ДЕРЖАВНА УСТАНОВА
«ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ МАГНЕТИЗМУ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ»

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Ткаченко Олександр Олегович

УДК 621.3.013.24

ДИСЕРТАЦІЯ

МАГНІТНЕ ПОЛЕ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ПРИ ДВОСТОРОННЬОМУ ЗАЗЕМЛЕННІ ЕКРАНІВ КАБЕЛІВ

Спеціальність 05.09.05 – теоретична електротехніка
14 – електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.О. Ткаченко

Науковий керівник
Розов Володимир Юрійович,
д.т.н., чл.-кор. НАН України

Ідентичність дії змінам з іншими примірниками дисертації засвідчую
Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 64.[illegible].17
Купіченко В.[illegible]
22.11.2018р.

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Ткаченко О.О. Магнітне поле високовольтних кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.05 «Теоретична електротехніка». – Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерство освіти і науки України, Харків, 2018.

Дисертація присвячена розвитку методів вирішення задачі фізико-математичного моделювання і розрахунку магнітного поля високовольтних трифазних кабельних ліній електропередачі, виконаних з одножильних кабелів, при двосторонньому заземленні їх екранів за допомогою аналітичних розв'язків.

Сучасна тенденція розвитку міських електромереж передбачає все більш широке застосування трифазних високовольтних кабельних ліній, що виконуються одножильними кабелями з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Однак маючи високі експлуатаційні характеристики, такі кабельні лінії створюють магнітне поле, індукція якого може перевищувати діючі екологічні норми для населення (0,5 мкТл в житлових приміщеннях і 10 мкТл на території житлової забудови). Тому при проектуванні трас кабельних ліній обов'язковим є ретельний розрахунок їх магнітного поля, який виконується відповідно до діючих нормативних документів за допомогою аналітичних розв'язків на основі відомих методів моделювання. Водночас при двосторонньому заземленні екранів кабелів, яке використовується відповідно до нормативних документів для обмеження наведеного на екранах електричного потенціалу, екрани кабелів утворюють замкнені контури, в яких індукуються повздовжні струми. Ці струми створюють додаткове магнітне поле, яке істотно змінює первинне магнітне поле кабельної лінії, що необхідно враховувати при моделюванні та розрахунку її магнітного поля.

Задачі моделювання та розрахунку магнітного поля при двосторонньому заземленні екранів кабелів можуть бути вирішені чисельними методами. Однак при проектуванні кабельних ліній переваги мають аналітичні методи, які відрізняються більш доступною для проектантів кабельних ліній методикою розрахунку та прозорою фізичною інтерпретацією результату. Проте методи рішення вказаних задач за допомогою аналітичних розв'язків на сьогодні досліджені недостатньо, що пов'язано з відсутністю теоретично обґрунтованих методів визначення комплексних амплітуд струмів в екранах трифазних кабельних ліній та методів моделювання магнітного поля при будь-яких схемах прокладання фазних кабелів («у площині», «у трикутник» тощо).

У дисертаційній роботі досліджено особливості трифазної кабельної лінії, виконаної з одножильних кабелів, як джерела магнітного поля при двосторонньому заземленні екранів кабелів. Показано, що коректні методики моделювання і розрахунку магнітного поля кабельних ліній можуть бути створені тільки за умови визначення комплексних значень струмів в замкнених екранах кабелів, що індуктивно зв'язані зі струмами жил кабелів. Проведено аналіз електромагнітних процесів в трифазній кабельній лінії при двосторонньому заземленні екранів на основі методу комплексних амплітуд і запропоновано узагальнену фізико-математичну модель магнітного поля кабельних ліній, що дозволяє створювати на її основі методики розрахунку магнітного поля кабельних ліній для різних схем прокладання кабелів.

На основі запропонованої фізико-математичної моделі отримано аналітичні вирази для розрахунку комплексних амплітуд струмів, індукованих в екранах кабелів при їх двосторонньому замиканні, для випадків прокладання кабелів «у трикутник» і «у площині». Так, запропоновано точний компактний вираз для розрахунку коефіцієнта екранування магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому замиканні екранів кабелів при їх прокладанні «у трикутник» та спрощений компактний вираз для розрахунку коефіцієнта екранування при прокладанні «у площині», похибка якого не перевищує 5%, що дозволяє рекомендувати їх для використання при проектуванні високовольтних

трифазних кабельних ліній з нормованим рівнем магнітного поля.

Запропоновано співвідношення для розрахунку коефіцієнта екранування магнітного поля кабельних ліній при охопленні кабелів феромагнітними осердями в залежності від параметрів кабелів, схеми їх прокладання та параметрів феромагнітних осердь, що дозволяє рекомендувати отримані вирази для використання при проектуванні високовольтних трифазних кабельних ліній з феромагнітними осердями та нормованим рівнем магнітного поля.

В роботі на основі чисельного розрахунку методом скінчених елементів показано, що похибка розробленої фізико-математичної моделі магнітного поля кабельних ліній, що зумовлена нерівномірністю розподілу густини струму в екранах кабелів, не перевищує 8% при прокладанні кабелів «у трикутник» та 5% при прокладанні кабелів «у площині». Це дозволяє рекомендувати дану модель для розробки інженерних методик розрахунку магнітного поля кабельних ліній на основі аналітичних розв’язків.

Проведено верифікацію розробленої фізико-математичної моделі на основі натурного експерименту на фізичному макеті трифазної кабельної лінії, виконаному з кабелів типу АПвЕгаПу-110-1х240/70. Показано, що запропонована модель дозволяє виконувати розрахунок магнітного поля при двосторонньому заземленні екранів кабелів з похибкою, що не перевищує 5%. Результати експерименту при охопленні кабелів феромагнітними осердями також обґрунтовують можливість 2-4 кратного підвищення коефіцієнта екранування *SF* при використанні феромагнітних осердь, а також можливість обмеження похибки запропонованої фізико-математичної моделі для розрахунку магнітного поля з феромагнітними осердями на рівні 15%. Це підтверджує коректність розробленої автором фізико-математичної моделі та можливість її практичного застосування для розрахунку магнітного поля при проектуванні кабельних ліній.

Показано, що відомі методики розрахунку діючого значення струмів в екранах кабелів, що використовуються в діючих нормативних документах при прокладанні кабелів «у площині», мають значну похибку, що досягає 30% і не

дозволяє коректно виконувати розрахунки у всьому діапазоні параметрів реальних кабельних ліній. Отримано і запропоновано для практичного застосування в нормативних документах Міненерговугілля коректні аналітичні вирази та нову методику для розрахунку діючих значень струмів в екранах кабелів при двосторонньому заземленні екранів кабелів, що дозволяють, в порівнянні з прийнятою в нормативних документах методикою розрахунку, зменшити похибку з 30% до 5-8%.

В роботі автором отримані наступні нові наукові результати. Вперше, на основі використання аналітичних розв'язків, розроблено узагальнену фізико-математичну модель магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів, що дозволяє здійснювати моделювання при будь-якій схемі прокладання кабелів. За допомогою розробленої фізико-математичної моделі, вперше отримані співвідношення для визначення магнітного поля та струмів в екранах кабелів при їх двосторонньому заземленні у разі прокладання кабелів «у площині». Запропоновано нове наближене компактне співвідношення для інженерного розрахунку коефіцієнта екранування магнітного поля реальних кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів у разі прокладання кабелів «у площині», яке отримано на основі розробленої фізико-математичної моделі та застосування перетворення Кларк і дозволяє виконувати розрахунок з методичною похибкою в межах 5%. Розвинено фізико-математичну модель магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів для випадку охоплення кабелів феромагнітними осердями та вперше, на основі використання аналітичних розв'язків, отримано співвідношення, що дозволяє виконувати інженерний розрахунок коефіцієнтів екранування магнітного поля кабельних ліній з феромагнітними осердями.

Отримані автором результати мають істотне практичне значення. Так, на основі запропонованої фізико-математичної моделі розроблено верифіковану методику розрахунку магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому замиканні власних екранів кабелів, яка використана при розробці нормативних

документів Міненерговугілля «СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49: 2011.2. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ: Настанова (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 139 с.» та «СОУ-Н ЕЕ 20.179: 2008. Розрахунок електричного и магнітного полів ліній електропередавання. Методика (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2016. – С. 37».

Основні результати виконаних в дисертації досліджень і практичних розробок використано при виконанні тематичного плану ДУ «ІТПМ НАН України», в діючих нормативних документах Міненерговугілля, передані НЕК «Укренерго» для подальшого використання при розробці нових нормативних документів з проектування кабельних ліній і розрахунку їх магнітного поля.

Ключові слова: магнітне поле, трифазна кабельна лінія, двостороннє заземлення екранів, феромагнітне осердя, перетворення Кларк.

Список публікацій здобувача:

1. Ткаченко А.О. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов / В.Ю. Розов, А.А. Квицинский, П.Н. Добродеев, В.С. Гринченко, А.В. Ерисов, А.О. Ткаченко // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 4. – С. 56-61.

2. Ткаченко А.О. Повышение эффективности контурного экранирования магнитного поля высоковольтных кабельных линий / В.Ю. Розов, П.Н. Добродеев, А.В. Ерисов, А.О. Ткаченко // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 4. – С. 5-7.

3. Ткаченко А.О. Аналитический расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей / В.Ю. Розов, А.О. Ткаченко, А.В. Ерисов, В.С. Гринченко // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 2. – С. 13-18.

4. Ткаченко А.О. Повышение точности расчета токов в экранах кабелей при двустороннем заземлении трехфазной кабельной линии / В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко, Н.В. Гринченко // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – № 2. – С. 39-42.

5. Ткаченко А.О. Определение погрешности аналитического расчета магнитного поля высоковольтных кабельных линий при двухстороннем замыкании экранов кабелей, вызванной неравномерностью плотности тока в экранах / А.О. Ткаченко // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – № 3. – С. 44-48.

6. Ткаченко А.О. Расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей, охваченных ферромагнитными сердечниками / В.Ю. Розов, В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко // Електротехніка і електромеханіка. – 2017. – № 5. – С. 44-47.

7. Ткаченко А.О. Расчет экранных токов в трехфазных кабельных линиях с треугольным расположением фаз / В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко, К.В. Чунихин // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції, Ч. II. – Харків, НТУ «ХПІ». – 2016. – С. 12.

8. Ткаченко А.О. Анализ погрешностей инженерных выражений для токов в экранах кабелей, заземленных с обоих концов / В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції, Ч. II. – Харків, НТУ «ХПІ». – 2017. – С. 79.

9. Ткаченко А.О. Моделирование магнитного поля высоковольтных кабельных линий при двустороннем заземлении собственных экранов кабелей / В.Ю. Розов, В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко // Совершенствование энергоустановок методами математического и физического моделирования: Тезисы докладов XVI международной научно-технической конференции, Секция. 3. – Харків, ІПМАШ. – 2017. – С. 1.

10. Tkachenko O. Magnetic field calculation of cable line with two-point bonded shields / V. Grinchenko, O. Tkachenko, K. Chunikhin // IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering. − 2017. – P. 211-214.

11. Ткаченко А.О. Аналитический расчет магнитного поля кабельных линий при двустороннем замыкании экранов кабелей, охваченных

ферромагнитными сердечниками / В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування України: матеріали І Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків. – 2017. – С. 218-219.

12. Tkachenko O. Analytical Calculation of Magnetic Field Shielding Factor for Cable Line with Two-Point Bonded Shields / V. Rozov, V. Grinchenko, O. Tkachenko, A. Yerisov // IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. – 2018. – P. 358 – 361.

ABSTRACT

O.O. Tkachenko «Magnetic field of high-voltage cable lines with two-point bonded cable shields». – The manuscript.

Thesis for the scientific degree of candidate of technical sciences (Ph.D.), specialty 05.09.05 «Theoretical electrical engineering». – State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine», National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to the advancement of methods for solving the problem of physico-mathematical simulation and calculation of the magnetic field of high-voltage three-phase cable lines with two-point bonded shields.

The current tendency of the development of city electric networks implies an increasingly widespread use of three-phase high-voltage cable lines performed by single-conductor cables with insulation of cross-linked polyethylene. However, having high performance, such cable lines create a magnetic field, that the magnetic flux density can exceed the current reference level for the population (0.5 μT for living space and 10 μT for an urban area). Therefore, when designing cable lines it is mandatory to calculate accurately their magnetic field using existing regulations documents and analytical solutions based on known methods. At the same time, in the case of two-point bonding, the cable shields form closed loops in which longitudinal currents are induced. These currents create an additional magnetic field that substantially changes the initial magnetic field of the cable line, which must be taken into account.

The problem of simulation of the magnetic field of the cable line with two-point bonded cable shields can be solved numerically. However, analytical methods are more affordable for designers when designing cable lines. Also, these methods have a transparent physical interpretation of the result. However, the methods of solving these problems with the help of analytical solutions are insufficiently studied. This is due to the lack of theoretically based methods for determining the complex

amplitude of currents in the shields of three-phase cable lines and the methods of magnetic field simulating at any arrangement of phase cables.

In the thesis, the features of a three-phase cable line with two-point bonded shields as the source of the magnetic field are investigated. It is shown that correct methods of calculating the magnetic field of cable lines can be created only if the currents in cable shields, which are inductively connected with the currents in cable cores, are determined. The analysis of electromagnetic processes in a three-phase cable line with two-point bonded shields based on the method of complex amplitudes is carried out. A generalized physico-mathematical model of the magnetic field of cable lines is developed. It allows creating methods for calculating the magnetic field of cable lines for a different arrangement of cables. On the basis of the proposed model, analytical expressions are obtained for calculating the complex amplitudes of currents induced in cable shields for cases of trefoil and flat arrangement of cables. A compact expression is proposed for calculating the magnetic field shielding factor for the trefoil cable lines with two-point bonded shields of cables. A simplified compact expression is proposed to calculate the shielding factor for flat cable line, the error of which is within 5%. The proposed expressions are recommended for use in the design of high-voltage three-phase cable lines with a normalized magnetic field level.

Expressions are proposed for calculating the shielding factor of the magnetic field of cable lines when ferromagnetic cores used. They take into account the parameters of the cables, their arrangement and the parameters of the ferromagnetic cores, which allows to recommend the obtained expressions for use in the design of high-voltage three-phase cable lines with ferromagnetic cores, used for shielding factor increasing.

In the thesis, on the basis of numerical simulation it is shown that the error of the developed physico-mathematical model of the of cable line magnetic field due to the non-uniform distribution of the current density in the cable shields is within 8% for trefoil and 5% for flat arrangement of cables. It allows us to recommend this model for the creation of new engineering methods of analytical calculation the magnetic field of cable lines.

Verification of the developed physico-mathematical model on the basis of the experiment on a three-phase cable line made of cables of the type APvEgaPu-110-1x240/70 are performed. It is shown that the proposed model allows to calculate the magnetic field with two-point bonded cable shields with 5% accuracy. The experimental results confirm the possibility of 2-4 times increase of the shielding factor when using ferromagnetic cores. It is also shown that the error of the proposed physico-mathematical model for calculating the magnetic field of cable line with ferromagnetic cores is within 15%. This confirms the correctness of the model developed by the author and the possibility of its practical application for calculating the magnetic field when designing cable lines.

In the thesis, it is shown that known methods of calculating the RMS values of currents in cable shields with flat cables arrangement have a significant error that reaches 30%. This does not allow to perform calculations correctly throughout the range of parameters of real cable lines. The correct analytical expressions and a new method for calculating the RMS values of currents in cable shields is proposed for the practical application in the regulations documents of the Ministry of Energy and Coal. This allows, in comparison with the method adopted in the regulations documents, to reduce the error from 30% to 5-8%.

In the work, the author obtained the following new scientific results. The generalized physico-mathematical model of the magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded shields of cables is developed. It can be used for any arrangement of cables. With the help of the developed physico-mathematical model, for the first time, exact expressions are obtained for calculating the magnetic field and currents in the cable shields in case of flat cables arrangement. On the basis of the developed physico-mathematical model and the application of the Clark transformation, for the first time the approximate compact expression for calculating the magnetic field shielding factor of cable lines with two-point bonded cable shields in the case of flat cables arrangement is proposed. The physico-mathematical model of the magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded shields of cables for the case of installation the ferromagnetic cores on cables is developed.

Also, for the first time, the expressions for the engineering calculation of the magnetic field shielding factor of cable lines with ferromagnetic cores are obtained.

On the basis of the proposed physico-mathematical model, a verified method for calculating the magnetic field of cable lines with two-point bonded shields of cables is developed. The method was used in the development of regulatory documents of the Ministry of Energy and Coal: “SOU-N-MEV40.1-37471933-49: 2011.2. Design of cable lines with voltage up to 330 kV: Installation (with changes). - Kyiv: Ministry of Energy and Coal of Ukraine, 2017. - 139 p.” and “SOU-N EE 20.179: 2008. Calculation of electric and magnetic fields of transmission lines. Methodology (with changes). - Kyiv: Ministry of Energy and Coal of Ukraine, 2016. - P. 37”.

The main results of the thesis and practical developments were used in the implementation of the thematic plan of the State Institution “Institute of Technical Problems of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine”, in the existing regulations of the Ministry of Energy and Coal, transferred to the National Power Company “UKRENERGO” for further use in the development of new regulatory documents on the design of cable lines and the calculation of their magnetic field.

Key words: magnetic field, three-phase cable line, two-point bonded shields, ferromagnetic core, Clark transformation.

List of publications of the aspirant by the thesis theme:

1. Tkachenko A.O. Study of the magnetic field of three phase lines of single core power cables with two-end bonding of their shield / V.Yu. Rozov, A.A. Kvitsinskiy, P.N. Dobrodeyev, V.S. Grinchenko, A.V. Yerisov, A.O. Tkachenko // Elektroteh. elektromeh. – 2015. – № 4. – P. 56-61.

2. Tkachenko A.O. Increasing the efficiency of contour shielding of the magnetic field of high-voltage cable lines / V.Yu. Rozov, P.N. Dobrodeev, A.V. Erisov, A.O. Tkachenko // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2016. – No 4. – P. 5-7.

3. Tkachenko A.O. Analytical calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded shields / V.Yu. Rozov, A.O. Tkachenko, A.V. Erisov, V.S. Grinchenko // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2017. – No 2. – P. 13-18.

4. Tkachenko A.O. Improving calculation accuracy of currents in cable shields at double-sided grounding of three-phase cable line / V.S. Grinchenko, A.O. Tkachenko, N.V. Grinchenko // Elektroteh. elektromeh. – 2017. – No 2. – P. 39-42.

5. Tkachenko A.O. Determination of analytical calculation error of magnetic field of high-voltage cable lines with two-point bonded cable shields caused by non-uniform current distribution in the shields / A.O. Tkachenko // Elektroteh. elektromeh. – 2017. – No 3. – P. 44-48.

6. Tkachenko A.O. Calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded cable shields covered by ferromagnetic cores / V.Yu. Rozov, V.S. Grinchenko, A.O. Tkachenko // Elektroteh. elektromeh. – 2017. – No 5. – P. 44-47.

7. Tkachenko A.O. The shield currents calculation of three-phase cable lines with a trefoil cable arrangement / V.S. Grinchenko, A.O. Tkachenko, K.V. Chunikhin // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: Tezy dopovidei XXIV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Ch. II. – Kharkiv, NTU «KhPI». – 2016. – P. 12.

8. Tkachenko A.O. Analysis errors engineering expressions of the currents of the cables shields with two-point bonded shields / V.S. Grinchenko, A.O. Tkachenko // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: Tezy dopovidei XXV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Ch. II. – Kharkiv, NTU «KhPI». – 2017. – P. 79.

9. Tkachenko A.O. Simulation of the magnetic field of high-voltage cable lines with two-point bonded cables shields / V.Yu. Rozov, V.S. Grinchenko, A.O. Tkachenko // Sovershenstvovanie energoustanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya: Tezisyi dokladov XVI

mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, Sektsiya. 3. – Harkiv, IPMASh. – 2017. – P. 1.

10. Tkachenko O. Magnetic field calculation of cable line with two-point bonded shields / V. Grinchenko, O. Tkachenko, K. Chunikhin // IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering. − 2017. – P. 211-214.

11. Tkachenko A.O. Analytical calculation of the magnetic field of cable lines with two-point bonded cable shields and installed ferromagnetic cores / V.S. Grinchenko, A.O. Tkachenko // Aktualni problemy avtomatyky ta pryladobuduvannia Ukrainy: materialy I Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. – Kharkiv. – 2017. – P. 218-219.

12. Tkachenko O. Analytical Calculation of Magnetic Field Shielding Factor for Cable Line with Two-Point Bonded Shields / V. Rozov, V. Grinchenko, O. Tkachenko, A. Yerisov // IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. – 2018. – P. 358 – 361.

ЗМІСТ

ВСТУП 5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ І МЕТОДИК МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРИФАЗНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ З ОДНОЖИЛЬНИХ КАБЕЛІВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ 11
1.1. Аналіз відомих методів моделювання та розрахунку зовнішнього магнітного поля технічних об’єктів 11
1.2. Особливості кабельних ліній як джерел магнітного поля при двосторонньому заземленні екранів кабелів 22
1.3. Аналіз аналітичних і чисельних методів моделювання та розрахунку магнітного поля кабельних ліній при різних схемах заземлення екранів їх кабелів 26
1.4. Аналіз відомої методики розрахунку магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів їх кабелів 33
1.5. Постановка задач досліджень 35
РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНЕ РІШЕННЯ ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТРИФАЗНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ПРИ ДВОСТОРОННЬОМУ ЗАМИКАННІ ВЛАСНИХ ЕКРАНІВ КАБЕЛІВ 37
2.1. Фізико-математична модель магнітного поля кабельних ліній при довільній схемі прокладання кабелів 37
2.2. Моделювання магнітного поля кабельних ліній при прокладанні кабелів «у трикутник» та «у площині» 46
2.3. Фізико-математична модель магнітного поля кабельних ліній при охопленні кабелів феромагнітними осердями 57
2.4. Визначення магнітного поля кабельних ліній, охоплених феромагнітними осердями, при різних схемах прокладання кабелів 60
2.5. Висновки по розділу 61

РОЗДІЛ 3. ВЕРИФІКАЦІЯ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ПРИ ДВОСТОРОННЬОМУ ЗАМИКАННІ ЕКРАНІВ КАБЕЛІВ 63
3.1. Розробка кінцево-різницевої моделі магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому замиканні екранів кабелів для верифікації фізико-математичної моделі магнітного поля 63
3.2. Визначення коефіцієнтів екранування *SF* магнітного поля реальних кабельних ліній при двосторонньому замиканні власних екранів кабелів на основі чисельної моделі та аналітичних розв'язків 70
3.3. Експериментальні дослідження магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому замиканні власних екранів кабелів 74
3.4. Експериментальні дослідження магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому замиканні власних екранів кабелів, охоплених феромагнітними осердями 80
3.5. Визначення похибки фізико-математичної моделі магнітного поля трифазної кабельної лінії, зумовленої прийнятим припущенням про рівномірність розподілу густини струму в екранах кабелів 83
3.6. Висновки по розділу 92
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ З РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ТА СТРУМІВ В ЕКРАНАХ КАБЕЛІВ ПРИ ДВОСТОРОННЬОМУ ЗАЗЕМЛЕННІ ЇХ ЕКРАНІВ 94
4.1. Верифікована методика розрахунку магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому замиканні власних екранів кабелів 94
4.2. Розрахункові співвідношення для визначення діючих значень струмів в екранах при прокладанні кабелів «у трикутник» та «у площині» 99
4.3. Верифікована методика розрахунку діючих значень струмів в екранах кабелів при двосторонньому заземленні їх екранів 110
4.4. Впровадження результатів дисертаційних досліджень 113
4.5. Висновки по розділу 114
ВИСНОВКИ 115

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 118
ДОДАТОК А. Акти про впровадження результатів дисертаційної роботи..... 130
ДОДАТОК Б. Накази Міненерговугілля, щодо впровадження результатів дисертаційної роботи 133
ДОДАТОК В. Протокол лабораторних випробувань кабельної лінії з 3-х одножильних кабелів типу АПвЕгаПу-110 1×240/70 за параметрами магнітного поля 136
ДОДАТОК Г. Список публікацій здобувача 142