

*О. В. ДЯЧЕНКО, Д. А. ГАПОН, Т. С. ДОНЕЦЬКА, С. В. ШВЕЦЬ, В. М. БАЖЕНОВ***ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕГРАЦІЇ ЦИФРОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ У ЕНЕРГОСИСТЕМУ**

Енергетична галузь перебуває на етапі масштабної цифрової трансформації, що зумовлена необхідністю підвищення ефективності та гнучкості енергосистеми. Одним із ключових елементів цієї трансформації є цифрові трансформатори, які забезпечують суттєве покращення контролю та управління енергопотоками. Вони дозволяють значно підвищити надійність, зменшити експлуатаційні витрати, втрати електроенергії та підвищити точність вимірювань. Завдяки цифровим трансформаторам можливим стає оперативний моніторинг стану обладнання, що сприяє своєчасному виявленню несправностей і зменшенню ризиків аварій. Впровадження цифрових трансформаторів базується на міжнародному стандарті IEC 61850, який забезпечує швидкий і надійний обмін даними між компонентами цифрової системи. Вони дозволяють значно зменшити витрати на побудову нових об'єктів та їх обслуговування, забезпечують дистанційну діагностику та можливість прогнозного технічного обслуговування. Цифрові трансформатори відіграють ключову роль у розвитку інтелектуальних мереж (Smart Grid), дозволяючи автоматизувати процеси розподілу електроенергії та оперативно реагувати на зміни навантаження. Вони також сприяють зменшенню негативного впливу на довкілля, оскільки оптимізоване керування енергопотоками дозволяє скоротити потребу у викопних джерелах енергії та мінімізувати втрати електроенергії під час її транспортування. Однією з найважливіших переваг цифрових трансформаторів є їхня здатність працювати у складі комплексних систем захисту, керування та енергоменеджменту, забезпечуючи високий рівень взаємодії між різними елементами енергетичної інфраструктури. Вони можуть інтегруватися із системами штучного інтелекту та машинного навчання, що дозволяє прогнозувати можливі несправності, оптимізувати режими роботи мережі та підвищувати загальну ефективність системи. Подальша інтеграція цифрових трансформаторів у енергосистему дозволить значно підвищити надійність і стійкість електромереж, сприятиме розширенню можливостей кібербезпеки, а також зробить управління електроенергетикою більш адаптивним і економічно вигідним у довгостроковій перспективі. У статті детально аналізуються переваги цифрових трансформаторів перед традиційними аналоговими рішеннями, зокрема їхня здатність зменшувати електромагнітні втрати, забезпечувати більш високу точність вимірювань і підвищувати рівень автоматизації управління електромережею. Також розглядаються економічні аспекти переходу до цифрових трансформаторів, потенційні виклики їх впровадження та стратегічні перспективи розвитку цієї технології.

Ключові слова: цифрові трансформатори, цифрова підстанція, енергетична трансформація, інтелектуальні мережі, енергосистема, кібербезпека, управління енергопотоками, моніторинг.

*O. DIACHENKO, D. GAPON, T. DONETSKA, S. SHVETS, V. BAZHENOV***PROSPECTS OF INTEGRATING DIGITAL TRANSFORMERS INTO THE ENERGY SYSTEM**

The energy sector is undergoing a large-scale digital transformation driven by the need to enhance the efficiency and flexibility of the energy system. One of the key elements of this transformation is digital transformers, which provide significant improvements in the control and management of energy flows. They allow for a substantial reduction in electricity losses, improve measurement accuracy, and ensure seamless integration of renewable energy sources into the grid. Thanks to digital transformers, it is possible to conduct real-time monitoring of equipment status, which helps in the timely detection of faults and reducing the risks of accidents. The implementation of digital transformers is based on the international standard IEC 61850, which ensures fast and reliable data exchange between all components of the energy system. They significantly reduce maintenance costs by providing remote diagnostics and the possibility of predictive maintenance. Digital transformers play a key role in the development of Smart Grids, enabling the automation of electricity distribution processes and the ability to quickly respond to load changes. They also help reduce the negative environmental impact, as optimized energy flow management reduces the need for fossil energy sources and minimizes electricity losses during transmission. One of the most important advantages of digital transformers is their ability to operate within complex energy management systems, providing a high level of interaction between various elements of energy infrastructure. They can integrate with artificial intelligence and machine learning systems, allowing for the prediction of potential failures, optimization of network operating modes, and improving the overall efficiency of the system. Further integration of digital transformers into the energy system will significantly enhance the reliability and resilience of power grids, contribute to the expansion of cybersecurity capabilities, and make electricity management more adaptive and cost-effective in the long term. The article provides a detailed analysis of the advantages of digital transformers over traditional analog solutions, particularly their ability to reduce electromagnetic losses, provide higher measurement accuracy, and increase the level of automation in grid management. Economic aspects of the transition to digital transformers, potential challenges of their implementation, and strategic prospects for the development of this technology are also discussed.

Keywords: digital transformers, digital substation, energy transformation, smart grids, energy system, cybersecurity, energy flow management, monitoring.

Вступ. Цифрові трансформатори (ЦТ) є важливим елементом сучасних електроенергетичних систем, які дедалі більше переходять до цифрового формату. Інноваційні підходи до вимірювальної техніки відіграють ключову роль у підвищенні ефективності, надійності та безпеки енергетичної інфраструктури. Впровадження ЦТ дозволяє зменшити похибки вимірювань, підвищити стійкість систем до електромагнітних впливів та оптимізувати експлуатаційні витрати.

Останні роки характеризуються стрімким зростанням уваги до цифрових вимірювальних технологій, що обумовлено необхідністю дистанційного контролю та автоматизованого аналізу

електроенергетичних процесів. Використання цифрових трансформаторів забезпечує розширені можливості діагностики, збору та обробки даних, що дозволяє здійснювати гнучке управління мережею та швидко реагувати на потенційні відхилення в роботі обладнання [1].

Забезпечення високої адаптивності електроенергетичних активів при одночасному зниженні експлуатаційних витрат є стратегічним викликом для операторів електричних мереж. У цьому контексті ЦТ стають невід'ємною складовою концепції цифрової підстанції, сприяючи її інтеграції в сучасну енергетичну екосистему [2].

Крім того, ЦТ струму рис. 1 та напруги рис. 2

© О. В. Дяченко, Д. А. Гапон, Т. С. Донецька, С. В. Швець, В. М. Баженов, 2025

сприяють реалізації концепції «Розумних мереж» (Smart Grids), забезпечуючи гнучке керування потоками електроенергії та сприяючи інтеграції відновлюваних джерел енергії.



Рис. 1. Цифровий трансформатор струму 3000/5A фірми Schneider Electric

Завдяки своїм перевагам, таким як компактність, зменшення витрат на обслуговування та висока точність вимірювань, вони поступово витісняють традиційні електромагнітні трансформатори.

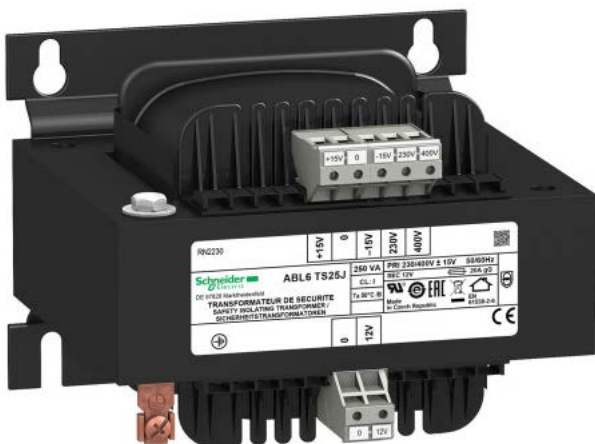


Рис. 2. Цифровий трансформатор напруги 230-400/12 В 250 ВА фірми Schneider Electric

Інноваційні рішення, що базуються на цифрових трансформаторах, дозволяють не лише підвищити ефективність роботи енергосистем, а й забезпечити відповідність сучасним стандартам кібербезпеки. Вони інтегруються в загальну цифрову інфраструктуру, відкриваючи нові можливості для автоматизації, аналізу великих масивів даних та впровадження прогнозованої аналітики.

Таким чином, ЦТ струму та напруги є невід'ємною складовою майбутніх електроенергетичних систем, забезпечуючи підвищення їхньої надійності, ефективності та стійкості до викликів сучасного технологічного середовища. Їхнє впровадження є важливим кроком на шляху до цифрової трансформації енергетики, що дозволяє адаптувати галузь до нових вимог і викликів

глобального енергетичного переходу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останнє десятиліття стало періодом активного розвитку цифрових трансформаторів, що привернуло увагу як українських, так і зарубіжних науковців. Вагомий внесок у дослідження цієї теми зробили такі вчені, як Holbach J., Rodriguez J., Brunner C., Bautista Flores, Гриб О. Г., Ляшенко В. І., Майсснер Ф., які зосереджували увагу на підвищенні точності вимірювань, адаптивності вимірювальних систем та їх інтеграції в цифрові електроенергетичні комплекси [3–7].

Розвиток цифрових технологій у вимірювальній техніці, зумовлений масштабною трансформацією енергетичного сектору, яка включає впровадження розподіленої генерації, інтеграцію відновлюваних джерел енергії та необхідність підвищення ефективності управління електричною мережею. Це вимагає нових підходів до моніторингу параметрів електроенергії, що стали можливими завдяки впровадженню ЦТ.

Серед ключових викликів, з якими стикається традиційна вимірювальна техніка, можна відзначити необхідність підвищення точності вимірювань у широкому діапазоні навантажень, зменшення впливу електромагнітних перешкод та покращення можливостей дистанційного контролю. Запровадження ЦТ дозволяє вирішити ці проблеми завдяки використанню електронних сенсорів, цифрової обробки сигналів та технологій оптичної передачі даних [8–11].

Глобальні тенденції у сфері цифровізації електроенергетики свідчать про зростаючу роль ЦТ у підвищенні ефективності енергосистем. Країни, що активно впроваджують ці технології, отримують конкурентні переваги у вигляді зниження експлуатаційних витрат, покращення адаптивності мереж та можливості швидкого реагування на зміни в енергетичному балансі [12; 13].

Метою цієї роботи є аналіз основних наукових підходів до впровадження ЦТ, а також оцінка їх перспектив у контексті глобальної цифровізації електроенергетичних систем.

Виклад основного матеріалу. ЦТ є ключовими елементами для забезпечення ефективної роботи цифрових підстанцій (ЦПС) рис. 3. Вони відрізняються від класичних аналогових трансформаторів тим, що не просто перетворюють фізичні величини, але й здійснюють безпосередню цифрову обробку сигналів. Ці пристрої є основою для вимірювання параметрів електричних мереж та забезпечують їх точне, швидке і безпечне управління в реальному часі [14–16].

ЦТ здійснюють кілька важливих функцій у рамках ЦПС:

- *перетворення аналогових сигналів у цифрові.* Завдяки вбудованим аналогово-цифровим перетворювачам (АЦП), ЦТ здійснюють точне перетворення значень струму та напруги в цифрову послідовність;

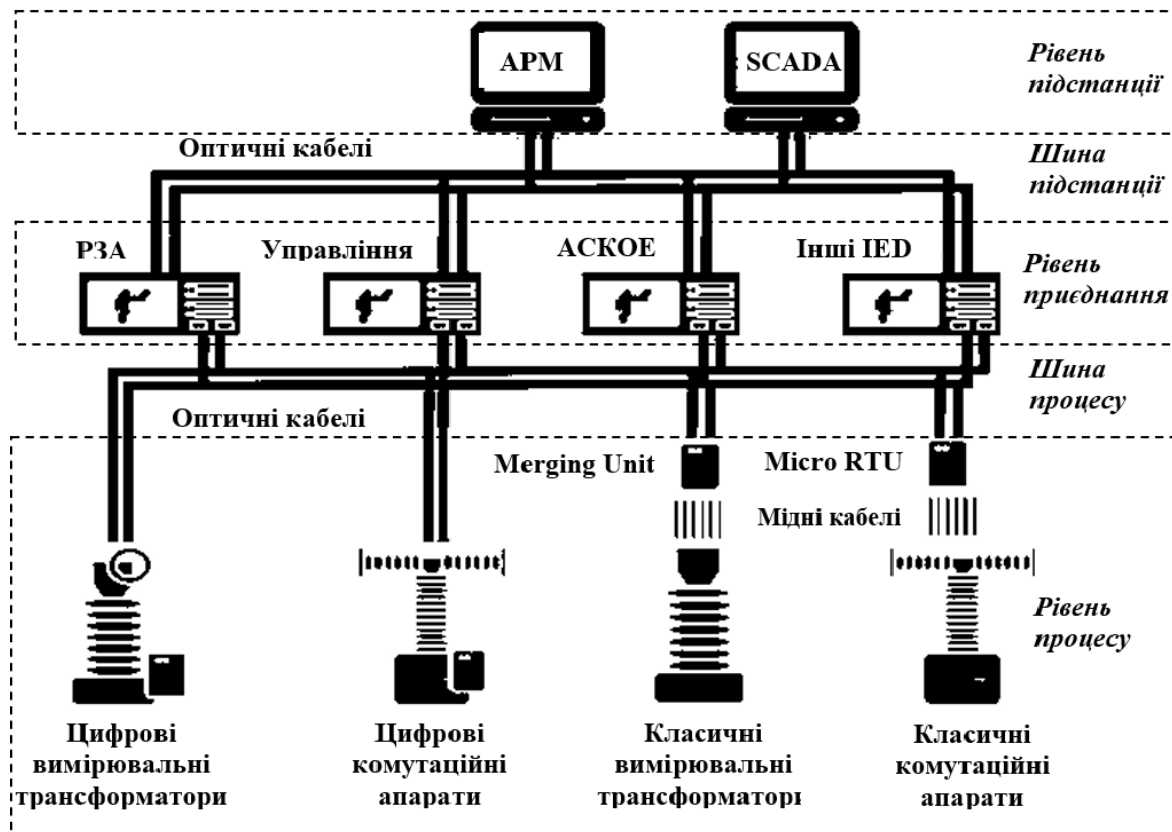


Рис. 3. Структура цифрової підстанції по міжнародному стандарту IEC 61850

- *інтерфейс з цифровими системами*. ЦТ передають вимірювальні дані через стандартизовані протоколи, такі як IEC 61850, IEC 62271-103, IEC 61869-2 та ін. Це забезпечує інтеграцію з іншими сучасними системами автоматизації та релейного захисту, що є важливим елементом для забезпечення надійності і швидкості реагування на аварійні ситуації;

- *моніторинг і діагностика*. Використання ЦТ дозволяє не тільки вимірювати струм і напругу, але й проводити аналіз стану обладнання, включаючи визначення температури, вологості та інших важливих параметрів, що, у свою чергу, дає змогу оперативно виявляти несправності та прогнозувати можливі аварії.

ЦТ мають низку переваг порівняно з класичними аналоговими:

- *зниження витрат на монтаж і експлуатацію*. Відсутність необхідності в численних кабелях і з'єднаннях між обладнанням значно знижує витрати на монтаж і зменшує складність системи. Зокрема, у повному обсязі виключаються проблеми розриву вторинних кіл трансформаторів струму та пов'язані з цим труднощі обслуговування та модернізації обладнання;

- *вища точність і надійність*. Цифрові перетворювачі забезпечують значно вищу точність вимірювань завдяки використанню високочастотних АЦП. Їх використання виключає необхідність додаткового перетворення сигналів напруги та струмів у цифрових приладах, результат вимірювання

не залежить від кількості та якості підключених приладів, що знижує похибки вимірів і забезпечує надійність роботи системи;

- *автоматизація*. Завдяки цифровим трансформаторам і сучасним протоколам обміну даними підстанції стають більш контрольованими та інформативними, що дозволяє зменшити кількість необхідного персоналу на місцях і знизити витрати на обслуговування;

- *швидкість обробки*. Завдяки цифровій обробці сигналів, інформація передається та обробляється в реальному часі, що знижує час реагування на зміни в параметрах мережі;

- *інтелектуальна самодіагностика*. Інтелектуальні ЦТ можуть здійснювати самодіагностику та надавати прогнози щодо стану обладнання, що дозволяє виконувати технічне обслуговування в прогнозовані моменти часу, зменшуючи ризик виникнення аварійних ситуацій;

- *відсутність насичення та ферорезонансу*. ЦТ не страждають від проблем, які характерні для аналогових систем, таких як насичення магнітного поля чи ферорезонанс;

- *забезпечення безпеки та кібербезпеки*. Передача даних оптичними каналами даних є абсолютно безпечною для людини та обладнання, на відміну від традиційних кіл напруги (100 В) та струму (1 А, 5 А). Крім того, цифрові системи обміну даними на підстанціях можуть бути оснащені сучасними методами захисту інформації, що підвищує рівень безпеки в умовах постійно зростаючих вимог до

захисту інфраструктури.

ЦТ є важливими елементами в архітектурі ЦПС. Вони входять до складу так званої «шини процесу», через яку здійснюється обмін даними між пристроями нижніх рівнів підстанції рис. 3. Цей обмін відбувається через протоколи, які забезпечують синхронізацію часу і передачу даних з високою швидкістю та надійністю. У випадку ЦТ, цифрові вимірювальні дані можуть бути безпосередньо передані до системи управління або релейного захисту [14; 16].

Шина процесу є основним компонентом для збирання та обміну даними на різних рівнях підстанції. Вона забезпечує зв'язок між первинними елементами мережі, такими як трансформатори і вимірювальні пристрої, та вторинними системами управління і захисту. Ця архітектура дозволяє здійснювати моніторинг та керування в реальному часі, що забезпечує високу надійність і оперативність роботи системи.

У контексті розвитку «розумних» мереж, ЦТ виконують важливу роль у забезпеченні автоматизованого моніторингу та управління розподілом електричної енергії. Ці мережі здатні здійснювати автоматичне виявлення та ліквідацію аварій, а також оптимізувати споживання енергії на основі даних, отриманих від цифрових трансформаторів. Завдяки цьому, «розумні» мережі здатні забезпечити більш ефективне використання ресурсів та зменшення втрат електричної енергії [17].

Перехід на ЦТ вимагає врахування особливостей існуючих мереж і поступового впровадження нових технологій. Для застарілих підстанцій цей процес може включати поетапну модернізацію обладнання, що дозволяє зберегти функціональність існуючих систем, таких як релейний захист і автоматика, і одночасно впроваджувати нові ЦТ і системи збору даних [18; 19].

ЦТ є важливими складовими частинами сучасних ЦПС. Вони забезпечують точне вимірювання параметрів електричної енергії, що є необхідним для належного функціонування систем управління, захисту та моніторингу.

ЦТ струму здатні здійснювати точне вимірювання струмів з високою роздільною здатністю та точністю, що забезпечує своєчасну реакцію на зміну режимів роботи підстанцій і трансформаторів. ЦТС, на відміну від традиційних трансформаторів, дозволяють реалізувати цифровий обмін даними між підстанцією і центральною системою управління, знижуючи вплив шуму та збурень на вимірювання.

ЦТ напруги працюють на принципі оптичного або аналогового цифрового перетворення. Вони дозволяють точно вимірювати напруги в реальному часі і передавати ці дані до системи автоматизації без необхідності додаткових перетворень або втрат точності.

Цей підхід забезпечує більш високий рівень інтеграції обладнання на цифровому рівні, знижуючи кількість необхідних з'єднань і зменшуючи можливі помилки, що можуть виникати при використанні

традиційних аналогових вимірювань.

Для обміну даними між елементами цифрових підстанцій використовуються стандарти, зокрема IEC 61850, який є основним стандартом для автоматизації підстанцій. Цей стандарт підтримує кілька різних типів комунікацій, зокрема протоколи SV, GOOSE і MMS, що дозволяють здійснювати швидкий та надійний обмін даними між усіма компонентами підстанцій [14].

Протокол SV (Sampled Values) використовується для передачі перетворених у цифрову послідовність значень безперервних сигналів, таких як струм, напруга, температура та ін. у реальному часі. Цей протокол дозволяє забезпечити мінімальну затримку передачі значень до усіх приладів захисту, автоматики, контролю та обліку.

Протокол GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) використовується для передачі дискретних сигналів у реальному часі, таких як спрацьовування захисту або комутація обладнання. Цей протокол дозволяє знизити час реагування на аварії і забезпечити швидку передачу інформації без необхідності транзиту через центральну систему управління.

Протокол MMS (Manufacturing Message Specification) використовується для обміну даними, вимірюваннями та командними сигналами. Завдяки цьому протоколу здійснюється обмін даними між різними пристроями на підстанції, а також з системами віддаленого моніторингу і контролю [14].

Майбутнє цифрових трансформаторів виглядає обнадійливо. З розвитком технологій вимірювання і обробки даних, а також удосконаленням протоколів комунікації, ЦТ будуть відігравати ще більшу роль у створенні інтегрованих, високоефективних і надійних енергетичних систем. Вони забезпечать можливість здійснювати дистанційне керування та моніторинг у реальному часі, що дозволить знижувати витрати на обслуговування та ремонт, а також забезпечити більш ефективне використання енергії.

Але незважаючи на численні переваги, впровадження цифрових трансформаторів і підстанцій має ряд технічних та організаційних викликів. Розглянемо деякі з них та розберемо можливі шляхи їх подолання:

- *вартість початкових інвестицій*. Одним з основних бар'єрів є висока вартість цифрових трансформаторів та інфраструктури, пов'язаної з їх інтеграцією в існуючі системи. Це особливо актуально для малих і середніх підприємств, які не можуть дозволити собі значні капіталовкладення на початковому етапі.

Для зниження фінансового навантаження на підприємства варто використовувати моделі фінансування, такі як лізинг або спеціалізовані кредити. Крім того, з розвитком технологій вартість компонентів, зокрема датчиків і сенсорів, знижуватиметься, що дозволить зменшити загальну вартість проєктів. Інвестиції в ЦТ можуть також окупитися за рахунок зниження витрат на обслуговування, а також на автоматизацію процесів,

що дозволяє зменшити потребу в персоналі та підвищити ефективність роботи;

- *необхідність кваліфікованих кадрів*. ЦТ вимагають наявності висококваліфікованих спеціалістів, здатних здійснювати їх установку, налаштування та обслуговування. Це може бути проблемою у регіонах з обмеженим доступом до таких кадрів.

Для вирішення цієї проблеми можна реалізовувати програми навчання та підвищення кваліфікації технічного персоналу. Багато компаній зараз проводять онлайн-курси та навчальні програми, щоб забезпечити кадри необхідними знаннями для роботи з новими технологіями. Враховуючи зростаючий попит на цифрові технології, університети та технічні навчальні заклади також починають включати спеціалізовані курси з автоматизації енергетичних систем, що допоможе зменшити дефіцит кваліфікованих кадрів у майбутньому;

- *проблеми сумісності*. Інтеграція цифрових трансформаторів у вже існуючі енергетичні мережі може бути ускладнена через різницю в стандартах, використовуваних у старих та нових системах. Це може спричинити проблеми сумісності між старими і новими компонентами, що може вимагати значних додаткових витрат на модернізацію та налаштування.

Щоб вирішити проблему сумісності, варто забезпечити інтеграцію цифрових трансформаторів з існуючими системами управління, використовуючи гнучкі і стандартизовані протоколи обміну даними, такі як IEC 61850. Крім того, важливо розробляти адаптовані рішення, які дозволяють інтегрувати нові технології з максимальною сумісністю до старих;

- *кібербезпека*. З розвитком ЦТ та автоматизації підстанцій зростають й ризики щодо кібербезпеки. Оскільки дані, що передаються між різними частинами енергетичної мережі, стають цифровими, існує ризик їх несанкціонованого доступу або маніпуляцій. Це може призвести до серйозних аварій, втрати даних або навіть кібератак [20].

Забезпечення надійного захисту даних є одним із головних завдань для розробників цифрових трансформаторів. Для цього застосовуються передові методи криптографії та аутентифікації, а також розробляються політики безпеки, що включають моніторинг і постійну оцінку вразливостей. Впровадження багаторівневої системи безпеки допоможе зменшити ймовірність успішних атак;

- *інтеграція з розумними мережами*. Один із перспективних напрямків розвитку цифрових трансформаторів – це інтеграція з розумними енергетичними мережами, або Smart Grids. ЦТ дозволяють зібрати велику кількість даних, що потім можуть бути використані для оптимізації роботи енергетичних систем в реальному часі.

Розвиток і впровадження Smart Grids стане важливим кроком для інтеграції цифрових трансформаторів у більш широкі енергетичні системи. У рамках цього процесу необхідно забезпечити максимальну взаємодію різних технологій, таких як

датчики, акумулятори, розподілені генеруючі джерела енергії та системи зберігання енергії. ЦТ можуть стати невід'ємною частиною цієї інфраструктури, дозволяючи автоматично регулювати параметри мережі, забезпечуючи стабільність і надійність.

Майбутнє ЦТ виглядає надзвичайно перспективним. Технології постійно розвиваються, і з кожним роком вартість компонентів знижується, що робить їх більш доступними для широкого кола споживачів. Окрім того, з появою нових матеріалів та удосконаленням сенсорних технологій можна очікувати ще більшу точність і надійність цифрових трансформаторів.

Модернізація енергетичних мереж із застосуванням цифрових технологій дозволить знизити енергетичні втрати, підвищити рівень автоматизації та забезпечити ефективний моніторинг і контроль. Завдяки цьому можна буде значно покращити якість постачання енергії, підвищити ефективність роботи підстанцій та зменшити ризик аварійних ситуацій.

Висновки. ЦТ є важливими елементами для розвитку сучасних цифрових підстанцій і розподільчих мереж. Використання таких трансформаторів дозволяє значно покращити надійність та ефективність функціонування енергетичних систем, зменшуючи потребу в традиційних електричних пристроях та обмежуючи вплив зовнішніх факторів, таких як ферорезонанс чи насичення. Перехід до цифрових технологій за допомогою таких міжнародних стандартів, як IEC 61850, оптимізує архітектуру підстанцій, що дозволяє знижувати витрати на монтаж і експлуатацію, а також сприяє швидшому виявленню неполадок і забезпеченню самодіагностики.

Особливо важливими є переваги в управлінні станціями і підстанціями завдяки можливості обробки великих обсягів даних у реальному часі. Підвищення спостережливості і керованості з боку операторів дозволяє ефективніше використовувати ресурси енергетичної інфраструктури, зменшуючи кількість виїздів на об'єкти і прискорюючи час реагування на аварійні ситуації. Впровадження ЦТ і пристроїв захисту дозволяє суттєво знизити загальні витрати на обладнання та дозволяє будувати компактні підстанції, зручні для монтажу в умовах обмеженого простору.

Важливо, що перехід до цифрових систем управління енергетичними об'єктами є поступовим процесом, що дозволяє інтегрувати нові технології в існуючі мережі без необхідності повної реконструкції інфраструктури. Це створює можливість для поетапного оновлення існуючих підстанцій і знижує фінансові витрати, що робить ці технології доступними для більш широкого впровадження. Загалом, ЦТ і ЦПС на основі стандартів IEC 61850 відкривають нові горизонти для розвитку енергетичних мереж і забезпечують значні переваги в плані економії, ефективності та надійності енергетичних систем у майбутньому.

Список літератури

- Гриб О. Г., Сендерович Г. А., Дяченко О. В., Карпалюк І. Т., Швець С. В. Аналіз перспектив розвитку цифрової енергетики в Україні. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2020. No. 1. P. 85–90. doi: 10.20998/2411-3441.2020.1.12
- Стан і перспективи розвитку технологій «інтелектуальних» електромереж, управління попитом та систем режимного управління в умовах розвитку поновлювальних джерел енергії у зарубіжній енергетичній сфері. Київ : НППР ОЕС України, відділ інформаційно-аналітичної роботи департаменту міжнародного співробітництва та євроінтеграції, 2018. 122 с.
- Holbach J., Rodriguez J., Wester C., Baigent D., Frisk L., Kunsman S., Hossenlopp L. Status on the first IEC 61850 based protection and control, multi-vendor project in the United States. *Power systems conference: advanced metering, protection, control, communication, and distributed resources (13–16 March 2007, Clemson, South Carolina, USA)*. IEEE, 2007. P. 254–277. doi: 10.1109/CPRE.2007.359907
- Brunner C. IEC 61850 & Smart Grids. *PAC World Magazine*. 2013.
- Bautista Flores J., Garcia-Colon V. R., Melendez Roman C. G., Robles Ramirez E., Rasgado Casique J. P. First multivendor 400 kV transmission line protection scheme using an IEC 61850-9-2 digital network for optical CT's and protection relays. *CIGRE Session (26–31 August 2012, Paris)*. Paris : CIGRE, 2012.
- Ляшенко В. І., Вишневецький О. С. *Цифрова модернізація економіки України як можливість проривного розвитку*. Київ : НАН України, Ін-т економіки пром. 2018. 252 с.
- Майснер Ф., Укердт Ф. *Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні: потенціал, перешкоди і рекомендації щодо економічної політики*. Берлін : BE Berlin Economics GmbH, 2010. 42 с.
- Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Швець С. В., Рудевич Н. В. Елементи цифрової енергетики в контролі стану мережі, що побудовані на вимірах допоміжних параметрів. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. Харків : НТУ «ХПІ». 2019. № 20 (1345). С. 58–64. doi:10.20998/2409-9295.2019.20.08
- Диджиталізація в енергетичному секторі. URL: <https://avenston.com/articles/digitalization-in-the-energy-sector/> (дата звернення: 28.03.2025).
- Аналіз зарубіжної практики впровадження автоматизованих систем управління технологічними процесами в електроенергетиці. Київ : Науково-технічний центр електроенергетики, відділ інформаційно-аналітичного забезпечення зарубіжною інформацією ВП НТЦЕ ДП «НЕК Укренерго», 2014. 114 с.
- European Smart Grids Technology Platform. URL: <http://ec.europa.eu> (дата звернення: 28.03.2025).
- Проект Плану відновлення України. Матеріали робочої групи «Енергетична безпека». Національна рада з відновлення України від наслідків війни. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/energy-security.pdf> (дата звернення: 28.03.2025).
- Дяченко О. В., Гапон Д. А., Карпалюк І. Т., Донецька Т. С. Аналіз стану та проблеми розвитку електроенергетики в Україні. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2024. No. 1. P. 83–87. doi: 10.20998/2411-3441.2024.1.12
- Гриб О. Г., Сендерович Г. А., Дяченко О. В., Швець С. В., Ярова І. С. Від класичної до цифрової підстанції. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2021. No. 1. P. 88–94.
- Стандарт підприємства загальні технічні вимоги до автоматизованих систем керування технологічними процесами підстанцій 220-750 кВ ОЕС України. Київ : НЕК Укренерго, 2018. 46 с.
- Сопель М. Ф., Денисюк С. П., Сподинський О. В., Цифрова підстанція. Переваги та особливості. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: зб. наук. пр.* Київ : ІЕД НАНУ. 2011. № 30. С. 14–17.
- Дяченко М. Д., Батора М. Р. Основні принципи створення цифрового високовольтного вимірювального трансформатору струму з абсолютною електричною міцною. *Вісник Приазовського Державного техн. ун-ту. Серія: Технічні науки*. Маріуполь : ПДТУ. 2021. № 43. С. 139–147. doi: 10.32782/2225-6733.43.2021.17
- Іванков В. Ф., Кокошин І. В. Чисельне дослідження магнітопружних деформацій в потужному трансформаторі. *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи*. Львів : НУ «ЛП». 2009. № 654. С. 88–92.
- Яськів В. І., Яськів А. В. Організація паралельної роботи імпульсних стабілізаторів постійної напруги на основі високочастотних магнітних підсилювачів. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. Київ : Інститут електродинаміки НАН України. 2018. Вип. 51. С. 81–87.
- Ткаченко В. В. Оцінка кібербезпеки Smart Grid систем. *Моделювання та інформаційні технології*. 2019. Вип. 89. С. 113–119.

References (transliterated)

- Hryb O. H., Senderovych H. A., Dyachenko O. V., Karpalyuk I. T., Shvets' S. V. Analiz perspektiv rozvytku tsyfrovoyi enerhetyky v Ukraini [Analysis of digital energy development prospects in Ukraine]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 1, pp. 85–90. doi: 10.20998/2411-3441.2020.1.12
- Stan i perspektivy rozvytku tekhnolohiy "intelektual'nykh" elektromerezh, upravlinnya popytom ta system rezhymnoho upravlinnya v umovakh rozvytku ponovlyuval'nykh dzhherel enerhiyi u zarubizhnyi enerhetychniy sferi [Status and prospects of development of technologies of "intelligent" power grids, demand management and regime management systems in the conditions of development of renewable energy sources in the foreign energy sphere]. Kyiv, NPTsR OES Ukrainy, viddil informatsiyno-analitychnoyi roboty departamentu mizhnarodnoho spivrobitnytstva ta yevrointehratsiyi Publ., 2018. 122 p.
- Holbach J., Rodriguez J., Wester C., Baigent D., Frisk L., Kunsman S., Hossenlopp L. Status on the first IEC 61850 based protection and control, multi-vendor project in the United States. *Power systems conference: advanced metering, protection, control, communication, and distributed resources (13–16 March 2007, Clemson, South Carolina, USA)*. IEEE Publ., 2007, pp. 254–277. doi: 10.1109/CPRE.2007.359907
- Brunner C. IEC 61850 & Smart Grids. *PAC World Magazine*. 2013.
- Bautista Flores J., Garcia-Colon V. R., Melendez Roman C. G., Robles Ramirez E., Rasgado Casique J. P. First multivendor 400 kV transmission line protection scheme using an IEC 61850-9-2 digital network for optical CT's and protection relays. *CIGRE Session (26–31 August 2012, Paris)*. Paris, CIGRE Publ., 2012.
- Lyashenko V. I., Vyshnevs'kyi O. S. *Tsyfrova modernizatsiya ekonomiky Ukrainy yak mozhlyvist' proryvnoho rozvytku* [Digital modernization of the Ukrainian economy as a breakthrough opportunity]. Kyiv, NAN Ukrainy, In-t ekonomiky promti Publ., 2018. 252 p.
- Mayssner F., Ukerdt F. *Rozvytok vidnovlyuvanykh dzhherel enerhiyi v Ukraini: potentsial, pereshkody i rekomendatsiyi shchodo ekonomichnoyi polityky* [Renewable energy development in Ukraine: potential, obstacles and policy recommendations]. Berlin, BE Berlin Economics GmbH Publ., 2010. 42 p.
- Hryb O. H., Karpalyuk I. T., Shvets' S. V., Rudevich N. V. Elementy tsyfrovoyi enerhetyky v kontroli stanu merezhi, shcho pobudovani na vymirakh dopomizhnykh parametrov [Elements of digital energy in the control of the state of the network, built on measurements of auxiliary parameters]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI". Seriya: Elektrichni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennya enerhiyi* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2019, no. 20 (1345), pp. 58–64. doi: 10.20998/2409-9295.2019.20.08
- Dydzhitalizatsiya v enerhetychnomu sektori [Digitization in the energy sector]. Available at: <https://avenston.com/articles/digitalization-in-the-energy-sector/> (accessed 28.03.2025).
- Analiz zarubizhnoyi praktyky vprovadzheniya avtomatyzovanykh system upravlinnya tekhnolohichnymy protsesamy v elektroenerhetytsi [Analysis of foreign practice of introduction of automated control systems of technological processes in electric

- power industry]. Kyiv, Naukovo-tehnichnyy tsentr elektroenerhetyky, viddil informatsiyno-analitychnoho zabezpechennya zarubizhnoyu informatsiyeyu VP NTTSE DP "NEK Ukrainerho" Publ., 2014. 124 p.
11. *European Smart Grids Technology Platform*. Available at: <http://ec.europa.eu> (accessed 28.03.2025).
 12. *Proekt Planu vidnovlennya Ukrainy. Materialy robochoyi hrupy "Enerhetychna bezpeka". Natsional'na rada z vidnovlennya Ukrainy vid naslidkiv viyny* [Project of the Recovery Plan of Ukraine. Materials of the "Energy Security" working group. The National Council for the Recovery of Ukraine from the Consequences of the War]. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/energy-security.pdf> (accessed 28.03.2025).
 13. Dyachenko O. V., Hapon D. A., Karpalyuk I. T., Donets'ka T. S. Analiz stanu ta problemy rozvytku elektroenerhetyky v Ukraini [Analysis of the state and problems of electricity development in Ukraine]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2024, no. 1, pp. 83–97. doi: 10.20998/2411-3441.2024.1.12
 14. Hryb O. H., Senderovych H. A., Dyachenko O. V., Shvets' S. V., Yarova I. S. Vid klasychnoyi do tsyfrovoyi pidstantsiyi [From classic to digital substation]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2021, no. 1, pp. 88–94.
 15. *Standart pidpryemstva zahal'ni tekhnichni vymohy do avtomatyzovanykh system keruvannya tekhnolohichnymy protsesamy pidstantsiy 220-750 kV OES Ukrainy* [Enterprise standard general technical requirements for automated process control systems of 220-750 kV substations of UES of Ukraine]. Kyiv, NEK Ukrainerho Publ., 2018. 46 p.
 16. Sopol' M. F., Denysyuk S. P., Spodyns'kyi O. V., Tsyfrova pidstantsiya. Perevahy ta osoblyvosti [Digital substation. Advantages and features]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy: zb. nauk. pr* [Proc. of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: collection of scientific papers]. Kyiv, IED NANU Publ., 2011, no. 30, pp. 14–17.
 17. Dyachenko M. D., Batora M. R. Osnovni pryntsyipy stvorenniya tsyfrovoho vysokovol'nogo vymiryuval'nogo transformatoru strumu z absolyutnoyu elektrychnoyu mitsnoyu [Basic principles of creating a digital high-voltage measuring current transformer with absolute electrical strength]. *Visnyk Pryazov's'koho Derzhavnoho tekhn. un-tu. Seriya: Tekhnichni nauky* [Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences]. Mariupol, PDTU Publ., 2021, no. 43, pp. 139–147. doi: 10.32782/2225-6733.43.2021.17
 18. Ivankov V. F., Kokoshyn I. V. Chysel'ne doslidzhennya mahnitoprzhnykh deformatsiy v potuzhnomu transformatori [Numerical study of magnetoelastic deformations in a powerful transformer]. *Visnyk Nats. un-tu "Lvivs'ka politekhnika". Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy*. [Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Electrical power and electromechanical systems]. Lviv, NU "LP" Publ., 2009, no. 654, pp. 88–92.
 19. Yas'kiv V. I., Yas'kiv A. V. Orhanizatsiya paralel'noyi roboty impul'snykh stabilizatoriv postiynoyi napruhy na osnovi vysokochastotnykh mahnitnykh pidsyluyuvachiv [Organization of parallel operation of pulse DC voltage regulators based on high-frequency magnetic amplifiers]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy* [Proc. of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine]. Kyiv, Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy Publ., 2018, issue 51, pp. 81–87.
 20. Tkachenko V. V. Otsinka kiberbezpeky Smart Grid system [Estimation of cybersecurity of Smart Grid system]. *Modelyuvannya ta informatsiyni tekhnolohiyi*. 2019, issue 89, pp. 113–119.

Надійшло (received) 29.03.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Дяченко Олександр Васильович (Diachenko Oleksandr) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7232-6585>; e-mail: diachenko.a.v@ukr.net

Гапон Дмитро Анатолійович (Gapon Dmytro) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>; e-mail: dmytro.hapon@khp.edu.ua

Донецька Тетяна Сергіївна (Donetska Tetiana) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0925-1001>; e-mail: iiuruslimovat@gmail.com

Швець Сергій Вікторович (Shvets Serhii) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3716-141X>; e-mail: se55sh32@gmail.com

Баженів Володимир Миколайович (Bazhenov Volodymyr) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-5450-8382>; e-mail: fider141@gmail.com