досягає 26 кА (рис. 7), що наряду з вимушеною складовою виникає вільна складова, що має аперіодичний характер. Як видно з осцилограмами, періодична складова струму короткого замикання фази *A* залишається незмінною протягом всього перехідного процесу. Завершення перехідного процесу визначається затуханням аперіодичної складової.

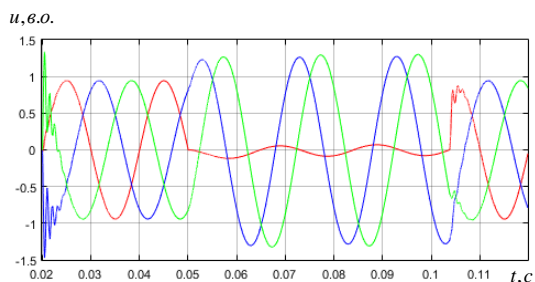


Рисунок 6 – Напряга в лінії при однофазному короткому замиканні



Рисунок 7 – Струм в лінії при однофазному короткому замиканні

Напряга в екранах у вузлах транспозиції 2, 4 та 6 не перевищує допустимих значень 3,5 кВ (рис. 8, а). У вузлі 7, напруга приймає значення 4 кВ. Підвищення напруги зумовлена тим, що ділянки 1 та 9 заземлені тільки з однієї сторони, тому потрібно вживати заходи для обмеження таких напруг. Це питання потребує додаткового дослідження, що виходить за рамки даної роботи.

Струм в екранах з'являється в наслідок різної довжини ділянок транспозиції (рис. 8, б), що обумовлено неповною компенсацією індуктованих струмів.

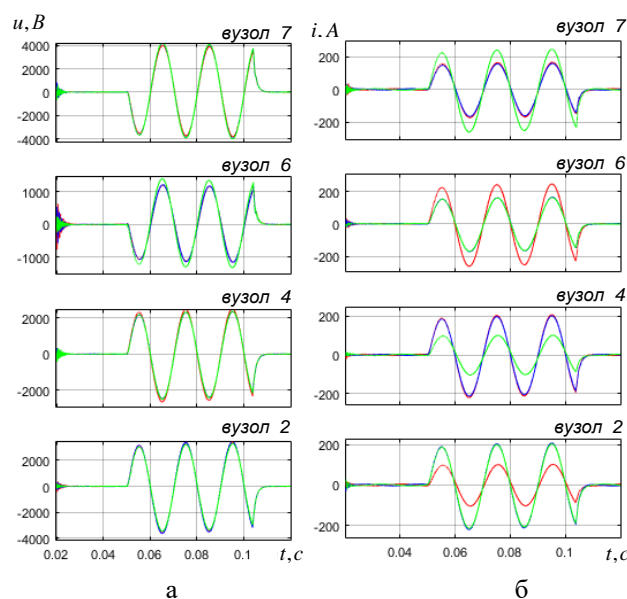


Рисунок 8 – Напряга і струм в екранах кабелів при однофазному короткому замиканні

Аналізуючи перехідні процеси у режимі однофазного короткого замикання можна зробити висновок, що для вибору оптимальних довжин ділянок транспозиції екранів кабелів, необхідно розглядати однофазний режим короткого замикання, так як в цьому режимі виникають неприпустимі перевищення напруги на екранах кабелів та струмів у жилах трифазних кабельних ліній.

Висновки.

Розглянуто осцилограми перехідних характеристик струмів в екранах трифазної КЛ однофазного виконання, при комутації КЛ до навантаження. Проведено аналіз умов появи струмів в екранах, обумовлених магнітним зв'язком, що виникає при взаємодукції між жилою і екраном одного і того ж кабелю і жилами сусідніх фаз.

Проведено аналіз перехідних процесів при однофазному короткому замиканні, що дозволило розглянути зміни перехідних складових струмів і напруг кожної фази трифазного кабельної лінії електропередачі і оцінити рівень перенапруги і амплітуди струмів короткого замикання в екранах з урахуванням транспозиції.

У роботі приведено розрахунки конкретної кабельної лінії на 330 кВ протяжністю 13 км, вперше прокладеної в Україні для електропостачання електросталеливарного комплексу заводу "Дніпросталь". Проведено розрахунок виникаючих перехідних електромагнітних процесів у такій лінії при різних умовах її підключення до трифазної мережі електроживлення. Це дозволяє рекомендувати результати роботи для розробки методик визначення допустимих і аварійних режимів аналогічних трифазних кабельних ліній електропередачі та вибору раціональних сфо-конструктивних рішень при їх проектуванні.

Список використаної літератури

1. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. К.: І-т електродинаміки НАН України, 2013. С. 550.
2. Лях В.В., Молчанов В.М., Сантацкий В.Г., Квицинский А.А. Кабельная линия напряжением 330 кВ: некоторые аспекты проектирования. Промэлектро, 2009, № 6. С. 27–33.
3. Лях В.В., Молчанов В.М., Судакова И.В., Павличенко В.П. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины. Электрические сети и системы, 2009, №3. С. 16–21.
4. Руководство по сооружению, испытаниям и эксплуатации современных кабельных линий сверхвысокого напряжения. РД К28-007:2017. / за ред. В.М.Золотарева, А.А.Щербы. Харьков, 2017. С. 63.
5. Лободзинський В.Ю. Перехідні процеси в представлених багатополосниками трифазних колах із розподіленими параметрами та електромагнітними зв'язками: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.05. Київ, 2019. 24 с.
6. Chibelis V., Lobodzinskiy V., Illina O. Research on transposition efficiency of screens of three-phase cable lines with consideration of mutual phase disposition. Computational Problems of Electrical Engineering, 2016, Vol.6, №2. pp. 63–66.

V. Lobodzinskiy, PhD in Technical Sciences, assistant professor, ORCID 0000-0003-1167-824X
V. Chybelis, PhD in Technical Sciences, assistant professor, ORCID 0000-0003-2235-9826
National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

TRANSIENT ANALYSIS IN THREE-PHASE ELECTRICAL CIRCUITS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS AND INTERFACIAL CONNECTION ON THE EXAMPLE OF HIGH-VOLTAGE CABLE LINE

The analysis of transients in three-phase electric circuits is carried out, which allowed to consider changes of transient components of currents and voltages of each phase of three-phase cable power line and to estimate the level of overvoltage and amplitude of short-circuit currents in screens taking into account transposition. Using the MatLab/Simulink program, software tools and methods for numerical calculation of transient electromagnetic processes in the designed 330 kV cable line were developed to analyze the level of voltages on the screens and currents in the cable cores at different switching modes. The calculations of a specific 330 kV cable line with a length of 13 km, laid for the first time in Ukraine for the power supply of the electric steel complex, were carried out. The calculation of the emerging transient electromagnetic processes in such a line under different conditions of its connection to the three-phase power supply network is carried out. Many types of switching overvoltages are subject to limitation. Feasibility studies of overvoltage protection measures include assessment of statistical characteristics of damage due to damage, simple or extraordinary repair of electrical equipment of the cable line, as well as due to violation of the technological process by consumers. The above determines the relevance of modeling and analysis of electromagnetic processes that occur when connecting and switching cable lines in ultra-high-voltage three-phase electrical circuits. This allows us to recommend the results of work to develop methods for determining the allowable and emergency modes of similar three-phase cable transmission lines and the choice of rational circuit design solutions in their design. Analyzing the transients in the mode of single-phase short circuit, we can conclude that to select the optimal lengths of the transposition sections of cable screens, it is necessary to consider single-phase short circuit mode, as in this mode there are unacceptable overvoltages on cable screens and currents in three-phase cable lines.

Keywords: distributed circuits, multipole, three-phase electric circuits, transients, interphase connections, cables.

References

1. A.K. Shydlovskiy, A.A. Shcherba, V.M. Zolotarev, A.D. Podoltsev, Y.N. Kucheriavaia. Ultra-high voltage polymer insulated cables. K.: I-t elektrodynamiky NAN Ukrainy, p. 550, 2013.
2. V.V. Liakh, V.M. Molchanov, V.H. Santatskiy, A.A. Kvytsynskiy. 330 kV cable line: some design aspects. Promjelektro, 2009, № 6.
3. V.V. Liakh, V.M. Molchanov, Y.V. Sudakova, V.P. Pavlychenko. The 330 kV cable line is a new stage in the development of Ukraine's electrical networks. Jelektricheskie seti i sistemy, №3, pp.27-33, 2009.
4. Guide to the construction, testing and operation of modern ultra-high voltage cable lines. РД К28-007:2017. / behind the editors V.M.Zolotareva, A.A.Shcherbi. Kharkov, pp. 63, 2017.
5. V.Iu. Lobodzynskiy. Transients in represented by multipoles three-phase circuits with distributed parameters and electromagnetic coupling: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.09.05. Kyiv, p.24, 2019.
6. Chibelis V., Lobodzinskiy V., Illina O. Research on transposition efficiency of screens of three-phase cable lines with consideration of mutual phase disposition. Computational Problems of Electrical Engineering, Vol.6, №2, pp. 63–66, 2016.

Надійшла 05.09.2021
Received 05.09.2021