

М.Й. Бурбело¹

Ю.В. Лобода¹

Р. О. Слободян¹

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЬ ВСТАНОВЛЕННЯ РЕКЛОУЗЕРІВ В РОЗГАЛУЖЕНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

¹Вінницький національний технічний університет

Повітряні лінії 10 кВ виконані, як правило, за радіальною схемою з алюмінієвими неізолюваними проводами на залізобетонних опорах з середньою протяжністю 10-15 км і в деяких випадках можуть досягати 40 км. В даних мережах практично не використовуються пристрої автоматичного секціонування та резервування, що зумовлює відключення всіх споживачів, які живляться від даних ПЛ, при виникненні аварійних ситуацій. Для прикладу, ПЛ-10 Ф-5 Хмельницького РЕМ протяжністю 23 км, розрахункове значення SAIDI становить 714 хв, а відповідно до постанови НКРЕКП №1175 значення показника SAIDI для сільських мереж не повинно перевищувати 300 хв.

Для підвищення надійності електропостачання використовують реклоузери. Використання реклоузерів дає змогу зменшити кількість знеструмлених споживачів при коротких замиканнях шляхом автоматичного секціонування повітряної лінії електропередачі та можливості резервування її з іншої підстанції на період ремонтних робіт пошкоджених ділянок ПЛ. Деякі оператори системи розподілу йдуть шляхом заміни лінійних роз'єднувачів, які комутують оперативно-виїзні бригади, але даний підхід не завжди відповідає оптимальному розміщенню реклоузерів для забезпечення максимального ефекту покращення показників надійності, зокрема, за використання індикаторів коротких замикань.

Запропоновано метод визначення оптимального місця розташування реклоузерів в розподільних електричних мережах з урахуванням встановлення індикаторів коротких замикань, що забезпечить найбільший ефект покращення показників надійності електропостачання. Даний метод базується на використанні матриці шляхів, що дає змогу автоматизувати розрахунок показника SAIDI в залежності від місця встановлення реклоузера і кількості індикаторів коротких замикань.

Ключові слова: електричні мережі, надійність, автоматичне секціонування, реклоузер.

Вступ

Найбільш ефективним способом підвищення надійності електропостачання в повітряних електричних мережах середньої напруги є секціонування лінії комутаційними апаратами типу реклоузер. Реклоузер виконує:

- оперативні перемикання у розподільчій мережі;
- автоматичне вимкнення пошкодженої ділянки;
- у разі необхідності може бути обладнаний автоматичним повторним увімкненням (АПВ);
- автоматичне відновлення живлення на неушкоджених ділянках мережі (АВР).

Результати дослідження

На повітряних лініях електропередачі без встановлених реклоузерів кожне пошкодження ПЛ буде призводити до знеструмлення всіх споживачів які живляться від даної ПЛ. У такому випадку показники SAIDI та ENS можна визначити за такими формулами [3]:

$$SAIDI = \omega_{0л} t_{в,л} L + \omega_T t_{в,Т}; \quad (1)$$

$$ENS = \omega_{0л} t_{в,л} L \cdot P_c + \omega_T t_{в,Т} N_T \cdot P_{сТ}, \quad (2)$$

де $\omega_{0л}$ – питома частота пошкоджень ПЛ 10 кВ (1/на 1 км в рік); $t_{в,л}$ – середній час відновлення

одного стійкого пошкодження лінії (год.); L – загальна довжина ділянки лінії (км); ω_T – частота пошкоджень трансформаторів напругою 10 кВ; $t_{в.т}$ – середній час відновлення живлення споживачів після пошкодження трансформатора; P_c – середня річна активна потужність навантаження лінії; P_{cT} – середньорічна активна потужність навантаження одного трансформатора.

Вираз (1) умовно можна розділити на два доданки. Перший доданок залежить від довжини лінії електропередачі, за умови однакової частоти пошкодження та часу відновлення стійких пошкоджень. Другий доданок залежить від частоти пошкодження та часу відновлення трансформаторів, але у випадку модернізації ПЛ шляхом встановлення реклоузерів є постійним та не залежить від місць та кількості їх встановлення. Тому оптимальні місця встановлення даних комутаційних апаратів може визначатися на основі аналізу конфігурації лінії електропередачі.

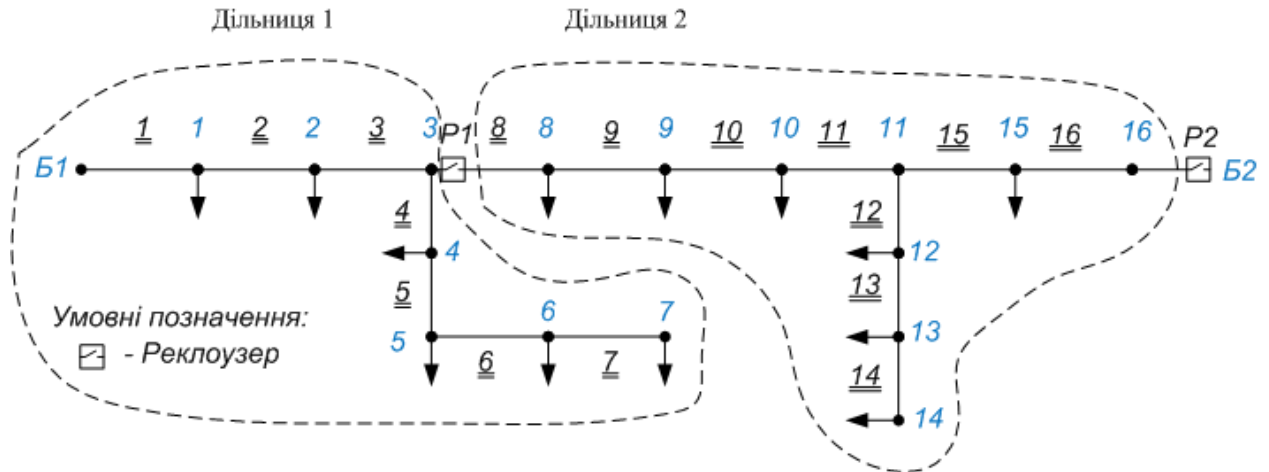


Рис. 1. Пояснювальна схема розрахунку показників надійності при встановленні реклоузерів

Розглянемо варіант схеми без встановлення реклоузерів рис. 1. У такій схемі у разі пошкодження на будь-якій ділянці відбувається відключення захисного апарату на початку фідера і всі споживачі лінії втрачають живлення. Для локалізації пошкодження на фідер виїжджає оперативно-виїзна бригада, і шляхом послідовних переїздів та перемикачів роз'єднувачів вручну виділяється пошкоджену ділянку мережі та локалізують її.

Розглянемо варіант встановлення одного реклоузера P1 у якості секціонування ПЛЕП 10 кВ (рис. 1). В даному випадку пошкодження на ділянці 1 призведе до знеструмлення всіх споживачів, а пошкодження на ділянці 2 – до знеструмлення споживачів які від неї живляться. Показники надійності можна розрахувати за формулами:

$$SAIDI = \omega_{0л} L_1 t_{в.л} + \omega_{0л} L_2 t_{в.л} N_2/N + \omega_T t_{в.т}; \quad (3)$$

$$ENS = \omega_{0л} L_1 t_{в.л} \cdot P_c + \omega_{0л} L_2 t_{в.л} \cdot P_{c2} + \omega_T t_{в.т} N_T \cdot P_{cT}, \quad (4)$$

де N – загальна кількість споживачів фідера; N_1, N_2 – кількість споживачів ділянок; L_1, L_2 – довжина відповідних ділянок (км); P_{c1}, P_{c2} – середня річна активна потужність навантаження ділянок.

Структура формул (3), (4) пояснюється тим, що пошкодження на першій ділянці призводить до вимкнення всіх споживачів, а пошкодження на другій ділянці – до вимкнення споживачів другої ділянки.

Ще одним із варіантів є встановлення одного реклоузера P1, у якості секціонування ПЛЕП, та одного реклоузера P2, у якості автоматичного введення резерву від сусідньої ПЛ (рис. 1). У даному випадку пошкодження на окремій ділянці призведе до знеструмлення споживачів які вона живить. Тоді вирази для розрахунку показників надійності набувають вигляду:

$$SAIDI = \omega_{0л} L_1 t_{в.л} N_1/N + \omega_{0л} L_2 t_{в.л} N_2/N + \omega_T t_{в.т}; \quad (5)$$

$$ENS = \omega_{0л} L_1 t_{в.л} \cdot P_{c1} + \omega_{0л} L_2 t_{в.л} \cdot P_{c2} + \omega_T t_{в.т} N_T \cdot P_{cT}. \quad (6)$$

Оскільки деякі оператори системи розподілу використовують прикладне програмне забезпечення для розрахунку втрат електроенергії яке базується на використанні вузлового рівняння в матричній формі тому в них наявні закодовані матриці з'єднань ПЛЕП, які описують конфігурацію мереж. Ці дані можна використати для знаходження матриці шляхів і в використати її для

знаходження кількості споживачів та довжини ліній електропередач які відносяться до відповідних ділянок [12].

За допомогою матриці шляхів визначаються вектори

$$\mathbf{L}_p = \mathbf{C} \cdot \mathbf{L}; \mathbf{N}_p = \mathbf{C} \cdot \mathbf{N}; \mathbf{P}_p = \mathbf{C} \cdot \mathbf{P}, \quad (7)$$

які характеризують кумулятивні (від споживачів) довжини, кількість споживачів та потужності. Їх можна використати для знаходження довжин, кількості споживачів та середньої потужності відповідних ділянок. Для прикладу перший елемент L_{p1} вектору \mathbf{L}_p відповідає загальній довжині фідера, а $L_{p4} = L_4 + L_5 + L_6 + L_7$ (рис. 1). Довжину першої ділянки можна визначити з виразу $L_1 = (L_{p1} - L_{p8})$, другої – $L_2 = L_{p8}$. Вирази (3), (4) в залежності від визначених довжин ПЛ, які входять до певної ділянки набувають вигляду:

$$SAIDI = \omega_{0л} \cdot (L_{p1} - L_{p8}) \cdot t_{в.л} + \omega_{0л} \cdot L_{p8} \cdot t_{в.л} (N_{p8}) / N_{p1} + \omega_{т} \cdot t_{в.т}; \quad (8)$$

$$ENS = \omega_{0л} \cdot (L_{p1} - L_{p8}) \cdot t_{в.л} \cdot P_{p1} + \omega_{0л} \cdot (L_{p8}) \cdot t_{в.л} \cdot P_{p8} + \omega_{т} \cdot t_{в.т} \cdot N_{т} \cdot P_{ст}, \quad (9)$$

а вирази (5) та (6):

$$SAIDI = \omega_{0л} \cdot (L_{p1} - L_{p8}) \cdot t_{в.л} \cdot (N_{p1} - N_{p8}) / N_{p1} + \omega_{0л} \cdot L_{p8} \cdot t_{в.л} \cdot (N_{p8}) / N_{p1} + \omega_{т} \cdot t_{в.т}; \quad (10)$$

$$ENS = \omega_{0л} \cdot (L_{p1} - L_{p8}) \cdot t_{в.л} \cdot P_{p1} + \omega_{0л} \cdot (L_{p8}) \cdot t_{в.л} \cdot P_{p8} + \omega_{т} \cdot t_{в.т} \cdot N_{т} \cdot P_{ст}. \quad (11)$$

У випадку встановлення тільки реклоузера для секціонування (без АВР) у вітці k , достатньо побудувати функцію показників від номеру вітки:

$$SAIDI_k = \omega_{0л} \cdot (L_{p1} - L_{pk}) \cdot t_{в.л} N_{p1} / N_{p1} + \omega_{0л} \cdot L_{pk} \cdot t_{в.л} (N_{pk}) / N_{p1} + \omega_{т} \cdot t_{в.т}; \quad (12)$$

$$ENS_k = \omega_{0л} \cdot (L_{p1} - L_{pk}) \cdot t_{в.л} \cdot P_{p1} + \omega_{0л} \cdot (L_{pk}) \cdot t_{в.л} \cdot P_{pk} + \omega_{т} \cdot t_{в.т} \cdot N_{т} \cdot P_{ст}, \quad (13)$$

де k – номер вітки, в якій встановлюється реклоузер для секціонування лінії.

У випадку встановленні реклоузера P1 для секціонування, та реклоузера P2 для АВР від суміжної пінії, необхідно розглядати два випадки. У першому випадку P1 припадає на відгалуження (вітки 4, 5, 6, 7, 12, 13, 14) і тоді можна використати вирази (12) та (13). У другому випадку P1 припадає на головну магістраль (вітки 1, 2, 3, 8, 9, 10, 11, 15, 16) і тоді вирази для визначення показників надійності набувають вигляду:

$$SAIDI_k = \omega_{0л} \cdot (L_{p1} - L_{pk}) \cdot t_{в.л} (N_{p1} - N_{pk}) / N_{p1} + \omega_{0л} \cdot L_{pk} \cdot t_{в.л} (N_{pk}) / N_{p1} + \omega_{т} \cdot t_{в.т}; \quad (14)$$

$$ENS_k = \omega_{0л} \cdot (L_{p1} - L_{pk}) \cdot t_{в.л} \cdot (P_{p1} - P_{pk}) + \omega_{0л} \cdot (L_{pk}) \cdot t_{в.л} \cdot P_{pk} + \omega_{т} \cdot t_{в.т} \cdot N_{т} \cdot P_{ст}. \quad (15)$$

Для визначення головної магістралі можна застосувати формулу:

$$\mathbf{G} = \mathbf{C} \cdot \delta_m,$$

де δ_m – стовпцева нульова матриця із одиничним коефіцієнтом у вузлі встановлення реклоузера для АВР (вузол 16).

Для визначення приналежності реклоузера до магістралі достатньо провести перевірку. Якщо $G_k = 1$ використовуємо вирази (14), (15) в іншому випадку ($G_k = 0$) – вирази (12), (13).

Тоді алгоритм набуває вигляду рис. 2.

Результати дослідження

Даний алгоритм було застосовано для вибору оптимального місця розташування реклоузера на ПЛ-10 кВ Ф-5 Хмельницького РЕМ, загальною протяжністю 23 км (рис. 3). В таблиці 1 приведені кількість споживачів та середньорічне навантаження. Конфігурація мережі та довжини ліній приведені на рисунку 4. Частоту відмов ПЛ 10 кВ прийнято рівною: $\omega = 0,11$ 1/(рік на 1 км), а середню тривалість відновлення ПЛ : 269 хв [12]. При даних умовах початкове значення показника SAIDI становить 714 хв, а ENS=1463 кВт*год.

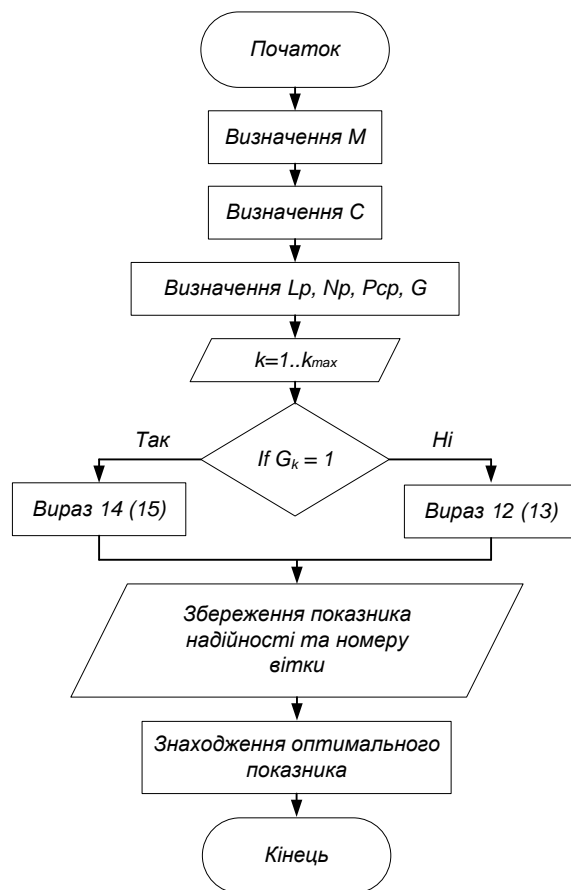


Рис. 2. Алгоритм визначення місць встановлення реклоузера

Таблиця 1. Вихідні дані ПЛ-10 кВ Ф-5 Хмельницького РЕМ

Номер ТП	N, шт	Pc, кВт	Номер ТП	N, шт	Pc, кВт
КТП-453	1	2,20	КТП-832	4	1,83
КТП-878	1	0,11	КТП-358	10	6,04
КТП-794	4	0,00	КТП-282	62	10,69
КТП-504	24	4,87	КТП-38	89	16,48
КТП-34	128	17,06	КТП-478	39	4,66
КТП-35	94	19,93	КТП-883	4	8,82
КТП-289	64	15,25	КТП-479	74	12,00
КТП-312	5	0,00	КТП-37	43	6,09

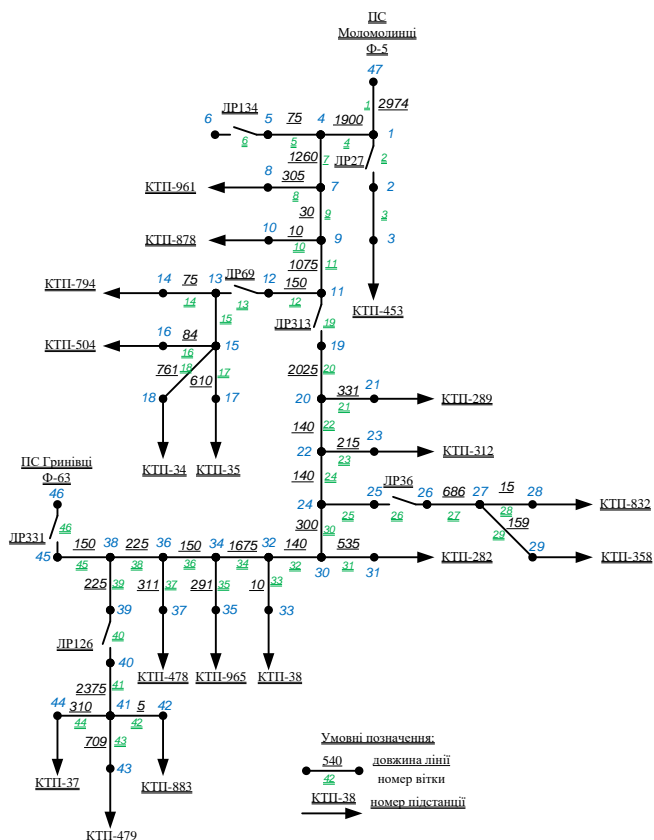


Рис. 3. Схема ПЛ-10 кВ Ф-5 Хмельницького РЕМ

Побудуємо графіки залежностей значень SAIDI та ENS від місця розташування реклоузера.

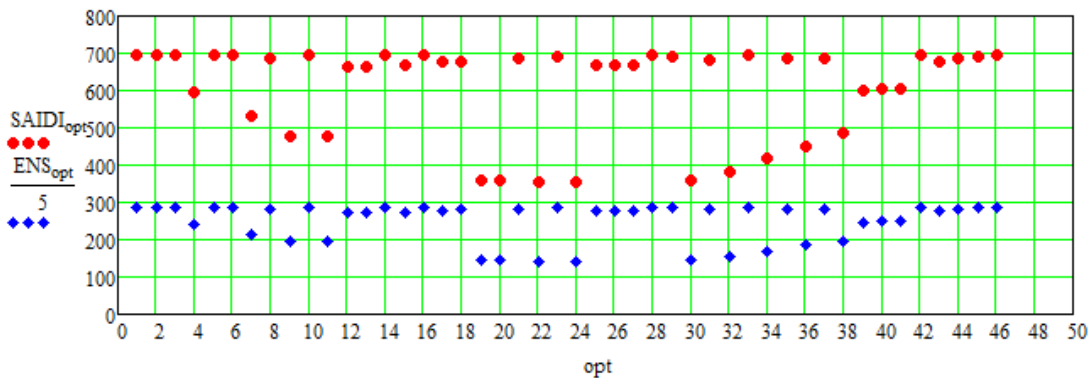


Рис. 4. Графік залежності SAIDI та ENS від вітки в якій встановлено реклоузер

Як видно з графіка оптимальними місцями встановлення є вітки 19, 20, 22, 24 та 30. Оптимальними місцями встановлення реклоузера по цільовому показнику SAIDI становить вітка 22, а по ENS – вітка 24. При встановленні реклоузера у вітці 22 значення SAIDI = 353 хв, ENS = 713 кВт·год, а при встановленні у вітці 22 SAIDI = 354.2 хв, ENS = 711 кВт·год.

Висновки

Розрахунок надійності розгалужених ПЛ досить тривалий та об'ємний процес. В даній статті запропоновано алгоритм вибору місця розташування реклоузерів якій базується на матричному методу розрахунку. В деяких операторів системи розподілу наявні закодовані конфігурації своїх мереж які вони використовують для розрахунку втрат електроенергії, даний алгоритм на основі цієї інформації дає змогу автоматизувати та значно пришвидшити процес розрахунку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. В. Зорин, В. В. Тисленко, Ф. Клеппель, Г. Адлер, *Надежность систем электроснабжения*. Киев: Вища шк. Голов. изд-во, 1984.
- [2] И. А. Будзко, М. С. Левин, *Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов*. Москва: Агропромиздат, 1985.
- [3] Р. Биллinton, Р. Аллан, *Оценка надежности электроэнергетических систем*. Москва: Энергоатомиздат, 1988.
- [4] Р. А. Буйный, А. В. Гай, А. Ю. Сорокин, В. В. Тисленко, «Новые подходы к учету надежности электроснабжения потребителей в рыночных условиях», *Техническая электродинамика*, № 5, с.85-88. 2002.
- [5] В. В. Козирський, О. В. Гай, *Методи та моделі розрахунку надійності систем електропостачання*. монографія. Київ: Гнозіс, 2013.
- [6] Тимчук С. А., Черемисин Н. М. Синтез оптимальной структуры распределительных электрических сетей при неопределенности исходной информации [Текст]: монография. – Харьков: ООО «В деле», 2016. – 270 с.
- [7] Тимчук С. А., Сиротенко М. А., Бовчалюк С.Я. Синтез оптимального размещения средств повышения эффективности электроснабжения при неопределенности исходной информации: монография. – Харьков: ФЛП Панов А.Н., 2018. – 116 с.
- [8] А. М. Абдурахманов, С. В. Глушкин, А. В. Шунтов, «О характеристиках надежности элементов воздушных электрических сетей 6–10 кВ», *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики*, №70, с. 81-89, 2019.
- [9] А.М. Абдурахманов, С.В. Глушкин, А.В. Шунтов, «О секционировании воздушных электрических сетей 6–20 кВ», *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики*, №70, с. 90-96, 2019.
- [10] В.В. Козирський, О.В. Гай, В.А. Костюк, П.В. Петров, «Розгалужена магістраль, як елемент розподільної електричної мережі», *Енергетика та електрифікація*. №10, с. 31–33, 2013.
- [11] В. В. Козырский, А. В. Гай, В. А. Костюк, В. Г. Дмитренко, П. В. Петров, «Анализ подходов к оптимизации количества и мест размещения средств автоматизации и управления в сложных разветвленных распределительных сетях», *Электрические сети и системы*, №5, с.14-19, 2014.
- [12] М. Й. Бурбело, Ю. В. Лобода, Р. О. Слободян, А. Р. Слободян, «Матричний метод визначення показників надійності розгалужених розподільних електричних мереж», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №3, с. 17-23, 2014.

REFERENCES

- [1] V. V. Zorin, V. V. Tyslenko, F. Kleppel, G. Adler, Reliability of power supply systems. Kyiv: Higher school Chairman publishing house, 1984.
- [2] I. A. Budzko, M. S. Levin, Electrical supply of agricultural enterprises and settlements. Moscow: Agropromizdat, 1985.
- [3] R. Billinton, R. Allan, Reliability assessment of electric power systems. Moscow: Energoatomizdat, 1988.
- [4] R. A. Buyny, A. V. Gai, A. Yu. Sorokin, V. V. Tyslenko, "New approaches to accounting for the reliability of electric supply to consumers in market conditions," *Technical Electrodynamics*, No. 5, pp. 85- 88. 2002.
- [5] V. V. Kozyrskiy, O. V. Gai, Methods and models for calculating the reliability of power supply systems. monograph. Kyiv: Gnosis, 2013.
- [6] Tymchuk S. A., Cheremysyn N. M. Synthesis of the optimal structure of distribution electric networks with uncertainty of the initial information [Text]: monograph. - Kharkov: LLC "V dele", 2016. - 270 p.
- [7] Tymchuk S. A., Syrotenko M. A., Bovchalyuk S. Ya. Synthesis of the optimal placement of means of increasing the efficiency of the electric supply in case of uncertainty of the initial information: monograph. - Kharkiv: FLP Panov A.N., 2018. - 116 c.
- [8] A. M. Abdurakhmanov, S. V. Glushkin, A. V. Shuntov, "On reliability characteristics of elements of air-to-air electrical networks 6–10 kV," *Methodical questions of reliability research of large energy systems*, No. 70, with. 81-89, 2019.
- [9] A.M. Abdurakhmanov, S.V. Glushkin, A.V. Shuntov, "About the sectioning of 6-20 kV air power networks," *Methodical questions of the reliability of large power systems*, No. 70, p. 90-96, 2019.
- [10] V.V. Kozyrsky, O.V. Guy, V.A. Kostyuk, P.V. Petrov, "A branched main line as an element of a distribution electric network," *Energy and Electrification*. No. 10, p. 31–33, 2013.
- [11] V. V. Kozyrsky, A. V. Gai, V. A. Kostyuk, V. G. Dmyt-renko, P. V. Petrov, "Analysis of approaches to optimization of the quantity and location of automation and control equipment in complex branched distribution networks," *Electric Networks and Systems*, No. 5, pp. 14-19, 2014.
- [12] M. Y. Burbelo, Y. V. Loboda, R. O. Slobodian, A. R. Slobodian, "Matrix method for determining the reliability indicators of branched distribution electric networks," *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, No. 3, p. 17-23, 2014.

Бурбело Михайло Йосипович – д.т.н., професор, завідувач кафедри ЕСЕЕМ, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Лобода Юрій Васильович – Ph. D., старший викладач кафедри ЕСЕЕМ, e-mail: lobodaeseem@gmail.com;

Слободян Руслан Олександрович – аспірант кафедри ЕСЕЕМ.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця; e-mail: ruslan.slobodyan@gmail.com.

M. J. Burbelo¹
Y. V. Loboda¹
R. O. Slobodian¹

Algorithm for determining the places of installation of reclosers in branched distribution electric networks

¹Vinnitsia National Technical University;

²State Inspectorate of Energy Supervision

Air line 10 kV overhead lines are made, as a rule, according to a radial scheme with aluminum non-insulated wires on reinforced concrete supports with an average length of 15 km and in some cases can reach 40 km (data according to Khmelnytskyi REM). In these networks, devices of automatic sectioning and redundancy are practically not used, which leads to the disconnection of all consumers that are powered by these PLs in the event of emergency situations. For example, Air line 10 kV F-5 of the Khmelnytsky REM with a length of 23 km, the estimated value of SAIDI is 714 minutes, and according to the resolution of the according to the Resolution of the National Commission for Regulation of Public Utilities №1175, the value of the SAIDI indicator for rural networks should not exceed 300 minutes.

Reclosers are used to increase the reliability of the power supply. The use of reclosers makes it possible to reduce the number of de-energized consumers in the event of short circuits by sectioning the overhead power line and the possibility of reserving it from another substation for the period of repair work on damaged sections of the substation. Some distribution system operators follow the path of replacing line disconnectors that switch on-site teams, but this approach does not always correspond to the optimal placement of reclosers to ensure the maximum effect of improving reliability indicators, in particular, when using short-circuit indicators.

A method of determining the optimal location of reclosers in distribution electrical networks, taking into account the installation of short-circuit indicators, is proposed, which will provide the greatest effect of improving the reliability of power supply. This method is based on the use of a matrix of paths, which makes it possible to automate the calculation of the SAIDI indicator depending on the location of the recloser and the number of short-circuit indicators.

Key words: electrical networks, reliability, sectioning reclosers.

Burbelo Michailo Josephovich - Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Loboda Yuriy Vasylovych – Ph. D., senior lecturer of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: lobodaeseem@gmail.com;

Slobodian Ruslan Oleksandrovych – Post-Graduate Student of Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: ruslan.slobodyan@gmail.com.