УДК 621.311:621.3.064.1 https://doi.org/10.31474/2074-2630-2023-1-5-11

Л. В. ДАВИДЕНКО (д-р техн. наук, проф.),
В. А. ДАВИДЕНКО (канд. техн. наук, доц.)
Луцький національний технічний університет
l.davydenko@lutsk-ntu.com.ua

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ПРОМИСЛОВІЙ НИЗЬКОВОЛЬТНІЙ РОЗПОДІЛЬЧІЙ МЕРЕЖІ З АСИНХРОННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Стаття присвячена питанню аналізу короткого замикання в низьковольтній мережі системи електропостачання промислового підприємства. Методологія аналізу базується на рекомендаціях стандарту IEC 60909 та стандарту ANSI/IEEE серії C37, що регламентують розрахунок струму короткого замикання для вибору і перевірки комутаційних апаратів та захисних пристроїв за рівнем струму короткого замикання. Як інструмент аналізу застосовано модуль «Short Circuit» програмного забезпечення ETAP. Аналіз короткого замикання виконується у два етапи: перший передбачає моделювання низьковольтної розподільчої мережі цеху; другий передбачає імітацію несправностей в мережі. Виконаний аналіз враховує особливості конфігурації мережі з асинхронними двигунами, що використовуються в технологічному процесі, та їх внесок в рівень струму короткого замикання. 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, значення струму короткого замикання, програмне забезпечення ETAP.

Постановка проблеми. Аналіз електромагнітних перехідних процесів, зокрема, визначення струму короткого замикання (КЗ), поряд із визначенням розрахункового навантаження є важливим етапом для проектування надійної системи електропостачання (СЕП) будь-якого об'єкту. КЗ в СЕП пов'язані зі складними електромагнітними та тепловими явищами, що призводять до перехідних процесів, термічних і механічних впливів на елементи СЕП [1]. Попередження негативних наслідків в результаті можливих аварій в СЕП вимагає прийняття відповідних рішень як щодо вибору обладнання, так і налаштування елементів релейного захисту. Тобто аналіз короткого замикання на всіх рівнях СЕП є актуальним завданням забезпечення надійного електропостачання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Коротке замикання може призвести до порушення стійкості СЕП та вузлів навантаження, механічних і термічних навантажень на елементи СЕП. Аналіз короткого замикання, координація реле в системах релейного захисту та дослідження небезпеки спалаху дуги є взаємопов'язаними елементами аналізу відповідності енергетичної системи сучасним вимогам [2]. При цьому вимоги до електричних апаратів, струмоведучих частин, конструкцій розподільчих пристроїв стають більш жорсткими [3].

Аналіз короткого замикання є важливим елементом для попередження негативних наслідків від пошкоджень в СЕП будь-якого об'єкту [1, 4-6]. Значення струму КЗ необхідне для проектування елементів СЕП та правильно скоординованих систем захисту. Значення струму КЗ використовується для вибору електрообладнання СЕП, комутаційно-захисних апаратів, координації реле для налаштування та узгодження пристроїв релейного захисту тощо під час проектування понижуючих підстанцій СЕП, розподільних пристроїв [1]. Компоненти СЕП повинні бути вибрані так, щоб витримувати вплив струму КЗ під час пошкодження [1]. Крім того, розрахунок і систематичний аналіз короткого замикання є важливим елементом визначення основних характеристик електричного обладнання СЕП та перевірки їх відповідності умовам експлуатації. Додавання нових джерел живлення (наприклад, місцевих генераторів), зміна схеми електропостачання, модернізація СЕП, розширення та модернізація технологічного процесу, додавання нових електроприймачів (в тому числі, синхронних та асинхронних двигунів, що використовуються в технологічному процесі) та елементів СЕП для їх живлення тощо впливає на рівень струму КЗ [4], отже вимагає систематичного проведення аналізу короткого замикання. Саме не врахування сукупного впливу на струм КЗ факторів, що виникають під час експлуатації СЕП, є однією з причин не коректного спрацювання пристроїв релейного захисту та відмов у роботі електрообладнання [3]. Таким чином, систематичний аналіз короткого замикання на різних рівнях напруги СЕП промислового об'єкту, перегляд значень струму КЗ та його врахування для координації реле та узгодження релейного захисту є одними із елементів забезпечення надійності електропостачання як на стадії проектування, так і на стадії експлуатації СЕП [7]. **Метою статті** є аналіз короткого замикання в низьковольтній розподільчій промисловій мережі з асинхронними двигунами із застосуванням інструментів

© Давиденко Л.В., Давиденко В.А., 2023

автоматизації розрахунків струму короткого замикання.

Основний матеріал дослідження. Модернізація технологічного процесу промислового підприємства, розширення виробництва, впровадження нових технологічних ліній тощо зумовлює найбільш істотні зміни саме в низьковольтній (НВ) розподільчій мережі СЕП промислового підприємства. Зміна складу електроприймачів зумовлює необхідність перегляду схеми НВ розподільчої мережі з точки зору відповідності елементів СЕП новим умовам роботи як в нормальному режимі, так і у випадку виникнення несправностей в мережі. Слід наголосити, що живлення точки КЗ може здійснюватися від таких джерел [8]: 1) система електропередачі, від якої здійснюється електропостачання об'єкту і яка діє як потужний віддалений генератор; 2) «місцеві» генератори (в тому числі дизель-генератори, когенераційні установки тощо), що встановлені безпосередньо на підприємстві або на невеликій електричній віддаленості; 3) синхронні та асинхронні двигуни, які приймають участь в технологічному процесі. Отже, впровадження в технологічний процес потужних установок з істотним асинхронним навантаженням або окремих установок з асинхронними двигунами (наприклад, компресорних установок для виробництва стисненого повітря безпосередньо біля його споживачів) вимагає урахування внеску двигунів таких електроприймачів не лише в розрахункове навантаження цеху, а й в рівні струму КЗ. Нехтування внеском струму від двигунів під час визначення струму КЗ призводить до заниження рівнів струму КЗ і помилок у виборі обладнання, особливо у випадку невеликого запасу за номінальним струмом. Необхідність розрахунку значення струму КЗ в багатьох точках НВ мережі СЕП та урахування внеску струму від електродвигунів потужних електроприймачів робить процес розрахунку трудомістким. За таких умов аналіз КЗ потребує автоматизації розрахункового процесу навіть для невеликих електричних систем.

Одним із інструментів комп'ютеризованого аналізу та моніторингу електроенергетичних систем є програмне забезпечення Electrical Transient Analyzer Program (ETAP), яке містить пакет програмних продуктів для моделювання, проектування та аналізу промислових енергосистем [5, 9, 10]. Аналіз короткого замикання є важливим елементом забезпечення проектування надійної СЕП, тому для коректної оцінки рівня КЗ в на різних рівнях СЕП промислового об'єкту необхідно застосовувати стандартизовану методологію. ETAP застосовує прийняті галузеві стандарти, що забезпечує використання технічно правильних моделей; має зручний інтерфейс, загальну базу даних та надає звіти про результати розрахунків, які легко аналізувати.

Аналіз короткого замикання полягає в розрахунку струму КЗ, який міг би проходити через електрообладнання в разі несправності або КЗ у відповідній точці СЕП. Метою аналізу короткого замикання в СЕП є перевірка відповідності рейтингу струму КЗ (Short Circuit Current range - SCCR) електрообладнання (існуючого чи нового, що планується до встановлення) очікуваному значенню струму КЗ [11] для забезпечення роботи СЕП з мінімальними пошкодженнями. Аналіз короткого замикання передбачає визначення значення струму КЗ в різних вузлах і на різних рівнях напруги СЕП, а також різного інтервалу часу після початку пошкодження. Максимальне та мінімальне значення струму трифазного КЗ визначаються через 10 мс та 60 мс після виникнення пошкодження. Розраховане максимальне значення струму КЗ використовується для вибору вимикача з відповідною вимикаючою здатністю та потужністю КЗ, перевірки здатності компонентів СЕП витримувати механічні та термічні навантаження [6, 11]. Мінімальне значення струму КЗ використовується для встановлення необхідної чутливості захисних реле та налаштування пристроїв релейного захисту.

Програмне забезпечення ETAP передбачає використання для аналізу короткого замикання як методології європейського стандарту Міжнародної електротехнічної комісії IEC 60909, так і методології американського стандарту ANSI/IEEE серії C37.

Стандарт IEC-60909 призначений для розрахунку струму КЗ та перевірки рейтингу обладнання в системах змінного струму, що працюють на частоті 50 Гц або 60 Гц [12, 13]. Методологія стандарту охоплює розрахунок трифазного КЗ та несиметричних КЗ (однофазного, двофазного, двофазного на землю), а також класифікує струми КЗ відповідно до їх величини (максимальний і мінімальний) і електричної віддаленості пошкодження (ближнє КЗ і віддалене КЗ). Припускається, що опори системи є симетричними, а метод симетричних складових використовується для розрахунку несиметричних КЗ. Стандарт IEC-60909 використовується для визначення різних значень струму КЗ, таких як початкове значення струму КЗ, миттєве значення пікового струму КЗ (ударний струм КЗ), періодичної та аперіодичної складової струму КЗ. Стандарт IEC-60909 вимагає детального моделювання параметрів елементів СЕП [6]. Відповідно до стандарту IEC-60909, для визначення максимального значення струму КЗ береться до уваги внесок струму пошкодження від усіх двигунів, оскільки через свою інерцію вони працюють як асинхронні генератори після виникнення пошкодження та під час перших циклів перехідного процесу. Для розрахунків КЗ за стандартом IEC джерело напруги, еквівалентне локалізації пошкодження, замінює всі джерела напруги. Для обчислення мінімального та максимального струму КЗ застосовується коригування значення еквівалентного джерела напруги за допомогою коефіцієнту напруги «c» залежно від номінальної напруги мережі. Усі машини представлені їх внутрішніми опорами. Для віддалених КЗ методологія стандарту IEC-60909 припускає, що усталене значення струму КЗ дорівнює початковому значенню струму КЗ. Початкове значення струму КЗ визначається як середньоквадратичне значення періодичної складової струму КЗ в момент часу $t = 0$ з урахуванням значення номінальної напруги, коефіцієнта напруги (C) та еквівалентного опору в місці пошкодження. Для розрахунку ударного струму КЗ в

стандарті IEC-60909 використовуються три методи, які передбачають різний підхід до визначення коефіцієнту пікового струму k. Метод А, відомий як рівномірне співвідношення: «k» визначається як найменше співвідношення R/X з усіх віток мережі, що мають внесок 80% струму при номінальній напрузі в місці пошкодження. Метод В, який називають методом коефіцієнта у місці КЗ: значення «k» отримують шляхом множення на коефіцієнт безпеки 1,15 для врахування неточностей у розрахунках. Метод С, відомий як метод еквівалентної частоти: значення «k» визначають за допомогою зміненої частоти R/X.

У розрахунках КЗ згідно методології стандарту ANSI/IEEE серії С37 усі зовнішні джерела напруги та внутрішні джерела напруги електричних машин замінюються еквівалентним джерелом напруги в точці КЗ, яке дорівнює напрузі перед КЗ, і всі електричні машини представлені їхніми внутрішніми опорами [14]. Стандарт ANSI/IEEE серії С37 потребує меншого об'єму моделювання параметрів порівняно з методом IEC [6]. Згідно методу ANSI залежно від періоду часу, який розглядається від початку виникнення КЗ, визначаються три типи струму КЗ: миттєве значення струму КЗ; значення струму вимкнення (переривання) КЗ; усталене значення струму КЗ. Для цього формуються три різні мережі імпедансів [4]: мережа з ½ циклу (надперехідна мережа), мережа з 1,5-4 циклами (перехідна мережа) і мережа з 30 циклами (мережа в усталеному стані). У мережі з ½ циклу (півперіоду) всі синхронні та асинхронні машини зображуються їх надперехідним реактивним опором. Миттєвий струм КЗ розраховується через ½ циклу після виникнення КЗ і представляє собою найбільше значення струму КЗ до того моменту, поки його змінна (вимушена, періодична) та постійна (вільна, аперіодична) складові спадають до усталеного значення струму [4, 14]. Хоча в реальності максимальне значення струму КЗ виникає трохи раніше ½ циклу, у розрахунках використовується мережа ½ циклу [6]. Згідно методології стандарту ANSI/IEEE, під час розрахунку значення струму першого циклу в мережах середньої напруги враховується лише реактивний опір елементів мережі, тоді як для мереж низької напруги враховується як реактивний опір, так і активний опір. Струм першого циклу (½ періоду) зазвичай враховує зміну аперіодичної складової та обчислюється на основі припущення про відсутність затухання періодичної складової струму в джерелах живлення точки КЗ. Струм першого циклу, визначений згідно методології стандарту ANSI/IEEE серії С37 є еквівалентом початкового струму симетричного КЗ, визначеного відповідно до методології стандарту IEC 60909. У мережі від ½ до 4 циклів для розрахунку струму КЗ використовується перехідний реактивний опір електричних синхронних та асинхронних машин, а струм вимкнення (переривання) КЗ розраховується після 4 циклів після виникнення КЗ. У схемі з 30 циклами для розрахунку усталеного струму КЗ використовується реактивний опір синхронних та асинхронних машин в усталеному стані. Методи ANSI та IEC відрізняються у підходах до обчислення X/R. Стандарт ANSI/IEEE рекомендує використовувати окремі мережі R і X для обчислення відношення X/R. Для кожної окремої несправної шини визначається співвідношення X/R для струму КЗ, яке використовується для визначення коригуючого коефіцієнта для врахування часового зміщення (затухання) аперіодичної складової струму КЗ [14]. В результаті застосування методології стандарту ANSI/IEEE серії С37 визначаються відповідні струми КЗ, які можуть бути використані для перевірки спрацювання та вимкнення струму КЗ автоматичних вимикачів високої напруги, перевірки вимикаючої (перериваючої) здатності запобіжників і автоматичних вимикачів низької напруги, перевірки стійкості ізоляторів шин, виконання налаштування реле [14]. Струми КЗ першого циклу, тобто, через 1/2 циклу після виникнення КЗ, які також називають струмами короткочасного КЗ, стосуються замкненого стану автоматичних вимикачів, коли вони повинні витримати струм КЗ. Враховуючи, що вимикачі та запобіжники низької напруги спрацьовують у першому циклі, їх номінальні характеристики відключення порівнюються з миттєвим значенням струму КЗ. Струм КЗ, розрахований для циклу 30 згідно методології стандарту ANSI/IEEE серії С37, відповідає мінімальному струму КЗ, визначеному відповідно до методології стандарту IEC 60909, і використовується для координації реле.

Аналіз короткого замикання в промисловій НВ розподільчій мережі з асинхронним навантаженням виконано із застосуванням методології обох стандартів, реалізованих в пакеті програмного забезпечення ETAP.

Для отримання достовірних результатів розрахунку струму КЗ в ETAP необхідні точні та детальні параметри електрообладнання. На першому етапі виконується моделювання однолінійної схеми низьковольтної розподільчої мережі СЕП цеху (рис.1).

Після проектування однолінійної діаграми розподільної мережі із застосуванням модуля Short Circuit виконано аналіз короткого замикання в СЕП шляхом імітації несправностей. Редактор випадків аналізу КЗ включає вибір несправної шини, змінні керування рішенням і різні опції для вихідних звітів. З урахуванням вибраних на панелі інструментів налаштувань виконується розрахунок струму КЗ та формується звіт про результати аналізу. Враховуючи вихідну схему та параметри елементів в нормальному режимі роботи, кожен вузол індивідуально піддається виходу з ладу за допомогою вибору шини в редакторі аналізу випадків КЗ. Результати моделювання КЗ відображаються на однолінійній схемі СЕП, а також у зведеному звіті. Програмне забезпечення ETAP передбачає порівняння значення струму КЗ, що проходить через кожен елемент НВ розподільчої мережі, із SCCR елементів, та за необхідності видаються відповідні попередження: якщо струм через елемент перевищує 95% номінального значення SCCR, фіксується граничне попередження; якщо струм через захисний пристрій складає 100% номінального значення SCCR струму або більше, фіксується критичне

попередження. Якщо характеристики елементів не відповідають умовам стійкості струмам короткого замикання, це має відповідне відображення на однолінійній схемі (таке місце відображається як неадекватне), а також у звіті. Список попереджень про КЗ включає всі окремі пристрої з критичними або граничними порушеннями рейтингу. Якщо немає пристроїв, перелічених у режимі попередження, це свідчить про те, що все електричне обладнання належним чином вибране відповідно до параметрів КЗ.

Результатом аналізу короткого замикання із застосуванням методології стандарту IEC є розрахунок значення початкового, максимального та мінімального струму для симетричного (трифазного) та несиметричних («фаза-фаза» та «фаза-земля») КЗ в заданих точках електричної мережі (рис.2, 3).

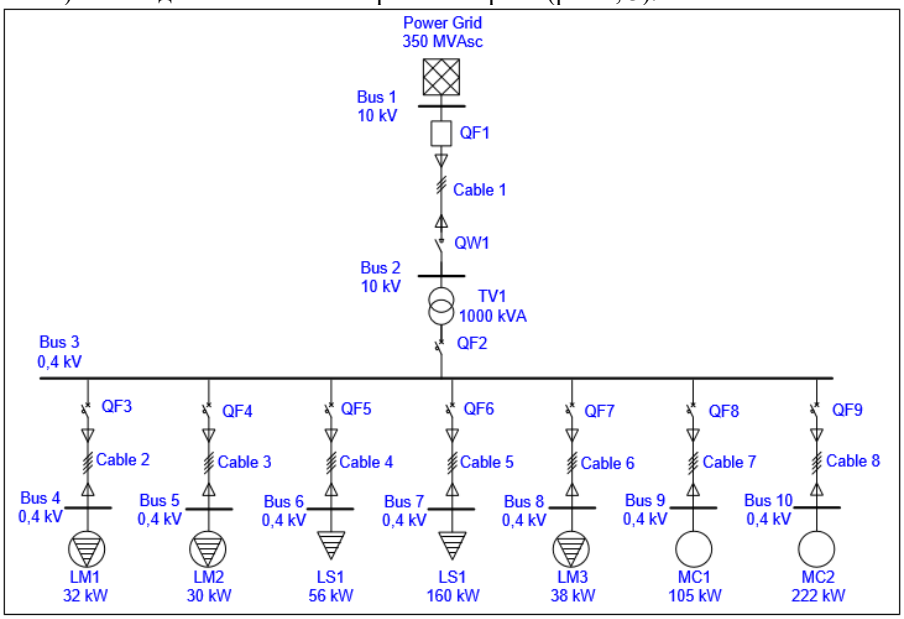

Рисунок 1 – Однолінійна схеми промислової розподільчої мережі з низьковольтним асинхронним навантаженням

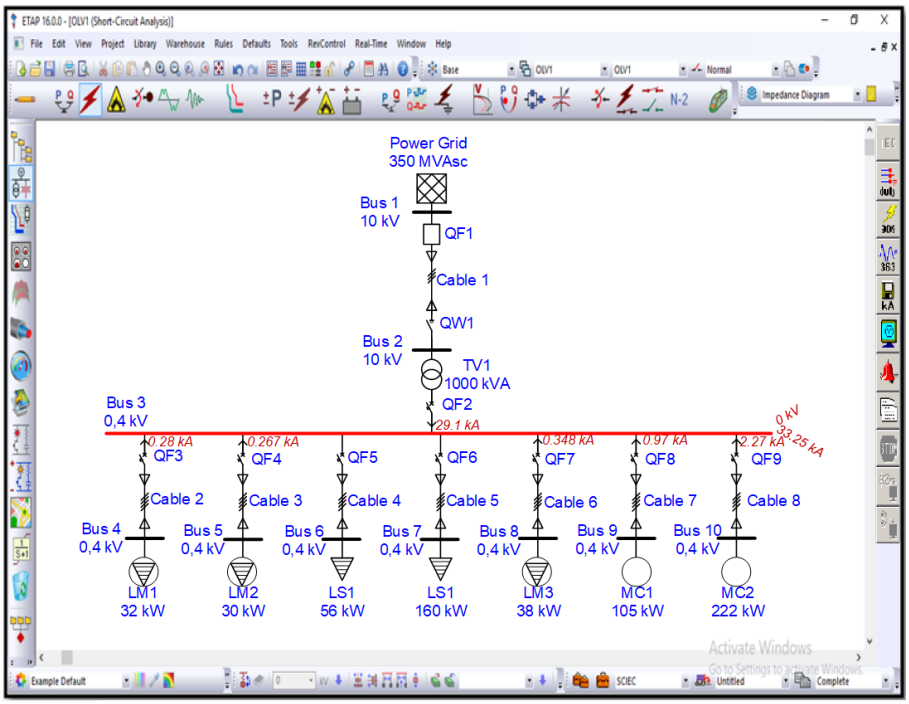

Рисунок 2 – Фрагмент результатів моделювання трифазного КЗ в низьковольтній розподільчій мережі

Short-Circuit Summari Report

3-Phase. LG, LL, LLG Fault Currents

Bus		3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			Line-to-Line-to-Ground Fault		
ID	kV	I''_k	i_p	I_k	I''_k	i_p	I_k	I''_k	i_p	I_k	I''_k	i_p	I_k
Bus 3	0.4	33.25	47.96	29.1	2.64	6.23	2.04	18.7	48.7	17.2	19.1	49.76	17.9

Рисунок 3 – Фрагмент звіту про аналіз короткого замикання із застосуванням методології стандарту IEC

Оскільки струм трифазного КЗ має найбільш істотний вплив на елементи СЕП, то для аналізу струму короткого із застосуванням методології стандарту ANSI/IEEE серії 37 увагу зосереджено саме на розрахунку струму трифазного КЗ. Для перевірки відповідності SCCR елементів струмам КЗ із застосуванням програмного забезпечення ETAP обчислено середньоквадратичне значення струму КЗ за ½ циклу (максимальне значення) та за 30 циклів (значення струму КЗ в усталеному аварійному режимі) (рис. 4).

Short-Circuit Summari Report

3-Phase Fault

Prefault Voltage = 100% of the Bus Nominal Voltage

Bus		½ Cycle			30 Cycle		
ID	kV	Real	Imag.	Symm Mag.	Real	Imag.	Symm Mag.
Bus 3	0.4	10.8	29.2	31.13	9.5	-26.9	28.52

Рисунок 4 – Фрагмент звіту про аналіз короткого замикання із застосуванням методології стандарту ANSI/IEEE

Застосування методології стандарту IEC або стандарту ANSI/IEEE вносить певні розбіжності в результати розрахунку струму КЗ, проте ці розбіжності не є істотними. За результатами аналізу короткого замикання із застосуванням методології стандарту IEC та стандарту ANSI/IEEE не виявлено невідповідностей характеристик електрообладнання струмам КЗ в промисловій низьковольтній мережі з асинхронним навантаженням.

Висновки. Основою для вибору електрообладнання, комутаційних апаратів та захисних пристроїв в НВ розподільчій мережі для забезпечення надійної роботи СЕП промислового підприємства є аналіз електромагнітних перехідних процесів, зокрема, визначення струму КЗ. Наявність в складі електроприймачів цеху асинхронного навантаження та технологічного обладнання з приводом від потужних асинхронних двигунів зумовлює необхідність врахування внеску струму двигунів електроприводу таких електроприймачів в рівні струму КЗ. Розгалуженість промислової НВ розподільчої мережі, необхідність розрахунку значення струму різних видів КЗ в багатьох точках СЕП, а також необхідність врахування внеску струму від електродвигунів робить процес розрахунку трудомістким. Застосування модуля «Short Circuit» програмного забезпечення ETAP, яке підтримує як методологію розрахунку струму КЗ європейського стандарту IEC 60909, так і методологію американського стандарту ANSI/IEEE серії C37, сприяє автоматизації процесу аналізу короткого замикання в СЕП промислового підприємства. Результатом роботи модуля «Short Circuit» є розрахунок значення струму для симетричного (трифазного) та несиметричних («фаза-фаза» та «фаза-земля») КЗ в заданих точках електричної мережі. Результати аналізу короткого замикання із застосуванням методологій, реалізованих в ETAP, засвідчили незначні розбіжності в результати розрахунку струму КЗ. Проте, ці розбіжності не мають впливу на результати виявлення невідповідності характеристик встановленого обладнання за SCCR струмам КЗ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. R. Chelluri, and M. D. Mohapatra, "Comparison of ANSI –IEC Short Circuit Methods", *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 8, Iss. 9, pp. 2182-2187, 2019.
2. R. Kamdar, M. K. Kirar, M. Kumar, and G. Agnihotri, "Short Circuit Analysis of an Industrial Distribution System", *Procceding of the Second International Conference on Advances in Computer, Electronics and Electrical Engineering – CEEE*, 2013, pp. 199-202.
3. І.В. Пантєлєєва, "Проблема координації рівнів струмів короткого замикання в енергосистемах", *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Т. 31(70), Ч. 2(1), С. 34-39, 2020.
4. 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.
5. S. Sankarakumar, S. Tamilselvan, S. S. Muthu, A. S. B. Krishnan, and M. Srinivasapandian, "Load Flow Analysis, Short Circuit Analysis, and Relay Protection Using ETAP", *International Journal of Advanced Research in Basic Engineering Sciences and Technology* (IJARBEST), Vol.7, Iss. 4, pp. 24-29, 2021.
6. A. Parmar, "Short-Circuit Analysis of Industrial Plant", *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, Vol. 5, Iss. 03, pp. 41-49, 2018.

7. 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. CIRED2007*, Sess. 3, ID 0562, 2007.
8. S. Rathor, Sumit, P. Bhavik, and P. Anil. "Short Circuit Analysis Case Study and Circuit Breaker Design", *In Procceding. International Conference on Innovative Science and Engineering Technology*, pp. 1–6, 2011.
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. 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.
11. K. S. Manu, C. S. Lakshmi, S. Purushotham, V. Shanmugasundaram, and R. Satheesh, "Short Circuit Analysis of Electrical Distribution System for Industry Application Using ETAP Software", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 09, Iss. 07, pp. 2732- 2739, 2022.
12. IEC 60909-0:2016 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents. IEC. 2016. 82 p.
13. ДСТУ IEC 60909-0:2007. Струми короткого замикання у трифазних системах змінного струму Ч. 0 : Обчислення сили струму (IEC 60909-0:2001, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 48 с.
14. 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.

REFERENCES

1. R. Chelluri, and M. D. Mohapatra, "Comparison of ANSI –IEC Short Circuit Methods", *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 8, Iss. 9, pp. 2182-2187, 2019.
2. R. Kamdar, M. K. Kirar, M. Kumar, and G. Agnihotri, "Short Circuit Analysis of an Industrial Distribution System", *Procceding of the Second International Conference on Advances in Computer, Electronics and Electrical Engineering – CEEE*, 2013, pp. 199-202.
3. I.V. Pantielieieva, "The problem of coordination of short current in power systems", *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, Vol. 31, № 1, pp. 34-39, 2020.
4. 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.
5. S. Sankarakumar, S. Tamilselvan, S. S. Muthu, A. S. B. Krishnan, and M. Srinivasapandian, "Load Flow Analysis, Short Circuit Analysis, and Relay Protection Using ETAP", *International Journal of Advanced Research in Basic Engineering Sciences and Technology* (IJARBEST), Vol.7, Iss. 4, pp. 24-29, 2021.
6. A. Parmar, "Short-Circuit Analysis of Industrial Plant", *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, Vol. 5, Iss. 03, pp. 41-49, 2018.
7. 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. CIRED2007*, Sess. 3, ID 0562, 2007.
8. S. Rathor, Sumit, P. Bhavik, and P. Anil. "Short Circuit Analysis Case Study and Circuit Breaker Design", *In Procceding. International Conference on Innovative Science and Engineering Technology*, pp. 1–6, 2011.
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. 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.
11. K. S. Manu, C. S. Lakshmi, S. Purushotham, V. Shanmugasundaram, and R. Satheesh, "Short Circuit Analysis of Electrical Distribution System for Industry Application Using ETAP Software", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 09, Iss. 07, pp. 2732- 2739, 2022.
12. IEC 60909-0:2016 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. Part 0: Calculation of currents. IEC. 2016. 82 p.
13. 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.
14. 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.

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

Analysis of electromagnetic transient processes in an industrial low-voltage distribution network with induction load. *The article is devoted to the issue of short-circuit analysis in the low-voltage network of the power supply system of an industrial enterprise. The analysis methodology is based on the recommendations of the IEC 60909 standard and the ANSI/IEEE C37 series standard, which regulate the calculation of short-circuit current for the selection and verification of switchgear and protective devices according to the level of short-circuit current. The Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) software was used as an analysis tool. Short-circuit analysis is performed in two stages: the first stages involves modelling the low-voltage distribution network of the industrial facility; the second stages involves the simulation of faults in the network. The modelling the low-voltage distribution network takes into account the features of the network configuration with inductions motors used in the technological process. The Short Circuit module of the ETAP software was used to calculate the short-circuit current on the bus of the distribution network. The performed analysis takes into account the induction motors contribution to the level of short-circuit current. The result of the analysis is the determination of symmetrical and asymmetrical short-circuit current values and the detection of inconsistency of the characteristics of the installed equipment with short-circuit currents. Analysis of short-circuit current using ETAP software provides the possibility of selecting switchgear and protective devices according to the level of short-circuit current and verify the correctness of the decisions made regarding the selection of low-voltage switchgear of the distribution network, which contributes to the design of a reliable power supply system for the facility.*
Keywords: short circuit analysis, short circuit current value, ETAP software.