



IV. ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

УДК 621.316.9

МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ІЗОЛЬОВАНОЮ
НЕЙТРАЛЛЮ НА ОСНОВІ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ РС-ФІЛЬТРІВ З
ОБМЕЖУВАЧАМИ ПЕРЕНАПРГУ ТА ТЕЛЕМЕТРІЄЮ НАПРУГ

Матвієнко Сергій Валерійович, к.т.н.,
ПАТ «Вінницяобленерго»

Янович Віталій Петрович, д.т.н., доцент,
Рубаненко Олена Олександрівна, к.т.н., доцент,
Явдик Віта Вікторівна, асистент,
Вінницький національний аграрний університет

S. Matviyenko, PJSC "Vinnytsiaoblenergo"
V. Yanovych, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
O. Rubanenko, PhD, Associate Professor
V. Yavduk, Assistant
Vinnytsia National Agrarian University

Проаналізовано особливості експлуатації, основні причини аварій та забезпеченість засобами моніторингу технічного стану розподільних мереж сільськогосподарських регіонів напругою 6–10 кВ. Запропоновано метод моніторингу технічного стану електричних мереж з ізольованою нейтраллю на основі системи автоматичної обробки даних датчиків напруги (телеметрії напруг), встановлених у розподіленій системі РС-фільтрів з ОПН. Розглянуто додаткові переваги та можливості, що дає застосування запропонованого методу, а також адаптація системи моніторингу до умов сучасної інфраструктури інформаційного обміну цифрової підстанції згідно IEC 6185-9-2.

Ключові слова: моніторинг, телеметрія напруг, ізольована нейтраль, розподілена система РС-фільтрів, ОПН, цифрова підстанція, IEC 61850.

Рис. 1. Літ. 6.

1. Вступ

Електричні мережі повітряних ЛЕП з ізольованою нейтраллю напругою 6–10 кВ є одним із найбільших за протяжністю та поширенням сегментів енергосистеми України, що забезпечують електропостачання в основному сільськогосподарських регіонів та споживачів на віддалених територіях. Зокрема, у Вінницькій області за офіційною статистикою ПАТ «Вінницяобленерго» їх протяжність складає понад 14 тис. кілометрів та перевищує сумарну протяжність мереж вищих ступенів напруги (35–110 кВ) у понад 3 рази.

Основним видом аварій у розподільних мережах повітряних ЛЕП [1], як правило, є однофазні замикання на землю (ОЗЗ) – до 70%. Також одним із основних факторів впливу на технічний стан електричної мережі є наявність імпульсних перенапруг. Причини їх появи можуть бути як зовнішні (грозова атмосферна активність), так і внутрішні (комутації в електричній мережі, перехідні процеси при дугових замиканнях на землю і т.п.). Рівень внутрішніх перенапруг може коливатись в межах 2,5...3-кратних значень максимальної фазної напруги, що є близьким до граничних значень електричної міцності ізоляції силових трансформаторів та кабельних вставок відносно землі.

Відповідно [2], для захисту електричних мереж від грозових та комутаційних перенапруг повинні застосовуватись обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН). Але реалії експлуатації розподільних мереж 6–10 кВ є такими, що лише нові та реконструйовані згідно з останніми вимогами ділянки мереж мають захист від перенапруг.

Аналіз досліджень ОПН [3] вказує на те, що виробники ОПН не забезпечують їх стабільну вольт-амперну характеристику, що обмежує фронт перенапруги при появі вищих гармонік. Особливо актуальним є те, що при дугових однофазних замиканнях на землю (ОЗЗ) фронт перенапруги максимально проявляється на 3-й гармоніці (150 Гц). Це в основному і призводить до пробоя ізоляції у «слабких» місцях, таких, як кабельні вставки та силові трансформатори (пробій обмотки ВН, пошкодження ізоляції вводу трансформатора і т.п.). Досвід експлуатації електричних мереж з ізольованою нейтраллю також вказує на те, що при наявності дугового ОЗЗ протягом тривалого часу



імовірність пошкодження ізоляції в іншій фазі та його переходу в двохфазне замикання через землю значно зростає.

Рівень забезпечення засобами телемеханіки, моніторингу технічного стану та загалом рівень інформатизації розподільних мереж сільських регіонів залишається стабільно низьким. Із доступних засобів моніторингу існує лише неселективний захист від ОЗЗ, що діє на сигнал, або сигналізатор типу «земля на лінії», принцип дії якого полягає у контролі напруги зміщення нейтралі у трансформаторі напруги НТМИ з обмоткою контролю ізоляції на вузлових підстанціях 110–35 кВ. При цьому визначити пошкоджене приєднання одразу неможливо, як і виявити інші види пошкоджень, наприклад, обрив проводу. Фактично, обсяг заходів з усунення наслідків ОЗЗ зводиться до послідовного відключення оперативним персоналом кожної лінії 10 кВ до моменту виявлення пошкодженої з її подальшим обстеженням оперативно-виїзною бригадою.

Як наслідок, аварійність та тривалість перерв в електропостачанні у даному сегменті мережі є найбільшою та суттєво впливає на показники SAIDI/SAIFI (індекси середньої тривалості/частоти перерв в електропостачанні) розподільних компаній.

Діючий нормативний документ [4] з обліку та аналізу технічного стану електричних мереж СОУ-Н МПЕ 40.1.20.576:2005 є застарілим та не регламентує передумов до підвищення рівня інформатизації в розподільних мережах. Також і в інших нормативно-технічних документах України не вистачає регламентів впровадження важливих новацій, зокрема, концепції цифрової підстанції, яка активно впроваджується у світі згідно IEC 61850 [5]. Остання редакція/доповнення даного стандарту IEC 61850-9-2 визначає цілий спектр додаткових вимог до побудови інформаційного обміну, його стандартизації та до технічних засобів передачі даних в електричних мережах.

2. Мета

Метою даної статті є представлення нового методу моніторингу технічного стану електричних мереж з ізолюваною нейтраллю на основі телеметрії напруг у розподіленій системі RC-фільтрів з ОПН, а також додаткових переваг та можливостей, що дає застосування запропонованого методу. Крім того, розглядається можливість адаптації системи моніторингу технічного стану розподільної мережі 6-10 кВ до умов сучасної інфраструктури інформаційного обміну цифрової підстанції згідно IEC 61850-9-2.

3. Результати дослідження

Пропонується новий метод моніторингу технічного стану розподільної мережі з ізолюваною нейтраллю, який полягає у ввімкненні на початку та в кінці кожної лінії спеціально налаштованого трипроменевого RC-фільтру (по одному променю для кожної фази, промені фільтру з'єднані у зірку, кожен промінь – це послідовно підключені високовольтний конденсатори типу ФГТ-И або К75-15 та високоточний калібрований резистор). Центральна точка (нейтраль) фільтру заземлюється через ОПН. Також на живлячій підстанції розподільної мережі в нейтраль трансформатора підключається аналогічний однопроменевий послідовний RC-фільтр із заземленням через ОПН. Параметри усіх ОПН підбираються таким чином, щоб забезпечити їх спрацювання при стійкому ОЗЗ (в т.ч. дуговому) та при зростанні напруги зміщення нейтралі (діюче значення) вище $U_0 = 0,6U_{\phi}$ (для $U_n = 10$ кВ та $U_0 = 0,6 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} = 3,5$ кВ – рекомендовано використання ОПН Tyco Electronics HDA-03MA).

Шляхом моделювання у програмному комплексі АТР-ЕМТР [6, 7] були з високою точністю визначені параметри пасивних елементів (ємність конденсатора та активний опір високоточного каліброваного резистора) RC-фільтру для напруги мережі 10 кВ таким чином, що при вимірюванні спаду напруги на резисторах RC-фільтру їх значення для кожної з фаз та нейтралі трансформатора рівно у 100 (непряме підкл.) чи 1000 разів (пряме підкл. до контролера) є меншими від дійсних значень фазних напруг (напруг фаз відносно землі при спрацюванні ОПН) та напруги зміщення нейтралі. При цьому вектори вимірюваних в RC-фільтрі напруг випереджають по фазі вектори дійсних напруг на кут 90° .

Для забезпечення телеметрії напруг застосовано систему дільників/перетворювачів напруги, датчиків, аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП) та контролера на базі ATmega32U4 (Arduino Leonardo), а також інтерфейсу передачі даних в залежності від можливостей інфраструктури: для телеметрії напруг на початку ліній – Wiznet W5100 (Arduino Ethernet); для телеметрії напруг в кінці ліній – плата розширення Arduino GSM. Так як контролер Arduino Leonardo має 6 аналогових входів



для вимірювання напруги, тому один контролер доцільно використовувати для телеметрії одразу 2-х приєднань (2 лінії по 3 фази – 6 каналів).

Принципова схема системи моніторингу технічного стану розподільної мережі на основі запропонованого методу представлена на рис. 1.

При виникненні пошкодження ізоляції в одній із фаз, що переростає в ОЗЗ, виникає несиметрія параметрів ізоляції відносно землі та різко збільшується напруга зміщення нейтралі, яка при стійкому ОЗЗ через малий перехідний опір досягає значення фазної напруги (при цьому напруги в непошкоджених фазах зростають до діючого значення лінійної напруги U_n). У разі досягнення $U_0 \geq 0,6 U_{\phi}$ відбувається спрацювання ОПН та найближчий до місця пошкодження RC-фільтр заземляється, що дозволяє виявити не тільки лінію, де виникло дугове ОЗЗ, а й те, в якій приблизно частині лінії це трапилось (ближче до початку чи до кінця лінії).

Фактично при пошкодженні ізоляції фронт перенапруги розповсюджується рівномірно з місця виникнення пошкодження по усій розподільній мережі.

Шляхом аналізу зміни напруг фаз (dU/dt) на рівні мікропрограми контролера ATmega32U4 є можливість запрограмувати ідентифікацію події спрацювання ОПН (виникнення ОЗЗ) шляхом ідентифікації різкої зміни напруги будь-якої із фаз порівняно з фазною напругою U_{ϕ} (в нормальному незаземленому режимі напруги фаз RC-фільтру симетричні).

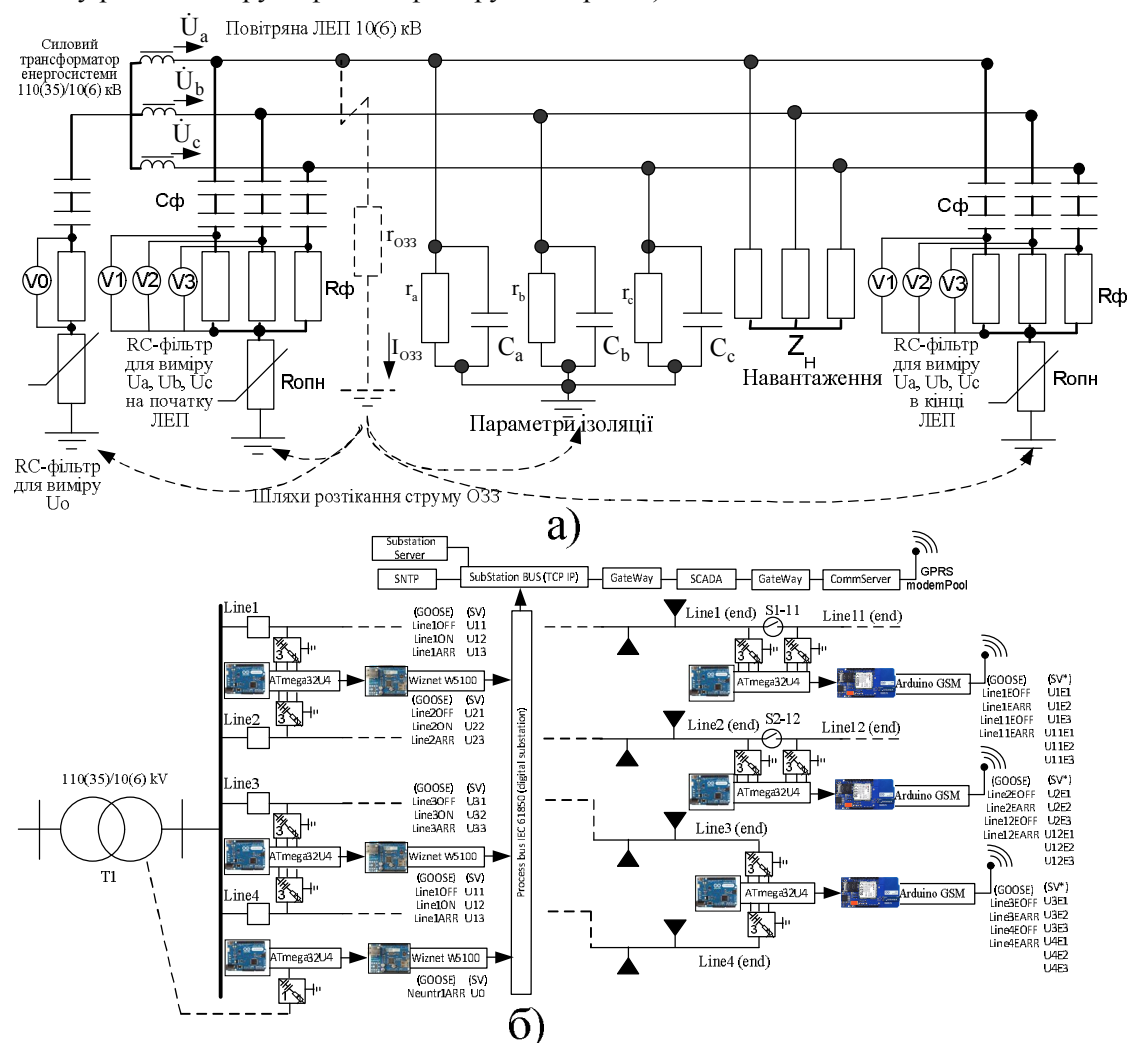


Рис. 1. Принципова схема системи моніторингу технічного стану розподільної мережі з ізольованою нейтраллю: а) заступна схема для пояснення суті методу; б) однолінійна схема.

Дослідження на моделях мережі 10 кВ показали, що збільшення напруги відносно землі одної із фаз до значення понад 9 кВ, як правило, свідчить про стійке ОЗЗ, а виникнення несиметрії напруг в RC-фільтрах на 5% і більше є сигналізатором спрацювання ОПН в його нейтралі. Також результати



моделювання засвідчили, що для послідовного спрацювання ОПН в інших РС-фільтрах необхідно, щоб пошкодження отримало подальший розвиток (зменшення перехідного опору в місці пошкодження, збільшення несиметрії параметрів ізоляції відносно землі), оскільки заземлення РС-фільтра через ОПН призводить до збільшення загальної ємної провідності мережі і тим самим до вирівнювання (зменшення) несиметрії повної провідності фаз мережі відносно землі. При цьому параметри ОПН слід вибирати таким чином, щоб не допускати масового спрацювання ОПН у інших РС-фільтрах. Таким чином напруга спрацювання ОПН має бути досить близькою за діючим значенням до напруги зміщення нейтралі, що виникатиме між центральною точкою РС-фільтра та землею при стійкому ОЗЗ.

4. Висновки

Запропонований новий метод моніторингу технічного стану розподільних мереж з ізолюваною нейтраллю, що оснований на застосуванні розподіленої системи РС-фільтрів, які заземлюються через ОПН, телеметрії напруг фаз мережі та напруги зміщення нейтралі. Метод дозволяє виявляти в автоматичному режимі приєднання з ОЗЗ, обриви фазних проводів, автоматизувати реєстрацію відключень ліній шляхом програмного порівняння напруг у фазах на початку та в кінці лінії.

Крім того, функція програмної ідентифікації обривів фазних проводів ліній може бути дуже корисною для запобігання та вчасного виявлення крадіжок тупикових ділянок ліній зв'язку між підстанціями, що, як правило, перебувають без навантаження і є легкою здобиччю для крадів електрообладнання.

Впровадження запропонованої системи моніторингу дає ще наступні додаткові переваги:

- додаткова компенсація реактивної потужності холостого ходу трансформаторів та зменшення перетікань реактивної енергії (завдяки ємності РС-фільтру);
- запобігання коливальним процесам та ферорезонансним явищам при ввімкненні понижувального трансформатора живлячої підстанції на недовантажену мережу, (завдяки підключенню РС-фільтру в мережі присутня мінімальна ємність для гарантованого забезпечення нерівності $\omega L \neq 1/\omega C_0$ та уникнення резонансних явищ на частоті 50 Гц);
- адаптованість при реалізації концепції цифрової підстанції у відповідності до ІЕС 61850 – можливість передачі релейному захисту через GOOSE та MMS-протокол цифрових сигналів на селективне відключення приєднання з ОЗЗ у повністю автоматичному режимі;
- можливість організації вимірювань напруги в розподільних мережах з ізолюваною нейтраллю без застосування трансформаторів напруги з прийнятною для цілей релейного захисту та технічного обліку електроенергії точністю.

Список використаних джерел

1. Кутін, В. М. Проблеми діагностування ізоляції повітряних ліній напругою 6-10 кВ / В. М. Кутін, М. П. Свиридов, С. В. Матвієнко // Вісник ВПІ. – 2003. – № 6. – С. 238-240.
2. Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. Інструкція із застосування, монтажу та експлуатації засобів захисту від перенапруг в електроустановках напругою 6-750 кВ, [Електронний ресурс] / затверджена Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України №374 від 23.05.2014. – / Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0842-14>.
3. Шевченко, С.Ю. Експериментальні дослідження електричних характеристик ОПН / С.Ю. Шевченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 19 (1128). – С. 60-67.
4. Методичні вказівки з обліку та аналізу в енергосистемах технічного стану розподільчих мереж напругою 0,38-20 кВ з повітряними лініями електропередачі: метод. вказівки з обліку та аналізу в енергосистемах технічного стану розподільчих мереж напругою 0,38–20 кВ / СОУ–Н МПЕ 40.1.20.576:2005, (Нормативний документ Мінпалиенерго України. Настанова).– Офіц. вид. – К.: ГРІФРЕ: М–во палива та енергетики України, 2005. – 92 с.
5. Schubert, H., Wong, G. «IEC 61850 cuts out substation confusion» / H. Schubert, G. Wong // Modern Power Systems, April 2004.
6. Canadian-American EMTP Users Group / ATP-EMTP Rule Book, 1997.



7. Матвійчук В.А. Аналіз режимів роботи мікроелектромереж і методів керування ними / В.А. Матвійчук, О.О. Рубаненко, В.В. Явдик // Всеукраїнський науково-технічний журнал. Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2017. – 1(96). – С.56-59

References

- [1] Kutin, V., Svyrydov, M., Matviyenko, S. (2003). *Problemy diahnostuvannya izolyatsiyi povitryanykh liniy napruhu 6-10 kV* [Problems of diagnostics of isolation of air lines with voltage 6-10 kV]. Visnyk VPI, No 6, 238-240 [in Ukraine].
- [2] Instruktsiya iz zastosuvannya, montazhu ta ekspluatatsiyi zasobiv zakhystu vid perenapruh v elektroustanovkakh napruhu 6-750 kV [By order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. Instruction on the use, installation and operation of overvoltage protection devices in electrical installations with a voltage of 6-750 kV], zatverdzhena Nakazom Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoyi promyslovosti Ukrayiny №374 from 23.05.2014: Elektronnyy resurs: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0842-14>. [in Ukraine].
- [3] Shevchenko, S. (2015). *Eksperymentalni doslidzhennya elektrychnykh kharakterystyk OPN* [Experimental studies of electric characteristics of arresters]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyy politekhnichnyy instytut». Kharkiv: NTU «KHPI», № 19 (1128), 60-67. [in Ukraine].
- [4] *Metodychni vkazivky z obliku ta analizu v enerhosystemakh tekhnichnoho stanu rozpodilchykh merezh napruhu 0,38-20 kV z povitryanymy liniyamy elektroperedachi* [Methodological guidelines for the accounting and analysis in the power systems of the technical state of distribution networks with voltage 0,38-20 kV with air lines of power transmission]: SOU–N MPE 40.1.20.576:2005. Ofits. vyd. K.: HRIFRE: M–vo palyva ta enerhetyky Ukrayiny, (Normatyvnyy dokument Minpalyenerho Ukrayiny. Nastanova) [in Ukraine].
- [5] Schubert, H., Wong, G. (2004). «IEC 61850 cuts out substation confusion» Modern Power Systems [in Canada].
- [6] Canadian-American EMTP Users Group. (1997). ATP-EMTP Rule Book [in Canada].
- [7] Matviichuk, V.A., Rubanenko, O.O., Yavdyk V.V. (2017). *Analiz rezhymiv roboty mikroelektromerezh i metodiv keruvannya nymy* [Analysis of operating modes of microelectric networks and their management methods] *Vseukrainskyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal. Tekhnika, enerhetyka, transport APK.- All-Ukrainian Scientific and Technical Journal. Engineering, power engineering, transport of agroindustrial complexes*, 56-59 [in Ukraine].

МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ НА БАЗЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ RC- ФИЛЬТРОВ С ОПН И ТЕЛЕМЕТРИЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ

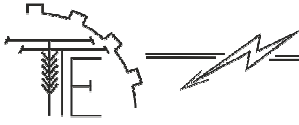
Проанализированы особенности эксплуатации, основные причины аварий и оснащение средствами мониторинга технического состояния в распределительных сетях 6–10 кВ сельскохозяйственных регионов. Предложен метод мониторинга технического состояния электрических сетей с изолированной нейтралью на базе системы автоматической обработки данных датчиков напряжения (телеметрии напряжений), установленных в распределенной системе RC-фильтров вместе с ОПН. Рассмотрены дополнительные преимущества и возможности, которые дает применение предложенного метода, а также адаптация системы мониторинга к условиям современной инфраструктуры информационного обмена цифровой подстанции согласно IEC 61850-9-2

Ключевые слова: мониторинг, телеметрия напряжений, изолированная нейтраль, распределенная система RC-фильтров, ОПН, цифровая подстанция, IEC 61850.

Рис. 1. Лит. 6.

TECHNICAL STATE MONITORING OF GRIDS WITH ISOLATED NEUTRAL ON THE BASIS OF THE RC-FILTER DISTRIBUTED SYSTEM WITH SURGE ARRESTER AND TELEMETRY OF VOLTAGE

The features of operation, the main causes of accidents and equipping with technical monitoring equipment in distribution networks of 6–10 kV agricultural regions are analyzed. A method is proposed for monitoring the technical state of electrical networks with isolated neutral on the basis of an automatic



data processing system for voltage sensors (voltage telemetry) installed in a distributed system of RC-filters together with surge arresters. Considered are the additional advantages and opportunities that apply the proposed method, as well as the adaptation of the monitoring system to the conditions of the modern information exchange infrastructure of a digital substation in accordance with IEC 61850–9–2

Keywords: *monitoring, voltage telemetry, isolated neutral, distributed system of RC-filters, surge arresters, digital substation, IEC 61850.*

Fig. 1. Ref. 6.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Матвієнко Сергій Валерійович – кандидат технічних наук, ПАТ «Вінницяобленерго» (вулиця Магістратська, 2, Вінниця, Вінницька область, 21000, e-mail: matviienko serhii@vsau.vin.ua).

Янович Віталій Петрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Процесів та обладнання переробних і харчових виробництв імені професора П.С. Берника» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: yanovichvitaliy@i.ua).

Рубаненко Олена Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електротехнічних систем, технологій та автоматизації в АПК» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: lena_rubanenko@bk.ru).

Явдик Віта Вікторівна – асистент кафедри «Електротехнічних систем, технологій та автоматизації в АПК» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: yavdyk@vsau.vin.ua).

Матвиенко Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, ПАО «Винницаоблэнерго» (ул. Магистратская, 2, Винница, Винницкая область, 21000, e-mail: matviienko serhii@vsau.vin.ua).

Янович Виталий Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессов и оборудования перерабатывающих и пищевых производств имени профессора П.С. Берника» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: yanovichvitaliy@i.ua).

Рубаненко Елена Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехнические системы, технологий и автоматизации в АПК» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: lena_rubanenko@bk.ru).

Явдик Вита Викторовна – аспирант кафедры «Электротехнические системы, технологий и автоматизации в АПК» Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: kolisnyk_mykola@vsau.vin.ua).

Matvienko Sergey – PhD, PJSC "Vinnitsaoblenergo" (Street Magistratskaya, 2, Vinnitsa, Vinnytsia region, 21000, e-mail: matviienko serhii@vsau.vin.ua).

Yanovich Vitalii – PhD, Associate Professor of the Department of Processes and Equipment for Processing and Food Productions named after Prof. P.S. Bernik "of the Vinnytsia National Agrarian University (3 Solnechnaya St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, e-mail: yanovichvitaliy@i.ua).

Rubanenko Elena – PhD, Associate Professor, Department of Electrotechnical Systems, Technologies and Automation in the Agroindustrial Complex of Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya str., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: lena_rubanenko@bk.ru).

Yavdik Vita Viktorovna – postgraduate student of the Department of Electrotechnical Systems, Technologies and Automation in the Agroindustrial Complex of the Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechnaya St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, e-mail: kolisnyk_mykola@vsau.vin.ua).