

С. І. Клівець, О. В. Кулешов, Т. В. Кулешова

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ СТАНІВ СКЛАДНОЇ ГЕТЕРОГЕННОЇ СИСТЕМИ ПРИ ОПЕРАТИВНОМУ УПРАВЛІННІ

**Анотація.** **Актуальність.** При оперативному управлінні необхідно прогнозувати можливі зміни станів складної системи. Але при суттєвій гетерогенності блоків складної системи стандартні методи розрахунку станів надають прогноз з неприпустимими похибками. **Мета статті** – розробити метод визначення зміни станів складної гетерогенної системи з припустимими похибками при оперативному управлінні. **Результати дослідження.** Розроблена математична модель зміни станів складної гетерогенної системи. Технічний стан блока в будь-який момент часу в моделі характеризується агрегованим параметром, який є ймовірністю безвідмовної роботи блока. На основі розробленої моделі запропонований метод побудови функції перехідних ймовірностей процесу зміни значень агрегованого параметра. **Висновок.** Розроблений метод дозволяє зменшити похибку прогнозу зміни стану складної гетерогенної системи при введенні агрегованого параметра.

**Ключові слова:** складна система, гетерогенність, стан системи, оперативне управління.

### Вступ

Однією з основних проблем при оперативному управлінні є питання прийняття рішень в стохастичних системах. Такі проблеми, наприклад, виникають в різноманітних роду системах управління складними об'єктами. Є два напрямки розвитку методів прийняття оптимальних рішень в стохастичних системах [1]. Одне з них тісно примикає до нелінійного програмування. Це стохастичне програмування, в якому розглядаються задачі умовного екстремуму при наявності додаткових обмежень, що враховують стохастичну природу систем [2]. Тут початкове рішення інтерпретується як деякий план одноразового застосування. Але цей напрямок мало пристосований для застосування як апарат для прийняття рішень в задачах оперативного управління, хоча така можливість не виключається [3, 4]. Другий напрямок орієнтований на динамічні, керуємі і стохастичні системи. Методи прийняття рішень в них ґрунтуються на управлінні станом, що може змінюватися під впливом керувань деяким випадковим чином. Очевидно, що це направлення природним чином пристосоване для прийняття рішень в задачах оперативного управління [5, 6]. Але при такому підході при суттєвій гетерогенності блоків складної системи стандартні методи розрахунку станів надають прогноз з неприпустимими похибками [7–10].

**Мета роботи** – розроблення методу визначення зміни станів складної гетерогенної системи з припустимими похибками при оперативному управлінні.

### 1. Математична модель зміни станів складної гетерогенної системи

Для завдання моделі марківського процесу рішення треба визначити:

- множину станів процесу, що досліджується;
- множину керуючих впливів, що застосовуються в гетерогенній системі, яка знаходиться в одному з можливих станів;
- ймовірності переходів системи з одних станів складної гетерогенної системи в інші при застосуванні різноманітних керуючих впливів;

– безпосередній вигравш при переході складної гетерогенної системи з одного стану в інший.

При математичній формалізації перерахованих компонентів моделі найбільшу складність, як правило, викликає завдання третьої компоненти – перехідних ймовірностей досліджуваного процесу еволюції системи.

Така проблема виникає, наприклад, при визначенні оптимальної стратегії управління технічним станом складних об'єктів з континуальною множиною станів [10].

Нехай є складна гетерогенна система управління складним об'єктом. Момент надходження заявки на використання даного об'єкта є випадковим, тобто заздалегідь невідомим. При використанні складного об'єкта за призначенням у випадковий момент часу  $t$  система управління повинна безвідмовно відпрацювати якійсь конкретний час  $T_p$ . Якщо система управління складається з  $K$  блоків ( $k = 1, K$ ), то при використанні об'єкта кожний з її блоків буде відпрацьовувати час  $T_p^k$ .

Технічний стан  $k$ -го блока в будь-який момент часу будемо характеризувати агрегованим параметром  $z^k(t)$ , який є ймовірністю безвідмовної роботи блока протягом часу  $T_p^k$ , при умові, що заявка на застосування об'єкта надійде в момент часу  $t$ . Тоді стан системи управління буде однозначно (з точки зору надійності) визначатися сукупністю таких агрегованих параметрів блоків:

$$z(t) = (z^1(t), z^2(t), \dots, z^k(t), \dots, z^K(t)). \quad (1)$$

Таким чином, параметр  $z$  приймає своє значення із множини  $S$ , яка має потужність, що описується таким декартовим добутком:

$$|S| = \left[ 0, z_b^1 \right] \times \left[ 0, z_b^2 \right] \times \dots \times \left[ 0, z_b^k \right] \times \dots \times \left[ 0, z_b^K \right], \quad (2)$$

де  $z_b^k$  – максимальне значення агрегованого параметра  $k$ -го блока, що володіє конкретною структурною схемою надійності і не має відмов за час  $m_p^k$ .

Кожний блок, що входить в склад системи управління, повинен проходити контролювання, при цьому одна частина блоків періодично перевіряється тестовим контролем з глибиною до елемента, що контролюється а інша частина блоків наражається на постійний апаратний контроль, на працездатність. При цьому в силу неідеальності системи контролю виникають помилки контролю першого і другого роду. Під час роботи системи управління при надходженні заявки також проводиться контроль кожного блока, однак повнота цього виду контролю менше, тому помилки першого і другого роду в цьому випадку мають більше значення.

Якщо в момент  $t_0$  агрегований параметр  $k$ -го блока мав значення

$$z^k(t_0) = z_0^k, \quad (3)$$

то в момент  $t_0 + t$  він може прийняти або значення

$$z^k(t) = z_t^k = 0, \quad (4)$$

або одне із значень, що належить відрізьку

$$\left[ z_H^k, z_t^k \right], \quad (5)$$

де  $z_H^k$  – нижнє значення агрегованого параметра, при якому  $k$ -й блок гарантовано здатний безвідмовно проробити час  $T_p^k$ .

Розглянемо різницю

$$\eta^k(t) = z_t^k - z_0^k. \quad (6)$$

В [1] показано підхід до визначення перехідних ймовірностей абстрактного полумарківського процесу зміни значень деякого параметра  $z$  при відомій умовній функції розподілу такого вигляду:

$$F_k = F_{\eta^k} \left( v \left| z_0^k, t \right. \right). \quad (7)$$

Використовуючи цей підхід, перехідні ймовірності процесу зміни значень агрегованого параметра можна подати у вигляді  $(c^k < b^k)$ :

$$q^k \left( t, (b^k, c^k) \left| z_0^k \right. \right) = \begin{cases} F_{\eta^k} \left( z_0^k - c^k \left| z_0^k, t \right. \right) - \\ - F_{\eta^k} \left( z_0^k - b^k \left| z_0^k, t \right. \right), & z_0^k > b^k > c^k, z_0^k \geq z_p^k; \\ F_{\eta^k} \left( z_0^k - c^k \left| z_0^k, t \right. \right), & b^k \geq z_0^k > c^k, z_0^k \geq z_H^k; \\ 0, & b^k > c^k \geq z_0^k, z_0^k \geq z_H^k; \\ 0, & c^k \neq 0, z_0^k < z_H^k; \\ 1, & c^k = 0, z_0^k < z_H^k. \end{cases} \quad (8)$$

## 2. Метод визначення зміни агрегованого параметра складної гетерогенної системи

Розглядувана математична модель (1)–(8) призначена для визначення аналітичного виразу умовної

функції розподілу  $F_k$  при дослідженні конкретного процесу зміни агрегованого параметра заданої складної гетерогенної системи.

Вираз для  $F_k$  є функцією 3-х аргументів  $V, z_0^k, t$ . Метод полягає в багатократному моделюванні процесу експлуатації системи управління таким чином, щоб кожному відомому поєднанню значень аргументів ставало у відповідність значення функції. Таким чином визначається функція таблиця дискретних значень  $F_k$ . Далі шляхом використання стандартних програм інтерполяції, наведених, наприклад, в [9], визначається аналітичний вираз цієї функції.

Розглянемо покроковий алгоритм отримання дискретних значень функції  $F_k$ .

*Крок 1.* Визначити значення  $z_0^k, z_H^k$ . Ці значення визначаються одним з відомих методів [6] для заданих структурної схеми надійності та інтенсивності відмов комплектуючих блок елементів.

*Крок 2.* Покласти  $l = 1$ .

*Крок 3.* Випадковим чином задати вхідний  $l$ -й стан блока в момент  $t_0 = 0$ .

*Крок 4.* Шляхом імітації процесу роботи блока визначити для моменту  $t_0$  значення агрегованого параметра блока, який знаходиться в  $l$ -му стані

$$z_0^{(l)} = P_{S_0^{(l)}}(T_P^k).$$

При цьому необхідно врахувати характеристики системи контролю (повноту, помилки контролю).

*Крок 5.* Покласти  $c = 0$ .

*Крок 6.* Вибрати значення  $t = t_c$ .

*Крок 7.* Покласти  $n = 1, r_u = 0$ .

*Крок 8.* Змодельовати спонтанну еволюцію блока на відрізьку часу  $[t_0, t]$ .

*Крок 9.* Моделюючи процес роботи блока визначити для моменту  $t$  значення агрегованого параметра блока

$$z_{kn}^{(l)} = P_{S_{kn}^{(l)}}(T_P^k)$$

з урахуванням характеристик системи контролю.

*Крок 10.* Обчислити значення

$$\eta_{kn}^{(l)} = z_0^{(l)} - z_{kn}^{(l)}.$$

*Крок 11.* Покласти  $u = 1$ .

*Крок 12.* Обчислити різницю  $v_u = z_0 - z_u$ .

*Крок 13.* Перевірити умову

$$\eta_{kn}^{(l)} \leq v_u.$$

Якщо "так", то перейти до кроку 14, а в протилежному випадку перейти до кроку 16.

*Крок 14.* Покласти  $r_u = r_u + 1$ .

*Крок 15.* Обчислити значення

$$F_{\eta^k}^{(l)} \left( V_m \left| z_0^{(l)}, t_k \right. \right) = \frac{r_u}{N}.$$

*Крок 16.* Перевірити умову  $u < U$ . Якщо "так", то перейти до кроку 17. В протилежному випадку перейти до кроку 19.

*Крок 17.* Покласти  $u = u + 1$ .

Крок 18. Обчислити значення  $v_u = v_u - \frac{v_u}{2 - u/U}$

та повернутися до кроку 13.

Крок 19. Перевірити умову  $n < N$ . Якщо "так", то перейти до наступного кроку. В протилежному випадку треба перейти до кроку 21.

Крок 20. Покласти  $n = n + 1$  і перейти до кроку 8.

Крок 21. Запамятати поточні значення  $z_0^{(l)}$ ,  $t_k$ ,  $v_u$ ,  $F_{\eta_k^{(l)}}(V_u z_0^{(l)}, t_k)$ .

Крок 22. Перевірити умову  $k < K$ . Якщо "так", то перейти до наступного кроку. В протилежному випадку треба перейти до кроку 24.

Крок 23. Покласти  $k = k + 1$  і перейти до кроку 6.

Крок 24. Перевірити умову  $l < L$ . Якщо "так", то перейти до наступного кроку. В протилежному випадку треба перейти до кроку 26.

Крок 25. Покласти  $l = l + 1$  і перейти до кроку 3.

Крок 26. Виведення вихідних даних і запуск стандартної програми апроксимації функції трьох аргументів. Кінець.

Вибравши достатнє значення  $U$ , одержують аналітичні вирази (8) для перехідних імовірностей полумарківського процесу зміни агрегованого параметра блока. Різноманітні сукупності елементів декартового добутку таких перехідних імовірностей дадуть вираз для імовірностей переходів процесу зміни агрегованого параметра системи управління в цілому.

### Висновки

В результаті проведених досліджень розроблена математична модель зміни станів складної гетерогенної системи. Технічний стан блока в будь-який момент часу в моделі характеризується агрегованим параметром, який є ймовірністю безвідмовної роботи блока. Розроблена модель враховує зміни технічного стану апаратури з урахуванням характеристик системи контролю і відновлення. На основі розробленої моделі запропонований метод побудови функції перехідних імовірностей процесу зміни значень агрегованого параметра.

Розроблений метод дозволяє зменшити похибку прогнозу зміни стану складної гетерогенної системи при введенні агрегованого параметра.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Emzir, M.F. Efficient projection filter algorithm for stochastic dynamical systems with correlated noises and state-dependent measurement covariance. *Signal Processing*, 2024. 218, 109383. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2024.109383>
2. Chetthamrongchai, P., Sayed, B.T., Artemova, E.I., Bashar, B.S., Heri Iswanto, A. Designing a Mathematical Model to Solve the Uncertain Facility Location Problem Using C Stochastic Programming Method. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 2023. Vol. 48(3). Pp. 345–355. Doi: <https://doi.org/10.2478/fcds-2023-0014>
3. Pratama, I.N., Dachyar, M., Pratama, N.R. Optimization of Resource Allocation and Task Allocation with Project Management Information Systems in Inf. Techn. Companies. *TEM Journal*. 12(3). Pp. 1814–1824. <https://doi.org/10.18421/TEM123-65>
4. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kasprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
5. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
6. Nechausov A., Mamusić I., Kuchuk N. Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures. *Сучасні інформаційні системи*. 2017. Т. 1, № 2. С. 21 – 26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>
7. Iervolino, R., Manfredi, S. Global stability of multi-agent systems with heterogeneous transmission and perception functions. *Automatica*. 2024. 162, 111510. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.automatica.2024.111510>
8. Кучук Н. Г., Мерлак В. Ю., Скороделов В. В. Метод зменшення часу доступу до слабкоструктурованих даних. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4, № 1. С. 97-102. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.14>
9. Kovalenko, A. and Kuchuk, H. (2022), "Methods to Manage Data in Self-healing Systems", *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 425, pp. 113–171, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96546-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96546-4_3)
10. Shi, H., Lin, W., Liu, C., Yu, J. A Novel Heterogeneous Parallel System Architecture Based EtherCAT Hard Real-Time Master in High Performance Control System. *Electronics*. 11(19), 3124. Doi: <http://doi.org/10.3390/electronics11193124>

Received (Надійшла) 29.11.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.01.2024

### Method of determining the change of state of a complex heterogeneous system under operational management

Sergii Klivets, Alexander Kuleshov, Tetiana Kulieshova

**Abstract. Topicality.** During operational management, it is necessary to predict possible changes in the state of a complex system. But with significant heterogeneity of the blocks of a complex system, standard methods of calculating states provide a forecast with unacceptable errors. **The purpose of the article** is to propose a method for determining the state change of a complex heterogeneous system with acceptable errors during operational control. **Research results.** A mathematical model of the change of states of a complex heterogeneous system has been developed. The technical state of the block at any moment in time in the model is characterized by an aggregated parameter, which is the probability of the block's failure-free operation. On the basis of the developed model, a method of constructing the function of transitional probabilities of the process of changing the values of the aggregated parameter is proposed. **Conclusion.** The developed method makes it possible to reduce the forecast error of a change in the state of a complex heterogeneous system when an aggregated parameter is introduced.

**Keywords:** complex system, heterogeneity, system state, operational management.