

I.O. КОСТЮКОВ, Ю.Г. ГОНТАР

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ПОВЕРХНЕВОГО ЕФЕКТУ НА ВЕЛИЧИНУ АКТИВНОГО ОПОРУ СУЦІЛЬНИХ ТА БАГАТОПРОВОЛОЧНИХ ЖИЛ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ

У статті проведено аналіз деяких розрахункових співвідношень, що використовуються для визначення впливу поверхневого ефекту на величину активного опору суцільних і багатопроволочних жил силових кабелів. Показано, що застосування розглянутих розрахункових співвідношень призводить до висновку, згідно з яким ускладнення конструкції жили силового кабелю за рахунок її виготовлення з скручених між собою дротів зменшує вплив поверхневого ефекту на опір жили в порівнянні з суцільною жилою аналогічного номінального перерізу.

Ключові слова: поверхневий ефект; внутрішня індуктивність; комплексний опір.

И. А. КОСТЮКОВ, Ю. Г. ГОНТАРЬ

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА НА ВЕЛИЧИНУ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СПЛОШНЫХ И МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ЖИЛ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

В статье проведен анализ некоторых расчетных соотношений, которые используются для определения влияния поверхностного эффекта на величину активного сопротивления сплошных и многопроволочных жил силовых кабелей. Показано, что применение рассмотренных расчетных соотношений приводит к выводу, согласно которому усложнение конструкции жилы силового кабеля за счет ее изготовления из скрученных между собой проволок приводит к уменьшению влияния поверхностного эффекта на сопротивление жилы по сравнению со сплошной жилой аналогичного номинального сечения.

Ключевые слова: поверхностный эффект, внутренняя индуктивность, комплексное сопротивление.

I. KOSTIUKOV, Yu. GONTAR

AN ANALYSIS OF MODELS FOR THE ESTIMATION OF THE IMPACT OF SKIN EFFECT ON THE VALUE OF ACTIVE RESISTANCE OF SOLID AND MULTI-CONDUCTOR CORES OF POWER CABLES

The article analyzes some relations that are used in order to determine the influence of skin effect on the value of the active resistance of solid and stranded conductors of power cables. It is shown that the applying of the considered relations leads to the conclusion that the complication of the structure of the core of the power cable due to its manufacture from twisted together wires leads to the decreasing of the influence of skin effect on the resistance of power cable core in comparison with a solid core of a similar nominal cross-section. It was shown that this reduction takes place due to the calculation of the electrical resistance of power cable core based on the relation which is based on the applying of the nominal cross-section of the power cable core. In the range of core cable cross-section values from 240 mm² to 500 mm², despite some increase in core resistance, the influence of skin effect is not significant enough to transfer the value of the complex resistance to the region almost independent of the generalized parameter x phase angle. In the same range of values of the cross sections of the core such a transition of its complex resistance in the region of almost constant value of the phase angle can be achieved by increasing the frequency of current flowing through the core, however, this transition occurs in the frequency range much higher than the value of the industrial frequency.

Key words: skin effect; internal inductance; impedance.

Вступ. Величина активного опору жили силового кабелю є одним із багатьох параметрів, що значною мірою визначають таку важливу експлуатаційну характеристику силового кабелю, як його пропускна спроможність [1]. В реальних умовах експлуатації величина активного опору залежить від багатьох різних факторів, серед яких суттєву роль відіграють конструкція жили силового кабелю, технологія її виготовлення, а також нерівномірність розподілу щільності струму по перерізу жили внаслідок поверхневого ефекту та ефекту близькості. Вплив поверхневого ефекту та ефекту близькості на пропускну спроможність призводить до необхідності застосування сегментованих жил (типу «Міллікен») для силових кабелів із достатньо великим перерізом жили [2, 3]. В такому випадку, з точки зору розвитку моделей для визначення впливу поверхневого ефекту на величину активного опору жили силового кабелю, суттєве значення має аналіз питання щодо порівняння ступеня впливу поверхневого ефекту на величину активного опору суцільних та багатопроволочних жил силових кабелів. В практиці визначення активного опору жил високо-

частотних кабелів приймається положення, згідно з яким ускладнення конструкції жили кабелю за рахунок її виготовлення із застосуванням декількох проволок призводить до збільшення поверхневого ефекту в жилі кабелю [4]. Згідно із [4] фізичне обґрунтування такого збільшення полягає у існуванні в жилі додаткової компоненти електромагнітного поля, внаслідок відхилення форми шляху протікання струму від прямолінійного через спіральність накладання проволок в жилі кабелю. Одним із можливих шляхів врахування такого збільшення активного опору є застосування методу «еквівалентного перерізу», що полягає у визначенні загального перерізу провідника, що складається з декількох неізолюваних проволок [4]. Оскільки для силових кабелів характерними є значно більш складні конструкції жил, щонайменше внаслідок значно більших значень величин їх можливих перерізів, таке збільшення впливу поверхневого ефекту на величину активного опору жили потребує додаткового аналізу.

Мета статті полягає в аналізі способів врахування впливу поверхневого ефекту на активний опір суціль-

них та багатопроволочних жил силових кабелів із застосуванням відомих в кабельній техніці розрахункових моделей та співвідношень.

Електричний опір та внутрішня індуктивність однорідного прямолінійного циліндричного провідника. В реальних умовах експлуатації кабельної лінії опір жили силового кабелю змінному струму визначається конструкцією жили, технологією її виготовлення, електромагнітними властивостями матеріалів з яких виконана жила (в тому числі при конкретному струмовому навантаженні, що визначає температуру жили силового кабелю), а також, для деяких важливих для практики випадків, скін-ефектом та ефектом близькості. Зазначені ефекти обумовлюють перерозподіл щільності струму по перерізу жили кабелю. Такий перерозподіл щільності струму призводить до того, що внутрішня частина жили стає менш навантаженою електричним струмом i , відповідно, до збільшення опору жили змінному струму. Інтенсивність впливу поверхневого ефекту та ефекту близькості на активний опір жили силового кабелю залежить від безрозмірного параметру x (узагальнений параметр контролю, згідно із прийнятою в [5] термінологією), що визначається за (1):

$$x = a\sqrt{\omega\mu\gamma}, \quad (1)$$

де a – радіус жили кабелю, γ – питома електропровідність матеріалу жили, ω – кутова частота, μ – абсолютна магнітна проникність матеріалу жили. На рис. 1 наведено залежності розрахованого згідно із (1) параметру x для суцільних циліндричних мідних та алюмінієвих провідників при частоті 50 Гц. Враховуючи, що типовий розрахунок пропускної спроможності силових кабелів вимагає проведення розрахунків за максимальної тривало допустимої температури жили, розрахунки проводились при температурі жили 90°C, що є максимально тривало допустимою для силових кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену.

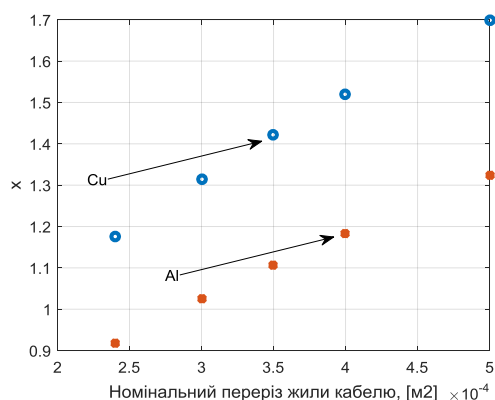


Рис. 1. Залежність розрахованого за (1) параметру x від номінального перерізу жили силового кабелю при температурі 90°C

Крім розрахунків при 90°C, враховуючи роботу кабельної лінії при змінному струмовому навантаженні, і, відповідно, при змінній температурі жили, розрахунки безрозмірного параметру x також були проведені приймаючи температуру жили рівною 50°C.

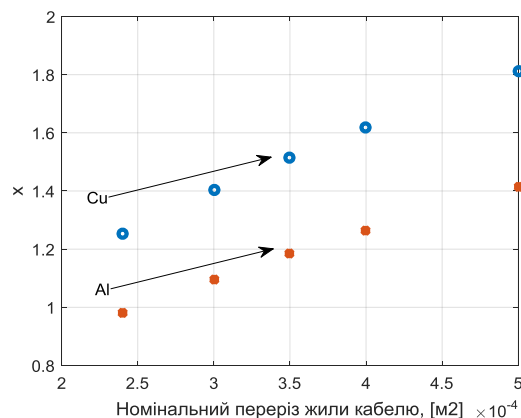


Рис. 2. Залежність розрахованого за (1) параметру x від номінального перерізу жили силового кабелю при температурі 50°C

З наведених на рис. 1 та рис. 2 результатів розрахунків можна зробити висновок, що зменшення температури внаслідок температурної залежності електропровідності матеріалу жили призводить до збільшення розрахованого за (1) параметру x і, відповідно, до збільшення впливу поверхневого ефекту на опір жили кабелю.

Для круглої суцільної жили можливе аналітичне визначення її активного та індуктивного опору, як із врахуванням ефекту близькості, так і при врахуванні скін-ефекту. При нехтуванні впливом ефектом близькості, тобто при врахуванні лише впливу поверхневого ефекту на опір жили, комплексний опір суцільної циліндричної жили можна знаходити згідно із виразом (2) [6]:

$$Z_a = \frac{1}{\gamma\pi a} \frac{\sqrt{ik} I_0(\sqrt{ika})}{2 I_1(\sqrt{ika})}, \quad (2)$$

де $I_0(i^{0.5}ka)$ – модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку, $I_1(i^{0.5}ka)$ – модифікована функція Бесселя першого роду першого порядку, k – коефіцієнт вихрових струмів, що визначається згідно із (3):

$$k^2 = w\mu\gamma. \quad (3)$$

Розрахунок модифікованих функцій Бесселя від комплексного аргументу в (2) для зручності можна проводити із використанням відомих формул:

$$I_0(\sqrt{ix}) = ber_0x + ibei_0x \quad (4)$$

$$I_1(\sqrt{ix}) = ber_1x + ibei_1x, \quad (5)$$

де ber_0x , bei_0x , ber_1x , bei_1x – функції Кельвіна нульового та першого порядку.

Виділяючи дійсну та уявну частину виразу (2) можна записати окремі вирази для активного опору та індуктивного опору прямолінійного циліндричного провідника. Враховуючи (2) а також (4, 5), вираз для фазового кута комплексного опору жили можна записати згідно із (6):

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{B_1 + B_2 + B_3 + B_4}\right), \quad (6)$$

де коефіцієнти $A_1..A_4$ та $B_1..B_4$ можуть бути визначені

згідно із виразами:

$$A_1 = \text{ber}_0 x \text{ber}_1 x, \quad (7)$$

$$A_2 = \text{bei}_0 x \text{bei}_1 x, \quad (8)$$

$$A_3 = -\text{bei}_0 x \text{ber}_1 x, \quad (9)$$

$$A_4 = \text{ber}_0 x \text{bei}_1 x, \quad (10)$$

$$B_1 = \text{bei}_0 x \text{ber}_1 x, \quad (11)$$

$$B_2 = -\text{ber}_0 x \text{bei}_1 x, \quad (12)$$

$$B_3 = \text{ber}_0 x \text{ber}_1 x, \quad (13)$$

$$B_4 = \text{bei}_0 x \text{bei}_1 x. \quad (14)$$

Результати розрахунку залежності фазового кута φ від радіусу жили кабелю та від частоти струму, що протікає по жилі кабелю наведено на рис. 3 та рис. 4.

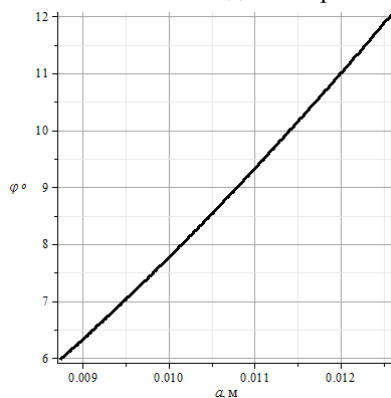


Рис. 3. Залежність розрахованого за (6) фазового кута від радіусу жили кабелю в діапазоні перерізів жили від 240 мм² до 500 мм²

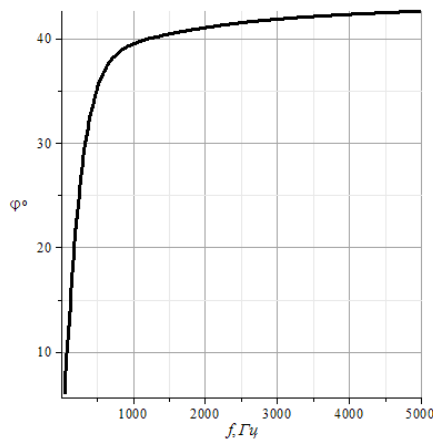


Рис. 4. Залежність розрахованого за (6) фазового кута від частоти змінного струму для перерізу жили силового кабелю 240 мм²

Розрахунок електричного опору багатопроволочних жил силових кабелів. Складна геометрія багатопроволочних жил силових кабелів не дозволяє використовувати аналітичне вирішення задачі, аналогічне до випадку суцільного циліндричного провідника. В загальному випадку, визначення опору багатопроволочної жили силового кабелю змінному струму проводять із використанням формули [7]:

$$R_{\sim} = R_{-}(1 + y_n + y_{\delta}), \quad (15)$$

де R_{-} – опір жили постійному струму, y_n , y_{δ} – допоміжні коефіцієнти, за допомогою яких враховують

вплив скін-ефекту та ефекту близькості на величину опору жили [8].

$$y_n = F(x) \quad (16)$$

$$y_{\delta} = \frac{G(x) \left(\frac{2a}{h}\right)^2}{1 - H(x) \left(\frac{2a}{h}\right)^2} \quad (17)$$

де h – відстань між центрами жил сусідніх кабелів, а $F(x)$, $G(x)$, $H(x)$ – допоміжні функції. Значення функції $F(x)$ наведено в табл. 1. [8]:

Таблиця 1 – Значення допоміжної функції $F(x)$ для розрахунку впливу поверхневого ефекту на опір жили змінному струму

x	$F(x)$
0.5	0
1	0.005
1.5	0.026
2	0.078
2.2	0.111
2.4	0.152
2.6	0.201

При цьому для багатопроволочних жил, на відміну від суцільних, параметр x визначають не за (1) а згідно із формулою (18) [8]:

$$x = \sqrt{\frac{2f\mu_0}{R_{-}}}, \quad (18)$$

Як можна бачити з даних в табл. 1 а також із виразів (15), (16), незважаючи на розрахунок параметру x не за (1), а згідно із виразом (18), його збільшення також призводить до збільшення впливу поверхневого ефекту на активний опір жили силового кабелю, тобто до збільшення різниці між величинами електричного опору жили змінному та постійному струму. В свою чергу, опір жили постійному струму можна знаходити згідно із (19) [7]:

$$R_{-} = \frac{\rho(1 + \alpha(T - 20))(1 + K_0)}{F}, \quad (19)$$

де F – номінальний переріз жили, T – максимальна робоча температура жили, ρ – питомий опір жили при 20 °С, α – температурний коефіцієнт опору, K_0 – коефіцієнт укрутки, який враховує збільшення опору за рахунок збільшення довжини дротин, із яких скручена жила.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнту K_0 для різних типів кабелю [7]

Тип кабелю	K_0
Одножилні силові кабелі із перерізом жили менш ніж 500 мм ²	0,03
Одножилні силові кабелі із перерізом жили 500 – 1000 мм ²	0,04
Одножилні силові кабелі із перерізом жили більше ніж 500 мм ²	0,05
Багатожильні кабелі	0,04

При цьому варто зазначити, що врахування збільшення опору багатопроволочної жили за рахунок збільшення довжини дротин, із яких скручена жила можна проводити не тільки із врахуванням наведених в

табл. 2 коефіцієнтів укрутки, а і шляхом безпосереднього розрахунку середньої укрутки для всієї жили кабелю [8].

Як можна бачити з аналізу виразів (15), (16), (18) а також із наведених в табл. 2 та табл. 1 даних, при врахуванні збільшення активного опору жили кабелю постійному струму за рахунок скручування проволочок в жилу силового кабелю шляхом застосування коефіцієнта укрутки K_0 в (19), розрахований за (19) параметр x зменшується. Таке зменшення автоматично призводить до висновку, згідно з яким ускладнення конструкції жили силового кабелю, що пов'язане із застосуванням не суцільних а багатопроволочних жил, призводить до зменшення впливу поверхневого ефекту на електричний опір жили силового кабелю. Зазначене зменшення впливу поверхневого ефекту викликано використанням в (19) саме номінального перерізу жили а не значення її перерізу, що враховує збільшення маси жили за рахунок її скручування із багатьох проволочок.

Висновки. Застосування наведених та проаналізованих моделей для розрахунку впливу поверхневого ефекту на величину активного опору жили силового кабелю призводить до висновку, за яким ускладнення конструкції жили за рахунок скручування окремих проволочок в жилу силового кабелю призводить до зменшення впливу поверхневого ефекту на активний опір жили кабелю. Зазначене зменшення пов'язане із розрахунком електричного опору жили постійному струму із застосуванням виразу, що передбачає використання величини номінального перерізу жили силового кабелю. В діапазоні значень перерізу жил силових кабелів від 240 мм² до 500 мм², незважаючи на деяке збільшення активного опору жили, вплив поверхневого ефекту не є достатньо суттєвим для переходу величини комплексного опору в область практично незалежного від узагальненого параметру x фазового кута. В цьому ж діапазоні значень перерізів жили такий перехід її комплексного опору в область практично незмінного значення фазового кута може бути досягнутий за рахунок збільшення частоти струму в жилі, проте і такому випадку зазначений перехід відбувається в діапазоні частот, що є набагато більшими за промислову частоту.

Список литературы

1. Kropotin O., Tkachenko V., Shepelev A., Petrova E., Goryunov V., Bigun A. Mathematical model of XLPE insulated cable power line with underground installation, *Przeglad Electrotechniczny*, 2019. Vol. 94, No. 6, P. 77-80
2. Золотарев В.М., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Анализ высокочастотных процессов в кабеле на напряжение 330 кВ с сегментированной жилой при возникновении частичных разрядов в его изоляции, *Технічна електродинаміка*, 2010. № 2, С. 3-9
3. Лету Ф. Токопроводящие жилы высокого качества для высоковольтных и сверхвысоковольтных кабелей (типа «Милликен»), *Кабели и провода*, 2008. № 1, С. 18-21
4. Ефимов И. Е., Останкович Г. А. *Радиочастотные линии передачи*. М.: Связь, 1977. 408 с.
5. Себко В.П., Пушай И.А. К расчету электромагнитных параметров проводящего стержня с продольным током, *Электротехника і електромеханіка*, 2005. № 2, С. 91-92
6. Кулешев В.Н. *Теория кабелей связи*. М.: Связьиздат, 1950. 419 с.
7. Ларина Э.Т. *Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии*. М.: Энергоатомиздат, 1996. 464 с.
8. Карпушенко В.П., Шибенюк Л.А., Антоненко Ю.А., Науменко О.А. *Силові кабелі низької та середньої напруги*. Х.: Регіон-інформ, 2000. 376 с.

References (transliterated)

1. Kropotin O., Tkachenko V., Shepelev A., Petrova E., Goryunov V., Bigun A. Mathematical model of XLPE insulated cable power line with underground installation, *Przeglad Electrotechniczny*, 2019. Vol. 94, No. 6, P. 77-80
2. Zolotarev V.M., Shherba A.A., Podol'cev A.D., Kucherjavaja I.N. Analiz vysokochastotnyh processov v kabele na naprjazhenie 330 kV s segmentirovannoj zhiloj pri vznikoventii chastichnyh razrjadov v ego izoljacji [Analysis of high-frequency processes in a cable with a voltage of 330 kV with a segmented core in the event of partial discharges in its insulation] *Tehnichna elektrodinamika*. 2010. no. 2. pp. 3-9.
3. Letu F. Tokoprovodjashhie zhily vysokogo kachestva dlja vysokovol'tnyh i sverhvysokovol'tnyh kabelej (tipa «Milliken»). [High quality conductors for high-voltage and ultra-high-voltage cables (Milliken type)] *Kabeli i provoda*. 2008. no. 1, pp. 18-21
4. Efimov I. E., Ostantkovich G. A. *Radiochastotnye linii peredachi* [RF transmission lines] Moscow, Svjaz' Publ., 1977. 408 p.
5. Sebko V.P., Pushhaj I.A. K raschetu jelektromagnitnyh parametrov provodjashhego sterzhnja s prodol'nym tokom, [Calculation of the electromagnetic parameters of a conducting rod with longitudinal current] *Elektrotehnika i elektromehanika*, 2005. no 2, pp. 91-92
6. Kuleshev V.N. *Teorija kabelej svjazi*. [Communication cable theory] Moscow, Svjaz'izdat Publ., 1950. 419 p.
7. Larina Je.T. *Silovye kabeli i vysokovol'tnye kabel'nye linii*. [Power cables and high voltage cable lines] Moscow, Energoatomizdat Publ., 1996. 464 p.
8. Karpushenko V.P., Shhebenjuk L.A., Antonec Ju.A., Naumenko O.A. *Silovi kabeli niz'koj ta seredn'oi naprugi*. [Low and medium voltage power cables] Kharkiv, Region-inform Publ., 2000. 376 p.

Поступила (received) 15.12.20

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Костюков Іван Олександрович (Костюков Иван Александрович, Kostjukov Ivan) – кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail iakostiukow@gmail.com.

Гонтар Юлія Григорівна (Гонтарь Юлия Григорьевна, Gontar Yuliya Grygorivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», майстер виробничого навчання кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ» м. Харків; e-mail gontar.yuliya@gmail.com.