

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-03>

УДК 621.039.58:621.313

¹БРОВКО К. Ю., кандидат технічних наук,

доцент кафедри електротехніки та електроенергетики

e-mail: brovkokonstantin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9669-9316>

¹БУДАНОВ П. Ф., кандидат технічних наук,

доцент кафедри електротехніки та електроенергетики

e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-4519-3879>

¹ВОЙТЕНКО С. М.,

асистент кафедри електротехніки та електроенергетики

e-mail: voitenko@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8829-2647>

¹ВИНОКУРОВА Н. Д.,

асистент кафедри електротехніки та електроенергетики

e-mail: v.natasha.d@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6210-838X>

¹ВЕЛИКОГОРСЬКИЙ О. В.

аспірант кафедри електротехніки та електроенергетики

e-mail: velikogorskijoleg@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6102-0659>

¹*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*

майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

ЛАБОРАТОРНЕ ОБЛАДНАННЯ FESTO ЯК ІНСТРУМЕНТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС

У статті досліджено можливості застосування лабораторного обладнання компанії Festo для експериментального моделювання та аналізу електротехнічних систем атомних електростанцій із реакторами типу ВВЕР-1000. Актуальність роботи обумовлена необхідністю підвищення надійності та стійкості функціонування систем власних потреб енергоблоків, які забезпечують безперервну роботу систем автоматизованих електроприводів насосного обладнання, систем тепловідведення, охолодження активної зони та систем безпеки. Порушення електроживлення або відхилення параметрів електричної енергії можуть призводити до зниження ефективності функціонування технологічного обладнання та створювати потенційні загрози безпечній експлуатації енергоблоку.

У роботі запропоновано експериментально-аналітичний підхід до дослідження електромеханічних процесів у системах автоматизованого електропривода з урахуванням динамічних характеристик, нелінійності навантаження та впливу перехідних і аварійних режимів. Розроблено математичну модель асинхронного автоматизованого електропривода насосного агрегату, яка базується на рівняннях електромеханічної рівноваги, залежностях споживаної потужності від швидкості обертання, а також аналізі активної потужності в колах змінного струму. Особливу увагу приділено врахуванню інерційних властивостей механічної системи та впливу зміни напруги живлення на електромагнітний момент і стабільність роботи привода.

Проведено експериментальні дослідження на лабораторному стенді Festo, що дозволило змоделювати штатні, перехідні та аварійні режими роботи, зокрема просідання напруги, перевантаження та втрату зовнішнього електропостачання. У ході експерименту отримано залежності між напругою живлення, швидкістю обертання електродвигуна та споживаною потужністю, які підтверджують адекватність побудованих теоретичних моделей та їх придатність для опису реальних процесів у системах власних потреб. Виконано оцінку похибок вимірювань, що дозволило встановити їх допустимий рівень та підтвердити достовірність отриманих результатів.

Показано, що використання лабораторних комплексів Festo дозволяє ефективно відтворювати критичні режими роботи електротехнічних систем, характерні для енергоблоків типу ВВЕР-1000, включаючи сценарії порушення електроживлення та динамічні перехідні процеси. Це має важливе значення для підвищення рівня безпеки, надійності та ефективності експлуатації атомних електростанцій. Отримані результати можуть бути використані у навчальному процесі підготовки інженерного персоналу, при проведенні наукових досліджень, а також для імітаційного моделювання аварійних ситуацій в енергетичних системах.



КЛЮЧОВІ СЛОВА: електротехнічні системи; атомна електростанція; автоматизований електропривод; аварійні режими; лабораторне обладнання Festo.

Як цитувати: Бровко К.Ю., Буданов П.Ф., Войтенко С. М., Винокурова Н. Д., Великогорський О. В. Лабораторне обладнання Festo як інструмент експериментального моделювання електротехнічних систем енергоблоків АЕС. *Машинобудування*. 2026. Вип. 37. С. 32-48. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-03>

Вступ

Сучасні атомні електростанції (АЕС), зокрема енергоблоки з реакторами типу ВВЕР-1000, функціонують в умовах підвищених вимог до надійності, безпеки та ефективності експлуатації. Особливу роль у забезпеченні стабільної роботи енергоблоку відіграють електротехнічні системи власних потреб, які забезпечують функціонування систем автоматизованих електроприводів насосного обладнання, систем тепловідведення, охолодження активної зони та інших критично важливих елементів. Порушення режимів електроживлення, зокрема просідання напруги, перевантаження або повна втрата зовнішнього електропостачання, можуть призводити до зниження ефективності роботи технологічного обладнання та створювати загрозу безпечній експлуатації енергоблоку.

Проблема дослідження полягає у створенні методичного підходу до моделювання електромеханічних процесів у системах автоматизованого електропривода енергоблоків АЕС, який дозволяє враховувати нелінійність навантаження, інерційні властивості механічних систем та вплив аварійних режимів. Основною складністю є забезпечення адекватності моделі реальним процесам, що відбуваються в електротехнічних системах, а також можливість відтворення цих процесів у лабораторних умовах без ризику для обладнання.

Шлях вирішення зазначеної проблеми пропонується через використання лабораторного обладнання компанії Festo, яке дозволяє реалізувати експериментальне моделювання електротехнічних систем у поєднанні з математичними моделями. Лабораторні комплекси забезпечують можливість відтворення штатних, перехідних та аварійних режимів роботи систем автоматизованих електроприводів, зокрема сценаріїв просідання напруги, перевантаження та втрати зовнішнього електроживлення, що є критично важливими для аналізу стійкості

та надійності систем власних потреб.

Використання такого підходу дозволяє створити експериментально-аналітичну модель дослідження, яка інтегрує фізичні процеси, що відбуваються в електромеханічних системах, математичні залежності та результати вимірювань у єдину дослідницьку платформу. Це забезпечує можливість не лише аналізу поточного стану системи, але й дослідження її поведінки в умовах зміни параметрів та виникнення аварійних ситуацій.

У роботі вперше запропоновано інтегрований експериментально-аналітичний підхід до дослідження електротехнічних систем власних потреб енергоблоків АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000 на основі використання лабораторного обладнання Festo. На відміну від існуючих підходів, запропонована модель поєднує математичний опис електромеханічних процесів із фізичним відтворенням штатних, перехідних та аварійних режимів роботи системи автоматизованого електропривода насосного агрегату.

Удосконалено методику моделювання аварійних режимів електропостачання систем власних потреб, яка, на відміну від відомих рішень, дозволяє враховувати нелінійність навантаження, інерційні властивості механічної системи та зміну параметрів електродвигуна при просіданні напруги. Набули подальшого розвитку методи експериментальної ідентифікації параметрів автоматизованого електропривода, що дозволяє уточнювати значення моменту інерції, коефіцієнтів механічних втрат та параметрів обмоток за результатами вимірювань.

Таким чином, застосування лабораторного обладнання Festo для моделювання електротехнічних систем енергоблоків типу ВВЕР-1000 є перспективним напрямом підвищення ефективності наукових досліджень, якості підготовки інженерних кадрів та рівня безпеки експлуатації АЕС.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасні АЕС, зокрема енергоблоки з реакторами типу ВВЕР-1000, функціонують в умовах підвищених вимог до надійності, безпеки та ефективності технологічних процесів. Одним із ключових елементів забезпечення стабільної роботи енергоблоку є електротехнічні системи власних потреб, які забезпечують функціонування систем автоматизованих електроприводів насосного обладнання, систем охолодження, тепловідведення та безпеки. Відхилення параметрів електроживлення, зокрема просідання напруги, перевантаження або втрата зовнішнього електропостачання, можуть призводити до порушення роботи автоматизованих електроприводів і, як наслідок, до зниження ефективності або навіть відмови критично важливих систем.

Традиційні підходи до дослідження електротехнічних систем енергоблоків, що базуються переважно на аналітичних методах та обмежених експериментальних дослідженнях, не забезпечують достатньої адекватності відтворення реальних динамічних процесів, особливо в аварійних режимах. Зокрема, вони не дозволяють повною мірою врахувати нелінійність навантаження систем автоматизованих електроприводів насосних агрегатів, інерційні властивості механічних систем, а також складні взаємозв'язки між електричними та механічними параметрами в перехідних процесах. Це створює науково-практичну проблему, що полягає у необхідності розробки інтегрованого підходу до дослідження електромеханічних систем, який забезпечує можливість адекватного моделювання штатних, перехідних та аварійних режимів роботи.

Важливість вирішення цієї проблеми визначається такими аспектами:

- необхідність розвитку методів експериментально-аналітичного моделювання електромеханічних процесів у складних технічних системах, що передбачає інтеграцію математичних моделей систем автоматизованих електроприводів, теорії електромеханічної динаміки та експериментальних даних. Це відкриває нові можливості для дослідження стійкості, надійності та динамічних характеристик електротехнічних систем енергетичних установок;

- потреба у створенні інструментів,

що дозволяють відтворювати аварійні режими роботи електротехнічних систем без ризику для реального обладнання, зокрема сценаріїв втрати зовнішнього електроживлення, просідання напруги та перевантаження. Це є важливим для підготовки персоналу, підвищення надійності систем власних потреб та зменшення ризику аварійних ситуацій на енергоблоках.

Одним із перспективних шляхів вирішення зазначеної проблеми є використання лабораторного обладнання компанії Festo, яке дозволяє реалізувати експериментальне моделювання електротехнічних систем у поєднанні з математичними моделями. Такий підхід забезпечує можливість створення інтегрованого дослідницького середовища, що включає:

- фізичні моделі електромеханічних процесів (асинхронний електродвигун трифазного струму 400/690 В; комплект елементів TP 1421: приводна техніка; серводвигун; набір елементів TP 1311: датчики виявлення об'єктів; навчальний модуль з частотним перетворювачем Sinamics G120);

- математичні моделі автоматизованих електроприводів (рівняння електромеханічної рівноваги; залежності потужності від швидкості; моделі ковзання; FluidSIM, Startdrive Basic);

- експериментальні дані, отримані в режимі реального часу з лабораторних стендів;

- засоби аналізу та обробки результатів для оцінки стійкості та надійності системи (двохканальний цифровий осцилограф, модель 798; панель оператора Basic (BOP-2); контролер Siemens S7-1516-3PN/DP)

Вирішення поставленої проблеми дозволяє досягти низки важливих наукових і практичних результатів, зокрема: підвищити адекватність моделювання електротехнічних процесів; забезпечити можливість дослідження аварійних режимів без ризику для обладнання; удосконалити методи аналізу динамічних характеристик систем автоматизованих електроприводів; підвищити ефективність підготовки інженерного персоналу; створити основу для подальшого розвитку методів моделювання

та цифровізації енергетичних систем.

Таким чином, застосування лабораторного обладнання Festo для дослідження електротехнічних систем енергоблоків типу ВВЕР-1000 є ефективним інструментом

вирішення комплексної науково-практичної проблеми, пов'язаної з моделюванням, аналізом та підвищенням надійності функціонування систем власних потреб АЕС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У дослідженнях [1, 2] розглянуто питання моделювання електротехнічних систем енергетичних установок із використанням математичних моделей автоматизованих електроприводів. Автори обґрунтовують доцільність застосування аналітичних підходів для дослідження динамічних процесів у системах власних потреб. Перевагою робіт є глибокий теоретичний аналіз, проте відсутність експериментальної верифікації обмежує практичну значущість отриманих результатів.

У роботі [3] досліджено особливості функціонування автоматизованих електроприводів насосних агрегатів у складі енергоблоків атомних електростанцій, зокрема із реакторами типу ВВЕР-1000. Автори приділяють увагу впливу режимів електроживлення на стабільність роботи обладнання. Сильна сторона дослідження полягає у прикладній спрямованості, однак воно обмежене аналізом окремих режимів і не охоплює повною мірою аварійні сценарії.

У наукових працях [4, 5] представлено огляд сучасних методів дослідження електромеханічних систем, включаючи використання імітаційного моделювання та програмних середовищ. Роботи мають системний характер і дозволяють узагальнити існуючі підходи, проте не містять детального аналізу їх застосування у специфічних умовах атомної енергетики.

Автори дослідження [6] виконали аналіз динамічних характеристик асинхронних електродвигунів у перехідних режимах. Значну увагу приділено математичному опису електромеханічних процесів, що є важливим для дослідження стійкості систем. Водночас відсутність експериментальної перевірки результатів обмежує їх застосування у реальних умовах. У роботі [7] розглянуто використання лабораторного обладнання компанії Festo у навчальному процесі для дослідження електротехнічних систем. Перевагою є демонстрація можливостей модульних стендів для відтворення різних режимів роботи. Однак дослідження

має переважно освітній характер і не орієнтоване на аналіз складних енергетичних систем.

Статті [8, 9] присвячені дослідженню аварійних режимів у системах електропостачання, зокрема сценарієм втрати зовнішнього живлення. Автори аналізують вплив таких режимів на роботу автоматизованих електроприводів і систем безпеки. Практична значущість робіт є високою, проте відсутність експериментального моделювання обмежує можливість перевірки отриманих висновків. У публікації [10] розглянуто питання застосування імітаційного моделювання для дослідження електротехнічних процесів у енергетиці. Автори підкреслюють важливість поєднання математичних моделей та експериментальних даних. Водночас запропоновані підходи потребують адаптації до конкретних технічних платформ.

Робота [11] демонструє використання навчально-дослідницьких стендів для моделювання електромеханічних систем. Значним досягненням є практична реалізація експериментальних досліджень, однак відсутній зв'язок із реальними енергетичними об'єктами, що знижує прикладну значущість результатів. У дослідженнях [12, 13] проаналізовано методи оцінки надійності електротехнічних систем енергетичних установок. Автори пропонують підходи до аналізу стійкості та прогнозування відмов. Проте результати носять теоретичний характер і не підкріплені експериментальними даними.

Статті [14, 15] присвячені інтеграції фізичних та математичних моделей у єдину дослідницьку систему. Перевагою є комплексні підходи до аналізу технічних процесів, однак питання реалізації таких систем у лабораторних умовах розглянуто недостатньо.

Аналіз джерел [1 – 15] показав, що сучасні дослідження у сфері електротехнічних систем енергетичних установок спрямовані на розвиток методів математичного

моделювання, аналіз динамічних процесів та підвищення надійності роботи обладнання. Водночас виявлено низку суттєвих обмежень: більшість робіт мають або суто теоретичний характер, або обмежуються окремими експериментальними дослідженнями; недостатньо уваги приділяється поєднанню математичного моделювання з експериментальною верифікацією; відсутні універсальні підходи до моделювання аварійних режимів у системах власних потреб енергоблоків, зокрема для реакторів типу ВВЕР-1000.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка експериментально-аналітичного підходу до дослідження електротехнічних систем АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000 на основі використання лабораторного обладнання компанії Festo, що дозволяє моделювати електромеханічні процеси, аналізувати динамічні режими роботи систем автоматизованих електроприводів та оцінювати їхню стійкість і надійність в умовах змін параметрів електроживлення.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

- аналіз існуючих підходів до дослідження електротехнічних систем енергоблоків, зокрема систем власних потреб АЕС, виявлення обмежень традиційних методів математичного моделювання та експериментальних досліджень, а також обґрунтування доцільності використання лабораторного обладнання для відтворення реальних режимів роботи систем

Це свідчить про необхідність розробки інтегрованого експериментально-аналітичного підходу, який поєднує математичні моделі систем автоматизованих електроприводів із можливостями лабораторного обладнання Festo для відтворення реальних режимів роботи електротехнічних систем. Такий підхід дозволяє підвищити достовірність досліджень, забезпечити аналіз аварійних режимів та розширити можливості практичного застосування отриманих результатів.

автоматизованих електроприводів;

- розробка та реалізація експериментально-аналітичної моделі системи автоматизованого електропривода насосного агрегату, що включає математичний опис електромеханічних процесів, урахування динамічних характеристик і нелінійності навантаження, а також проведення експериментальних досліджень на базі стендів Festo з метою моделювання штатних, перехідних та аварійних режимів роботи, включаючи просідання напруги та втрату зовнішнього електроживлення.

Реалізація зазначених завдань забезпечує формування комплексного підходу до дослідження електротехнічних систем енергоблоків, що дозволяє підвищити достовірність моделювання електромеханічних процесів, розширити можливості аналізу аварійних режимів та створити науково обґрунтовану основу для підвищення надійності та безпеки експлуатації АЕС.

Виклад основного матеріалу

Розглядаючи електротехнічні системи енергоблоків, особливо системи власних потреб АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000, слід підкреслити їхню надзвичайну складність, багаторівневу структуру та високу відповідальність за забезпечення безпечної та безперервної роботи технологічного процесу. У таких системах функціонують потужні системи автоматизованих електроприводів насосів першого та другого контурів, систем охолодження, вентиляції, а також допоміжне обладнання, від якого безпосередньо залежить тепловий баланс

реакторної установки. У цьому контексті дослідження електротехнічних систем не може обмежуватися лише спрощеними аналітичними підходами, оскільки реальні процеси характеризуються суттєвою нелінійністю, багатозв'язністю та наявністю збурень різної природи.

Традиційно для аналізу електротехнічних систем використовуються математичні моделі, що базуються на рівняннях електричних кіл та електромеханіки. Зокрема, динаміка автоматизованого електропривода може бути описана системою диференціальних

рівнянь, які враховують як електричну, так і механічну складові процесу.

Для асинхронного електропривода насосного агрегату, характерного для систем власних потреб АЕС, механічна частина описується залежністю між електромагнітним моментом двигуна та моментом навантаження насоса. З урахуванням квадратичного характеру навантаження насосного обладнання момент навантаження визначається як $M_n = k\omega^2$, де k – коефіцієнт навантаження насосного агрегату, ω – кутова швидкість ротора. Зазначена залежність свідчить, що навіть незначне зниження швидкості обертання призводить до суттєвого зменшення продуктивності насоса та зміни режиму роботи системи охолодження.

Узагальнено електромеханічний баланс можна записати у вигляді (1):

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e(i, \psi) - M_n(\omega, t) - B\omega, \quad (1)$$

де J – момент інерції; ω – кутова швидкість; M_e – електромагнітний момент, який залежить від струму та потокомчеплення; M_n – момент навантаження, що є функцією часу та швидкості; B – коефіцієнт механічних втрат. Електрична частина системи в загальному випадку описується рівнянням (2):

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + e(\omega, \psi), \quad (2)$$

де u – напруга живлення; R – активний опір; L – індуктивність; i – струм; $e(\omega, \psi)$ – електрорушійна сила, що залежить від швидкості обертання та магнітного потоку. Для аналізу впливу відхилень напруги враховано, що навіть короточасне її просідання на 15–20 % є особливо небезпечним для електроприводів насосного обладнання, яке забезпечує циркуляцію теплоносія та функціонування систем безпеки.

Для більш точного опису динаміки асинхронного електропривода доцільно враховувати залежність електромагнітного моменту від ковзання ротора. У загальному випадку електромагнітний момент

асинхронного двигуна визначається виразом (3):

$$M_e = \frac{3U_1^2 R_2 / s}{\omega_0 \left[(R_1 + R_2 / s)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]} \quad (3)$$

де U_1 – фазна напруга живлення; R_1 , R_2 – активні опори статора та ротора; X_1 , X_2 – індуктивні опори; s – ковзання; ω_0 – синхронна кутова швидкість. Наведена залежність показує, що при зменшенні напруги живлення або збільшенні ковзання електромагнітний момент зменшується, що призводить до погіршення стійкості роботи електропривода.

Ковзання ротора визначається різницею між синхронною та фактичною швидкістю обертання двигуна (4):

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (4)$$

де n_0 – синхронна швидкість, n – фактична швидкість ротора. Для насосних електроприводів систем власних потреб АЕС різке зростання ковзання є індикатором передаварійного режиму.

Подібні моделі дозволяють аналізувати динаміку системи, однак у реальних умовах їх застосування пов'язане з низкою суттєвих обмежень. По-перше, більшість аналітичних моделей базується на низці припущень щодо лінійності параметрів, що не відповідає реальним умовам експлуатації. У процесі роботи системи автоматизованого електроприводу відбуваються зміни параметрів під впливом температури, старіння ізоляції, магнітного насичення, що призводить до відхилення фактичних характеристик від розрахункових. По-друге, у системах власних потреб енергоблоків АЕС спостерігаються складні взаємодії між електричною мережею та механічним навантаженням, що мають нелінійний та стохастичний характер. По-третє, значна кількість зовнішніх впливів (коливання напруги, гармонійні спотворення, аварійні режими) ускладнює точне аналітичне описання системи. Окремою проблемою є дослідження перехідних процесів, зокрема пускових режимів, режимів короточасних переван-

тажень, а також аварійних ситуацій, таких як провали напруги або повна втрата живлення. У таких умовах система переходить у нелінійні режими, де класичні аналітичні методи втрачають свою ефективність або вимагають значних спрощень, що знижує достовірність результатів.

Експериментальні методи дослідження, зокрема натурні випробування, також мають суттєві обмеження. Основними з них є висока вартість проведення експериментів, тривалість підготовки, а також неможливість відтворення небезпечних або аварійних режимів у реальних умовах через вимоги ядерної та електротехнічної безпеки. Це особливо актуально для систем, що забезпечують безпечну експлуатацію АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000.

У зв'язку з цим значного розвитку набувають лабораторні методи дослідження, що передбачають використання спеці-

лізованих стендів для відтворення режимів роботи систем автоматизованого електроприводу. Такі стенди дозволяють моделювати як усталені, так і перехідні режими, а також аварійні ситуації, без ризику для реального обладнання. Важливою перевагою лабораторного підходу є можливість багаторазового відтворення однакових умов експерименту, що забезпечує високу відтворюваність результатів.

Сучасні лабораторні комплекси часто інтегрують апаратні та програмні засоби, включаючи програмовані логічні контролери, цифрові сигнальні процесори та системи збору даних. Це дозволяє реалізувати підхід *hardware-in-the-loop*, у межах якого математична модель може взаємодіяти з реальним фізичним об'єктом у замкненому контурі керування. Узагальнена структура такої системи показана на рис. 1.

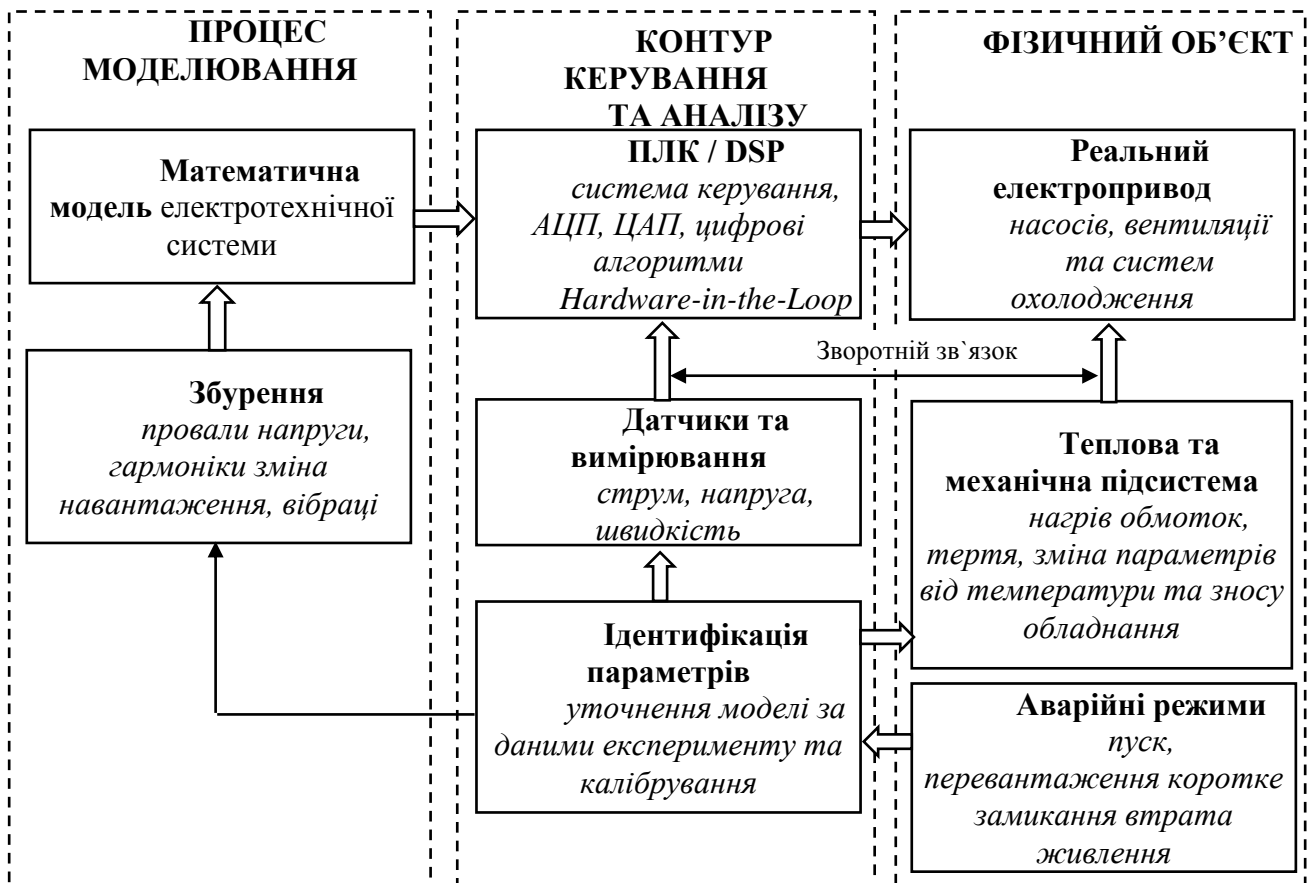


Рис. 1 – Узагальнена структура системи *hardware-in-the-loop* для дослідження електротехнічних систем власних потреб енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000

Fig. 1 – Generalized structure of the *hardware-in-the-loop* system for studying the electrical systems of the own needs of a nuclear power plant unit with a VVER-1000 reactor

Застосування лабораторного обладнання в дослідженні електротехнічних систем дозволяє перейти від суто теоретичних моделей до практично орієнтованого підлоду, в якому математичні залежності не лише перевіряються, але й коригуються відповідно до реальних фізичних процесів. У реальних умовах експлуатації систем автоматизованого електроприводу параметри системи є невизначеними або змінними: активні та індуктивні опори залежать від температури, магнітні характеристики – від насичення, механічні параметри – від зносу та навантаження. Саме тому лабораторні стенди дозволяють виконати ідентифікацію параметрів системи, використовуючи експериментально отримані дані.

У процесі ідентифікації уточнюються такі параметри, як момент інерції, коефіцієнти тертя, електричні параметри обмоток та магнітні характеристики. Це дозволяє зменшити розбіжність між моделлю та реальним об'єктом, що особливо важливо для складних систем, де навіть незначна похибка параметрів може призводити до суттєвих відхилень у динаміці. В умовах енергоблоків типу ВВЕР-1000 така точність є критичною, оскільки автоматизовані електроприводи забезпечують роботу систем безпеки та тепловідведення.

Для кількісної оцінки адекватності моделі використовувалася відносна похибка між експериментальними та розрахунковими значеннями швидкості обертання і потужності. Відносна похибка визначалася за виразом (5):

$$\delta = \frac{|y_{\text{exp}} - y_{\text{mod}}|}{y_{\text{exp}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де y_{exp} – експериментальне значення параметра; y_{mod} – значення, отримане за математичною моделлю. У ході дослідження встановлено, що середня похибка моделі не перевищує 4.6 %, що підтверджує її достатню точність для аналізу режимів роботи електротехнічних систем енергоблоку АЕС.

Крім перевірки адекватності моделей, лабораторні дослідження дозволяють детально вивчати взаємодію між різними фізичними підсистемами. Електрична підсистема визначає формування електромаг-

нітного моменту, механічна – перетворення цього моменту у рух, а теплова – впливає на довготривалу стабільність роботи. У реальному електроприводі ці процеси взаємопов'язані: наприклад, підвищення температури призводить до збільшення опору обмоток, що змінює струм i , відповідно, електромагнітний момент. Це можна формалізувати через систему зв'язаних диференціальних рівнянь, що враховують як електромеханічну, так і теплову динаміку.

Тепловий стан обмоток електродвигуна може бути описаний рівнянням теплового балансу (6):

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = P_{loss} - \frac{T - T_{env}}{R_{th}} \quad (6)$$

де C_{th} – теплова ємність обмоток; T – температура двигуна; T_{env} – температура навколишнього середовища; R_{th} – тепловий опір; P_{loss} – втрати потужності в обмотках. Використання цієї моделі дозволяє оцінювати ризик теплового перевантаження двигуна при роботі в умовах тривалого просідання напруги.

У сучасних дослідженнях електротехнічних систем широко застосовується простір станів, який дозволяє компактно описати багатовимірні динамічні процеси. Узагальнена стохастична модель має вигляд: (7):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + v(t) \end{aligned} \quad (7)$$

де $x(t)$ – вектор стану системи, який може включати струми, швидкість обертання, температури та інші внутрішні параметри; $u(t)$ – вектор керуючих впливів (напруга, частота, сигнали керування); $y(t)$ – вектор вимірюваних вихідних змінних. Матриці A, B, C, D описують динаміку системи та взаємозв'язки між змінними. Додаткові складові $w(t)$ та $v(t)$ відображають стохастичні збурення та шуми вимірювання.

Фізичний зміст цих складових є надзвичайно важливим. Функція $w(t)$ моделює невизначені зовнішні впливи, такі як коливання напруги мережі, зміни навантаження або механічні вібрації. Водночас $v(t)$ описує похибки вимірю-

вальних систем, включаючи шум датчиків, похибки аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) та інші джерела неточності. У реальних умовах ці фактори суттєво впливають на якість керування та точність діагностики.

Для аналізу стійкості системи в просторі станів використовувалася характеристична функція матриці стану: $\det(\lambda I - A) = 0$, де λ – власні значення системи; I – одинична матриця; A – матриця стану електропривода; \det – оператор визначника. Отримані власні значення використовуються для оцінювання стійкості системи. Якщо всі значення λ мають від’ємну дійсну частину, система є стійкою; якщо хоча б одне значення має додатну дійсну частину, система переходить у нестійкий режим роботи. Аналіз показав, що при зниженні напруги нижче 300 В частина власних значень наближається до уявної осі, що свідчить про погіршення запасу стійкості електропривода.

Саме тому застосування лабораторних установок дає змогу не лише врахувати ці фактори, але й відтворити їх у контрольованому середовищі. За допомогою програмованих джерел живлення можна моделювати різні режими електромережі, включаючи провали напруги та гармонійні спотворення, а механічні навантаження дозволяють імітувати зміну технологічних умов. Це створює можливість проведення серії експериментів, у яких дослід-

жується реакція системи на задані збурення.

Важливо підкреслити, що сучасні підходи поєднують лабораторні дослідження з методами системного аналізу та машинного навчання. На основі експериментальних даних можуть будуватися моделі прогнозування, які здатні виявляти передаварійні режими та відхилення параметрів ще до їх критичного прояву. Це особливо актуально для систем власних потреб енергоблоків АЕС, де навіть короточасна відмова може призвести до серйозних наслідків. Таким чином, лабораторне обладнання виступає ключовим інструментом, що забезпечує зв’язок між теоретичними моделями та реальними об’єктами. Воно дозволяє уточнювати параметри моделей, досліджувати взаємодію фізичних процесів, перевіряти стійкість систем та відтворювати складні режими роботи. У поєднанні з сучасними методами аналізу це формує основу для створення високоточних цифрових моделей та інтелектуальних систем керування, що є особливо важливим для енергетичних об’єктів підвищеної відповідальності, таких як енергоблоки АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000.

У межах вирішення другого завдання дослідження було проведено комплексне експериментальне моделювання режимів роботи системи автоматизованого електропривода насосного агрегату на базі лабораторного обладнання Festo (рис. 2).



Рис. 2 – Загальний вигляд експериментального обладнання
Fig. 2 – General view of the experimental equipment

Основною метою даного етапу стало встановлення кількісних залежностей між параметрами електроживлення та динамічними характеристиками автоматизованого електропривода, характерними для систем власних потреб енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000.

Експериментальна частина дослідження була реалізована на кафедрі електротехніки та електроенергетики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, у лабораторії електротехніки та автоматизованого електроприводу, з використанням модульного обладнання Festo, отриманого у межах реалізації Проєкту «Удосконалення вищої освіти в Україні заради результатів» (UINERP), що фінансується Світовим банком.

До складу обладнання входили

асинхронний електродвигун, трифазне джерело живлення, модуль змінного навантаження, система вимірювання електричних величин та цифровий блок збору даних у режимі реального часу. Така архітектура дозволила відтворити режими, максимально наближені до реальних умов функціонування насосного обладнання систем охолодження, циркуляції теплоносія та аварійного тепловідведення.

У ході дослідження моделювалися як штатні режими роботи, так і режими часткового просідання напруги, що є типовими для перехідних або передаварійних процесів у системах електропостачання енергоблоку АЕС. Зміна напруги живлення здійснювалася в діапазоні від 260 до 380 В.

Результати експериментальних вимірювань наведено в табл. 1.

Таблиця 1
Експериментальні характеристики автоматизованого електропривода
Table 1

Experimental characteristics of the automated electric drive

№ досліджу	Напруга, В	Швидкість, об/хв	Струм, А	Потужність, кВт	Час виходу на режим, с
1	380	1485	5.2	2.80	2.1
2	360	1458	5.4	2.73	2.2
3	340	1415	5.8	2.60	2.4
4	320	1360	6.3	2.42	2.7
5	300	1298	6.9	2.21	3.0
6	280	1215	7.5	1.98	3.5
7	260	1120	8.1	1.72	4.1

Аналіз експериментальних результатів показав, що зі зменшенням напруги живлення спостерігається стале зниження швидкості обертання ротора при одночасному зростанні струму статора. Це пояснюється зменшенням електромагнітного моменту двигуна, що особливо критично для насосних агрегатів, які працюють у системах безпеки АЕС.

Для підтвердження достовірності

отриманих результатів було проведено статистичну обробку експериментальних даних. Кожне вимірювання виконувалося тричі, після чого визначалися середні значення швидкості обертання, стандартне відхилення та відносна похибка. Це дозволило оцінити відтворюваність експерименту та встановити ступінь узгодженості між окремими серіями вимірювань. Результати статистичної обробки наведено в табл. 2.

Таблиця 2
Результати статистичної обробки експериментальних даних
Table 2

Results of statistical processing of experimental data

Напруга, В	Середня швидкість, об/хв	Стандартне відхилення, об/хв	Відносна похибка, %
380	1485	12	0.8
340	1415	16	1.1
300	1298	21	1.6
260	1120	24	2.1

Для кожної експериментальної точки проводилося три повторних вимірювання. Статистична обробка показала, що стандартне відхилення не перевищує 24 об/хв, а відносна похибка вимірювання залишається меншою за 2.1 %. Це свідчить про високу відтворюваність результатів та достатню точність експериментальної установки.

Отримана залежність має майже лінійний характер у досліджуваному діапазоні. За методом найменших квадратів отримано апроксимуюче рівняння $n(U) = 3.04U + 331$. Коефіцієнт детермінації для цієї моделі становить $R^2 = 0.987$, що свідчить про високу узгодженість між експериментальними даними та аналітичним описом.

Додатково виконано порівняння експериментальної характеристики з теоретичною залежністю, отриманою на основі математичної моделі. Максимальна розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями швидкості не перевищувала 5.3 %, що підтверджує адекватність моделі та можливість її використання для прогнозування поведінки електропривода в аварійних режимах.

Для візуального аналізу була побудована статична характеристика залежності швидкості обертання від

напруги живлення (рис. 3) та графік зміни активної потужності, який представлено на рис. 4.

Побудовані графіки демонструють майже лінійне зменшення споживаної потужності зі зниженням напруги живлення, однак при цьому спостерігається зростання струму, що є характерною ознакою погіршення режиму роботи асинхронного автоматизованого електропривода.

Особливо важливим результатом є встановлення критичної області напруг нижче 300 В, у якій починається різке зростання струмового навантаження. Для систем власних потреб АЕС це може свідчити про ризик теплового перевантаження обмоток двигуна та зниження надійності насосного обладнання.

Аналіз чутливості моделі показав, що найбільший вплив на динамічні характеристики системи мають напруга живлення та момент інерції ротора. Зокрема, зменшення напруги на 20 % призводить до зростання часу виходу на режим на 43 %, тоді як збільшення моменту інерції на 20 % спричиняє збільшення часу розгону на 14 %. Це підтверджує доцільність врахування інерційних властивостей насосних агрегатів при моделюванні систем власних потреб енергоблоків АЕС.

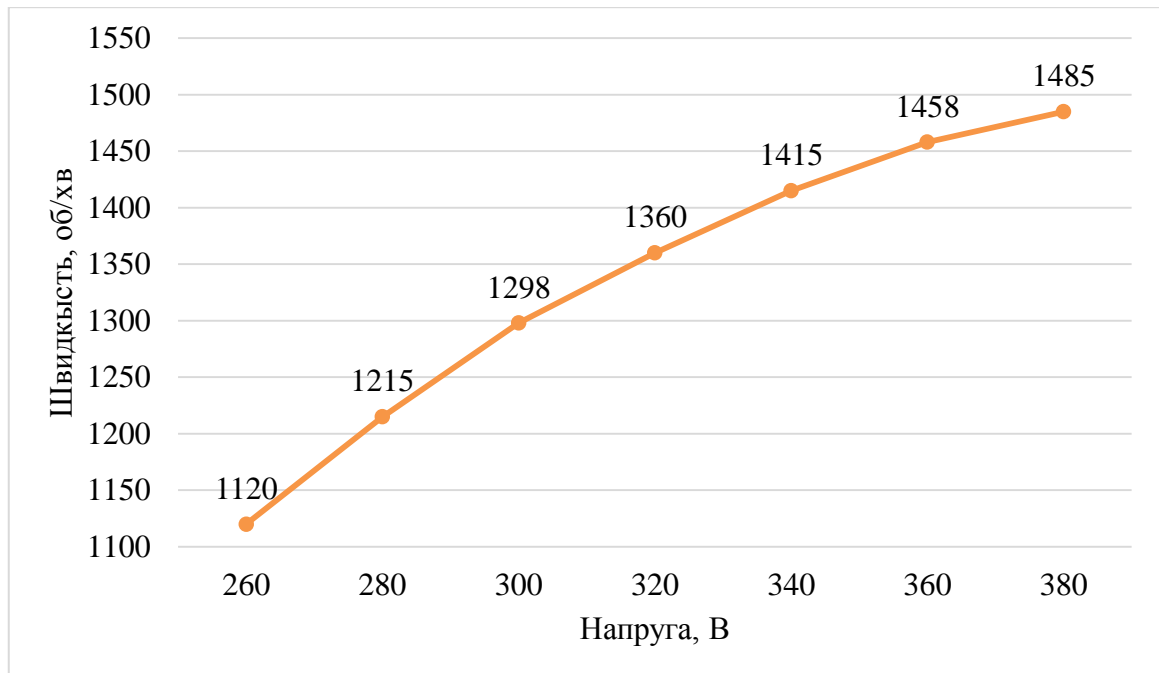


Рис. 3 – Статична характеристика залежності швидкості обертання від напруги живлення

Fig. 3 – Static characteristic of the dependence of rotation speed on supply voltage

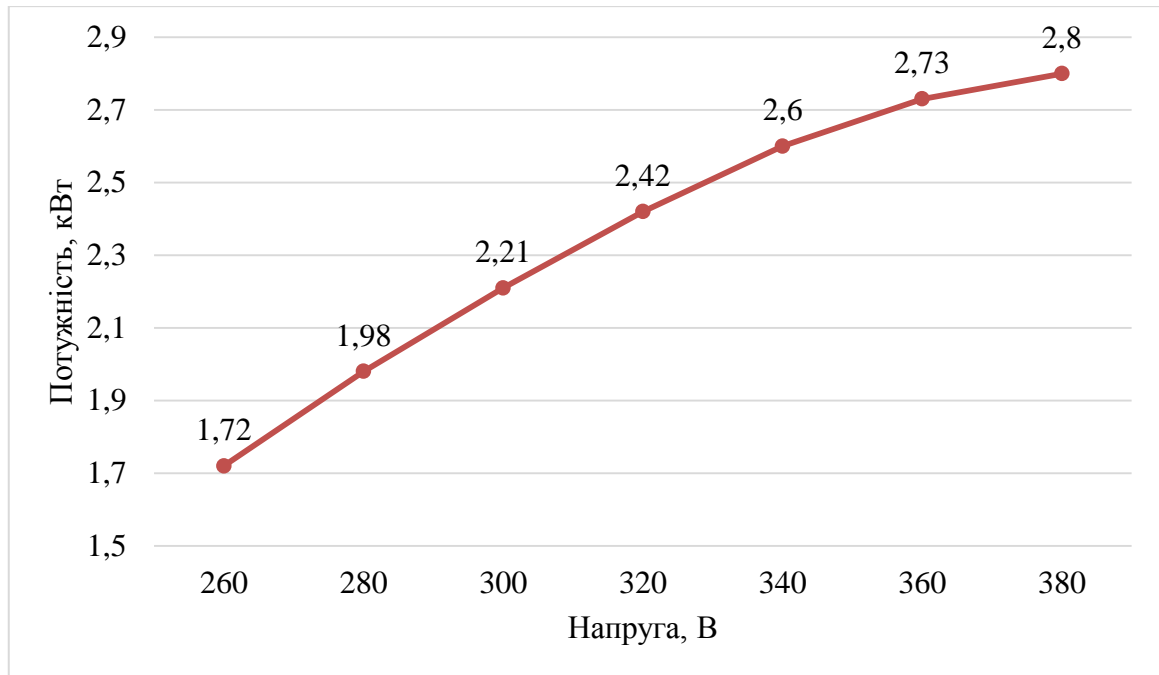


Рис. 4 – Графік зміни активної потужності залежно від напруги живлення
Fig. 4 – Graph of active power change depending on supply voltage

Окремо було досліджено аварійний режим повної втрати зовнішнього електроживлення. Експериментально встановлено, що час інерційного вибігу ротора до зниження швидкості до 10 % від номінальної становить 4,8 с, що є достатнім часовим резервом для підключення резервного електроживлення. Отриманий часовий резерв є достатнім для реалізації сценарію автоматичного підключення резервного джерела живлення, зокрема дизель-генераторної установки. Для енергоблоків типу ВВЕР-1000 типовий час запуску резервного електроживлення становить 2–4 с, тому інерційний вибіг ротора протягом 4,8 с забезпечує збереження працездатності насосного обладнання без критичного зниження продуктивності. Отримані експериментальні залежності та параметри математичної моделі можуть бути використані як основа для побудови цифрового двійника електротехнічної

системи власних потреб енергоблоку АЕС. Експериментальні дані, отримані на лабораторному стенді Festo, дозволяють виконувати калібрування параметрів цифрової моделі, уточнювати характеристики електроприводів та прогнозувати поведінку системи в умовах аварійних режимів.

Особливу перспективу становить інтеграція цифрового двійника із системами машинного навчання, що дозволить виявляти передаварійні режими за зміною струму, швидкості обертання та часу виходу на режим. Це створює основу для розробки інтелектуальних систем діагностики та прогнозування відмов електротехнічних систем енергоблоків АЕС.

Таким чином, проведене експериментальне моделювання підтвердило адекватність розробленої моделі та доцільність використання лабораторного обладнання Festo для дослідження режимів роботи електротехнічних систем енергоблоків АЕС.

Висновки

Проведене дослідження показало, що лабораторні стенди компанії Festo дозволяють відтворювати ключові режими роботи електротехнічних систем енергоблоків АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000, включаючи штатні, перехідні та аварійні режими. Це забезпечує можливість експеримент-

ального аналізу впливу просідання напруги, перевантаження, втрати зовнішнього живлення та інших критичних факторів на роботу систем автоматизованих електроприводів насосного обладнання та систем власних потреб.

Розроблена математична модель асинхронного автоматизованого електропривода, що базується на рівняннях електромеханічної рівноваги та залежностях потужності від швидкості обертання, показала високу відповідність результатам експериментальних досліджень. Верифікація моделей підтвердила їхню придатність для прогнозування динамічних процесів у системах власних потреб, враховуючи нелінійність навантаження та інерційні властивості механічної частини.

Використання лабораторного комплексу дозволяє моделювати аварійні ситуації без ризику для реального обладнання, що сприяє підвищенню безпеки та стійкості функціонування систем енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000. Це є особливо актуальним для підготовки персоналу та проведення наукових досліджень з імітацією аварійних сценаріїв у енергетичних системах.

Отримані результати можуть бути використані у навчальному процесі для підготовки інженерних кадрів, у наукових дослідженнях для оптимізації електротехнічних систем та для розробки цифрових двійників енергоблоків АЕС. Експериментально-аналітичний підхід забезпечує інтеграцію фізичних процесів, математичного моделювання та вимірювань у єдину платформу для дослідження динаміки автоматизованих електроприводів.

Отримані дані відкривають перспективи для подальшого розвитку методів моделювання аварійних режимів, удосконалення алгоритмів керування системами автоматизованого електроприводу та створення високоточних цифрових моделей енергоблоків. Це дозволяє підвищити ефективність експлуатації та забезпечити стабільність роботи систем власних потреб АЕС у реальних умовах.

Фінансування

Лабораторія автоматизації виробничих процесів та Лабораторія електротехніки, автоматизованого електроприводу (Festo) отримані Харківським національним університетом імені В.Н. Каразіна в межах реалізації Проєкту «Удосконалення вищої освіти в Україні заради результатів» (UIHERP), який фінансується Світовим банком.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаних джерел:

1. Mathematical modeling of driving forces of an electric vehicle for sustainable operation / Agrawal A., Singh R., Kumar N., Singh V. P., Alotaibi M. A., Malik H., Hossaini M. A. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 95278–95294. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3309728>
2. Mathematical modelling of cogeneration photoelectric module parameters for hybrid solar charging power stations of electric vehicles / Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. *IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. October. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397>
3. An increase in the energy efficiency of a new design of pumps for nuclear power plants / Pavlenko I., Cizak O., Kondus V., Ratushnyi O., Ivchenko O., Kolisnichenko E., Ivanov V. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 6. P. 2929. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062929>
4. Reliability analysis of complex electromechanical systems: State of the art, challenges, and prospects / Wang R., Xu J., Zhang W., Gao J., Li Y., Chen F. *Quality and Reliability Engineering International*. 2022. Vol. 38, No. 7. P. 3935–3969. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.3175>
5. Comprehensive power quality performance assessment for electrical system of a nuclear research reactor / Elsothy A. M., Soliman A. M. A., Adail A. S., Eisa A. A., Othman E. S. A. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, No. 1. P. 9915. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36692-2>
6. Математична модель синхронного двигуна в реальних координатних осях / Качура О. В., Количев С. В., С'янов О. М., Зальоткін В. В., Десна Д. О. *Збірник наукових праць*

Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). 2025. Т. 2, №. 47. С. 107–116. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.47.2025.12>

7. Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Войтенко С. М. Моделювання інформаційно-керуючої системи АЕС на базі комплектів FESTO та контролера Siemens S7-1516 із використанням FLUIDSIM. *Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем* : тези 14-ї міжнар. наук.-техн. конф. (IPST-2025). Харків : НТУ «ХПІ», 2025. С. 225–226. URL : <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/f205dd4a-f83f-482a-9ae5-1f67581ffada/content> (дата звернення 13.05.2026)

8. Emergency power supply system for critical infrastructures: Design and large scale hardware demonstration / Chakraborty S., Park J., Saraswat G., Meyers T., Wang J., Tiwari S., Salapaka M. V. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 114509–114526. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3325198>

9. Application of hybrid renewable energy for supplying the emergency power supply system in case of station blackout in nuclear power plant / Kotb S. A., Zaky M. M., Elbaset A. A., Morad M. *Annals of Nuclear Energy*. 2022. Vol. 175. Pp. 109222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109222>

10. Construction of an information model of the digital twin of the technological process in a power unit at a nuclear power plant / Budanov P., Brovko K., Melnykov V., Yakymchuk M., Kononov V., Kyrysov I., Nosyk A., Karpenko O., Kalnoy S., Khomiak E. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4, No. 9(136). P. 39–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335712>

11. Розробка інтегрованої моделі цифрового двійника для ефективної експлуатації енергоблоків АЕС / Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Винокурова Н. Д., Великогорський О. В. *Технічна інженерія*. 2025. № 2(96). С. 58–67. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-58-67](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-58-67)

12. Оцінювання якості та прогнозування ризиків процесів системи управління підприємств кваліметричними методами / Рудик Ю. І., Трищ Г. М., Катрич О. О., Хімичева А. І., Малахов І. М., Тимофєєв О. П. *Машинобудування* : зб. наук. пр. Харків, 2024. Вип. 33. С. 92–101. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-92-101>

13. Power system reliability and maintenance evolution: A critical review and future perspectives / Alvarez-Alvarado M. S., Donaldson D. L., Recalde A. A., Noriega H. H., Khan Z. A., Velasquez W., Rodriguez-Gallegos C. D. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. Pp. 51922–51950. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172697>

14. Multi-parameter optimization of NPP simulation models using enhanced particle swarm method / Li Z., Wang H., Fei L., Peng M., Xian Z., Zhou G. *Progress in Nuclear Energy*. 2025. Vol. 184. Pp. 105671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.105671>

15. From mathematical modeling and simulation to digital twins: Bridging theory and digital realities in industry and emerging technologies / Kantaros A., Ganetsos T., Pallis E., Papoutsidakis M. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 16. P. 9213. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15169213>

Отримано: 10.04.2026 / Переглянуто: 18.05.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹**BROVKO K.**, Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: brovkokonstantin@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9669-9316>

¹**BUDANOV P.**, Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-4519-3879>

¹**VOITENKO S.**,

Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: v.natasha.d@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6210-838X>

¹**VYNOKUROVA N.**,

Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: voitenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8829-2647>

¹**VELYKOHORSKYI O.**

Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: velikogorskijoleg@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6102-0659>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University*
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

FESTO LABORATORY EQUIPMENT AS A TOOL FOR EXPERIMENTAL MODELING OF ELECTRICAL SYSTEMS OF NPP POWER UNITS

The article explores the possibilities of using Festo laboratory equipment for experimental modeling and analysis of electrical systems of nuclear power plants with VVER-1000 reactors. The relevance of the work is due to the need to increase the reliability and stability of the operation of the power units' own needs systems, which ensure the continuous operation of automated electric drive systems of pumping equipment, heat removal systems, core cooling and safety systems. Power supply disruptions or deviations in electrical energy parameters can lead to a decrease in the efficiency of the functioning of technological equipment and create potential threats to the safe operation of the power unit.

The paper proposes an experimental and analytical approach to the study of electromechanical processes in automated electric drive systems, taking into account dynamic characteristics, load nonlinearity and the influence of transient and emergency modes. A mathematical model of an asynchronous automated electric drive of a pumping unit has been developed, which is based on the equations of electromechanical equilibrium, the dependence of power consumption on the speed of rotation, as well as the analysis of active power in alternating current circuits. Particular attention is paid to taking into account the inertial properties of the mechanical system and the influence of changes in the supply voltage on the electromagnetic moment and the stability of the drive.

Experimental studies were conducted on the Festo laboratory stand, which allowed to simulate normal, transient and emergency operating modes, in particular voltage sag, overload and loss of external power supply. During the experiment, the dependences between the supply voltage, the speed of rotation of the electric motor and the consumed power were obtained, which confirm the adequacy of the constructed theoretical models and their suitability for describing real processes in systems of own needs. An assessment of measurement errors was performed, which allowed to establish their permissible level and confirm the reliability of the results obtained.

It is shown that the use of Festo laboratory complexes allows to effectively reproduce critical operating modes of electrical systems typical of VVER-1000 type power units, including power failure scenarios and dynamic transient processes. This is important for increasing the level of safety, reliability and efficiency of operation of nuclear power plants. The results obtained can be used in the educational process of training engineering personnel, in conducting scientific research, as well as for simulation modeling of emergency situations in energy systems.

KEYWORDS: electrical systems; nuclear power plant; automated electric drive; emergency modes; Festo laboratory equipment.

In cites: Brovko K., Budanov P., Voitenko S., Vynokurova N., Velykohorskyi O. (2026). Festo Laboratory Equipment as a Tool for Experimental Modeling of Electrical Systems of NPP Power Units. *Engineering*, (37), 32-48. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-03> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

Funding

The Laboratory of Automation of Production Processes and the Laboratory of Electrical Engineering, Automated Electric Drive (Festo) were received by V.N. Karazin Kharkiv National University within the framework of the implementation of the Project "Improving Higher Education in Ukraine for Results" (IHEUR), which is financed by the World Bank.

References:

1. Agrawal, A, Singh, R, Kumar, N, Singh, VP, Alotaibi, MA, Malik, H & Hossaini, MA 2023, 'Mathematical modeling of driving forces of an electric vehicle for sustainable operation', *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 95278–95294. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3309728>
2. Halko, S, Halko, K, Suprun, O, Qawaqzeh, M & Miroshnyk, O 2022, 'Mathematical modelling of cogeneration photoelectric module parameters for hybrid solar charging power stations of electric vehicles', *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, October 2022, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397> (in Ukraine)
3. Pavlenko, I, Cizak, O, Kondus, V, Ratushnyi, O, Ivchenko, O, Kolisnichenko, E & Ivanov, V 2023, 'An increase in the energy efficiency of a new design of pumps for nuclear power plants', *Energies*, Vol. 16, No. 6, pp. 2929. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062929>
4. Wang, R, Xu, J, Zhang, W, Gao, J, Li, Y & Chen, F 2022, 'Reliability analysis of complex electromechanical systems: State of the art, challenges, and prospects', *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 38, No. 7, pp. 3935–3969. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.3175>
5. Elsotho, AM, Soliman, AMA, Adail, AS, Eisa, AA & Othman, ESA 2023, 'Comprehensive power quality performance assessment for electrical system of a nuclear research reactor', *Scientific Reports*, Vol. 13, No. 1, pp. 9915. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36692-2>
6. Kachura, OV, Kolichev, SV, Sianov, OM, Zalotkin, VV & Desna, DO 2025, 'Matematychna model synchronnoho dvygyna v realnykh koordynatnykh osiakh' [Mathematical model of a synchronous motor in real coordinate axes]. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky)*, Vol. 2, No. 47, pp. 107–116. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.47.2025.12> (in Ukraine)
7. Brovko, KYu, Budanov, PF & Voytenko, SM 2025, 'Modeliuvannia informatsiino-keruiuchoi systemy AES na bazi komplektiv FESTO ta kontrolera Siemens S7-1516 iz vykorystanniam FLUIDSIM' [Modeling of the information-control system of a NPP using FESTO kits and Siemens S7-1516 controller with FLUIDSIM], *Informatsiini problemy teorii akustychnykh, radioelektronnykh i telekomunikatsiynykh system (IPST-2025)*, NTU "KhPI", Kharkiv, Pp. 225–226.
8. Chakraborty, S, Park, J, Saraswat, G, Meyers, T, Wang, J, Tiwari, S & Salapaka, MV 2023, 'Emergency power supply system for critical infrastructures: Design and large scale hardware demonstration', *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 114509–114526. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3325198>
9. Kotb, SA, Zaky, MM, Elbaset, AA & Morad, M 2022, 'Application of hybrid renewable energy for supplying the emergency power supply system in case of station blackout in nuclear power plant', *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 175, pp. 109222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109222>
10. Budanov, P, Brovko, K, Melnykov, V, Yakymchuk, M, Kononov, V, Kyrsov, I, Nosyk, A, Karpenko, O, Kalnoy, S & Khomiak, E 2025, 'Construction of an information model of the digital twin of the technological process in a power unit at a nuclear power plant', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, No. 9(136), pp. 39–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335712> (in Ukraine)
11. Brovko, KYu, Budanov, PF, Vinokurova, ND & Velykohorskyi, OV 2025, 'Rozrobka intehrovanoi modeli tsyfrovoho dviinyka dlia efektyvnoi ekspluatatsii enerhoblokiv AES'

[Development of an integrated digital-twin model for efficient operation of NPP power units], *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2(96), pp. 58–67. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-58-67](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-58-67) (in Ukraine)

12. Rudyk, YuI, Trishch, HM, Katrych, OO, Khimicheva, AI, Malakhov, IM, & Tymofieiev, OP 2024, ‘Otsiniuvannia yakosti ta prohnozuvannia ryzykiv protsesiv systemy upravlinnia pidpriemstv kvalimetrychnymy metodamy’ [Assessment of quality and forecasting of risks of enterprise management system processes by qualimetric methods], *Engineering*, Issue 33, pp. 92–101. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-92-101> (in Ukraine)

13. Alvarez-Alvarado, MS, Donaldson, DL, Recalde, AA, Noriega, HH, Khan, ZA, Velasquez, W & Rodriguez-Gallegos, CD 2022, ‘Power system reliability and maintenance evolution: A critical review and future perspectives’, *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 51922–51950. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172697>

14. Li, Z, Wang, H, Fei, L, Peng, M, Xian, Z & Zhou, G 2025, ‘Multi-parameter optimization of NPP simulation models using enhanced particle swarm method’, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 184, pp. 105671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.105671>

15. Kantaros, A, Ganetsos, T, Pallis, E & Papoutsidakis, M 2025, ‘From mathematical modeling and simulation to digital twins: Bridging theory and digital realities in industry and emerging technologies’, *Applied Sciences*, Vol. 15, No. 16, pp. 9213. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15169213>

Submission received: 04.10.2026/Revised: 05.18.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026