

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-31>

УДК 681.5

НЕСТЕРЕНКО Андрій

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: nester.letopisets@gmail.com

ФІЛІПОВА Марина

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-4910-3249>

e-mail: m.filippova@kpi.ua

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Проведення діагностики онлайн промислових технологічних процесів є ефективною процедурою для підвищення функціональної безпеки самого процесу та зменшення економічних втрат, спричинених збоями в роботі чи несправностями обладнання, що збільшує тривалість ремонтного простою. Раннє розпізнавання несправностей, що виникають, викликає потребу для операторів технологічних процесів вживати відповідних дій, які би могли дозволити відносно швидко та успішно проводити діагностування з метою попередження збоїв. Таким чином, блокування та заходи безпеки, передбачені та реалізовані в системах керування при правильному підході до діагностування фактично не будуть активовані, а отже, зупинка процесу не відбувається.

Таким чином, діагностичні процедури гарантують, серед іншого, значну економію при виконанні технологічного процесу. При цьому точне та якісне діагностування, дозволяє ізолювати несправності та застосовувати відповідні рішення та ремонтні дії. Точність діагностування можна визначити шляхом додавання кількості несправностей, виявлених у кожному елементарному блоці. Чим менша кількість несправностей зібрано в елементарному блоці, тим точніша процедура діагностування. Діагностичні тести виявляють набір характерних симптомів, пов'язаних із несправністю або набором несправностей. Вони можуть бути визначені або як патерн конкретних значень (симптомів) діагностичних сигналів, а також як певні послідовності (порядки) цих сигналів.

В роботі проведено аналіз застосування систем діагностування для виявлення несправностей в системах керування технологічними процесами. Було проведено моделювання технологічного процесу роботи турбіни для виробництва електроенергії. Моделювання проводили в пакеті прикладних програм MATLAB/Simulink. В якості вхідних сигналів використовували функції лінійного висхідного сигналу. Як компоненти системи використано модулі компресора, турбіни, контролера та пальника. Отримані графіки перехідних процесів та функцій залишків для виявлення несправностей. Виявлення несправностей має часову затримку, яку можна зменшити засновуванням додаткових алгоритмів аналізу функцій залишків.

Отримані результати виявлення несправностей на різних давачах є достатніми для промислових діагностичних застосувань, враховуючи також, що мінімальна кількість виявлених несправностей може бути зменшена, якщо застосувати додаткові алгоритми аналізу залишків.

Ключові слова: діагностування, моделювання, несправність, керування, перехідний процес.

NESTERENKO Andrii, FILIPPOVA Maryna

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

APPLICATION OF DIAGNOSTIC SYSTEMS TO DETECT FAULTS IN TECHNOLOGICAL PROCESS CONTROL SYSTEMS

Conducting online diagnostics of industrial technological processes is an effective procedure for enhancing the functional safety of the process itself and reducing economic losses caused by failures or equipment malfunctions, which increase downtime for repairs. Early recognition of emerging faults requires process operators to take appropriate actions that could allow for relatively quick and successful diagnostics to prevent failures. Thus, the blocking and safety measures foreseen and implemented in the control systems, with the right approach to diagnostics, will not be activated, and therefore, the process is not interrupted.

Thus, diagnostic procedures guarantee, among other things, significant savings in the execution of technological processes. Accurate and high-quality diagnostics allow for isolating faults and applying appropriate solutions and repair actions. The accuracy of diagnostics can be determined by adding up the number of faults detected in each elementary block. The fewer faults collected in the elementary block, the more accurate the diagnostic procedure. Diagnostic tests reveal a set of characteristic symptoms associated with a fault or a set of faults. These can be defined as a pattern of specific values (symptoms) of diagnostic signals, as well as certain sequences (orders) of these signals.

The study analyzed the application of diagnostic systems for detecting faults in process control systems. The modeling of the technological process of turbine operation for electricity production was conducted. The modeling was carried out using the MATLAB/Simulink application package. Linear ascending signal functions were used as input signals. The system components included modules of the compressor, turbine, controller, and burner. Obtained transient process graphs and residual functions were used to detect faults. Fault detection has a time delay, which can be reduced by implementing additional algorithms for analyzing residual functions.

The obtained results of fault detection in various sensors are sufficient for industrial diagnostic applications, considering also that the minimum number of detected faults can be reduced if additional algorithms for residual analysis are applied.

Keywords: diagnostics, modeling, fault, control, transient process.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Проведення діагностики онлайн промислових технологічних процесів є ефективною процедурою для підвищення функціональної безпеки самого процесу та зменшення економічних втрат, спричинених збоями в роботі чи несправностями обладнання, що збільшує тривалість ремонтного простою. Раннє розпізнавання несправностей, що виникають, викликає потребу для операторів технологічних процесів вживати відповідних дій, які би могли дозволити відносно швидко та успішно проводити діагностування з метою попередження збоїв. Таким чином, блокування та заходи безпеки, передбачені та реалізовані в системах керування при правильному підході до діагностування фактично не будуть активовані, а отже, зупинка процесу не відбувається [1].

Таким чином, діагностичні процедури гарантують, серед іншого, значну економію при виконанні технологічного процесу. При цьому точне та якісне діагностування, дозволяє ізолювати несправності та застосовувати відповідні рішення та ремонтні дії. Точність діагностування можна визначити шляхом додавання кількості несправностей, виявлених у кожному елементарному блоці [2]. Чим менша кількість несправностей зібрано в елементарному блоці, тим точніша процедура діагностування. Точність залежить від ступеня розрізнення несправності, досягнутого в даній системі. Під розрізненням дефектів автори розуміють здатність розпізнавати (розрізняти) одиничні дефекти. Як правило, розпізнавання несправностей базується на аналізі відповідно оброблених результатів діагностичних тестів. Діагностичні тести виявляють набір характерних симптомів, пов'язаних із несправністю або набором несправностей. Вони можуть бути визначені або як патерн конкретних значень (симптомів) діагностичних сигналів, а також як певні послідовності (порядки) цих сигналів [2]. Зрозуміло, що недоліки неможливо розрізнити, якщо їх усі симптоми ідентичні. Тому розрізнення несправності залежить від вибору симптомів. Показники розрізнення несправностей є дуже потрібними при побудові систем діагностування. Вимоги до розрізнення несправностей можуть бути визначені, наприклад, шляхом вказування набору пар несправностей, які необхідно розрізнити. Як правило, оператори процесу вимагають розрізнення всіх окремих несправностей. Однак варто зазначити, що це не обов'язково. На практиці достатньо розрізнити ті несправності, наслідки яких є особливо загрозливими. Іншою типовою вимогою є розрізнення несправностей, які можуть бути використані для запуску процедур страхування безпеки процесу. У цьому випадку несправності, до яких відносяться ці процедури, не потрібно розрізнити.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Усунення несправності зазвичай визначається в контексті прийнятого методу діагностики. Його часто аналізують на основі структурних залишків (бінарна діагностична матриця, матриця інцидентності, структурна матриця), отриманих із лінійних рівнянь залишків у внутрішній формі [3]. Основні визначення були сформульовані термінах структур залишкових множин, а також у контексті залишкового простору [4]. Розпізнавання несправностей є важливим питанням, яке впливає на процес проектування діагностичних систем. Зрозуміло, що індикація помітних і нерозрізнених несправностей необхідна для перевірки того, чи задовольняються необхідні вимоги ізоляції несправностей. Відповідний вибір змінних процесу є ключовим у питаннях виявлення та розрізнення несправностей. Як правило, чим більше доступних змінних процесу, тим більше моделей процесів потрібно побудувати. Примітно, що розробка моделей, корисних для діагностики, не є тривіальною. Крім того, це складне питання для складних великомасштабних систем. Методика генерації структур усіх моделей за заданим набором вимірювань обговорюється в [5]. На практиці використовуються також евристичні підходи. У цьому випадку як первинні, так і вторинні залишки отримують шляхом об'єднання (зв'язування) сусідніх часткових моделей діагностованої системи. Часткові моделі призначені для невеликих частин системи, яка підлягає діагностуванню. Як правило, збільшення кількості моделей призводить до збільшення показників розрізнення несправностей. Крім того, розрізнення несправностей можна збільшити за допомогою багатозначних залишків. Як правило, використовується тризначна оцінка залишків. При цьому значення діагностичних сигналів належать набору $v = \{0, -1, +1\}$. Значення діагностичного сигналу 0 означає, що значення залишку знаходиться в певній визначеній і прийнятній межі. Таке значення вказує на номінальний поведінковий стан системи. Інші значення називаються симптомами несправності. Прийняття тризначних залишків є виправданим, оскільки деякі несправності можуть спричинити збільшення залишкових значень вище прийнятних порогів (+1), в той час як інші несправності знижують ці значення нижче прийнятних порогових значень (-1). Тому, принаймні, тризначна оцінка залишків гарантує кращу ступінь розрізнення несправностей. Багатозначна оцінка залишків вимагає знання зв'язку несправність– діагностичні сигнали у формі системи інформації про несправності. Під симптомами несправності розуміються інтерпретовані значення діагностичних сигналів. Оскільки, загалом, діагностована система є динамічною системою, зазвичай виникає затримка між моментом виникнення несправності та моментом, коли з'являється відповідний симптом цієї несправності. Це відставання залежить від динамічних властивостей діагностованої системи. Іншими словами, одна і та ж помилка впливає на різні діагностичні тести в різні моменти часу. Попередження діагностичних сигналів

може надати додаткову інформацію, яка може бути корисною в діагностиці [6]. Крім того, це може бути корисним для диференціації несправностей, які неможливо розрізнити на основі оцінки залишкової вартості. Щоб розрізнити будь-яку пару дефектів, достатньо, щоб передування симптомів цих дефектів було різним.

Співтовариство інформатики та штучного інтелекту розробило численні методи виявлення та ізоляції несправностей, що належать до сімейства методів DX [7]. Діагнози отримують на основі конфліктів, де конфлікт – це набір компонентів системи, для яких припущення, що всі ці компоненти є здоровими, суперечить спостереженням. Остаточними діагнозами є набори конфліктних наборів. Суттєва перевага методів DX порівняно з методологіями виявлення та усунення несправностей (Fault Detection and Isolation, FDI) полягає в тому, що не потрібні додаткові заходи для ізоляції множинних несправностей. Одиночні та множинні несправності виділяються таким же чином.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є: моделювання роботи систем діагностування для технологічного процесу керування турбіною.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Виправдання помилок часто передбачається в методологіях FDI, заснованих на аналітичних відношеннях надлишковості (Analytical Redundancy Relation, ARR). Відповідно до цього припущення, якщо деякі ARR задовольняються спостереженнями, то всі компоненти, пов'язані зі спостереженнями, вважаються невідомими. У підходах DX такого припущення не існує. Загальна структура системи діагностування приведена на рис. 1.

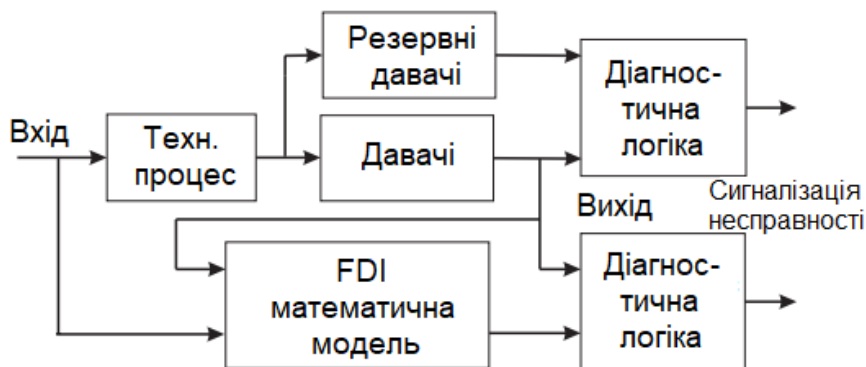


Рис. 1. Загальна структура системи діагностування технологічного процесу

Усі методи FDI на основі моделі використовують модель моніторингової системи для створення генератора симптомів. Якщо система не є складною і може бути точно описана математичною моделлю, FDI здійснюються безпосередньо за допомогою простого геометричного аналізу залишків. Однак у реальних промислових системах невизначеності моделювання не уникнути. Розробка надійної схеми FDI повинна брати до уваги невизначеність моделювання щодо чутливості несправностей [8]. Метод FDI на основі моделі вимагає високоточного математичного опису системи, що контролюється. Чим краще модель представляє динамічну поведінку системи, тим кращою буде точність FDI. Якщо можна розробити такий метод, який нечутливий до невизначеності моделювання, точна модель не обов'язково потрібна. Усі невизначеності можна підсумувати як збурення, що діють на систему. Хоча вектор збурення невідомий, його матрицю розподілу можна отримати за допомогою процедури ідентифікації. Згідно з цим припущенням, принцип розв'язки завад може бути використаний для розробки схеми виявлення несправності з використанням невідомого вхідного спостерігача (Unknown Input Observer, UIO). Якщо зробити припущення, що система може бути описана як модель рівнянь помилки, то стає можливим отримання матриці розподілу збурень з даних безвідмовної системи, враховуючи член помилки. UIO, який забезпечує розв'язання збурень, може бути розроблений на основі моделі вимірювання помилки. У подальшому, фактично, припускається, що контрольована система, зображена на рис. 2, може бути описана моделлю похибки лінійного рівняння з дискретним часом типу [8]:

$$y_i^*(t) = \sum_{k=1}^n \alpha_{ik} y_i^*(t-k) + \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^n \beta_{ik} u_j^*(t-k) + \varepsilon_i(t) \quad (1)$$

де $y_i^*(t)$ ($i = 1, \dots, m$) - i -компонента вихідного вектора системи $y^*(t)$;

u_j^* - j -компонента вхідного вектора керування $u^* \in R^r$

n, α_{ik} та β_{ikj} є параметрами, які мають бути визначені методом ідентифікації.
Термін $\varepsilon_i(t)$ враховує похибку моделювання, що зумовлена шумами процесу, змінами параметрів тощо.

Використовуючи опис передавальної функції, систему (1) можна переписати у вигляді:

$$y_i^*(t) = F_i(z)u^*(t) + G_i(z)\varepsilon_i(t)$$

її структура зображена на рис. 3, де z є оператором унітарного випередження.

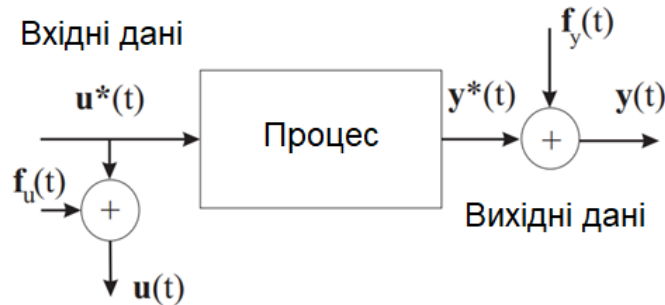


Рис. 2. Структура системи моніторингу технологічного процесу

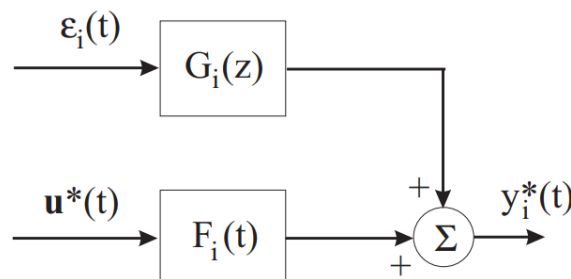


Рис. 3. Структура моделі похибки

Для моделювання системи ідентифікації несправностей FDI створено модель системи парової турбіни для технологічного процесу генерації електроенергії потужність 120 МВт.

Система складається з двовальної промислової газової турбіни, що працює паралельно з електромережею.

Блок-схема системи показана на рис. 4.

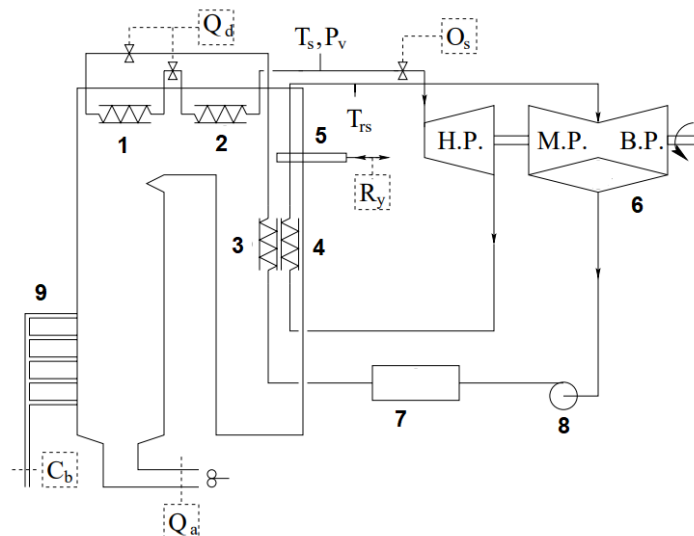


Рис. 4. Структура системи енергогенерації: 1- нагрівач великої потужності (випромінювання); 2 - нагрівач великої потужності (конвекція); 3, 4 – теплообмінники; 5 – заслонки; 6 – конденсатор; 7 - барабан, 8 - водяний насос; 9 - пальник

Для симуляції системи застосували метод спостерігачів виходу, для FDI прототипу промислової газової турбіни і технологічному процесі генерації електроенергії.

Прототип Simulink, зображений на рис. 5, можна описати схемою замкнутого циклу, представленій на рис. 6, в якій змінні f_u , f_s , f_c і f_y , це види несправностей, які можуть виникнути в реальному технологічному процесі.

Вони представляють мультиплікативні несправності виконавчого механізму, системи, компонента контролера та вихідного датчика, відповідно. Зокрема, їх можна змоделювати як функції лінійного висхідного сигналу.

Розглянута проблема стосується виявлення та ізоляції несправностей на основі знання вимірної $y_i(t)$ та оціненої послідовності $\hat{y}_i(t)$ щодо вихідної потужності i -ї турбіни.

Структура пристрою виявлення несправностей зображена на рис. 7.

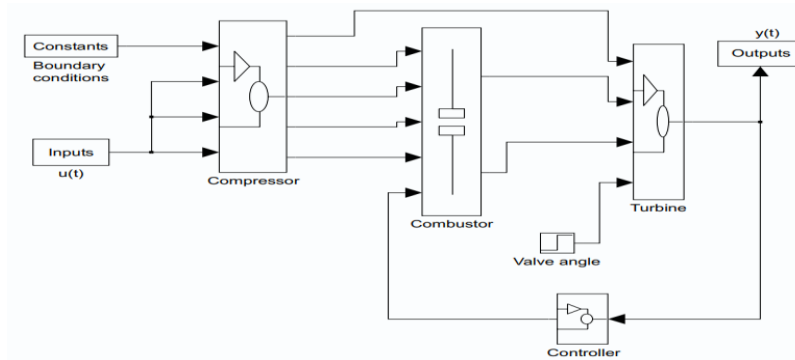


Рис. 5. Прототип процесу генерації в пакеті MATLAB/Simulink

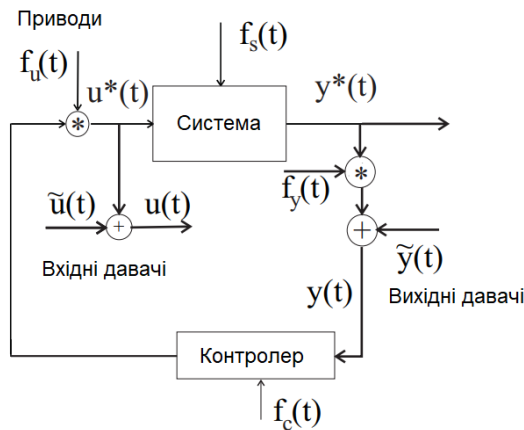


Рис. 6. Схема замкнутого циклу турбіни

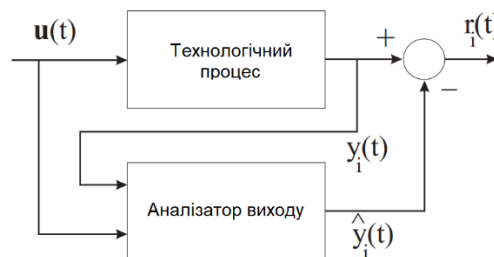


Рис. 7. Логічна схема генератора залишку

Динаміка входу показана на рис. 8.

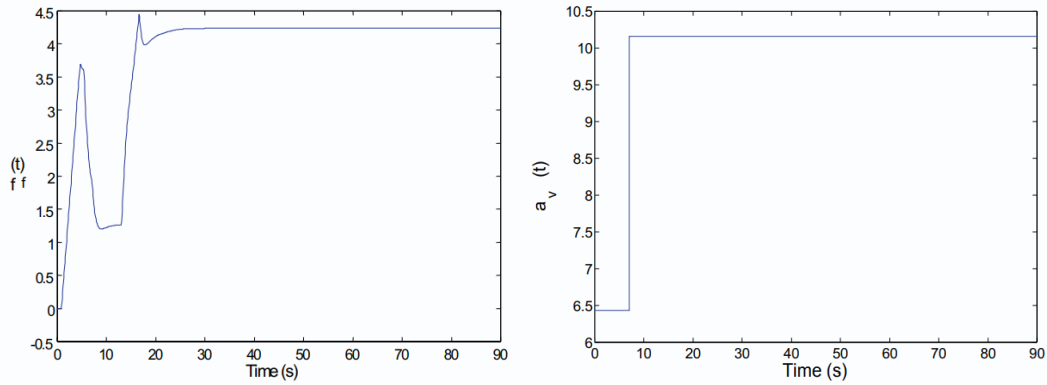


Рис. 8. Динаміка вхідних параметрів системи

Було проведено симуляцію для чотирьох несправностей, а саме:

1. Забрудненість компресора, $f_c(t)$;
2. Несправність датчика термопари, $f_y(t)$;
3. Пошкодження ущільнення турбіни, $f_s(t)$;
4. Пошкодження приводу, $f_u(t)$.

Ці мультиплікативні несправності, які мають розвиваються повільний розвиток, були змодельовані за допомогою лінійних функцій.

Випадок несправності 1 являє собою забруднення поверхонь лопаток компресора, що зменшує потік повітря, змінюючи їх аеродинаміку і, отже, змінюючи шорсткість поверхні.

Сигнал, що відповідає витраті повітря компресора, зображено на рис. 9а, а несправність сигналу – на рис. 9б.

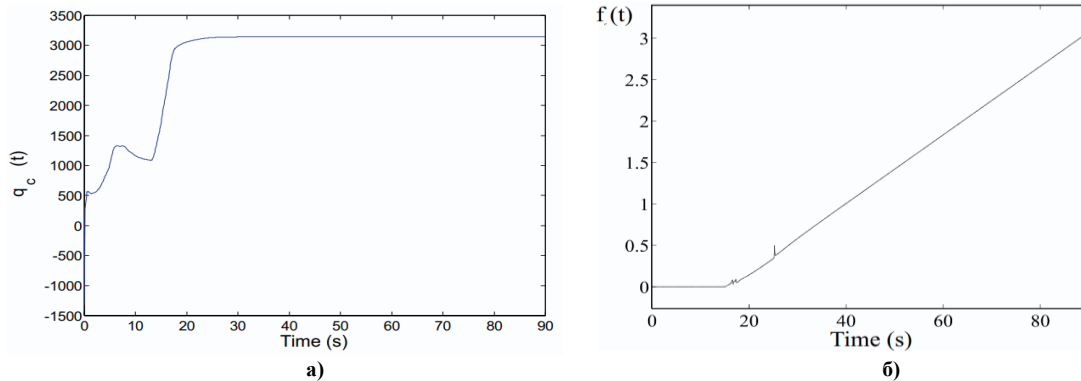


Рис. 9. Графіки роботи та несправності компресора: а) витрата повітря компресора; б) динаміка несправності компресора

Виявлення несправності $f_s(t)$ щодо компресора було виконано за допомогою конфігурації вихідного спостерігача. Вхід $u(t)$ і вихід $y_i(t)$ подають спостерігачу для оцінки самого сигналу $\hat{y}_i(t)$. Полюси вихідного спостерігача для сигналу були обрані близько 0:4. На рисунку 10 показані безвідмовний (суцільна лінія) і несправний залишок (пунктирна лінія), створений першим вихідним спостерігачем.

Графіки вхідних процесів, сигналу несправності та залишків для решти видів несправностей приведені на рис. 10.

При перевищенні функції залишку заданого порогу приймається рішення про наявність несправності системи. Виявлення несправності відбувається із затримкою.

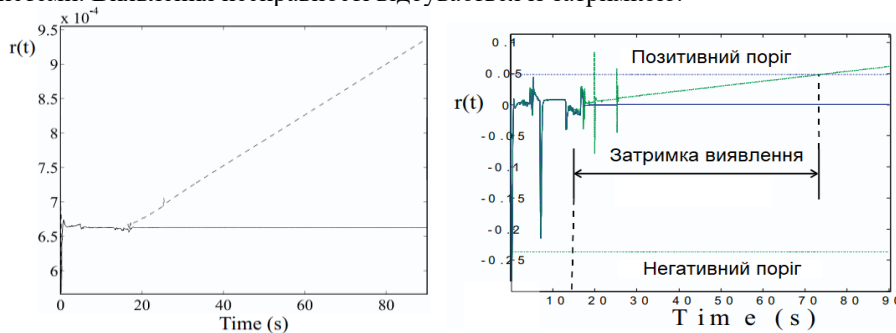


Рис. 9. Залишок несправності компресора та виявлення затримки при несправності

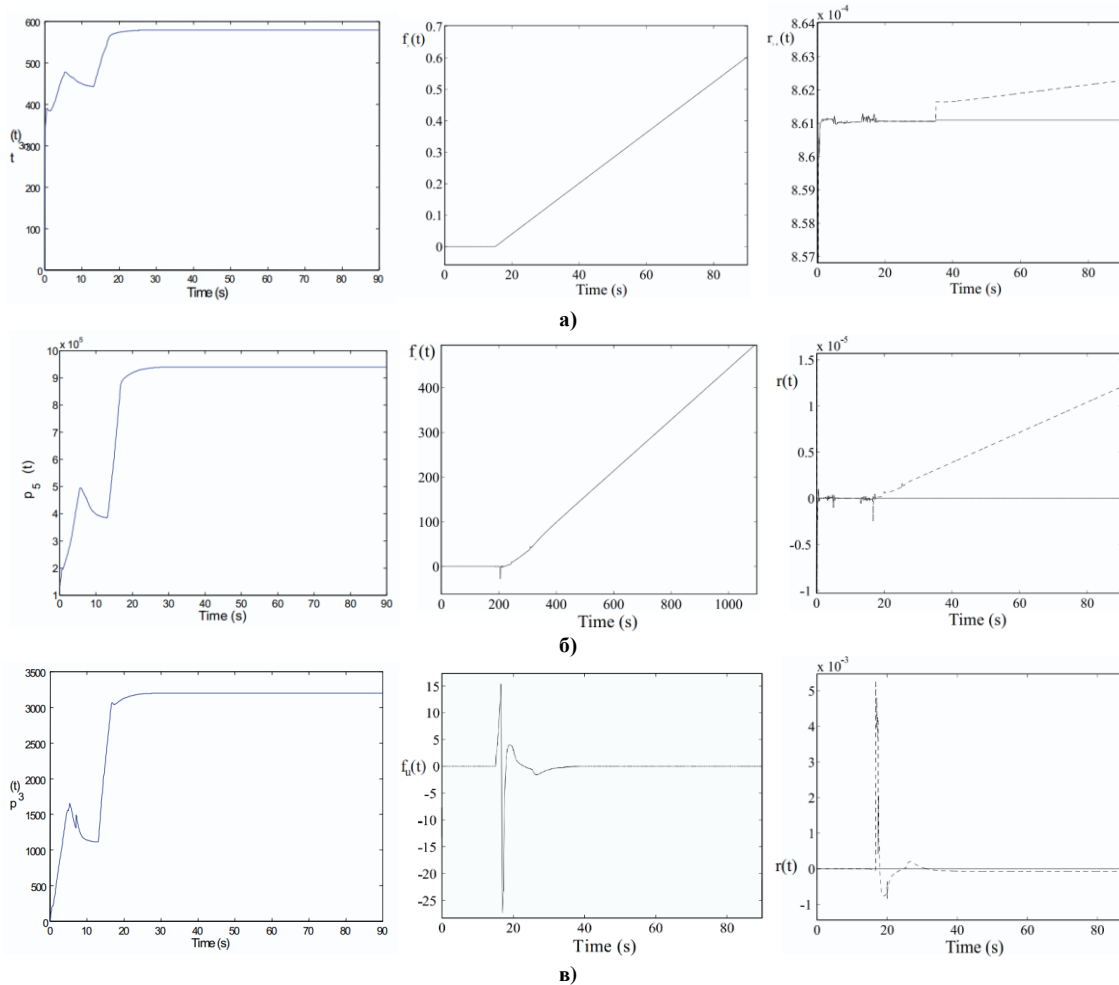


Рис. 10. Графіки нормальної роботи, несправності та залишку отримані при моделюванні роботи компонентів системи: а) несправність датчика термопар, $f_y(t)$; б) пошкодження ущільнення турбіни, $f_s(t)$; в) пошкодження приводу, $f_u(t)$

Всі отримані значення затримок при виявленні несправності приведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Значення затримок при визначенні несправності на основі залишків

Вид несправності	Вимірювання без шуму	Вимірювання з наявністю шуму	Затримка виявлення
Забрудненість компресора, $f_c(t)$	1,0%	1,5%	35с
Несправність датчика термопар, $f_y(t)$	11%	12,5%	35с
Пошкодження ущільнення турбіни, $f_s(t)$	6%	8%	65с
Пошкодження приводу, $f_u(t)$	1,0%	3,5%	20с

Таблиця 1 підсумовує продуктивність методу FDI як у детерміністичному, так і в стохастичному середовищі. Таблиця містить мінімальні значення часу виявлення несправності на чотирьох виходах вимірювання, якщо залишкові або інноваційні значення контролюються за допомогою геометричного тесту та фіксованих порогів (рис. 10).

Мінімальні значення несправності, у таблиці 1 виражені у відсотках від контрольованого сигналу і відносяться до випадку, коли появу несправності необхідно виявити якомога швидше.

Несправності, змодельовані за допомогою лінійних функцій, можуть не негайно виявлені, оскільки затримка відповідного тривоги зазвичай залежить від режиму несправності.

Отримані результати виявлення несправностей на різних датчиках є достатніми для промислових діагностичних застосувань, враховуючи також, що мінімальна кількість виявлених несправностей може бути зменшена, якщо застосувати додаткові алгоритми аналізу залишків.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В роботі проведено аналіз застосування систем діагностування для виявлення несправностей в системах керування технологічними процесами. Було проведено моделювання технологічного процесу роботи турбіни для виробництва електроенергії. Моделювання проводили в пакеті прикладних програм MATLAB/Simulink. В якості вхідних сигналів використовували функції лінійного висхідного сигналу. Як компоненти системи використано модулі компресора, турбіни, контролера та пальника. Отримані графіки перехідних процесів та функцій залишків для виявлення несправностей. Виявлення несправностей має часову затримку, яку можна зменшити засновуванням додаткових алгоритмів аналізу функцій залишків.

Література

1. Kościelny J.M., Bartyś M., Rostek K. The comparison of fault distinguishability approaches – case study // *Technical sciences.* – 2019. – Vol. 67, No. 6. – P. 1059-1068. DOI: 10.24425/bpasts.2019.131566.
2. Kościelny J.M., Syfert M., Rostek K., Szyber A. Fault isolability with different forms of faults-symptoms relation // *Journal of Applied Mathematics and Computer Science.* – 2016. – Vol. 26, No. 4. – P. 815–826.
3. Blanke M., Staroswiecki M. Structural design of systems with safe behaviour under single and multiple faults // *IFAC Symposium Safeprocess.* – 2006. – P. 511–515.
4. Isermann R. *Fault Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance.* – Springer Science & Business Media, 2006. – 475 p.
5. Szyber A. Graph of a Process: A New Tool for Finding Model Structures in a Model-Based Diagnosis // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems.* – 2015. – Vol. 45, No. 7. DOI: 10.1109/TSMC.2014.2384000.
6. Syfert M., Kościelny J.M. Diagnostic reasoning based on symptom forming sequence // *IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes.* – 2009. – P. 89–94. <https://doi.org/10.3182/20090630-4-ES-2003.00015>.
7. Trapani N., Longo L. Fault Detection and Diagnosis Methods for Sensors Systems: Scientific Literature Review // *IFAC-PapersOnLine.* – 2023. – Vol. 56, Issue 2. – P. 1253-1263. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1749>.
8. Simani S., Fantuzzi C., Patton R.J. *Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques.* – Springer London, 2013. – 282 p.

References

1. Kościelny J.M., Bartyś M., Rostek K. The comparison of fault distinguishability approaches – case study // *Technical sciences.* – 2019. – Vol. 67, No. 6. – P. 1059-1068. DOI: 10.24425/bpasts.2019.131566.
2. Kościelny J.M., Syfert M., Rostek K., Szyber A. Fault isolability with different forms of faults-symptoms relation // *Journal of Applied Mathematics and Computer Science.* – 2016. – Vol. 26, No. 4. – P. 815–826.
3. Blanke M., Staroswiecki M. Structural design of systems with safe behaviour under single and multiple faults // *IFAC Symposium Safeprocess.* – 2006. – P. 511–515.
4. Isermann R. *Fault Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance.* – Springer Science & Business Media, 2006. – 475 p.
5. Szyber A. Graph of a Process: A New Tool for Finding Model Structures in a Model-Based Diagnosis // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems.* – 2015. – Vol. 45, No. 7. DOI: 10.1109/TSMC.2014.2384000.
6. Syfert M., Kościelny J.M. Diagnostic reasoning based on symptom forming sequence // *IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes.* – 2009. – P. 89–94. <https://doi.org/10.3182/20090630-4-ES-2003.00015>.
7. Trapani N., Longo L. Fault Detection and Diagnosis Methods for Sensors Systems: Scientific Literature Review // *IFAC-PapersOnLine.* – 2023. – Vol. 56, Issue 2. – P. 1253-1263. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1749>.
8. Simani S., Fantuzzi C., Patton R.J. *Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques.* – Springer London, 2013. – 282 p.