Грабовенко Ігор Володимирович, Магістр спеціальності 122 “Комп’ютерні науки” Західноукраїнський національний університет, Тернопіль

Науковий керівник: Осолінський Олександр Романович, доцент кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління, Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль

**КОНЦЕПЦІЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В ІНДУСТРІЇ 4.0**

ВСТУП

Цифровий двійник (Digital Twin) - це концепція сучасної індустрії, яку запропонували в 2002 році в Мічиганському університеті під час презентації створення центру управління життєвим циклом продукту (Product Lifecycle Management - PLM). Космічна програма НАСА "Аполлон" була першою, де було використано концепцію DT, де було 2 апарати, один з яких знаходився в центрі польотів. За допомогою такого підходу можна було моделювати та прогнозувати стан іншого апарату в космосі [1]. Hribernik та ін. [2] ввели поняття "аватар продукту".

У контексті Індустрії 4.0 цифровий об'єкт регулює та покращує стан фізичного об'єкта. Німецька асоціація виробників електротехніки та електроніки розробила еталонну архітектурну модель для Industry 4.0 (RAMI 4.0), щоб підтримати нові ініціативи промислової революції, засновані на цілісному підході компаній-виробників.

RAMI 4.0 надає компаніям цілісну структуру для розробки майбутніх продуктів і бізнес-моделей з використанням тривимірної карти (наприклад, шарів, життєвого циклу, рівня ієрархії або потоку даних) у структурованому вигляді [3].

Розвиток промислових технологій нав'язує нове бачення - I4.0, де машини з'єднані за допомогою технологій Інтернету речей, що дозволяє швидко приймати рішення. Складність промислових архітектур збору даних вимагає більш досконалих датчиків і складніших комп'ютерних мереж. У цьому тренді кіберфізичні системи використовуються для управління взаємопов'язаними системами між їхніми фізичними активами та обчислювальними потужностями [4].

Промислові системи можуть контролювати свої фізичні активи, що самовдосконалюються, за допомогою цифрового двійника (ЦД) або кібер-двійника, де розумне реактивне рішення можливе за допомогою зв'язку в режимі реального часу та алгоритмів ШІ [5].

1. ПРОБЛЕМАТИКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ІНДУСТРІЇ 4.0

Всі згадані вище технології потребують енергії для роботи, обчислення, передачі, моніторингу та контролю даних. Таким чином, наукова література, дослідницькі проекти та промисловий досвід дають зрозуміти, що існує потреба в новій та надійній платформі, здатній забезпечити більше моніторингу, інтеграції, зберігання та аналітики енергетичної інформації для майбутнього енергоефективного виробництва [6, 7 8]. Для створення кращої системи енергоменеджменту необхідний великий обсяг даних з різних галузей і місць. Крім того, через неоднорідність даних не всі учасники промислової екосистеми можуть ефективно їх використовувати [9].

Для вирішення цих проблем використовується ЦД для оцифрування системи та моніторингу енергетичної інформації в ЦД, що надходить від фізичних об’єктів, за допомогою динамічної моделі. Розробка ЦД на основі моделі енергоефективності в контексті Industry 4.0 проходить через цифрову тінь (ЦТ), яка полягає у зборі різнорідних енергетичних даних в режимі реального часу для використання в моделі, що покращує симуляцію енергоспоживання для всієї екосистеми навантажень [10].

Тим не менш, неоднорідність типів енергетичних даних та відсутність комунікації між суб'єктами господарювання блокують впровадження ЦД та ЦТ на основі енергетичних даних у реальній промисловості. Тому для стандартизації збору даних використовується показник енергоефективності кожного суб'єкта господарювання, починаючи з однієї машини. Досягнення високої енергоефективності при низьких витратах залишається актуальним завданням і донині. Новітні архітектури EMS дозволяють контролювати та підвищувати ефективність промислових систем, не впливаючи на їх експлуатаційні характеристики. За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА)[11], 53% споживання електроенергії припадає на електроприводи (ЕП) або електроприводні системи (ЕПС). Серед EMDS 77% споживання електроенергії припадає на електродвигуни середнього розміру, тоді як 80% - на асинхронні двигуни різних типів [12]. Використання великої кількості ЕП робить їх гарним кандидатом на підвищення енергоефективності.

Середні ЕП з енергоефективністю 84% споживають 10 500 ТВт-год на рік, отже, якщо лише один відсоток енергоефективності буде покращено під час експлуатації, можна буде заощадити 105 ТВт-год. [13]. Враховуючи ці тенденції, збір значної енергетичної інформації про ЕП є надзвичайно важливим.

Енергоефективність є комплексним показником як споживання енергії, так і стану машини. Потенційним практичним застосуванням цього підходу є розробка методу прогнозованого технічного обслуговування на основі ЕЕ, який використовує історичні дані про енергоефективність машини [14]. Для досягнення цілей I4.0 може бути розроблена система енергоменеджменту з використанням всієї енергетичної інформації, починаючи з малого рівня з одним двигуном до більшого масштабу, де вся енергетична інформація збирається і обробляється для управління на основі галузевих енергетичних цілей. Наприклад, в [15] запропоновано два нових методи на основі штучних нейронних мереж (ШНМ) та ANFIS для прогнозування параметрів асинхронних двигунів в одно- та двокоміркових моделях. У роботі [16] продуктивність ANFIS порівнюється з нейронною мережею прямого поширення (FFNN) та нейронною мережею Елмана (ENN) для оцінки енергетичної ефективності.

Четверта промислова революція вимагає відстеження та оптимізації енергоспоживання за допомогою інтелектуальної системи енергоменеджменту (IEMS). Така система потребує точної енергетичної інформації в режимі реального часу для управління промисловими машинами.

У даній статті запропоновано концепцію цифрового двійника (ЦД) для підвищення енергоефективності асинхронного двигуна. Розроблено гібридну модель, що базується на моделі, керованої даними, для представлення інформації про ефективність машини в реальному часі.

Для вирішення описаних проблем і завдань потрібно на першому етапі розробити модель енергоефективності електродвигуна, яка оперує визначеними величинами, такими як напруга, струм, коефіцієнт потужності, внутрішня температура та робоча швидкість.

2. РЕАЛІЗАЦІЯ ДН НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ IMS В I4.0

Для алгоритмів штучного інтелекту, що оптимізують промислове енергоспоживання, ЕПС потребує даних про енергоспоживання. Для того, щоб зібрати відповідні дані про енергоспоживання, беручи до уваги аспект in situ, коли деякі частини машин можуть бути недоступними.

Альтернативою є побудова моделі енергоефективності машини, яка може оперувати лише легкодоступними параметрами, такими як струм, напруга та температура. Така модель використовує менше даних з датчиків завдяки алгоритмам на основі штучного інтелекту, які оцінюють втрати та визначають енергоефективність машини. Перший крок до оцінки енергоефективності машини в режимі реального часу здійснюється через її цифрову тінь (DS). Однак для повного розгортання цифрового двійника (ЦД) необхідні подальші кроки, як показано на рисунку 1.



Рисунок 1.- Рівні інтеграції цифрового двійника в моделі енергоефективності

2.1. РОЛЬ ЦИФРОВОЇ ТІНІ У РОЗРОБЦІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ДЛЯ АСИНХРОННИХ МОТОРІВ

Моніторинг енергоефективності машини в реальному часі за допомогою динамічної моделі - це ЦТ на основі енергоефективності, яка відображає енергетичну поведінку машини і дає уявлення про стан машини.

Цифрова тінь відіграє важливу роль у покращенні користувацького інтерфейсу, надаючи цифрове зображення машин і станцій з використанням даних у реальному часі в галузях, що використовують в ІКТ. Більше того, окрема цифрова тінь може використовуватися для кожного верстату в промисловому середовищі, де потрібна велика кількість агрегатів. Таке рішення може зменшити складність завдань, пов'язаних з гетерогенністю даних і відсутністю зв'язку між підрозділами, що часто трапляється в промисловому середовищі [17].

Оскільки цифрова тінь являє собою фізичну модель з одностороннім потоком даних, вся інформація, яку оператор отримує, залежить від моделі цифрової тіні. Тому її розробка має вирішальне значення для впровадження цифрового двійника.

2.2 РОЛЬ ДИНАМІКИ ТА ЕВОЛЮЦІЙНОЇ МОДЕЛІ В РОЗРОБЦІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Розробка цифрового двійника передбачає використання моделі у всіх процесах, як показано на рис. 2, як правило, вона починається з так званої номінальної моделі, вона є цифровою початковою моделлю, яка є фізичною моделлю, що реалізує, перевіряє та ідентифікує досліджувану систему. За межами мети цифрового двійника і змін у галузі, тільки динамічна модель може представляти поведінку машини в реальному часі.



Рисунок 2.- Запропонована модель енергоефективності асинхронного двигуна

Важливо також мати модель, в якій час обчислень менший за час між двома оновленнями вхідних величин, інакше система накопичуватиме похибку і втрачатиме динаміку, отже, симулятор реального часу допомагає досягти цієї мети.

Модель електродвигуна повинна мати залежність від температури, напруги та струму і враховувати зміну цих величин. Цифровий двійник оновлюється, відстежуючи фізичну систему, а також коригуючи деякі параметри для покращення фізичного двійника. Отже, для досягнення цієї мети необхідна еволюційна модель. Еволюційна модель використовує інструменти оптимізації ШІ в реальному часі, такі як машинне навчання та навчання з підкріпленням.

ВИСНОВКИ

Масове використання асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором привернуло увагу дослідників і промисловців до створення більш ефективних двигунів та їх більш ефективної експлуатації. Цього неможливо досягти без точної оцінки енергоефективності двигуна в режимі реального часу. Оцінка енергоефективності та втрат в режимі реального часу дозволяє збирати історичні дані, які можуть бути використані для прогнозування стану машини. У зв’язку з необхідністю отримання точної інформації про енергоефективність, в роботі запропоновано концепцію цифрового двійника на основі моделі енергоефективності асинхронного двигуна.

Література

1. M. Liu, S. Fang, H. Dong, C. Xu. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *J. Manuf. Syst.* 58. (Jan. 2021). P.346–361, URL: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017.
2. HRIBERNIK, Karl A., et al. The product avatar as a product-instance-centric information management concept. International Journal of Product Lifecycle Management, 2006, 1.4: 367-379.
3. M.A. Pisching, M.A.O. Pessoa, F. Junqueira, D.J. dos Santos Filho, P.E. Miyagi. An architecture based on RAMI 4.0 to discover equipment to process operations required by products. *Comput. Ind. Eng.* 125 (Nov. 2018) 574–591. URL: https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.029.
4. J. Lee, B. Bagheri, H.-A. Kao. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufact. Lett.* 3 (Jan. 2015) 18–23, URL:https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
5. R.Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, S.T. Newman. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review, *Engineering* 3 (5) (Oct. 2017) 616–630, URL:https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015.
6. R. Walawalkar, S. Fernands, N. Thakur, K.R. Chevva. Evolution and current status of demand response (DR) in electricity markets: Insights from PJM and NYISO, Energy 35 (4) (Apr. 2010) 1553–1560, URL:https://doi.org/10.1016/j. energy.2009.09.017
7. K. Bunse, M. Vodicka, P. Schönsleben, M. Brülhart, F.O. Ernst. Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature, J. Clean. Prod. 19 (6) (Apr. 2011) 667–679, URL:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.011.
8. H. P. Inamdar and R. P. Hasabe. It based energy management through demand side in the industrial sector. *in Communication and Energy Conservation* 2009 International Conference on Control, Automation, Jun. 2009, pp. 1–7.
9. Ladj, Z. Wang, O. Meski, F. Belkadi, M. Ritou, C. Da Cunha. A knowledge-based Digital Shadow for machining industry in a Digital Twin perspective, J. Manuf. Syst. 58 (Jan. 2021) 168–179, URL:https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.018.
10. M. Landherr, U. Schneider, T. Bauernhansl. The Application Center Industrie 4.0 - Industry-driven Manufacturing, Research and Development, *Procedia CIRP* 57 (Jan. 2016) 26–31, URL:https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.006.
11. 4E\_2017\_Annual\_Report\_100518.pdf. Accessed: Nov. 01, 2021. URL:https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2018/05/4E\_2017\_Annual\_Report\_  
    100518.pdf (дата звернення: 15.09.2023)
12. P. Waide, C. U. Brunner. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. *OCDE*, Paris, May 2011. URL: doi: 10.1787/5kgg52gb9gjden
13. R. Kumar, P. Kumar, T. Kanekawa, K. Oishi. Stray Loss Model for Induction Motors With Using Equivalent Circuit Parameters. *IEEE Trans. Energy Convers*. 35 (2) (Jun. 2020) 1036–1045, URL: https://doi.org/10.1109/TEC.2020.2964616.
14. Amadou Adamou, C. Alaoui. Energy Efficiency Model-Based Predictive Maintenance for Induction Motor Fault Prediction Using Digital Twin Concept, *in: S. Motahhir, B. Bossoufi (Eds.)*, *Digital Technologies and Applications, Springer Nature Switzerland*, Cham, 2023, pp. 600–610, URL:https://doi.org/10.1007/978-3-031-29860-8\_61.
15. M.A. Jirdehi, A. Rezaei. Parameters estimation of squirrel-cage induction motors using ANN and ANFIS, *Alex. Eng. J.* 55 (1) (Mar. 2016) 357–368, URL: https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.01.026.
16. O. Çetin, A. Dalcalı, F. Temurtas. A comparative study on parameters estimation of squirrel cage induction motors using neural networks with unmemorized training. *Eng. Sci. Technol., Int. J.* 23 (5) (Oct. 2020) 1126–1133, URL:https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.03.011.
17. Ladj, Z. Wang, O. Meski, F. Belkadi, M. Ritou, C. Da Cunha. A knowledge based Digital Shadow for machining industry in a Digital Twin perspective. *J. Manuf. Syst.* 58 (Jan. 2021) 168–179, URL: https://doi.org/10.1016/j. jmsy.2020.07.018.