

Кущ Ю.В., д.т.н.,  
Реуцький Є.А.,  
Щербак Л.М., д.т.н.

## МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ З МЕТОЮ ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ЇХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

Інститут інформаційно-діагностичних систем  
Національний авіаційний університет

*Розглянуто питання випробувань технічних систем, наведено етапи життєвого циклу технічної системи і запропоновано проведення комп'ютерного вимірювального експерименту на етапі експлуатації на основі створення необхідного метрологічного забезпечення.*

### **Вступ**

Випробування технічних систем широко використовуються для оцінки їх реальних характеристик як діючих, так і нових зразків технічних систем з метою підтвердження їх експлуатаційних характеристик, у тому числі характеристик надійності та технічного ресурсу, що є основою для об'єктивної оцінки технічного рівня всіх етапах життєвого циклу.

Термін «життєвий цикл», який природно характеризує біологічні об'єкти та системи, використовується і для технічних систем. Це один з напрямів дослідження теорії сигналів і систем. Традиційно виділяють наступні етапи життєвого циклу технічної системи [1,4,6-9]: обґрунтування необхідності створення системи, розробка завдання, моделювання та проектування, виготовлення, що передбачає дослідне та серійне виробництво зразків системи, експлуатація, утилізація. Розвиток сучасних інформаційних технологій при створенні технічних систем у певній мірі не порушує логічної послідовності етапів створення системи, доповнює і суттєво розвиває їх зміст.

В загальному життєвому циклі технічних систем випробуванням відводиться особлива роль. Правильний вибір об'ємів і тривалості проведення випробувань, а особливо пошук шляхів їх скорочення, має важливе практичне значення і є одним з напрямів підвищення економічної ефективності систем, так як у процесі проведення випробувань вирішується ни-

зка питань таких, як підтвердження методології функціонування систем, сумісність роботи їх елементів, перевірка розрахункових моделей, що використовуються при проектуванні, оцінка показників надійності та ін.

Основою проведення випробувань є їх метрологічне забезпечення, яке базується на моделях, алгоритмах обробки даних, програмному забезпечення, аналізі результатів, прийнятті рішень та формуванні бази знань досліджуваної системи. Випробування – це по суті натурний вимірювальний експеримент. При проектуванні технічної системи на етапі розробки широко використовується комп'ютерний вимірювальний експеримент, він грає визначну роль у випробуваннях на початковому етапі життєвого циклу. В роботі пропонується проводити комп'ютерний вимірювальний експеримент на етапі експлуатації, за результатами якого можна внести відповідні корективи у процес експлуатації технічної системи, провести її модернізацію, а також поповнювати базу знань системи експлуатаційними даними, що необхідно для дослідження динаміки змін характеристик технічної системи та подальшого прогнозування часового терміну її роботи.

### **Аналіз досліджень і публікацій**

Задачам, які виникають при проведенні випробувань з метою забезпечення їх вдосконалення, єдності, ефективності та ін. присвячено ряд вітчизняних та зарубіжних робіт, у тому числі в нормативних

документах [1-6,9]. У зазначених працях викладено загальні концептуальні основи випробувань, теоретичні основи їх проведення, моделі життєвого циклу технічних систем, але дані розробки не можуть врахувати дію випадкових факторів, що діють в робочих умовах експлуатації, частина яких хоч і є прогнозованою, наприклад, у вигляді допустимих границь випадкових похибок вимірювань, але існує також ряд факторів, дія яких є непередбаченою.

Тому актуальними та перспективними є задачі випробувань систем до і під час експлуатації, за результатами розв'язання яких можна буде вдосконалити методики контрольних випробувань за рахунок вдосконалення метрологічного забезпечення, яке є частиною бази знань систем, з метою підвищення надійності технічних систем, збільшення тривалості їх життєвого циклу. Одним із способів розв'язання таких задач є введення додаткового етапу моделювання перед випуском та під час експлуатації технічної системи шляхом застосування комп'ютерного вимірювального експерименту.

### **Постановка завдання**

Обґрунтувати необхідність проведення комп'ютерного вимірювального експерименту на основі створення відповідного метрологічного забезпечення проведення цього експерименту з метою збільшення тривалості життєвого циклу технічної системи на етапі експлуатації.

### **Загальні положення**

При проведенні випробувань технічних систем у ході їх експлуатації отримують додаткову інформацію, яка, в першу чергу, поповнює базу знань системи, дає можливість створити рекомендації по заміні діючих, введення в дію нових елементів системи, що знаходиться в експлуатації. Основна задача аналізу результатів даного етапу життєвого циклу полягає у досягненні мети продовження життєвого

циклу технічної системи, що забезпечується підтримкою її параметрів на рівні, що визначається необхідним метрологічним забезпеченням.

Сучасні технічні системи є складними апаратно-програмними комплексами, тому в ряді випадків вони не проходять етапи випробувань у повному обсязі, а випробуються лише окремі підсистеми, модулі. Відомо, що проведення натурного експерименту всієї системи в цілому характеризується наступними особливостями [1]:

- випробуванню піддається уся система, а не її окремі складові частини;
- випробування проводяться за умов, що відповідають умовам реальної експлуатації;
- основні характеристики системи під час випробувань визначаються шляхом вимірювань, а не на підставі аналітичних залежностей;
- велика тривалість, складність, висока вартість.

З наведеного випливає, що в ряді технічних систем таких, як атомна електростанція, гідроелектростанція та ін., не можна провести їх випробування (натурний експеримент). Тому в цьому випадку слідує необхідність проведення комп'ютерного вимірювального експерименту на етапі експлуатації, що дає можливість поповнювати базу знань.

Розглянемо проведення комп'ютерного вимірювального експерименту та його місце в побудованій умовній моделі життєвого циклу технічної системи (рис. 1). Новизною даної моделі є використання в ній бази знань системи, яка формується за результатами проведення випробувань на етапах життєвого циклу. Отримані таким способом знання використовуються під час експлуатації системи та в подальших розробках нових технічних систем даного типу.

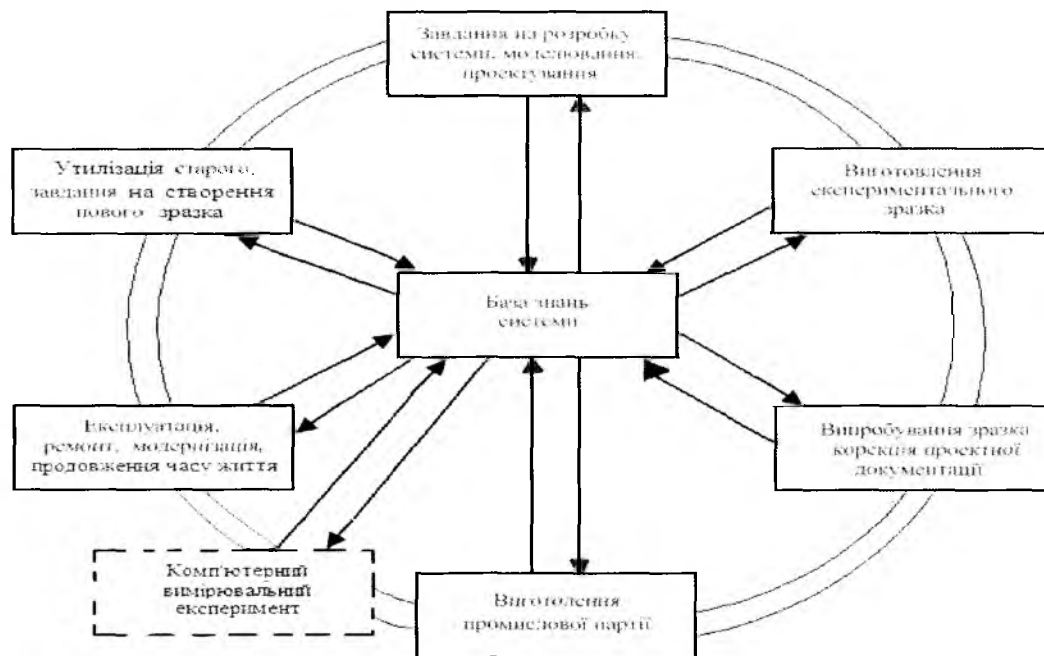


Рис. 1. Основні етапи життєвого циклу технічної системи

### **Комп'ютерний вимірвальний експеримент**

У багатьох наукових дослідженнях проведення натурних експериментів неможливо з цілого ряду причин, наведених вище, тому виникає необхідність проведення комп'ютерного вимірвального експерименту всієї системи в цілому. Це дозволить накопичувати результати, отримані при дослідженні різного типу задач, пов'язаних із системою. Головною відмінною рисою комп'ютерного вимірвального експерименту від імітаційних або модельних експериментів є отримання метрологічних характеристик у результаті його проведення, які в подальшому використовуються в якості зразкових характеристик точності технічної системи.

Проведення комп'ютерного вимірвального експерименту, наведений на рис. 2, складається з наведеної послідовності етапів, в результаті яких створюється в сукупності метрологічне забезпечення технічної системи:

1) використання математичної моделі технічної системи на етапі проектування, її вдосконалення з урахування результатів проведених випробувань на всіх етапах життєвого циклу;

2) розробка обчислювального алгоритму (вибір чисельних методів розрахунку);

3) створення програмного забезпечення, що реалізує алгоритм вимірвального експерименту;

4) проведення експерименту, отримання і обробка його результатів;

5) аналіз результатів, порівняння (якщо це можливо) з натурним експериментом.

Ефективність проведення комп'ютерного вимірвального експерименту по суті визначається ефективністю створеного метрологічного забезпечення експерименту.

Зазвичай на останньому етапі вносяться зміни в рішення, прийняті на перших етапах.

### **Статистичні критерії перевірки оцінки використання метрологічного забезпечення**

Виникає необхідність за результатами комп'ютерного вимірвального експерименту прийняти рішення, чи відповідає отриманий результат дослідження очікуваному. З математичної статистики поставлена задача відома як задача перевірки статистичних гіпотез. При цьому виникає проблема вибору найбільш оптимального критерію, за яким необхідно прийняти рішення.

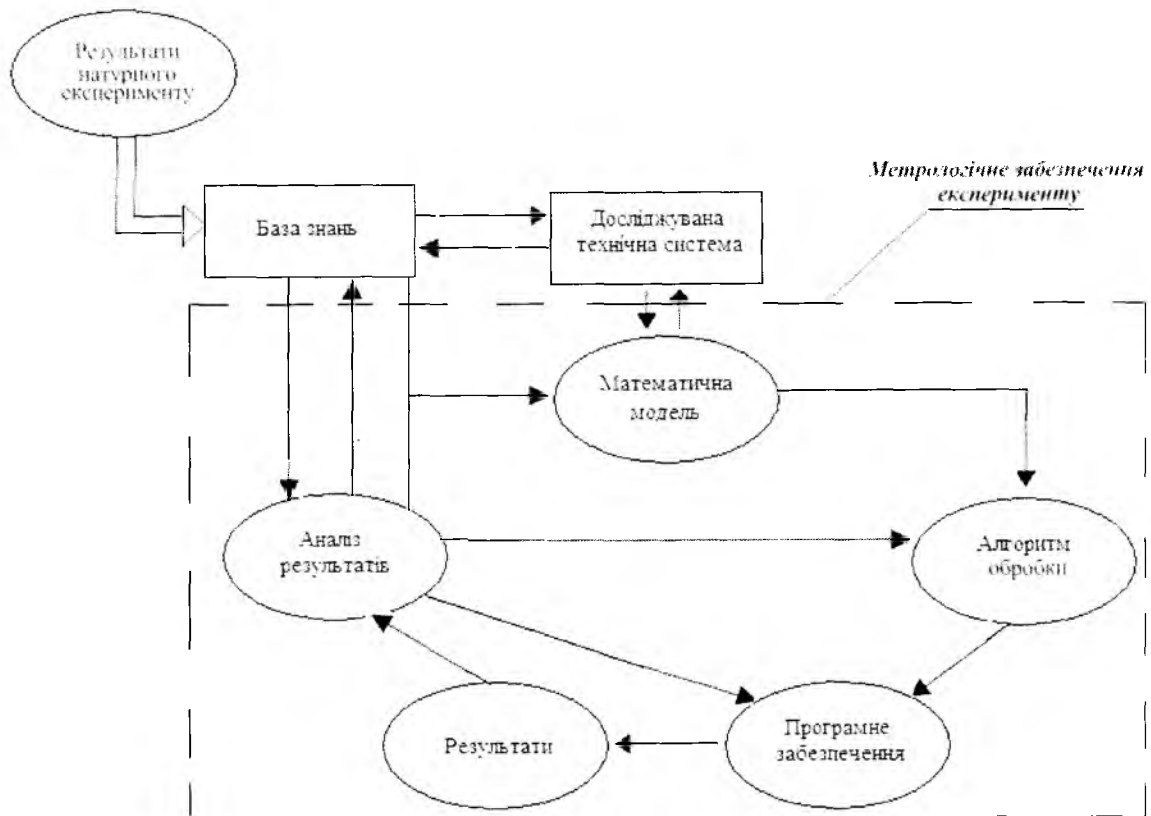


Рис. 2. Структура комп'ютерного вимірювального експерименту

Вона пов'язана з тим, що будь-який статистичний критерій будується на основі аналізу вибірки об'єму  $n$   $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ , тому прийняте рішення може бути помилковим, так як, наприклад, при проведенні іншого експерименту буде отримана нова вибірка (нова реалізація досліджуваної метрологічної характеристики), і висунута гіпотеза  $H_0$  може бути й відхилена. Тому необхідно використання такого критерію, при якому ймовірність помилкових рішень буде мінімальною [2].

Критерій Неймана-Пірсона. Даний критерій передбачає, що всі статистичні гіпотези є детермінованими, тобто у будь-якому стохастичному експерименті, за яким отримується вибірка  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ , істинною завжди є одна й та сама висунута гіпотеза, а хибними є інші.

Нехай  $H_0 : \theta \in \Theta_0, H_1 : \theta \in \Theta_1; \Theta_0, \Theta_1 \subset R,$

$$\Theta_0 \cap \Theta_1 = \emptyset,$$

де  $\theta \in \Theta_j$  – невідомий параметр з множини  $\Theta_j$ ,  $H_0$  – основна гіпотеза,  $H_1$  – альтернативна гіпотеза.

Нехай в результаті проведення вимірювального експерименту отримано реалізацію  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  вибірки  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ . На основі цього необхідно прийняти або відхилити гіпотезу про приналежність параметру  $\theta$  множині  $\Theta_0$  або множині  $\Theta_1$ . Введемо випадкові події:  $H'_0$  – прийнято гіпотезу  $H_0$ ,  $H'_1$  – прийнято гіпотезу  $H_1$ ,  $H_0$  – істинною є основна гіпотеза,  $H_1$  – істинною є альтернативна гіпотеза. Як зазначалося вище можливо зробити помилки двох видів: помилка першого роду – коли приймається альтернативна гіпотеза  $H_1$ , а істинною є основна гіпотеза  $H_0$ , позначимо її

$$\alpha(\theta) = P_\theta(H'_1 | H_0), \theta \in \Theta_0;$$

помилка другого роду – коли приймається основна гіпотеза  $H_0$ , а насправді істинною є альтернативна  $H_1$ ; ймовірність помилки другого роду позначимо  $\beta(\theta) = P_\theta(H'_0 | H_1), \theta \in \Theta_0.$

Критерієм перевірки гіпотези  $H_0$  проти альтернативної гіпотези  $H_1$  називається ймовірність відхилення основної

гіпотези  $H_0$  (прийняття альтернативної  $H_1$ ) за умови, що  $\{(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = (x_1, x_2, \dots, x_n)\}$ .

Позначимо цей критерій  $\pi(x_1, x_2, \dots, x_n) = P\{H_1 | (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = (x_1, x_2, \dots, x_n)\}$ . Отримавши реалізацію вибірки  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  можливі наступні три випадки:

- якщо  $\pi(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ , то приймається гіпотеза  $H_0$ , а  $H_1$  – відхиляється;
- якщо  $\pi(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1$ , то приймається гіпотеза  $H_1$ , а  $H_0$  – відхиляється;
- якщо  $\pi(x_1, x_2, \dots, x_n) = p \in (0, 1)$ , то рішення можна сформулювати наступним чином: гіпотеза  $H_0$  приймається з ймовірністю  $(1-p)$ , а гіпотеза  $H_1$  – з ймовірністю  $p$ .

**Критерій Вальда.** Цей критерій також називається послідовним статистичним аналізом, відповідно до якого після отримання результатів  $n$  спостережень (починаючи з  $n=1$ ), експеримент може бути завершений прийняттям відповідного рішення або продовжений далі, якщо обсягу отриманої вибірки недостатньо для прийняття відповідного рішення.

Розглянемо приклад. Нехай маємо дві прості гіпотези  $H_0: \theta = \theta_0, H_1: \theta = \theta_1$ , висунуті відносно невідомого параметра  $\theta$ . Нехай для будь-якого  $n = 1, 2, 3, \dots$  кожен елемент вибірки  $\xi_k, k = \overline{1, n}$  вибірки  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$  є неперервною випадковою величиною, що набуває значень з множини  $X_k \subseteq \mathbf{R}, k = \overline{1, n}$ . Тоді задача побудови послідовного критерію перевірки гіпотези  $H_0$  проти  $H_1$  зводиться для кожного  $n = 1, 2, 3, \dots$ , до вибору трьох непорожніх множин  $A_0^n, A_1^n, A_2^n$  так, щоб прийняти гіпотезу  $H_0$  при  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \in A_0^n$ , прийняти гіпотезу  $H_1$  при  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \in A_1^n$  і прийняти рішення про проведення  $(n+1)$ -го спостереження при  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \in A_2^n$ .

Обсяг вибірки, при якому приймається одна з гіпотез і експеримент припиняється, є дискретною випадковою величиною, позначимо її  $n(\omega), \omega \in \Omega, n(\omega) \in \mathbf{N}$ .

Нехай  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n(\omega)})$  – повторна вибірка, кожен елемент якої має скінченне математичне сподівання  $\mathbf{M}(\xi | H_j), j = \overline{0, 1}$  і нехай  $\mathbf{M}(n(\omega), H_j) < \infty, j = \overline{0, 1}$ . Тоді

$$\mathbf{M}\left(\sum_{k=1}^{n(\omega)} \xi_k | H_j\right) = \mathbf{M}(\xi | H_j) \mathbf{M}(n(\omega), H_j), j = \overline{0, 1}.$$

Оптимальний послідовний критерій перевірки простої гіпотези  $H_0$  проти простої альтернативної гіпотези  $H_1$  задається вибором областей  $A_0^n, A_1^n, A_2^n, n = 1, 2, 3, \dots$ , щоб при заданих ймовірностях помилок першого та другого роду ( $\mathbf{P}(H_1 | H_0) = \alpha$  і  $\mathbf{P}(H_0 | H_1) = \beta$ ) забезпечити мінімальні  $\mathbf{M}(n(\omega), H_j), j = \overline{0, 1}$ .

Даний критерій ґрунтується на відношенні правдоподібності  $l_n(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ , де

$$l_n(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = \prod_{k=1}^n \frac{L_1(\xi_k; \theta_1)}{L_1(\xi_k; \theta_0)},$$

і полягає в наступному:

- гіпотеза  $H_0$  приймається (експеримент припиняється), якщо  $l_n(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \leq c_0$ ;
- гіпотеза  $H_1$  приймається (експеримент припиняється), якщо  $l_n(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \geq c_1$ ;
- якщо  $c_0 < l_n(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) < c_1$ , то приймається рішення про проведення  $(n+1)$  спостереження, де  $0 < c_0 < c_1$  – константи, які вибираються так, щоб забезпечити задані ймовірності  $\alpha$  і  $\beta$  помилок.

Знаходження констант  $c_0, c_1$ , по заданих  $\alpha$  і  $\beta$ , є досить складною задачею. У практичних застосуваннях отримують значення цих констант наближено з необхідною точністю. Згідно [2],

$$c_0 \geq \frac{\beta}{1-\alpha}, c_1 \leq \frac{1-\beta}{\alpha}.$$

**Критерій Байєса.** Нехай знову маємо вибірку  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ , кожен елемент якої залежить від дійсного невідомого параметра  $\theta$ , відносно якого висувуються дві прості гіпотези  $H_0: \theta = \theta_0, H_1: \theta = \theta_1$ . Але в даному критерії, на відміну від двох

попередніх, гіпотези  $H_0$  і  $H_1$  є випадковими подіями з відомими ймовірностями їх появи:

$$p_0 = \mathbf{P}(H_0) \geq 0, \\ p_1 = \mathbf{P}(H_1) \geq 0, p_0 + p_1 = 1.$$

Так, якщо для деякої реалізації  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  вибірки  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$  істинною є гіпотеза  $H_0$ , то для іншої реалізації цієї ж вибірки істинною буде гіпотеза  $H_1$ . В даному випадку, параметр  $\theta$  є дискретною випадковою величиною, що набуває двох значень:  $\theta_0$  і  $\theta_1$  із відповідними ймовірностями  $\mathbf{P}(\theta = \theta_0) = p_0$  і  $\mathbf{P}(\theta = \theta_1) = p_1$ .

Нехай  $d_n(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$  – статистика, яка набуває значення 0, коли приймається гіпотеза  $H_0$  і набуває значення 1, коли приймається гіпотеза  $H_1$ . Назвемо згідно [2]  $d_n$  правилом перевірки гіпотези  $H_0$  проти альтернативної гіпотези  $H_1$ .

Поставимо у відповідність будь-якому правилу  $d_n$  так звану функцію цін  $L(d_n, \theta)$ , що набуває значення  $c_{ij} \geq 0$ , якщо приймається гіпотеза  $H_i$ , але істинною є гіпотеза  $H_j, i, j = \overline{0,1}$ . Матриця

$$C = \begin{pmatrix} c_{00} & c_{01} \\ c_{10} & c_{11} \end{pmatrix}$$
 називається матрицею цін,

в якій  $c_{00}$  – ціна, коли приймається гіпотеза  $H_0$ , і в дійсності вона відбувається;  $c_{01}$  – ціна, коли приймається гіпотеза  $H_0$ , а в дійсності відбувається гіпотеза  $H_1$ ;  $c_{10}$  – ціна, коли приймається гіпотеза  $H_1$ , а в дійсності має місце гіпотеза  $H_0$ ;  $c_{11}$  – ціна, коли приймається гіпотеза  $H_1$ , і в дійсності вона відбувається.

Матриця цін  $C$  задається до початку експерименту і будується на основі апіорних даних про досліджувану проблему, в нашому випадку використовується інформація з бази знань системи.

Правило перевірки гіпотези  $H_0$  проти альтернативної гіпотези  $H_1$  ґрунтується

на аналізі відношення правдоподібності  $l_n(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ , а саме:

- гіпотеза  $H_0$  приймається ( $H_1$  відхиляється), якщо  $l_n < \frac{p_0(c_{10} - c_{00})}{p_1(c_{01} - c_{11})}$ ;
- гіпотеза  $H_1$  приймається ( $H_0$  відхиляється), якщо  $l_n \geq \frac{p_0(c_{10} - c_{00})}{p_1(c_{01} - c_{11})}$ .

Таким чином, в залежності від виду поставленої задачі, рішення, яке необхідно прийняти за результатами комп'ютерного вимірювального експерименту, можливо користуватися описаними вище критеріями, які досить легко реалізуються у вигляді програм.

### **Точність та відтворюваність результатів випробувань**

Зазначені два показники – точність та відтворюваність результатів випробувань – визначаються розробленим метрологічним забезпеченням, його ефективністю. На етапі проведення випробувань отримується інформація про досліджувані характеристики системи (або береться з бази знань), на наступних – доповнюється, трансформується. Тому постає задача забезпечення точності та відтворюваності результатів випробувань.

Під точність результатів випробувань розуміють властивість випробувань, що характеризується наближенням оцінки характеристики досліджуваного об'єкта випробувань до її дійсного значення – це показник якості випробувань. Досліджуваною характеристикою об'єкта випробувань може бути як характеристика одного об'єкта-зразка з партії, так і статистична характеристика, якщо об'єктом випробувань є партія технічних систем. В останньому випадку за результат випробувань приймаються такі характеристики, як математичне сподівання, дисперсія, функція розподілу ймовірності і т.д. для всієї партії.

Відтворюваність результатів випробувань визначається як властивість результатів випробувань, що характеризується подібністю результатів повторних випробувань об'єкта. В загальному випадку поняття відтворюваності набуває змі-

сту тільки при визначенні методики та умов випробувань.

Використання комп'ютерного вимірювального експерименту, як додаткового етапу життєвого циклу технічної системи, забезпечує показники точності випробувань та відтворюваності їх результатів шляхом проведення імітаційного моделювання.

### **Висновки**

В роботі проаналізовано випробування, пов'язані з технічними системами на протязі їх життєвого циклу. Розглянуто застосування комп'ютерного вимірювального експерименту, як додаткового етапу життєвого циклу технічної системи, і обґрунтовано необхідність його проведення на основі використання його метрологічного забезпечення, обґрунтовано необхідність його застосування наряду з натурним експериментом (якщо можливе проведення останнього). В якості необхідних критеріїв прийняття рішень за результатами експерименту наведені алгоритми статистичних критеріїв Неймана-Пірсона, Вальда і Байеса, які рекомендовано для перевірки оцінки відповідності використаного метрологічного забезпечення.

Застосування комп'ютерного вимірювального експерименту є основою для вдосконалення метрологічного забезпечення випробувань технічних систем.

### **Список літератури**

1. Азарсков В.М., Сущенко О.А. Експериментальні випробування та дослідження систем: Підручник. – К.: НАУ, 2003. – 268 с.
2. Бабак В.П., Марченко Б.Г., Фриз М.Є. Теорія ймовірностей, випадкові процеси та математична статистика. – К.: Техніка, 2004. – 288 с.
3. Володарський Є.Т., Кошева Л.О. Статистична обробка даних: Навч. посібник. – К.: НАУ, 2008. – 308 с.
4. ГОСТ 16504:81. Система государственных испытаний. Испытания и контроль качества продукции. Введ. с 01.01.82. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 32 с.

5. ДСТУ 3021:95. Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення. Чинний з 01.01.96 р. – К.: Держстандарт України, 1996. – 71 с.

6. Кошева Л.А. Обеспечение единства испытаний: Монография. – К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. – 178 с.

7. Реуцький Є.А. Методологія створення метрологічного забезпечення вимірювальних пристроїв // Матеріали наук.-техн. конференції студентів та молодих вчених «Наукоємні технології». – К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2010. – 18 с.

8. Самарский А.А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент // Вестник АН СССР. – 1979. – №5. – С. 38-49.

9. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: учебн. Пособие / Александровская Л.Н., Круглов В.И., Кузнецов А.Г. и др. – М.: Логос, 2003. – 736 с.