

МАКРОСКОПІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕРГАТИЧНИХ СИСТЕМ¹

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

THE MACROSCOPIC ANALYSIS OF ERGATIC SYSTEMS

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

Вступ

Сучасний етап розвитку техніки характеризується широким застосуванням ергатичних систем (ЕС) різноманітного призначення. Як клас систем «людина-техніка» ЕС складаються із сукупності ергатичних (оператори) та неергатичних ланок, взаємодія яких завдяки діяльності ергатичної ланки (ЕЛ) об'єднується в єдиний цілеспрямований процес функціонування [1]. Необхідність використання ЕС зумовлена тим, що оператор хоч і може поступатися технічним засобам за швидкістю, точністю, часом виконання завдань та об'ємом сприйнятої інформації, але він є найбільш пластичною, універсальною та активною ланкою. Людина – оператор має можливість сприймати будь-які сигнали, реагувати на малоймовірні сигнали, об'єднувати різноманітні символи в одне ціле, аналізувати інформацію та налаштовуватися на будь-яку програму [2, 3].

Формалізм існуючих методів аналізу ЕС, як і інших систем, базується на мікроскопічному та макроскопічному підходах. Мікроскопічний аналіз передбачає детальний опис кожної складової ЕС та всього комплексу внутрішніх процесів. В рамках мікроскопічного підходу вивчаються зв'язки та функціонування елементів, ефективність елементів та структура системи. Макроскопічний аналіз базується на ігноруванні детальної структури системи та спостереженні тільки загальної поведінки системи як цілого [4]. Що стосується ЕС, то на макроскопічному рівні доцільно розглядати сукупність ЕЛ-технічні засоби (неергатичні ланки), оскільки саме ця сукупність утворює ЕС як ціле та дає можливість розглядати людину-оператора як особу, що приймає рішення на підставі отриманої інформації щодо стану неергатичних ланок [5].

Ергатичні системи відносяться до класу цілеспрямованих систем, тобто систем, які завдяки притаманній їм властивості активності прагнуть досяг-

¹ Електронний варіант статті: <http://radar.kpi.ua/index.php/radiotechnique/article/view/840>

нути певної цілі [1]. Щоб досягнути поставленої цілі, оператор та технічні засоби повинні виконати певну кількість завдань (операцій). Це стає можливим в умовах надходження необхідної кількості інформації. Отже, на рівні макроаналізу доцільно оперувати величинами, які враховують результативність роботи оператора, технічних засобів та кількість доступної для них інформації.

Постановка задачі

З метою розв'язання задачі макроскопічного аналізу ЕС приймемо до уваги той факт, що в системі передбачається виконання певної кількості завдань M_0 оператором та M_c технічними засобами. Функціонування ЕС забезпечується за рахунок постійного інформаційного обміну між оператором та технічними засобами. Інформація надходить до оператора через пристрої відображення інформації. Керуюча інформація в технічні засоби вводиться оператором за допомогою пристроїв керування. В результаті інформаційного обміну для оператора є доступною інформація $I_1 = I_1(t)$, а для технічних засобів — інформація $I_2 = I_2(t)$. В процесі роботи ЕС відбувається перерозподіл виконаних та невиконаних завдань (операцій), передбачених для оператора та технічних засобів. Нехай m_2 — кількість завдань, які залишилось виконати технічним засобам, m_1 — кількість завдань, які залишилось виконати оператору. Якщо n_2 та n_1 відповідно кількість завдань, виконаних технічними засобами та оператором, то можна записати: $m_1 + n_1 = M_0$, $m_2 + n_2 = M_c$. За рахунок надходження інформації I_1 та I_2 збільшуються значення n_1 та n_2 і зменшуються значення m_1 та m_2 .

Для розв'язання задачі аналізу ЕС на макроскопічному рівні необхідно скласти рівняння динаміки, які характеризують процеси зміни m_1 , m_2 , n_1 , n_2 за рахунок надходження відповідної інформації в умовах перерозподілу навантаження між оператором та технічними засобами ЕС.

Теоретичні викладки

Розглянемо роботу ЕС в цілому за умови, що у разі збільшення доступної інформації $I = I(t)$ спостерігається збільшення виконаних завдань або операцій n та зменшення невиконаних завдань m . В процесі функціонування ЕС величина n постійно зростає та наближається до свого потенційно можливого значення M . Якщо dI — приріст інформації, K — константа швидкості зміни n , то приріст виконаних завдань або операцій

$$dn = K(M - n)dI. \quad (1)$$

Приймаючи до уваги, що $m + n = M$, на підставі формули (1) знаходимо

$$\frac{dm}{dI} = -Km. \quad (2)$$

Розглянемо ЕС, в якій відокремлено оператора та технічні засоби. Прийmemo до уваги, що навантаження перерозподіляється між оператором та технічними засобами. Отже, приріст dn_1 буде меншим у разі збільшення n_2 і навпаки. Якщо K_1 — константа швидкості зміни n_1 , K_2 — константа швидкості зміни n_2 , то по аналогії з рівнянням (1) можна записати

$$\begin{cases} dn_1 = K_1(M_c - n_2)dI_1, \\ dn_2 = K_2(M_0 - n_1)dI_2. \end{cases} \quad (3)$$

Приймаючи до уваги, що $m_1 + n_1 = M_0$, $m_2 + n_2 = M_c$, на підставі формул (3), (4) визначаємо

$$\begin{cases} \frac{dm_1}{dI_1} = -K_1 m_2, \\ \frac{dm_2}{dI_2} = -K_2 m_1. \end{cases} \quad (5)$$

Система рівнянь (5), (6) відбиває той факт, що в ЕС спостерігається процес постійного зменшення невиконаних завдань як людиною-оператором, так і технічними засобами. Продиференціюємо ліву та праву частину рівняння (5), врахуємо рівняння (6) та прийmemo до уваги, що

$$\frac{dm_2}{dI_1} = \frac{dm_2}{dI_2} \cdot \frac{dI_2}{dI_1}.$$

Тоді можна записати

$$\frac{d^2 m_1}{dI_1^2} - K_1 K_2 m_1 \cdot \frac{dI_2}{dI_1} = 0, \quad (7)$$

Прийmemo до уваги, що швидкості зростання кількості інформації $C_1 = dI_1 / dt$, $C_2 = dI_2 / dt$, а їх відношення $K_c = C_2 / C_1$. Введемо у розгляд величину $K = K_1 K_2 K_c$ та запишемо рівняння (7) у наступному вигляді:

$$\frac{d^2 m_1}{dI_1^2} - K m_1 = 0. \quad (8)$$

Розглянемо найпростішу ситуацію, коли швидкості зростання кількості інформації C_1 та C_2 є постійними величинами. Тоді загальне рішення диференціального рівняння (8) має вигляд

$$m_1 = L_1 \exp(-\sqrt{K} I_1) + L_2 \exp(\sqrt{K} I_1), \quad (9)$$

де постійні L_1 та L_2 визначаються із початкових умов. Продиференціюємо ліву та праву частину рівняння (9), прийmemo до уваги рівняння (5) та вве-

демо параметр $W = K_1 / \sqrt{K} = \sqrt{K_1 / K_2 K_c}$. Тоді можна записати:

$$Wm_2 = L_1 \exp(-\sqrt{K}I_1) - L_2 \exp(\sqrt{K}I_1). \quad (10)$$

Нехай на початку спостереження, $I_1 = I_{10}$, $m_1 = m_{10}$, $m_2 = m_{20}$, а в кінці спостереження $I_1 = I_{1K}$, $m_1 = m_{1K}$, $m_2 = m_{2K}$. Якщо ввести позначення $b = \sqrt{K}(I_{1K} - I_{10})$, то на підставі рівнянь (9), (10) можна записати наступне матричне рівняння

$$\begin{bmatrix} m_{10} \\ m_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\ b & W\ sh\ b \\ \frac{sh\ b}{W} & ch\ b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{1K} \\ m_{2K} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Якщо ввести змінну $S = th\ b$, то рівняння (11) приймає вигляд

$$\begin{bmatrix} m_{10} \\ m_{20} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1-S^2}} \begin{bmatrix} 1 & WS \\ \frac{S}{W} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{1K} \\ m_{2K} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

На підставі формули (12) визначаємо:

$$\begin{bmatrix} m_{10} \\ m_{1K} \end{bmatrix} = \frac{W}{S} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{1-S^2} \\ \sqrt{1-S^2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{20} \\ m_{2K} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Ймовірність того, що у оператора залишаються невиконані завдання

$$P_{10} = \frac{m_{10}}{m_{10} + m_{20}}. \quad (14)$$

Тоді на підставі формул (12), (14) визначаємо

$$P_{10} = \frac{1}{1 + \frac{Sm_{1K} + Wm_{2K}}{W(m_{1K} + WSm_{2K})}}. \quad (15)$$

Ймовірність того, що у технічних засобів залишаються невиконані завдання

$$P_{20} = \frac{m_{20}}{m_{10} + m_{20}}. \quad (16)$$

На підставі формул (12), (16) знаходимо

$$P_{20} = \frac{1}{1 + \frac{W(m_{1K} + WSm_{2K})}{Sm_{1K} + Wm_{2K}}}. \quad (17)$$

Розглянемо типові ситуації, коли першим закінчує роботу оператор ($m_{1K} = 0, m_{2K} \neq 0$). На підставі формул (15), (17) знаходимо

$$p_{10} = \frac{WS}{1+WS}, p_{20} = \frac{1}{1+WS}. \quad (18)$$

Якщо першими закінчують роботу технічні засоби, то $m_{2K} = 0, m_{1K} \neq 0$. На підставі формул (15), (17) визначаємо

$$p_{10} = \frac{W}{W+S}, p_{20} = \frac{S}{W+S}. \quad (19)$$

Прийmemo до уваги, що кількість інформації $I_1 = \ln N_1$, де N_1 — інформаційна спроможність [6]. Тоді $I_{1K} = \ln N_{1K}$, $I_{10} = \ln N_{10}$. Таким чином

$$b = \ln\left(\frac{N_{1K}}{N_{10}}\right)^{\sqrt{K}}.$$

Оскільки $S = th b$, то можна записати

$$S = \frac{\left(\frac{N_{1K}}{N_{10}}\right)^{2\sqrt{K}} - 1}{\left(\frac{N_{1K}}{N_{10}}\right)^{2\sqrt{K}} + 1}. \quad (20)$$

Отже, на підставі формул (18), (19), (20) стає можливим визначити залежність ймовірностей p_{10} та p_{20} від інформаційних спроможностей оператора.

Введемо позначення $r_1 = m_{1K}/m_{10}$, $r_2 = m_{2K}/m_{20}$. Тоді на підставі формули (13) можна записати

$$r_1 = \frac{\sqrt{1-S^2} + r_2}{1 + \sqrt{1-S^2} r_2}.$$

Виконуючи задачі програмування, керування та контролю, оператор виконує різні маніпуляції. Тоді для деякого i — того типу завдання на підставі формули (13) визначаємо

$$\begin{bmatrix} m_{10}^{(i)} \\ m_{1K}^{(i)} \end{bmatrix} = \frac{W_i}{S_i} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{1-S_i^2} \\ \sqrt{1-S_i^2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{20} \\ m_{2K} \end{bmatrix},$$

де $W_i = \sqrt{K_{1i}/K_{2i}K_{ci}}$, $S_i = th b_i$, $b_i = \sqrt{K_i}(I_{1K}^{(i)} - I_{10}^{(i)})$. Загальний залишок завдань оператора

$$R_{10} = \sum_{i=1}^l m_{10}^{(i)}, \quad R_{1K} = \sum_{i=1}^l m_{1K}^{(i)},$$

де l — різноманіття типу завдань.

Тоді матрична модель приймає наступний вигляд

$$\begin{bmatrix} R_{10} \\ R_{1K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{20} \\ m_{2K} \end{bmatrix}.$$

Елементи матриці визначаються з наступних умов:

$$Z_{11} = Z_{22} = \sum_{i=1}^l \frac{W_i}{S_i}, \quad Z_{12} = Z_{21} = \sum_{i=1}^l \frac{W_i}{S_i} \sqrt{1 - S_i^2}.$$

Розглянемо ситуацію, коли припинено інформаційну підтримку ЕС. Кількість операцій, яку залишилось виконати технічним засобом, $l_{20} = l_{2K}$. Оскільки людина-оператор є найбільш гнучкою ланкою ЕС, то він бере до виконання деяку частину Z операцій технічних засобів ($Z \leq 1$). Таким чином, $l_{10} = Zl_{2K} + l_{1K}$. Складаємо матричну модель ситуації:

$$\begin{bmatrix} l_{10} \\ l_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{1K} \\ l_{2K} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Нехай дана ситуація спостерігається в кінці роботи системи. Тоді $m_{1K} = l_{10}$, $m_{2K} = l_{20}$. На підставі рівнянь (12), (21) визначаємо

$$\begin{bmatrix} m_{10} \\ m_{20} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1 - S^2}} \begin{bmatrix} 1 & Z + WS \\ \frac{S}{W} & 1 + \frac{SZ}{W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{1K} \\ l_{2K} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

На підставі формул (14), (22) можна визначити ймовірність того, що у оператора залишаються невиконані завдання. Розглянемо типову ситуацію, коли $l_{1K} = 0$, тобто оператор виконує частину операцій технічних засобів, при цьому власні завдання виконані повністю в умовах відсутності інформаційної підтримки. На підставі формул (14), (22) визначаємо

$$p_{10} = \frac{1}{1 + \frac{W + SZ}{W(Z + WS)}}.$$

Таким чином, на підставі макроскопічного підходу до аналізу ергатичних систем стало можливим визначення основних показників, які характеризують результативність роботи як технічних засобів, так і людини-оператора.

Висновки

Отримані результати дають можливість перевести процедуру аналізу ергатичної системи на якісно новий рівень, який враховує інформаційну природу процесів та перерозподіл навантаження між людиною-оператором та технічними засобами. Макроскопічний опис дав можливість врахувати той факт, що в процесі функціонування ергатичної системи спостерігається постійне зменшення невиконаних завдань як людиною-оператором, так і технічними засобами. Отже, стало можливим з'ясування закономірностей зміни ймовірнісних показників від кількості інформації, доступної людині-оператору. З іншого боку, встановлено залежність ймовірнісних показників від інформаційної спроможності людини-оператора.

Оскільки в запропонованій моделі (7) передбачається виконання умови $K_c = C_2 / C_1 = const$, то отримані результати можна використовувати як з постійними значеннями C_1 , C_2 , так і в умовах, коли $I_1 = a_1 t^a$, $I_2 = a_2 t^a$, де a_1 , a_2 , a — деякі постійні величини.

Перелік посилань

1. Стенін О. А. Автоматизоване навчання операторів ергатичних систем / О. А. Стенін, О. І. Михальов, К. Ю. Мелкумян. – К. : НТУУ «КПІ», 2013. – 180 с.
2. Ашеров А. Т. Ергономіка інформаційних технологій / А. Т. Ашеров, Г. І. Сажко. – Харків : УПА, 2005. – 244 с. ISBN 966-8044-53-1.
3. Присняков В. Ф. Математическое моделирование переработки информации оператором человеко-машинных систем / В. Ф. Присняков, Л. М. Приснякова. – М. : Машиностроение, 1990. – 248 с. ISBN 5-217-01062-2.
4. Николаев В. И. Системотехника: методы и приложения / В. И. Николаев, В. М. Брук. – Л. : Машиностроение, 1985. – 199 с.
5. Згуровський М. З. Основи систематичного аналізу / М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратова. – К. : Видавнича група BHV, 2007. – 544 с. ISBN 978-966-552-153-2.
6. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств / П. В. Новицкий. – М. : Энергия, 1968. – 248 с.

References

1. Stenin O. A., Mykhalov O. I. and Melkumian K. Yu. (2013) *Avtomatyzovane navchannia operatoriv erhatychnykh system* [Automated operator training ergodic systems]. Kyiv, NTUU «KPI», 180 p.
2. Asherov A. T. and Sazhko H. I. (2005) *Erhonomika informatsiinykh tekhnolohii* [Ergonomics Information Technology]. Kharkiv, UIPA Publ. 244 p. ISBN 966-8044-53-1.
3. Prisnyakov V. F. and Prisnyakova L. M. (1990) *Matematicheskoe modelirovanie pererabotki informatsii operatorom cheloveko-mashinnykh sistem* [Mathematical modeling of information processing operator man-machine systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 248 p. ISBN 5-217-01062-2.
4. Nikolaev V. I. and Bruk V. M. (1985) *Sistemotekhnika: metody i prilozheniya* [Systems engineering: methods and applications]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 199 p.
5. Zhurovskiy M. Z. and Pankratova N. D. (2007) *Osnovy systematychnoho analizu* [Basis of a system analysis]. Kyiv, Vydavnycha hrupa BHV, 544p. ISBN 978-966-552-153-2.
6. Novitskii P. V. (1968) *Osnovy informatsionnoi teorii izmeritel'nykh ustroistv*

[Foundations of information theory of measurement devices]. Moskow, Energiya Publ., 248p.

Бичковський В. О., Реутська Ю. Ю. Макроскопічний аналіз ергатичних систем. На підставі макроскопічного підходу до розв'язання задачі аналізу ергатичної системи встановлено закономірності зміни кількості завдань, передбачених до виконання людиною-оператором і технічними засобами, та їх залежність від кількості доступної інформації. Запропонована модель, яка описує процес перерозподілу навантаження між людиною-оператором та технічними засобами. Враховано той факт, що в процесі функціонування ергатичної системи спостерігається постійне зменшення кількості невиконаних завдань, як людиною-оператором, так і технічними засобами. З'ясовано закономірності зміни ймовірнісних показників від кількості інформації, доступної людині-оператору. Встановлено залежність ймовірнісних показників від інформаційної спроможності людини-оператора. Розглянуто типову ситуацію, яка відповідає режиму припинення інформаційної підтримки ергатичної системи та додаткового навантаження людини-оператора.

Ключові слова: ергатична система, макроскопічний аналіз, інформація, ймовірність.

Бычковский В. А., Реутская Ю. Ю. Макроскопический анализ эргатических систем. На основании макроскопического подхода к решению задачи анализа эргатической системы установлены закономерности изменения количества задач, предусмотренных к выполнению человеком-оператором и техническими средствами, их зависимость от количества доступной информации. Предложена модель, описывающая процесс перераспределения нагрузки между человеком-оператором и техническими средствами. Учтен тот факт, что в процессе функционирования эргатической системы наблюдается постоянное уменьшение количества невыполненных заданий, как человеком-оператором, так и техническими средствами. Выявлены закономерности изменения вероятностных показателей от количества информации, доступной человеку-оператору. Установлена зависимость вероятностных показателей от информационной способности человека-оператора. Рассмотрена типовая ситуация, которая соответствует режиму прекращения информационной поддержки эргатической системы и дополнительной нагрузки человека-оператора.

Ключевые слова: эргатическая система, макроскопический анализ, информация, вероятность.

Bychkovskiy V.O., Reutskaya Yu. Yu. The macroscopic analysis of ergatic systems.

Introduction. System "man-machine" (ergatic system) is characterized by the extreme complexity of the internal and external relationships and their dependence on a very large number of factors. Macroscopic analysis makes it possible to move from random intrasystems mikrointeraction to some regular process at a sufficiently high level of formalization of phenomena and processes. From the point of view of the macroscopic approach it is advisable to allocate ergatic system hardware and the human operator and establish the laws of their interaction.

Problem statement. In order to solve the problem of the macroscopic analysis of ergatic system will take into account the fact that the system provides for completing a certain number of tasks the operator and technical means. In operation, the ergatic system is a redistribution of tasks performed and outstanding (operations) provided for the operator and equipment. To solve the problem of analysis of ergatic system at the macroscopic level it is necessary to make the dynamic equation describing the processes of change in the number of tasks

due to receipt of the relevant information in a load transfer between the operator and the technical means of ergatic system.

Theoretical results. Macroscopic approach to the problem of analysis ergatic system is considered. A model that describes the process of load transfer between the human operator and technical facilities is offered. Patterns of change in the probability of indicators of the amount of information available to a human operator are clarified. The dependence of the probability parameters of the information capacity of the human operator is established. A typical situation corresponded to the termination of an information support ergatic system and the additional load of the human operator is considered.

Conclusion. The results make it possible to translate the analysis procedure ergatic system to a new level taking into account the information nature of processes and the redistribution of the load between the human operator and technical means. The dependence of the probability parameters on the human operator information capacity is established.

Keywords: *ergatic system, the macroscopic analysis, information, probability.*