

**DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-177-185****УДК 621.313.13: 631.37**І. О. Попова¹, канд. техн. наук

ORCID 0000-0001-5429-8269

С. В. Чаусов¹, канд. техн. наук

ORCID 0000-0003-3811-9077

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет**імені Дмитра Моторного,*e-mail: iryana.popova@tsatu.edu.ua, тел: +380983765519

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМНОГО РІШЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ЯКОСТІ ФІЛЬТРА ЛІНІЙНИХ НЕСИМЕТРИЧНИХ НАПРУГ

Анотація. В роботі зроблений аналіз причин виникнення несиметричних режимів у мережі 0,38/0,22 кВ до яких приєднано електрообладнання сільських господарств, виявлені наслідки для роботи динамічного електрообладнання при несиметрії напруг мережі. Виявлено, що умовах експлуатації електроспоживачів несиметричний режим є звичайним робочим режимом сільських мереж 0,38/0,22 кВ. Обґрунтовано надійність діагностування несиметрії трифазної напруги за допомогою фільтрів симетричних складових, які розподіляються на фільтрові датчики напруги: прямої, зворотної і нульової послідовностей, в яких параметри складових елементів фільтрів напруги визначаються таким чином, щоб виділити ту, чи іншу симетричну складову напруги. Зроблено порівняння між фільтрами, що складаються з резистивно-конденсаторних кіл та схемним рішенням пристрою, що досліджується в роботі. Досліджено можливість використання схемного рішення пристрою, яке складається з двох лінійних індуктивних котушок без феромагнітних осердь з однаковими параметрами (активним опором та індуктивністю) і конденсатора в якості фільтру симетричних складових лінійних напруг прямої і зворотної послідовностей. Для розрахунку несиметричного режиму трифазних кіл застосовано спеціальний метод розрахунку – метод симетричних складових. Аналітичним розрахунком доведено, що досліджуване схемне рішення пристрою може бути використане в якості фільтру лінійних напруг зворотної послідовності: вольтметр, що включений у фазі «а» вимірює напругу зворотної послідовності, а вольтметр, включений у фазі «с» вимірює напругу прямої послідовності. Визначені співвідношення між активним і реактивним індуктивним опорами індуктивної котушки і ємністю конденсатора у схемному рішенні пристрою.

Ключові слова: симетричні складові, фільтр лінійних напруг, параметри, активний опір, індуктивність, ємність, котушка, конденсатор.

Актуальність та постановка проблеми. Електричні розподільні мереж 0,38/0,22 кВ, до яких приєднано електрообладнання сільських господарств, мають значну протяжність низьковольтних мереж, характеризуються змішаним підключенням однофазних та трифазних



споживачів, доволі часто загальна потужність однофазних споживачів перевищує потужність трифазних і має місце недопустима несиметрія струмів та напруг. Тому реальних умовах експлуатації електроспоживачів України несиметричний режим є звичайним робочим режимом сільських мереж 0,38/0,22 кВ [1].

В умовах несиметрії напруги різкому погіршуються техніко-економічних характеристик пристроїв, включених у електромережу, погіршується експлуатаційна надійність і терміну роботи електродвигунів. Зростають додаткові втрати у лініях 0,38 кВ, розподільних і споживчих силових трансформаторах напруги: ці втрати складають 4% від всієї електроенергії, що споживає сільське господарство [2].

Дослідження [3-4] показали, що відхилення напруги у сільських споживачів значно перевищують норми, що встановлені ГОСТ 13109-97. В господарствах, найбільш віддалених від джерел живлення, відхилення напруги знаходиться у допустимих межах тільки 54% часу, а нерівномірність навантаження фаз коливається в межах 16-22%.

Математичне очікування величини несиметрії напруг за даними [5] складає 7,3%, що значно перевищує вимоги ГОСТ 13109-97 Напруга прямої послідовності складає 89% від номінальної, що на 3,5% нижче мінімально допустимої на затискачах електродвигунів за умовами їх пуску у симетричному режимі.

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором – є динамічним навантаження, з точки зору електротехніки, є найчастіше вживаним в якості приводу виробничих машин у промисловому, сільському виробництві і побуті. Незважаючи на те, що асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (АД) доволі надійний в роботі, причин виходу з ладу трифазної обмотки статора АД багато, до них відносяться: струмові перевантаження обмотки статора збоку виникнення неприпустимої несиметрії напруги фаз мережі (до 50 %) або з причини обриву фазного проводу виходить з ладу до 45% статорних обмоток АД та інші [6].

Питанням якості електричної енергії в останні роки в Україні приділяється значна увага, оскільки недотримання норм якості електричної енергії призводить до погіршення електромагнітної сумісності електричних мереж електропостачання та споживачів (АД) електроенергії. Показники якості нормуються міжнародним стандартом 13109-97.

При дотриманні стандарту досягається безпечність електроспоживання, ресурсо- та енергозбереження, зниження витрат



на паливо, зменшується навантаження на обладнання, що використовується при генеруванні додаткових невиробничих потужностей [7].

Найбільш простими пристроями надійного діагностування несиметричних режимів трифазної напруги є фільтри симетричних складових, які розділяються на фільтрові датчики напруги: прямої, зворотної і нульової послідовностей, параметри складових елементів фільтрів напруги визначаються таким чином, щоб виділити ту, чи іншу симетричну складову напруги [8].

Мета досліджень – теоретично дослідити використання схемного рішення в якості фільтру симетричної складової прямої і зворотної послідовності і визначити співвідношення параметрів в ньому.

Основні матеріали дослідження. Під терміном «фільтр» в електротехніці розуміють спеціальний пристрій, або схемне рішення, за допомогою якого можна виділити або подавити із складної системи компонентів якісь визначені частини з її складу.

Фільтри симетричних складових призначені для вилучення конкретних складових векторів напруги (струму) з трифазної несиметричної системи напруги мережі: наприклад, симетричну складову прямої зворотної або нульової послідовностей [6].

При порушенні симетричного режиму трифазної системи, наприклад в наслідок несиметричних коротких замикань, в повних фазних напругах споживачів, наряду з напругою прямої послідовності, з'являються складові напруги зворотної та нульової послідовностей. Симетрична складова напруги зворотної послідовності викликає в динамічному навантаженні, тобто асинхронному трифазному двигуні, виникнення зворотного обертового магнітного поля, що викликає гальмівний момент. Зростають сили повних фазних струмів у динамічному навантаженні, збільшуються втрати активної потужності у фазах двигуна, збільшується швидкість зносу ізоляції цих обмоток і, як слідство, зменшується експлуатаційний ресурс навантаження.

Для запобігання виходу з ладу динамічних навантажень використовують захисні пристрої, датчиком несиметрії напруги в яких, як правило, використовують фільтри симетричних складових. Це діє можливість виконати захист, що буде реагувати на появу даних симетричних складових напруг [9].

Найбільшого розповсюдження досягли фільтри, що складаються з резистивно-конденсаторних кіл в наслідок простоти використання, підбору параметрів у схемі і невеликої ціни. Але головним недоліком



таких фільтрів є те, що разі використання для захисту динамічного індуктивного навантаження, в електричному колі може виникнути резонансне явище струму, яке само по собі супроводжується значним збільшенням струмів у фаз навантаження. Тому доцільно розробляти інші схемні рішення, які можна застосовувати в якості фільтру напруг симетричних складових при несиметрії напруг мережі [6].

Якщо у трифазній системі є пристрої, опори фаз яких залежать від послідовності чергування фаз струмів (трифазні асинхронні або синхронні двигуни та генератори або хоча б один з таких пристроїв, потужність якого порівняна з потужністю всієї трифазної системи), то для розрахунку несиметричного режиму таких трифазних кіл застосовують спеціальний метод розрахунку – метод симетричних складових, який по своїй суті є різновидом методу накладання [10].

Дослідимо можливість використання схемного рішення пристрою (рисунок 1а), яке складається з двох лінійних індуктивних котушок без феромагнітних осердь з однаковими параметрами (активним опором та індуктивністю) і конденсатора в якості фільтру напруги прямої і зворотної послідовностей.

При несиметричній системі лінійних напруг кола, напруги у фазах a і c визначаються (згідно позначень рисунку 1б і комплексами фазних провідностей Y_a, Y_b, Y_c) за рівняннями

$$\dot{U}_a = \frac{\dot{U}_{ab} \cdot Y_b + \dot{U}_{ac} \cdot Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c}; \quad (1)$$

$$\dot{U}_c = \frac{\dot{U}_{ca} \cdot Y_a + \dot{U}_{cb} \cdot Y_b}{Y_a + Y_b + Y_c}, \quad (2)$$

де $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{cb}, \dot{U}_{ca}$ – комплекси лінійних несиметричних напруг на затискачах схемного рішення, B ;

Y_a, Y_b, Y_c – комплекси повних провідностей фаз схемного рішення (рис.1б), $См.$

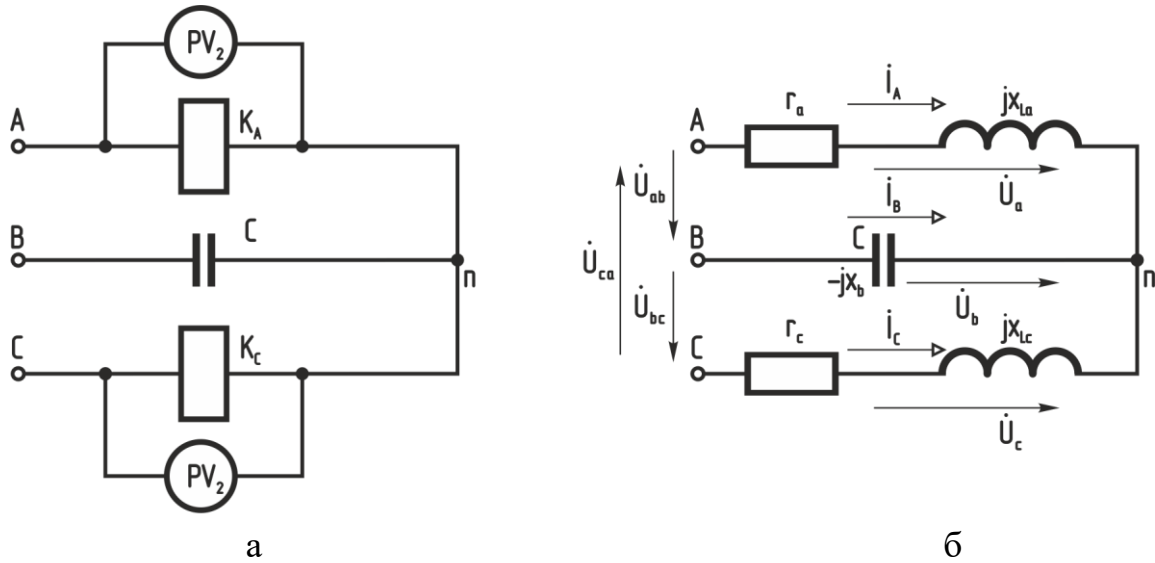


Рис. 1. Принципова (а) і розрахункова (б) схеми пристрою

Схемне рішення пристрою (рис. 1) з'єднано зіркою, тому лінійні напруги при з'єднанні зіркою не містять складової напруги нульової послідовності. Тоді представимо лінійні напруги схемного рішення пристрою через симетричні складові несиметричної лінійної напруги прямої і зворотної послідовностей

$$\begin{cases} \dot{U}_{ab} = \dot{U}_{ab1} + \dot{U}_{ab2} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2; \\ \dot{U}_{bc} = a^2 \cdot \dot{U}_{ab1} + a \cdot \dot{U}_{ab2} = a^2 \cdot \dot{U}_1 + a \cdot \dot{U}_2; \\ \dot{U}_{ca} = a \cdot \dot{U}_{ab1} + a^2 \cdot \dot{U}_{ab2} = a \cdot \dot{U}_1 + a^2 \cdot \dot{U}_2, \end{cases} \quad (3)$$

де a – оператор трифазної системи, $a = e^{j120^\circ}$.

Підставимо симетричні складові прямої і зворотної послідовностей лінійних напруг з системи рівнянь (3) у (1) та (2). Визначимо фазні напруги фаз «а» та «в» з рівняння (1) через лінійні напруги (3) схемного рішення пристрою

$$\dot{U}_a = \frac{\dot{U}_1 \cdot (Y_b - a \cdot Y_c) + \dot{U}_2 \cdot (Y_b - a^2 \cdot Y_c)}{Y_a + Y_b + Y_c}; \quad (4)$$

$$\dot{U}_c = \frac{\dot{U}_1 \cdot (a \cdot Y_a - a^2 \cdot Y_b) + \dot{U}_2 \cdot (a^2 \cdot Y_a - a \cdot Y_b)}{Y_a + Y_b + Y_c}. \quad (5)$$

Якщо прийняти $(Y_b - a \cdot Y_c) = 0$, то комплекс фазної напруги \dot{U}_a з виразу (4) буде дорівнювати

$$\dot{U}_a = \dot{U}_2 \cdot \frac{(Y_b - a^2 \cdot Y_c)}{Y_a + Y_b + Y_c}; \quad (6)$$

Якщо прийняти $(a^2 \cdot Y_a - a \cdot Y_b) = 0$, то комплекс фазної напруги \dot{U}_c з виразу (5) буде рівний



$$\dot{U}_c = \dot{U}_1 \cdot \frac{(a \cdot Y_a - a^2 \cdot Y_b)}{Y_a + Y_b + Y_c}. \quad (7)$$

Таким чином, напруга фази «а» схемного рішення пристрою (рис. 1), згідно рівняння (6) містить тільки симетричну складову зворотної послідовності, що відповідає показам вольтметра V2 (рис.1а), а напруга фази «с» містить тільки симетричну складову прямої послідовності, що відповідає показам вольтметра V1, якщо співвідношення провідностей наступне

$$(Y_b - a \cdot Y_c) = 0; Y_c = \frac{Y_b}{a} = a^2 \cdot Y_b; \quad (8)$$

$$(a^2 \cdot Y_a - a \cdot Y_b) = 0; Y_a = \frac{Y_b}{a} = a^2 \cdot Y_b. \quad (9)$$

Визначимо співвідношення параметрів у схемному рішенні пристрою (рис. 1б) для використання в якості фільтру лінійної напруги прямої і зворотної послідовності.

Умовою фільтру лінійних напруг прямої і зворотної послідовностей є співвідношення комплексів повних провідностей індуктивних котушок і конденсатора, включених у фази схемного рішення пристрою (рис.1б)

$$Y_a = Y_c = a^2 \cdot Y_b. \quad (10)$$

Прийmemo, що конденсатор ідеальний, тобто активний опір його дорівнює нулю, тоді комплекс повної провідності фази «в», в якій включений ідеальний конденсатор, буде дорівнювати

$$Y_b = j\omega C, \quad (11)$$

де ω – кругова частота електричного кола, рад/с;

C – ємність конденсатора, Ф;

j – уявне число, $j = \sqrt{-1}$.

Тоді співвідношення між комплексами фазних провідностей індуктивних котушок та ідеального конденсатора, тобто параметрами схемного рішення пристрою: активним опором і індуктивністю котушок і ємністю конденсатора, буде наступним, згідно співвідношення (10)

$$Y_a = Y_c = a^2 \cdot Y_b = a^2 \cdot j\omega C = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot j\omega C = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j\omega C - j\frac{\omega C}{2} = g - b_L, \quad (12)$$

де g – активна провідність індуктивної котушки, См;

b_L – індуктивна реактивна провідність котушки, См;

b_C – ємнісна реактивна провідність конденсатора, См;

Співвідношення активної провідності котушки до ємнісної провідності ідеального конденсатора знаходяться з рівняння



$$g = \frac{r_a}{z^2} = \frac{\sqrt{3} \cdot \omega C}{2}, \quad (13)$$

де z^2 – квадрат повного опору індуктивної котушки, якщо квадрат повного опору визначити за рівнянням

$$z^2 = r^2 + (\omega L)^2. \quad (14)$$

В той час, як реактивна провідність індуктивності до ємнісної провідності конденсатора співвідносяться як

$$b_L = \frac{\omega L}{z^2} = \frac{\omega C}{2}. \quad (15)$$

Для визначення співвідношення величини активного опору котушки по відношенню до ємності конденсатора (12), з використанням значення кругової частоти мережі та комплексу повного опору котушки, використаємо наступні рівняння

$$r = \frac{z^2 \cdot \sqrt{3} \cdot \omega C}{2}. \quad (16)$$

Для визначення величини індуктивного опору котушки по відношенню до ємності конденсатора (12), з використанням значення кругової частоти мережі та комплексу повного опору котушки, використаємо наступні рівняння

$$\omega L = \frac{z^2 \cdot \omega C}{2}. \quad (17)$$

При цьому співвідношення активного і реактивного опорів індуктивної котушки у схемному рішенні [4, 5]

$$\frac{r}{\omega L} = \sqrt{3}.$$

Висновок. Проведений аналіз схемного рішення пристрою доводить, що його можна використовувати в якості фільтру лінійної напруги прямої і зворотної послідовностей за умови підбору параметрів котушок і конденсатора. Це дозволить використовувати його в пристроях захисту від несиметрії напруги мережі, щоб зменшити швидкість зносу ізоляції статорних обмоток і подовжити термін експлуатації асинхронних двигунів.

Список використаних джерел

1. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Дідур В. В. Вплив відхилення живлячої напруги на ресурс ізоляції асинхронних електродвигунів потокових технологічних ліній. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. № 9(1). <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-25>.



2. Маков Д. К., Поворознюк Н. І., Виноградов Ю. М., Услонцев А. Б. Підвищення точності вимірювання несиметрії трифазної напруги. *Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск: Інформатика і моделювання*. 2010. № 21. С.111-116.

3. Pavlenko T., Shavkun V., Petrenko A. Ways to improve operation reliability of traction electric motors of the rolling stock of electric transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 5/8(89). P. 22–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112109>.

4. Щерба А. А., Маков Д. К., Захарченко С. Н., Супруновська Н. І. Аналіз уравнень преобразования трехфазных напряжений при каскадном соединении фильтров симметричных составляющих. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2008. № 3(12). С. 8-15.

5. Стьопін Ю. О., Кушлик Р. В., Перова Н. П. Дослідження роботи Асинхронних двигунів при несиметрії напруг в усталених режимах. *Енергетика і автоматика*. 2014. № 3. С. 141-146.

6. Попова І. О. Визначення параметрів активно-ємнісного фільтра напруги зворотної послідовності. *Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем: тези доп. І Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. пам'яті В. В. Овчарова*. Мелітополь, 2020. С. 18-19.

7. Pakkawe S., Nayamin V., Chaiyapon D., Thongchaisuratkrul G. Effects of Induction Motor Using Unbalance Voltage. *International Journal of the Computer, the Internet and Management*. 2018. Vol. 26(3). P.98-103.

8. Benoît de Metz-Noblat. Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques [Electronic resource] / B. de Metz-Noblat. *Cahier Technique Schneider Electric*. Regime of access: <https://www.se.com/fr/fr/download/document/> (date of the application: 10.09.2023).

9. Kurashkin S., Popova I., Popryaduhin V.S., Kovalov O.V. Mathematical model of asynchronous motor diagnosis. *Science progress in European countries: new concepts and modern solutions: Proceedings of the 6th International conference*. ORT Publishing. Stuttgart, Germany. 2019. P. 361-366

10. Попова І. О., Попрядухін В. С. Параметри контролю несиметричних режимів роботи асинхронних двигунів для розробки ефективного захисту. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 9, т. 1(41). <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-41>.

Стаття надійшла до редакції 28.09.2023 р.



I. Popova¹, S. Chausov¹

¹Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university

INVESTIGATION OF THE CIRCUIT SOLUTION OF A DEVICE FOR USING LINEAR UNBALANCED VOLTAGES AS A FILTER

Summary

The paper analyzes the causes of unbalanced modes in the 0.38/0.22 KV network to which electrical equipment of rural farms is connected, and reveals the consequences for the operation of dynamic electrical equipment with unbalanced network voltages. It is revealed that under the operating conditions of electric consumers, the unbalanced mode is the usual operating mode of rural networks of 0.38/0.22 KV. The reliability of diagnostics of three-phase voltage asymmetry is justified using symmetric component filters, which are distributed to filter voltage sensors: forward, reverse and zero sequences, in which the parameters of the constituent elements of voltage filters are determined in such a way as to distinguish one or another symmetric component of voltage. A comparison is made between filters consisting of resistive-capacitor circuits and the circuit solution of the device studied in this paper. The article examines the possibility of using a circuit solution of a device that consists of two linear inductive coils without ferromagnetic cores with the same parameters (active resistance and inductance) and a capacitor as a filter for symmetric components of linear voltages of the forward and reverse sequences. To calculate the asymmetric mode of three – phase circuits, a special calculation method is used-the symmetric component method. Since the circuit solution of the device is connected by a star, there is no zero-sequence voltage component in the device circuit. Analytical calculation proved that the studied circuit solution of the device can be used as a filter of linear voltages of the reverse sequence: a voltmeter included in Phase "A" measures the voltage of the reverse sequence, and a voltmeter included in Phase "C" measures the voltage of the direct sequence. The relations between the active and reactive inductive resistances of the inductive coil and the capacitance of the capacitor in the circuit solution of the device are determined.

Keywords: symmetric components, linear voltage filter, parameters, active resistance, inductance, capacitance, coil, capacitor.