УДК 621.316.13

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВРАХУВАННЯ ЗБІЛЬШЕННЯ АКТИВНОГО ОПОРУ ПРОВІДНИКА ЗМІННОМУ СТРУМІ ПРИ ПОВЕРХНЕВОМУ ЕФЕКТІ

ПРОКУДА В.М. канд. техн. наук, асистент кафедри електроенергетики Національного ТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: prokuda.v.m@nmu.one;

РУХЛОВА Н.Ю. канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики Національного ТУ "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна, e-mail: Rukhlova.N.Yu@nmu.one;

Мета роботи. *При проходженні змінного струму з вищими гармоніками по кабелю нагрівання здійснюється середньоквадратичним значенням всіх гармонік. Зважаючи на різний опір кабелю в залежності від частоти через дію поверхневого ефекту, доцільно розраховувати коефіцієнт підвищення опору повному струму, приймаючи дію кожної гармоніки незалежною. Однак, є передумови вважати існуючи розрахункові моделі складними для алгоритмічної реалізації у програмних пакетах. Тому метою роботи є розробка розрахункової моделі для врахування збільшення активного опору провідника змінному струму при поверхневому ефекті для подальшого використання у пакетах імітаційного моделювання таких як, наприклад, MATLAB.*

Методи дослідження. *Методи лінійної алгебри, лінійної регресії, визначення коефіцієнта детермінації.*

Отримані результати. *Отримано залежності для визначення величини опору високовольтних кабельних ліній струмам високої частоти, котрі враховують переріз та гармонійний склад струму. За існуючими та обґрунтованими графіками (залежностями), отриманими на підставі класичних виразів з літератури, були отримані нові спрощені розрахункові залежності (для перерізу мідних кабельних ліній 240 - 1000 мм^2) при протіканні гармонік струму вище п'ятої при базовій частоті 50 Гц. Такі розрахункові співвідношення дозволять здійснювати у програмному середовищі MATLAB Simulink врахування декількох гармонійних складових струму при нагріванні лінії.*

Отримані значення коефіцієнта детермінації при визначенні розрахункових залежностей близькі до 1, що говорить про правильно обраний вид рівняння і правильно підібраний коефіцієнт k для різних перерізів кабельної лінії.

Наукова новизна. *Наукова новизна полягає у розробці нової залежності, котра обґрунтована високим значенням множинного коефіцієнту кореляції, поправочного коефіцієнту збільшення опору жили кабелю від номеру гармоніки та емпіричного коефіцієнту регресійної моделі, котрий враховує переріз кабельної лінії.*

Практична цінність. *Практична цінність роботи полягає у отриманні залежностей, котрі можливо використовувати у аналітичних та імітаційних моделях при визначенні величини нагріву кабельних ліній з урахуванням струму гармонік вище п'ятої при базовій частоті 50 Гц. Таке застосування дозволить у багатьох випадках замінити фізичний експеримент імітаційним у програмному середовищі MATLAB Simulink, що зменшить необхідні людські та матеріальні витрати.*

Ключові слова: кабельна лінія; нагрів; вищі гармоніки; регресія; коефіцієнт детермінації; MATLAB Simulink; активний опір; поверхневий ефект.

I. ВСТУП

У зв'язку зі збільшенням кількості електричних приладів та електроспоживачів з нелінійним навантаженням зростає актуальність розробки способів визначення допустимих струмів кабельних ліній при різному гармонічному складі струму. Як відомо, збільшення нагріву кабелю відбувається через збільшення середньоквадратичної складової гармонік, а також зростаючого впливу поверхневого ефекту. Також все ширше використання знаходять кабельні лінії перерізом 240 – 1000 мм^2 на напругу 6-35 кВ. Але є передумови вважати дещо складними існуючі моделі врахування поверхневого ефекту для практичного застосування.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Основні засади визначення нагріву кабельних ліній струмами вищих гармонік викладено у [1-3]. При протіканні по кабелю змінного струму з вищими гармоніками нагрів здійснюється середньоквадратичним їх значенням. Однак, з огляду на різний опір кабелю в залежності від частоти струму через дію поверхневого ефекту, доцільно розрахувати коефіцієнт підвищення опору повному струму, приймаючи вплив кожної гармоніки незалежно [4], тобто:

$$\Delta P_{ac} = I^2 R_{ac} = I_1^2 R_1 + \sum_{\substack{n=2k-1,\\ n\neq 3k, k\in N}}^{m} I_n^2 R_n \qquad (1)$$

© Прокуда В.М., Рухлова Н.Ю., 2022
DOI 10.15588/1607-6761-2022-3-1

де n – номер гармоніки, m – максимальний номер гармонік, прийнятих для аналізу. Згідно літератури [2], суттєвий вплив надають гармоніки до m = 23. I_n та R_n – струм та опір струму n-ої гармоніки.

Визначимо величину струму вищих гармонік у відсотках відносно струму основної частоти і позначимо це значення коефіцієнтом K_{In}. Аналогічно для опору використовуємо коефіцієнт K_{Rn} Перепишемо вираз (1), використовуючи коефіцієнти K_{Rn} и K_{In}:

$$\Delta P_{ac} = I^2 R_{ac} = I_1^2 R_1 \left(1 + \sum_{\substack{n=2k-1,\\ n\neq 3k, k\in N}}^{m} \left(K_{In}\right)^2 K_{Rn} \right) \quad (2)$$

Згідно літератури [3] K_{Rn} визначається як:

$$K_{Rn} = \left(1 + y_s + y_p\right) \quad (3)$$

де:

y_s – фактор поверхневого ефекту;

y_p – фактор ефекту близькості.

Фактор поверхневого ефекту розраховується як:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8 \cdot x_s^4}, \quad (4)$$

де:

$$x_s = \sqrt{\left(\frac{8\pi f}{R_{dc}} 10^{-7} \cdot k_s\right)}, \quad (5)$$

R_{dc} – опір постійному струму при робочій температурі провідника θ (Ом/м),

f – частота мережі (Гц),

k_s – константа.

Фактор ефекту близькості кабелю залежить від геометрії провідника. У разі круглого провідника коефіцієнт впливу близькості дорівнює.

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8 \cdot x_p^4} \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \cdot 2.9, \quad (6)$$

де:

$$x_p = \sqrt{\left(\frac{8\pi f}{R_{dc}} 10^{-7} \cdot k_p\right)}, \quad (7)$$

R_{dc} – опір постійному струму при робочій температурі провідника θ (Ом/м)

f – частота мережі (Гц);

k_p – константа;

s – відстань між вісями провідників (мм);

d_c – діаметр провідника (мм).

Коефіцієнт K_{In} має задаватися для кожної гармоніки окремо, він обумовлений несинусоїдальною прикладеною напругою, а також нелінійним опором навантаження.

Однак, вирази (3) – (7) мають певні недоліки:

1. Вони громіздкі при необхідності розрахунку впливу декількох гармонійних складових одночасно.

2. В літературі [5] йде мова про обмежену галузь застосування виразів, а саме їх адекватності лише при частотах 50-250 Гц для перерізів лінії 240 мм^2 та більше. Тому доцільно розробити інший підхід для подальшої розробки моделі в середовищі MATLAB.

Опір провідника з поверхневим ефектом згідно класичних праць Безсонова Л.А. [6] визначається за виразом:

$$R_{ж} = \frac{\sqrt{\omega\gamma\mu} b_0}{2\pi\gamma b_1 a} \cos\left(\beta_0 - \beta_1 - 45\right), \quad (8)$$

де ω – кутова частота електричного струму; b_0 – модуль функції Бесселя нульового порядку першого роду; b_1 – модуль функції Бесселя першого порядку першого роду; β_0 – аргумент функції Бесселя нульового порядку першого роду; β_1 – аргумент функції Бесселя першого порядку першого роду; γ – питома провідність струмопровідної жили; μ – магнітна проникність; a – радіус струмопровідної жили.

III. МЕТА РОБОТИ

При проходженні змінного струму з вищими гармоніками по кабелю нагрівання здійснюється середньоквадра-тичним значенням всіх гармонік. Зважаючи на різний опір кабелю в залежності від частоти через дію поверхне-вого ефекту, доцільно розраховувати коефіцієнт підвищення опору повному струму, приймаючи дію кожної гармоніки незалежною. Однак, є передумови вважати існуючи розрахункові моделі складними для алгоритміч-ної реалізації у програмних пакетах. Тому метою роботи є розробка розрахункової моделі для врахування збі-льшення активного опору провідника змінному струму при поверхневому ефекті для подальшого використання у пакетах імітаційного моделювання таких як, наприклад, MATLAB.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В літературі [5] за виразом (8) побудовано залежності відносного збільшення опору мідної струмопровідної жили при різному перерізі. Наведемо їх на рисунку 1.

У представленому вигляді вираз (8) складно аналітично використовувати в моделях для аналізу нагріву ізоляції кабельних ліній. Тому доцільно виконати апроксимацію залежностей для окремих випадків – кабельних ліній перерізом 240 – 1000 мм^2 та гармонік вище 5-ої.

Апроксимацію виконаємо в програмному пакеті Microsoft Excel. Згідно літератури [5] високу точність наближення дає вираз:

$$K_{Rn} = \left(0{,}187 + 0{,}532 \cdot \sqrt{n}\right), \qquad (9)$$

де n – номер гармоніки.

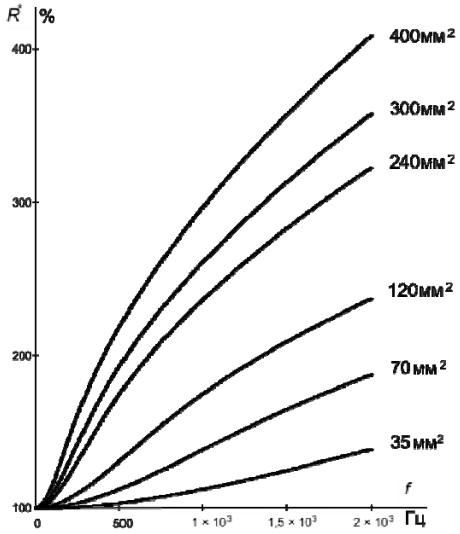

Рисунок 1. Збільшення опору при дії поверхневого ефекту в мідному провіднику при різному його перерізі

Однак, таке наближення адекватно тільки для перерізу 300 мм^2, для інших перерізів (виходячи з візуальної оцінки) необхідно ввести уточнюючий коефіцієнт k:

$$K_{Rn} = k\left(0{,}187 + 0{,}532 \cdot \sqrt{n}\right), \qquad (10)$$

Виконаємо підбір коефіцієнта k для апроксимації існуючих наведених в літературі [5] залежностей. На рисунку 2 крива (1) відповідає апроксимації за виразом (10) при k=1 (для 300 мм^2), а крива (2) при k = 0,91 (для 240 мм^2). Аналогічно методом підбору знаходимо коефіцієнти для 400 мм^2 – k=1,14 и для 120 мм^2 – k=0,67. Однак останнє значення використовувати при розрахунках буде не коректно, тому що воно стає близьким до вихідної кривої тільки близько частоти 500 Гц (рис 2).

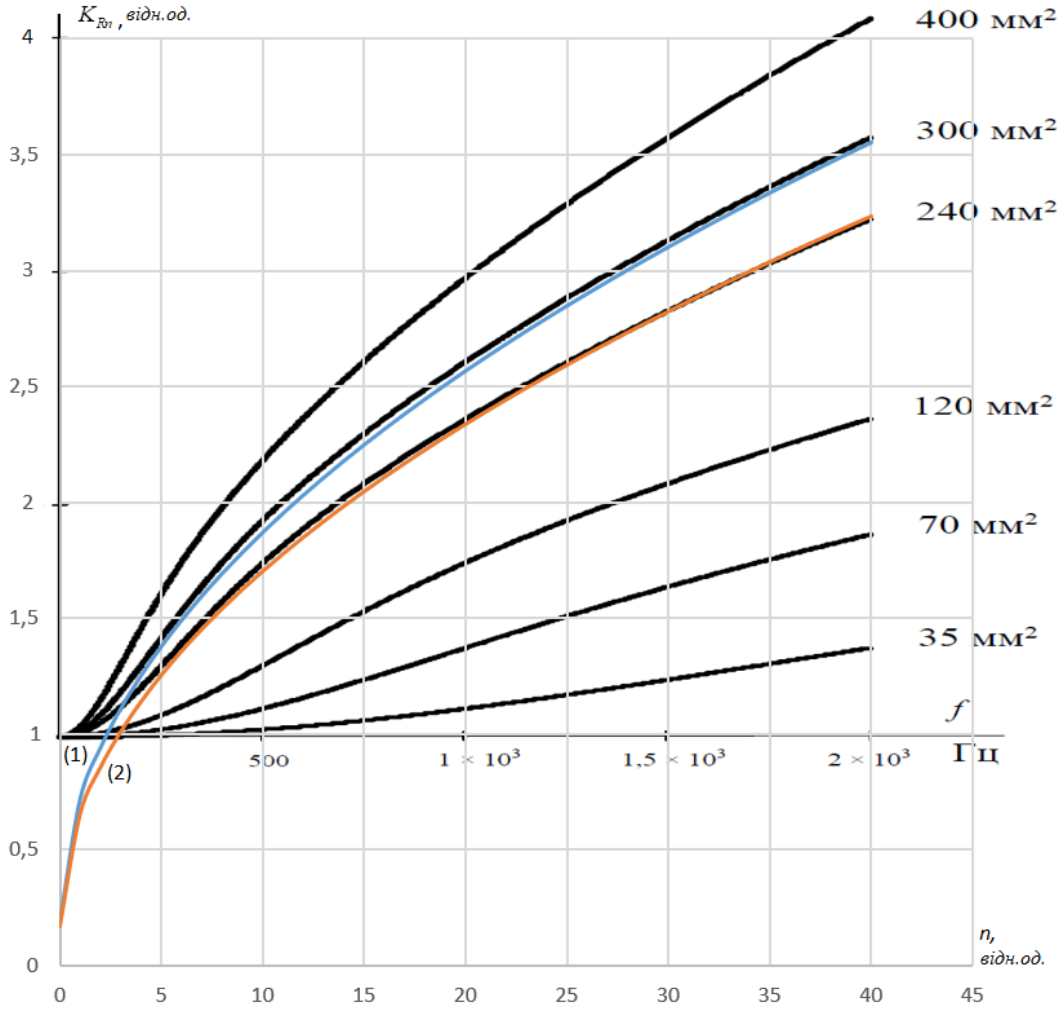

Рисунок 2. Апроксимація кривих для визначення величини активного опору при поверхневому ефекті

На рисунку 2 дві осі абсцис – абсолютне значення частоти в Гц, і відносні значення частоти першої гармоніки 50 Гц – воно ж має назву номер гармоніки *n*.

Далі визначимо коефіцієнт *k* для перерізів 600 мм^2, 800 мм^2 и 1000 мм^2. Для цього виконаємо апроксимацію лінійним рівнянням отриманих коефіцієнтів, після чого здійснимо екстраполяцію. Задаємо вихідні значення (таблиця 1) і будуємо по ним графік (рисунок 3), а також програмними засобами будуємо лінію тренда (апроксимуючу лінію). Показуємо рівняння лінії і точність безпосередньо на графіку.

Таблиця 1. Вихідні дані для апроксимації

Переріз, мм^2	*k*
400	1,14
300	1
240	0,91
120	0,67

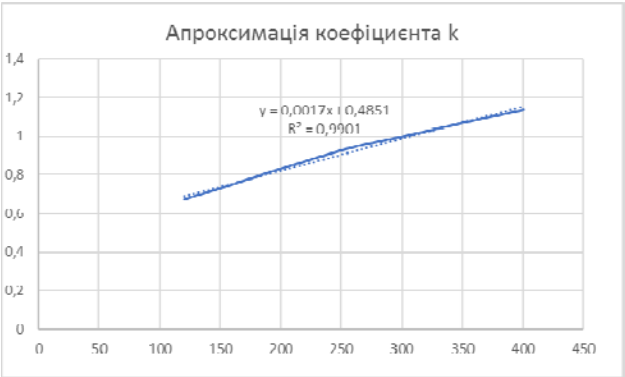

Рисунок 3. Апроксимація коефіцієнта *k*

Як видно, коефіцієнт детермінації R^2 = 0,99, що досить точно для вирішення поставлених завдань. обчислюємо коефіцієнт *k* для інших перерізів.

Для 600 мм^2:

$$k = 0,0017 \cdot 600 + 0,4851 = 1,505$$

Для 800 мм^2:

$$k = 0,0017 \cdot 800 + 0,4851 = 1,845$$

Для 1000 мм^2:

$$k = 0,0017 \cdot 1000 + 0,4851 = 2,185$$

Обчислені коефіцієнти *k* адекватні для гармонік від 5-ої до 40-ої.

Виконаємо аналіз точності отриманих залежностей використовуючи коефіцієнт детермінації. Вихідні дані для аналізу отримаємо з залежностей на рисунку 1 методом візуальної обробки в діапазоні 250 – 2000 Гц для перерізів 240, 300 та 400 мм^2.

Коефіцієнт детермінації розраховується згідно наступних залежностей:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{reg}}{SS_{tot}} \qquad (11)$$

де $SS_{reg} = \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \hat{y}_i \right)^2$ – сума квадратів решток регресії, y_i, $\hat{y}_i$ – фактичні і розрахункові значення змінної, котра є в розробці.

$SS_{tot} = \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \overline{y}_i \right)^2$ – загальна сума квадратів

при цьому $\overline{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i$ – середнє значення всієї вибірки.

Покажемо приклад розрахунку. Визначаємо середнє значення вибірки для перерізу 240 мм^2:

$$\overline{y} = \frac{1}{36} \sum_{i=1}^{n} (1,188 + 1,293 + 1,386 + ... + 3,232) = 2,385$$

Для *n* = 5 та перерізу 240 мм^2:

$$\left(y_5 - \hat{y}_5 \right)^2 = \left(1,293 - 1,253 \right)^2 = 0,0025$$

$$\left(y_5 - \overline{y}_5 \right)^2 = \left(1,293 - 2,385 \right)^2 = 1,193$$

Визначаємо суми квадратів для перерізу 240 мм^2:

$$SS_{reg} = \sum_{i=1}^{n} \left(0,0025 + 0,0016 + ... + 0,0001 + 0 \right) = 0,0259$$

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^{n} \left(1,432 + 1,193 + 0,998 + ... + 0,718 \right) = 12,6595$$

Коефіцієнт детермінації:

$$R^2 = 1 - \frac{0,0259}{12,6595} = 0,998$$

Аналогічно отримуємо значення суми квадратів для інших перерізів. Отримані значення R^2 близькі до 1, що говорить про вірно обраний вид рівняння (10) та вірно визначені коефіцієнти *k* для різних перерізів кабельної лінії.

Для моделювання дії вищих гармонійних складових струму розробимо розрахункову модель у програмному пакеті MATLAB, частину якої, котра виконує розрахунок згідно рівнянь (2) та (10), представимо на рисунку 4.

Результати моделювання для аналізованих раніше перерізів кабельних ліній наведемо в таблиці 2.

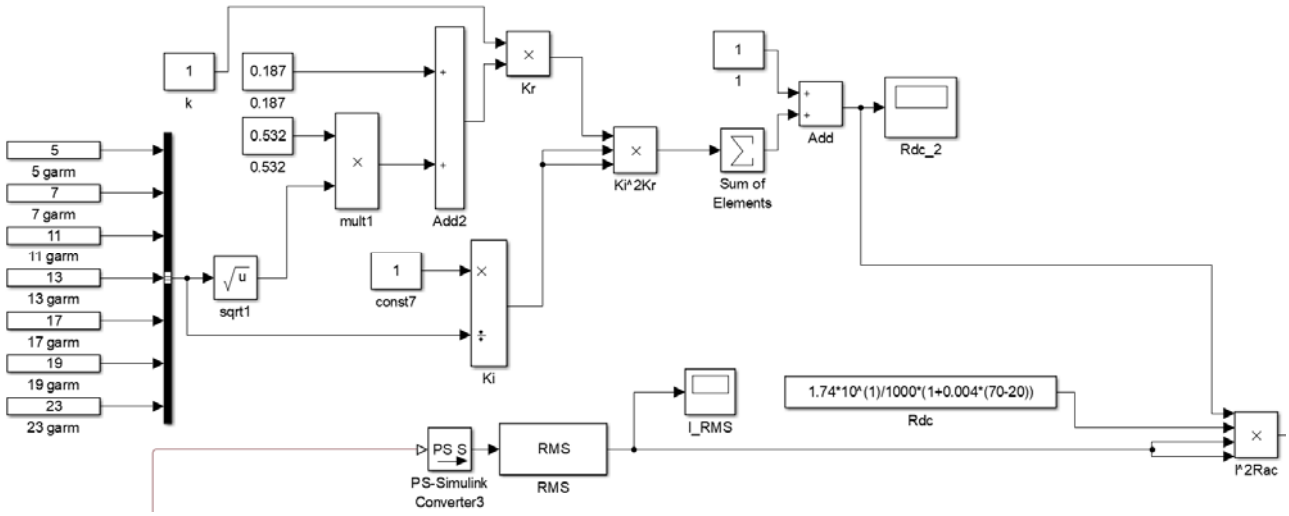

Рисунок 4. Визначення активного опору при дії в кривій струму кількох гармонійних складових

Таблиця 2. Результати моделювання нагріву кабельних ліній при дії струмів вищих гармонік, ºС (початкова температура 20 ºС)

вищі гармоніки *	Кабельні лінії перерізом, мм^2					
	240	300	400	600	800	1000
Відсутні.	84,08	84,4	84,62	85,7	86,2	86,8
$1/n$	90,91	92,18	94,3	98,53	102,77	107

* струми першої гармоніки приймаються близькими до максимально допустимих за довідковими даними.

За результатами моделювання для кабельних ліній перерізом 240-400 мм^2, можемо сказати, що нагрів вищими гармоніками істотно менше, ніж у кабелів перетином 1000 мм^2, особливо при значних гармонійних складових струму більш 20 %.

V. ВИСНОВКИ

В роботі отримано залежності для визначення величини опору високовольтних кабельних ліній струмам високої частоти, котрі враховують переріз та гармонійний склад струму. За існуючими та обґрунтованими графіками (залежностями), отриманими на підставі класичних виразів з літератури, були отримані нові спрощені розрахункові залежності (для перерізу мідних кабельних ліній 240 - 1000 мм2) при протіканні гармонік струму вище п'ятої при базовій частоті 50 Гц. Такі розрахункові співвідношення дозволять здійснювати у програмному середовищі MATLAB Simulink врахування декількох гармонійних складових струму при нагріванні лінії.

Отримані значення коефіцієнта детермінації при визначенні розрахункових залежностей близькі до 1, що говорить про правильно обраний вид рівняння і правильно підібраний коефіцієнт k для різних перерізів кабельної лінії.

Наукова новизна полягає у розробці нової залежності, котра обґрунтована високим значенням множинного коефіцієнту кореляції, поправочного коефіцієнту збільшення опору жили кабелю від номеру гармоніки та емпіричного коефіцієнту регресійної моделі, котрий враховує переріз кабельної лінії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Зайцев, Е.С. Алгоритм оценки температур жил трѐхфазных высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена / Е.С. Зайцев, В.Д. Лебедев // Электрические станции. – 2016. – Вып. 9. – С. 34–38. http://elst.energy-journals.ru/index.php/elst/article/view/516

[2] Tze Mei Kuan, Suhaila Sulaiman, Azrul Mohd. Ariffin, Wan Mohamad Shakir Wan Shamsuddin. Verification of MATLAB/Simulink Power Cable Modelling with Experimental Analysis/ Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science Vol. 11, No. 2, August 2018, pp. 622~629 ISSN: 2502-4752, DOI: 10.11591/ijeecs.v11.i2.pp622-629. https://www.researchgate.net/publication/325959293_Verification_of_MATLABSimulink_Power_Cable_Modelling_with_Experimental_Analysis/fulltext/5c5378a7a6fdccd6b5d77323/Verification-of-MATLAB-Simulink-Power-Cable-Modelling-with-Experimental-Analysis.pdf?origin=publication_detail

[3] Ansovinus Akumawah Nche, Temperature modeling and control algorithm for high voltage underground cables, A thesis submitted to the faculty of The University of North Carolina at Charlotte in partial fulfillment of the requirements for the degree of

Master of Science in Applied Energy and Electromechanical Systems, Charlotte, 2017 – 104 p. https://repository.uncc.edu/islandora/object/etd%3A1627/datastream/PDF/download/citation.pdf

[4] Д. В. Куделина, В. И. Бирюлин. Определение нагрева изоляции кабельных линий с учетом влияния высших гармоник. Auditorium. Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2019. № 1 (21). https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-nagreva-izolyatsii-kabelnyh-liniy-s-uchetom-vliyaniya-tokov-vysshih-garmonik

[5] А. А. Алферов, А. В. Засименко, Т. В. Алферова, ю. А. Рудченко Анализ существующих инженерных математических моделей учета поверхностного эффекта в токопроводящих жилах силовых кабелей. Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого № 2, 2015 https://core.ac.uk/download/pdf/212976232.pdf

[6] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки дипломированных специалистов «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», «Электроэнергетика», «Приборостроение». Автор: Лев Алексеевич Бессонов. 11-е издание, переработанное и дополненное. Учебное издание. Внешнее оформление Н.Д. Горбуновой. М: Гардарики, 2007.

[7] M. Caton, O. Marjanovic and S. Rowland, "Dynamic Thermal Modelling of Low Voltage Underground Cables", *University of Manchester report*, 2015. https://www.vermilliontesting.co.uk/globalassets/innovation/enwl002-thermal-modelling/enwl002-closedown/enwl002-appendix-2---dynamic-thermal-modelling-of-lv-underground-cables.pdf

[8] Aman Sharma, Determination of Hotspot Location and Power Cable Temperatures from Spare Duct Temperatures in an Underground Installation. A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. Arizona state university, December 2017, - 123 p. https://repository.asu.edu/attachments/194055/content/Sharma_asu_0010N_17507.pdf

[9] Ansovinus Akumawah Nche, Temperature modeling and control algorithm for high voltage underground cables, A thesis submitted to the faculty of The University of North Carolina at Charlotte in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Applied Energy and Electromechanical Systems, Charlotte, 2017 – 104 p. https://repository.uncc.edu/islandora/object/etd%3A1627/datastream/PDF/download/citation.pdf

[10] Simulating Thermal Effects in Semiconductors, https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/simulating-thermal-effects.html#bs5crhn-1

[11] Martin Andersson Ljus, Dynamic Line Rating Thermal Line Model and Control. Division of Industrial Electrical Engineering and Automation Faculty of Engineering, Lund University. CODEN:LUTEDX/(TEIE-5324)/1-49/2013, - 55 p. https://www.iea.lth.se/publications/MS-Theses/Full%20document/5324_full_document.pdf

[12] Кабели силовые для стационарной прокладки. Общие технические условия: ГОСТ 24183–80. М.: Изд-во стандартов, 1989. 33 с.

[13] ДСТУ EN 50160:2014.. Якість електричної енергії. Опубліковано 06 квітня 2016. року Дата оновлення: 21.02.2022. https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi#:~:text=Показники%20якості%20електричної%20енергії%20для,у%20ДСТУ%20EN%2050160%3A2014.

[14] Calculation of the Cyclic and Emergency Current Ratings of Cables, Part 2: Cyclic Rating Factor of Cables Greater than 18/30 (36) kV and Emergency Ratings for Cables of All Voltages [Text]: IEC Std. 60853-2. -- 1989.

[15] Prime, J.B. Systems to monitor the conductor temperature of undergraund cable [Text] / J.B. Prime, J.G. Valdes // IEEE Trans. PAS. – 1981. – 100. -- № 1. P. 211 – 219.

[16] Millar R., John. Real-time transient temperature computation of power cables including moisture migration modeling [Text]: Proceeding of 15th PSCC / John Millar R., Matti Lehtonen. -- Liege, 2005.

Стаття надійшла до редакції 10.08.2022

MODEL DEVELOPMENT ACCORDING TO INCREASE IN THE ACTIVE RESISTANCE OF THE CONDUCTOR TO AC CURRENT AT THE SURFACE EFFECT

PROKUDA V.M. Ph.D, in Technology, assistant of the Electrical Power Engineering Department of the Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: prokuda.v.m@nmu.one;

RUKHLOVA N.YU PhD, in Technology assistant of the Electrical Power Engineering Department of the Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: Rukhlova.N.Yu@nmu.one;

Purpose. *When alternating current with higher harmonics passes through the cable, heating is carried out by the root mean square value of all harmonics. Taking into account the different resistance of the cable depending on the frequency due to the effect of the surface effect, it is advisable to calculate the coefficient of increase in the total current resistance, assuming the action of each harmonic as independent. However, there are prerequisites to consider existing calculation models difficult for algorithmic implementation in software packages. Therefore, the purpose of the work is to develop a calculation model to take into account the increase in the active resistance of the conductor to alternating current due to the surface effect for further use in simulation modeling packages such as, for example, MATLAB.*

Methodology. *Methods of linear algebra, linear regression, defining the coefficient of determination.*

Findings. *Dependencies for determining the resistance value of high-voltage cable lines to high-frequency currents, which take into account the cross-section and harmonic composition of the current, have been obtained. According to the existing and substantiated graphs (dependencies) obtained on the basis of classical expressions from the literature, new simplified calculation dependencies were obtained (for the cross-section of copper cable lines 240 - 1000 mm2) when current harmonics above the fifth at a base frequency of 50 Hz. Such calculated ratios will allow taking into account several harmonic components of the current during line heating in the MATLAB Simulink software environment.*

The obtained values of the coefficient of determination in defining the calculated dependencies are close to 1, which indicates the correctly selected type of equation and the correctly selected coefficient k for different cross-sections of the cable line.

Originality. *The scientific novelty lies in the development of a new dependence, justified by the high value of the multiple correlation coefficient, the correction factor for the increase in the resistance of the cable core from the harmonic number and the empirical coefficient of the regression model, taking into account the cross section of the cable line.*

Practical value. *The practical value of the work consists in obtaining dependencies that can be used in analytical and simulation models when determining the amount of heating of cable lines taking into account the current of harmonics above the fifth at a base frequency of 50 Hz. Such an application will allow in many cases to replace the physical experiment with a simulation in the MATLAB Simulink software environment, which will reduce the necessary human and material costs.*

Keywords: cable line; heating; higher harmonics; regression; coefficient of determination; MATLAB Simulink; active resistance; surface effect

.

REFERENCES

[1] E. S. Zajcev, V. D. (2016). Lebedev. Algoritm ocenki temperatur zhil trèhfaznyh vysokovol'tnyh kabel'nyh linij s izoljaciej iz sshitogo polijetilena. *Jelektricheskie stancii*. 9, 34–38.

[2] Tze Mei Kuan, Suhaila Sulaiman, Azrul Mohd. Ariffin, Wan Mohamad Shakir Wan Shamsuddin. Verification of MATLAB/Simulink Power Cable Modelling with Experimental Analysis/ *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science.* Vol. 11, No. 2, August 2018, pp. 622~629 ISSN: 2502-4752, DOI: 10.11591/ijeecs.v11.i2.pp 622-629.

[3] Ansovinus Akumawah Nche, Temperature modeling and control algorithm for high voltage underground cables, A thesis submitted to the faculty of The University of North Carolina at Charlotte in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Applied Energy and Electromechanical Systems, Charlotte, 2017 – 104 p.

[4] D. V. Kudelina, V. I. Birjulin. (2019). Opredelenie nagreva izoljacii kabel'nyh linij s uchetom vli-janija vysshih garmonik. Auditorium. Jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta. No 1 (21).

[5] A. A. Alferov, A. V. Zasimenko, T. V. Alferova, ju. A. Rudchenko (2015). Analiz sushhestvujushhih inzhenernyh matematicheskih modelej ucheta poverhnostnogo jeffekta v tokoprovodjashhih zhilah silovyh kabe-lej. Vestnik GGTU im. P. O. Suhogo No 2.

[6] Bessonov L.A. (2007). Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki: Jelektricheskie cepi. Uchebnik dlja

studen-tov vysshih uchebnyh zavedenij, obuchajushhihsja po napravlenijam podgotovki diplomirovannyh specialistov «Jelektrotehnika, jelektromehanika i jelektrotehnologii», «Jelektrojenergetika», «Priborostroenie». Avtor: Lev Alekseevich Bes-sonov. 11-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe. Uchebnoe izdanie. Vneshnee oformlenie N.D. Gorbunovoj. M: Gardariki,.

[7] M. Caton, O. Marjanovic and S. Rowland, "Dynamic Thermal Modelling of Low Voltage Underground Cables", University of Manchester report, 2015.

[8] Aman Sharma, (2017). Determination of Hotspot Location and Power Cable Temperatures from Spare Duct Temperatures in an Underground Installation. A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. Arizona state university, December. 123. https://repository.asu.edu/attachments/194055/content/Sharma_asu_0010N_17507.pdf

[9] Ansovinus Akumawah Nche, Temperature modeling and control algorithm for high voltage underground cables, A thesis submitted to the faculty of The University of North Carolina at Charlotte in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Applied Energy and Electromechanical Systems, Charlotte, 2017, 104.

[10] Simulating Thermal Effects in Semiconductors,

[11] Martin Andersson Ljus, Dynamic Line Rating Thermal Line Model and Control. Division of Industrial Electrical Engineering and Automation Faculty of Engineering, Lund University. CODEN:LUTEDX/(TEIE-5324)/1-49/2013, - 55 p.

[12] Kabeli silovye dlja stacionarnoj prokladki. Obshhie tehnicheskie uslovija: GOST 24183–80. M.: Izd-vo standartov, 1989. 33 s.

[13] DSTU EN 50160:2014.. Jakist' elektrichnoї energiї. Opublikovano 06 kvitnja 2016. roku Data onovlennja: 21.02.2022.

[14] Calculation of the Cyclic and Emergency Current Ratings of Cables, Part 2: Cyclic Rating Factor of Cables Greater than 18/30 (36) kV and Emergency Ratings for Cables of All Voltages [Text]: IEC Std. 60853-2, 1989.

[15] J.B. Prime, J.G. (1981).Valdes Systems to monitor the conductor temperature of undergraund cable [Text]. IEEE Trans. PAS. 100, No 1, 211 – 219.

[16] R. Millar, John. (2005). Real-time transient temperature computation of power cables including moisture migration modeling [Text]: Proceeding of 15th PSCC / John Millar R., Matti Lehtonen. Liege.