

ВПЛИВ ОПОРУ РЕЗИСТОРА ЗАЗЕМЛЕННЯ НЕЙТРАЛІ НА РЕЖИМИ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНИХ НАПРУГОЮ 20 КВ

У статті розглянуто вплив різних режимів заземлення нейтралі на експлуатаційні параметри розподільних мереж напругою 20 кВ, зокрема вибір оптимального опору резистора для резистивного заземлення нейтралі. Одним із основних завдань є підвищення ефективності роботи розподільних мереж ОЕС України шляхом переходу з напруги 10 кВ на 20 кВ. Це рішення спрямоване на зниження втрат потужності, збільшення обсягу переданої енергії та поліпшення роботи релейного захисту. У контексті такого переходу особливо актуальним є вибір способу заземлення нейтралі трансформатора живлення, що істотно впливає на надійність і безпеку експлуатації електричних мереж.

В дослідженні виконано аналіз впливу резистивного заземлення нейтралі трансформатора на режимні ха-рактеристики мережі напругою 20 кВ, а також визначення оптимального значення опору резистора. Наведено результати порівняння енерговузла мережі з ізольованою нейтраллю та резистивним заземленням. Проаналізовано основні експлуатаційні параметри, такі як струми короткого замикання, перенапруги на неушкоджених фазах, втрати потужності та роботу релейного захисту, що мають значний вплив на стабільність і безпеку функціонування мережі.

Створено імітаційну розрахункову модель енерговузла мережі на базі двотрансформаторної підстанції 110/20 кВ, що включає дві секції з відхідними лініями різної довжини та навантаження. Моделювання виконано за допомогою програмного комплексу PowerFactory, який забезпечує можливість точного відтворення реальних умов функціонування електричних систем. Особлива увага приділялася вибору опору резистора для заземлення нейтралі та його впливу на параметри мережі. У дослідженні були розглянуті чотири варіанти функціонування нейтралі: ізольована нейтраль та резистивне заземлення з опором 10 Ом, 15 Ом і 20 Ом.

Установлено, що для забезпечення стабільної та безпечної роботи розподільної мережі важливим є правильний вибір методу заземлення нейтралі. Оптимальним варіантом з переліку прийнятих значень опору є резистивне заземлення з опором 15 Ом, яке дозволяє знизити втрати потужності, забезпечує достатній рівень струмів для ефективної роботи релейного захисту та мінімізує ризики перенапруг на неушкоджених фазах. Це дослідження є важливим для підвищення надійності функціонування розподільних мереж та безпеки електропо-стачання, особливо у контексті модернізації мереж ОЕС України.

Ключові слова: напруга 20 кВ, резистивне заземлення, ізольована нейтраль, коротке замикання, перенапруги, втрати потужності, розподільні мережі.

Вступ

З метою підвищення ефективності функціонування розподільних мереж ОЕС України важливим та доцільним як зі сторони зменшення втрат потужності, збільшення потужності, що передається, так і з сторони функціонування релейного захисту є перехід з напруги 10 кВ на 20 кВ. У цьому процесі постає актуальне питання вибору способу заземлення нейтралі трансформатора, що живить мережу з напругою 20 кВ.

Спосіб заземлення нейтралі трансформатора живлення в розподільних мережах є надзвичайно важливою характеристикою. Він впливає на такі аспекти, як струм у місці пошкодження, перенапругу на неушкоджених фазах під час однофазного замикання, схему побудови релейного захисту від замикань на землю, рівень ізоляції електроустаткування, вибір апаратів для захисту від грозових і комутаційних перенапруг (обмежувачів перенапруги), безперебійність електропостачання, допустимий опір контуру заземлення підстанції, а також рівень безпеки персоналу та обладнання під час однофазних замикань. Спосіб заземлення нейтралі може суттєво впливати на наведені характеристики, що ставить актуальним питання оптимального його вибору з урахуванням специфіки мережі [1-6].

Мета роботи – аналіз впливу резистивного способу заземлення нейтралі трансформатора живлення на режимні параметри, а також вибору значення опору резистора в розподільних мережах 20кВ.

Порівняння режимів роботи мережі з ізольованою та резистивно заземленою нейтраллю широко висвітлюється в наукових публікаціях [7], [8], оскільки ці два методи заземлення суттєво впливають на режимні характери-стики електричних мереж і, відповідно, мають свої переваги та недоліки. Вибір між цими режимами залежить від специфічних вимог до безпеки, стабільності, економічної доцільності та

експлуатаційних характеристик мережі. У таблиці узагальнено порівняння впливу ізольованої та резистивно заземленої нейтралі характеристики мережі [9].

Аналіз наведених особливостей функціонування мереж в режимі ізольованої та резистивно заземленої нейтралі дав змогу оцінити їхні впливи на роботу електричних мереж і обрати найбільш відповідний метод функціонування нейтралі для конкретних умов

Таблиця 1 – Порівняння характеристик ізольованої та резистивно заземленої нейтралі

Характеристика	Ізольована нейтраль	Резистивно заземлена нейтраль
1. Рівень струму замикання на землю	Струм КЗ на землю є дуже низьким, оскільки мережа не має прямого шляху до землі. Це дозволяє продовжувати функціонування мережі навіть у разі однофазного замикання, що підвищує безперервність електропостачання	Струм КЗ обмежується за допомогою резистора. Це зменшує можливі пошкодження обладнання, але струм достатньо високий для того, щоб викликати спрацювання захисту і виконати відключення при замиканні
2. Перенапруги на неушкоджених фазах	Через незначний ємнісний струм замикання можуть виникати значні перенапруги на неушкоджених фазах, що може призвести до пошкодження ізоляції і викликати вторинні замикання	Обмежений на певному рівні струм КЗ забезпечує зменшення рівня перенапруги на неушкоджених фазах, що знижує ризик додаткових пошкоджень
3. Безпека та надійність	Однофазні КЗ не потребують негайного відключення, що підвищує надійність мережі. Однак, виявлення місця замикання ускладнюється, а високі перенапруги створюють ризики для безпеки	Підвищується безпека та захист персоналу. Знижується ризик ураження електричним струмом під час замикань. Спрощується виявлення місця КЗ, що покращує надійність мережі
4. Складність та витрати на впровадження	Простий у впровадженні метод, не потребує додаткових пристроїв для заземлення, що може знизити початкові витрати	Необхідність встановлення додаткових резисторів і пристроїв контролю, що збільшує початкову вартість та викликає необхідність додаткового обслуговування резисторів

Ізольована нейтраль надає перевагу у вигляді підвищеної безперервності, але за рахунок безпеки та ризику значної перенапруги. Резистивне заземлення, навпаки, забезпечує кращий захист від пошкоджень і безпеку, але вимагає відключення мережі при однофазних коротких замиканнях, також постає питання вибору оптимального значення опору резистора.

У рамках даного дослідження була створена математична імітаційна модель енерговузла розподільної мережі 20 кВ (рис.1) для аналізу впливу різних способів заземлення нейтралі на експлуатаційні режимні параметри мережі, зокрема на струми замикань, перенапруги та втрати потужності.

Моделювання було виконано в програмному комплексі PowerFactory, який широко застосовується для дослідження електричних систем завдяки його можливостям точної імітації поведінки електромереж в реальних умовах. Вибір PowerFactory як платформи для моделювання обумовлений її здатністю враховувати такі аспекти, як параметри ліній, навантаження, режими роботи та характеристики релейного захисту, що дозволяє провести глибокий аналіз впливу різних способів заземлення на мережу.

Модель відображає роботу двотрансформаторної підстанції 110/20 кВ із двома секціями напруги 20 кВ: перша секція містить три відхідні лінії (фідери) 20 кВ; друга секція – п'ять відхідних ліній 20 кВ. Лінії мають як повітряні, так і кабельні ділянки різної довжини і навантаженості (рис.2).

У моделі PowerFactory були використані реальні параметри ліній, навантаження та конфігурації підстанції для точного відтворення умов роботи мережі (рис.3). Особливий акцент було зроблено на зміні значення опору заземлення нейтралі вторинних обмоток трансформаторів живлення для оцінки впливу на струми замикання, перенапруги та втрати потужності (рис.4).

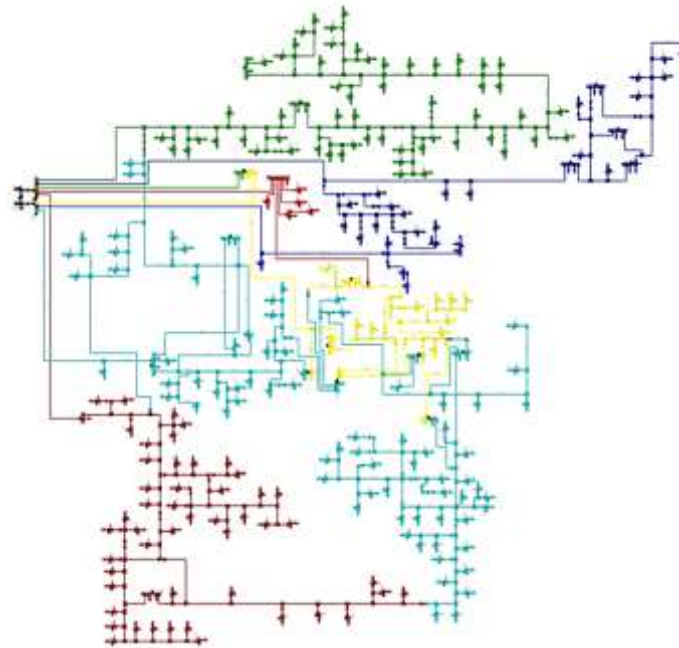


Рисунок 1 – Розрахункова імітаційна модель вісьмифідерної розподільної мережі 20 кВ в програмному середовищі Power Factory

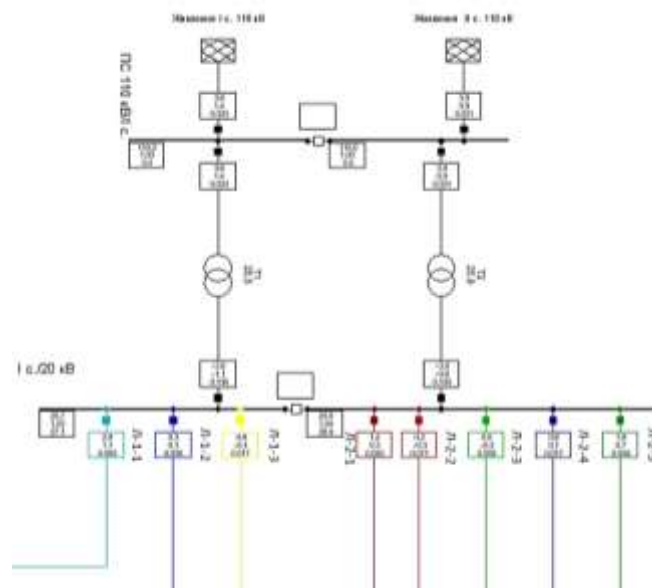


Рисунок 2 – Модель розрахункової схеми підстанції ПС 110/20 кВ

При проведенні дослідження в програмному комплексі PowerFactory одним з ключових етапів моделювання було визначення впливу кожного з методів заземлення на параметри мережі під час коротких замикань. Для цього на однакових місцях у моделі мережі були задані точки короткого замикання для кожного режиму функціонування нейтралі та, зокрема, різних значень опору заземлення нейтралі. Це дозволило провести порівняльний аналіз параметрів мережі, таких як струми замикання, перенапруги та робота релейного захисту, в однакових умовах.

Вплив способу заземлення нейтралі на результати моделювання розподільної мережі 20 кВ досліджений на однаковій точці короткого замикання у кількох аспектах, зокрема: падіння напруги, втрати потужності, рівень струмів короткого замикання, перенапруги на неушкоджених фазах та робота релейного захисту. Детальний аналіз кожного способу заземлення в контексті цих параметрів дозволив зробити висновки щодо їхнього впливу на роботу розподільної електромережі. Аналіз проводився для точки на ділянці Л-30 Зазим'я (ТП-669 – ТП-933), що дозволило здійснити порівняння впливу кожного типу заземлення.

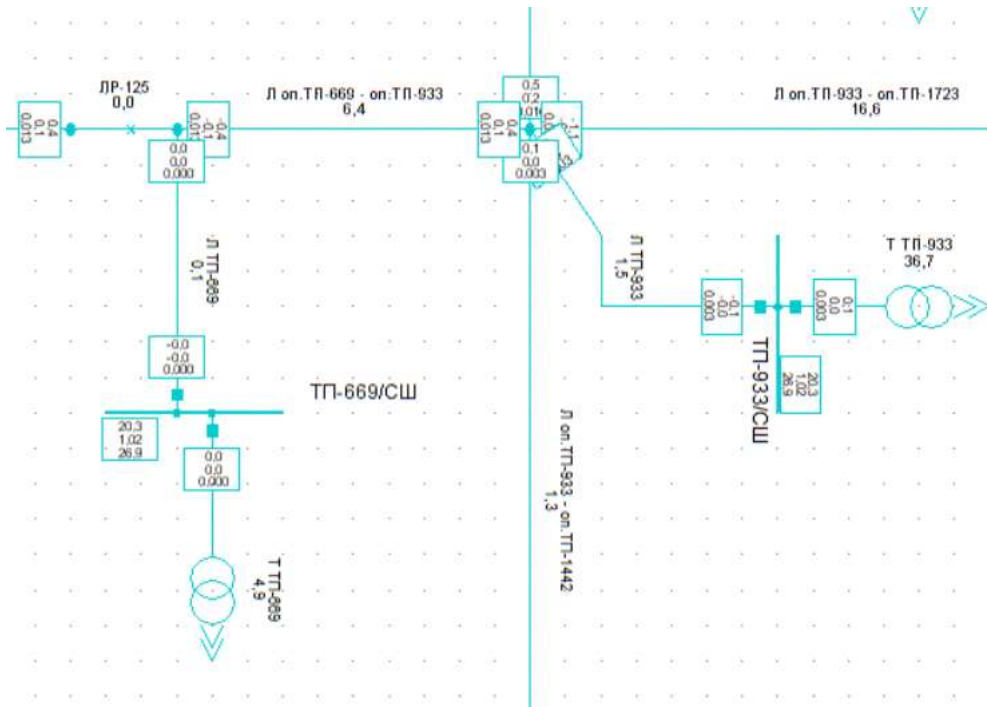


Рисунок 3 – Фрагмент розрахункової мережі

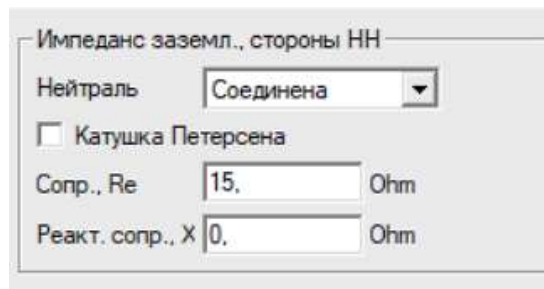


Рисунок 4 – Блок зміни режиму функціонування нейтралі трансформатора та опоры резистора заземлення нейтралі

Результати дослідження:

1. Ізольована нейтраль

Амплітудне значення струму короткого замикання фази на землю за 0,01с досягає 1400 А. Це найбільше значення серед усіх варіантів, що ускладнює роботу релейного захисту та підвищує ризик значних пошкоджень у разі аварії. Усталене значення замикання струму замикання не перевищує 7,4 А.

Втрати потужності: $\Delta S = 39$ МВА. Високий рівень втрат свідчить про значне навантаження на мережу.

Ізольована нейтраль має спонукає до виникнення перенапруг на неушкоджених фазах при однофазному замиканні. Це створює загрозу пробією ізоляції та додаткових аварій. Через це, варіант із ізольованою нейтраллю менш безпечний і потребує обережного підходу, особливо в мережах з високими вимогами до надійності.

2. Резистивне заземлення з опором 10 Ом.

Усталене значення замикання струму однофазного замикання на землю не перевищує 333 А. Підвищення струму короткого замикання в порівнянні з ізольованою нейтраллю полегшує налаштування і роботу релейного захисту.

Втрати потужності складають: $\Delta S = 3,8$ МВА. Збільшені втрати потужності у порівнянні з іншими варіантами де використовується резистивне заземлення, через вищий струм замикання можуть викликати перегрів і підвищене навантаження на обладнання.

Резистор із опором 10 Ом забезпечує значне зменшення перенапруг на неушкоджених фазах, що підвищує безпеку мережі. Однак збільшення втрат потужності може стати недоліком, особливо в енергоощадних мережах.

3. Резистивне заземлення з опором 15 Ом.

Усталене значення замикання струму однофазного замикання на землю не перевищує 317 А. При збільшенні опору до 15 Ом, струм короткого замикання зменшується порівняно з 10 Ом, що знижує ризик пошкодження обладнання.

Втрати потужності складають: $\Delta S = 3,7$ МВА. Втрати потужності при цьому варіанті заземлення залишаються на помірному рівні, оскільки струми замикання все ще достатньо високі, але менші, ніж при опорі 10 Ом. Зниження втрат потужності робить цей варіант більш оптимальним для мереж із великим навантаженням, де важлива ефективність.

Переваги та недоліки: Оптимальний баланс між втратами, рівнем струму та стабільністю роботи мережі. Такий варіант підходить для мереж, що потребують надійного захисту та високої енергоефективності.

4. Резистивне заземлення з опором 20 Ом.

Усталене значення замикання струму однофазного замикання на землю не перевищує 298 А. Це найнижчий рівень струму короткого замикання серед розглянутих варіантів, що мінімізує ризик перегріву та пошкодження обладнання. Однак зниження рівня струму замикання може викликати ускладнення для налаштування релейного захисту, оскільки вимагає більш високої чутливості для виявлення замикань.

Втрати потужності складають: $\Delta S = 3,4$ МВА. Невеликі втрати потужності вказують на високу енергоефективність.

Найбільш енергоощадний варіант заземлення, що забезпечує стабільність мережі та знижує перенапруги. Проте, через низький струм короткого замикання, можливі ускладнення у точності виявлення аварійних точок, що потребує налаштування чутливішого релейного захисту.

Висновок

Вибір режиму роботи нейтралі та значення опору за резистивного заземлення нейтралі суттєво впливає на основні експлуатаційні параметри мережі під час коротких замикань. Режим ізольованої нейтралі демонструє найвище амплітудне значення струму короткого замикання фази на землю, що ускладнює роботу релейного захисту та підвищує ризик пошкодження обладнання. Виникають перенапруги на неушкоджених фазах під час однофазних замикань створює додаткові ризики для стабільності мережі та безпеки обладнання.

Резистивне заземлення забезпечує кращий баланс між струмом короткого замикання та захистом від пере-напруг. При опорі 10 Ом струм короткого замикання достатній для надійної роботи релейного захисту, що дозволяє швидко виявляти і відключати пошкоджені ділянки мережі. Однак збільшені втрати потужності можуть викликати перегрів і додаткове навантаження на обладнання.

Установлено, що зі збільшенням опору в нейтралі трансформатора енерговузла спостерігається подальше зниження струму короткого замикання до значень 317 А та 298 А відповідно, а також помірне зменшення втрат потужності ($\Delta S = 3,7$ МВА для 15 Ом і $\Delta S = 3,4$ МВА для 20 Ом). Це знижує навантаження на обладнання та підвищує енергоефективність мережі, але потребує точного налаштування релейного захисту для забезпечення швидкої реакції.

Таким чином, для підвищення надійності та безпеки функціонування мережі необхідно обирати метод заземлення з урахуванням балансу між зниженням струмів короткого замикання, рівнем перенапруг та ефективністю релейного захисту.

Вибір резистивного заземлення з відповідним значенням опору дозволяє мінімізувати ризики пошкодження обладнання та забезпечити стабільну роботу мережі.

При виборі режиму функціонування нейтралі та значення опору резистора заземлення необхідно враховувати і питомий електричний опір ґрунту.

V. Kyryk¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-0419-8934

A. Buryak, Ph. D. student, ORCID 0000-0001-7732-575X

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

THE INFLUENCE OF THE RESISTANCE OF THE NEUTRAL GROUNDING RESISTOR ON THE 20 KV VOLTAGE DISTRIBUTION MODES OF OPERATION

The article examines the impact of different modes of neutral grounding on the operating parameters of 20 kV distribution networks, in The article examines the influence of different neutral grounding modes on the

operational parameters of 20 kV distribution networks, in particular, the selection of the optimal resistor resistance for resistive neutral grounding. One of the main tasks is to increase the efficiency of distribution networks of UES of Ukraine by switching from 10 kV to 20 kV. This solution is aimed at reducing power losses, increasing the amount of transmitted energy and improving the operation of relay protection. In the context of such a transition, the choice of the method of grounding the neutral of the power transformer is particularly relevant, which significantly affects the reliability and safety of operation of electrical networks.

In the study, an analysis of the effect of resistive grounding of the neutral of the transformer on the operating characteristics of the 20 kV network was performed, as well as the determination of the optimal value of the resistance of the resistor. The results of the comparison of the power node of the network with isolated neutral and resistive grounding are given. The main operating parameters, such as short-circuit currents, overvoltages on undamaged phases, power losses and operation of relay protection, which have a significant impact on the stability and safety of network operation, were analyzed.

A simulated calculation model of the network's power node based on a two-transformer 110/20 kV substation was created, including two sections with outgoing lines of different lengths and loads. Modeling is performed using the PowerFactory software complex, which provides the ability to accurately reproduce the real operating conditions of electrical systems. Special attention was paid to the selection of the resistance of the neutral grounding resistor and its influence on network parameters. In the study, four variants of the operation of the neutral were considered: isolated neutral and resistive grounding with a resistance of 10 Ohms, 15 Ohms and 20 Ohms.

It was established that in order to ensure stable and safe operation of the distribution network, it is important to correctly choose the neutral grounding method. The best option from the list of accepted resistance values is non-resistive grounding with a resistance of 15 Ohms, which allows you to reduce power losses, provides a sufficient level of currents for the effective operation of relay protection, and minimizes the risks of overvoltages on undamaged phases. This study is important for increasing the reliability of the operation of distribution networks and the security of electricity supply, especially in the context of the modernization of Ukraine's UES networks.

Keywords: voltage 20 kV, resistive grounding, isolated neutral, short circuit, overvoltage, power losses, distribution networks.

References

1. Methodical recommendations for grounding the neutral of electric networks 6–35 kV through a resistor / V. Gazhaman et al.; development A. Kvitsinsky; executed V. Santotskyi. - K.: Ministry of Energy and Coal, 2018. - 87
2. Analysis of the effectiveness of the existing neutral modes of 6–35 kV networks in power engineering / B. S. Stogniy, V. V. Maslyanyk, V. V. Nazarov [and others] // Technical electrodynamics. – 2002. – No. 3. – P. 37–41.
3. IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991) IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems <https://standards.ieee.org/ieee/142/3548/>
4. Rules for arranging electrical installations. The publication is official. Ministry of Energy and Coal of Ukraine. Kharkiv: "Fort" Publishing House, 2017. 760 p.
5. V. V. Kyryk, B. V. Tsyganenko, and O. S. Yandulskyi, 20 kV electrical distribution networks and their efficiency, monograph, Kyiv, Ukraine: "KPI named after Igor Cikorskyi", 2018, 233 p.
6. Kyryk V.V., Buryak A.R., Iskova M.S. Determination of the optimal resistance value of the neutral grounding resistor in 20 kV networks. Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute 2021. Vol. 158, No. 5. P. 96–102. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-96-102>
7. Kyryk V.V., Buryak A.R. Neutral grounding resistors in distribution electric networks. Scientific discussion Journal. 2023. No. 81. P. 21–26. URL: <https://scientific-discussion.com/wp-content/uploads/2023/10/Scientific-discussion-No-81-2023.pdf>.
8. Mitolo M., Tartaglia M., Zizzo G. Electrical Safety of Resonant Grounding. 2019 IEEE/IAS 55th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), Calgary, AB, Canada, 5–8 May 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/icps.2019.8733369>.
9. Zhou Y. Research on Neutral Voltage Offset and Its Influencing Factors of 20kV Small Resistance Grounding System. 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, 6–10 September 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/ichve49031.2020.9279425>

Надійшла: 14.10.2024
Received: 14.10.2024