

**TRANSIENTS
WITH A SINGLE-POLE UNAUTHORIZED TOUCH OF PERSONNEL
IN A CIRCUIT WITH AN ISOLATED NEUTRAL**

V. Khilov^{1} & M. Kyrychenko¹*

¹*Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine*

^{*}*Corresponding author: khilov.v.s@nmu.one*

Abstract. The purpose of the paper is to determine the damaging transient voltage and current in a circuit with an isolated neutral with a single-phase touch. Methods of analysis of the theory of linear electric circuits with lumped parameters in stationary and non-stationary modes of operation are used. The values of the damaging currents and voltages are estimated. The regularities of changes in damaging currents and voltages depending on the grid parameters are determined. The practical value of the paper results is the identification of damaging currents and voltages range depending on the grid parameters.

Key words: transients, damaging voltage and current, a circuit with an isolated neutral, a single-pole unauthorized touch of personnel

**ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ
ПРИ ОДНОПОЛЮСНОМУ НЕСАНКЦІОНОВАНОМУ ДОТИКУ
ПЕРСОНАЛУ В КОЛІ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ**

В. Хілов^{1}, М. Кириченко¹*

¹*НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна*

^{*}*Відповідальний автор: khilov.v.s@nmu.one*

Анотація. Метою роботи є визначення вражаючої перехідної напруги і струму в колі з ізолюованою нейтраллю при однофазному дотику. У дослідженні використовувалися методи аналізу теорії лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами при стаціонарних і нестаціонарних режимах роботи. Оцінено величини вражаючих струмів і напруг. Визначено закономірності зміни вражаючих струмів і напруг в залежності від параметрів мережі. Практичним значенням результатів роботи є виявлення діапазону вражаючих струмів і напруг в залежності від параметрів мережі.

Ключові слова: перехідні процеси, вражаючий струм і напруга, коло з ізолюованою нейтраллю, однополюсний несанкціонований дотик персоналу.

1 Вступ

Електробезпека електричних мереж в загальному випадку оцінюється значеннями струму, що проходить через людину, напругою дотику та часом впливу [2, 3]. В електричних мережах з ізолюованою нейтраллю замикання на землю не викликає короткого замикання і не призводить до відключення пошкодженої фази. При цьому напруга двох інших фаз мережі відносно землі зростає до лінійного значення, а це створює підвищену небезпеку для обслуговуючого персоналу. Тому на всіх пристроях з ізолюованою нейтраллю має бути забезпечений контроль ізоляції для швидкого виявлення замикання на землю, а на виробництвах з підвищеними вимогами щодо безпеки повинні бути відповідні засоби автоматики для забезпечення швидкого автоматичного відключення від напруги пошкоджених ділянок мережі [4-7]. Таким чином задача визначення вражаючої перехідної напруги і струму в колі з ізолюованою нейтраллю при однофазному дотику персоналу є актуальною для захисту персоналу від ураження електричним струмом.

В доступних джерелах інформації немає прямого розв'язання перехідних струмів та напруг при однофазному дотику, тому вирішенню цього питання присвячено дослідження цієї роботи.

Метою даної роботи є знаходження параметрів електричного кола при мінімальному ураженні або напрузі дотику, що дорівнює нулю.

Для досягнення вказаної мети поставлено наступні завдання: оцінити величини вражаючих струмів і напруг, а також визначити закономірності та діапазон їх зміни в залежності від параметрів мережі.

2 Методика

У дослідженні використовувалися методи аналізу теорії лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами при стаціонарних і нестаціонарних режимах роботи [1, 8, 9]. Сформульовано припущення, що джерело живлення симетричне, відсутні індуктивні елементи і схема з зосередженими параметрами та зроблено дослідження, на основі якого знайдено параметри мережі.

3 Результати та обговорення

Електрична схема заміщення наведена на рис.1.

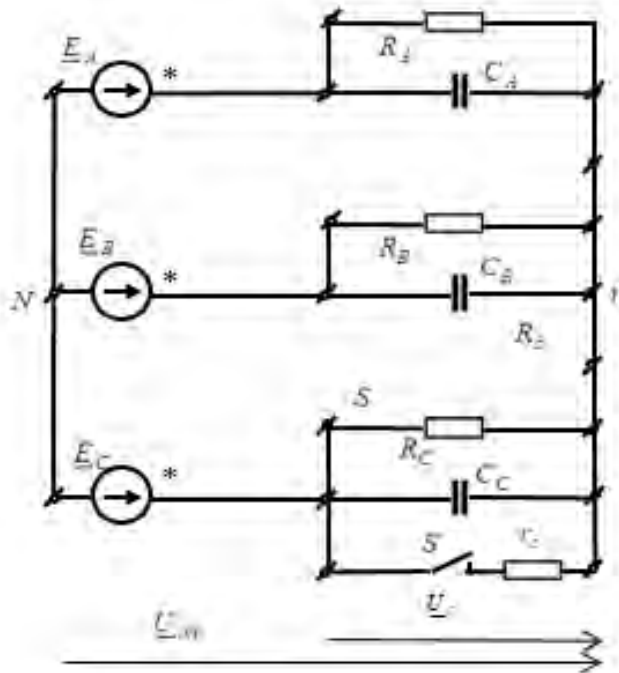


Рис. 1

Електрична схема заміщення кола з ізолюваною нейтраллю при однополюсному несанкціонованому дотику персоналу

Аналіз перехідного процесу виконуємо методом накладення з використанням класичного підходу рішення лінійних диференціальних рівнянь [1]. При такому підході окремо розраховуємо параметри напруги і струму по закінченні перехідного процесу, так звані вимушені складові, які виникають під дією джерела енергії, і вільні складові, що циркулюють в колі під дією запасеної електромагнітної енергії в реактивних елементах.

Вимушену складову знаходимо символічним методом, при якому від функцій дійсної змінної переходимо до функцій комплексної змінної, що дозволяє істотно спростити аналіз процесів в колі змінного струму. При такому підході переходимо від інтегро-диференціальних рівнянь до рівнянь в алгебраїчній формі з комплексними коефіцієнтами.

Аналіз проводимо при наступних припущеннях: трифазне джерело електромагнітної енергії симетричне $\underline{E}_A, \underline{E}_B = \underline{E}_A e^{j120 \text{ ел. зр}}, \underline{E}_C = \underline{E}_A e^{+j120 \text{ ел. зр}}$, і є ідеальним джерелом ЕРС з нульовим внутрішнім опором, однакові по фазах навантаження активні і реактивні опори $R_A = R_B = R_C = R_\Phi$; $C_A = C_B = C_C = C_\Phi$; $X_\Phi = 1/\omega C_\Phi$.

Вимушена складова розраховується методом вузлових потенціалів і є напругою зсуву нейтралі. Так, при однофазному дотику, наприклад, фази С напруга зсуву нейтралі

$$\underline{U}_{Nn} = \underline{E}_C \frac{X_\Phi^2 (R_\Phi - r_c)}{X_\Phi^2 (2r_c + R_\Phi) + j3X_\Phi r_c R_\Phi}, \quad (1)$$

де r_c – активний опір при однофазному дотику.

На межі, коли відсутній дотик фази (активний опір $r_c = \infty$) напруга зсуву нейтралі має бути відсутня при прийнятих припущеннях.

Дійсно

$$\lim_{r_c \rightarrow \infty} \underline{E}_C \frac{X_\Phi^2 (R_A - r_c)}{X_\Phi^2 (2r_c + R_A) + j3X_\Phi r_c R_A} = 0.$$

Вимушена складова при однофазному дотику, наприклад, фази С – це різниця напруги фази С і напруги зсуву нейтралі

$$\begin{aligned} \underline{U}_{np} &= \underline{E}_C - \underline{U}_{Nn} = \underline{E}_C - \underline{E}_C \frac{X_\Phi^2 (R_\Phi - r_c)}{X_\Phi^2 (2r_c + R_\Phi) + j3X_\Phi r_c R_\Phi} = \\ &= \underline{E}_C \frac{3 \cdot r_c \cdot (X_\Phi^2 R_\Phi + 2r_c X_\Phi^2 + 3 \cdot r_c R_\Phi^2)}{[X_\Phi (2r_c + R_\Phi)]^2 + [3r_c R_\Phi]^2} + j \underline{E}_C \frac{3r_c X_\Phi R_\Phi (R_\Phi - r_c)}{[X_\Phi (2r_c + R_\Phi)]^2 + [3r_c R_\Phi]^2}. \end{aligned}$$

Миттєве значення напруги вимушеної складової - це проекція комплексної напруги \underline{U}_{np} на вісь уявних чисел, розгорнута в часі. Тому в останньому рівнянні виділено дійсну і уявну частини в явному вигляді.

Миттєве значення напруги вимушеної складової

$$u_{np} = \text{Im}(\underline{U}_{np}) = \sqrt{2} E_C \frac{3r_c R_\Phi X_\Phi (R_\Phi - r_c)}{[X_\Phi (2r_c + R_\Phi)]^2 + [3r_c R_\Phi]^2} \cdot \sin \left(\omega t - 120^\circ + \arctan \frac{X_\Phi R_\Phi (R_\Phi - r_c)}{X_\Phi^2 (R_\Phi + 2r_c) + 3 \cdot r_c R_\Phi^2} \right). \quad (1)$$

Вільна складова визначається коренем однорідного диференціального рівняння. Це рівняння найбільш просто отримати, використовуючи поняття комплексного опору кола відносно будь-якої вітки, оскільки характеристичне рівняння єдине і незалежне для всього кола за винятком тих випадків, коли після комутації коло розпадається на ряд незалежних контурів. Видаляємо зі схеми джерела енергії ($\underline{E}_A = 0, \underline{E}_B = 0, \underline{E}_C = 0$), залишаємо в схемі їхні внутрішні опори (при прийнятих припущеннях вони дорівнюють нулю), розриваємо коло в фазі С (повні опори фаз А і В включені паралельно між собою і послідовно з'єднаний повний опір фази с з урахуванням опору дотику r_c)

$$Z(j\omega) = \frac{1}{2} \frac{\frac{1}{j\omega C_\Phi} R_\Phi}{\frac{1}{j\omega C_\Phi} + R_\Phi} + \frac{\frac{1}{j\omega C_\Phi} r}{\frac{1}{j\omega C_\Phi} + r} = \frac{0.5 R_\Phi (1 + j\omega C_\Phi r) + r (1 + j\omega C_\Phi R_\Phi)}{(1 + j\omega C_\Phi R_A)(1 + j\omega C_\Phi r)},$$

де в активному опорі r враховано активні опори дотику r_c та витoku фази С ($R_C = R_\Phi$)

$$r = \frac{R_\Phi r_c}{R_\Phi + r_c}.$$

До отриманого повного опору кола після комутації вводимо шуканий корінь характеристичного рівняння. З цією метою формально замінюємо символ $j\omega$ символом λ ($j\omega \rightarrow \lambda$). Оскільки маємо справу однорідним характеристичним рівнянням, то результуюче рівняння прирівнюємо до нуля

$$\frac{0,5R_\phi(1+\lambda C_\phi r)+r(1+\lambda C_\phi R_\phi)}{(1+\lambda C_\phi R_\phi)(1+\lambda C_\phi r)}=0.$$

Після спрощення виділяємо шуканий корінь характеристичного рівняння λ

$$\lambda(0,5R_\phi C_\phi r+rC_\phi R_\phi)=-0,5R_\phi-r; \lambda=-\frac{0,5R_\phi+r}{1,5R_\phi C_\phi r}.$$

Знайдений корінь дозволяє визначити не тільки постійну часу перехідного процесу τ

$$\tau=|\lambda^{-1}|=\frac{1,5R_\phi C_\phi r}{0,5R_\phi+r}$$

але також і загальний вигляд вільної складової як деяку експонентну функцію

$$u_{св}=Ae^{\lambda t},$$

де A – постійна інтегрування, яка визначається з граничних умов.

Накопичена в ємнісному елементі C електромагнітна енергія $W=qu/2=Cu^2/2$ (де q , u – відповідно заряд і напруга на ємності C) підкоряється закону безперервності енергії. Звідси випливає, що заряд і напруга на ємнісному елементі безпосередньо перед дотику і безпосередньо після дотику залишаються незмінними, що дозволяє розрахувати сталу інтегрування A .

Вражаюча напруга при дотику фази C

$$u(t)=\sqrt{2}E_c \frac{3r_c R_\phi X_\phi (R_\phi - r_c)}{[X_\phi (2r_c + R_\phi)]^2 + [3r_c R_\phi]^2} \cdot \sin\left(\omega t - 120^\circ + \arctan \frac{X_\phi R_\phi (R_\phi - r_c)}{X_\phi^2 (R_\phi + 2r_c) + 3 \cdot r_c R_\phi^2}\right) + Ae^{\lambda t}.$$

Відлік часу t виконуємо від моменту дотику. Тоді в момент часу $t=0$ знаходимо сталу інтегрування A

$$A=\sqrt{2}E_c \sin(\psi_E) - \sqrt{2}E_c \frac{3r_c R_\phi X_\phi (R_\phi - r_c)}{[X_\phi (2r_c + R_\phi)]^2 + [3r_c R_\phi]^2} \cdot \sin\left(-120^\circ + \arctan \frac{X_\phi R_\phi (R_\phi - r_c)}{X_\phi^2 (R_\phi + 2r_c) + 3 \cdot r_c R_\phi^2}\right),$$

де ψ_E – кут дотику напруги джерела живлення фази C , що знаходиться в межах $-\pi \leq \psi_E \leq +\pi$

Перехідна напруга дотику

$$u(t)=\sqrt{2}E_c \left[\frac{3r_c R_\phi X_\phi (R_\phi - r_c)}{[X_\phi (2r_c + R_\phi)]^2 + [3r_c R_\phi]^2} \cdot \sin\left(\omega t - 120^\circ + \arctan \frac{X_\phi R_\phi (R_\phi - r_c)}{X_\phi^2 (R_\phi + 2r_c) + 3 \cdot r_c R_\phi^2}\right) + \left(\sin(\psi_E) - \frac{3r_c R_\phi X_\phi (R_\phi - r_c)}{[X_\phi (2r_c + R_\phi)]^2 + [3r_c R_\phi]^2} \cdot \sin\left(-120^\circ + \arctan \frac{X_\phi R_\phi (R_\phi - r_c)}{X_\phi^2 (R_\phi + 2r_c) + 3 \cdot r_c R_\phi^2}\right) \right) \cdot e^{\frac{0,5R_\phi+r}{1,5R_\phi C_\phi r} t} \right].$$

Висновки

Вільна складова вражаючої напруги в колі не генерується (рис. 2, а), якщо кут дотику буде дорівнювати

$$\psi_E = 120^\circ - \arctan \frac{X_\phi R_\phi (R_\phi - r_c)}{X_\phi^2 (R_\phi + 2r_c) + 3 \cdot r_c R_\phi^2}.$$

При виконанні такої умови вражаюча напруга буде дорівнювати тільки вимушеній складовій, а це є напруга на фазі С.

Якщо кут дотику $\psi_E = 0$, то вражаюча напруга в момент дотику буде дорівнювати нулю, так як

$$u(t)|_{\psi_E=0; t=0} = 0.$$

В подальшому вражаюча напруга зростає і являє собою суму загасаючої експоненти і напругу на фазі С (рис.2, б).

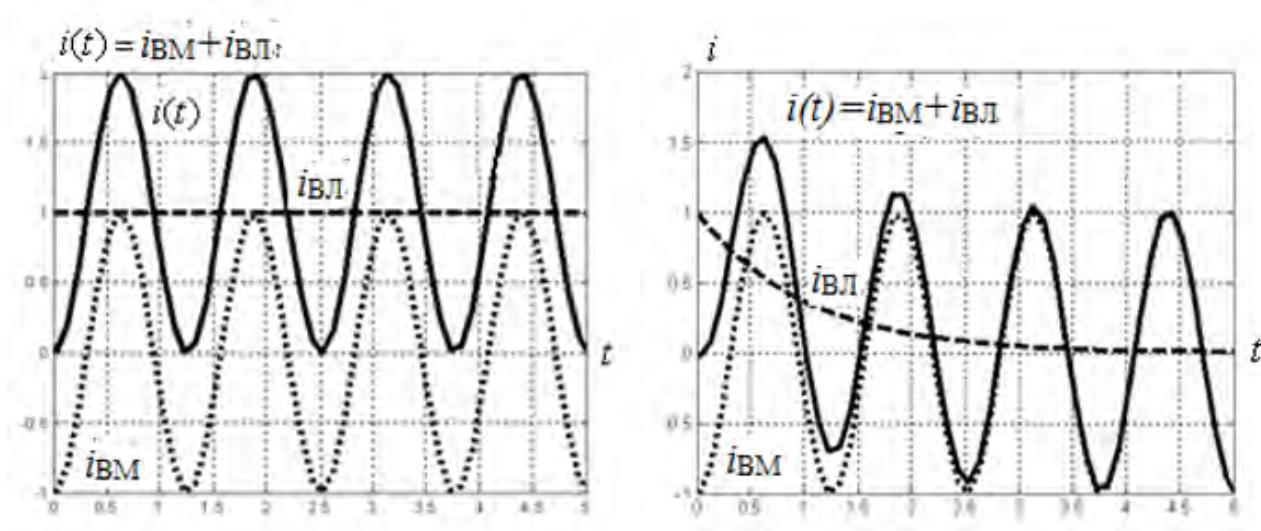


Рис. 2

Перехідний струм при однополюсному дотику:

а - при мінімальному значенні вражаючого струму, б - при максимальному значенні вражаючого струму

Acknowledgements

Робота виконана на основі власних досліджень без зовнішньої фінансової допомоги.

References

1. Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering: textbook / V.S. Khilov; Ministry of Science and Education of Ukraine, National Mining University, 2018. – 467 p.
2. Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справочное пособие. – М.: Недра, 1993. – 192 с.: ил.
Pivnyak G.G., Shkrabets F.P. Nesimmetrichnyie povrezhdeniya v elektricheskikh setyakh karerov: Spravochnoe posobie. – М.: Nedra, 1993. – 192 s.: il.
3. Цапенко Е.Ф., Сычев Л.И., Кулешов П.Н. Шахтные кабели и электробезопасность сетей. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. – 213 с.: ил.
Tsapenko E.F., Syichev L.I., Kuleshov P.N. Shahtnyie kabeli i elektrobezopasnost setey. – 3-e izd., pererab. i dop. – М.: Nedra, 1988. – 213 s.: il.
4. Хілов В.С., Фофанов К. П. (опубліковано 10.06.2016). Спосіб безперервного контролю опору ізоляції кабельної мережі з ізолюваною нейтраллю (Патент України 111784). Бюл.№11.
Khilov V.S., Fofanov K. P. (opublikovano 10.06.2016). Sposib bezperervnoho kontroliu oporu izoliatsii kabelnoi merezhi z izolovanoiu neutralliu (Patent Ukrainy 111784). Biul.№11.
5. В.С. Хілов, К.П. Фофанов. Основні вимоги до безперервного контролю опору ізоляції в мережі ізолюваною нейтраллю напругою до 1000В та тенденції розвитку даних систем / Форум гірників – 2014: матеріали між. нар. конф. 1-4 жовт. 2014 р., м. Дніпропетровськ. – Д.: ТОВ «Лізунов Прес», 2014. – Т.3. 232 с.
V.S. Khilov, K.P. Fofanov. Osnovni vymohy do bezperervnoho kontroliu oporu izoliatsii v merezhi izolovanoiu neutralliu napruhoiu do 1000V ta tendentsii rozvytku dannykh system / Forum

hirnykiv – 2014: materialy mizh. nar. konf. 1-4 zhovt. 2014 r., m. Dnipropetrovsk. – D.: TOV «Lizunov Pres», 2014. – Т.3. 232 s.

6. Хілов В.С., Фофанов К.П. Дослідження можливості використання інформаційно-вимірювальної системи для визначення складових частин опору ізоляції кабельної мережі / Гірнична електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб., 2015. -№56. – с. 66-73.

Khilov V.S., Fofanov K.P. Doslidzhennia mozhlyvosti vykorystannia informatsiino-vumiriuvanoi systemy dlia vyznachennia skladovykh chastyn oporu izoliatsii kabelnoi merezhi / Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka: nauk. – tekhn. zb., 2015. -№56. – s. 66-73.

7. Kyrychenko M, Akulov A. Methods of improving the reliability of distribution networks 6-35 kV. Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems, Taylor & Francis Group, London, UK. – 2013. С.125-131

8. В.С. Хілов, К.П. Фофанов, Є.В. Носаненко. Дослідження можливості використання методу дзеркальних відображень для визначення ємнісного опору ізоляції кабельної мережі / Форум гірників – 2015: матеріали міжнар. конф., 30 вересня – 3 жовтня 2015 р., м. Дніпропетровськ. – Д.: Національний гірничий університет, 2015. – Т.3. – 181-186 с.

V.S. Khilov, K.P. Fofanov, Ye.V. Nosanenko. Doslidzhennia mozhlyvosti vykorystannia metodu dzerkalnykh vidobrazhen dlia vyznachennia yemnistnoho oporu izoliatsii kabelnoi merezhi / Forum hirnykiv – 2015: materialy mizhnar. konf., 30 veresnia – 3 zhovtnia 2015 r., m. Dnipropetrovsk. – D.: Natsionalnyi hirnychyi universytet, 2015. – Т.3. – 181-186 s.

9. В.С. Хілов, К.П. Фофанов. Особенности расчета емкости жил кабельной линии при наличии центрального токопровода / Электротехнические и компьютерные системы. - №22 (98), 2016. – с. 79-83.

V.S. Khilov, K.P. Fofanov. Osobennosti rascheta emkosti zhil kabel'noj linii pri nalichii central'nogo tokoprovoda / Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy. - №22 (98), 2016. – s. 79-83.