

УДК 621.35.231

**АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ ЄМНІСНИХ СТРУМІВ ПРИ
ОДНОПОЛЮСНОМ ТОРКАННІ В МЕРЕЖІ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ**

В.С. Хілов

Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна,
khilov.v.s@nmu.one, ORCID 0000-0002-5583-4323

**COMPENSATION EFFICIENCY ANALYSIS OF CAPACITIVE CURRENTS WHEN
SINGLE-POLE TOUCHING IN A NETWORK WITH INSULATED NEUTRAL**

V. Khilov

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine,
khilov.v.s@nmu.one, ORCID 0000-0002-5583-4323

Анотація. Метою роботи є оцінка діапазонів змін напруги зсуву нейтралі, уражаючих напруг і струму в мережах з ізолюованою нейтраллю як без компенсації, так і з компенсацією ємнісних струмів. В дослідженні використовувалось методи аналізу теорії лінійних електричних кіл. У результаті роботи отримано аналітичні співвідношення для струмів і напруг при однополюсного торканні в мережах з ізолюованою нейтраллю. Оцінений діапазон змін опорів мережі. Встановлено закономірності зміни уражає напруги і струму в залежності від параметрів мережі. Практичним значенням результатів роботи є розробка рекомендацій на створення пристроїв компенсації і пристроїв захисту при однополюсному торканні в мережі з ізолюованою нейтраллю.

Ключові слова: трифазна трипровідна мережа, наруга зсуву, уражаючі напруга та струм, активний опір, ємність мережі, індуктивність компенсуючого дроселя.

Вступ. При електрифікації гірничих підприємств застосовуються трифазні електричні мережі з ізолюованою нейтраллю трансформаторів [1, 2]. У таких мережах струми витоку і струм, що проходить через тіло людини при його однополюсного доторку до струмоведучих частин, цілком визначаються опорями ізоляції і ємностями мережі щодо землі [3, 4].

Аналіз існуючих досліджень і публікацій. Схема заміщення мережі з ізолюованою нейтраллю відома [5-10] та зображена на рис.1. На рисунку прийняті наступні позначення: $\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$ – комплексні значення діючих величин електрорухомих сил джерела енергії; N, n – загальні точки фаз на джерелі живлення і на навантаженні (землі); R_A, R_B, R_C – активні опори окремих фаз мережі щодо землі; C_A, C_B, C_C – ємності окремих фаз мережі щодо землі; L_a, L_b, L_c – індуктивності окремих фаз компенсуючого дроселя щодо землі; R_a, R_b, R_c – активні опори окремих фаз компенсуючого дроселя щодо землі; r_c – активний опір тіла людини при торканні фази C .

Формулювання мети і завдань досліджень. Метою роботи є оцінка діапазонів змін напруги зсуву нейтралі, уражаючих напруг і струму в мережах з ізолюованою нейтраллю як без компенсації, так і з компенсацією ємнісних струмів.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані і вирішені наступні завдання досліджень:

- отримати аналітичні співвідношення для струмів і напруг при однополюсного торканні в мережах з ізолюованою нейтраллю;
- оцінити діапазон змін опорів мережі;
- встановити закономірності зміни уражаєчих напруги і струму в залежності від параметрів мережі.

Методика досліджень. З точки зору теорії лінійних кіл схема заміщення являє собою трифазну трипровідну мережу за схемою зірка - зірка без нульового проводу з симетричним джерелом живлення і несиметричним навантаженням. Аналіз роботи такої схеми доцільно проводити методом вузлових потенціалів з визначенням напруги зсуву між нейтральними точками джерела енергії та землі [11-13].

Викладення основного матеріалу. Повні опору провідників мережі $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ щодо землі

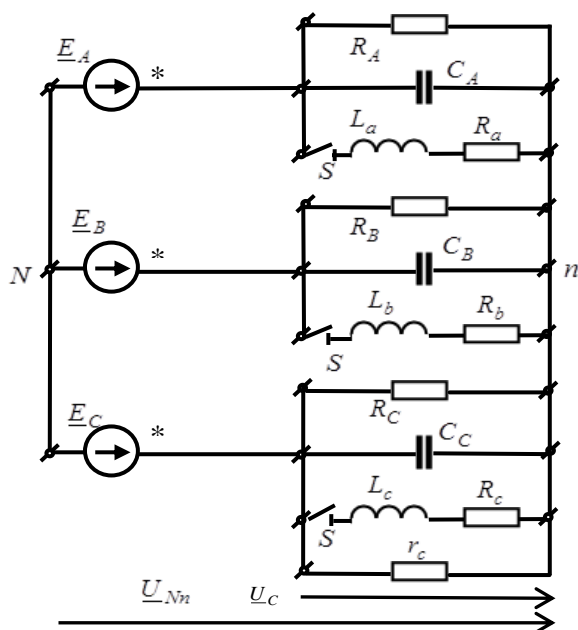
$$\underline{Y}_A = G_A + j\omega C_A, \underline{Y}_B = G_B + j\omega C_B, \underline{Y}_C = G_C + j\omega C_A,$$

де активні опори $G_A = R_A^{-1}, G_B = R_B^{-1}, G_C = R_C^{-1}$ щодо землі; ω – кутова частота; $j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця.

Напруга зсуву нейтралі при торканні фази C

$$\underline{U}_{Nn} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C + \underline{E}_C g_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + g_C}.$$

Якщо прийняти однакові провідності $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}$ щодо землі та ввести $g_C = r_C^{-1}$ – провідність



торкання, то напруга зміщення нейтралі буде $\underline{U}_C = \underline{E}_C g_C / (3\underline{Y} + g_C)$.

При торканні фазного проводу C людиною, вона потрапляє під дію напруги

$$\begin{aligned} \underline{U}_C &= \underline{E}_C - \underline{U}_{Nn} = \underline{E}_C - \underline{E}_C \frac{g_C}{3\underline{Y} + g_C} = \\ &= \underline{E}_C \frac{3\underline{Y}}{3\underline{Y} + g_C}, \end{aligned}$$

якщо витримується співвідношення $g_C \ll 3\underline{Y}$, то $\underline{U}_C = \underline{E}_C$ і до тіла людини прикладається фазна напруга. Чим менше опір (більше провідність) торкання $g_C \gg 3\underline{Y}$, тим меншу напругу потрапляє тіло людини.

Людина потрапляє під дію струму

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{r_C} = \underline{E}_C \frac{3\underline{Y}}{3\underline{Y} + g_C} g_C.$$

Рисунок 1 – Схема заміщення трифазної мережі з ізольованою нейтраллю

Зараз в мережах з ізольованою нейтраллю контроль стану ізоляції і захисне відключення здійснюється за допомогою спеціальних апаратів

[5, 6]. У цих апаратах для зниження струму через тіло людини застосовується компенсація ємнісної складової цього струму. Досягається це включенням в мережу компенсуючих дроселів L_a, L_b, L_c (рис.1, ключі S замкнуті). Для такої схеми напруга зсуву нейтралі

$$\underline{U}_{Nn} = \frac{\underline{E}_A (G_A + j\omega C_A + (R_a + j\omega L_a)^{-1}) + \underline{E}_B (G_B + j\omega C_B + (R_b + j\omega L_b)^{-1}) + \underline{E}_C (G_C + j\omega C_C + (R_c + j\omega L_c)^{-1}) + \underline{E}_C g_C}{G_A + j\omega C_A + (R_a + j\omega L_a)^{-1} + G_B + j\omega C_B + (R_b + j\omega L_b)^{-1} + G_C + j\omega C_C + (R_c + j\omega L_c)^{-1} + g_C}.$$

Якщо прийняти фазні провідності G_A, G_B, G_C , ємності C_A, C_B, C_C і індуктивності L_a, L_b, L_c однаковими, то напруга зміщення нейтралі

$$\underline{U}_{Nn} = \underline{E}_C g_C / (3G_C + 3j\omega C_C + 3/(R_c + j\omega L_c) + g_C).$$

Напруга торкання фази C

$$\begin{aligned} \underline{U}_C &= \underline{E}_C - \underline{U}_{Nn} = \underline{E}_C - \underline{E}_C g_C / (3G_C + 3j\omega C_C + 3/(R_c + j\omega L_c) + g_C) = \\ &= \underline{E}_C (3G_C + 3j\omega C_C) / (3G_C + 3j\omega C_C + 3/(R_c + j\omega L_c) + g_C). \end{aligned}$$

Величина уражаючої струму

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{r_C} = \underline{E}_C g_C (3G_C + 3j\omega C_C + 3/(R_c + j\omega L_c)) / (3G_C + 3j\omega C_C + 3/(R_c + j\omega L_c) + g_C).$$

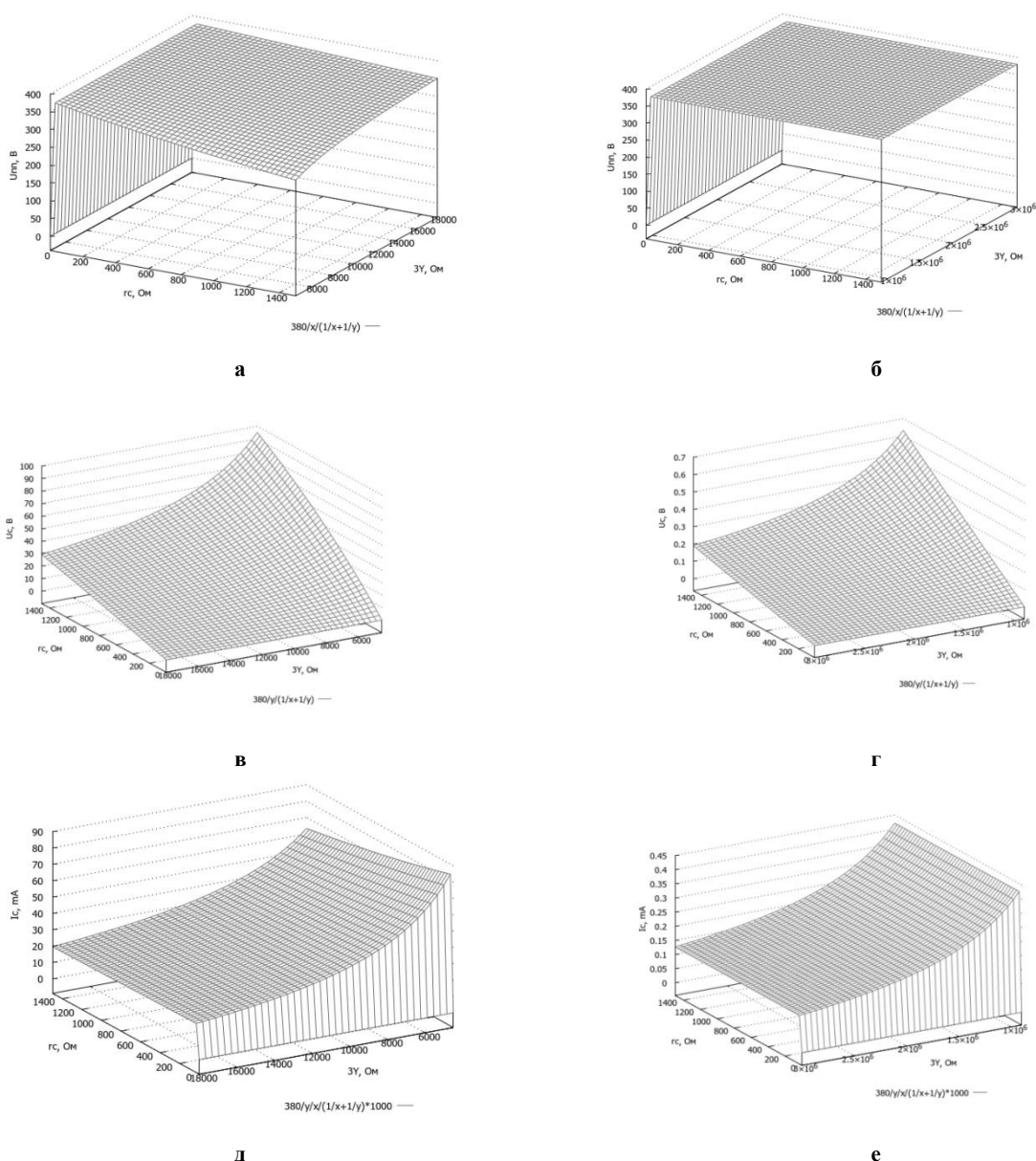


Рисунок 2 – Залежності зсуву нейтральної напруги (а, б – за наявності компенсуючих дроселів), напруги торкання (в, г- за наявності компенсуючих дроселів), струму торкання (д, е- за наявності компенсуючих дроселів)

За виконанням двох умов та $j\omega Cc=1/j\omega La$ у трифазній мережі виникає явище резонансу струмів. Напруга зсуву нейтралі прагнучим до значення фазної електрорушійної сили ЕС, вражаючи напруга і струм прагнутимуть до нуля при виконанні умови $3GC \ll g_c$. Однак реальні дроселі індуктивності мають кінцеві внутрішні активні опори, що призводить до погіршення компенсуючих властивостей ємнісних струмів при однофазному дотику ланцюга з ізолюваною нейтраллю.

Отримані аналітичні співвідношення дозволяють оцінити діапазон зміни величини вражаючого струму, а також ефективність компенсації ємнісних струмів при однофазному торканні мережі з ізолюваною нейтраллю.

Обираємо діапазон зміни параметрів, що відповідає найбільш розпоширеним мережам з ізолюваною нейтраллю [5-10].

Діапазон зміни параметрів:

- величина ємності на фазу 0,5мкФ ... 1,5мкф;
- активний опір струмів витоку на фазу 0.5Мом ... 1.5 Мом;
- модуль повного опору для струмів витоку на фазу 1.5 Ком ... 6.0Ком;
- активний опір тіла людини 0.5 Ком ... 1.5 Ком.

У виділеному діапазоні зміни параметрів прораховані напруги зсуву нейтралі, напруги і струми доторкання, рис.2.

Висновки. Аналіз кількісних параметрів надає підстави встановити наступні закономірності:

- напруга зсуву нейтралі прагне до значення фазної напруги до якої зроблено торкання;
- зменшення опору тіла людини зі збільшенням повного опору фази веде до зменшення значення напруги зсуву нейтралі, а отже до підвищення електротравматизму;
- підключення компенсуючих дроселів дозволяє істотно збільшити величину напруги зсуву нейтралі, що сприятливо позначається на зменшенні електротравматизму;
- найбільш несприятливе співвідношення опорів – це мале значення повного опір мережі та великий опір тіла людини, що у решті призводить до великого значення напруги торкання, яке може доходити до 100 В за відсутності компенсуючих дроселів;
- наявність у схемі компенсуючих дроселів дозволяє знизити напругу торкання на три порядки;
- уражаюча сила струму збільшується зі збільшенням опору тіла людини і зменшенням значення повного опору струмів витоку, яка може доходити до значення 80 мА;
- під'єднання компенсуючих дроселей дозволяє знизити величину уражаючого струму на три порядки;
- наявність активних опорів в повному опорі для струмів витоку і компенсуючих дроселів істотно зменшує ефективність компенсації емнісних струмів з одночасним збільшенням значення уражаючого струму.

Наукова новизна полягає у встановленні закономірностей змін значень уражаючих напруг і струмів у обраному діапазоні змін параметрів живлячої мережі.

Практичне значення результатів роботи є встановлення того, що при розробці пристроїв компенсації і пристроїв захисту необхідно брати до уваги вплив активних опорів елементів мережі на умову компенсації емнісних струмів у мережах з ізолюваною нейтралю.

Список літератури

1. Дзюбан В. С. Справочник энергетика угольной шахты. [Текст] / В. С. Дзюбан, И. Г. Ширнин, Б. Н. Вансеев, В. М. Гостищев. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2001 – 512 с.
2. Вареник Є.О. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок [Текст] / Є.О. Вареник, С.І. Випанасенко, В.С. Дзюбан, Н.А. Шидловська, Ф.П. Шкрабець. – Д.: Національний гірничий університет, 2004 – 334 с.
3. Півняк Г.Г. Системи ефективного енергозабезпечення вугільних шахт [Текст] / Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець, В.Т. Заїка, Ю.Т. Разумний. – Д.: Національний гірничий університет, 2004 – 206 с.
4. Шкрабець Ф.П. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях [Текст] / Ф.П. Шкрабець, Н.А. Шидловская, В.С. Дзюбан, Е.А. Вареник – Д.: Национальный горный университет, 2003 – 151 с.
5. ДСТУ ГОСТ 31612-2012 Устройства защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические требования.
6. Цапенко Е.Ф. Шахтные кабели и электробезопасность сетей [Текст] / Е.Ф. Цапенко, Л.И. Сычев, П.Н. Кулешов. – М.: Недра, 1988 – 213 с.
7. Дзюбан В.С. Справочник энергетика угольной шахты [Текст] / Дзюбан В.С., Римап Я.С., Маслий А.К. – М., Недра, 1983 – 542 с.
12. Півняк Г.Г. Несимметричные повреждения в электрических цепях [Текст] / Півняк Г.Г., Шкрабець Ф.П. – М.: Недра, 1993 – 192 с.
8. Півняк Г.Г. Системи ефективного енергозабезпечення вугільних шахт [Текст] / Півняк Г.Г., Шкрабець Ф.П., Заїка В.Т., Разумний Ю.Т. – Д.: Національний гірничий університет, 2004 – 206 с.
9. Шкрабець Ф.П. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях [Текст] / Ф.П. Шкрабець, Н.А. Шидловская, В.С. Дзюбан, Е.А. Вареник – Д.: Национальный горный университет, 2003 – 151 с.
10. Khilov V.S. Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering. Ministry of Science and Education of Ukraine/ National Mining University. – Д.: Національний гірничий університет, 2018 – 467 с.
11. Хілов В.С. Дослідження можливостей використання інформаційно-вимірювальної системи для визначення складових частин опору ізоляції кабельної мережі [Текст] / В.С. Хілов, К.П. Фофанов – Гірничо-електромеханіка та автоматика. Дніпропетровськ, ДВНЗ, 2015, №94, с. 21-24.
12. Хілов В.С. Влияние центрального токопровода на емкость кабельной линии [Текст] / В.С. Хілов, К.П. Фофанов – Электротехнические комплексы и системы. Киев, Наука и техника, 2016, №19(95), с. 79-83.
13. Хілов В.С. Дослідження можливостей використання методу дзеркальних відображень для визначення ємностного опору ізоляції кабельної мережі Форум гірників [Текст] / В.С. Хілов, К.П. Фофанов – Дніпропетровськ, ДВНЗ, 2015, №3, с. 181-186.

Анотація

Целью работы является оценка диапазонов изменений напряжения смещения нейтрали, поражающих напряжений и тока в сетях с изолированной нейтралью как без компенсации, так и с компенсацией емкостных токов. В исследовании использовались **методы анализа** теории линейных электрических цепей. В результате работы получены аналитические соотношения для токов и напряжений при однополюсного касания в сетях с изолированной нейтралью. Оценка диапазонов изменений сопротивлений сети. **Установлены** закономерности изменения поражает напряжения и тока в зависимости от параметров сети.

Практическим значением результатов работы является разработка рекомендаций на создание устройств компенсации и устройств защиты при однополюсном касании в сети с ограждена нейтралью.

Ключевые слова: *трехфазная трехпроводная сеть, надругательство сдвига, поражающие напряжение и ток, активное сопротивление, емкость сети, индуктивность компенсирующего дросселя.*

ABSTRACT

The aim of the work is to estimate the ranges of changes of neutral bias voltage, striking voltages and current in networks with isolated neutral both without compensation and with compensation of capacitive currents. The methods of analysis of the theory of linear electric circuits were used in the research. As a result of work analytical relations for currents and voltages at unipolar contact in networks with the isolated neutral are received. The range of changes in network resistances is estimated. Regularities of change of striking voltage and current depending on network parameters are established. The practical significance of the results of the work is the development of recommendations for the creation of compensation devices and protection devices for unipolar contact in a network with isolated neutral.

Key words: *three-phase three-wire network, bias voltage, striking voltage and current, active resistance, network capacity, inductance of compensating inductor.*

Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, професором Луценко І.М.