

Д. О. ДАНИЛЬЧЕНКО, А. Е. ПОТРИВАЙ

СИСТЕМА ДИНАМІЧНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

В роботі проаналізовано метод нейро-нечіткого моделювання для прогнозування технічного стану системи. Модель системи динамічного прогнозування технічного стану обладнання об'єднаної електроенергетичної системи складається з імітаційних моделей сонячної електростанції, вітрогенератора та синхронного генератора, що виконує роль теплової станції. Для виконання моделювання використовувалася спеціальна система інструментів Fuzzy extension logic toolbox, призначена для оцінки якості роботи синхронного генератора. Отримані оцінки технічного стану обладнання обробляються за допомогою адаптивної системи нейро-нечіткого виведення (ANFIS), в результаті чого формується прогноз технічного стану обладнання на заданому часовому інтервалі. Встановлено, що нечіткі моделі знайшли широке практичне застосування під час побудови нечітких регуляторів, систем розпізнавання та обробки даних тощо. Моделювання реальних систем нечіткими моделями ґрунтується на тому, що нечіткі моделі типу Сугено і Мамдані є універсальними апроксиматорами функцій. Побудована модель системи динамічного прогнозування технічного стану обладнання може бути використана при проектуванні об'єктів відновлюваної енергетики, а також при розробці та тестуванні алгоритмів систем управління та моніторингу. Система оцінки та прогнозування стану обладнання з використанням апарату нечіткої логіки може бути використана для підтримки прийняття рішень оператором електричної станції при визначенні необхідності ремонту та перестановки обладнання. Ключовою перевагою представленої системи є її здатність враховувати динамічні зміни стану сонячної електростанції залежно від трансльованих умов експлуатації, що дозволяє ще більше наблизити отримані дані до реальних. Також, особливістю реалізації системи динамічного прогнозування технічного стану обладнання є використання моделі сонячної електростанції, що має в своєму складі моделі для наближення імітації до реальних умов експлуатації з урахуванням пилу, нагрів поверхні тощо.

Ключові слова: математична модель, прогнозування, експлуатаційні умови, алгоритми, нейро-нечітка модель, імітація.

D. O. DANYLCHENKO, A. E. POTRYVAI

SYSTEM FOR DYNAMIC PREDICTION OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE EQUIPMENT OF A COMBINED ELECTRIC POWER SYSTEM

This paper analyses the neuro-fuzzy modelling method for predicting the technical state of a system. The model of the system for dynamic forecasting of the technical condition of the equipment of an integrated power system consists of: a simulation model of a solar power plant, a simulation model of a wind turbine, and a simulation model of a synchronous generator acting as a thermal power plant. To perform the modelling, a special system of tools Fuzzy extension logic toolbox was used to assess the quality of the synchronous generator. The obtained estimates of the technical condition of the equipment are processed using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS), which results in a forecast of the technical condition of the equipment at a given time interval. It has been established that fuzzy models have found wide practical application in the construction of fuzzy controllers, data recognition and processing systems, etc. Modelling of real systems with fuzzy models is based on the fact that fuzzy models of the Sugeno and Mamdani types are universal function approximators. The constructed model of the system for dynamic forecasting of the technical condition of equipment can be used in the design of renewable energy facilities, as well as in the development and testing of algorithms for control and monitoring systems. The system for assessing and predicting the state of equipment using fuzzy logic can be used to support decision-making by the power plant operator when determining the need for repair and relocation of equipment. The key advantage of the presented system is its ability to take into account dynamic changes in the state of a solar power plant depending on the transmitted operating conditions, which makes it possible to bring the obtained data even closer to the real ones. Also, a feature of the system for dynamic forecasting of the technical condition of equipment is the use of a simulation model of a solar power plant, which has a model to bring the simulation closer to real operating conditions, taking into account dust, surface heating etc.

Keywords: mathematical model, prediction, operating conditions, algorithms, neuro-fuzzy model, simulation.

Вступ. Обов'язковою умовою забезпечення стабільності роботи системи є її технічний стан та наявний ресурс. Основним способом підтримки високої продуктивності будь-якої технічної системи є своєчасне виявлення та заміна зношених і застарілих елементів. Наразі загальноприйнятою практикою є проведення планового технічного обслуговування, під час якого оцінюється працездатність елементів системи та приймається рішення про необхідність їх заміни та ремонту. Однак обладнання часто виходить з ладу до того, як відбудеться планове технічне обслуговування, тому інструмент, який дозволить підвищити точність прогнозування потреби в обслуговуванні обладнання, користується високим попитом на енергетичному ринку в усьому світі.

Розробки в цьому напрямку ведуть такі науково-виробничі компанії як-от Semiotic Labs, Dynapar, CMS Condition monitoring Systems, Bruel & Kjar Vibro, Ifm

effector Canada тощо. У наукових працях пропонуються різні методи та підходи до побудови систем моніторингу (метод реконструктивного моделювання [1], метод розрахунку індексу стану обладнання [2], методи спектрального аналізу [3]), а також оцінки працездатності різних типів обладнання (електродвигунів [4], турбогенератора та силового трансформатора [5], силового трансформатора [6], керованого випрямляча [7]). Однак на сьогоднішній день питання створення систем моніторингу технічного стану не має однозначного вирішення, що пов'язано з відмінностями об'єктів діагностики, наявністю переваг і недоліків для різних типів систем моніторингу, а також з постійним прогресом комп'ютерних технологій і засобів обробки даних, які вимагають перегляду і вдосконалення існуючих рішень.

© Д. О. Данильченко, А. Е. Потривай, 2023

Тому, метою даної роботи є побудова імітаційної моделі комбінованої сонячно-вітрової електростанції з системою моніторингу та прогнозування технічного стану обладнання: вітрової турбіни, фотоелектричних перетворювачів, інвертора напруги та перетворювача частоти. Під технічним станом в даній роботі розуміється стан об'єкта (вищевказаних пристроїв), що характеризується сукупністю встановлених в документації параметрів, які описують його здатність виконувати необхідні функції в умовах, що розглядаються.

Мета статті. Розробка методу на основі нейронетичного прогнозування для підвищення ефективності роботи обладнання енергосистеми.

Методи дослідження. Раніше авторам вже вдалося покращити прогнозування продуктивності сонячної електростанції (СЕС), шляхом врахування багатьох факторів зовнішнього середовища (умов експлуатації) [8]. В реаліях сучасної енергосистеми необхідно враховувати не тільки традиційні джерела електроенергії, але й альтернативні. Модель, представлена в [8], стала основою для розробки і виступала в якості імітації роботи СЕС в системі. Це виправдано, якщо припустити, що імітація відбувається в межах одного регіону.

Тому модель, зображена на рис. 1, використовується в якості динамічно встановлюваної потужності модуля СЕС.

В якості основного методу дослідження в рамках даної роботи було використано імітаційне моделювання в середовищі MATLAB Simulink з використанням інструментарію розширення Fuzzy logic. На рис. 2 зображено імітаційну модель в середовищі MATLAB Simulink.

Імітаційна модель системи динамічного прогнозування технічного стану обладнання об'єднаної електроенергетичної системи включає наступні елементи: перетворювач сонячної енергії, перетворювач вітрової енергії, трифазне електричне навантаження активно-індуктивного характеру та системи моніторингу технічного стану пристроїв. Канали перетворення енергії об'єднані за допомогою шини змінного струму.

Перетворювач сонячної енергії складається з фотоелектричних модулів Атау, потужність яких динамічно змінюється в часі залежно від зареєстрованих умов експлуатації, що дозволяє отримати найбільш об'єктивну оцінку впливу СЕС на роботу системи.

Вітроенергетичний перетворювач включає в себе простий вітротурбінний блок – турбіну з номінальною електричною потужністю 10 кВА, синхронний генератор з постійними магнітами і частотний перетворювач з ланкою постійного струму, який компенсує коливання частоти вихідної напруги при зміні швидкості вітру. Користувач може задавати швидкість вітру, змінюючи значення сигналу в простій підсистемі Turbine. На жаль, ця модель не враховує умови експлуатації, але над цим активно працюють.

Завданням системи діагностики є формування оцінки технічного стану пристроїв, що входять до складу електроенергетичного комплексу. Ця оцінка дозволяє персоналу комплексу мати інформацію про працездатність пристроїв в будь-який момент часу, а також прогнозувати виникнення аварійних ситуацій. Рейтинг формується на основі інформації про параметри, які впливають на роботу пристроїв і характеризують якість їх роботи. В даний час немає технічної можливості отримати в режимі реального часу всю діагностичну інформацію, необхідну для однозначної оцінки технічного стану пристрою, таку як ступінь старіння матеріалів, поява мікроскопічних деформацій і дефектів елементів. Крім того, зміни навантажень і умов експлуатації часто мають стохастичний характер. Через ці обставини оцінка і прогноз технічного стану здійснюється в умовах недосконалості і неповноти вихідної інформації. Однак накопичені знання і досвід багатьох експертів з експлуатації та ремонту обладнання дозволяють їм приймати правильні управлінські рішення при оцінці технічного стану обладнання та превентивної заміни застарілого обладнання навіть на основі неповних і недосконалих вихідних даних.

Для формалізації досвіду експертного співтовариства і побудови системи, що підтримує оператора в прийнятті рішень, ефективним методом є використання методів нечіткої логіки. Такий підхід дозволяє підвищити гнучкість системи оцінювання за рахунок використання наборів правил, а також нелінійних функцій належності елементів, які дозволяють системі генерувати правильний результат у разі зашумлених і неповних вхідних даних. Перелік логічних правил, за якими формується оцінка, повинен бути складений фахівцями з експлуатації та ремонту відповідних електротехнічних пристроїв. В рамках даної роботи використовується тестовий набір правил, який повинен бути доопрацьований при використанні з конкретними зразками обладнання.

До переліку діагностичних параметрів, на підставі яких формується оцінка якості робіт, входять частота обертання валу генератора, температура міді статора генератора, середнє арифметичне діючих значень струмів фаз статора, середнє арифметичне діючих значень лінійних напруг статора, температура металу підшипників. Цей перелік не є вичерпним і може бути доповнений або змінений відповідно до специфіки конкретного об'єкта діагностики. Використовувані величини приводяться до відносних одиниць відповідно до номінальних параметрів синхронного генератора. Для вхідної змінної «Частота обертання валу» використовуються три значення: «Низька», «Нормальна» і «Висока». Вхідна змінна «Температура міді» має два значення: «Нормальний» і «Високий». Для вхідної змінної «Середній струм» використовуються три значення: «Низький», «Нормальний» і «Високий». Для вхідної змінної «Середнє значення напруги» використовуються три терми: «Низьке», «Нормальне» і «Високе». Вхідна змінна «Температура підшипників» має три значення:

«Низька», «Нормальна» та «Висока». Вихідною змінною системи нечіткого виводу є Synchronous Generator Performance, для якої використовуються три терми: «Low», «Normal», «High» («Низький», «Нормальний» і «Високий» відповідно). Якість роботи

оцінюється як висока, коли всі діагностичні параметри знаходяться в межах норми. Якщо будь-які параметри відхиляються від норми, якість роботи оцінюється як нормальна або низька відповідно до згенерованого тестового списку з восьми правил наступного вигляду:

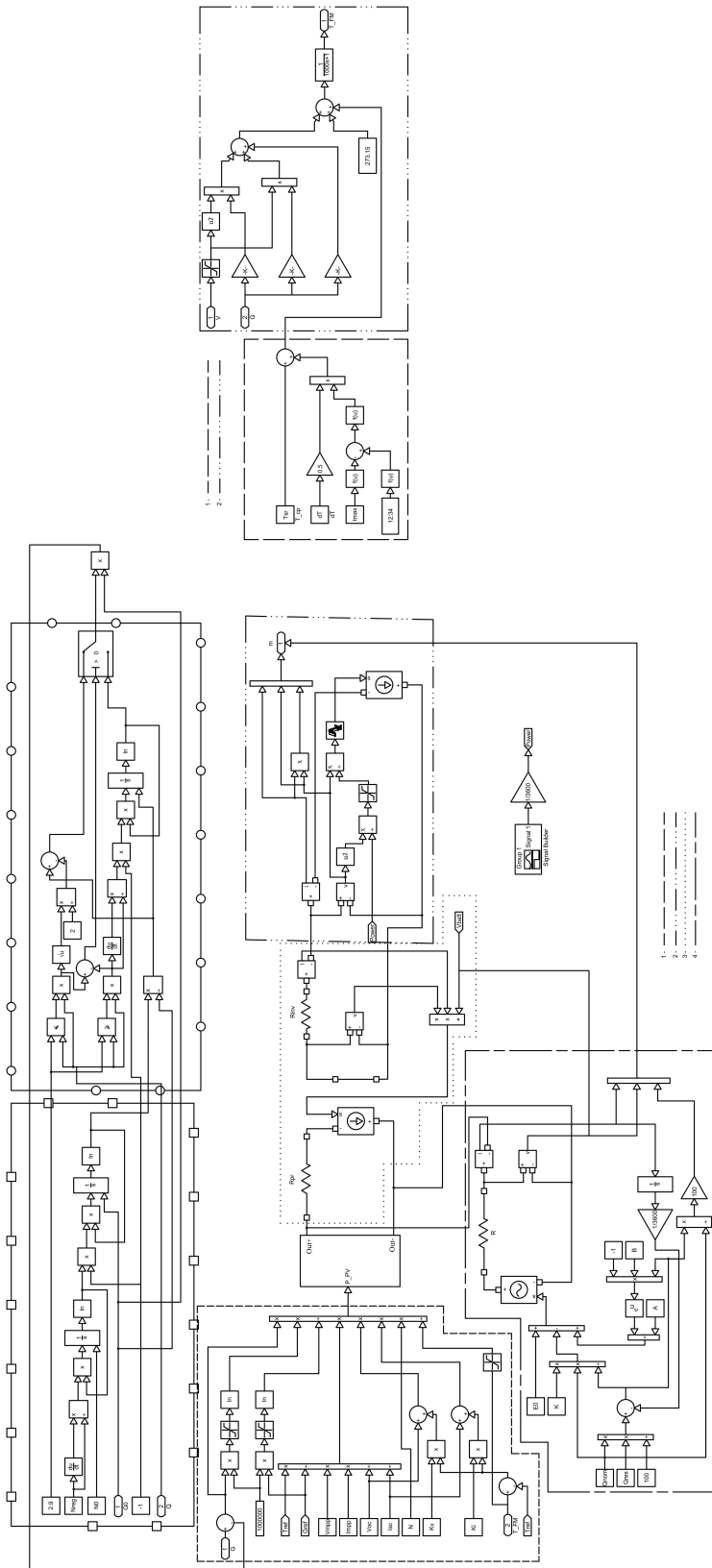


Рисунок 1 – Повна імітаційна модель СЕС в умовах експлуатації

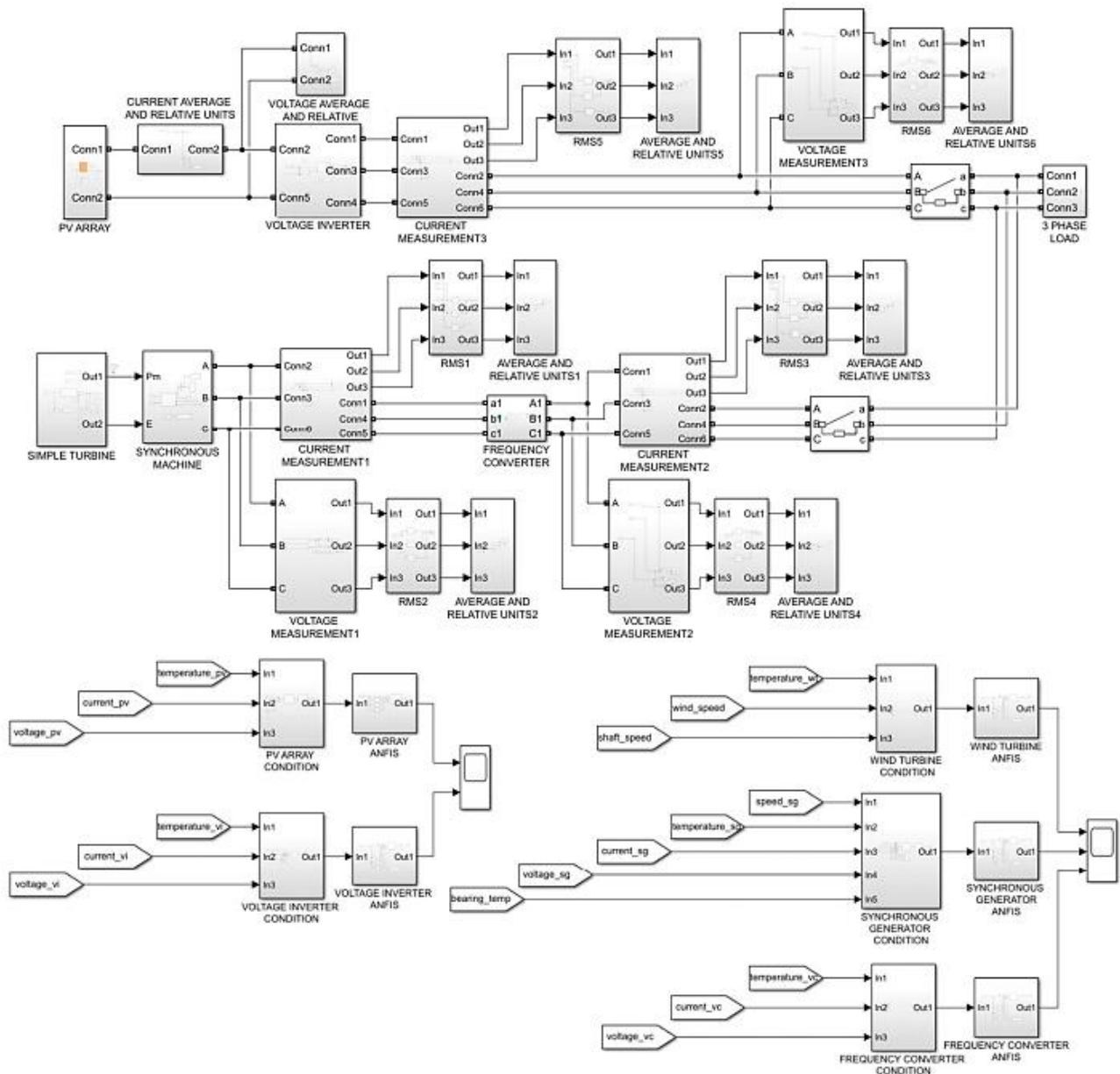


Рисунок 2 – Імітаційна модель комбінованої системи генерації електроенергії

1. If (Rotor freq is Normal) and (Winding_temperature is Normal) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) and (Bearing_temperature is Normal) then (Operation_quality is High).

2. If (Rotor freq is High) and (Winding_temperature is Normal) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) then (Operation_quality is Normal).

3. If (Rotor freq is Normal) and (Winding_temperature is High) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) then (Operation_quality is Normal).

4. If (Rotor freq is Normal) and (Winding_temperature is Normal) and (Current is High) and (Voltage is Normal) then (Operation_quality is Low).

5. If (Rotor freq is Normal) and (Winding_temperature is High) and (Current is High) and (Voltage is Normal) then (Operation_quality is Low).

6. If (Rotor freq is Normal) and (Winding_temperature is Normal) and (Current is High) and (Voltage is Low) then (Operation_quality is Low).

7. If (Rotor freq is Normal) and (Voltage is Low) then (Operation_quality is Low).

8. If (Rotor freq is High) and (Winding_temperature is Normal) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) and (Bearing_temperature is High) then (Operation_quality is Low).

Оцінка якості роботи формується за шкалою від нуля до ста відсотків. Системи оцінки якості роботи фотоелектричних перетворювачів, вітрогенераторів, інверторів напруги, перетворювачів частоти побудовані за таким же принципом і описані в [9–12].

Зміна умов експлуатації має безпосередній вплив на технічний стан обладнання. Для врахування незворотної зміни технічного стану пристрою вихідна змінна системи нечіткого виводу («Оцінка якості

роботи») віднімається від одиниці, отримане значення інтегрується і віднімається від початкового рівня технічного стану пристрою, що приймається як рівняння. Ця залежність може бути представлена виразом:

$$TC(p) = 1 - \frac{1 - kOQ(p)}{T_p}, \quad (1)$$

де $TC(p)$ – оцінка технічного стану пристрою;
 $OQ(p)$ – оцінка якості роботи, сформована системою нечіткого виводу;

T_p – постійна часу інтегрування;

k – коефіцієнт коригування; p – оператор Лапласа.

Для отримання коректних результатів оцінювання постійна часу інтегрування та коефіцієнт налаштування повинні визначатися експертно, з урахуванням експериментальних досліджень конкретного об'єкта діагностики. В рамках даної роботи використовуються тестові значення.

На рис. 3 наведено блок, що формує оцінку технічного стану синхронного генератора в середовищі Matlab Simulink.

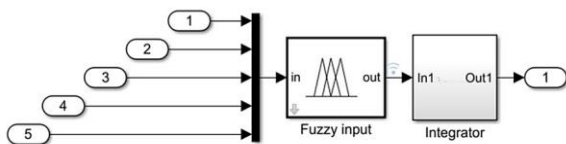


Рисунок 3 – Блок формування оцінки технічного стану синхронного генератора

Для розробки прогнозу технічного стану обладнання отримані оцінки обробляються за допомогою адаптивної системи нейро-нечіткого виводу. В якості прикладу розглянемо проектування системи прогнозування технічного стану синхронного генератора (рис. 4). Системи прогнозування стану вітрогенератора, перетворювача частоти, фотоелектричних перетворювачів та інвертора напруги мають схожий принцип роботи.

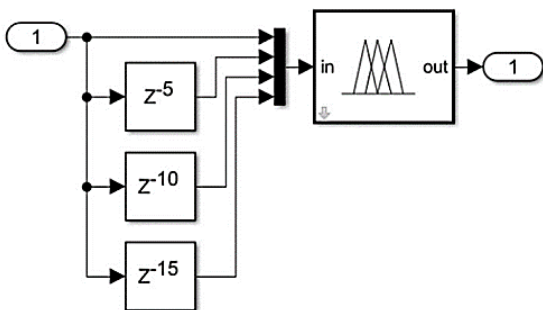


Рисунок 4 – Блок прогнозування технічного стану синхронного генератора

Для формування прогнозованого технічного стану на момент часу $t+60$ секунд побудована система використовує чотири відомі значення оцінки технічного стану в моменти часу t , $t-5$, $t-10$, $t-15$

секунд. Система пройшла 10 епох навчання, в результаті чого мінімальне значення середньоквадратичної похибки прогнозування склало 3,6 %. Для перевірки працездатності системи використовувався тестовий графік з різним характером зміни оцінки технічного стану.

На рис. 5 показано накладання тестового графіка оцінки технічного стану, використаного в якості еталонного (пунктирна лінія), та графіка оцінки, отриманого в результаті генерації прогнозу (суцільна лінія).

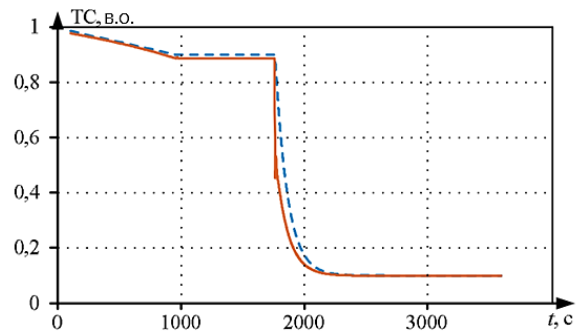


Рисунок 5 – Робота системи прогнозування: еталонний графік (пунктирна лінія), прогнозований технічний стан (суцільна лінія)

Як видно з графіків, при заданих параметрах прогнозована оцінка технічного стану часто виявляється нижчою за фактичну. Зміна кількості епох навчання та кількості навчальних даних може підвищити точність прогнозу, але в рамках даної роботи досягнута точність є прийнятною, тому нейронна мережа не перенавчалася. Отже, система має достатню точність. Однак вона все ще не здатна враховувати динамічні зміни в роботі вітрогенератора та синхронного генератора, тому дана модель не є достовірним відображенням реальної системи, але виступає надійним підґрунтям для створення динамічної аналітичної моделі.

Висновки. У статті наведено результати розробки імітаційної моделі генеруючого комплексу на основі відновлюваних джерел енергії з системою моніторингу технічного стану обладнання. Виконано імітаційне моделювання роботи в Simulink при потужності електричного навантаження 10 кВА, $\cos\phi$ 0,9 та частоті напруги навантаження 50 Гц, отримано осцилограми фазного струму та лінійної напруги навантаження, побудовано графіки для оцінки технічного стану пристроїв енергокомплексу при порушенні нормальних умов експлуатації у вигляді збільшення струму навантаження до 170 % від номінального значення. Побудовано графіки прогнозів технічного стану пристроїв з горизонтом прогнозування 60 секунд. Під час роботи моделі можна відтворювати процеси, які відбуваються при зміні потужності сонячного випромінювання, швидкості вітру, задання амплітуди та частоти вихідної напруги перетворювачів, параметрів електричного навантаження. Побудована імітаційна модель може бути використана при

проектуванні об'єктів відновлюваної енергетики, розробці та тестуванні алгоритмів систем керування, а також при дослідженні різних режимів роботи електроенергетичного комплексу.

Список літератури

- Oscar S., Anvar V. The monitoring system of an actual technical condition for pumping units with frequency analysis. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 176. P. 144–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.282>.
- Niggemann O., Biswas G., Kinnebrew J. S., Khorasgani H., Volgmann S., Bunte A. Data-driven monitoring of cyber-physical systems leveraging on big data and the internet-of-things for diagnosis and control. *26th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-2015)*, Paris, France, 31 August – 3 September 2015. P. 185–192.
- Lee J., Bagheri B. Cyber-physical systems in future maintenance. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, 2015. P. 299–305. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-15536-4_25.
- Wang L., Törngren M., Onori M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 2015. Vol. 37. P. 517–527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.04.008>.
- Harirchi F., Ozay N. Guaranteed model-based fault detection in cyber-physical systems: a model invalidation approach. *Automatica*. 2018. Vol. 93. P. 476–488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.03.040>.
- Bunte A., Stein B., Niggemann O. Model-Based diagnosis for cyber-physical production systems based on machine learning and residual-based diagnosis models. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2019. Vol. 33. P. 2727–2735. DOI: <https://doi.org/10.1609/aaai.v33i01.33012727>.
- Tremblay O., Dessaint L.-A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *World Electric Vehicle Journal*. 2009. Vol. 3, no. 2. P. 289–298. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>.
- Shevchenko S., Danylchenko D., Dryvetskiy S., Potryvai A. Modernization of a simulation model of a photovoltaic module, by accounting for the effect of snowing of photovoltaic panels on system performance with correction for panel cleaning for MATLAB Simulink. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 13–17 September 2021. P. 670–675. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek53812.2021.9570030>.
- Shepherd C. M. Design of primary and secondary cells: II. An equation describing battery discharge. *Journal of The Electrochemical Society*. 1965. Vol. 112, no. 7. P. 657. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2423659>.
- Gorunescu F. Data Mining: concepts, models and techniques. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. 360 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19721-5>.
- Fink O., Zio E., Weidmann U. Predicting component reliability and level of degradation with complex-valued neural networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014. Vol. 121. P. 198–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.08.004>.
- Sarver T., Al-Qaraghuli A., Kazmerski L. L. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: history, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 22. P. 698–733. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>.

References

- S. Oscar and V. Anvar, “The monitoring system of an actual technical condition for pumping units with frequency analysis,” *Procedia Engineering*, vol. 176, p. 144–149, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.282>.
- O. Niggemann, G. Biswas, J. S. Kinnebrew, H. Khorasgani, S. Volgmann, and A. Bunte, “Data-driven monitoring of cyber-physical systems leveraging on big data and the internet-of-things for diagnosis and control,” in *26th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-2015)*, Paris, France, Aug. 31–Sep. 3, 2015. p. 185–192.
- J. Lee and B. Bagheri, “Cyber-Physical systems in future maintenance,” in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2015, p. 299–305. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-15536-4_25.
- L. Wang, M. Törngren, and M. Onori, “Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 37, p. 517–527, Oct. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.04.008>.
- F. Harirchi and N. Ozay, “Guaranteed model-based fault detection in cyber-physical systems: A model invalidation approach,” *Automatica*, vol. 93, p. 476–488, Jul. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.03.040>.
- A. Bunte, B. Stein, and O. Niggemann, “Model-Based diagnosis for cyber-physical production systems based on machine learning and residual-based diagnosis models,” *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 33, p. 2727–2735, Jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.1609/aaai.v33i01.33012727>.
- O. Tremblay and L.-A. Dessaint, “Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 3, no. 2, p. 289–298, Jun. 2009, doi: <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>.
- S. Shevchenko, D. Danylchenko, S. Dryvetskiy, and A. Potryvai, “Modernization of a simulation model of a photovoltaic module, by accounting for the effect of snowing of photovoltaic panels on system performance with correction for panel cleaning for MATLAB Simulink,” in *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, Sep. 13–17, 2021. p. 670–675, doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek53812.2021.9570030>.
- C. M. Shepherd, “Design of primary and secondary cells: II. An equation describing battery discharge,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 112, no. 7, pp. 657, 1965, doi: <https://doi.org/10.1149/1.2423659>.
- F. Gorunescu, *Data Mining: Concepts, Models and Techniques*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19721-5>.
- O. Fink, E. Zio, and U. Weidmann, “Predicting component reliability and level of degradation with complex-valued neural networks,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 121, p. 198–206, Jan. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.08.004>.
- T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, and L. L. Kazmerski, “A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, p. 698–733, Jun. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>.

Надійшло (received) 21.06.2023

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Данильченко Дмитро Олексійович (Dmytro Danylchenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>; e-mail: dmytro.danylchenko@khp.edu.ua.

Потривай Андрій Едуардович (Andrii Potryvai) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1250-7525>; e-mail: potryvai.andrew99@gmail.com.