

В. В. Стрінада, М. О. Гуменюк, В. П. Добровінський, А. О. Ткач

КРИТЕРІЙ УПРАВЛІННЯ РОБОТИЗОВАНОЮ СИСТЕМОЮ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ НЕКОНТРОЛЬОВАНИХ ФАКТОРІВ

У статті запропоновано критерій управління роботизованою системою, який на основі інформаційного підходу дозволяє враховувати вплив неконтрольованих факторів та статистичних зв'язків між ними в процесі добування інформації.

У даній науковій роботі вибір оптимальної стратегії управління роботизованою системою в процесі добування інформації забезпечує показник, який характеризує ефективність управління. Слід зауважити, що наявність неконтрольованих факторів (перешкод, погодних умов, технічних несправностей тощо), які враховані у формальній математичній моделі управління, призводить до залежності показника ефективності не лише від вибраної стратегії управління, а й від значень неконтрольованих факторів. При цьому як вибрана стратегія управління, так і показник ефективності процесу добування інформації є функціями від неконтрольованих факторів відповідно.

Використання запропонованого критерію дозволяє приймати правильні рішення в процесі управління роботизованою системою в разі впливу неконтрольованих факторів. Він може бути застосований за умов статистичної залежності неконтрольованих факторів та зміни станів досліджуваного процесу. Даний критерій не вимагає побудови моделей на основі оцінюваних комбінацій факторів, що істотно знижує часові та обчислювальні витрати для прийняття рішень у процесі управління роботизованою системою. Його використання дозволяє визначати, наскільки нове спостереження збільшить обізнаність роботизованої системи щодо стану досліджуваного процесу.

Варто зауважити, що перспективи подальших досліджень можуть полягати в модифікації чинних та розробці нових методів планування застосування роботизованої системи на основі запропонованого критерію.

Ключові слова: критерій управління; роботизована система; вплив неконтрольованих факторів; інформаційний підхід.

Постановка проблеми в загальному вигляді. В умовах стрімкого розвитку роботизованих систем постійно підвищуються вимоги до процесу управління ними. Це зумовлює необхідність підвищення ефективності управління роботизованими системами, одним із пріоритетних напрямків якого є розроблення сучасної методологічної бази автоматизованого процесу обробки інформації на основі всебічного комплексного аналізу даних. При цьому процес добування інформації роботизованою системою визначається як стохастичний [1, 2], а управління ним здійснюється відповідно до певного критерію для прийняття правильного рішення за результатами спостережень.

Також слід зазначити, що процес управління роботизованою системою характеризується впливом великої кількості неконтрольованих факторів (перешкод, погодних умов, технічних несправностей тощо), неврахування яких під час прийняття управлінських рішень призводить до зниження ефективності самого процесу управління.

© В. В. Стрінада, М. О. Гордійчук, В. П. Добровінський, А. О. Ткач, 2019

Тому актуальною проблемою є обґрунтування критерію управління роботизованою системою з урахуванням впливу неконтрольованих факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Інформаційний підхід набув широкого розповсюдження в робототехніці, зокрема в управлінні роботизованими системами. Так, у [3, 4] запропоновано керувати роботами на основі кількості інформації між даними сенсорів та координатами цілі. У [5] використано схожий метод для дослідження навколишнього середовища в умовах невизначеності. У [6–8] розглянуто проблему планування маршрутів для дослідження навколишнього середовища на основі інформаційного критерію.

У [9, 10] використано інформаційний підхід для управління мережею сенсорів у процесі добування даних для визначення стану навколишнього середовища. В [11] описано використання інформаційного підходу для процесу управління дослідження стану стохастичної системи. У [12] показано переваги цього підходу для управління сенсорами з бінарними вимірюваннями порівняно з іншими критеріями.

У роботах [13, 14] запропоновано використання інформаційного підходу в ході планування застосування мобільних роботів для вирішення завдань із дослідження навколишнього середовища. Однак запропоновані в [13, 14] підходи не є адаптованими до врахування нових вимірювань у процесі виконання запланованого завдання. Це значно знижує ефективність управління в умовах зміни обстановки.

Слід зазначити, що у вказаних публікаціях не враховано вплив неконтрольованих факторів на процес управління та є припущення щодо незалежності результатів проведених роботами вимірювань, а це призводить до хибного визначення інформативності сукупності вимірювань та, як наслідок, до помилкових рішень у ході управління роботизованою системою.

Таким чином, **метою статті** є розробка критерію управління роботизованою системою на основі інформаційного підходу, який дозволить враховувати вплив неконтрольованих факторів та статистичних зв'язків між ними в процесі добування інформації.

Виклад основного матеріалу. В ідеальному випадку вибір оптимальної стратегії управління добуванням інформації роботизованою системою U забезпечує число $G = G(U)$, яке характеризує ефективність управління роботизованою системою. Водночас наявність неконтрольованих факторів x , які враховують у формальній математичній моделі управління, веде до залежності показника ефективності не лише від вибраної управлінської стратегії, а й від x , тобто $G = G(U, x)$. При цьому як вибрана стратегія управління, так і показник ефективності процесу добування інформації є функціями неконтрольованих факторів.

Розглянемо роботизовану систему Ω , яка отримує інформацію про досліджувану систему Λ . Під час добування даних система Λ може знаходитися в одному зі станів $L_i = \{L_1, L_2, \dots, L_N\}$, де N – кількість можливих станів, які утворюють повну групу подій. Процес переходу системи Λ в один зі станів L_i є випадковим, опишемо його кінцевою

множиною ймовірностей $\{p(L_1), p(L_2), \dots, p(L_N)\}$, $\sum_{i=1}^N p(L_i) = 1$.

Припустимо, що в процесі добування інформації на роботизовану систему Ω може впливати неконтрольований фактор x_k , який може приймати J дискретних значень (градацій).

Ентропію рішення про стан системи Λ , за умови визначення j -ї градації k -го неконтрольованого фактора, будемо знаходити як

$$H(L/x_{kj}) = -\sum_{i=1}^N p(L_i/x_{kj}) \log_N p(L_i/x_{kj}), \quad (1)$$

де $p(L_i/x_{kj})$ – умовна ймовірність знаходження системи Λ в i -му стані за умови визначення j -ї градації k -го неконтрольованого фактора, $j = \overline{1, J}$.

Застосовуючи формулу Бейєса для визначення умовної ймовірності $p(L_i/x_{kj})$, отримаємо

$$p(L_i/x_{kj}) = \frac{p(L_i)p(x_{kj}/L_i)}{p(x_{kj})},$$

де $p(L_i)$ – апіорна ймовірність знаходження системи Λ у L_i -му стані;

$p(x_{kj}) = \sum_{i=1}^N p(L_i)p(x_{kj}/L_i)$ – ймовірність отримання j -ї градації k -го неконтрольованого фактора в ході добування інформації;

$p(x_{kj}/L_i)$ – умовна ймовірність отримання j -ї градації k -го неконтрольованого фактора в разі знаходження системи Λ у L_i -му стані.

Після підстановки останнього виразу в (1) формула для розрахунку ентропії рішення про стан системи в разі отримання j -ї градації k -го неконтрольованого фактора матиме вигляд:

$$\begin{aligned} H(L/x_{kj}) &= -\frac{1}{p(x_{kj})} \sum_{i=1}^N p(L_i)p(x_{kj}/L_i) \log_N \frac{p(L_i)p(x_{kj}/L_i)}{\sum_{i=1}^N p(L_i)p(x_{kj}/L_i)} = \\ &= -\frac{1}{p(x_{kj})} \left(\sum_{i=1}^N p(L_i)p(x_{kj}/L_i) \log_N p(L_i)p(x_{kj}/L_i) - \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^N p(L_i)p(x_{kj}/L_i) \log_N \sum_{i=1}^N p(L_i)p(x_{kj}/L_i) \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Для одержання ентропії рішення слід знайти суму значень величин $H(L/x_{kj})$ за всіма градаціями з вагами, пропорційними ймовірності появи кожної з них, тобто $p(x_{kj})$. Тоді матимемо

$$\begin{aligned} H(L/x_k) &= -\sum_{j=1}^J p(x_{kj}) H(L/x_{kj}) = -\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N p(L_i, x_{kj}) \times \\ &\quad \times \log_N p(L_i, x_{kj}) + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N p(L_i, x_{kj}) \sum_{i=1}^N \log_N p(L_i, x_{kj}), \end{aligned} \quad (3)$$

де $p(L_i, x_{kj}) = p(L_i)p(x_{kj} / L_i)$.

Відповідно до [2] кількість інформації про стан системи Λ , у разі отримання k -го неконтрольованого фактора, можна знайти як

$$I_k(L) = H_0(L) - H(L/x_k), \quad (4)$$

де $H_0(L)$ – початкова ентропія рішення про стан системи Λ .

Значення початкової ентропії рішення знайдемо за виразом

$$H_0(L) = -\sum_{i=1}^N p(L_i) \log_N p(L_i). \quad (5)$$

За відсутності статистичних зв'язків між неконтрольованими факторами кількість інформації про стан системи Λ за умови визначення n неконтрольованих факторів знайдемо за виразом

$$I(L) = \sum_{k=1}^n I_k(L), \quad (6)$$

де $k = \overline{1, n}$.

Однак оцінити кількість інформації, що добуває роботизована система, у разі впливу статистично зв'язаних неконтрольованих факторів, використовуючи шеннонівську міру, досить складно, оскільки для цього потрібно знайти багатомірні розподіли ймовірностей.

Щоб обійти складності оцінювання багатомірних розподілів ймовірностей неконтрольованих факторів та водночас врахувати статистичні зв'язки між ними, використаємо спосіб, наведений у [15]. Відповідно до нього значення кількості інформації, що добуває роботизована система з урахуванням статистичних зв'язків між неконтрольованими факторами, будемо знаходити за таким виразом:

$$I(L) = \sum_{k=1}^n I_k(L) \left[1 - \sum_{\beta=0}^{k-1} \gamma_{k\beta} \frac{I_\beta(L)}{(I_\beta(L))_{max}} \right], \quad (7)$$

де $I_k(L)$ та $I_\beta(L)$ – кількість інформації, що добуває роботизована система в ході визначення відповідно k -го та β -го неконтрольованого фактора;

$(I_\beta(L))_{max}$ – максимально можлива кількість інформації, яку добуває роботизована система в разі визначення β -го неконтрольованого фактора;

$\gamma_{k\beta}$ – коефіцієнт, що характеризує статистичний зв'язок між k -м та β -м неконтрольованим фактором.

Як видно з (7), для знаходження кількості інформації, добутої роботизованою системою, необхідно оцінити статистичні зв'язки між факторами, які характеризуються коефіцієнтом $\gamma_{k\beta}$. Для цього використаємо критерії згоди, які базуються на обчисленні ступеня розходження вимірних частот сумісної появи дискретних значень факторів із гіпотетичним розподілом частот, що відповідає умові незалежності факторів.

Спочатку припустимо, що неконтрольовані фактори статистично незалежні. Гіпотетичний розподіл частот, який відповідає цій умові, потрібно статистично перевірити. Для цього використаємо критерій Пірсона.

Припустимо, що необхідно кількісно визначити статистичний зв'язок між факторами x_1 та x_2 , що можуть мати в загальному випадку декілька градацій, тобто x_{1j} та $x_{2\phi}$ ($\phi = \overline{1, q}$, q – максимальна кількість градацій ϕ -го фактора).

У табл. 1 наведено розподіли вимірних частот $M_{j\phi}$ сумісної появи j -го значення x_1 -го та ϕ -го значення x_2 -го неконтрольованих факторів.

Таблиця 1

Частоти сумісної появи j -го значення x_1 -го та ϕ -го значення x_2 -го неконтрольованих факторів

Градація x_1	Градація x_2				
	x_{21}	x_{22}	...	x_{2q}	Σ
x_{11}	$[M_{11}^0] M_{11}$	$[M_{12}^0] M_{12}$	...	$[M_{1q}^0] M_{1q}$	$M_1(x_{2q})$
x_{12}	$[M_{21}^0] M_{21}$	$[M_{22}^0] M_{22}$	...	$[M_{2q}^0] M_{2q}$	$M_2(x_{2q})$
...	...	...	$[M_{j\phi}^0] M_{j\phi}$	...	...
x_{1j}	$[M_{j1}^0] M_{j1}$	$[M_{j2}^0] M_{j2}$	...	$[M_{jq}^0] M_{jq}$	$M_j(x_{2q})$
Σ	$M_1(x_{1j})$	$M_2(x_{1j})$	...	$M_q(x_{1j})$	W

У даній таблиці використано такі позначення:

$M_j(x_{2q})$ – підсумкові частоти відповідних рядків дискретних значень градацій першого неконтрольованого фактора ($M_j(x_{2q}) = \sum_{\phi=1}^q M_{j\phi}$, коли $j = const$);

$M_\phi(x_{1j})$ – підсумкові частоти відповідних стовпців дискретних значень другого неконтрольованого фактора ($M_\phi(x_{1j}) = \sum_{j=1}^J M_{j\phi}$, коли $\phi = const$);

$W = \sum_{j=1}^J M_j(x_{2\phi}) = \sum_{\phi=1}^q M_\phi(x_{1j})$ – сума всіх вимірних частот сумісної появи дискретних значень неконтрольованих факторів;

$[M_{j\phi}^0] = [M_j(x_{2q})][M_\phi(x_{1j})] / W$ – гіпотетичні частоти.

Сформуємо зважені суми квадратів величин $M_{j\phi}$ від їх гіпотетичних частот $[M_{j\phi}^0]$:

$$v^2 = \sum_{j=1}^J \sum_{\phi=1}^q \frac{(M_{j\phi} - [M_{j\phi}^0])^2}{[M_{j\phi}^0]} \quad (8)$$

Подвійна сума (8) розподілена приблизно як $\chi_{k\beta}^2$ з кількістю ступенів вільності $\xi = (J-1)(q-1)$ [15]. Тому будемо вважати, що

$$\chi_{k\beta}^2 = v^2. \quad (9)$$

Чим більша величина $\chi_{k\beta}^2$ для кожної пари факторів x_k та x_β , тим більший статистичний зв'язок між ними (для статистично незалежної пари факторів $M_{j\phi} = [M_{j\phi}^0]$ та $\chi_{k\beta}^2 = 0$).

У разі використання критерію Пірсона у виразі (8) величину $\chi_{k\beta}^2$ для пар факторів потрібно нормувати, розділивши їх на $(\chi_{k\beta}^2)_{max}$ для цієї пари параметрів, тобто потрібно знайти

$$\gamma_{k\beta} = \chi_{k\beta}^2 / (\chi_{k\beta}^2)_{max}, \quad (10)$$

де $(\chi_{k\beta}^2)_{max} = W$.

Статистичні зв'язки між неконтрольованими факторами у (8) враховано в усіх їх парних комбінаціях. Зв'язками більш високих порядків знехтували через їх несуттєвість для практичних розрахунків [15].

Отже, за критерій управління роботизованою системою доцільно взяти максимальну кількість інформації, що її добуває система внаслідок реалізації варіанта застосування $I^*(L) = \max_{a \in A} I(L)$, де $A = \{a_1, a_2, \dots, a_D\}$ – усі можливі варіанти використання роботизованої системи. Даний критерій забезпечить управління роботизованою системою з урахуванням неконтрольованих факторів, що впливають на процес добування інформації.

Висновки. Таким чином, у статті вирішено актуальне завдання розробки критерію управління роботизованою системою. Запропонований критерій на основі інформаційного підходу дозволяє оцінювати ефективність управління роботизованою системою в умовах впливу неконтрольованих факторів з урахуванням статистичних зв'язків між ними. Його застосування дозволяє прийняти рішення про те, наскільки нове спостереження підвищить обізнаність роботизованої системи щодо стану об'єкта дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні критерію управління роботизованою системою за рахунок врахування впливу неконтрольованих факторів та статистичних зв'язків між ними.

Подальші дослідження слід присвятити розробленню методики планування застосування роботизованої системи на основі запропонованого критерію.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Charrow B. Information-theoretic active perception for multi-robot teams, PhD thesis / Benjamin Charrow. Philadelphia: University of Pennsylvania, 2015. 175 p.
2. Humeniuk M. O., Sashchuk I. M., Zhuravskiy Yu. V. The criterion for feature informativeness estimation in multi robot teams control // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2018. № 4. С. 96–105. DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-9.

3. Grocholsky B. Information-theoretic control of multiple sensor platforms, PhD thesis. Sydney : University of Sydney, 2002. 199 p.
4. Grocholsky B., Makarenko A., Durrant-Whyte H. Information theoretic control of multiple sensor platforms // In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2003. Vol. 1. P. 1521–1526.
5. Bourgault F., Makarenko A., Williams S. Information based adaptive robotic exploration // In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2002. P. 540–545.
6. Choi H. L., How J. P. Continuous trajectory planning of mobile sensors for informative forecasting // Automatica. 2011. P. 145–152.
7. Ny J. L., Pappas G. J. On trajectory optimization for active sensing in gaussian process models // In Proceedings of the Joint IEEE Conference on Decision and Control and Chinese Control Conference. 2009. P. 6282–6292.
8. Singh A., Krause A., Guestrin C. Efficient planning of informative paths for multiple robots // In Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence. 2007. P. 93–105.
9. A scalable information theoretic approach to distributed robot coordination / [B. Julian, M. Angermann, M. Schwager et al.] // In IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2011. P. 46–53.
10. Zhao F., Shin J., Reich J. Information-driven dynamic sensor collaboration // IEEE Signal Processing Magazine. 2002. P. 61–72.
11. Feng X., Loparo K., Fang Y. Optimal state estimation for stochastic systems: An information theoretic approach // IEEE Transactions on Automatic Control. 1997. Vol. 42, № 6. P. 771–785.
12. Kreucher C., Kastella K., Hero A. Information based sensor management for multitarget tracking // In Processing SPIE, Bellingham, WA. 2003. Vol. 5204. P. 480–489.
13. Efficient informative sensing using multiple robots / [A. Singh, A. Krause, C. Guestrin et al.] // J. of AI Research. 2009. № 34 (1). P. 707–755.
14. Binney J., Krause A., Sukhatme G. Optimizing waypoints for monitoring spatiotemporal phenomena // International Journal Robotics Research. 2013. № 32 (8). P. 873–888.
15. Анисимов Б. В., Курганов В. Д., Злобин В. К. Распознавание и цифровая обработка изображений : учеб. пособ. для студентов вузов. Москва : Высшая школа, 1983. 295 с.

Подано 19.06.2019

В. В. Стринада, М. А. Гуменюк, В. П. Добровинский, А. А. Ткач
КРИТЕРИЙ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ С УЧЕТОМ
ВЛИЯНИЯ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ ФАКТОРОВ

В статье предложен критерий управления роботизированной системой, который на основе информационного подхода позволяет учитывать влияние неконтролируемых факторов и статистических связей между ними в процессе добывания информации.

В данной статье выбор оптимальной стратегии управления роботизированной системой в процессе добывания информации обеспечивает показатель, характеризующий эффективность управления. Вместе с тем наличие неконтролируемых факторов (помех, погодных условий, технических неисправностей и т. п.), учтённых в формальной математической модели управления, ведет к зависимости показателя эффективности не только от выбранной стратегии управления, но и от значений неконтролируемых

факторов. При этом как выбранная стратегия управления, так и показатель эффективности процесса управления являются функциями от неконтролируемых факторов.

Использование предложенного критерия позволяет принимать правильные решения в процессе управления роботизированной системой при воздействии неконтролируемых факторов. Он может быть применен в условиях статистической зависимости неконтролируемых факторов и изменения состояний изучаемого процесса. Данный критерий не требует построения моделей на основе оцениваемых комбинаций факторов, существенно снижает временные и вычислительные затраты для принятия решений в процессе управления роботизированной системой. Его использование позволяет определять, насколько новое наблюдение увеличит осведомленность роботизированной системы о состоянии исследуемого процесса.

Перспективы дальнейших исследований могут заключаться в модификации существующих и разработке новых методов планирования применения роботизированной системы на основе предложенного критерия.

Ключевые слова: критерий управления; роботизированная система; влияние неконтролируемых факторов; информационный подход.

V. V. Strinada, M. O. Humeniuk, V. P. Dobrovinskiy, A. O. Tkach

CRITERIA OF MANAGEMENT BY THE ROBOTIC SYSTEM WITH ACCOUNT OF THE INFLUENCE OF NON-CONTROLLED FACTORS

The article proposes a criterion for managing a robotic system, which, based on the information approach, allows to take into account the influence of uncontrolled factors and statistical connections between them in the process of obtaining information.

In this article, the choice of strategy for managing a robotic system in the process of obtaining information provides an indicator that characterizes the effectiveness of management. At the same time, the presence of uncontrolled factors (obstacles, weather conditions, technical malfunctions etc.), which are taken into account in the formal mathematical model of management, leads to the dependence of the efficiency indicator not only on the chosen management strategy, but also on the values of uncontrolled factors. At the same time, both the chosen management strategy and the indicator of the efficiency of the process of obtaining information are functions from uncontrolled factors.

Using the proposed criterion allows you to make the right decisions in the process of managing a robotic system in the event of the influence of uncontrolled factors. The developed criterion can be applied in the conditions of statistical dependence of uncontrolled factors and changes of states of the investigated process. This criterion does not require the construction of models based on evaluated combinations of factors, which significantly reduces the time and computing costs for decision-making in the process of managing a robotic system. Its use allows determining how much new observation will increase awareness of the robotic system in relation to the state of the process being studied.

Prospects for further research may consist of modifying the existing and developing new methods for planning the use of a robotic system based on the proposed criterion.

Keywords: control criterion; robotic system; influence of uncontrolled factors; information approach.