

УДК 681.5:658

В. П. Пошивалов, доктор технічних наук, професор
Інституту механіки НАН України
Ю. Ф. Данієв, кандидат технічних наук, старший
науковий співробітник відділу надійності
та довговічності складних технічних систем
Інституту механіки НАН України

ПІДТВЕРДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕРГАТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ІМОВІРНІСНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Розглянуто методологічні питання підтвердження показників надійності ергатичних систем. Показано, що для підтвердження показників надійності доцільно використовувати метод імовірнісного моделювання. Наведені співвідношення дозволяють проводити розрахунки показників структурної та функціональної надійності ергатичних систем.

Рассмотрены методологические вопросы подтверждения показателей надежности эргатических систем. Показано, что для подтверждения показателей надежности целесообразно использовать метод вероятностного моделирования. Приведены соотношения, которые позволяют проводить расчеты показателей структурной и функциональной надежности эргатических систем.

Methodological problems of confirmation of ergotic systems reliability ratios are considered. For the confirmation of reliability ratios it is reasonable to use a method of probabilistic modelling. Relations that allow to carry out calculations of structural and functional reliability ratios of ergotic systems are given.

Ключові слова. Надійність, ергатичні системи, показники надійності, ймовірність безвідмовної роботи, імовірнісне моделювання.

© **В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Данієв, 2010**

Вступ. Під час дослідження надійності ергатичних систем мало уваги приділяється підтвердженню показників надійності. У першу чергу, це пов'язано з тим, що випробування для підтвердження показників надійності ергатичних систем мають більші технічні, психологічні та організаційні труднощі, ніж звичайні технічні системи, а для багатьох систем з операторами відповідального призначення експерименти просто неможливі. Разом з тим навіть наближене аналітичне дослідження надійності ергатичних систем призводить до дуже громіздких перетворень, незручних для практичного використання. У зв'язку із цим питання підтвердження показників надійності ергатичних систем зараз дуже актуальні для розвитку теорії надійності.

Цю статтю присвячено розробці методологічних основ підтвердження показників надійності функціонування ергатичних систем на основі імовірнісного моделювання.

Постановка завдання. У початковий період розвитку ергатичних систем дослідники намагалися замінити людину автоматом, і вся увага зосереджувалася на забезпеченні надійності технічних пристроїв, а діяльність людини взагалі не враховувалася. Однак очевидно, що заміна людини автоматом не є повністю коректною. Розглядаючи моделі ергатич-

них систем, можна порушувати питання лише про посилення людських здатностей за допомогою автоматики. Така зміна поглядів на роль людини в технічних системах вплинула на розуміння проблеми надійності. Загальноновизнаним стає те, що під час розгляду надійності складних систем, зокрема ергатичних, необхідно враховувати діяльність оператора, але поки що немає повної ясності, як це робити [1, 2]. Тому важливо розробити методи розрахунку надійності таких систем з урахуванням помилок операторів, що призводять до аварійних відмов, їх частка може становити 25–75 % від усіх відмов системи.

Отже, під надійністю ергатичної системи будемо розуміти її здатність виконувати задані функції протягом необхідного проміжку часу або необхідного наробітку і зберігати при цьому свої експлуатаційні показники в заданих межах.

За своїми можливостями людина і технічна система взаємно доповнюють одна одну. Людина має переваги перед технічною системою за способами переробки інформації, здатністю поєднувати різноманітні елементи в єдину структуру, у виконанні нечітко сформульованих завдань, в умінні оцінити стан керованого об'єкта не тільки за прямими, але й непрямими сигналами, які не передбачені системою керування.

Людині властиве уявлення про мету своєї діяльності, у процесі навчання й роботи вона здатна до побудови моделі динамічного образу керованого об'єкта, що є психічним новотвором, синтезованим на основі інформації, отриманої з цієї моделі та накопиченого досвіду.

Для функціонування ергатична система як ціле повинна мати у своєму складі ланку, що здійснює інтеграцію інших ланок. Характеристики людини дозволяють їй бути такою ланкою, тому що людина може адаптуватися до різних умов; покладаючись на інтуїцію, вона здатна швидко приймати рішення, не перебираючи всіх варіантів. Але людина дуже швидко стомлюється від виконання одноманітних дій, вона піддається зовнішнім і внутрішнім впливам, її характеристики залежать від психічного стану, вона здатна до декваліфікації у разі тривалої бездіяльності. Водночас людина значно поступається машині за обсягом переробки інформації; максимальна кількість інформації, яку може переробити людина, обмежена властивостями її пам'яті. Ці недоліки людини можуть бути скомпенсовані автоматичними пристроями, якщо раціонально розподілити функції між людиною і технічною системою.

Вивчаючи ергатичну систему, можна розглядати або цілеспрямовану діяльність окремих осіб і колективів людей (виконавців і керівників робіт), що використовують частково автоматизовані технічні системи, або часткові завдання взаємодії оператора з машиною.

З позиції включення в ергатичну систему оператор-людина здійснює:

– контроль і встановлює критерії ефективності;

- повністю ручне керування;
- оперативне керування за інформацією про систему;
- оперативне втручання шляхом уведення вихідних даних у модель, закладену в систему;
- тактичне керування шляхом вибору альтернатив;
- стратегічне керування шляхом вибору моделі поведінки системи.

Залежно від способу одержання вихідних даних методи підтвердження показників надійності поділяються на: експериментальні, розрахункові та розрахунково-експериментальні [3, 4].

Експериментальні методи ґрунтуються на використанні статистичних даних, одержуваних при випробуваннях виробів на надійність, або даних дослідної чи підконтрольної експлуатації. Ці методи разом з контрольними випробуваннями на надійність є основними для підтвердження показників надійності. Перевага експериментальних методів полягає у використанні добре відпрацьованих методів оцінки показників надійності за результатами випробувань. Недолік – необхідність проводити певну кількість випробувань для підтвердження показників надійності.

Розрахункові методи базуються на обчисленні показників надійності за довідковими даними про надійність складових частин з урахуванням функціональної структури виробу і видів руйнування, за даними про надійність виробів аналогів, за результатами експертної оцінки надійності, за даними про властивості матеріалів, елементів виробів і навантажень на них, механізмів відмови та за іншою інформацією про виріб, яка є до моменту оцінки надійності. Перевага розрахункових методів полягає в тому, що не потрібно проводити контрольні випробування на надійність. Недолік – необхідно знати показники надійності елементів і в ряді випадків проводити великі обсяги обчислень.

Розрахунково-експериментальні методи ґрунтуються на обчисленні показників надійності за вихідним даними, які визначаються експериментальними методами. Розрахунково-експериментальні методи також застосовуються у всіх випадках, коли це дозволяє істотно скоротити необхідний обсяг випробувань (наприклад, для резервованих систем, за наявності апріорної інформації про надійність виробів тощо). Перевага розрахунково-експериментальних методів – не потрібно проводити контрольні випробування на надійність. Недолік – треба мати інформацію про імовірнісні характеристики надійності всіх елементів системи і проводити деякі випробування елементів на надійність.

Випробування для підтвердження показників надійності ергатичних систем неможливі або недоцільні економічно, тому при визначенні надійності системи доводиться обмежуватися розрахунками або моделюванням. Завдання в цьому випадку ставиться так: є дані про надійність елементів і зв'язки між ними (відомості про структуру системи), потрібно за цими даними визначити показники надійності системи.

Оцінка надійності ергатичної системи проводиться на основі інформації про надійність її складових компонентів: технічної системи, програмного забезпечення, оператора [5].

Показники надійності технічної системи знаходяться звичайними методами теорії надійності.

Оцінка надійності програмного продукту починається з аналізу його структури, тобто з визначення трьох типів графів, а саме:

- графа, що визначає структуру процедурної частини об'єктно-орієнтованої програми, вершинами якого є або програмні модулі (процедури), або методи класів даних;
- набору графів, де кожний граф відповідає певному класу даних;
- графа, який описує ієрархію класів об'єктно-орієнтованої програми.

Після того як структура програмного продукту повністю визначена, оцінка його надійності проводиться так: спочатку розраховується інтенсивність потоку відмов компонентів нижнього рівня, а потім дається оцінка надійності компонентів верхніх рівнів.

Надійність оператора визначається, по-перше, станом людського організму, тобто сукупністю процесів у ньому: психічних, енергетичних тощо, а по-друге – надійністю виконання оператором функцій керування та обслуговування системи. У зв'язку із цим надійність оператора доцільно зобразити у вигляді структурної та функціональної надійності. Одержання кількісного показника надійності ергономічної складової ґрунтується на таких принципах:

- діяльність оператора декомпонується на дрібніші елементи (функціональні та операційні одиниці);
- визначаються показники надійності операційних одиниць (безпомилковість і своєчасність виконання операції) експериментальним шляхом або з відповідних довідників;
- на рівні функцій показники надійності діяльності оператора визначаються через відомі характеристики елементів, що декомпозуються, шляхом згортання отриманих структур діяльності до більш простих структур з еквівалентними часовими і надійнісними характеристиками.

Шляхом аналізу побудованих структур у діяльності оператора виділяються типові блоки функціональних одиниць, для яких можуть бути отримані аналітичні вирази щодо визначення характеристик функціональної надійності (безпомилковості і своєчасності) їхнього виконання. За допомогою цих залежностей структура будь-якої складності може бути зведена до еквівалентної, в окремому випадку вона становить послідовний ланцюжок еквівалентних блоків. Тоді показники функціональної надійності визначатимуться як добуток ймовірностей безпомилкового виконання кожного блоку.

Показниками надійності ергатичних систем можуть бути:

- напрацювання до відмови системи (неремонтовані системи) і характеристики відповідного потоку відмов (відновлювані системи), якщо основна увага приділяється розглядові функціонування технічної системи (будь-які дії операторів оцінюються залежно від їхнього впливу на безвідмовну роботу системи);

- час досягнення поставленої мети, якщо основна увага приділяється цілеспрямованій діяльності колективу людей (або окремих осіб). У цьому випадку використовується випадкова величина – час досягнення поставленої мети (характеристики цієї випадкової величини застосовуються як показники своєчасності), а відмови в технічних системах і помилки виконавців розглядаються з позиції їхнього впливу на час досягнення мети. Показниками надійності функціонування ергатичних систем є показники структурної та функціональної надійності. Показником структурної надійності слугує імовірність безвідмовної роботи за час виконання функції, а показником функціональної надійності – умовна ймовірність безпомилкового виконання запропонованого технологією способу функціонування за умови, що враховується можливість виникнення помилок, при цьому вважаються неможливими виникнення стійких відмов та відсутність усунення порушень правильного функціонування системи від помилок.

Іншим показником функціональної надійності є умовна ймовірність правильного виконання

запропонованого способу функціонування, коли враховується як можливість виникнення помилок, так і можливість їх усунення.

Враховуючи складність проведення експериментів для визначення надійності ергатичних систем, використання випробувань для підтвердження показників надійності недоцільне. Тому для цього можна використовувати метод імовірнісного моделювання, який не потребує проведення контрольних випробувань на надійність, а базується тільки на знанні імовірнісних характеристик елементів.

Результати дослідження. При використанні логічної моделі імовірнісне моделювання полягає у відтворенні випадкового процесу зміни станів системи та обчисленні значень часу (наробітку) до появи відмов і відновлень системи. У ході моделювання враховуються логічні умови працездатності системи. Математична модель містить відомості про логічну структуру системи та інформацію про надійність усіх її елементів.

Будемо вважати, що ергатична система складається з трьох компонентів: самої технічної системи, програмного забезпечення і людини-оператора або групи операторів.

Введемо такі допущення при підтвердженні показників надійності ергатичних систем з використанням імовірнісного моделювання.

1. Поява відмови технічної системи, програмного забезпечення і помилки оператора є незалежними рідкісними випадковими подіями; поява двох і більше однойменних подій за період застосування системи практично неможлива.

2. Здатність до компенсації помилок і до безпомилкової роботи – незалежні властивості оператора.

3. Системи з некомпенсованими помилками оператора, відмовами програмного забезпечення і техніки можуть бути наслідком відсутності обміну інформацією між системами, що становлять ергатичну систему, наслідком відсутності самоперевірки діяльності оператора тощо.

Виділимо можливі сценарії при функціонуванні ергатичної системи з компенсацією як помилок, так і відмов протягом часу $(t_1, t_1 + \tau)$.

1. Технічна система і програмне забезпечення не відмовляли, і оператор не робив помилки.

2. Технічна система і програмне забезпечення не відмовляли, оператор зробив помилку, але виправив її.

3. Оператор не зробив помилки, програмне забезпечення не відмовляло, технічна система відмовила, але завдяки втручанню оператора система виконала свої функції.

4. Оператор зробив помилку, але виправив її, програмне забезпечення не відмовляло, технічна система відмовила, але завдяки втручанню оператора система виконала свої функції.

5. Технічна система не відмовляла, оператор не робив помилки, відмовило програмне забезпечення, але завдяки втручанню оператора система виконувала свої функції.

6. Оператор не робив помилки, програмне забезпечення не відмовляло, технічна система відмовила, але завдяки втручанню оператора система виконала свої функції.

Виходячи з перерахованих сценаріїв, можна виділити найбільш загальний випадок ергатичної системи з компенсацією помилок операторів і наслідків відмов технічних систем і програмного забезпечення. Компенсація помилок є важливим додатковим шляхом підвищення надійності систем. У цьому випадку оператори можуть вчасно виправляти (компенсувати) частину допущених ними помилок. Компенсація наслідків відмов технічних систем і програмного забезпечення також веде до підвищення надійності систем. У цьому випадку технічна система або програмне забезпечення не відмовляли або відмовляли, але завдяки втручанню оператора система виконала свої функції.

Враховуючи, що ймовірність одночасної появи двох і більше помилок дуже мала, і вважаючи, що кожен помилку можна миттєво компенсувати з ймовірністю $P_{ком}$, ймовірність безвідмовної роботи ергатичної системи дорівнюватиме

$$\text{[input type="text"]}, \tag{1}$$

де $P_T(t_1, t_1 + \tau)$ – ймовірність безвідмовної роботи технічної системи протягом часу ;

– ймовірність безвідмовної роботи програмної складової протягом часу ;

$P_0(\tau)$ – ймовірність безпомилкової роботи операторів протягом часу за умови, що технічна система працює безвідмовно;

t_1 – час експлуатації технічної системи;

τ – розглянутий період застосування системи;

$P_{\mathcal{F}}(t_1, t_1 + \tau, \delta_1)$ – умовна ймовірність безвідмовної роботи протягом часу технічної системи з компенсацією наслідків відмов, якщо в момент δ_1 відбулася відмова $(t_1 < \delta_1 < t_1 + \tau)$ і вона була компенсована.

З формули (1) можна одержати вираз для ймовірності безвідмовної роботи системи для інших можливих сценаріїв. Наприклад, у випадку коли технічна система і програмне забезпечення не відмовляли, оператор зробив помилку, але виправив її, з (1) одержимо вираз для визначення ймовірності безвідмовної роботи системи у вигляді



З виразу (1) також можна одержати показник структурної надійності ергатичної системи – імовірність безвідмовної роботи для ергатичної системи з некомпенсованими помилками і відмовами

$$P_1(t) = P_r(t) P_n(t) P_o(t).$$

Системи з некомпенсованими помилками операторів і відмовами техніки порівняно рідко зустрічаються на практиці. Надійність таких систем можна вважати нижньою границею надійності ергатичної системи. Надійність систем з некомпенсованими помилками і відмовами може бути істотно підвищена шляхом резервування операторів з періодичним звірянням результатів їхньої діяльності. Якщо немає твердих обмежень за часом виконання операторами робіт, то ефективність резервування буде тим вищою, чим різноманітніші помилки роблять оператори.

Функціональна надійність ергатичної системи може бути відображена набором показників надійності виконання окремих функцій $P_i(t)$ ($i = 1, \dots, M$), де M – кількість функцій, виконуваних системою. Якщо функції між собою незалежні, то функціональна надійність ергатичної системи визначається так:

$$P(T) = \prod_{i=1}^M P_i(t)$$

Тут $P_i(t)$ – умовна ймовірність, яка визначається з формули

$$P_i(T) = P_{ri}(t) K_{T_n} P_n(\tau) P_o(\tau),$$

де τ – час виконання системою заданої функції;

K_{T_n} – коефіцієнт готовності апаратури.

Висновки. Розглянуто методологічні питання підтвердження показників надійності ергатичних систем. Показано, що для підтвердження показників надійності доцільно використовувати метод імовірнісного моделювання. Наведені співвідношення дозволяють проводити розрахунки показників структурної та функціональної надійності ергатичної систем.

Література

1. Губинский А. И. Надежность и качество функционирования эргатических систем / Губинский А. И. – Ленинград : Наука, 1982. – 270 с.
2. Пошивалов В. П. Оцінка працездатності складних ергатичних систем / В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Данієв // Вісник Академії митної служби України. Серія: “Технічні науки”. – 2009. – № 1(41). – С. 32–37.
3. Острейковский В. А. Теория надежности / Острейковский В. А. – М. : Высшая школа, 2003. – 463 с.
4. Шишмарев В. Ю. Надежность технических систем / Шишмарев В. Ю. – М. : Академия, 2010. – 304 с.
5. Пошивалов В. П. Визначення комплексних показників надійності ергатичних систем / В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Данієв, О. В. Пошивалова // Вісник Академії митної служби України. Серія: “Технічні науки”. – 2010. – № 1 (43). – С. 111–119.