

УДК 519

О.О. Морозов

Національна академія Національної гвардії України, Харків

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОНТРОЛЮ ОПЕРАЦІЙ, ЩО ЗДІЙСНЮЮТЬСЯ СКЛАДНИМИ СИСТЕМАМИ

У статті розглядається задача визначення параметрів контролю операцій, що здійснюються складними системами. В якості таких параметрів розглядаються точність оцінювання обсягу здійснюваної операції (або точність контролю) та швидкість її здійснення. Отримані вирази, що встановлюють залежність відносної точності виміру швидкості здійснення операції від часу контролю. Організація контролю за такими параметрами дозволить своєчасно здійснювати управляючі впливи на систему задля досягнення цілі операції.

**Ключові слова:** складна система, контроль здійснення операції, параметри контролю, точність контролю, орган управління, досягнення цілі операції

### Постановка проблеми

Функціонування складних систем (СС) спрямовано на виконання певних операцій (обслуговування, забезпечення, виробництво, досягнення переваги тощо), закінчення яких визначається досягненням певної цілі. Для здійснення операцій виділяються ресурси (часові, матеріальні, людські тощо). Управління такими системами вимагає контролю за процесом досягнення цілі. Такий контроль необхідний для поточного оцінювання спроможності СС досягти визначеної цілі у встановлений термін при заданих ресурсах та прийняття у разі необхідності рішення щодо корегування цілі або часу та/або ресурсів. Оцінку поточного стану складної системи та вироблення необхідних управлінських рішень повинен здійснювати орган управління системою (далі – орган управління (ОУ)).

Такий орган визначає завдання системі досягти до заданого моменту часу певного значення якогонебудь показника операції (наприклад, виконати необхідний обсяг робіт (план)), після цього система починає рухатися до цілі по певній траєкторії. Якщо за результатами контролю з'ясується, що досягти цілі неможливим, то необхідно виявити це якомога раніше і так змінювати параметри цілі, щоб вона стала досяжною. Ця зміна може виражатися в зменшенні кількісної оцінки планованого результату, у збільшенні часу на його досягнення, або в тім і іншому одночасно. Завданням контролю повинна бути оцінка поточного стану складної системи, обсягу виконаних робіт, ризику невиконання плану, а також близькості її стану до критичної області, звідки досягнення цілі буде неможливо при будь-яких припустимих витратах. Тобто ОУ системою повинен виконувати і контролюючі функції, і функції перепланування. Проблема полягає в тім, як визначити параметри контролю або інтенсивність контролю. Організація контролю

повинна задовольняти двом суперечливим вимогам: з одного боку, точок контролю повинне бути досить багато, тому що при відсутності належного контролю можна потрапити в ситуацію, коли що-небудь міняти вже пізно. З іншого боку, за проведення контролю доводиться "платити", тому точок контролю повинне бути якнайменше.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вирішенню задачі організації контролю операцій, що здійснюються складними системами присвячено достатньо робіт [1-3]. В багатьох джерелах задача організації контролю та управління в таких системах розглядається як задачі програмного-цільового планування – коли, скільки і які ресурси необхідно виділяти (використовувати) аби система виконала поставлені завдання у встановлені терміни. При цьому, як правило, приймається, що стан системи контрольований, завдання (операція) виконуються без порушення встановлених регламентів (механізмів) її функціонування [4, 5]. У роботі [6] розглядається схожа задача та спосіб її рішення, що дозволяє знайти моменти часу, коли необхідно проводити контроль стану системи.

Але досвід управління складними системами, особливо систем критичного функціонування, показує, що визначення тільки моментів часу контролю недостатньо. Для таких систем контроль повинен бути не разовою операцією, а безперервною, і в кожен момент часу потрібно приймати рішення про параметри контролю на поточний момент часу - для кожного моменту часу треба визначати необхідну точність оцінювання обсягу здійснюваної операції (або точність контролю) та швидкість її здійснення. Якщо формалізувати та вирішити задачу за таких вимог та у такій постановці, то це дасть можливість для будь-якого моменту часу визначати поточні

складності досягнення цілі, а також ступінь ризику недосягнення запланованої цілі операції.

**Мета статті** – розроблення алгоритму визначення параметрів контролю операцій, що здійснюються складними системами, який би забезпечував безперервне та адаптивне управління такими системами.

### Виклад основного матеріалу

Допустимо, що за час  $t_{пл}$  необхідно досягти результату операції, кількісне значення якої є  $Q_{пл}$ . При цьому відомо, що існує мінімальна швидкість досягнення результату в часі  $v_{min}$  та максимальна швидкість  $v_{max}$  (рис. 1).

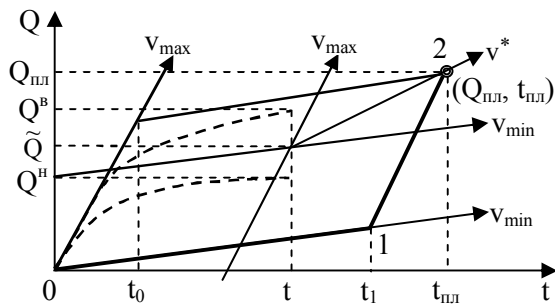


Рис. 1. Графічне представлення протікання операції

Необхідно знайти точки контролю за станом здійснюваної операції, які можуть бути моментами часу, коли необхідно прийняти рішення про управляючий вплив або перегляд параметрів цілі. Якщо в процесі руху СС попадає в область, що лежить нижче прямої 1-2 (див. рис. 1), то досягнення цілі операції в заданий час  $t_{пл}$  стане неможливим. Тобто ця область стає критичною, і наближення до неї треба розглядати як загрозу невиконання завдання системою, що здійснює операцію. Отже, контроль за протіканням операції повинен бути організований таким чином, щоб можна було вчасно втрутитися в хід її здійснення, якщо її результат наближається до критичної зони.

Нехай  $\tilde{v}(t)$  – оцінювана миттєва швидкість руху СС до цілі в момент  $t$ ,  $\tilde{v}(t) \in [v_{min}, v_{max}]$ . Нехай вона відома з деякою точністю  $\Delta v(t)$ :

$$\begin{cases} v^B(t) = \tilde{v}(t) + \Delta v(t)/2, \\ v^H(t) = \tilde{v}(t) - \Delta v(t)/2, \end{cases} \quad (1)$$

де  $v^B(t)$  і  $v^H(t)$  – відповідно, верхня та нижня оцінки швидкості в момент  $t$ ,  $v^B(t), v^H(t) \in [v_{min}, v_{max}]$ , причому

$$\Delta v(t) = (v_{max} - v_{min}) \cdot \delta(t), \quad (2)$$

$\delta(t)$  – відносна точність виміру швидкості,  $\delta(t) \in [0, 1]$ .

Саме цю величину і будемо вважати точністю контролю, і задача буде полягати в знаходженні цієї величини як функції часу  $t$ . Для будь-якого моменту  $t$  можна оцінити поточні "складності" (ризик не досягнення цілі) у такий спосіб:

$$d(t) = \frac{v^*(t) - v_{min}}{v_{max} - v_{min}}, \quad v^*(t) = \frac{Q_{пл} - Q(t)}{t_{пл} - t}, \quad (3)$$

де  $d(t)$  – складність досягнення цілі в момент  $t$ ;  $v^*(t)$  – мінімальна постійна швидкість, з якою необхідно рухатися з поточної точки  $(t, Q(t))$ , щоб виконати плановий обсяг операції у встановлений термін  $t_{пл}$  (рис. 1).

Таким чином, за ймовірність досягнення цілі операції для поточної точки прийемо відношення довжини відрізка можливих швидкостей до довжини відрізка прийнятних швидкостей (рухаючись із якими постійно, можна здійснити операцію не пізніше відведеного терміну). Тоді

$$\tilde{Q}(t) = \int_0^t \tilde{v}(\tau) d\tau,$$

$$Q^B(t) = \int_0^t v^B(\tau) d\tau = \int_0^t \left( \tilde{v}(\tau) + \frac{v_{max} - v_{min}}{2} \delta(\tau) \right) d\tau, \quad (4)$$

$$Q^H(t) = \int_0^t v^H(\tau) d\tau = \int_0^t \left( \tilde{v}(\tau) - \frac{v_{max} - v_{min}}{2} \delta(\tau) \right) d\tau,$$

де  $\tilde{Q}(t)$ ,  $Q^B(t)$ ,  $Q^H(t)$  – оцінки здійсненого обсягу операції до моменту  $t$ , розраховані по  $\tilde{v}(t)$ ,  $v^B(t)$  і  $v^H(t)$  відповідно.

Найбільш цікавим є гірший випадок, тобто  $Q^H(t)$ . Для точки  $(t, Q^H(t))$  можна знайти відповідну мінімальну постійну швидкість, необхідну для досягнення цілі:

$$\begin{aligned} v^{H*}(t) &= (Q_{пл} - Q^H(t)) / (t_{пл} - t) = \\ &= Q_{пл} - \tilde{Q}(t) + \frac{v_{max} - v_{min}}{2} \int_0^t \delta(\tau) d\tau / (t_{пл} - t). \end{aligned} \quad (5)$$

Для будь-якого моменту  $t$  будемо задавати необхідну точність виміру швидкості в такий спосіб:

$$\delta(t) = 1 - d(t). \quad (6)$$

Сенс виразу (6) в тім, що чим більше ризик недосягнення цілі в поточний момент часу, тим більше необхідно витратити зусиль на контроль за здійсненням операції, тому що результат цієї операції наближається до критичної межі, вийшовши за яку, система вже не зможе здійснити визначений обсяг операції за час  $t_{пл}$ . Тому бажано в таких випадках знати стан контрольованого ходу здійснення операції з можливо більшою точністю, щоб, наприклад,

втрутитися в цей процес, скорегувати завдання і т.п., якщо величина ризику (складності досягнення цілі) перевищить деяку задану величину. У той же час, якщо результат здійснення операції оцінюється як цілком благополучний (тобто ризик невиконання операції невеликий), то не треба витрачати зайві ресурси на контроль та перевірку ходу виконання завдання. Слід відмітити, що це лише один з можливих варіантів вибору точності виміру  $\delta(t)$  залежно від складностей  $d(t)$ . У загальному випадку формулу (6) можна записати так:  $\delta(t) = \psi(d(t))$ , де  $\psi(x) \in [0, 1]$  при  $x \in [0, 1]$  та  $\psi(0) = 1$ ,  $\psi(1) = 0$ .

Розглянемо приклад, що ілюструє вищевикладене. Допустимо, у якийсь момент орган управління СС бажає довідатися про поточний обсяг здійснюваної системою операції. Нехай органу управління вже відомий деякий інтервал, у якому перебуває поточний обсяг операції  $[Q^H(t), Q^B(t)]$ , який можна розрахувати виходячи з даних контролю за попередні інтервали часу функціонування системи. Щоб оцінити поточну швидкість виконання операції  $\tilde{v}(t)$ , орган управління повинен отримати відомості від виконавчих елементів складної системи щодо здійсненого обсягу операції за поточний інтервал часу. Витрати на одержання такої інформації близькі до нуля, але і її точність також невелика. Щоб підвищити точність, можна зажадати від одного або декількох виконавчих елементів СС надати більш повні відомості, але при цьому прийдеться понести певні витрати на їх підготовку, аналіз і перевірку. Однак, мабуть, таку перевірку прийдеться проводити, якщо з'ясується, що ризик невиконання операції у встановлений термін досить значний.

Повернемося до знаходження необхідної точності виміру швидкості руху до цілі. Підставивши у вираз (6) формули (3) і (5), одержимо інтегральне рівняння для  $\delta(t)$ :

$$\delta(t) = 1 - (v_{\max} - v_{\min})^{-1} \times \frac{Q_{\text{пл}} - \tilde{Q}(t) + \frac{v_{\max} - v_{\min}}{2} \int_0^t \delta(\tau) d\tau}{t_{\text{пл}} - t} - v_{\min} \quad (7)$$

Продиференціюємо по  $t$ , а також враховуючи, що похідна  $\tilde{Q}'(t) = \tilde{v}(t)$ , одержимо лінійне диференціальне рівняння:

$$\delta'(t) = \frac{1}{t_{\text{пл}} - t} \left( \frac{\delta(t)}{2} - \frac{v_{\max} - \tilde{v}(t)}{v_{\max} - v_{\min}} \right) \quad (8)$$

з початковою умовою:

$$\delta(0) = 1 - d(0) = \frac{v_{\max} - Q_{\text{пл}}/t_{\text{пл}}}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (9)$$

Вирішуючи це рівняння, одержимо:

$$\delta(t) = \frac{\sqrt{t_{\text{пл}}} \left( v_{\max} - \frac{Q_{\text{пл}}}{t_{\text{пл}}} \right) - \int_0^t \frac{(v_{\max} - \tilde{v}(\tau))}{\sqrt{t_{\text{пл}} - \tau}} d\tau}{\sqrt{t_{\text{пл}} - t} (v_{\max} - v_{\min})} \quad (10)$$

Відмітимо, що якщо в якийсь момент часу  $t_0$  виявиться, що  $\delta(t_0) = 1$ , то це означає, що подальший контроль не потрібний, оскільки  $d(t_0) = 0$ , і система досягне цілі операції у запланований термін, навіть рухаючись із мінімальною швидкістю. Якщо ж у момент  $t_1$  буде виконано  $\delta(t_1) < 0$ , то система могла до цього моменту ввійти в критичну зону, і досягнення цілі може виявитися неможливим.

Розглянемо окремий випадок, коли оцінювана швидкість руху постійна і дорівнює середній:  $\tilde{v}(t) = (v_{\max} + v_{\min})/2$ . Тоді

$$\delta(t) = 1 - \sqrt{\frac{t_{\text{пл}}}{t_{\text{пл}} - t}} \left( \frac{Q_{\text{пл}}/t_{\text{пл}} - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \right) \quad (11)$$

Знайдемо для цього випадку величини  $t_0$  і  $t_1$ . Підставляючи  $\delta(t_0) = 1$  в (11), отримаємо, що

$$\sqrt{\frac{t_{\text{пл}}}{t_{\text{пл}} - t}} \left( \frac{Q_{\text{пл}}/t_{\text{пл}} - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \right) = 0, \text{ тобто, якщо задача}$$

не тривіальна і досягнення цілі за час  $t_{\text{пл}}$  неможливе навіть при постійному русі з мінімальною швидкістю, то контроль припиняти не можна. При  $\delta(t_1) = 0$  одержуємо

$$t_1 = t_{\text{пл}} \left( 1 - \left( \frac{Q_{\text{пл}}/t_{\text{пл}} - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \right)^2 \right) \quad (12)$$

Існує альтернативний підхід до обчислення кількісної оцінки складності досягнення цілі. Якщо  $\mu \in (0, 1]$  - безрозмірна оцінка якості деякого ресурсу (чим більше, тим краще), а  $\varepsilon \in (0, 1]$  - нижня границя вимог до якості ресурсу, то складності можна задати так [7]:

$$d = \varepsilon(1 - \mu) / (\mu(1 - \varepsilon)), \quad (13)$$

при цьому  $d \in [0, 1]$  при виконанні умови  $\mu \geq \varepsilon$ , тобто якщо ресурс є припустимим. Слід відмітити, що у формулі (3) не враховано ще одну особливість розглянутої задачі. З області, що лежить нижче прямої 0-1 на рис. 1, теоретично можливо досягти цілі операції у запланований термін. Проте, мінімальна швидкість досягнення результату операції може розумітися як оцінка надійності системи, рух із ще меншою швидкістю може відбуватися у випадку виникнення малоймовірних надзвичайних обставин, які можуть привести до руйнування самої системи. Саме тому кількісна оцінка ризику повинна зростати також і при наближенні системи до відрізка 0-1. Тоді для розглянутої задачі з урахуванням вищевик-

деного зауваження складності можуть бути обчислені в такий спосіб:

$$d = \max(d_1, d_2),$$

$$d_1 = \frac{\varepsilon_1(1 - \mu_1)}{\mu_1(1 - \varepsilon_1)} = \frac{|E_1 E_2| \cdot |E_3 P|}{|E_1 P| \cdot |E_2 E_3|},$$

$$d_2 = \frac{\varepsilon_2(1 - \mu_2)}{\mu_2(1 - \varepsilon_2)} = \frac{|F_1 F_2| \cdot |F_3 P|}{|F_1 P| \cdot |F_2 F_3|},$$

що після підстановки дає таку формулу для  $d(t)$ :

$$d(t) = \max(d_1(t), d_2(t)),$$

$$d_1(t) = v_{\min} \cdot (v_{\max} t - Q(t)) / (v_{\max} - v_{\min}) \times$$

$$\times \frac{(Q_{\text{пл}} - v_{\min} t_{\text{пл}} - t(v_{\max} - v_{\min}))}{Q(t)(Q_{\text{пл}} - v_{\min} t_{\text{пл}} + Q(t) - v_{\max} t)},$$

$$d_2(t) = (v_{\max} t - Q(t)) / (v_{\max} - v_{\min}) \times$$

$$\times \frac{(Q(t) - Q_{\text{пл}} - v_{\min} t_{\text{пл}} + v_{\min} t)}{(t_{\text{пл}} - t)(v_{\max} t_{\text{пл}} - Q_{\text{пл}})}.$$
(14)

Підставляючи в (14) замість  $Q(t)$  величину  $Q^H(t)$  з (4), з урахуванням (6) і умови  $\tilde{Q}'(t) = \tilde{v}(t)$ , можна одержати диференціальне рівняння для даного виду оцінки складності. З огляду громіздкості конструкцій, що виходять, у статті вони не наводяться.

## Висновки

1. Розроблений алгоритму визначення параметрів контролю операцій, що здійснюються складними системами, реалізація якого забезпечить адаптивне управління складними системами.

2. Отримані вирази, що встановлюють залежність відносної точності виміру швидкості здійснення операції від часу контролю. Організація контролю за

такими параметрами дозволить своєчасно здійснювати управляючі впливи на систему задля досягнення цілі операції.

3. Як можливе розширення даної задачі в її постановку можна ввести управління і розглядати два варіанти задачі оптимального управління - з кінцевим числом точок контролю стану системи і з безперервним контролем, де як кінцевий результат буде розглядатися мінімізація витрат на досягнення цілі у відведений час, і задача буде полягати в знаходженні оптимальної траєкторії руху системи до цілі.

## Список літератури

1. Бурков В.Н. Механизмы управления в активных системах / В.Н. Бурков // Тренды и управление. – 2014. – Вып. 4(8). – С. 428-440.
2. Лафта Дж.К. Теория организации: учеб. пособие / Дж.К. Лафта. – М.: ТК Велби, Проспект, 2003. – 416 с.
3. Райченко А.В. Прикладная организация / А.В. Райченко. – СПб.: Питер, 2003. – 304 с.
4. Новиков Д.А. Сетевые структуры и организационные системы. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 103 с.
5. Сетевые модели в управлении / О.П. Кузнецова, М.В. Губко; под ред. Д.А. Новикова. – М.: Эгвес, 2011. – 443 с.
6. Морозов О.О. Алгоритм контролю та управління складними системами / О.О. Морозов, Л.В. Морозова [Текст] // Системи обробки інформації. – 2016. – Вып. 3(140). – С. 88-91.
7. Каплинский А.И. Моделирование и алгоритмизация слабоформализованных задач выбора наилучших вариантов систем / А.И. Каплинский, И.Б. Русман, В.М. Умывакин. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. – 168 с.

Надійшла до редколегії 25.10.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.А. Подригало, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТРОЛЯ ОПЕРАЦИЙ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫХ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

А.А. Морозов

В статье рассматривается задача определения параметров контроля операций, осуществляемых сложными системами. В качестве таких параметров рассматриваются точность оценивания объема осуществляемой операции (или точность контроля) и скорость ее осуществления. Полученные выражения, устанавливающие зависимость относительной точности измерения скорости осуществления операции, от времени контроля. Организация контроля по таким параметрам позволит своевременно осуществлять управляющие влияния на систему для достижения цели операции.

**Ключевые слова:** сложная система, контроль осуществления операции, параметры контроля, точность контроля, орган управления, достижение цели операции

## DETERMINATION OF PARAMETERS OF CONTROL OF OPERATIONS IMPLEMENTED BY COMPLEX SYSTEMS

A.A. Morozov

The article deals with the task of determining the parameters of the control of operations carried out by complex systems. As such parameters, the accuracy of estimating the volume of the operation being performed (or the accuracy of the control) and the speed of its implementation are considered. The obtained expressions, establishing the dependence of the relative accuracy of measuring the speed of the operation, on the control time. The organization of control over such parameters will allow for timely implementation of control influences on the system to achieve the whole operations.

**Keywords:** complex system, control of the operation, parameters of control, accuracy of control, control body, achievement of the objective of the operation