

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ПОБУДОВИ ВІДМОВОСТІЙКИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ В УМОВАХ ЗМІННОГО СЕРЕДОВИЩА

О.А. Коваленко, С.В. Бондаренко

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: oleh.kovalenko@nure.ua, serhii.bondarenko@nure.ua

Анотація: У статті досліджено сучасні підходи до побудови відмовостійких систем керування, орієнтованих на функціонування в умовах змінного та невизначеного середовища. Проаналізовано основні причини виникнення відмов у технічних системах та їх вплив на якість керування. Розглянуто методи підвищення надійності шляхом резервування, реконфігурації структури системи та використання алгоритмів діагностики.

Ключові слова: відмовостійка система керування, змінне середовище, діагностика, резервування, адаптивне керування, надійність

ANALYSIS OF APPROACHES TO DESIGNING FAULT-TOLERANT CONTROL SYSTEMS IN VARIABLE ENVIRONMENTS

O. Kovalenko, S. Bondarenko

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

E-mail: oleh.kovalenko@nure.ua, serhii.bondarenko@nure.ua

Annotation: The article investigates modern approaches to designing fault-tolerant control systems intended for operation in variable and uncertain environments. The main causes of failures in technical systems and their impact on control performance are analyzed. Methods for improving reliability through redundancy, system reconfiguration, and diagnostic algorithms are considered.

Key words: fault-tolerant control system, variable environment, diagnostics, redundancy, adaptive control, reliability

Сучасні автоматизовані системи керування технологічними процесами функціонують в умовах, що характеризуються високим рівнем невизначеності та змінності параметрів як самих об'єктів керування, так і зовнішнього середовища. Це обумовлено зростаючою складністю виробничих систем, їх інтеграцією у розподілені інформаційні структури, а також впливом різноманітних дестабілізуючих факторів, серед яких можна виділити зміну режимів роботи обладнання, варіації технологічних параметрів та вплив зовнішніх збурень. У таких умовах традиційні підходи до побудови систем керування, що базуються на припущенні про сталість параметрів та передбачуваність поведінки об'єкта, виявляються недостатньо ефективними. Це зумовлює необхідність формування нових підходів до забезпечення надійності та стійкості функціонування систем керування.

Особливого значення набуває проблема відмовостійкості, яка передбачає здатність системи зберігати працездатність у разі виникнення відмов окремих її елементів або при зміні умов функціонування. У сучасних виробничих умовах навіть короточасні порушення у роботі систем керування можуть призводити до суттєвих економічних втрат, зниження якості продукції або виникнення аварійних ситуацій. Тому забезпечення відмовостійкості розглядається як одна з ключових вимог до сучасних систем автоматичного керування.

Змінний характер середовища функціонування проявляється у динамічній зміні параметрів об'єкта керування, варіації навантажень, впливі температурних та інших фізичних факторів, а

також у можливих порушеннях інформаційних зв'язків між елементами системи. У таких умовах система керування повинна не лише забезпечувати задані показники якості, але й адаптуватися до змін, зберігаючи стабільність та керованість процесу. Це вимагає використання більш складних алгоритмів обробки інформації, здатних враховувати невизначеність та змінність параметрів.

Актуальність дослідження підходів до побудови відмовостійких систем керування зумовлена також розвитком сучасних інформаційних технологій та переходом до цифрових виробничих середовищ. У таких системах зростає роль програмно-апаратних комплексів, що забезпечують збір, обробку та передавання даних у реальному часі. Водночас збільшується кількість потенційних джерел відмов, пов'язаних як з апаратними, так і з програмними компонентами, що потребує комплексного підходу до забезпечення надійності, який враховує всі рівні функціонування системи.

Причини виникнення відмов у системах керування мають різний характер і визначаються як особливостями побудови технічних засобів, так і умовами їх експлуатації. У загальному випадку відмови можна класифікувати за кількома ознаками, серед яких можна виділити характер прояву, тривалість, ступінь впливу на систему та джерело виникнення. За характером прояву розрізняють раптові та поступові відмови. Раптові відмови виникають без попередніх ознак деградації, що ускладнює їх прогнозування та своєчасне виявлення. Поступові відмови, навпаки, розвиваються у часі внаслідок зношування елементів, старіння матеріалів або накопичення похибок, що створює передумови для їх діагностування та попередження.

За джерелом виникнення відмови поділяються на апаратні, програмні та зовнішні. Апаратні відмови пов'язані з фізичним пошкодженням або деградацією елементів системи, зокрема сенсорів, виконавчих механізмів, комунікаційних каналів та обчислювальних модулів. Причинами таких відмов можуть бути температурні перевантаження, вібрації, вплив агресивного середовища або дефекти виробництва. Програмні відмови зумовлені помилками в алгоритмах керування, некоректною обробкою даних або збоєм у функціонуванні програмного забезпечення. В умовах зростаючої складності програмних систем їх вплив на загальну надійність системи керування постійно зростає. Зовнішні відмови спричинені впливом факторів, що не залежать безпосередньо від самої системи, таких як перебої у живленні, електромагнітні завади або порушення у роботі суміжних систем.

За ступенем впливу відмов на функціонування системи, відмови поділяються на часткові, повні та приховані. Часткові відмови призводять до погіршення характеристик системи, зокрема зниження точності або швидкодії, але не викликають повної втрати керованості. Повні відмови, у свою чергу, можуть призводити до втрати працездатності окремих підсистем або системи в цілому. Особливо небезпечними є приховані відмови, які не проявляються безпосередньо, але впливають на результати вимірювання або керування, що може призводити до накопичення помилок і виникнення критичних ситуацій.

Вплив відмов на якість керування проявляється у зміні динамічних характеристик системи, порушенні стабільності та зниженні точності регулювання. Зокрема, відмова сенсорного елемента може призвести до отримання некоректної інформації про стан об'єкта керування, що, у свою чергу, викликає формування помилкових керуючих впливів. Відмови виконавчих механізмів можуть обмежувати або повністю унеможливити реалізацію керуючих сигналів, що безпосередньо впливає на здатність системи підтримувати задані режими роботи. Порушення у каналах зв'язку можуть спричинити затримки або втрати даних, що негативно позначається на синхронізації процесів керування.

Наявність відмов також ускладнює процес забезпечення стійкості системи, оскільки змінюються її параметри та структура. У деяких випадках це може призводити до виникнення коливальних режимів або навіть до втрати стійкості. Крім того, відмови можуть впливати на

ефективність алгоритмів керування, знижуючи їх здатність адекватно реагувати на зміну умов функціонування. У зв'язку з цим особливого значення набуває своєчасне виявлення відмов та оцінка їх впливу на систему.

Забезпечення відмовостійкості систем керування базується на сукупності методів і технічних рішень, спрямованих на збереження працездатності системи в умовах виникнення несправностей окремих її елементів або порушення нормальних режимів функціонування. Одним із найбільш поширених підходів є використання резервування, яке передбачає введення додаткових елементів або підсистем, здатних замінити основні у разі їх відмови. Резервування може реалізовуватися на різних рівнях, зокрема апаратному, функціональному та інформаційному. Апаратне резервування полягає у дублюванні критично важливих компонентів, таких як сенсори, виконавчі механізми або обчислювальні модулі. Функціональне резервування передбачає можливість виконання однієї і тієї ж функції різними засобами, що підвищує гнучкість системи. Інформаційне резервування реалізується шляхом використання надлишкових даних або алгоритмів перевірки достовірності інформації.

Важливим напрямом підвищення відмовостійкості є реконфігурація структури системи керування, яка передбачає зміну її внутрішніх зв'язків та режимів функціонування у відповідь на виявлені відмови. Такий підхід дозволяє адаптувати систему до нових умов роботи без повної зупинки технологічного процесу. Реконфігурація може здійснюватися автоматично на основі вбудованих алгоритмів або за участю оператора, залежно від складності системи та характеру відмови. При цьому важливим є забезпечення коректності переходу між різними режимами функціонування та мінімізація перехідних процесів, що можуть негативно впливати на якість керування.

Методи діагностики відмов забезпечують їх виявлення, локалізацію та ідентифікацію. Ефективна система діагностики дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи та визначати їх причини. Це створює передумови для оперативного прийняття рішень щодо усунення несправностей або переходу системи у безпечний режим функціонування. Методи діагностики можуть базуватися як на аналізі вимірних сигналів, так і на використанні моделей об'єкта керування, що дозволяє порівнювати реальні та очікувані значення параметрів. Застосування сучасних алгоритмів обробки даних розширює можливості діагностики, підвищуючи її точність та швидкодію.

Принципи підвищення надійності систем керування тісно пов'язані з комплексним підходом до їх проектування та експлуатації. Одним із ключових принципів є врахування можливих відмов ще на етапі розробки системи, що дозволяє закласти відповідні механізми їх компенсації. Важливим є також принцип модульності, який передбачає поділ системи на окремі функціональні блоки з чітко визначеними інтерфейсами. Це спрощує процес виявлення та локалізації відмов, а також полегшує заміну окремих компонентів без впливу на систему в цілому.

Підвищення надійності досягається також і за рахунок використання адаптивних алгоритмів керування, здатних враховувати зміну параметрів об'єкта та умов функціонування. Такі алгоритми дозволяють компенсувати негативний вплив відмов або збурень, підтримуючи задані показники якості керування. Забезпечення стійкості системи до невизначеностей досягається шляхом використання робастних підходів до синтезу керування.

Адаптивні механізми у відмовостійких системах керування відіграють ключову роль у забезпеченні стабільного функціонування в умовах невизначеності, змінності параметрів об'єкта та наявності збурень різної природи. На відміну від класичних систем, які функціонують на основі заздалегідь визначених параметрів, адаптивні системи здатні змінювати власні характеристики у процесі роботи, реагуючи на відхилення від номінального режиму. Це дозволяє підтримувати необхідний рівень якості керування навіть у випадках,

коли структура об'єкта або його параметри зазнають змін. Особливого значення адаптивні механізми набувають у ситуаціях, коли відмови окремих елементів системи призводять до порушення її початкових налаштувань і вимагають оперативного коригування алгоритмів керування.

Реалізація адаптивного керування передбачає використання алгоритмів, що забезпечують ідентифікацію поточного стану об'єкта та оцінку його параметрів у реальному часі. На основі отриманої інформації здійснюється корекція керуючих впливів або переналаштування параметрів регулятора. Це дозволяє компенсувати вплив невизначеностей, а також зменшити наслідки відмов, що виникають у системі. Також треба забезпечити стійкість адаптивних алгоритмів, оскільки некоректна реакція на зміну параметрів може призвести до погіршення динамічних характеристик або навіть до втрати керованості.

Адаптивні механізми реалізуються у різних формах, зокрема у вигляді самоналаштовуваних регуляторів, систем із змінною структурою або алгоритмів, що використовують моделі об'єкта керування. Усі ці підходи спрямовані на забезпечення здатності системи пристосовуватися до нових умов функціонування без необхідності зовнішнього втручання. Ефективними є методи, що поєднують адаптацію з елементами прогнозування, що дозволяє не лише реагувати на зміни, але й передбачати їх розвиток. Це створює передумови для більш ефективного управління складними динамічними процесами.

У розрізі відмовостійкості адаптивні механізми виконують функцію компенсації наслідків відмов, забезпечуючи збереження працездатності системи навіть при частковій втраті її функціональних можливостей. Наприклад, у разі відмови сенсорного елемента система може використовувати альтернативні джерела інформації або оцінювати необхідні параметри на основі моделей. У випадку деградації виконавчих механізмів адаптивні алгоритми дозволяють перерозподіляти керуючі впливи таким чином, щоб мінімізувати негативний вплив несправності.

Подальший розвиток відмовостійких систем керування тісно пов'язаний із процесами цифровізації виробництва та впровадженням сучасних інформаційних технологій. Сучасні виробничі системи дедалі більше орієнтуються на використання цифрових платформ, які забезпечують інтеграцію різноманітних технічних засобів у єдине інформаційне середовище. У таких умовах системи керування стають більш складними, але водночас отримують нові можливості для підвищення ефективності та надійності. Використання цифрових технологій дозволяє забезпечити безперервний моніторинг стану обладнання, аналіз великих обсягів даних та оперативне прийняття рішень.

Таким чином, підвищення автономності систем керування є ще одним важливим напрямом розвитку. Сучасні системи все частіше здатні самостійно приймати рішення на основі аналізу поточної ситуації, що зменшує залежність від людського фактору та підвищує оперативність реагування на зміни.

ЛІТЕРАТУРА

1. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2018.–190 с.
2. Mahmood, A.; Khan, A.Q.; Ullah, N.; Khan, A.S.; Abbasi, M.A.; Mohammad, A.; Noorwali, A. Faults Modeling in Networked Environment and Its Tolerant Control with Multiple Simultaneous Faults. *Mathematics* 2023, 11, 996
3. Abbaspour, A.; Sargolzaei, A.; Forouzannezhad, P.; Yen, K.K.; Sarwat, A.I. Resilient Control Design for Load Frequency Control System under False Data Injection Attacks. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2019, 67, 7951–7962.

4. Control in System Dynamics: Comparative Analysis of Feedback Strategies [Electronic resource] / Alain Oustaloup. – John Wiley and Sons Ltd, 2024. – 464 p.
5. Application of nonlinear systems theory to enhance the accuracy of automatic control systems in technological processes / V. Ovcharenko, O. Tokarieva // XII International scientific and practical conference «Prospective directions of modern science and education in the world», November 19-22, 2024, Rotterdam, Netherlands. International Science Group.2024. P. 373-375.
6. Abbaspour, A.; Mokhtari, S.; Sargolzaei, A.; Yen, K.K. A Survey on Active Fault-Tolerant Control Systems. Electronics 2020, 9, 1513.
7. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. Computational intelligence and neuroscience, 2022(1), 3046116.
8. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Khosravi, M. R. (2022). Control system development and implementation of a CNC laser engraver for environmental use with remote imaging. Computational intelligence and neuroscience, 2022(1), 9140156.
9. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. J. Math. Comput. Sci., 11(1), 520-542.
10. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2022, September). Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In 2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) (pp. 61-64). IEEE.
11. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Yevsieiev, V., Amer, A., Demska, N., Luhach, A. K., & Lyashenko, V. (2022). Electronic user authentication key for access to HMI/SCADA via unsecured internet networks. Computational intelligence and neuroscience, 2022(1), 5866922.
12. Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94
13. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2025). Remote monitoring system of patient status in social IoT environments using amazon web services technologies and smart health care. International Journal of Crowd Science, 9(2), 110-125.
14. GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, V. Lyashenko, M. Ayaz. Ahmad // Advances in Dynamical Systems and Applications. – 2021. – Vol. 16(2). – pp. 441-455.
15. Yevsieiev, V., & Starodubcev, N. (2023). Development of a control algorithm for a small-sized mobile manipulation robot. Scientific Collection «InterConf», (140), 648-651.
16. Yevsieiev V. Development of a program for modeling the control of a mobile manipulation robot in the unity environment / V. Yevsieiev, N. Starodubcev // Science in Environment of Rapid Changes : proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Brussels, Belgium, February 6-8, 2023. - Brussels : De Boeck, 2023. - Scientific Collection «InterConf» . - № 141. - P. 331-334.

Науковий керівник: *Овчаренко Віталій Євгенович, проф., д.т.н., професор кафедри КІТАРБІ Харківського національного університету радіоелектроніки.*