

УДК 681.513.54

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОГО ОБМІНУ В ГРУПІ ОПЕРАТОРІВ

*Бичковський В. О., к.т.н., доцент; Реутська Ю. Ю., асистент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна,
reutska_rt@ukr.net*

PROGNOSTICATION OF INFORMATION EXCHANGE EFFICIENCY IN OPERATOR'S GROUP

*Bychkovskiy V. O., PhD, Associate Professor; Reutskaya Yu. Yu., Assistant
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

Вступ

В наш час постійно зростає необхідність розробки прогнозів. Методи прогнозування розвитку технічних систем (ТС) є достатньо відомими. У процесі прогнозування розвитку ТС використовуються як загальні наукові методи і підходи до дослідження, так і специфічні методи, властиві науково-технічному прогнозуванню [1]. Значне місце в ТС займають ергатичні системи, ефективність роботи яких суттєво залежить від можливостей людини – оператора. В сучасних ергатичних системах досить часто функціональне навантаження розподіляється між декількома операторами. В такій ситуації однією із фундаментальних проблем стає з'ясування основних законів, які визначають особливості поведінки та розвитку ергатичної системи з врахуванням ефективності роботи групи операторів.

Методи оцінки ефективності роботи групи операторів у разі статичного підходу до розв'язання задачі є відомими [2]. Оскільки прогнозна модель передбачає використання динамічної трактовки, то стає зрозумілим, що і ефективність роботи групи операторів необхідно розглядати в часовій області. З іншого боку, забезпечити достатню ефективність роботи групи операторів без взаємного інформаційного обміну не представляється можливим. Таким чином, прогнозування ефективності інформаційного обміну в групі операторів є складовою частиною загальної задачі прогнозування розвитку ергатичної системи. Розробку відповідних прогнозних моделей слід вважати актуальною та практично спрямованою задачею.

Постановка задачі

Якщо у разі розв'язання поставленої задачі будемо розглядати групу операторів як ціле, то на етапі макроскопічного аналізу представляється можливим виділяти окремого оператора (ОП1) та всіх інших операторів (ОП2). Тоді для ОП1 можна розглядати ОП2 як оточуюче середовище. В

найпростішій ситуації ОП1 та ОП2 — це пара операторів. Цілеспрямованість поведінки ОП1 та ОП2 може оцінюватися їх ефективністю. Методика оцінки ефективності із статичної точки зору є відомою [2]. Актуальною стає задача динамічного підходу до оцінки ефективності з подальшим прогнозуванням закономірностей перерозподілу відносних помилок ОП1 та ОП2.

Теоретичні викладки

В загальному випадку ефективність роботи оператора визначається з рівняння $E = R/Q$, де R — результат роботи оператора, Q — витрати на навчання та утримання оператора. Прийmemo до уваги, що в процесі аналізу доцільно використовувати відносні величини, які можуть змінюватися від 0 до 1 [3]. Тоді доцільно ввести у розгляд коефіцієнт ефективності

$$A = \frac{E - E_{\min}}{E}, \quad (1)$$

де E_{\min} — мінімально можливе значення ефективності, яке визначається у разі інформаційної спроможності оператора $N = 1$ квант. В якості результативності роботи оператора прийmemo його інформаційну спроможність, тобто $R = N$. Приймаючи до уваги, що $E = N/Q$, $E_{\min} = 1/Q$, на підставі формули (1) визначаємо

$$A = 1 - \frac{1}{N}. \quad (2)$$

Аналіз формули (2) показує, що A змінюється від 0 (у разі $N = 1$) до потенційно можливого значення $A = 1$. Актуальною стає задача з'ясування основних закономірностей зміни A та інших показників, які характеризують функціонування ОП1 та ОП2.

Прийmemo до уваги, що $N = 1/b\gamma$, де γ — відносна помилка оператора, b — коефіцієнт, який залежить від характеристик повідомлення [4]. Нехай A_1, N_1, b_1, γ_1 — характеристики ОП1, A_2, N_2, b_2, γ_2 — характеристики ОП2. Тоді на підставі формули (2) можна записати

$$A_1 = 1 - b_1\gamma_1, \quad A_2 = 1 - b_2\gamma_2. \quad (3)$$

Для ефективного виконання поставленої задачі ОП1 вимушений тим швидше нарощувати A_1 , чим менше A_2 для ОП2, і навпаки. Те ж саме характерно і для ОП2. З іншого боку, A_1 та A_2 повинні поступово зростати з асимптотичним наближенням до потенційно можливого значення. Таким чином, можна записати

$$\begin{cases} \frac{dA_1}{dt} = K_{21}(1 - A_2), \\ \frac{dA_2}{dt} = K_{12}(1 - A_1), \end{cases} \quad (4)$$

$$\quad (5)$$

де K_{21} — константа швидкості зростання A_1 ; K_{12} — константа швидкості зростання A_2 .

Введемо коефіцієнти $K_2 = K_{21}b_2/b_1$, $K_1 = K_{12}b_1/b_2$. Тоді на підставі формул (3), (4), (5) знаходимо

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\gamma_1}{dt} = -K_2\gamma_2, \\ \frac{d\gamma_2}{dt} = -K_1\gamma_1. \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\gamma_1}{dt} = -K_2\gamma_2, \\ \frac{d\gamma_2}{dt} = -K_1\gamma_1. \end{array} \right. \quad (7)$$

Для розв'язання системи рівнянь (6), (7) продиференціюємо ліву та праву частини рівняння (6) та підставимо в отриманий результат рівняння (7):

$$\frac{d^2\gamma_1}{dt^2} - K_1K_2\gamma_1 = 0. \quad (8)$$

Загальне рішення рівняння (8) має такий вигляд

$$\gamma_1(t) = C_1 \exp(\lambda t) + C_2 \exp(-\lambda t), \quad (9)$$

де $\lambda = \sqrt{K_1K_2}$; C_1, C_2 — постійні, що визначаються з початкових умов.

Введемо позначення $W = \sqrt{K_2/K_1}$. Тоді на підставі формул (6), (9) знаходимо

$$W\gamma_2(t) = C_2 \exp(-\lambda t) - C_1 \exp(\lambda t). \quad (10)$$

Будемо спостерігати за процесом протягом часу τ . Тоді на підставі формул (9), (10) визначаємо

$$\gamma_1(\tau) = C_1 \exp(\lambda\tau) + C_2 \exp(-\lambda\tau), \quad (11)$$

$$W\gamma_2(\tau) = C_2 \exp(-\lambda\tau) - C_1 \exp(\lambda\tau) \quad (12)$$

Використання рівнянь (11), (12) дає можливість визначити постійні C_1 та C_2 :

$$C_1 = \frac{1}{2}[\gamma_1(\tau) - W\gamma_2(\tau)]\exp(-\lambda\tau), \quad (13)$$

$$C_2 = \frac{1}{2}[\gamma_1(\tau) + W\gamma_2(\tau)]\exp(\lambda\tau). \quad (14)$$

Приймаючи до уваги (9), (10), (13), (14) складаємо матричне рівняння

$$\begin{bmatrix} \gamma_1(0) \\ \gamma_2(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\lambda\tau & Wsh\lambda\tau \\ \frac{sh\lambda\tau}{W} & ch\lambda\tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_1(\tau) \\ \gamma_2(\tau) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Для подальшого аналізу доцільно ввести змінну $S = th\lambda\tau$ [5,6]. Тоді рівняння (15) приймає наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} \gamma_1(0) \\ \gamma_2(0) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1-S^2}} \begin{bmatrix} 1 & WS \\ \frac{S}{W} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_1(\tau) \\ \gamma_2(\tau) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

На підставі формули (16) знаходимо

$$\begin{bmatrix} \gamma_1(0) \\ \gamma_1(\tau) \end{bmatrix} = \frac{W}{S} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{1-S^2} \\ \sqrt{1-S^2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_2(0) \\ \gamma_2(\tau) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Введемо відносні показники $Z(0) = \gamma_1(0)/\gamma_2(0)$, $Z(\tau) = \gamma_1(\tau)/\gamma_2(\tau)$. Тоді на підставі рівняння (16) визначаємо

$$Z(0) = W \frac{Z(\tau) + WS}{SZ(\tau) + W}. \quad (18)$$

Введемо відносні показники $\Gamma_1(\tau) = \gamma_1(\tau)/\gamma_1(0)$, $\Gamma_2(\tau) = \gamma_2(\tau)/\gamma_2(0)$. Тоді на підставі формули (17) можна записати:

$$\Gamma_1(\tau) = \frac{\Gamma_2(\tau) + \sqrt{1-S^2}}{\sqrt{1-S^2}\Gamma_2(\tau) + 1}. \quad (19)$$

Розглянемо прогнозну функцію (18). Нехай через час τ необхідно забезпечити $\gamma_1(\tau) = 0$. Це означає, що $Z(\tau) = 0$. Представляється можливим досягнути такого результату, якщо на початку роботи, тобто у разі $t = 0$, забезпечити $Z(0) = \gamma_1(0)/\gamma_2(0) = WS$. Прийmemo до уваги, що

$$N_1(0) = \frac{1}{b_1\gamma_1(0)}, \quad N_2(0) = \frac{1}{b_2\gamma_2(0)}. \quad (20)$$

Оскільки $Z(0) = WS$, то на підставі формули (20) визначаємо час виконання поставленої задачі

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{K_1K_2}} \operatorname{Arth}\left(\frac{\sqrt{K_1}b_2N_2(0)}{\sqrt{K_2}b_1N_1(0)}\right).$$

Розглянемо іншу ситуацію, при якій через час τ необхідно забезпечити $\gamma_2(\tau) = 0$. Це означає, що $Z(0) = \gamma_1(0)/\gamma_2(0) = W/S$. Приймаючи до уваги рівняння (20), знаходимо час виконання поставленої задачі

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{K_1K_2}} \operatorname{Arth}\left(\frac{\sqrt{K_2}b_1N_1(0)}{\sqrt{K_1}b_2N_2(0)}\right).$$

Аналіз формули (18) показує, що процедура прогнозування передбачає визначення необхідного співвідношення відносних помилок в роботі операторів на початку їх роботи для забезпечення їх певного співвідношення через заданий час τ при заданих параметрах $W = \sqrt{K_2/K_1}$ та $S = th\lambda\tau$, де $\lambda = \sqrt{K_1K_2}$. В іншому варіанті прогнозування згідно формули (19) передбачається визначення необхідного співвідношення між відносними помил-

ками в кінці та на початку спостережень за ОП1, яке забезпечує певне співвідношення між відносними помилками в кінці та на початку спостережень за ОП2 у разі заданих τ , W та S .

Прийmemo до уваги, що в процесі роботи ОП1 та ОП2 параметри K_1 , K_2 можуть змінюватися. Щоб врахувати цей факт, розглянемо досить малі інтервали часу τ , в межах яких K_1 , K_2 можна розглядати як майже постійні величини. Тоді на підставі рівняння (16) для i -того інтервалу часу τ можна записати

$$\begin{bmatrix} \gamma_{1i}(0) \\ \gamma_{2i}(0) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1-S_i^2}} \begin{bmatrix} 1 & W_i S_i \\ \frac{S_i}{W_i} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{1i}(\tau) \\ \gamma_{2i}(\tau) \end{bmatrix}, \quad (21)$$

де $S_i = th \lambda_i \tau$, $\lambda_i = \sqrt{K_{1i} K_{2i}}$, $W_i = \sqrt{K_{2i} / K_{1i}}$. Якщо співвідношення між K_1 та K_2 змінювалося n разів на кожному малому інтервалі τ , то прогнозна функція для першого кроку прогнозування має вигляд

$$Z_1(S_1, S_2, \dots, S_n) = \frac{W_i [Z_2(S_1, S_2, \dots, S_n) + W_i S_i]}{S_i Z_2(S_1, S_2, \dots, S_n) + W_i}, \quad (22)$$

де $Z_2(S_1, S_2, \dots, S_n)$ — прогнозна функція для другого кроку прогнозування [6]. На підставі властивості функції (22) визначаємо, що $W_i = Z_i(1, 1, \dots, 1)$. Тоді прогнозна функція для другого кроку

$$Z_2(S_1, S_2, \dots, S_n) = \frac{Z_1(1, 1, \dots, 1) [Z_1(S_1, S_2, \dots, S_n) - S_i Z_1(1, 1, \dots, 1)]}{Z_1(1, 1, \dots, 1) - S_i Z_1(S_1, S_2, \dots, S_n)}. \quad (23)$$

Після першого кроку прогнозу порядок функції $Z_2(S_1, S_2, \dots, S_n)$ знижується. Процедура виконується до повного завершення прогнозних кроків. Розглянемо приклад прогнозної функції.

$$Z_1(S_1, S_2) = \frac{2S_1 + S_2}{1 + 2S_1 S_2}. \quad (24)$$

Аналіз функції (24) показує, що прогнозна функція описується двома змінними S_1 , S_2 . Таким чином, співвідношення між K_1 та K_2 змінювалось двічі. Отже, необхідно виконати два кроки прогнозу. Визначаємо, який з варіантів ситуації був першим [6]. Оскільки $Z_1(1, 1) = Z_1(S_1, 1) = 1$, то ситуація на першому інтервалі описується змінною $S_2 = th(\lambda_2 \tau)$. При цьому, $W_2 = 1$, тобто $K_1 = K_2$. Переходимо до другого кроку прогнозу. На підставі формули (23) запишемо $Z_2(S_1, S_2) = M / N$, де $M = 2S_1(1 - S_2^2)$, $N = 1 - S_2^2$. Таким чином, $Z_2(S_1) = 2S_1$, і на другому інтервалі ситуація описується змінною $S_1 = th(\lambda_1 \tau)$. При цьому, $W_2 = Z_2(1) = 2$, таким чином $K_2 = 4K_1$. Визначимося з ситуацією, коли $t = 2\tau$. Аналізуючи формулу (21)

приходимо до висновку, що в цей момент $\gamma_1 = 0$, $\gamma_2 \neq 0$. Таким чином встановлено, що відносна помилка ОПІ в кінці спостережень дорівнює нулю та визначено співвідношення між K_1 та K_2 на окремих ділянках їх зміни.

Висновки

Отримані результати дають можливість перейти від статичного опису та оцінки ефективності роботи групи операторів до динамічного опису та формування прогнозу моделі, яка враховує процеси взаємного інформаційного обміну між операторами. При використанні відносних показників ефективності A_1 та A_2 рівняння динаміки представляються у вигляді, який дозволяє перевести поставлену задачу на рівень, який відповідає прогнозуванню методом аналогій. Це дає можливість використовувати методики, відпрацьовані в одній області знань, на знання в іншій області, що значно підвищує ефективність розв'язаних задач [5, 6]. На підставі отриманих залежностей (16), (17) стає можливим визначення необхідних співвідношень між відносними помилками операторів при заданих константах швидкостей зростання ефективності їх роботи. Час виконання поставленої задачі визначається у разі накладання умов на відносну помилку оператора в момент завершення його роботи. Якщо в процесі роботи операторів константи швидкості зростання ефективності змінюються, то представляється можливим визначення співвідношень між ними по прогнозній функції для кожного кроку прогнозування.

Перелік посилань

1. Кузнецов Ю. М. Прогнозування розвитку технічних систем / Ю. М. Кузнецов, Р. А. Склярів. – К. : ТОВ «ЗМОК» – ПП «ГНОЗИС», 2004. – 323 с. ISBN 966-7569-79-9.
2. Шибанов Г. П. Количественная оценка деятельности человека в системах человек – техника / Г. П. Шибанов. – М. : Машиностроение, 1983. – 263 с.
3. Згуровський М. З Основи системного аналізу / М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратова. – К. : Видавнича група ВНУ, 2007. – 544 с. ISBN 978-966-552-153-2.
4. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств / П. В. Новицкий. – М. : Энергия, 1968. – 248 с.
5. Современная теория фильтров и их проектирование / Под ред. Г. Темеша, С. Митра. – М. : Мир, 1977. – 560 с.
6. Козловский В. В. Синтез неоднородных электромагнитных сред / В. В. Козловский, В. А. Бычковский, Г. С. Свечников, А. В. Згурский. – К. : Наукова думка, 1992. – 264 с.

References

1. Kuznietsov Iu. M. and Skliarov R. A. (2004) Prohnozuvannia rozvytku tekhnichnykh system [Forecasting of development of technical systems]. Kyiv, TOV ZMOK – PP HNOZYS Publ., 323 p. – ISBN 966-7569-79-9.
2. Shibanov G. P. (1983) Kolichestvennaya otsenka deyatelnosti cheloveka v sistemakh chelovek – tekhnika [Quantitative assessment of human activities in the systems people - machinery]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 263 p.

3. Zhurovskiy M. Z. and Pankratova N. D. (2007) *Osnovy systemnoho analizu* [Fundamentals of Systems Analysis]. Kyiv, BHV Publ., 544 p. – ISBN 978-966-552-153-22.
4. Novitskii P. V. (1968) *Osnovy informatsionnoi teorii izmeritel'nykh ustroystv* [Foundations of information theory of measurement devices]. Moscow, Energiya Publ., 248 p.
5. Temes G. C. and Mitra S. K. eds. (1973) *Modern filter theory and design*. Wiley, New York.
6. Kozlovskii V. V., Bychkovskii V. A., Svechnikov G. S. and Zgurskii A. V. (1992) *Sintez neodnorodnykh elektromagnitnykh sred* [Synthesis of non-uniform electromagnetic environments]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 264 p.

Бичковський В. О., Реутська Ю. Ю. Прогнозування ефективності інформаційного обміну в групі операторів. На підставі динамічної трактовки інформаційного обміну в групі операторів запропонована прогнозна модель для оцінки ефективності такого обміну. У разі формування прогнозуючої функції введено відносні показники, що дало можливість спростити опис процесу обміну та перевести задачу на рівень прогнозування методом аналогій. Встановлено співвідношення між показниками ефективності та відносними помилками операторів. Визначено закономірності зміни відносних помилок операторів. Проаналізовано залежність відношення помилок операторів на початку та в кінці прогнозування. Визначено час виконання поставленої задачі у разі передбачених вимог до відносної помилки одного або другого операторів. Показано, що процедура прогнозування передбачає визначення необхідного співвідношення відносних помилок операторів на початку їх роботи для забезпечення їх певного співвідношення через заданий час з заданими параметрами, що враховують константи швидкості зростання ефективностей роботи.

Ключові слова: оператор, інформація, ефективність, прогнозування.

Бычковский В. А., Реутская Ю. Ю. Прогнозирование эффективности информационного обмена в группе операторов. На основе динамической трактовки информационного обмена в группе операторов предложена прогнозная модель для оценки эффективности такого обмена. При формировании прогнозирующей функции введены относительные показатели, что дало возможность упростить описание процесса обмена и перевести задачу на уровень прогнозирования методом аналогий. Установлены соотношения между показателями эффективности и относительными ошибками операторов. Определены закономерности изменения относительных ошибок операторов. Проанализирована зависимость отношения ошибок операторов в начале и в конце прогнозирования. Определено время выполнения поставленной задачи при предусмотренных требованиях к относительной ошибке одного или другого операторов. Показано, что процедура прогнозирования предусматривает определение необходимого соотношения относительных ошибок операторов в начале их работы для обеспечения их определенного соотношения через заданное время при заданных параметрах, которые учитывают константы скорости возрастания эффективностей работы.

Ключевые слова: оператор, информация, эффективность, прогнозирование.

Bychkovskiy V.O., Reutska Yu. Yu. Prognostication of information exchange efficiency in operator's group.

Introduction. The function load in modern systems distributes often between several operators. Prognostication of information exchange efficiency between operators is actual problem.

***Problem statement.** The problem solving is possible with distinguishing the individual operator and all other operators. In such situation it is possible to carry out the prognosis procedure on macroscopic level.*

***Theoretical results.** Parities between indicators of efficiency and relative errors of operators are established. Laws of operator relative error changes are defined. Dependence of the operator error relations in the beginning and in the end of prognostication is analyzed. Time of task performance in view with the provided requirements to a relative error of one or other operators is defined. It is shown that prognostication procedure provides definition of a necessary parity of operator relative errors in the beginning of their work for maintenance of their certain parity through set time at the set parameters which consider constants of increase efficiency of work.*

***Conclusion.** The results give the chance to pass from the static description and an estimation of work efficiency of operator's group to the dynamic description and formation of look-ahead model which considers processes of a mutual information exchange between operators.*

***Keywords:** operator, information, efficiency, prognostication.*