

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-2>

УДК 621.31

ОРОБЧУК БОГДАН

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0002-6375-2440>e-mail: orobchuk@tu.edu.te.ua**КОЗАК КАТЕРИНА**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0001-7267-8492>e-mail: kozakateryna@gmail.com**ТАРАСЕНКО МИКОЛА**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0001-6080-4367>e-mail: tarasenko_mykola@ukr.net**БАБЮК СЕРГІЙ**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0001-5318-8586>e-mail: sermuk@gmail.com**СТАСІВ АНДРІЙ**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0005-2966-5529>e-mail: astasiv@expres1.com

ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ПІДСТАНЦІЙ У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС НА БАЗІ ТРЕНАЖЕРНИХ КОМПЛЕКСАХ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Поняття «цифрова підстанція» в більшості випадків передбачає створення системи управління електричною підстанцією згідно стандарту МЕК 61850. Незважаючи на те, що цей стандарт прийнято ще в 2003 році, в Україні та світі є дуже мало об'єктів електроенергетики, управління на яких організовано на базі МЕК 61850. У статті автори наводять переваги, які може дати широкомасштабне застосування систем управління на основі МЕК 61850, проводиться аналіз причин того, чому цифрові системи управління ще не впроваджуються повсюдно і описується спосіб подолати перешкоди впровадженню подібних систем, зокрема в навчальний процес вищих навчальних закладів електроенергетичного напрямку. Згідно зі світовою практикою основним сучасним інструментом при підготовці будь-якого управлінського персоналу є віртуальні тренажери, що відтворюють характеристики об'єкта управління і штатний оперативний інтерфейс. Розробка нових ефективних підходів до вирішення завдань забезпечення надійності професійної діяльності персоналу можливо відтворити шляхом впровадження у процес навчання віртуальних тренажерів.

Ключові слова: моделювання, кола керування, тренажерний комплекс реального часу, цифрова підстанція, експериментальний стенд, МЕК 61850.

**OROBCHUK BOHDAN, KOZAK KATERYNA, TARASENKOMYKOLA,
BABIUK SERHII, STASIV ANDRII**

Ternopil National Ivan Puluj Technical University

IMPLEMENTATION OF DIGITAL SUBSTATIONS INTO THE EDUCATIONAL PROCESS BASED ON REAL-TIME TRAINING COMPLEXES

In the Ukrainian power industry, there is currently a large-scale development of digital devices implemented in accordance with the requirements of the IEC 61850 standard. These include, in particular, relay protection systems, digital current and voltage transformers, automated process control systems, and monitoring systems. These technologies offer numerous advantages and facilitate the creation of digital substations.

The implementation of digital substation technology is expected to significantly reduce costs associated with the design, commissioning, operation, and maintenance of energy facilities. Furthermore, the advanced capabilities of digital technologies will substantially enhance the level of automation. It is crucial to emphasize that the deployment of digital substations should be based on a thorough assessment of the reliability of digital systems, the configuration of execution devices, the regulatory framework, and the development of publicly accessible design tools.

The concept of a "digital substation" generally refers to the establishment of a substation control system in compliance with the IEC 61850 standard. Although this standard was adopted in 2003, there remain very few power facilities in Ukraine and globally where management is fully implemented based on IEC 61850.

This article highlights the advantages of large-scale implementation of IEC 61850-based control systems, examines the reasons why digital control systems have not yet been widely adopted, and proposes strategies to overcome barriers to their implementation. Particular attention is given to integrating such technologies into the educational process of higher institutions specializing in power engineering.

According to global best practices, virtual simulators that replicate the characteristics of controlled objects and standard operational interfaces are among the most effective modern tools for training management personnel. The development of innovative approaches to ensuring the reliability of professional activities can be achieved through the integration of virtual simulators into the training process.

Keywords: modelling, control circuits, real-time simulator, digital substation, experimental stand, IEC 61850.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.04.2025

Постановка проблеми

Тренажер з оперативних перемикачів використовується для навчання персоналу енергетичних об'єктів порядку проведення комутацій на будь-яких енергетичних об'єктах. Він може бути використаний для самопідготовки, атестації персоналу різного рівня, проведення змагань оперативного персоналу, підготовки до проведення складних перемикачів, на співбесіді прийому працювати [1].

За низкою критеріїв виділяють кілька класів комп'ютерних тренажерів. Зазначимо найпопулярніші з них:

- тренажери, які навчають моторним навичкам, широко застосовуються для навчання водінню різних транспортних засобів, стрільбі, зварювальним роботам, спортивним іграм тощо;

- тренажери, які навчають розпізнаванню образів, найбільш активно використовуються для підготовки фахівців у галузі медичної діагностики, навчання навичок синхронного перекладу, а також навчання операторів різних спеціальностей;

- тренажери, які навчають роботі за алгоритмом, найбільш поширені та призначені для навчання методик роботи з обладнанням, експлуатації складної техніки. Тренажер зазвичай має досить жорсткий сценарій навчання: той, хто навчається, користується повною свободою дій тільки в проміжках між контрольними ситуаціями, а правильне рішення (ситуація) завжди єдине, і від того, хто навчається, зрештою потрібно його точне відтворення;

- тренажери, які навчають поведінці в позаштатних (аварійних) ситуаціях, використовуються для тренування персоналу і операторів електростанцій, атомних станцій, хімічних виробництв, а також при навчанні управлінню об'єктами, що рухаються (літак, судно, автомобіль і т.п.).

Тренажер дозволяє моделювати енергооб'єкти різного рівня - від міських та розподільчих мереж до електростанцій та енергосистем. В якості інтерфейсу користувача тренажера використовується електронний макет, що представляє однолінійну схему енергооб'єкта або мережі електропостачання, зображення щитів управління, панелей релейних захистів і автоматики, а також анімованих зображень реального основного обладнання відкритого розподільчого пристрою, комірків комплектних розподільних пристроїв, моделей автоматизованих робочих місць і терміналів мікропроцесорних захистів [2].

Аналіз відомих результатів досліджень

В даний час одним із напрямків розвитку вітчизняної та світової електроенергетики є застосування на енергооб'єктах цифрових пристроїв релейного захисту, протиаварійної автоматики, контролерів автоматизованої системи керування технологічним процесом, систем комерційного обліку та контролю якості електроенергії. Простежується тенденція масового впровадження цифрових підстанцій, реалізованих за стандартами серії МЕК 61850, реалізуються технології управління «інтелектуальна мережа», що говорить про актуальність цієї теми.

Цифрова підстанція є підстанцією з високим рівнем автоматизації управління технологічними процесами, оснащена розвиненими інформаційно-технологічними та керуючими системами та засобами, в якій усі процеси інформаційного обміну між елементами підстанції, інформаційного обміну із зовнішніми системами, а також управління роботою підстанції здійснюються у цифровому вигляді на основі протоколів стандартів МЕК 61850, 61968/61970. Первинне силове обладнання підстанції та компоненти інформаційно-технологічних та керуючих систем орієнтовані на підтримку цифрового обміну даними. Відповідно, у цифровому вигляді тут передаються всі дані: вимірювання, діагностична інформація, команди керування.

Цифрова підстанція повинна відповідати наступним критеріям:

- дистанційне спостереження параметрів і режимів роботи обладнання та систем, необхідних для нормального функціонування без постійної присутності чергового та обслуговуючого експлуатаційного персоналу;

- забезпечення телеуправління обладнанням та системами для експлуатації ПС без постійної присутності чергового та обслуговуючого експлуатаційного персоналу;

- високий рівень автоматизації управління обладнанням та системами із застосуванням інтелектуальних систем управління режимами роботи обладнання та систем;

- дистанційна керованість усіма технологічними процесами як єдиного часу;

- цифровий обмін даними між усіма технологічними системами у єдиному форматі;

- інтегрованість у систему управління електричною мережею та підприємством, а також забезпечення цифрової взаємодії з відповідними інфраструктурними організаціями (з суміжними об'єктами);

- функціональна та інформаційна безпека при цифровізації технологічних процесів;

- безперервний моніторинг стану основного технологічного обладнання та систем у режимі онлайн з передачею необхідного обсягу цифрових даних, контрольованих параметрів та сигналів.

До складу цифрової підстанції входять наступні системи.

1) *Системи релейного захисту*. Релейний захист складає основу цифрової підстанції. Термінали релейного захисту із систем вимірювання беруть значення струму та напруги. На основі цих даних термінали відпрацьовують внутрішню логіку захисту. Термінали спілкуються між собою, щоб передавати інформацію про спрацьовані захисти, положення комутаційних апаратів і т.д. Також

термінали відправляють інформацію про поточні події на сервер автоматизованої системи управління технологічним процесом. Отже, можна виділити кілька типів зв'язку:

- *горизонтальний зв'язок* – спілкування терміналів між собою;
- *вертикальний зв'язок* – спілкування з сервером автоматизованої системи управління технологічним процесом.
- *вимірювання* – спілкування з вимірювальними пристроями.

2) Системи комерційного обліку електроенергії, які спілкуються лише з вимірювальними пристроями.

3) Системи диспетчерського управління. З сервера автоматизованої системи управління технологічним процесом та з сервера комерційного обліку дані частково мають надсилатися до диспетчерського пункту.

Це дуже спрощений перелік систем, що обмінюються даними у складі цифрової підстанції. Щоб об'єднати описані системи між собою та організувати горизонтальний та вертикальний зв'язок, а також передачу вимірювань, необхідно організувати шини, кожна з яких представляє собою окрему локальну обчислювальну систему на промислових Ethernet-комутаторах (рис. 1).

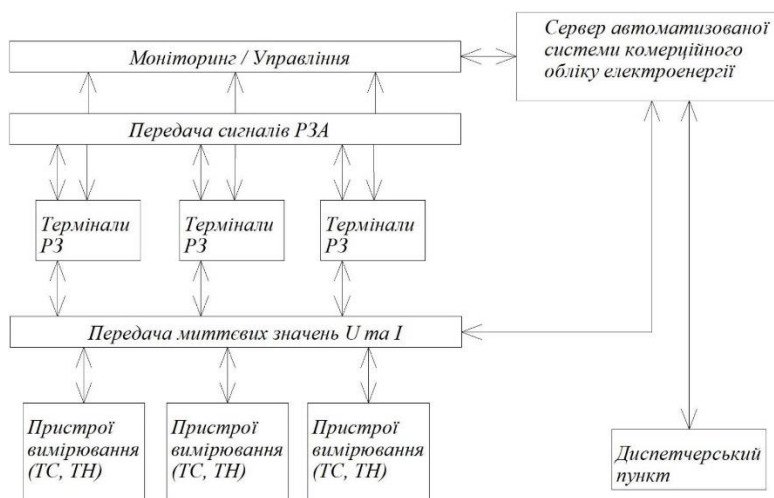


Рис.1. Структура електроенергетичного об'єкта відповідно до МЕК 61850

Термінали релейного захисту беруть участь і в горизонтальному, і вертикальному зв'язку, а також використовують вимірювання, тому вони підключаються до всіх шин. Через шину "Передача сигналів РЗА" термінали передають інформацію між собою. Тобто. тут реалізовано горизонтальний зв'язок. Через шину «Передача миттєвих значень напруги та струмів» реалізована передача вимірювань. До цієї шини підключаються пристрої вимірювання – трансформатори струму та напруги, а також термінали релейного захисту. Також до шини «Передача миттєвих значень напруги та струмів» підключається сервер автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії, який також забирає до себе вимірювання для обліку. А шина "Моніторинг / Управління" служить для вертикального зв'язку, тобто через неї термінали відправляють на сервер автоматизованої системи управління технологічним процесом різні події, і також сервер посилає управляючі команди на термінали. З сервера автоматизованої системи управління технологічним процесом дані надсилаються до диспетчерського пункту.

Термінали релейного захисту є невід'ємною частиною як горизонтального, так і вертикального зв'язку в межах цифрової підстанції, а також використовують дані вимірювань. Отже, ці термінали підключені до всіх комунікаційних шин.

Через шину «Передача сигналів релейного захисту та автоматики» термінали обмінюються інформацією один з одним, тим самим сприяючи горизонтальному зв'язку. Для передачі вимірювальних даних використовується шина «Передача миттєвих значень напруги та струму». До цієї шини підключаються вимірювальні прилади, такі як трансформатори струму і напруги, а також клема релейного захисту. Крім того, сервер автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії підключений до шини «Передача миттєвих значень напруги та струму» для доступу до даних вимірювань для цілей обліку.

Шина "Моніторинг/Контроль" призначена для вертикального зв'язку. Через цю шину термінали РЗА передають дані про події на сервер АСУ ТП, а сервер, у свою чергу, передає команди керування на термінали. Крім того, дані з сервера АСУ ТП передаються в диспетчерський центр для оперативного контролю та управління.

В умовах активного розвитку інформаційних технологій навчальні заклади повинні вирішити важливу задачу – підготувати спеціалістів, які зможуть активно інтегруватися в технологічний процес розвитку суспільства. Це обумовлено попитом інформатизованих і автоматизованих виробництв в фахівцях,

які зможуть якісно виконувати поставлені перед ними задачі. Також варто відмітити недостатній рівень підготовки майбутніх фахівців до виробничих умов ще під час навчального процесу [3].

Ступінь автоматизації управління процесами в енергосистемі постійно підвищується з моменту їхньої появи, що є цілком природною з урахуванням складності та швидкості цих процесів. Ще одним поштовхом до розвитку автоматизації систем управління процесами в енергосистемі став розвиток інформаційних технологій. Одним із етапів удосконалення систем управління об'єктами електроенергетики стала спроба формування системного підходу до опису об'єкта управління, способів обміну даними на об'єкті та всього процесу інжинірингу системи управління для нього. Результатом такого системного опису став стандарт МЕК 61850 [4, 5]. В подальшому підстанції, система управління на яких працює за цим стандартом, отримали назву «цифрових» через те, що обмін усіма даними на таких підстанціях передбачається організовувати в цифровому вигляді.

Хоча перша редакція стандарту запрацювала в 2003 році і мала декілька змін, у світі є небагато «цифрових підстанцій», а в Україні на даний час є лише декілька пілотних проектів [6, 7]. Це обумовлено тим, що технічні складності реалізації ідеї, закладені у стандарті, мають протиріччя з перевагами, що надає ця ідея. Насамперед всього, протиріччя обумовлені високою ціною рішень, які відповідають даному стандарту. У майбутньому ціна має знижуватися, проте цьому має передувати більш широке впровадження, яке, в свою чергу, має опиратися на успішні пілотні проекти. Отже, формується замкнене коло, гальмування розвитку технології, яке, можливо можна розв'язати рішенням, представленим у цій статті. Зокрема, основний акцент приділяється впровадженню цієї технології в навчальний процес вищих навчальних закладів електроенергетичного напрямку, що дозволить підвищити рівень підготовки майбутніх фахівців в цій галузі [8].

Виклад основного матеріалу

Під час підготовки цієї статті автори застосували методи системного інжинірингу.

Проблеми, які виникають при реалізації стандарту МЕК 61850. Створення стандарту було спрямоване на рішення існуючих проблем впровадження систем управління підстанціями:

- великий обсяг проектних та пусконаладжувальних робіт, що створює ризики зниження надійності (у основному через помилки персоналу) на кожному етапі життєвого циклу підстанції;
- складність створення систем із великою кількістю постачальників обладнання через відсутність універсального підходу до роботи з даними (опис об'єктів управління, способів обміну даними);
- складність масштабування системи управління, що веде до високої вартості внесення змін та додаткових ризиків зниження надійності;
- обмежені та дорогі засоби забезпечення резервування.

Основна ідея стандарту полягає в уніфікації опису об'єкта управління. Умовно цей опис можна розділити на такі групи:

- опис структури та обладнання підстанції, його властивостей та функціональних зв'язків;
- опис видів та способів передачі інформації між засобами керування підстанцією;
- формалізація опису двох попередніх пунктів за рахунок визначення специфічних правил та синтаксису мови розмітки.

Така уніфікація у майбутньому дозволить досягти максимального простого налаштування механізмів взаємодії пристроїв різних виробників та навіть їх взаємозамінності за принципом *"plug-and-play"*, оскільки структура даних та принципи роботи з ними у всіх виробників обладнання будуть однаковими.

Це, у свою чергу, відкриє значно ширші можливості для конкуренції та зниження вартості пристроїв керування об'єктами електроенергетики. Від впровадження систем керування на основі стандарту можна отримати наступні переваги:

- 1) високий рівень автоматизації проектування, налагодження та експлуатації системи можна отримати за рахунок стандартних способів опису даних. Така автоматизація суттєво підвищує надійність функціонування об'єктів електроенергетики;
- 2) за рахунок уніфікації знижується складність, вартість, зміни та розширення системи керування;
- 3) простота впровадження нових алгоритмів управління як з точки зору створення самих алгоритмів, так і з погляду розгортання їх у об'єктах. З'являється можливість впроваджувати інноваційні алгоритмічні рішення із меншими витратами;
- 4) широкі можливості резервування каналів передачі вимірювань та пристроїв управління при зниженні кількості самих пристроїв.

З огляду на те, що технологія не освоєна, надійність не підвищується і без широкомасштабного використання ця технологія залишається не освоєною, відповідно, вартість не знижується. На рис. 2 приведено оптимальний сценарій широкомасштабного впровадження цифрових підстанцій і на початковому етапі з'являється стандарт у вигляді «ідеальної» моделі майбутньої системи керування.

Дальше поступово з'являється обладнання, що відповідає вимогам стандарту та інжинірингові компанії, які володіють компетенціями створення проектів та впровадження систем керування на основі нового обладнання. Потім створюються пілотні проекти, за результатами успішної експлуатації

яких формуються вимоги до функціонування нових систем управління. Виникнення нормативної бази створює умови для широкомасштабного впровадження цифрових підстанцій. При широкомасштабному впровадженні створюються умови для конкуренції та зниження вартості нових систем. Також створюються умови для подальшого освоєння технології, підвищення надійності функціонування нових систем та вдосконалення нормативної бази. В Україні склалася інша ситуація, яка наведена на рис. 3.

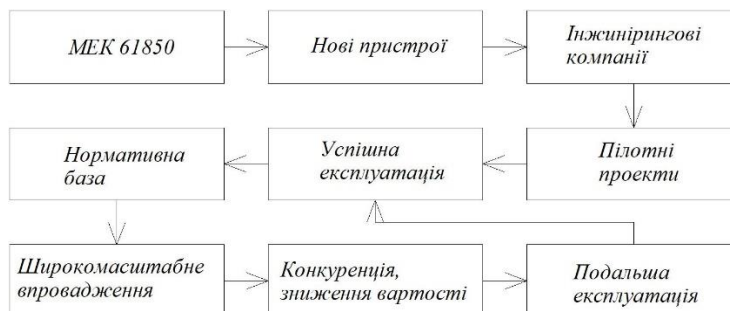


Рис.2. Оптимальний сценарій широкомасштабного впровадження цифрових підстанцій

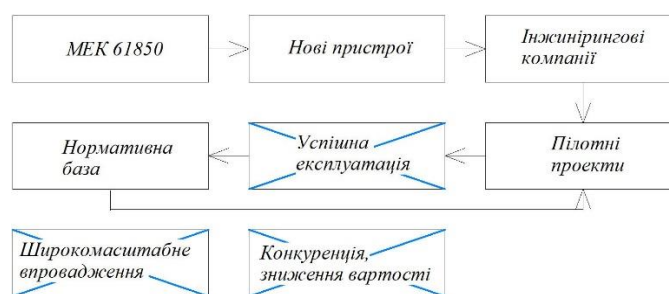


Рис.3. Реальна ситуація при впровадженні цифрових підстанцій

Незважаючи на наявність обладнання та компетентних інжинірингових компаній, лише обмежена кількість пілотних проектів була успішною [9-11]. Хоча деякі пілотні проекти є технічно життєздатними, вони не введені в дію через відсутність нормативно-правової бази, що перешкоджає призначенню відповідальності за потенційні аварії з новим обладнанням. Це підкреслює нагальну потребу у розробці комплексної нормативно-правової бази.

Хоча спроби створити таку структуру вже розпочато, вони передчасні через відсутність практичного досвіду роботи цих систем у реальному світі. Крім того, відповідальність за зниження високого ризику аварій при впровадженні нових технологій покладається на персонал, який обслуговує енергосистеми. Отже, необхідно забезпечити надійне функціонування нових систем управління перед їх розгортанням.

Цю впевненість можна досягти без ризику аварій в енергосистемі за допомогою симуляторів у реальному часі. Один із таких тренажерів успішно інтегрований у навчальний процес на кафедрі електричної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя [12].

На кафедрі електричної інженерії в лабораторіях «Систем управління електропостачанням» та «Автоматизованих систем диспетчерського управління» успішно завершено початковий етап розробки навчального тренажера централізованого диспетчерсько-технологічного центру контролю та управління на базі оперативного-інформаційного комплексу «Стріла».

Цей спеціалізований навчально-тренувальний комплекс включено в навчальний процес для проведення тренувань з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, забезпечуючи наочне уявлення про режим роботи енергосистеми. Симулятор дозволяє моделювати різні сценарії роботи електричної мережі під час практичних занять. Крім того, він підтримує протокол MEK 61850-5-101 для взаємодії з обладнанням і протокол MEK 61850-5-104 для інтеграції з оперативними інформаційними системами енергетичних компаній (системи верхнього рівня). Симулятор також дозволяє підключати та дистанційно керувати різноманітними приводами та обладнанням, підвищуючи його застосовність для реального навчання та керування системою.

Розроблено та впроваджено в навчальний процес цифрову модель (цифровий двійник) енергосистеми як спільний проект кафедри електричної інженерії та Тернопільського радіотехнічного конструкторського бюро «Стріла». Ця інноваційна технологія цифрового двійника дозволяє студентам віртуально виконувати операції керування електричним мережевим обладнанням у різних класах напруги, вирішуючи проблеми, пов'язані з доступом до реального обладнання та мереж у звичайних навчальних закладах.

Крім того, цифровий двійник полегшує дистанційне керування енергетичними об'єктами та підтримує інтеграцію мікропроцесорних систем керування електропостачанням провідних світових

виробників, у тому числі обладнання ABB, у систему SCADA лабораторного тренажера. Така інтеграція підвищує реалістичність і обсяг навчання, готуючи студентів до практичних завдань у сфері управління енергетичними системами.

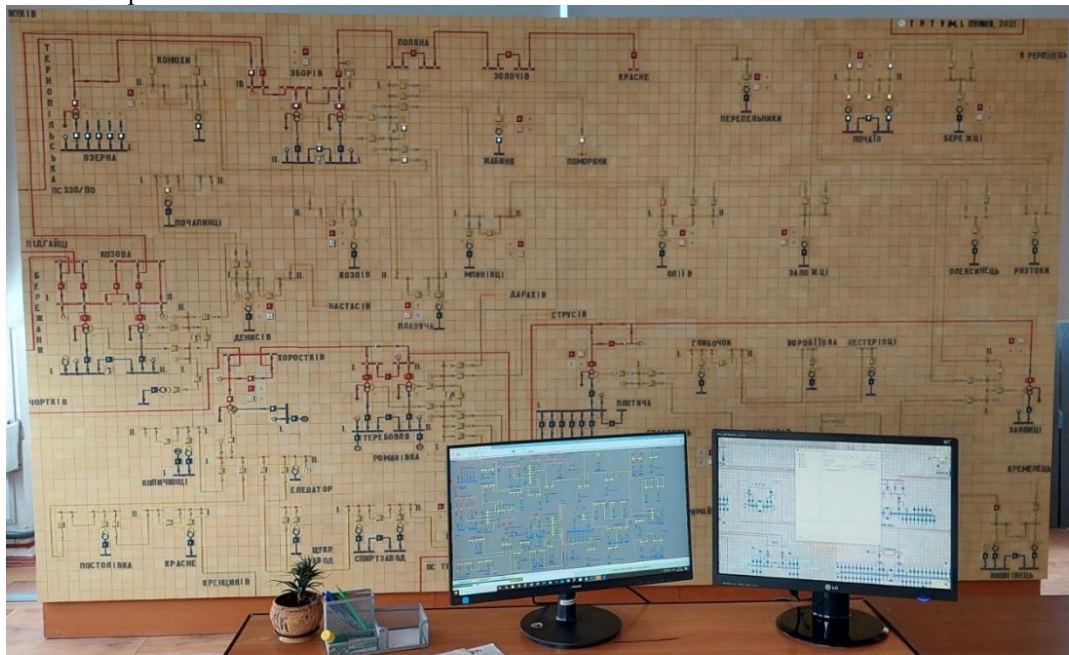


Рис.4. Центральний диспетчерський пункт навчального тренажера

Центральний диспетчерський центр навчального тренажера (рис. 4), побудованого на оперативно-інформаційному комплексі «Стріла», призначений для забезпечення роботи з 42 цифровими двійниками електричних підстанцій. Також забезпечується взаємодія з реальним обладнанням у навчальній лабораторії та дистанційне керування об'єктами енергетики, розташованими в інших приміщеннях кафедри. Ці можливості реалізовані за допомогою протоколів зв'язку MEK 61850-5-101 і MEK 61850-5-104, що забезпечує повну інтеграцію та взаємодію з сучасними системами управління енергією.

Застосування тренажерних комплексів реального часу

Варто відмітити, що на даний час моделювання на тренажерних комплексах реального часу починає отримувати широке застосування в електроенергетиці [13, 14]. На етапі розвитку комп'ютерних технологій з'являється можливість вирішувати системи диференціально-алгебраїчних рівнянь, що описують процеси в енергосистемі швидше, ніж останні протікають. Причому, розмірність енергосистеми, для якої можна здійснювати такі розрахунки, обмежена лише продуктивністю (кількістю процесорів) обчислювального комплексу.

Така швидкість розрахунку дозволяє моделювати «в реальному часі». При вирішенні систем диференціально-алгебраїчних рівнянь застосовують методи чисельного інтегрування. Вони застосовуються поняття «крок розрахунку». Крок розрахунку – це інтервал часу між поточним і наступним станом модельованої системи:

$$x_{k+1} = x_k + f(x_k) \cdot \Delta t, \quad (1)$$

де x_{k+1} – стан системи на момент часу $k+1$;

x_k – стан системи у момент часу k (попередній моменту часу $k+1$);

$f(x_k)$ – набір функцій, описує зміну стану системи при переході з x_k до x_{k+1} ;

Δt – крок розрахунку.

Реальний час при розрахунку досягається, коли умова (1) виконується за час менший, ніж Δt . Наприклад, якщо відомий поточний стан системи та набір функцій, що описують систему, то можна визначити її стан через 50 мкс. При цьому, якщо такий розрахунок можна виконати швидше ніж за 50 мкс, то результат розрахунку можна надавати в реальному часі. Саме таким чином працюють моделюючі тренажери реального часу.

Основна ідея застосування тренажерного комплексу реального часу для впровадження цифрових підстанцій полягає у створенні платформи, яка дозволяє створювати, тестувати та доопрацьовувати системи управління на основі MEK 61850 в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації, але без ризику для реальної енергосистеми. Концепція такої платформи представлена на рис. 5. У такій платформі вся первинна частина підстанції та фізичні процеси, пов'язані з нею, моделюються, а система керування на основі MEK 61850 будується із застосуванням реального обладнання.

Тренажерний комплекс реального часу дозволяє описувати підстанцію та прилеглу мережу, відтворюючи всі параметри обладнання та процеси, які є суттєвими для випробувань систем управління підстанціями.



Рис.5. Застосування тренажерного комплексу реального часу для впровадження цифрових підстанцій

Вимірювання з тренажерного комплексу у систему управління підстанцією надходять наступними способами:

- значення струмів та напруги від віртуальної енергосистеми надходять у аналоговому вигляді на підсилювач, який перетворює ці значення до величин, що відповідають значенням реальних трансформаторів струму (ТС) та напруги (ТН). Потім ці значення (умовно від ТС і ТН) надходять на перетворювач аналогових сигналів, який є частиною системи управління підстанцією;
- значення струмів та напруг від віртуальної енергосистеми, а також дискретні параметри та інші сигнали за допомогою віртуальних перетворювачів дискретних і аналогових сигналів упаковуються в пакетні повідомлення, що передаються Ethernet-мережею, і надходять до системи управління підстанцією локальною обчислювальною мережею. Віртуальні перетворювач дискретних і аналогових сигналів представляють собою спеціальні програмні модулі у комплексі реального часу, що дозволяють передавати інформацію за протоколами MEK 61850.

Таким чином, можна побудувати систему управління підстанцією на основі стандарту MEK 61850 і випробовувати її у різних ситуаціях, навіть каскадних аварійних подій, які виникають в енергосистемі без ризику для реальної енергосистеми. Більше того, випробування можна проводити в дуже стислі терміни в порівнянні з випробуваннями в реальній енергосистемі, коли потрібна для випробувань подія може не відбуватися протягом кількох років.

Структура моделюючого тренажерного комплексу для випробувань систем керування цифрових підстанцій, побудованого на базі інформаційно-оперативного комплексу «Стріла», приведена на рис. 6 [15].

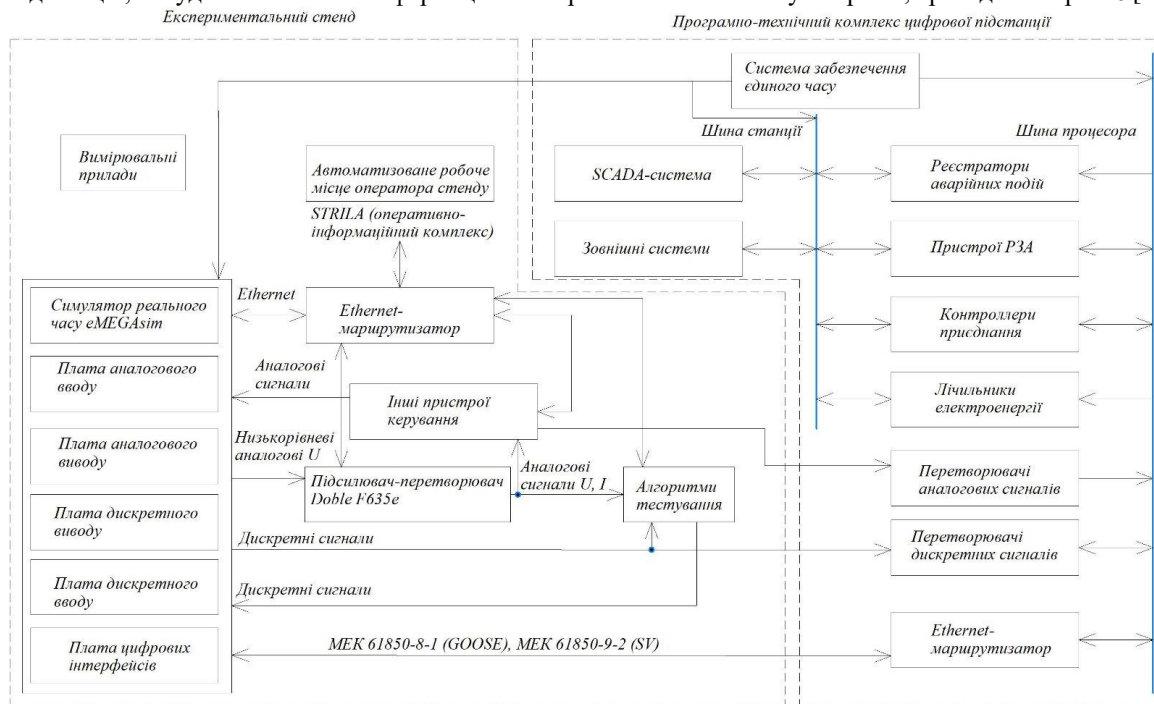


Рис.6. Структура моделюючого тренажерного комплексу для випробувань систем керування цифрових підстанцій

Структура тренажера умовно поділяється на дві частини:

- 1) експериментальний стенд, що містить моделюючий комплекс реального часу, підсилювачі-перетворювачі та інтелектуальні електронні пристрої для реалізації різних алгоритмів керування.

Також стенд включає автоматизоване робоче місце оператора стенду для налаштування та запуску різних сценаріїв функціонування підстанції та набір вимірювальних інструментів. Моделюючий комплекс підключено до системи забезпечення єдиного часу для забезпечення синхронізованих міток часу в вимірах, які поступають від віртуальних перетворювачів аналогових і дискретних сигналів;

2) *програмно-технічний комплекс цифрової підстанції*, який має в своєму складі пристрої релейного захисту і автоматики, контролери приєднань, перетворювач дискретних сигналів, перетворювач аналогових сигналів, лічильники електроенергії, реєстратори аварійних подій, підключені до шини процесу. Крім того, пристрої релейного захисту і автоматики, реєстратори аварійних подій, контролери приєднань підключені до шини станції для обміну інформацією між собою та передачі на верхні рівні управління і в SCADA-систему «Енергія» [16].

Перешкоди широкомасштабному впровадженню систем управління за стандартом MEK 61850 в основному полягають у високих ризиках впровадження нових технологій. При цьому високі ризики отримують внаслідок високої ціни і, відповідно, у першому наближенні переваги застосування нового підходу не є очевидними. Подолання первинних перешкод можливе з появою перших успішних пілотних проектів. Простим та дешевим способом створення успішного пілотного проекту є застосування розробленого тренажерного комплексу реального часу та впровадження його в навчальний процес. Адже за допомогою сучасних навчальних моделюючих тренажерних комплексів реального часу можна здобути спеціальні рішення для випробувань реальних цифрових систем керування.

Висновки

Основна мета застосування запропонованого моделюючого тренажерного комплексу реального часу – це створення повністю функціонального зразка системи керування на основі стандарту MEK 61850. Однак, розроблений тренажерного комплексу реального часу, а в подальшому реальна платформа на його основі може отримати кілька напрямів розвитку.

1. *Інжиніринг пілотних проектів цифрових підстанцій*. Як уже зазначалося, невпевненість експлуатаційного персоналу при впровадженні цифрових підстанцій у реальну енергосистему зрозуміла, а використання тренажерного комплексу реального часу може знизити таку невпевненість. При впровадженні цифрової системи управління на реальній підстанції можна змоделювати цю конкретну підстанцію та побудувати для неї систему керування відповідно до MEK 61850. Далі здійснюється всебічне тестування системи управління. Потім готова, зібрана та протестована система управління в тому ж вигляді переноситься на реальний об'єкт керування. Такий підхід може суттєво знизити ризики на етапі впровадження пілотних проектів.

2. *Навчання персоналу*. Розроблений тренажерний комплекс дозволяє навчати роботі з системою управління цифровою підстанцією в умовах максимально наближених до справжніх. Більше того, можливе завчасне навчання роботі з системою управління, яка буде поставлена для конкретного об'єкта управління (відповідно до вищезазначеного пункту).

3. *Дослідження надійності, оптимальної структури системи управління та ін.* Можливість експериментувати із системою управління у широкому діапазоні режимів, можливих на об'єкті управління дозволяє досліджувати надійність системи управління, живучість при каскадних подіях та необхідний ступінь резервування в залежності від сфери застосування. Також можливі дослідження структури комунікаційної системи, необхідної надмірності у ній. Можливі дослідження реалізованості різних архітектур побудови цифрової підстанції (децентралізованої, централізованої, гібридної). Також передбачається перспектива дослідження реакції окремих функцій управління та системи в цілому на втрату пакетів переданої інформації, затримок у передачі та ін.

4. *Розробка нормативної документації*. З урахуванням того, що система управління у складі представленої платформи функціонує в умовах, максимально наближених до реальних, досвід експлуатації систем керування в рамках платформи може стати основою для нормативних документів з проектування та експлуатації подібних систем. Принаймні першої редакції цих документів.

Застосування моделюючих тренажерних комплексів реального часу може суттєво знизити ризики та вартість впровадження пілотних проектів систем керування на основі стандарту MEK 61850.

Література

1. Debs, A., Hansen, C., & Wu, Y. C. (2001). Effective electricity market simulators. IEEE computer applications in Power, 14(1), 29-34.
2. Western Service Corporation – Innovation Simulation Solutions. (б. д.). <https://www.ws-corp.com/>
3. Orobchuk, B., Sysak, I., Babiuk, S., Rajba, T., Karpinski, M., Klos-Witkowska, A., ... & Gancarczyk, J. (2017, September). Development of simulator automated dispatch control system for implementation in learning process. In 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS) (Vol. 1, pp. 210-214). IEEE.
4. Holbach, J., Rodriguez, J., Wester, C., Baigent, D., Frisk, L., Kunsman, S., & Hossenlopp, L. (2007, March). Status on the first IEC61850 based protection and control, multi-vendor project in the United States. In 2007 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources (pp. 254-277). IEEE.
5. Case Studies. IEC 61850 at work / ABB Review Special Report, № 8, 2010.

6. Drubetska, T., Zemskyi, D., Shmelova, V., & Artemchuk, V. (2024). DEVELOPMENT OF DIGITAL SUBSTATION CONSTRUCTION TECHNOLOGIES. POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology, (1). <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297585>
7. Сопель, М. Ф., Денисюк, С. П., & Сподинський, О. В. (2011). Цифрова підстанція. Переваги та особливості. Праці Інституту електродинаміки НАН України.
8. Оробчук, Б. Я., Рафалюк, О. О., & Пискун, С. О. (2017). Впровадження систем телемеханіки керування енергооб'єктами в навчальному процесі. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 224-226.
9. Введена в експлуатацію новозбудована підстанція “Прибузька”. Хмельницька обласна військова адміністрація — Офіційне інтернет-представництво. (б. д.). Хмельницька обласна військова адміністрація — Офіційне інтернет-представництво. <https://www.adm-km.gov.ua/?p=1887>
10. Ukrinform. (2018, 27 червня). Перша в Україні інноваційна цифрова підстанція незабаром запрацює на Запоріжжі. Укрінформ - актуальні новини України та світу. <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/2489016-persa-v-ukraini-innovacijna-cifrova-pidstancia-nezabarom-zapracue-na-zaporizhzi.html>
11. Будівництво цифрової підстанції 110 кВ в Бучанському районі Київської області. <https://dream.gov.ua/ua/project/DREAM-UA-020924-CEBA0083/profile>
12. Orobchuk, B., Buniak, O., & Sysak, I. (2023). DESIGN OF AN INTELLIGENT SYSTEM TO CONTROL EDUCATIONAL LABORATORY EQUIPMENT BASED ON A HYBRID MINI-POWER PLANT. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 122(9).
13. Orobchuk, B., Babiuk, S., Buniak, O., Sysak, I., Kostyk, L., Nakonechniy, M., & Filiuk, Y. (2023). Development of an educational laboratory stand at the base fast-acting automatic reserve input. Вісник Тернопільського національного технічного університету, 112(4), 12-25.
14. Orobchuk, B., Sysak, I., Oleh, B., Babiuk, S., & Koval, V. (2023). Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. In ITTAP (pp. 672-683).
15. Automated system of dispatching control (ASDC) «Strila». Technical description and operating manual. – Ternopil Design Bureau of Radiocommunication «Strila». [in Ukraine]
16. SCADA-system «Energy». Technical description and operating manual. – Ternopil Design Bureau of Radiocommunication «Strila». [in Ukraine]

References

1. Debs, A., Hansen, C., & Wu, Y. C. (2001). Effective electricity market simulators. IEEE computer applications in Power, 14(1), 29-34.
2. Western Service Corporation – Innovation Simulation Solutions. (b. d.). <https://www.ws-corp.com/>
3. Orobchuk, B., Sysak, I., Babiuk, S., Rajba, T., Karpinski, M., Klos-Witkowska, A., ... & Gancarczyk, J. (2017, September). Development of simulator automated dispatch control system for implementation in learning process. In 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS) (Vol. 1, pp. 210-214). IEEE.
4. Holbach, J., Rodriguez, J., Wester, C., Baigent, D., Frisk, L., Kunsman, S., & Hossenlopp, L. (2007, March). Status on the first IEC61850 based protection and control, multi-vendor project in the United States. In 2007 Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources (pp. 254-277). IEEE.
5. Case Studies. IEC 61850 at work / ABB Review Special Report, № 8, 2010.
6. Drubetska, T., Zemskyi, D., Shmelova, V., & Artemchuk, V. (2024). DEVELOPMENT OF DIGITAL SUBSTATION CONSTRUCTION TECHNOLOGIES. POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology, (1). <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297585>
7. Сопель, М. Ф., Денисюк, С. П., & Сподинський, О. В. (2011). Тсыфрова пидстаниця. Переваги та особливості. Праці Інституту електродинаміки НАН України.
8. Оробчук, Б. Я., Рафалюк, О. О., & Пискун, С. О. (2017). Впровадження систем телемеханіки керування енергооб'єктами в навчальному процесі. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 224-226.
9. Введена в експлуатацію новозбудована підстанція “Прибузька”. Хмельницька обласна військова адміністрація — Офіційне інтернет-представництво. (б. д.). Хмельницька обласна військова адміністрація — Офіційне інтернет-представництво. <https://www.adm-km.gov.ua/?p=1887>
10. Ukrinform. (2018, 27 червня). Перша в Україні інноваційна тсыфрова пидстаниця незабаром запрацює на Запоріжжі. Укрінформ - актуальні новини України та світу. <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/2489016-persa-v-ukraini-innovacijna-cifrova-pidstancia-nezabarom-zapracue-na-zaporizhzi.html>
11. Будівництво тсыфрової пидстаниці 110 кВ в Бучанському районі Київської області. <https://dream.gov.ua/ua/project/DREAM-UA-020924-CEBA0083/profile>
12. Orobchuk, B., Buniak, O., & Sysak, I. (2023). DESIGN OF AN INTELLIGENT SYSTEM TO CONTROL EDUCATIONAL LABORATORY EQUIPMENT BASED ON A HYBRID MINI-POWER PLANT. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 122(9).
13. Orobchuk, B., Babiuk, S., Buniak, O., Sysak, I., Kostyk, L., Nakonechniy, M., & Filiuk, Y. (2023). Development of an educational laboratory stand at the base fast-acting automatic reserve input. Visnyk Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, 112(4), 12-25.
14. Orobchuk, B., Sysak, I., Oleh, B., Babiuk, S., & Koval, V. (2023). Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. In ITTAP (pp. 672-683).
15. Automated system of dispatching control (ASDC) «Strila». Technical description and operating manual. – Ternopil Design Bureau of Radiocommunication «Strila». [in Ukraine]
16. SCADA-system «Energy». Technical description and operating manual. – Ternopil Design Bureau of Radiocommunication «Strila». [in Ukraine]