

**П. М. Баран**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електроенергетики та систем управління,  
petro.m.baran@lpnu.ua

**В. П. Кідиба**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електроенергетики та систем управління,  
viktor.p.kidyba@lpnu.ua

**Н. О. Равлик**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електроенергетики та систем управління,  
nazar.o.ravlyk@lpnu.ua

## **ЗАСТОСУВАННЯ ЄМНІСНИХ ПОДІЛЬНИКІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГ СЕКЦІЙ ШИН 6 (10) кВ**

<http://doi.org/10.23939/sepes2022.01.055>

© Баран П. М., Кідиба В. П., Равлик Н. О., 2022

Однією із проблем в електричній мережі з ізольованою (компенсованою) нейтраллю є селективне визначення пошкодженого елемента за однофазного замикання на землю. Для селективної та надійної роботи захистів від однофазних замикань на землю в мережах із ізольованою (компенсованою) нейтраллю, крім струму нульової послідовності приєднань, необхідна інформація про фазні напруги та напругу нульової послідовності електричної мережі. На багатьох трансформаторних підстанціях відсутні традиційні електромагнітні трансформатори напруги. Для таких підстанцій проблему вимірювання високовольтної напруги можна вирішити застосуванням ємнісних подільників. Для перевірки функціонування ємнісних подільників, призначених для вимірювання напруг секцій шин 6 (10) кВ, на кафедрі електроенергетики та систем управління розроблено фізичну модель. У схемі фізичної моделі застосовано сертифіковані ємнісні подільники, які використовують у системах індикації наявності напруги на секціях шин напругою 6 (10) кВ. Ці ємнісні подільники розробило НПП РЕЛСіС. Розроблено пристрій для узгодження під час функціонування схеми вимірювання напруг сигналів, які подаються з ємнісного подільника на вхід цифрового реєстратора. Для перевірки роботи ємнісних подільників у схемі фізичної моделі застосовано традиційний електромагнітний трансформатор напруги типу НТМИ-10-66, з вторинної обмотки якого напруга подається на цифровий реєстратор. Здійснено перевірку запропонованої системи в основних режимах роботи. Для аналізу записаних цифровим реєстратором осцилограм розроблена спеціальна програма. Ця програма містить функції аналізу координат режиму, які дають змогу виконувати гармонічний аналіз, здійснювати розрахунок симетричних складових, формувати інтегральні, диференціальні характеристики тощо. З використанням перетворення Фур'є розроблено цифрову модель, яка дає змогу визначити діючі значення

вимірюваних напруг та виділити їх симетричні складові – нульової та зворотної послідовностей. Дослідження показали, що вимірювання високої напруги за допомогою ємнісних подільників можна застосовувати в схемах із пристроями, для функціонування яких необхідний контроль фазних напруг мережі 6–10 кВ.

*Ключові слова: електрична мережа; секція шин; релейний захист та автоматика; ємнісний подільник; трансформатор напруги; фазна напруга; напруга нульової послідовності; цифрові пристрої.*

### **Постановка проблеми**

В Україні на багатьох трансформаторних підстанціях електричних мереж напругою 6 (10) кВ відсутні трансформатори напруги. Тому вимірювати напругу на таких підстанціях немає можливості. І, як наслідок, на таких підстанціях неможливо застосовувати пристрої автоматики, релейного захисту, обліку тощо, для функціонування яких потрібна інформація про напруги.

Однією із проблем в електричній мережі з ізольованою (компенсованою) нейтраллю є селективне визначення пошкодженого елемента за однофазного замикання на землю. Розроблено методи та засоби, що вирішують цю проблему [3, 4]. Для їх реалізації необхідна інформація про фазні напруги та напругу нульової послідовності електричної мережі.

### **Актуальність дослідження**

Для селективної та надійної роботи захистів від однофазних замикань на землю у мережах з ізольованою (компенсованою) нейтраллю необхідна інформація про фазні напруги та напругу нульової послідовності електричної мережі. На трансформаторних підстанціях та розподільних пунктах, де відсутні традиційні електромагнітні трансформатори напруги, проблему можна вирішити застосуванням ємнісних подільників.

### **Формулювання мети та завдань**

Перед нами поставлено завдання застосувати ємнісні подільники для вимірювання фазних напруг секцій шин 6 (10) кВ, яке було вирішено зі створенням фізичної моделі на основі високовольтного обладнання і цифрових систем реєстрації кафедри електроенергетики та систем управління. Натурними експериментами підтверджено можливість вимірювати високовольтну напругу секцій шин із використанням ємнісних подільників. Виміряну в такий спосіб напругу можна використовувати для роботи цифрових пристроїв релейного захисту та автоматики.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Для вимірювання високої напруги в електричних мережах, крім традиційних електромагнітних трансформаторів напруги, можливе використання ємнісних подільників [1, 2].

### **Постановка задачі**

Розробити систему вимірювання високовольтної напруги 6 (10) кВ із застосуванням ємнісних подільників, дослідити основні її характеристики.

### **Виклад основного матеріалу**

На багатьох підстанціях напругою 6 (10) кВ немає трансформаторів напруги. Тому застосовувати на таких підстанціях сучасні цифрові засоби захисту, обліку та управління, які потребують інформації про напруги секцій шин, немає можливості. Крім того, встановити на таких підстанціях традиційний електромагнітний трансформатор напруги фізично неможливо. Тому виникла проблема вимірювання високої напруги із застосуванням інших принципів вимірювання. Одним із таких способів вимірювання високої напруги є використання ємнісних подільників.

Основною проблемою під час створення системи контролю високої напруги 6 (10) кВ є виготовлення ємнісних подільників, які відповідають певним вимогам. В електричних мережах напругою 6 (10) кВ застосовують індикатори наявності напруги на секціях шин ИН-10-1 [5]. До складу індикатора входять світлодіоди, узгоджувальний пристрій та ємнісні подільники. В індикаторі ИН-10-1 ємнісний подільник – це сертифікована продукція НПП РЕЛСіС [5]. Ми вирішили застосувати ці ємнісні подільники з метою вимірювання напруги на секціях 6 (10) кВ. Для випробування системи контролю високої напруги 6 (10) кВ на базі ємнісних подільників на кафедрі електроенергетики та систем управління створено фізичну модель. Принципову схему фізичної моделі наведено на рис. 1.

Для отримання високої напруги застосовано трансформатор напругою 220/6000 В/В. До шин напругою 6 кВ приєднані ємнісні подільники  $C31$ ,  $C32$ ,  $C33$ . Параметрами ємнісного подільника є ємності:  $C1=120$  пФ,  $C2=1$  мкФ. Як видно з рис. 1, для контролю напруги на шинах ми повинні приєднувати вимірювальні пристрої до ємності  $C2$  (одна обкладка ємності  $C1$  має високий потенціал 6 кВ). Із ємностей  $C2$  напруга подається на узгоджувальний пристрій ПУ, призначений для узгодження сигналів із ємнісного подільника та входних кіл цифрового реєстратора ЦР.

Узгоджувальний пристрій ПУ налаштовано так, що за напруги на шинах 6 кВ напруга на вході цифрового реєстратора становить 100 В.

Для перевірки роботи ємнісного подільника в схемі застосовано традиційний електромагнітний трансформатор напруги типу НТМИ-10-66. З вторинної обмотки електромагнітного трансформатора напруга подається на цифровий реєстратор ЦР. Здійснено реєстрацію напруги в різних режимах – усталений режим, подавання (зняття) напруги на секцію шин 6 кВ тощо. У всіх цих режимах фіксували напругу як від ємнісного подільника, так і від електромагнітного трансформатора напруги. Це дало змогу перевірити роботу ємнісного подільника.

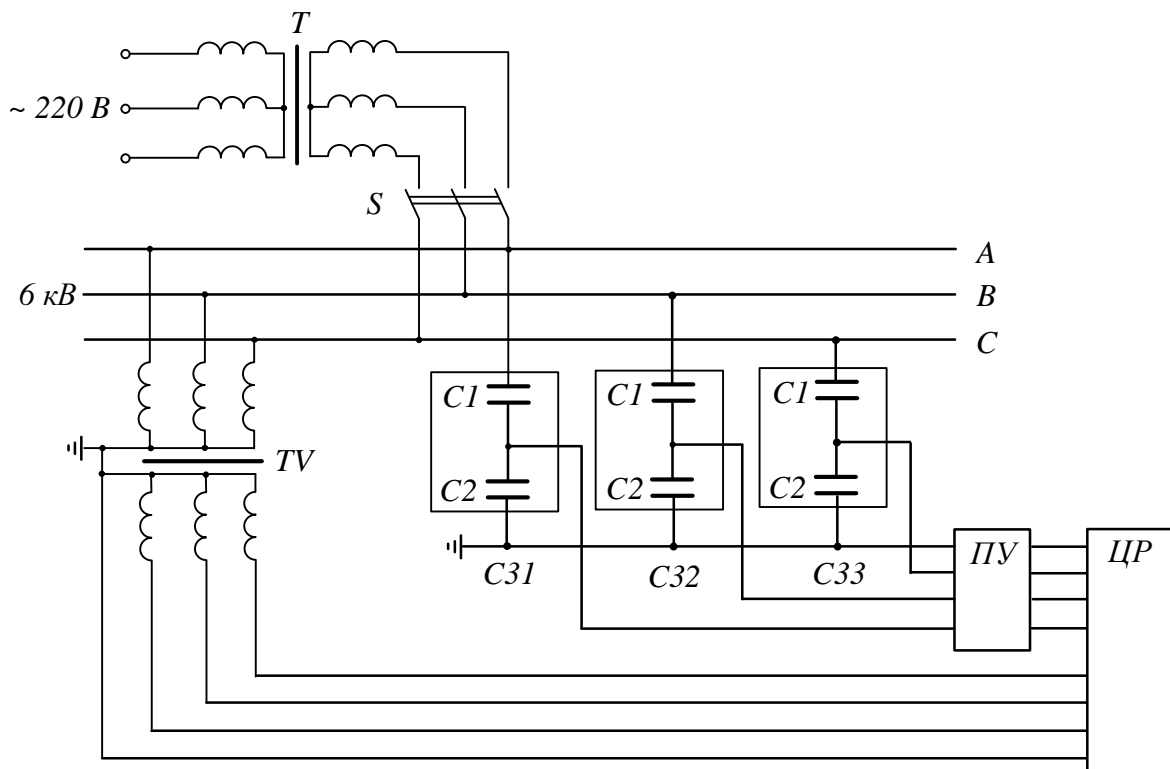


Рис. 1. Схема фізичної моделі електричної мережі для дослідження ємнісного подільника

Виконані дослідження можуть бути основою для застосування запропонованої схеми в пристроях, для функціонування яких необхідний контроль фазних напруг мережі 6–10 кВ.

У цифровому реєстраторі аналогові сигнали, пропорційні до фазних напруг, перетворюються на цифровий код. Після цього на цифровому рівні здійснюється фільтрація сигналу – виділення сигналу основної частоти [6]. Для фільтрації використовують перетворення Фур'є.

Для гармонічного сигналу фазної напруги  $u(t)$  згідно із перетворенням Фур'є визначають ортогональні складові амплітуди (косинусну та синусну) перетворення Фур'є для першої гармоніки

$$\begin{aligned} U_c &= \frac{2}{T} \cdot \int_t^{t+T} u(t) \cdot \cos(\omega t) \cdot dt, \\ U_s &= \frac{2}{T} \cdot \int_t^{t+T} u(t) \cdot \sin(\omega t) \cdot dt, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $u(t)$  – значення напруги для часу  $t$ ;  $T$  – період промислової частоти,  $T = 0,02$  с;  $\omega$  – кутова частота, що визначається як  $\omega = 2\pi f$ , де  $f = 50$  Гц,  $\omega \approx 314,159$  с<sup>-1</sup>.

На основі ортогональних складових визначають амплітуду фазної напруги для першої гармоніки

$$U = \sqrt{U_c^2 + U_s^2}. \quad (2)$$

За виразами (1), (2) визначають напругу для кожної фази електричної мережі.

Ураховуючи дискретність вхідної інформації, формули для розрахунку синусних та косинусних складових напруги, отриманих на основі перетворення Фур'є для першої гармоніки, набудуть вигляду [7, 9]

$$\begin{aligned} U_{jc} &= \frac{h}{T} \sum_{k=1}^N \left( U_j(k) \cos \left( (k-1) \cdot \frac{2\pi}{N} \right) + U_j(k+1) \cos \left( (k) \cdot \frac{2\pi}{N} \right) \right), \\ U_{js} &= \frac{h}{T} \sum_{k=1}^N \left( U_j(k) \sin \left( (k-1) \cdot \frac{2\pi}{N} \right) + U_j(k+1) \sin \left( (k) \cdot \frac{2\pi}{N} \right) \right), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $U_j(k)$ ,  $U_j(k+1)$  – значення напруги 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 захистів від замикань на землю в мережах з ізольованою (компенсованою) нейтраллю необхідна інформація не тільки про фазні напруги, а й про напругу нульової послідовності.

Напругу нульової послідовності на основі фазних напруг (першої гармоніки) визначають за виразом

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

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 визначимо як

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

На фізичній моделі виконано низку експериментів, що підтвердили високу ефективність використання ємнісних подільників для вимірювання високої напруги в електричній мережі. Для прикладу на рис. 2 наведено записані цифровим реєстратором осцилограми фазних напруг у режимі увімкнення рубильника  $S$  (рис. 1). На рис. 2, а подано осцилограми, виміряні електромагнітним трансформатором напруги, на рис. 2, б – осцилограми, виміряні за допомогою ємнісних подільників. З рис. 2 видно повний збіг вимірювань двома способами фазних напруг як у перехідному, так і в усталеному режимах. Осі ординат осцилограм відградуєвано так: для трансформатора напруги – в значеннях напруги його первинної обмотки, для ємнісних подільників – у значеннях, що відповідають напрузі вторинної обмотки трансформатора напруги.

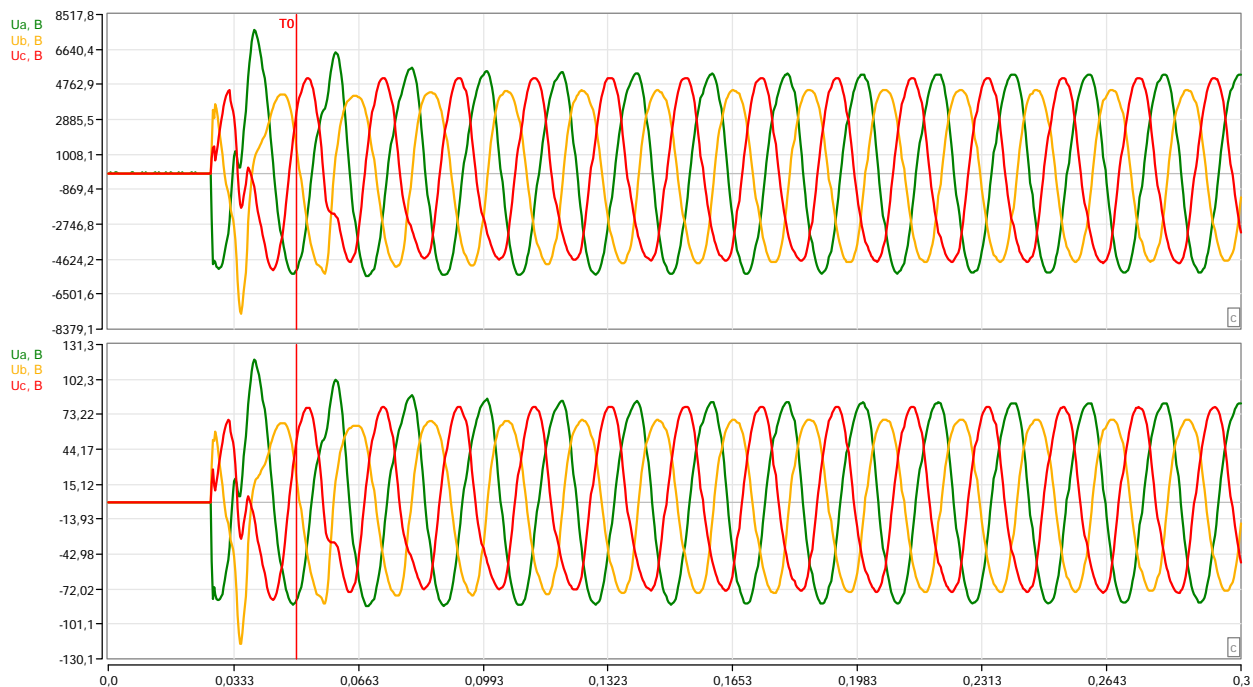


Рис. 2. Осцилограми фазних напруг, виміряні за допомогою:  
а – електромагнітного трансформатора напруги; б – ємнісного подільника

### Висновки

1. Виконані дослідження показали, що використання ємнісних подільників для контролю високої напруги можливе в схемах з пристроями, для функціонування яких необхідний контроль фазних напруг мережі 6–10 кВ.
2. Використання ємнісних подільників дасть змогу впроваджувати в електричних мережах з ізольованою (компенсованою) нейтраллю захисти від однофазних замикань на землю та виконувати діагностування ізоляції обладнання на трансформаторних без традиційних електромагнітних трансформаторів напруги. Це забезпечить можливість селективно ідентифікувати пошкоджену ділянку в складній електричній мережі.
3. Фільтрація вхідного сигналу – виділення сигналу основної частоти, обчислення симетричних складових координат режиму здійснюється із застосуванням перетворення Фур'є на цифровому рівні безпосередньо в цифровому пристрої.

### Перспективи подальших досліджень

Враховуючи новизну цього напрямку, який із упровадженням в електричних мережах цифрових пристроїв захисту та автоматики уможливилося використання ємнісних подільників для контролю високої напруги на підстанціях, де немає трансформаторів напруги чи використовувати їх неможливо через габаритні обмеження, під час подальших досліджень передбачено встановлення такого ємнісного подільника в сукупності із мікропроцесорним захистом “Альтра-32” на об’єкті електричної мережі з метою аналізу осцилограм напруг, знятих у реальних умовах за допомогою електромагнітного трансформатора напруги та ємнісного подільника.

### Список літератури

1. Бржезицький В. О., Ісакова А. В., Рудаков В. В. та ін. Техніка та електрофізика високих напруг: навч. посіб.; за ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. Харків: НТУ “ХПІ” Торнадо, 2005. 926 с. URL: [http://library.kpi.kharkov.ua/files/TRUD\\_NTY/trud2005\\_3.htm](http://library.kpi.kharkov.ua/files/TRUD_NTY/trud2005_3.htm)

2. Бойко Н. И., Евдошенко Л. С., Иванов В. М., Христенко О. А. Компактный ёмкостный делитель напряжения на 70 кВ с экранированным промежуточным электродом // *Электротехника і електромеханіка*. 2012. № 6. С. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2012.6.09>.

3. Wahlroos A., Altonen J., “Compensated networks and admittance based earth-fault protection”, seminar “Methods and techniques for earth fault detection, indication and location”, arranged by Kaunas University of Technology and Aalto University, 15th February, 2011. URL: [https://library.e.abb.com/public/509d776e7bdcc425c1257847004468f4/Compensared%20networks%20and%20admittance%20based%20earth%20fault%20protection\\_techpub\\_757370\\_ENa.pdf](https://library.e.abb.com/public/509d776e7bdcc425c1257847004468f4/Compensared%20networks%20and%20admittance%20based%20earth%20fault%20protection_techpub_757370_ENa.pdf).

4. Wahlroos A., Altonen J. et al. “Application of novel cumulative phasor sum measurement for earth-fault protection in compensated MV-networks”, 22nd International Conference on Electricity Distribution – CIRED, Stockholm, 10–13 June 2013. URL: [http://sgemfinalreport.fi/files/CIRED2013\\_0607\\_paper.pdf](http://sgemfinalreport.fi/files/CIRED2013_0607_paper.pdf).

5. Індикатор напруги ІН-10-1. Паспорт. URL: <https://releis.ua/upload/in-10-1.pdf>.

6. Баран П. М., Кідиба В. П., Пришляк Я. Д., Шмагала В. М. Програмне забезпечення аналізу інформації з цифрових пристроїв захисту та автоматики // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”*. 2003. № 479. С. 10–17. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/37667>

7. Baran Petro, Varetsky Yuriy, Kidyba Viktor, Pryshliak Yaroslava, Sabadash Igor, Franchuk Oleksandr. VPN-based monitoring power system facilitie: PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 98 NR 5/2022. URL: <http://pe.org.pl/articles/2022/5/3.pdf>.

8. Фізична модель системи телемеханіки для оперативно-диспетчерського управління підстанціями / М. В. Базилевич, П. М. Баран, В. П. Кідиба, Г. М. Лисяк, І. О. Сабадаш // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”*. 2017. № 870. С. 3–8. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/44877>.

#### References

1. Brzhezyts'kyi V. O., Isakova A. V., Rudakov V. V. ta in. *Tekhnika ta elektrofizyka vysokikh napruh: navch. posib. za red. V. O. Brzhezyts'koho ta V. M. Mykhaylova*. Kharkiv: NTU “KHPI” Tornado, 2005. 926 s.

2. Boyko N. I., Yevdoshenko L. S., Ivanov V. M., Khristenko O. A. Kompaktnyy yomkostnyy delitel' napryazheniya na 70 kV s ekranirovannym promezhutochnym elektrodom // *Yeletrotekhnika i yeletromekhanika*. 2012, No. 6, S. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2012.6.09>.

3. Wahlroos A., Altonen J. “Compensated networks and admittance based earth-fault protection”, seminar “Methods and techniques for earth fault detection, indication and location”, arranged by Kaunas University of Technology and Aalto University, 15th February, 2011. URL: [https://library.e.abb.com/public/509d776e7bdcc425c1257847004468f4/Compensared%20networks%20and%20admittance%20based%20earth%20fault%20protection\\_techpub\\_757370\\_ENa.pdf](https://library.e.abb.com/public/509d776e7bdcc425c1257847004468f4/Compensared%20networks%20and%20admittance%20based%20earth%20fault%20protection_techpub_757370_ENa.pdf).

4. Wahlroos A., Altonen J. et al. “Application of novel cumulative phasor sum measurement for earth-fault protection in compensated MV-networks”, 22nd International Conference on Electricity Distribution – CIRED, Stockholm, 10–13 June 2013. URL: [http://sgemfinalreport.fi/files/CIRED2013\\_0607\\_paper.pdf](http://sgemfinalreport.fi/files/CIRED2013_0607_paper.pdf).

5. Індикатор напруги ІН-10-1. Паспорт. URL: <https://releis.ua/upload/in-10-1.pdf>.

6. Baran P. M., Kidyba V. P., Pryshlyak Ya. D., Shmahala V. M. Prohramne zabezpechennya analizu informatsiyi z tsyfrovyykh prystroyiv zakhystu ta avtomatyky // *Visn. NU “L'vivs'ka politekhnika” “Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy”*, 2003, No. 479, S. 10–17. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/37667>.

7. Petro Baran, Yuriy Varetsky, Viktor Kidyba, Yaroslava Pryshliak, Igor Sabadash, Oleksandr Franchuk. VPN-based monitoring power system facilitie: PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 98 NR 5/2022. URL: <http://pe.org.pl/articles/2022/5/3.pdf>.

8. Fizychna model' systemy telemekhaniky dlya operativno-dyspetchers'koho upravlinnya pidstantsiyamy / М. В. Базилевич, П. М. Баран, В. П. Кідиба, Г. М. Лисяк, І. О. Сабадаш // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”*, 2017, No. 870, S. 3–8. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/44877>.

**P. Baran,**

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electric Power Engineering and Control Systems,  
petro.m.baran@lpnu.ua

**V. Kidyba,**

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electric Power Engineering and Control Systems,  
victor.p.kidyba@lpnu.ua

**N. Ravlyk**

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electric Power Engineering and Control Systems,  
nazar.o.ravlyk@lpnu.ua

### **THE USAGE OF CAPACITIVE DISTRIBUTORS FOR MEASURING VOLTAGES OF 6 (10) kV TIRE SECTIONS**

© Baran P., Kidyba V., Ravlyk N., 2022

One of the problems in the electrical network with isolated (compensated) neutral is the selective determination of the damaged element in a single-phase earth fault. For selective and reliable operation of protections against single-phase earth faults in networks with isolated (compensated) neutral, in addition to the zero-sequence current, information on phase voltages and zero-sequence voltage of the electrical network is required. Many transformer substations do not have traditional electromagnetic voltage transformers. For such substations, the problem of measuring high voltage can be solved by using capacitive dividers. A physical model was developed at the Department of Electric Power Engineering and Control Systems to test the operation of capacitive dividers designed to measure the voltages of 6 (10) kV bus sections. The scheme of the physical model used certified capacitive dividers used in voltage indication systems on bus sections with a voltage of 6 (10) kV. These capacitive dividers are developed by NPP RELSiS. A device has been developed for the operation of the voltage measurement circuit to match the signals supplied from the capacitive divider to the input of the digital recorder. To test the operation of capacitive dividers in the scheme of the physical model used a traditional electromagnetic voltage transformer type NTMI-10-66, From the secondary winding of which the voltage is fed to the digital recorder. The developed system in the basic operating modes is checked. A special program has been developed for the analysis of oscillograms recorded by a digital recorder. This program contains a number of functions for analyzing the coordinates of the mode, which allow you to perform harmonic analysis, calculate symmetrical components, form integral, differential characteristics and more. Using the Fourier transform, a digital model was developed that allows to obtain the effective values of the measured voltages and to distinguish their symmetrical components – zero and inverse sequences. Studies have shown that the measurement of high voltage using capacitive dividers can be used in circuits with devices for the operation of which requires control of phase voltages of the 6–10 kV network.

*Key words: electrical network; bus section; relay protection and automation; capacitive divider; voltage transformer; phase voltage; zero sequence voltage; digital devices.*