

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В РОЗПОДІЛЬЧІЙ МЕРЕЖІ 10 КВ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

Стаття присвячена питанню аналізу короткого замикання в високовольтній мережі системи електропостачання промислового підприємства. Методологія аналізу базується на рекомендаціях стандарту ІЕС 60909. Обґрунтовано необхідність аналізу струмів короткого замикання на всіх рівнях системи електропостачання та доцільність автоматизації процесу розрахунку. Як інструмент аналізу застосовано модуль «Аналіз короткого замикання» програмного забезпечення ЕТАР. Результатом аналізу є визначення значень струму симетричного та несиметричних коротких замикань та виявлення невідповідності характеристик встановленого обладнання струмам короткого замикання.

Ключові слова: *аналіз короткого замикання, початкове значення струму короткого замикання, максимальне значення струму короткого замикання, програмне забезпечення ЕТАР.*

Постановка проблеми. Зростання потреби у електроенергії висуває нові вимоги щодо побудови системи живлення промислових, громадських, житлових тощо об'єктів, в тому числі, щодо безпеки та надійності систем електропостачання [1]. Надійною системою електропостачання об'єкту є система, яка не тільки здатна працювати в нормальних умовах, але й також зберегти свою роботу в умовах, відмінних від нормальних [2], з мінімальними пошкодженнями, які можуть виникати в результаті перехідних процесів, зумовлених збуреннями режиму роботи системи. Однією з причин перехідного процесу в системі електропостачання є коротке замикання. Аналіз перехідних процесів, зокрема, струмів короткого замикання, є одним з завдань, яке потребує вирішення під час проектування та експлуатації систем електропостачання для забезпечення надійного електроживлення об'єкту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час виникнення короткого замикання опір короткозамкнутого кола значно зменшується, що призводить до збільшення струму, зниження напруги і порушення роботи споживачів [3]. Тривалість короткого замикання невелика, але істотно зростає струму зумовлене термічний, динамічний та механічний вплив на елементи системи електропостачання [1]. Протікання струму короткого замикання через елементи системи електропостачання може зумовити руйнування або пошкодження обладнання. Крім того, виникнення короткого замикання може стати причиною тривалої перерви в електропостачанні об'єкту, оскільки ремонт пошкодженого обладнання може зайняти час, що призведе до збитків підприємства через зупинку процесу виробництва [4]. Небезпечний вплив струмів короткого замикання на електричне обладнання висуває відповідні вимоги до побудови системи електропостачання та вибору її вибору елементів (комутаційно-захисного обладнання, шин, кабельних ліній). Елементи системи електропостачання мають бути здатними протистояти термічним і механічним впливам струмів короткого замикання [1]. Засобом для усунення пошкодження та розвитку аварії в системі електропостачання об'єкту є відокремлення пошкодженої ділянки від решти справної системи за допомогою захисних пристроїв. Тобто, аналіз короткого замикання також є основою для визначення налаштувань пристроїв релейного захисту для обмеження можливого негативного впливу зовнішніх і внутрішніх факторів [5], зумовлених ненормальними режимами роботи. Для визначення характеристик обладнання, для забезпечення їх здатності витримувати та/або вимикати небезпечні струми, налаштування релейного захисту елементів системи електропостачання, струм короткого замикання має бути визначений на кожному ієрархічному рівні системи [4]. Таким чином, для вибору електрообладнання, визначення схем підстанцій та розподільних пристроїв, налаштування захисту, оптимізації рівнів короткого замикання з метою забезпечення надійної роботи системи електропостачання та координації її режимів роботи необхідним є аналіз електромагнітних перехідних процесів, тобто, струмів короткого замикання.

Метою статті є аналіз короткого замикання в системі електропостачання промислового підприємства із застосування сучасних інструментів автоматизації розрахунків струму короткого замикання.

Основний матеріал дослідження. В даний час існує низка різних методів розрахунку струмів короткого замикання, які є придатними для застосування в різних випадках. З метою відповідності зростаючим вимогам до побудови систем електропостачання методи розрахунку струму короткого замикання постійно удосконалювались. Удосконалення головним чином стосувалися врахування впливу змінної та постійної складової струму короткого замикання, які генеруються машинами, що обертаються. Ці удосконалення передбачають як просте коригування опорів послідовностей, так і більш складні розрахунки надперехідних і

перехідних опорів і постійних часу затухання складових струму короткого замикання для машин, що обертаються [6]. Процес зміни повного струму короткого замикання можна розглядати у функції часу від моменту його виникнення в точці короткого замикання до моменту настання усталеного аварійного режиму з урахуванням миттєвого значення напруги на початку виникнення короткого замикання. Проте, на практиці, як правило такий детальний аналіз струму короткого замикання не потрібен [7]. Достатнім є визначення початкового значення періодичної складової струму короткого замикання, максимального та мінімального значення струму короткого замикання.

Документом, що регламентує процедуру дослідження струму короткого замикання є міжнародний стандарт ІЕС 60909 [8]. Він встановлює загальну, практичну і стислу процедуру розрахунку струму короткого замикання (симетричного та несиметричного) в трифазних мережах змінного струму, що забезпечує прийнятну точність результатів розрахунку [7, 8].

Згідно [7, 8] для обчислення струму короткого замикання використовується метод еквівалентного джерела напруги. Еквівалентне джерело напруги, яке вводять в точку короткого замикання, є єдиною активною напругою системи. Усі лінії живлення, трансформатори, синхронні й асинхронні машини замінюють внутрішніми повними опорами. Фактичні дані про параметри режиму роботи, навантаження споживачів, положення перемикача відгалужень трансформатора, збудження генераторів тощо, а також обчислення розподілів потоку навантаження у момент короткого замикання не є обов'язковими. Повний опір короткозамкненого кола визначається на основі номінальних даних електроустановки і топологічної структури системи. Перевагою висвітленого в [7, 8] методу є можливість розрахунку повного опору короткозамкненого кола, а отже й струму короткого замикання як для існуючих систем електропостачання, так і проєктованих.

Згідно стандарту ІЕС 60909-0 [7, 8] слід розглядати два струми короткого замикання, які розрізняються за своїм значенням: максимальне значення струму короткого замикання, що визначає категорію та конструкцію електроустановки, характеристики обладнання і його стійкості дії струму короткого замикання; і мінімальне значення струму короткого замикання, яке може бути основою для вибору захисних пристроїв та уставок реле під час проєктування пристроїв релейного захисту елементів системи електропостачання, щоб забезпечити точну та злагоджену роботу захисту, а також для перевірки двигунів за умовою нагрівання. Основною відмінністю розрахунку струму короткого замикання згідно ІЕС 60909-0 [7, 8] є використання коефіцієнтів корекції напруги та повного опору, а також прийнятих припущень для розрахунку максимального і мінімального струму.

Під час розрахунку максимальних струмів короткого замикання за згідно ІЕС 60909-0 [7, 8] для налаштування значення еквівалентного джерела напруги необхідно враховувати коефіцієнт напруги c_{max} ; використовувати конфігурацію схеми системи електропостачання, яка дає максимальний внесок від електростанцій та фідерів мережі, що призводить до найвищого струму короткого замикання в точці короткого замикання, а також використовувати мінімальний еквівалентний повний опір для представлення зовнішніх мереж, який відповідає максимальному внеску струму короткого замикання від фідерів.

Для трифазного короткого замикання початковий струм короткого замикання згідно [7, 8]:

$$I_k'' = \frac{c_{max} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (1)$$

де $\frac{c_{max} \cdot U_n}{\sqrt{3}}$ - джерело еквівалентної напруги в місці пошкодження;

Z_k - повний опір короткозамкненого кола.

У випадку розімкнених електромереж максимальне (пікове) значення струму трифазного короткого замикання:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot k \cdot I_k'' \quad (2)$$

де k - коефіцієнт максимального струму, який є функцією співвідношення R/X :

$$k = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3R/X} \quad (3)$$

Для аналізу несиметричного короткого замикання використовується метод симетричних складових [7, 8], згідно якого значення струму короткого замикання обчислюється шляхом накладання струмів трьох симетричних складових: струму прямої послідовності; струму зворотної послідовності; струм нульової послідовності.

Розрахунок струму короткого замикання згідно [7, 8] базується на використанні простих методів, які є легкими у використанні. Однак, необхідність розрахунку значення струму короткого замикання на різних рівнях системи електропостачання робить процес розрахунку трудомістким. При цьому, необхідним є аналіз симетричного (трифазного) короткого замикання як найважливого виду короткого замикання, та несиметричних коротких замикань (двофазного та двофазного на землю, а також однофазного як найбільш ймовірно поширеного виду короткого замикання). Кожен сценарій розрахунку струму короткого замикання - це, по суті,

окрема схема короткозамкненого кола, яка може мати абсолютно різні шляхи протікання струму короткого замикання та його значення. Удосконалення та доступність комп'ютерних програм для моделювання та аналізу енергетичних систем дає змогу спростити процедуру дослідження складних мереж за допомогою реалістичного моделювання.

Аналіз короткого замикання в розподільчій мережі 10 кВ системи електропостачання промислового підприємства виконано за допомогою модуля «Аналіз короткого замикання» програмного забезпечення ETAP американської компанії Operation Technology. ETAP - найбільш комплексне рішення для моделювання, проектування та аналізу систем виробництва, передачі та розподілу електроенергії в електроенергетичній системі, а також промислових систем електропостачання [9]. ETAP - один з найпотужніших інструментів електротехнічного аналізу та керування, визнаних світовим лідером у проектуванні, аналізі та моніторингу енергосистем, який широко використовується для аналізу електромагнітних перехідних процесів [2, 5, 9-12]

Для забезпечення необхідної точності розрахунку максимального струму короткого замикання необхідне знання схеми системи електропостачання об'єкту. Фрагмент спроектованої в програмі ETAP однолінійної схеми розподільчої мережі системи електропостачання промислового підприємства наведено на рисунку 1.

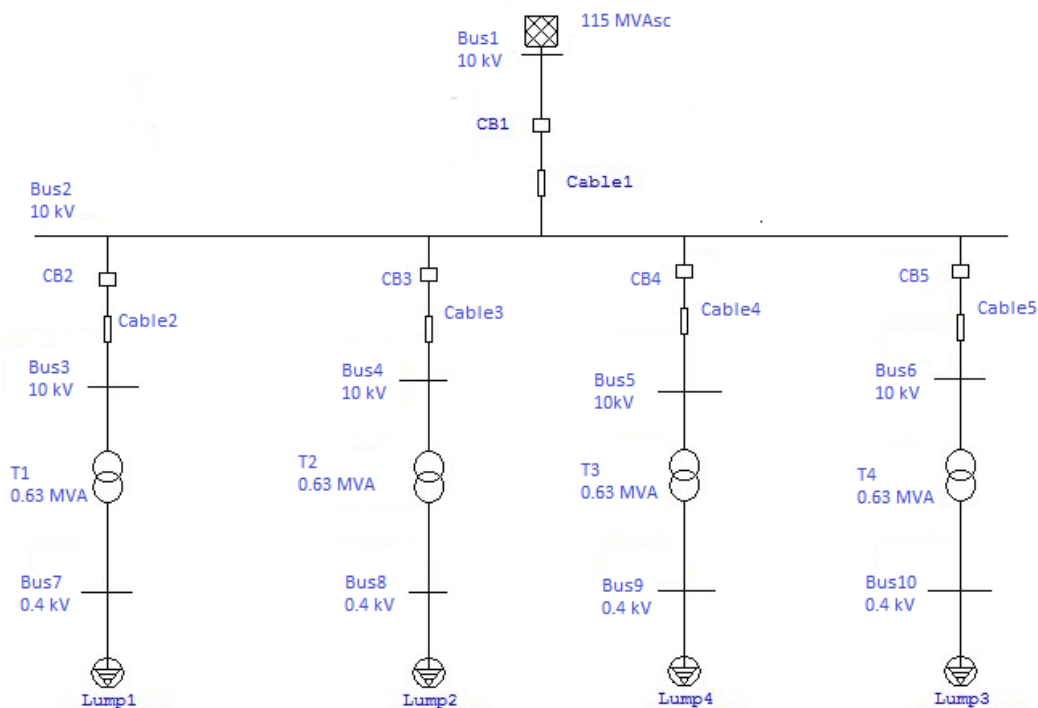


Рисунок 1 - Однолінійна схема розподільчої мережі системи електропостачання промислового підприємства, спроектована в програмі ETAP

Після проектування однолінійної діаграми розподільчої мережі в режимі редагування, поточне представлення схеми в програмному забезпеченні ETAP перемикається в режим аналізу короткого замикання. Модуль «Аналіз короткого замикання» програми ETAP реалізує аналіз впливу симетричного (трифазного) та несиметричних («фаза-фаза» та «фаза-земля») коротких замикань в заданих точках електричної мережі. Обчислення короткого замикання контролюються та передаються відповідно до налаштувань досліджуваного випадку, вибраного на панелі інструментів. Редактор випадків короткого замикання включає вибір несправної шини, змінні керування рішенням і опції для вихідних звітів. Доступ до них можна отримати з панелі інструментів досліджуваного випадку або з системного менеджера. Враховуючи вихідну схему та параметри елементів в нормальному режимі роботи, для кожного вузла виконується індивідуальний аналіз короткого замикання шляхом вибору шини в редакторі аналізу випадків короткого замикання. Результати моделювання короткого замикання відображаються на однолінійній схемі системи електропостачання та в таблиці звіту. При цьому, програмне забезпечення ETAP передбачає порівняння значення струму короткого замикання, що проходить через відповідні елементи системи електропостачання з їх характеристиками. Якщо характеристики елементів системи електропостачання не відповідають умовам стійкості струмам короткого замикання, це має відповідне відображення на однолінійній схемі (таке місце відображається як неадекватне), а також у звіті. Фінальний звіт аналізу струму короткого замикання в системі електропостачання містить опис обсягу дослідження, всі припущення, походження даних, методи, що використовуються для розрахунку струмів, зведені в таблицю результату, а також рекомендації щодо коригувальних дій у випадку невідповідності встановленого обладнання струмам короткого замикання.

Фрагмент результатів розрахунку струмів короткого замикання в розподільчій мережі 10 кВ із

застосуванням модуля «Аналіз короткого замикання» програмного забезпечення ETAP наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку струмів короткого замикання на шині 2.

Вид КЗ	Трифазне	Двофазне на землю	Двофазне	Однофазне
Початкове значення струму короткого замикання I_k'' , кА	4,05	3,54	3,51	1,46
Максимальне значення струму короткого замикання i_p , кА	8,5	7,48	7,36	2,87

Аналогічним чином розраховано струм короткого замикання в інших точках (на інших шинах) розподільчої мережі 10 кВ промислового підприємства. Результати аналізу короткого замикання в досліджуваній розподільчій мережі не виявили невідповідностей обладнання вимогам щодо стійкості струмам короткого замикання.

Висновки. Аналіз електромагнітних перехідних процесів є основою для вибору електрообладнання, визначення схем підстанцій та розподільних пристроїв, налаштування пристроїв релейного захисту для обмеження можливого негативного впливу зовнішніх і внутрішніх факторів, оптимізації рівнів короткого замикання з метою забезпечення надійної роботи системи електропостачання та координації її режимів роботи. На практиці достатнім є визначення початкового, максимального та мінімального значення струму короткого замикання. Розрахунок струму короткого замикання згідно ІЕС 60909 базується на використанні простих методів. Однак необхідність розрахунку значення струму різних видів короткого замикання та на різних рівнях системи електропостачання робить процес розрахунку трудомістким, оскільки кожен сценарій розрахунку - це окрема схема короткозамкненого кола з різними шляхами протікання струму короткого замикання. Застосування програмного забезпечення ETAP, зокрема, модуля «Аналіз короткого замикання», забезпечило автоматизацію процесу аналізу короткого замикання в розподільчій мережі 10 кВ системи електропостачання промислового підприємства. Результатом його роботи є розрахунок значення початкового та максимального струму для симетричного (трифазного) та несиметричних («фаза-фаза» та «фаза-земля») коротких замикань в заданих точках електричної мережі, а також виявлення невідповідності характеристик встановленого обладнання струмам короткого замикання та відображення неадекватних місць.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. P. Janiga, Ž. Eleschová, and D. Vigiš, "Short-circuit - analysis and calculation", *WSEAS transactions on power systems*, Vol. 9, 291-299, 2014.
2. A. Arizaldi, S. Salahuddin, M. Muhammad, V. Jain, G. P. Pandey, and M. J. Watane, "Short Circuit Analysis on Distribution Network 20 kV Using Etap Software", *Journal of Renewable Energy, Electrical, and Computer Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 49-57, 2021. doi: 10.29103/jreece.v1i2.5232
3. С. О. Скрипник, О. Ю. Колларов, "Аналіз режиму роботи електричної мережі при однофазних КЗ напругою 6-35 кВ", *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика»*, №2(25), С. 35-40, 2021.
4. L. G. Mahiwal, J. G. Jamnani and K. N. Velani, "Short Circuit Analysis of Electrical Distribution System for Typical Chemical Industry", *2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Proceedings*, pp. 475-480, 2019.
5. K. Handono, T. Tukiman, I. M. Putra, and L. Subekti, "Short circuit analysis on electrical power supply building # 71 BATAN for case reliability study of nuclear power plant electrical protection system", *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2180, 020036, 2019. doi: 10.1063/1.5135545
6. D. Nedic, G. Bathurst, and J. Heath, "A Comparison of Short Circuit Calculation Methods and Guidelines for Distribution Networks", *19th International Conference on Electricity Distribution, Proceedings*, 0562, 2007.
7. ДСТУ ІЕС 60909-0:2007. Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму Ч. 0: Обчислення сили струму (ІЕС 60909-0:2001, ІДТ). Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 48 с.
8. ІЕС 60909-0:2016 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents. ІЕС. 2016. 82 р.
9. A. Z. Latt, "Short Circuit Analysis of 33/11/0.4 kV Distribution System Using ETAP", *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)*, Vol. VIII (V), pp. 79-85, 2019.
10. S. L. Sankar, and M. M. Iqbal, "ANSI and IEC Standards Based Short Circuit Analysis of a Typical 2×30 MW Thermal Power Plant", *Middle-East Journal of Scientific Research*, Vol. 23(8), pp. 1617-1625, 2015. doi: 10.5829/idosi.mejsr.2015.23.08.22406
11. J. A. X. Prabhu, K. S. Nande, S. Shukla and C. N. Ade, "Design of electrical system based on Short Circuit study using ETAP for IEC projects," *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, pp. 1-6, 2016. doi: 10.1109/ICPES.2016.7584102.
12. M. A. Ullah, A. Qaiser, Q. Saeed, A. R. Abbasi, I. Ahmed and A. Q. Soomro, "Load flow, voltage stability & short circuit analyses and remedies for a 1240 MW combined cycle power plant using ETAP," *2017 International*

Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT), pp. 1-6, 2017. doi: 10.1109/ICIEECT.2017.7916568.

REFERENCES

1. P. Janiga, Ž. Eleschová, and D. Viglaš, "Short-circuit - analysis and calculation", *WSEAS transactions on power systems*, Vol. 9, 291-299, 2014.
2. A. Arizaldi, S. Salahuddin, M. Muhammad, V. Jain, G. P. Pandey, and M. J. Watane, "Short Circuit Analysis on Distribution Network 20 kV Using Etap Software", *Journal of Renewable Energy, Electrical, and Computer Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 49-57, 2021. doi: 10.29103/jreece.v1i2.5232
3. S. O. Skrypnyk, A. Yu. Kollarov, "Analysis of the mode of electrical network operation at single-phase accessories of voltage 6-35 kV", *Scientific papers of Donetsk national technical university. Series: "Electrical and power engineering"*, №2(25), pp. 35-40, 2021.
4. L. G. Mahiwal, J. G. Jamnani and K. N. Velani, "Short Circuit Analysis of Electrical Distribution System for Typical Chemical Industry", *2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Proceedings*, pp. 475-480, 2019.
5. K. Handono, T. Tukiman, I. M. Putra, and L. Subekti, "Short circuit analysis on electrical power supply building # 71 BATAN for case reliability study of nuclear power plant electrical protection system", *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2180, 020036, 2019. doi: 10.1063/1.5135545
6. D. Nedic, G. Bathurst, and J. Heath, "A Comparison of Short Circuit Calculation Methods and Guidelines for Distribution Networks", *19th International Conference on Electricity Distribution, Proceedings*, 0562, 2007.
7. DSTU IEC 60909-0:2007. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems P. 0 : Calculation of currents (IEC 60909-0:2001, IDT). Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2009. 48 p.
8. IEC 60909-0:2016 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents. IEC. 2016. 82 p.
9. A. Z. Latt, "Short Circuit Analysis of 33/11/0.4 kV Distribution System Using ETAP", *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS)*, Vol. VIII (V), pp. 79-85, 2019.
10. S. L. Sankar, and M. M. Iqbal, "ANSI and IEC Standards Based Short Circuit Analysis of a Typical 2×30 MW Thermal Power Plant", *Middle-East Journal of Scientific Research*, Vol. 23(8), pp. 1617-1625, 2015. doi: 10.5829/idosi.mejsr.2015.23.08.22406
11. J. A. X. Prabhu, K. S. Nande, S. Shukla, and C. N. Ade, "Design of electrical system based on Short Circuit study using ETAP for IEC projects," *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, pp. 1-6, 2016. doi: 10.1109/ICPES.2016.7584102.
12. M. A. Ullah, A. Qaiser, Q. Saeed, A. R. Abbasi, I. Ahmed, and A. Q. Soomro, "Load flow, voltage stability & short circuit analyses and remedies for a 1240 MW combined cycle power plant using ETAP," *2017 International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT)*, pp. 1-6, 2017. doi: 10.1109/ICIEECT.2017.7916568.

L. V. DAVYDENKO, V. A. DAVYDENKO
Lutsk National Technical University

Analysis of electromagnetic transitional processes in the distribution network of 10 kv industrial enterprise. The article is devoted to the issue of short-circuit analysis in the high-voltage network of the power supply system of an industrial enterprise. A short-circuit analysis is based on the methodology recommended by the IEC 60909 International Standard. The method of equivalent voltage source at a short-circuit point was used to calculate a short-circuit current. The necessity to analyze short-circuit currents at all levels of the power supply system was used as justification of the feasibility of automation of the calculation process. Module "Short-circuit analysis" of the ETAP software was used as an analysis tool. The nominal parameters of the elements of the power supply system of the industrial enterprise and its topological structure are the initial data for the calculation. A single-line scheme of a 10 kV distribution network of power supply system is designed in ETAP program for implementation of the calculation process. The calculation of the value of the initial and maximum current for symmetric (three-phase) and asymmetrical ("phase-phase" and "phase-land") short circuits at the specified points of the electrical network, as well as the detection of inconsistency of characteristics installed equipment to short-circuit currents and displaying inadequate places are the result of the module "Short-circuit analysis" of the ETAP program. The results of the analysis of short circuit in the investigated distribution network of the 10 kV industrial enterprise did not find inconsistencies of the equipment characteristics of the requirements for the stability of short-circuit currents.

Key words: *short-circuit analysis, initial short-circuit current, maximum short-circuit current, ETAP software.*