

В. П. Пошивалов, доктор технічних наук,
професор, провідний науковий співробітник
відділу надійності та довговічності складних
технічних систем Інституту технічної механіки
НАН України і НКА України

Ю. Ф. Данієв, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник відділу надійності
та довговічності складних технічних систем Інституту технічної
механіки НАН України і НКА України

ОЦІНКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СКЛАДНИХ ЕРГАТИЧНИХ СИСТЕМ

У статті викладено методологічні основи оцінювання працездатності ергатичних систем. Для оцінки надійності технічних засобів запропоновано складний розподіл Вейбулла. Розглянуто питання оцінювання працездатності програмного забезпечення та людини-оператора й ергатичної системи в цілому.

Methodological bases of the ergotic systems capacity evaluation are offered. Complicated Weibull's distribution is proposed for the engineering systems reliability estimation. Problems of evaluation software a human operator and the complete ergotic system evaluation are considered.

Ключові слова. Ергатичні системи, оцінка надійності, програмне забезпечення, технічні засоби, оператор системи.

Вступ. На сучасному етапі економічного розвитку одна з найбільш важливих проблем – це підвищення якості й надійності розробок у галузі створення ергатичних систем, які використовуються в різних сферах діяльності людини, а саме в системах обслуговування, керування і контролю, під час обробки даних, проектування тощо.

Ергатична система являє собою складну систему керування, складовим елементом якої виступає людина-оператор (або група операторів).

Дослідження ергатичної системи проводиться на основі системного підходу, що розглядає об'єкт як систему, в якій виділяються окремі елементи, внутрішні та зовнішні зв'язки, що впливають на функціонування елементів, при цьому цілі кожного з елементів формуються залежно від загального призначення системи.

Підвищення ефективності ергатичних систем пов'язано зі зростанням їх технічної та програмної складності. У зв'язку із цим посилюються вимоги до працездатності (надійності) людини-оператора та надійності компонентів, що входять до складу ергатичної системи. Для розв'язання цієї проблеми потрібно вміти оцінювати рівні надійності всіх компонентів та їх внесок у рівень надійності всієї системи.

Нині питанням оцінювання працездатності складних людино-машинних систем із сучасним програмним забезпеченням приділяється недостатньо уваги, немає єдиного концептуального підходу до дослідження таких систем [1, 2]. Також недостатньо вивчено надійність оператора і працездатність програмних комплексів. Елементи сучасної ергатичної системи можуть пристосовуватись до умов функціонування, тобто вони адаптивні. Для такої системи важко сформулювати поняття відмови. У зв'язку з цим проблема оцінювання працездатності ергатичних систем актуальна.

Дану працю присвячено методологічним основам оцінювання працездатності ергатичних систем.

© **В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Данієв, 2009**

Постановка завдання. У сучасній науково-технічній літературі за основні показники надійності ергатичної системи береться ймовірність безвідмовного, безпомилкового і своєчасного розв'язання задачі системою, вони визначаються через показники надійності людини-оператора і комплексу технічних засобів, котрі беруться як початкові з урахуванням їх впливу один на одного.

Оцінка надійності ергатичної системи взагалі має проводитися за такими основними напрямками [2]:

- надійність технічних засобів системи;
- надійність програмного забезпечення;
- надійність оператора, керівника системи.

Вважатимемо, що порушення працездатності будь-якого з трьох компонентів призводить до порушення працездатності системи, яка має функціонувати безперервно протягом заданого часу, і ці компоненти системи не тільки не мають надмірності, але й не можуть відновлюватися під час виконання завдання, однакові з погляду їхньої функціональної значущості. Ці припущення не принципові та порівняно легко можуть бути зняті: перше з них – уведенням показників з урахуванням відновлення, а друге – за рахунок уведення вагових коефіцієнтів.

За цих умов оцінювання ергатичних систем через істотну невизначеність, яка спричинена відсутністю достовірних апріорних розподілів для компонентів, невеликим обсягом результатів випробувань, відсутністю моделей оцінювання діяльності операторів в умовах навчання, недостатнього часу тощо, змушує обмежуватися розглядом випадкових оцінок показників працездатності як компонентів, так і

системи в цілому. Для цього необхідно розробити методологічні основи оцінювання працездатності таких систем.

Надійність технічних засобів

За розглянутих припущень працездатність (надійність) можна оцінити показником імовірності безвідмовності роботи. Вважатимемо, що напрацювання на відмову технічної системи описується розподілом Вейбулла із щільністю розподілу:

$$g(t) = \lambda \lambda t^{\lambda-1} \exp(-\lambda t^{\lambda}), \quad (1)$$

де λ, β – параметри розподілу;

t – заданий час роботи технічних засобів.

Узагалі параметри λ і β у виразі (1) є випадковими величинами відповідно до щільностей розподілу $\varphi_1(\lambda)$ і $\varphi_2(\beta)$. Якщо апіорні щільності $\varphi_1(\lambda)$ і $\varphi_2(\beta)$ відомі, то щільність складного розподілу Вейбулла запишеться так:

$$g(t) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \lambda \lambda t^{\lambda-1} \exp(-\lambda t^{\lambda}) \varphi_1(\lambda) \varphi_2(\beta) d\lambda d\beta \quad (2)$$

Надалі розглядається зміна випадковим чином параметра λ , а параметр β вважається постійним. Нехай випадкова величина λ описується гамма-розподілом:

$$\varphi_1(\lambda) = \frac{\lambda_1^k \lambda^{k-1}}{\Gamma(k)} \exp(-\lambda_1 \lambda), \quad (3)$$

де λ_1, k – параметри розподілу.

Підставляючи (3) в (2), маємо:

$$g(t) = \int_0^{\infty} \lambda \lambda t^{\lambda-1} \exp(-\lambda t^{\lambda}) \frac{\lambda_1^k \lambda^{k-1}}{\Gamma(k)} \exp(-\lambda_1 \lambda) d\lambda = k \lambda_1^k t^{\lambda-1} (t^{\lambda} + \lambda_1)^{-(k+1)}$$

Тоді функція складного розподілу Вейбулла дорівнює

$$G(t) = 1 - \frac{\lambda_1^k}{(t^{\lambda} + \lambda_1)^k}, \quad (4)$$

а інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{k \lambda_1 t^{\lambda-1}}{t^{\lambda} + \lambda_1}. \quad (5)$$

У цьому випадку імовірність безвідмовної роботи технічної системи визначатиметься виразом

$$P_T(t) = \frac{\lambda_1^k}{(t^{\lambda} + \lambda_1)^k}. \quad (6)$$

Надійність програмного забезпечення

Причини відмов ергатичних систем з вини програмного забезпечення відмінні від причин відмов техніки. Надійність програмного забезпечення – здатність програмного продукту безвідмовно виконувати певні функції за заданих умов протягом заданого періоду часу з достатньо великою вірогідністю. Ступінь надійності характеризується вірогідністю роботи програмного продукту без відмови протягом певного періоду часу. Для прогнозування надійності програмного забезпечення на різних етапах його життєвого циклу існує безліч різних моделей, що дозволяють прогнозувати надійність програмного забезпечення на різних етапах його життєвого циклу: аналітичні (динамічні і статичні) та емпіричні [2–4]. Незважаючи на наявність різних моделей надійності програмних засобів, питання оцінки надійності комп'ютерних програм недостатньо опрацьовано.

Можна виділити дві групи моделей надійності програмного забезпечення:

- програми вважаються за аналоги невідновлюваних систем і знаходяться значення відповідних показників надійності (імовірність безвідмовної роботи програм протягом певного інтервалу напрацювання або кількості прогонів під час експлуатації програми в розрахунковому режимі);
- програми вважаються за аналоги відновлюваних систем.

Проте на завершальних стадіях випробувань, коли основну частину дефектів уже усунено, виникаючі помилки достатньо лише фіксувати, оскільки вони не повинні приводити до катастрофічних наслідків. Ці помилки виявлятимуться випадковим чином з огляду на те, що вони можливі через випадковий вибір початкових даних, що визначають випадкову траєкторію обчислень, а запобігти подібним помилкам у складних програмних засобах за рахунок повнішого їх тестування практично неможливо. Імовірність

безвідмовної роботи програмного забезпечення міняється у міру виправлення помилок. Вважатимемо, що імовірність виявлення помилки в одному випробуванні визначається за формулою

$$P_p(t) = 1 - \exp(-\lambda t), \quad (7)$$

де λ – інтенсивність відмов, яка пропорційна кількості ще не виявлених помилок.

Цей підхід відповідає моделі Джелінського–Моранди [4], яка полягає в тому, що в процесі тестування програми значення інтервалів часу тестування між виявленнями двох помилок має експоненціальний розподіл з інтенсивністю відмов, пропорційною кількості ще не виявлених помилок. У цьому випадку відбувається експоненціальне зменшення інтенсивності відмов

$$\lambda = N_0 k \exp(-kt) \quad (8)$$

У виразі (8) N_0, k визначаються із співвідношення $N = N_0 (1 - \exp(-kt))$, де N – кількість виправлених помилок під час розробки програм за час t . Після закінчення розробки програми для визначення кількості виправлених помилок можна скористатися емпіричними оцінками, наприклад

$$N = 10^{-3} V,$$

де V – кількість операторів у програмі.

Таким чином, знаючи тривалість розробки програми, її об'єм, визначивши параметри N_0 і k , можна оцінити імовірність безвідмовної роботи програми.

Для аналізу і підвищення надійності програмного забезпечення складної структури можна піти шляхом декомпозиції та подання його у вигляді сукупності взаємопов'язаних модулів часткових програм. Тому скористаємося простою моделлю послідовності випробувань Бернуллі. У цьому випадку простір елементарних подій містить $2N$ точок, де N – кількість випробувань (випробування – запуск програми). Позначимо імовірність правильного результату P_2 . Тоді імовірність неправильного результату – $(1 - P_2)$. Імовірність того, що з N запусків m приведуть до правильного результату, виразиться формулою біноміального розподілу, а щільність імовірності безпомилкового функціонування модуля програми дорівнюватиме:

$$g_2(P_2) = \frac{(N+1)}{m!} P_2^m (1 - P_2)^{N-m}, \quad (9)$$

де n – повна кількість прогонів програми функціонування інформаційної системи,

m – кількість успішних прогонів.

Надійність оператора, керівника системи

Оцінити працездатність людини-оператора як одного з необхідних компонентів складної системи досить важко через властивості живого організму, що володіє адаптаційними можливостями. Надійність оператора характеризує його властивість, яка полягає в здатності виконувати задані функції, зберігаючи в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що визначають якість виконання функцій у заданих режимах і умовах функціонування. Моделі надійності оператора істотно відрізняються від моделей надійності технічних систем, оскільки людина здатна ухвалювати рішення, виходячи з власного досвіду, і продовжувати роботу після того, як технічні засоби системи відмовили, а також виводити систему зі стану відмови. Основними функціями, які виконує оператор у системі “людина–машина”, є:

- введення в систему інформації без ухвалення рішень;
- управління, за якого операторові ставиться завдання і потрібно ухвалити рішення.

Якщо в першому випадку здатність оператора визначається в основному навиками і ступенем втоми, то в іншому випадку від нього вимагаються певні творчі зусилля і вища кваліфікація. Надійність людини можна розкласти на ряд компонентів: надійність психічних процесів, надійність енергетичних процесів тощо. Повна надійність людини визначається сукупністю процесів, що відбуваються в його організмі. Надійність діяльності, у свою чергу, визначається надійністю людського організму і виконанням людиною функцій з управління та обслуговування. Тому надійність діяльності людини доцільно уявити у вигляді структурної і функціональної надійності. Надійність людини-оператора характеризується показниками безпомилковості, готовності, відновлюваності і своєчасності. Безпомилковість людини-оператора визначається імовірністю безпомилкової роботи, яка обчислюється як на рівні окремої операції, так і алгоритму. Початковими даними для розрахунку надійності операторів є: кількість операторів, їх взаємодія під час виконання функціональних завдань, дані про надійність одного оператора. Надалі складається структурна схема надійності операторів під час виконання заданих функцій. Для цього проводиться аналіз усіх функцій, що виконуються оператором. Якщо у виконанні функцій беруть участь декілька операторів, то імовірність безвідмовної роботи операторів $P_{op}(t)$ під час виконання l функцій визначиться за формулою

$$P_{op}(t) = \prod_{j=1}^l P_{opj}(t), \quad (10)$$

де $P_{op}(t)$ – імовірність безвідмовної роботи під час виконання j -ї функції.

Значення $P_{op}(t)$ визначиться за формулою $P_{opj}(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_{ij}(t))$ – при дублюванні m

операторами заданої функції, за формулою $P_{opj}(t) = \prod_{i=1}^k P_{ij}(t)$ – при виконанні j -ї функції k -м операторами.

Тут $P_i(t)$ – імовірність безвідмовної роботи одного оператора, яка в простому випадку визначається кваліфікацією, досвідом роботи (імовірністю безпомилкового виконання заданої функції P_{iB}) і надійністю людського організму (імовірністю працездатного стану, яка залежить від віку, фізичного стану і т. п.). Значення величин P_{iB} і $P_{iФ}$ визначаються за наслідками підготовки і тестування операторів. Тоді вираз для розрахунку імовірності безвідмовної роботи оператора матиме вигляд:

$$P_i(t) = P_{iB}(t)P_{iФ}(t) \quad (11)$$

Результати дослідження. Вплив людини-оператора на надійність ергатичної системи розглядається у двох напрямках:

– поняття теорії надійності застосовуються до людини-оператора аналогічно технічним елементам (вводяться показники, аналогічні показникам надійності технічних систем: інтенсивність відмов, інтенсивність відновлення, коефіцієнт готовності);

– зважаючи на динамічність і стохастичність властивостей людини, не ставиться питання про показники надійності, але при цьому враховуються можливість помилкових дій людини-оператора і його здатність компенсувати наслідки відмов технічних систем.

У першому випадку імовірність безвідмовної роботи системи знаходиться як добуток імовірності безвідмовної роботи технічної системи та імовірності безвідмовної роботи людини-оператора. Тоді оцінити працездатність ергатичної системи можна імовірністю безвідмовної роботи за формулою

$$P_3(t) = P_T(t)P_P(t)P_{op}(t) \quad (12)$$

Недолік цього підходу полягає в тому, що не враховується активна роль людини-оператора, тому в другому випадку, зважаючи на динамічність і стохастичність властивостей людини, навряд чи доцільно визначати показники її надійності аналогічно показникам надійності технічних систем.

Висновок. Розроблені методологічні основи дозволяють кількісно оцінювати працездатність ергатичних систем. Розглядаючи шляхи підвищення надійності ергатичних систем, слід урахувати імовірність помилкових дій людини-оператора і його здатність своєчасно реагувати як на відмови технічних систем, так і на свої помилки.

Література

1. Губинский А. И. Надежность и качество функционирования эргатических систем [Текст] / А. И. Губинский. – Л. : Наука, 1982. – 270 с.
2. Леонтьев Е. А. Надежность экономических информационных систем [Текст] : учеб. пособие / Е. А. Леонтьев. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – 128 с.
3. Василенко Н. В. Модели надежности программного обеспечения [Текст] / Н. В. Василенко, В. А. Макаров // Вестник Новгородского государственного университета. – 2004. – С. 126–132.
4. Майерс Г. Надежность программного обеспечения [Текст] / Г. Майерс. – М. : Мир, 1980. – 360 с.