

П. М. Баран¹
В. П. Кідиба¹
Н. О. Равлик¹

ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГ СЕКЦІЙ ШИН 6 (10) КВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЄМНІСНИХ ПОДІЛЬНИКІВ

¹Національний університет «Львівська політехніка»

Однією з проблем в електричній мережі з ізольованою (компенсованою) нейтраллю є селективне визначення пошкодженого елемента за однофазного замикання на землю. Селективна робота захистів від таких пошкоджень може бути забезпечена на основі аналізу струмів нульової послідовності приєднань, фазних напруг та напруги нульової послідовності секції шин, від якої живляться ці приєднання. Як показав досвід експлуатації, селективну роботу захистів від однофазних замикань на землю в таких мережах можна забезпечити тільки із застосуванням цифрових пристроїв. На багатьох підстанціях та розподільчих пунктах енергосистем України напругою 6 (10) кВ відсутні трансформатори напруги. Тому застосовувати на таких підстанціях сучасні цифрові засоби захисту, які потребують інформацію про напруги секцій шин, немає можливості. До того ж на сучасних трансформаторних підстанціях, враховуючи компактність розміщення в них обладнання, додатково встановити традиційні електромагнітні трансформатори напруги фізично неможливо. Тому для вимірювання високої напруги необхідно застосовувати інші способи вимірювання. Одним з таких способів вимірювання високої напруги є використання ємнісних подільників. На кафедрі електроенергетики та систем управління НУ «Львівська політехніка» розроблено фізичну модель вимірювання високої напруги з використанням ємнісних подільників, що застосовуються в системах індикації наявності напруги на секціях шин підстанцій напругою 6 (10) кВ. Ці ємнісні подільники розроблені НВП РЕЛСіС. Після успішного випробовування цієї системи на фізичній моделі її впроваджено в дослідно-практичну експлуатацію на діючій підстанції РП-10 ПрАТ «Львівобленерго». Система використовувалась для функціонування цифрового захисту від однофазних замикань на землю в мережах з ізольованою (компенсованою) нейтраллю «Альтра». В пристрої «Альтра» аналогові сигнали (напруги секцій шин та струми нульової послідовності приєднань) перетворюються аналогово-цифровим пристроєм в цифровий код. Після цього на цифровому рівні здійснюється фільтрація сигналу — виділення сигналу основної частоти. Для цифрової фільтрації сигналу застосоване перетворення Фур'є. Обчислення значення напруги нульової послідовності здійснюється безпосередньо в цифровому пристрої на основі синусних та косинусних складових фазних напруг перетворення Фур'є. Позитивний досвід дослідно-практичної експлуатації ємнісних подільників на діючій підстанції ПрАТ «Львівобленерго» дозволяє рекомендувати використовувати їх на інших подібних підстанціях та розподільчих пунктах електричних мереж напругою 6 (10) кВ, де відсутні традиційні електромагнітні трансформатори напруги.

Ключові слова: електрична мережа, підстанція, секція шин, захист від однофазних замикань на землю, ємнісний подільник, електромагнітний трансформатор напруги, фазна напруга, напруга нульової послідовності, цифрові пристрої захисту й автоматики, цифрові пристрої «Альтра», розподільчий пункт.

Вступ

Однією з проблем в електричній мережі з ізольованою (компенсованою) нейтраллю є селективне визначення пошкодженого елемента за однофазного замикання на землю. Розроблені методи та засоби, які вирішують цю проблему [1]—[3]. Для селективної та надійної роботи захистів від однофазних замикань на землю в мережах з ізольованою (компенсованою) нейтраллю крім струмів нульової послідовності приєднань необхідна інформація про фазні напруги та напругу нульової послідовності електричної мережі.

В Україні на багатьох трансформаторних підстанціях та розподільчих пунктах електричних мереж напругою 6 (10) кВ відсутні електромагнітні трансформатори напруги. Тому на таких підстан-

ціях неможливе застосування пристроїв автоматики, релейного захисту, обліку тощо, для функціонування яких потрібна інформація про напруги. До того ж на сучасних трансформаторних підстанціях, враховуючи компактність розміщення в них обладнання, додатково встановити традиційні електромагнітні трансформатори напруги фізично неможливо.

На трансформаторних підстанціях та розподільчих пунктах, де відсутні традиційні електромагнітні трансформатори напруги, проблему можна вирішити застосуванням ємнісних подільників [4]—[7].

Метою роботи є впровадження в дослідно-практичну експлуатацію на діючій підстанції ПрАТ «Львівобленерго» системи вимірювання фазних напруг секцій шин 6 (10) кВ із застосуванням ємнісних подільників, а також дослідження роботи системи в комплексі з цифровим пристроєм захисту приєднань секцій шин підстанції від однофазних замикань на землю.

Результати дослідження

Основною проблемою у створенні системи контролю високої напруги 6 (10) кВ із застосуванням ємнісних подільників є їхні технічні характеристики, які повинні відповідати певним вимогам.

Відомо, що на багатьох підстанціях напругою 6 (10) кВ застосовують індикатори наявності напруги на секціях шин ИН-10-1 [8]. Індикатор складається з трьох світлодіодів для контролю наявності фазних напруг, узгоджувального пристрою та трьох ємнісних подільників. В індикаторі ИН-10-1 ємнісні подільники — це сертифікована продукція НВП РЕЛСіС. Тому вирішено застосувати ці ємнісні подільники для вимірювання напруг на секціях шин 6 (10) кВ. Для випробування системи контролю високої напруги 6 (10) кВ на базі ємнісних подільників на кафедрі електроенергетики та систем управління створено фізична модель [9]. На фізичній моделі проведено низку експериментів, що підтвердили високу ефективність використання ємнісних подільників для вимірювання високої напруги в електричній мережі 6 (10) кВ.

Схема приєднання ємнісних подільників до шин підстанції показана на рис. 1. До шин напругою 6 (10) кВ підстанції приєднані ємнісні подільники C_{31} , C_{32} , C_{33} . Параметрами ємнісного подільника є ємності: $C_1 = 120$ пФ, $C_2 = 1$ мкФ. Як видно з рис. 1, для контролю напруги на шинах, потрібно приєднувати вимірювальні пристрої до ємності C_2 , (одна обкладка ємності C_1 має високий потенціал 6 (10) кВ). З ємності C_2 напруга подається на узгоджувальний пристрій ПУ, який призначений для узгодження сигналів з ємнісного подільника та входними колами цифрового пристрою. Як цифровий пристрій (ЦП) використано пристрій «Альтра»[1], [10]. Узгоджувальний пристрій ПУ налаштований таким чином, що за напруги на шинах 6 (10) кВ, напруга на вході цифрового пристрою становить 100 В. У випадку застосування інших цифрових пристроїв, в яких відмінні характеристики входних аналогових входів від пристрою «Альтра», можливе переналаштування узгоджувального пристрою ПУ.

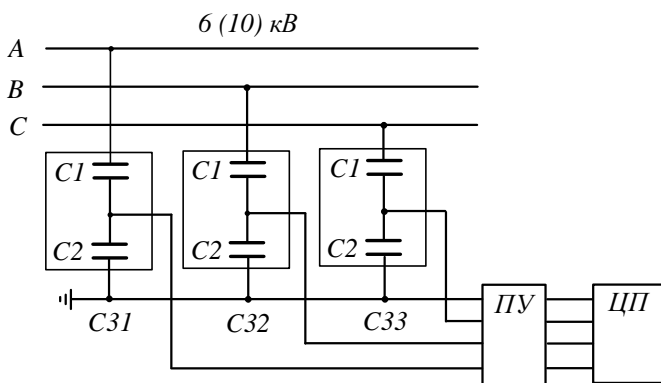


Рис. 1. Схема під'єднання ємнісного подільника

замикань на землю. Цей пристрій використано також для контролю напруг, отриманих від ємнісних подільників. З цією метою в пристрої «Альтра» додатково встановлено 3 входи живлення (рис. 2).

В цифровому реєстраторі, функції якого виконує пристрій «Альтра», аналогові сигнали (напруги секції шин та струми нульової послідовності приєднань), перетворюються аналогово-цифровим пристроєм в цифровий код. Після цього на цифровому рівні здійснюється фільтрація сигналу — виділення сигналу основної частоти. Для цифрової фільтрації сигналу застосовується перетворення Фур'є [11].

Після успішної перевірки роботи ємнісного подільника на фізичній моделі запропоновано випробувати його в реальних умовах на діючій підстанції. З цією метою ємнісний подільник встановлено на розподільчому пункті РП-10 ПрАТ «Львівобленерго». Для перевірки роботи ємнісних подільників вибрано підстанцію, на якій знаходиться традиційний електромагнітний трансформатор напруги. На цій підстанції також встановлений цифровий пристрій «Альтра», призначений для захисту приєднань до секції шин від однофазних

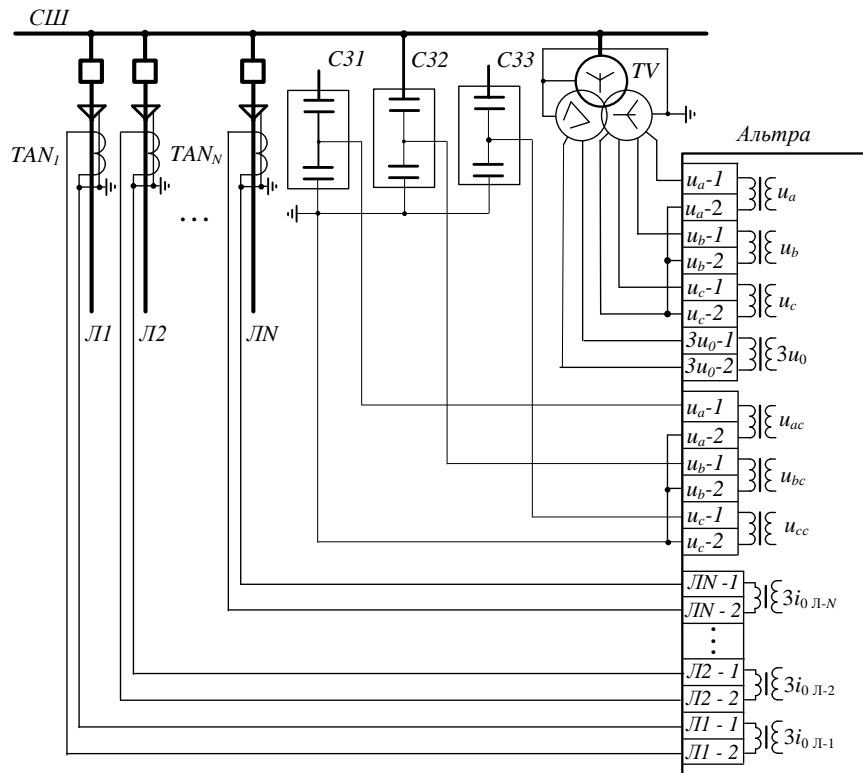


Рис. 2. Схема під'єднання цифрового пристрою "Альтра"

Для гармонічного сигналу $y(t)$ згідно з перетворенням Фур'є визначаються ортогональні складові амплітуди (косинусна та синусна) перетворення Фур'є для 1-ї гармоніки

$$Y_s = \frac{2}{T} \int_t^{t+T} y(t) \cdot \sin(\omega t) dt, \tag{1}$$

де $y(t)$ — значення аналогового сигналу для часу t ; T — період промислової частоти, $T = 0,02$ с; ω — кутова частота, що визначається як $\omega = 2\pi f$, де $f = 50$ Гц; $\omega \approx 314,159$ с⁻¹.

На основі ортогональних складових визначається амплітуда аналогового сигналу для 1-ї гармоніки

$$Y = \sqrt{Y_c^2 + Y_s^2}. \tag{2}$$

Враховуючи дискретний характер вхідної інформації, формули розрахунку синусних та косинусних складових аналогових сигналів, отриманих на основі перетворення Фур'є для першої гармоніки, мають вигляд [12]

$$\begin{aligned} Y_{jc} &= \frac{h}{T} \sum_{k=1}^N \left(Y_j(k) \cos\left((k-1) \frac{2\pi}{N} \right) + Y_j(k+1) \cos\left(k \frac{2\pi}{N} \right) \right); \\ Y_{js} &= \frac{h}{T} \sum_{k=1}^N \left(Y_j(k) \sin\left((k-1) \frac{2\pi}{N} \right) + Y_j(k+1) \sin\left(k \frac{2\pi}{N} \right) \right), \end{aligned} \tag{3}$$

де $Y_j(k)$, $Y_j(k+1)$ — значення аналогових сигналів для k та $k+1$ точок дискретизації, J — фаза, $J = A, B, C$; h — крок дискретизації за часом; N — кількість точок дискретизації на період промислової частоти.

Для селективної роботи цифрового захисту від замикань на землю в мережах з ізольованою (компенсованою) нейтраллю необхідна інформація не тільки про фазні напруги, а й про напругу нульової послідовності. Під час вимірювання фазних напруг за допомогою ємнісних подільників напруга нульової послідовності розраховується безпосередньо в цифровому пристрої. Механізм цього обчислення такий.

Відомо, що напруга нульової послідовності на основі фазних напруг визначається за виразом

$$3\dot{U}_0 = \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C, \quad (4)$$

де $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ — значення фазних напруг першої гармоніки.

Значення нульової послідовності напруги на основі синусних та косинусних складових фазних напруг перетворення Фур'є визначається як

$$\begin{aligned} U_{0s} &= U_{As} + U_{Bs} + U_{Cs}; \\ U_{0c} &= U_{Ac} + U_{Bc} + U_{Cc}; \\ U_0 &= \sqrt{U_{0s}^2 + U_{0c}^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

де $U_{As}, U_{Bs}, U_{Cs}, U_{Ac}, U_{Bc}, U_{Cc}$ — значення синусних та косинусних складових фазних напруг, обчислених за виразами (3).

На рис. 3 показані осцилограми, зафіксовані пристроєм «Альтра» під час однофазного замикання на одному з приєднань до секції шин підстанції: 1) фазних напруг, виміряні електромагнітним трансформатором напруги; 2) фазних напруг, виміряні за допомогою ємнісних подільників; 3) напруги нульової послідовності, виміряної трансформатором напруги; 4) напруги нульової послідовності, отриманої шляхом цифрового фільтрування, згідно з виразами (4), (5); 5) струмів нульової послідовності приєднань секції шин підстанції.

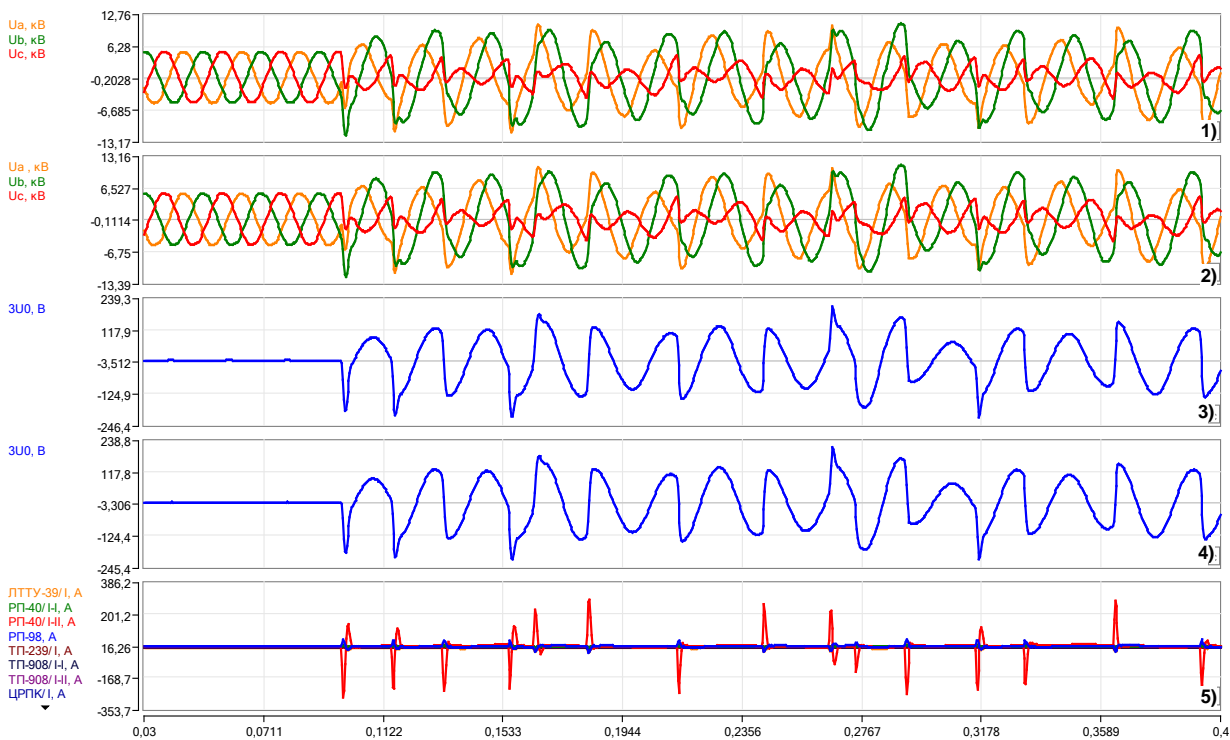


Рис. 3. Осцилограми: 1 — фазні напруги, виміряні електромагнітним трансформатором напруги; 2 — фазні напруги, виміряні ємнісними подільниками; 3 — напруга нульової послідовності, виміряна електромагнітним трансформатором напруги; 4 — напруга нульової послідовності, отримана шляхом цифрового фільтрування; 5 — струми нульової послідовності приєднань секції шин підстанції

З рис. 3 видно повний збіг фазних напруг, виміряних двома способами, як в перехідному, так і в усталеному режимах. Так само збігаються напруги нульової послідовності, виміряні трансформатором напруги та отримані цифровим способом.

Позитивні результати використання ємнісних подільників для вимірювання високої напруги уможливають їхнє використання для функціонування цифрових пристроїв захисту та автоматики. Це насамперед стосується підстанцій, де відсутні електромагнітні трансформатори напруги, а їхнє встановлення неможливе через габаритні обмеження. Позитивний досвід дослідно-практичної експлуатації ємнісних подільників на діючій підстанції ПрАТ «Львівобленерго» надає можливість рекомендувати використовувати їх на інших подібних підстанціях та розподільчих пунктах електричних мереж напругою 6 (10) кВ.

Висновки

1. Доведено, що впровадження ємнісних подільників для вимірювання напруг секцій шин 6—10 кВ може бути застосовано в схемах з пристроями, для функціонування яких необхідний контроль фазних напруг.

2. Показано, що використання ємнісних подільників дозволить впроваджувати в електричних мережах з ізольованою (компенсованою) нейтраллю селективні захисти від однофазних замикань на землю на трансформаторних підстанціях, де відсутні традиційні електромагнітні трансформатори напруги.

3. Показано, що фільтрація вхідного сигналу — виділення сигналу основної частоти, обчислення симетричних складових координат режиму із застосуванням перетворення Фур'є, може бути реалізована безпосередньо в цифровому пристрої.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] М. В. Базилевич, Р. С. Божик, і І. О. Сабадаш, «Мікропроцесорна інформаційно-діагностувальна система "Альт-ра" для селективного визначення приєднання з уземленою фазою,» *Енергетика і електрифікація*, № 7, с. 91-95, 2003.
- [2] A. Wahlroos, and J. Altonen, "Compensated networks and admittance based earth-fault protection," in *Methods and techniques for earth fault detection, indication and location*, seminar, Kaunas University of Technology and Aalto University, 15th February, 2011. [Online]. Available: https://library.e.abb.com/public/509d776e7bdcc425c1257847004468f4/Compensated%20networks%20and%20admittance%20based%20earth%20fault%20protection_techpub_757370_ENa.pdf. Accessed: 2024.10.11.
- [3] A. Wahlroos, et al., "Application of novel cumulative phasor sum measurement for earth-fault protection in compensated MV-networks," in *22nd International Conference on Electricity Distribution – CIRED*, Stockholm, 10-13 June 2013. [Electronic resource]. Available: https://library.e.abb.com/public/ea8b2f4cb1f2767c1257bc6001e1b84/CIRED2013_0607.pdf. Accessed: 2024.10.11.
- [4] В. О. Бржезицький, та ін., *Техніка та електрофізика високих напруг*, навч. посіб., В. О. Бржезицький та В. М. Михайлов, Ред. Харків, Україна: НТУ «ХПІ» Торнадо, 2005, 926 с.
- [5] J. A. Zamora, E. Aguilera, and E. Soto, "Characterization of a capacitive voltage divider," *Electric Power Systems Research*, vol. 223, 10, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109635>.
- [6] R. Hrbac, V. Kolar, M. Bartłomiejczyk, T. Mlcak, P. Orsag, and J. Vanc, "A Development of a Capacitive Voltage Divider for High Voltage Measurement as Part of a Combined Current and Voltage Sensor," *Elektronika Ii Elektrotehnika*, no. 26 (4), pp. 25-31, 2020. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.26.4.25888>.
- [7] Y. Trotsenko, and A. Derzhuk, "On application of resistive-capacitive voltage dividers for higher harmonics measurement: a review of studies," *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського, Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*, вип. 3 (140), 2023. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.3.16>.
- [8] *Індикатор напруги ІН-10-1*. Паспорт. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://releis.ua/upload/in-10-1.pdf>. Дата звернення 11.10.2024.
- [9] П. М. Баран, В. П. Кідиба, і Н. О. Равлик, «Застосування ємнісних подільників для вимірювання напруг секцій шин 6 (10) кВ,» *Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Електроенергетичні та електромеханічні системи*, вип. 4, № 1, с. 55-61, 2022. <https://doi.org/10.23939/sepes2022.01.055>.
- [10] Petro Baran, Yuriy Varetsky, Viktor Kidyba, Yaroslava Pryshliak, Igor Sabadash, and Oleksandr Franchuk, "VPN-based monitoring power system facilities," *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 98 NR 5/2022. [Online]. Available: <http://pe.org.pl/articles/2022/5/3.pdf>. Accessed: 2024.10.11.
- [11] Ю. О. Карпов, С. Ш. Кацев, і В. В. Кухарчук, *Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами*, підруч., Ю. О. Карпов, Ред. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011, 377 с.
- [12] П. М. Баран, В. П. Кідиба, Я. Д. Пришляк, і В. М. Шмагала «Програмне забезпечення аналізу інформації з цифрових пристроїв захисту та автоматики,» *Вісник НУ «Львівська політехніка», Електроенергетичні та електромеханічні системи*, № 479, с. 10-17, 2003. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/37667>.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 1.11.2024

Баран Петро Михайлович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики та систем управління, e-mail: petro.m.baran@lpnu.ua ;

Кідиба Віктор Павлович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики та систем управління;

Равлик Назар Олександрович — старший викладач кафедри електроенергетики та систем управління. Національний університет «Львівська політехніка», Львів

P. M. Baran¹
V. P. Kidyba¹
N. O. Ravlyk¹

Measurement of 6 (10) kV Bus Sections Voltage Using Capacitive Voltage Dividers

¹Lviv Polytechnic National University

One of the problems in an electrical network with an isolated (compensated) neutral is the selective determination of a damaged element during a single-phase earth fault. Selective operation of protections against such damage can be ensured on the basis of the analysis of zero-sequence currents, phase voltages and zero-sequence voltage of the bus section from which these feeders are powered. As operational experience has shown, selective operation of protection against single-phase earth faults in such networks can be ensured only with the use of digital devices. There are no voltage transformers at many substations and distribution points of the energy systems of Ukraine with a voltage of 6 (10) kV. Therefore, it is not possible to use modern digital protection devices at such substations, which require information about the voltages of the bus sections. In addition, at modern transformer substations, taking into account the compact placement of equipment in them, it is physically impossible to additionally install traditional electromagnetic voltage transformers. Thus, to measure high voltage, it is necessary to use other methods of voltage measurement. One of these methods of measuring high voltage is the use of capacitive voltage dividers. A physical model of high voltage measurement was developed at the Department of Electric Power Engineering and Control Systems of Lviv Polytechnic National University using capacitive voltage dividers used in voltage indication systems on bus sections of substations with a voltage of 6 (10) kV. These capacitive voltage dividers were developed by the RELSiS company. After successful testing of this system on a physical model, it was put into experimental and practical exploitation at the operating substation RP-10 of PrJSC "Lvivoblenergo". The system was used for the operation of digital protection against single-phase earth faults in grids with an isolated (compensated) neutral "Altra". In "Altra" device, analog signals (voltages of bus sections and zero-sequence currents of feeders) are converted by an analog-digital device into a digital code. After that, the signal is filtered at the digital level - the main frequency signal is selected. Fourier transformation is used for digital filtering of the signal. Zero-sequence voltage value is calculated directly in the digital device based on the sine and cosine components of the phase voltages of the Fourier transform. The positive experience of experimental and practical exploitation of capacitive voltage dividers at the operating substation of PrJSC "Lvivoblenergo" makes it possible to recommend their use at other similar substations and distribution points of electrical networks with a voltage of 6 (10) kV, where there are no traditional electromagnetic voltage transformers.

Keywords: electrical network, substation, bus section, protection against single-phase earth faults, capacitive voltage divider, electromagnetic voltage transformer, phase voltage, zero-sequence voltage, digital protection and automation devices, digital devices "Altra", distribution point.

Baran Petro M. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electric Power Engineering and Control Systems, e-mail: petro.m.baran@lpnu.ua ;

Kidyba Viktor P. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electric Power Engineering and Control Systems;

Ravlyk Nazar O. — Senior Lecturer of the Chair of Electric Power Engineering and Control Systems