

## Розробка цифрового двійника малопотужного однофазного трансформатора

Анастасія Брусовцова, студент<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0003-8899-3675),

Олексій Бондарчук, студент<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0002-1672-9608)

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

### АНОТАЦІЯ

У проведеному дослідженні розроблено програмно-апаратне забезпечення цифрового двійника малопотужного силового трансформатора. Апаратна складова побудована на базі мікроконтролера ESP-32 та блоків вимірювання струмів та напруг в обмотках. Засобами середовища MatLab розроблена Simulink-модель однофазного трансформатора, що дозволяє проводити моделювання у реальному часі. Результатом співставлення результатів прогнозування моделі та сигналів від датчиків став розрахунок їх середньоквадратичних значень та нормалізованих середньоквадратичних відхилень. Отримані дані свідчать про достатньо високий рівень точності моделі, розраховані відхилення не перевищують 11%.

*Ключові слова:* кіберфізична система, IoT, цифровий двійник, трансформатор, Simulink, модель, вимірювання, контролер.

### 1. ВСТУП

Функціонування енергетичної галузі супроводжується постійним збільшенням вимог до надійності, гнучкості й ефективності експлуатації критично важливого обладнання електричних мереж, серед якого особливе місце займають силові трансформатори які є стратегічними вузлами енергосистеми, а, навіть, часткова втрата їх працездатності супроводжується фінансовими втратами, аваріями та перебоями в енергопостачанні споживачів [1].

Традиційним підходом до обслуговування силових трансформаторів є підхід, що базується або на проведенні регламентних ремонтних робіт за графіком (планово-попереджувальні), або на усуненні наслідків наявних відмов (реактивне). Обидва варіанти мають відносно низьку ефективність оскільки не дозволяють прогнозувати відмови, супроводжуються збитковими або навпаки недостатніми витратами на обслуговування, не враховують реальний стан обладнання в режимі наближеному до реального часу.

Актуальність переходу до більш інтелектуальних та предикативних методів обслуговування трансформаторів обумовлена рядом чинників: деградація матеріалів, що входять до їх складу; зростання навантаження (пов'язане з розвитком промисловості та зростанням вимог до надійності); інтеграція до складу енергосистеми альтернативної розподіленої електрогенерації, що є причиною появи додаткових динамічних навантажень, на які вони не розраховані. За таких умов перспективним напрямком є концепція передбачуваного обслуговування (Predictive Maintenance), що базується не на часі, а на фактичному стані силового трансформатора [2]. Проте практична реалізація такого підходу потребує динамічних моделей високої точності, що дозволяють отримувати інформацію про фізичний стан обладнання в усіх його проявах. Такою моделлю є цифровий двійник, що представляє собою комплексну віртуальну копію силового трансформатора, яка в режимі реального часу обмінюється з ним даними за допомогою датчиків (моніторинг вібрацій, температури, розчинених газів в маслі системи охолодження, вологості, тощо) та, яка використовує комбінацію фізичних принципів його роботи й алгоритмів штучного інтелекту для симуляції, аналізу і прогнозування

його поведінки. На відміну від статичних моделей, цифровий двійник функціонує паралельно з реальним трансформатором, постійно навчаючись та адаптуючись до його характеристик та історії експлуатації [3].

### 2. МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою проведеного дослідження стала розробка програмно-апаратної основи цифрового двійника малопотужного однофазного трансформатора.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Структурна схема апаратної основи цифрового двійника малопотужного однофазного трансформатора представлена на рис. 1

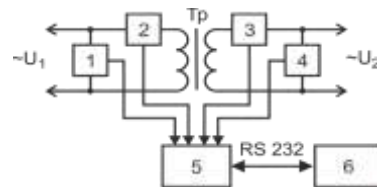


Рисунок 1. Структурна схема апаратної основи цифрового двійника малопотужного однофазного трансформатора

Розроблена система включає блоки вимірювання напруги 1 та 4 та блоки вимірювання струму 2 та 3 в первинній та вторинній обмотках трансформатора Тр. Сигнали вимірювальної інформації з цих блоків подаються на вхід АЦП мікроконтролера 5, а далі – в ПЕВМ верхнього рівня 6. Вимірювальні канали струму та напруги побудовані на базі операційних підсилювачів. Розроблені схеми дозволяють проводити вимірювання сигналів змінного струму з амплітудами до 1 мВ. Результати аналого-цифрових перетворень вхідних сигналів передаються мікроконтролером в ПЕВМ верхнього рівня з використанням інтерфейсу RS-232. Подальша обробка вимірювальних сигналів здійснюється засобами програмного середовища MatLab. На рис.2 представлено розроблену Simulink модель малопотужного однофазного трансформатора.

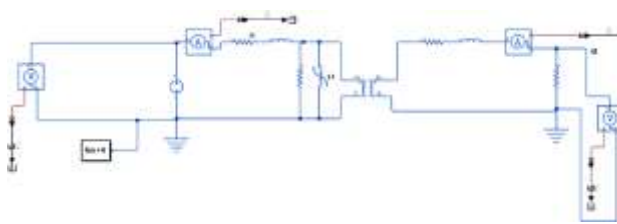


Рисунок 2. Simulink модель малопотужного однофазного трансформатора

Параметри моделі – індуктивність намагнічування, індуктивності розсіювання, коефіцієнт трансформації, активні опори обмоток визначалися експериментально за методикою дослідів холостого ходу та короткого замикання.

Запропонована модель розроблена з врахуванням можливих нелінійностей, пов'язаних з нелінійним характером кривої намагнічення матеріалу осердя. Оцінка якості цифрового двійника здійснювалась за допомогою двох критеріїв.

На першому етапі проводилась оцінка систематичної складової похибки амплітудного значення результатів, що отримуються з допомогою цифрового двійника. Для цього порівнювались середньоквадратичні значення сигналів від датчиків струму – 3 та напруги – 4 вторинної обмотки трансформатора  $-U_2^A, I_2^A$  та аналогічні сигнали що формувалися цифровим двійником  $U_2^{ЦД}, I_2^{ЦД}$ . Визначення середньоквадратичних значень напруги та струму здійснювались для даних, що отримувались за допомогою АЦП відповідно до формул:

$$U_2^A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_{2i}^2}{N}}, \tag{1}$$

$$I_2^A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N I_{2i}^2}{N}}, \tag{2}$$

де  $N$  – кількість вимірювань, зроблених АЦП за період.

Середньоквадратичні значення сигналів, що отримані за допомогою цифрового двійника визначались аналогічним чином. Для оцінки отриманих результатів розраховувались значення відносних відхилень середньоквадратичних значень струму та напруги у вторинній обмотці:

$$\Delta_{U_2} = \frac{|U_2^A - U_2^{ЦД}|}{U_2^A} \cdot 100\%, \tag{3}$$

$$\Delta_{I_2} = \frac{|I_2^A - I_2^{ЦД}|}{I_2^A} \cdot 100\% \tag{4}$$

$$\delta_{U_2} = \frac{\sum_{i=1}^K (U_{2i} - U_{2ЦДi})^2}{\sum_{i=1}^N U_{2i}^2} \cdot 100\% \tag{5}$$

$$\delta_{I_2} = \frac{\sum_{i=1}^K (I_{2i} - I_{2ЦДi})^2}{\sum_{i=1}^N I_{2i}^2} \cdot 100\% \tag{6}$$

У таблиці 1 наведено результати розрахунків величин (1-4). Отримані значення демонструють високу ступінь співпадіння результатів, отриманих за даними цифрового двійника та реальних вимірювань.

Оцінка відповідності форми сигналів цифрового двійника та сигналів, що отримуються від датчиків струму та напруги вторинної обмотки трансформатора проведена із застосуванням нормалізованого середньоквадратичного відхилення:

Значення цього критерію показують у скільки разів середня потужність похибки менша за потужність сигналу, що отримується від датчиків. Результатом розрахунку нормалізованого середньоквадратичного відхилення стали значення  $\delta_{U_2} = 8,5\%$  та  $\delta_{I_2} = 11\%$ .

Таблиця 1.Результати визначення середньоквадратичних значень

$R_n, \text{ Ом}$	$U_2^A, \text{ В}$	$I_2^A, \text{ мА}$	$U_2^{ЦД}, \text{ В}$	$I_2^{ЦД}, \text{ А}$	$\Delta_{U_2}, \%$	$\Delta_{I_2}, \%$
500	6,5	12,6	6,7	12,0	3,1	4,7
100	6,5	63,7	6,7	60,2	3,1	5,5

#### 4. ВИСНОВКИ

Розробка та застосування цифрових двійників силових трансформаторів дозволяє перейти від реактивного або періодичного обслуговування до їх прогнозного обслуговування та діагностики. Такий підхід покликаний завчасно планувати ремонт, мінімізувати простої та збитки, а також продовжити строк служби обладнання.

Створення цифрового двійника передбачає розробку технічного рішення, в якому за допомогою сенсорів та ІоТ-технологій збираються дані про струми, напруги, температуру, вібрацію, газовий склад оливи тощо. Ці дані вносяться до віртуальної моделі, де з використанням математичного моделювання та алгоритмів машинного навчання проводиться аналіз, діагностика дефектів і прогнозування залишкового ресурсу. У результаті можна оптимізувати витрати на експлуатацію та зменшити ризики серйозних аварій та продовжити строк служби обладнання.

#### Список літератури

- [1] Abdessadak A., Hicham Ghennioui H. Digital twin technology and artificial intelligence in energy transition: A comprehensive systematic review of applications. Energy Reports. 2025. Vol 13. P.5196-5218. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248472500263X>
- [2] Reza Jalilzadeh Hamidi A modular measurement integrity verification for transformer currents with applications in hardware in-the-loop digital twin. Electrical engineering and systems science. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2407.18944>
- [3] Panayiotis Moutis Digital Twin of Distribution Power Transformer for Real-Time Monitoring of Medium Voltage from Low Voltage Measurements. IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. Vol. 36 Issue: 4. P. 1952 - 19639. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9170814>

<sup>i</sup> Робота виконана під керівництвом канд. тех. наук, доц. Вадима Луценка