

## ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИПРОБУВАНЬ СКЛАДНИХ ЗРАЗКІВ ОЗБРОЄННЯ

В.Ю. Камінський<sup>1</sup>, В.В. Хижняк<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Технічний комітет з акредитації, Київ,

<sup>2</sup>Воснно-наукове управління ГШ ЗС України, Київ)

*Синтезовано імітаційну модель метрологічного забезпечення випробувань складних зразків озброєння, що відповідає принципам системного аналізу, динамічного управління та адекватна реальним умовам проведення випробувань.*

***імітаційна модель, метрологічне забезпечення, складні зразки озброєння***

**Постановка проблеми і аналіз літератури.** Вирішення проблеми метрологічного забезпечення (МЗ) озброєння відноситься до задач дослідження операцій у зворотній постановці [1 – 4].

Виходячи з цього, задачу оптимізації системи метрологічного забезпечення випробувань можна сформулювати таким чином: необхідно створити систему метрологічного забезпечення випробувань складного зразка озброєння чи військової техніки (ОВТ) так, щоб витрати на її створення і функціонування були мінімальні при виконанні цим зразком свого призначення відповідно до встановленого нормативними документами критерію його ефективності з урахуванням обмежень щодо кваліфікації персоналу, структури об'єкта випробувань, динамічного характеру процесів випробувань та флуктуації їх характеристик і параметрів, показників існуючої системи логістичного забезпечення озброєння чи техніки в процесі подальшої експлуатації зразка ОВТ тощо. Такий підхід дозволяє врахувати та дотриматися основних принципів забезпечення єдності і точності вимірювань:

– принципу системного аналізу вимірювальних та діагностичних задач, які встановлюються шляхом декомпозиції процесу випробувань на елементарні вимірювальні, контрольні та випробувальні операції для конкретних етапів випробувань зразка ОВТ;

– принципу динамічного управління МЗ випробувань, втілення якого дозволяє своєчасно реагувати в процесі всього випробування та на його окремих етапах на зміни в стратегії діагностики і контролю та прогнозувати й оптимально планувати внесення відповідних змін;

– принципу відповідності рішень метрологічного забезпечення (вимірювальні задачі, засоби і методи вимірювань, процедури контролю і діагностики тощо) загальній меті та задачам випробувань складного зразка ОВТ.

**Метою статті** є синтез моделі метрологічного забезпечення випробувань ОВТ, що відповідає зазначеним вище принципам, та адекватне реальним умовам проведення випробувань.

**Викладення основного матеріалу.** Представимо процес метрологічного забезпечення у вигляді кібернетичної динамічної детермінованої моделі зі зворотнім зв'язком та з параметром – аргументом часу  $t_k$  (рис. 1).

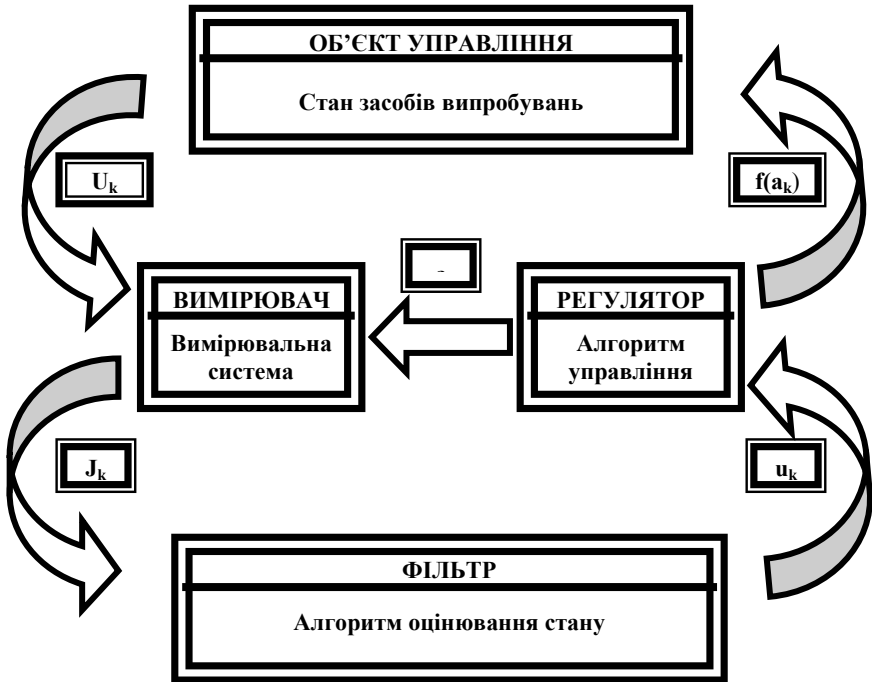


Рис. 1. Формалізована схема процесу метрологічного забезпечення випробувань

Визначимо як об'єкт управління процес зміни стану засобів випробувань

$$u_k = u(t_k). \quad (1)$$

У процесі спостереження за станом засобів випробувань проводяться певні вимірювання за допомогою вимірювальної системи. Відображення стану засобів випробувань буде фіксуватись у параметрах вектора  $f_k$ , що фіксується на виході системи:

$$f_k = F(u_k). \quad (2)$$

У детерміновані моменти часу  $t_k$  на основі аналізу показників вектора  $f_k$  може бути проведена ідентифікація стану засобів випробувань за параметрами і характеристиками: справність, працездатність, можливість функціонування, у тому числі і за метрологічними характеристиками.

ками. Звичайно, що така ідентифікація повинна проводитись, виходячи з вимог нормативних документів, що регламентують методику і технологію задач випробувань зразка озброєння.

Визначимо  $\alpha_k$  як управляючий вплив, що надходить на вхід вимірюючої системи та забезпечує формування вектора параметрів, достатніх для аналізу стану засобів випробувань у кожний момент часу. Алгоритм управління, що входить до складу регулятора, повинен надати необхідні показники процесу змін стану засобів випробувань у функції відповідного управляючого впливу  $\alpha_k$ .

Мета управління (K) полягає в тому, щоб перевести засіб випробувань з первинного стану  $u(t_k = 0)$  у кінцевий  $u(t_k = T)$ , що обов'язково належить підобласті Q1 з області дозволених станів Q:  $u(t_k = T) \in Q1(u)$ . Тому для досягнення мети управління на вхід вимірювальної системи (вимірювача) необхідно надати управляючий вплив  $\alpha_k$ . Таким чином, задачу управління можна сформулювати у такому вигляді: підібрати (сформулювати)  $\alpha_k \in \Omega(\alpha) \sim K$ , де  $\sim$  – еквіваленція.

Задача управління у такому вигляді має нескінчену кількість розв'язків. Це обумовлюється тим, що будь – яке  $\alpha_k \in \Omega(\alpha)$  є рівноцінним в області Q1. Однак, до управляючої системи висуваються вимоги, що не входять у формулювання задачі управління, але якісно окреслюють процес досягнення мети управління. Фактори найрізноманітнішого характеру, що впливають на цей процес, дають змогу побудувати лише стохастичні моделі змін стану засобів випробувань на протязі етапу експлуатації, але не дозволяють апріорі визначити їх конкретні значення чи показники.

Підхід до вирішення цієї проблеми, що регламентований майже у всіх нормативних документах з випробувань складних зразків озброєння та військової техніки, полягає у використанні „найгіршого варіанта”: характеристики (параметри) завжди нестабільні та виходять за допуск. Моделі, побудовані на використанні цього підходу, дають гарантований результат та необхідну достовірність прийняття рішень. Але при цьому значно зростає необхідна кількість вимірювань для оцінки стану засобу випробувань, що призводить до великих обсягів метрологічних робіт, подорожчання процесів технічного забезпечення тощо. Доля часу на виконання метрологічних операцій зростає до 25 – 30 % від усього часу робіт, що проводяться в процесі експлуатації. Тому саме система метрологічного забезпечення є неефективною та потребує вдосконалення для зменшення витрат на її створення, утримання та використання за функціональним призначенням при умовах забезпечення необхідної повноти та точності контролю характеристик випробувань.

Сформулюємо критерій, схему та модель для формалізації оптимального управління метрологічним забезпеченням випробувань в умовах можливості

детального аналізу динаміки характеристик засобів випробувань та вимірювань. Припустимо, що показник якості вимірювань являє собою ступінь (міру) ефективності досягнення мети управління за допомогою конкретного управляючого впливу. Враховуючи, що задача оптимізації системи метрологічного забезпечення відноситься до складу задач дослідження операцій у зворотній постановці, будемо визначати критерій функцією витрат на проведення атестації (повірки), основним параметром якої є „обсяг вимірювань”, під яким розуміємо номенклатуру контрольованих параметрів, кількість вимірювань, періодичність атестації засобів вимірювань та точність приладів і еталонного устаткування. Тоді, беручи до уваги, що для конкретного обсягу вимірювань загальною характеристикою якості є похибка оцінювання стану засобів випробувань  $\Delta_k$ , критерій можна представити у вигляді:

$$J = \sum_{t_k=t_0}^T G[\Delta_k; C_k; \alpha_k], \quad (3)$$

де  $G$  – функція, що визначає конкретний фізичний зміст показника якості.

Застосування цього критерію дозволяє сформулювати задачу оптимального управління процесом метрологічного забезпечення випробувань: знайти таке  $\alpha_k \in \Omega(\alpha)$ , при якому  $J = \max J$ , а об’єкт випробувань переводиться з первинного стану  $u_k(t_k=0)$  у кінцевий  $u_k(t_k=T)$  в області дозволених значень.

У цьому разі алгоритм управління, управляючий вплив та траєкторія руху ідентифікаційної точки об’єкта випробувань будуть квазіоптимальними (в області дозволених значень), а система метрологічного забезпечення відповідно до критерію (3) буде ефективною.

Визначення критерію  $J$  є необхідною, але не недостатньою умовою розв’язання задачі оптимального управління. Зазначена вище можлива безкінечна кількість дозволених управлінь, що переводять об’єкт з первинного в кінцеве значення (стан), у дійсних умовах випробувань обмежена низкою специфічних властивостей об’єкта випробувань. Такі властивості повинні враховуватись у моделі метрологічного забезпечення випробувань шляхом застосування принципів керованості та спостережності об’єкта, які у своїй сукупності визначають достатні умови розв’язання задачі оптимального управління.

Враховуючи, що періодичний контроль засобів випробувань проводиться у дискретні моменти часу  $t_k$  з вибраним кроком  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ , представимо фазову траєкторію зміну стану засобів випробувань у вигляді лінійної моделі, як векторне різнісне рівняння першого порядку:

$$u_k = u_{k-1} + B_k v_k, \quad (4)$$

де  $u_k, u_{k-1}$  –  $n$ -вектори стану в моменти часу  $t_k$  і  $t_{k-1}$ ;  $B_k$  – перехідна матриця станів розмірностей  $n \times n$ ;  $v_k$  – випадковий  $n$ -вектор збурюючих впливів на засіб випробувань.

Прийемо, якщо  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ , то послідовність векторів  $\{u_k\}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$  є гауссово-марковською послідовністю, а  $v_k$  має нормальний закон розподі-

лу ймовірностей. Тоді для випадкових моментів  $t_1 < t_2 < \dots < t_k$  вірне:

$$f(u_{t_k} / u_{t_{k-1}}, \dots, u_{t_1}) = f(u_{t_k} / u_{t_{k-1}}), \quad (5)$$

де  $f(\dots)$  – умовна щільність ймовірності вектора  $u_k$  при умові, що вектори стану в попередні моменти часу мали значення  $u_{k-1}, \dots, u_1$ .

Також допустимо: якщо випадкова послідовність є гауссово-марковською, то її показники повністю визначаються математичним сподіванням та коваріаційною матрицею; періодичний контроль засобів випробувань проводиться у дискретні моменти часу  $t_k$ , що відповідають моментам проведення операцій метрологічного забезпечення; марковська випадкова послідовність у зворотному часі також є марковською, тобто

$$f(u_1 / u_2, \dots, u_k) = f(u_1 / u_2). \quad (6)$$

Тоді модель проведення вимірювань запишемо у вигляді:

$$f_k = \alpha_k (C_k + F_k u_k) + \varphi_k, \quad (7)$$

де  $f_k$  –  $m$ -вектор параметрів (результат оцінювання параметрів стану);  $\alpha_k$  – матриця розмірності  $m \times m$ , елементи якої  $\alpha_k^{ff}$  ( $f = \overline{1, m}$ ) мають значення „0” чи „1”:

$$\alpha_k^{ff} = \begin{cases} 0, & \text{якщо параметр не вимірюється,} \\ 1, & \text{якщо параметр вимірюється;} \end{cases} \quad (8)$$

$C_k$  – детермінований  $m$ -вектор, що відповідає випробувальному режиму, який відтворюється;  $F_k$  – матриця зв'язку вектора параметрів з вектором стану об'єкта випробувань для проектування розмірності  $m \times p$ ;  $u_k$  –  $p$ -вектор результатів вимірювань, на основі якого визначаються параметри стану об'єкта випробувань;  $\varphi_k$  –  $m$ -вектор результату впливу збурень на вимірну систему, що має нормальний розподіл.

Враховуючи прийняті вище позначення, запишемо обмеження, що накладаються на (4) та (7):

$$\begin{aligned} E(u_k \varphi_{k+1}^T) &= 0, \quad i = 0, 1, 2, \dots; \\ E(u_k v_{k+i}^T) &= 0; \quad E(\varphi_k \varphi_{k+i}^T) = 0; \quad E(v_k v_{k+i}^T) = 0, \quad i = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (9)$$

Умови (9) дають підстави стверджувати, що випадкові послідовності  $\varphi_k$  і  $v_k$  не залежать від поточного значення фазових координат та не корельовані між собою, а послідовності  $\varphi_k$  і  $v_k$  з математичними сподіваннями  $E(\varphi_k)$ ,  $E(v_k)$  та коваріаційними матрицями  $R\varphi_k$ ,  $Rv_k$  визначені для всіх  $k$ .

Моделі стану та вимірювань є основою для отримання оцінок стану засобів випробувань за результатами метрологічної атестації. При цьому задача оцінювання розв'язується, як задача фільтрації, коли „вимірювач” рухається за об'єктом досліджень та дозволяє отримувати скореговані значення оцінок стану. У склад обчислювальної схеми вводиться алгоритм отримання рекурентних оцінок вектора стану, що реалізує оптимальний

фільтр Калмана, який останнім часом є частиною програмного забезпечення вимірювально-інформаційних систем сучасних технічних складних об'єктів. При цьому до уваги беруться властивості фільтра Калмана:

- фільтр заснований на зручній обчислювальній процедурі і являє собою форму адекватного представлення динаміки випадкових процесів, що природно включає в себе похибки описів цих процесів за допомогою математичних моделей. Оскільки моделі (4) та (7) мають лінійну природу, то оцінки, що будуть отримані за допомогою фільтра Калмана, з урахуванням обмежень (9), будуть найбільш ефективними в рамках прийнятого процесу стану об'єкта випробувань. Саме в цьому полягає оптимальність фільтра Калмана;

- оцінка стану об'єкта випробувань виконується з урахуванням попереднього поводження параметрів стану та їх „історії”, що дозволяє використовувати апіорну інформацію про цей об'єкт, наприклад, результати попередніх атестацій.

Варіанти розв'язання задачі оцінювання за допомогою фільтрації результатів вимірювань викладені в монографії [3]. Нижче наведена процедура оцінювання з використанням наведеної моделі. Її особливістю є те, що фільтрації підлягають результати прогнозу стану об'єкта випробувань на невеликому інтервалі часу. Результати фільтрації є вихідними для наступного кроку прогнозу, при якому рекурентна процедура прогнозу повторюється. Рекурентний алгоритм фільтра Калмана можна представити у вигляді:

$$\hat{u}_k = \hat{u}_{k-1} + W[f_k - \alpha_k(c_k + F_k \hat{u}_{k-1})]. \quad (10)$$

$$W_k = K_{k/k-1}(\alpha_k F_k)^T [(\alpha_k F_k) K_{k/k-1}(\alpha_k F_k)^T + R\phi_k]^{-1}. \quad (11)$$

$$K_{k/k-1} = K_{k-1} + B_{k-1} R v_{k-1} B_{k-1}^T. \quad (12)$$

$$K_k = K_{k/k-1} - W_k(\alpha_k F_k) K_{k/k-1}. \quad (13)$$

Для розв'язання задачі оптимізації вимірювань при атестації засобів випробувань визначальними є не самі оцінки його стану, а їх динаміка в часі відносно один до одного для різних управляючих впливів.

Оскільки ймовірні властивості гаусово-марковської випадкової послідовності повністю оцінюються математичним сподіванням та коваріаційною матрицею, траєкторія поведінки цих оцінок є предметом досліджень. При цьому вид цієї траєкторії є прямо взаємопов'язаним з траєкторією поведінки коефіцієнтів  $W_k$ , що видно з (11), (13).

Доцільно підкреслити, що обчислювальна процедура може бути виконана у тому випадку, якщо стан засобів випробувань повністю є спостережним за результатами вимірювань. Тобто, при вибраному порядку  $n$  вектора стану кількість вимірювальних каналів повинна забезпечувати вимірювальною інформацією роботу алгоритму рекурентного оцінювання.

При цьому ймовірнісна залежність між параметрами стану дозволяє припустити можливість зменшення задіяних вимірювальних каналів відносно порядку вектора стану. Належно до математичних моделей ця вимога означає можливість зниження рівня матриці проектування  $F_k$  на  $k$ -му кроці оцінювання відносно до вектора стану засобів випробувань. Така процедура, що виконується з допомогою матриці  $\alpha_k$ , забезпечує можливість розв'язання задачі оптимального управління вимірюваннями.

Стала робота вибраного алгоритму оцінювання стану засобів випробувань – фільтра Калмана характеризується незбудженою траєкторією похибок фільтрації в загальному випадку та сліду коваріаційної матриці похибок фільтрації в частому випадку. Тобто, при сталій роботі фільтра, незалежно від початкової похибки оцінювання, траєкторії похибок фільтрації вийдуть на єдину для конкретного фільтра розрахункову траєкторію.

Властивістю фільтра Калмана є те, що алгоритм обчислень (розрахунків) завжди буде асимптотично сталим, якщо стан динамічного об'єкта є повністю наочним за результатами вимірювань. Для оцінювання цього процесу системи складемо матрицю спостереження  $Q_H$ :

$$Q_H = [\alpha_k F_k]^T. \quad (14)$$

Якщо ранг матриці (14) дорівнює порядку вектора стану, то система (4), (7) є повністю спостережна. У цьому випадку діагональні елементи матриці похибок оцінювання  $K_k$  створюють з часом послідовність, що зменшується. У випадку  $k \rightarrow \infty$  елементи матриці  $K_k$  набувають постійного значення  $K_\infty$ , що і характеризує сталу роботу алгоритму фільтра:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} K_k = K_\infty = \text{const}. \quad (15)$$

Відповідно і матриця коефіцієнтів  $W_k$ , що визначається згідно з формулою (11), також набуває сталого значення:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} W_k = W_\infty = \text{const}. \quad (16)$$

Кількісні показники  $K_\infty$  і  $W_\infty$  визначаються параметрами  $B_k, \Phi_k, \nu_k$  моделей (4), (7) та відповідно значеннями  $B_k R \nu_k B_k^T, R \Phi_k$ .

При відсутності ймовірних збуджуючих параметрів стану  $\nu_k (R \nu_k = 0)$  та похибок вимірювань  $\Phi_k (R \Phi_k = 0)$  сталій режим роботи фільтра характеризується значеннями  $K_\infty = 0$  і  $W_\infty = 0$ . Тому похибки оцінювання фільтра можуть бути зведеними до нуля. У дійсності такі припущення можуть бути прийняті в екстремальних випадках для розв'язання достатньо вузького кола задач метрологічного забезпечення випробувань.

Як відмічалось вище, допущення щодо не збудженості траєкторії параметрів стану засобів випробувань та відсутності похибок вимірювань є

достатньо умовними. Відсутність апріорної інформації щодо динаміки параметрів стану можна компенсувати, застосувавши метод введення „фіктивного” шуму [5, 6]. Застосування цього методу направлене на збільшення ваги результатів вимірювань, що отримані на  $\tau$ -му кроці, та полягає у введенні в рівняння (10) скалярного коефіцієнта ваги  $S \geq 1$ :

$$K_{k/k-1} = SK_{k-1} + B_{k-1}Rv_{k-1}B_{k-1}^T. \quad (17)$$

У [5] значення коефіцієнта  $S$  пропонується вибирати в діапазоні  $1 - 1,5$ . Послідовність матриць  $K_k$  створює простий марковський ланцюг, для якої будуть виконуватись умови (5). Властивості гауссово-марковської послідовності, як висновки умов (5), можуть бути використані для рішення задачі оптимізації системи метрологічного забезпечення.

Відомо [3, 4], що створити повністю адекватну та абсолютно точну модель будь-якого реального процесу практично не вдається. Безумовним є вплив на отримувані значення критерію та параметрів і характеристик моделі похибок засобів обчислення та методик обробки результатів вимірювань, а відповідно, є реальним їх вплив і на сталу роботу алгоритму. Тому необхідно, при розгляді теоретичної сталості алгоритму фільтра Калмана, розглядати і проблему його розбіжності.

Розбіжність фільтра виявляється у вигляді монотонного необмеженого накопичення похибок оцінювання, як функції часу. При цьому теоретична сталість фільтра є необхідною, але недостатньою умовою його збіжності. Для оцінки збіжності необхідно провести розрахунки при значеннях  $S$ , що вибираються з ряду  $S \in (1; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5)$ . Це відповідає марковській моделі, у якої зростання „невизначеності” оцінки параметрів складає відповідно від 0 до 50 % на рік. Збільшення „шумів” процесу прискорює розбіжність фільтрації.

Першою мотивацією розбіжності є невідповідність властивостей математичної моделі вимірювань, що використовується у фільтрі, статистичним та динамічним властивостям реального об'єкта внаслідок відсутності необхідної інформації при умові функціонування засобів випробувань, а також спрощення моделі фільтра для зменшення „шуму” вимірювань [5]. Похибки фільтрації, що з'являються при цьому, є методичними, а механізм їх виявлення тісно пов'язаний з особливостями методу оцінювання Калмана, що приводить до старіння вимірювальної інформації. Таке явище має у своїй основі процес зменшення з кожним новим кроком порядку матриці  $K_k$ , що приводить, у свою чергу, до зменшення ваги поточних результатів вимірювань. Наслідком цього є перетворення матриці вагових коефіцієнтів  $W_k$ , коли окремі її елементи можуть стати „нульовими” або навіть „мінусовими”. У цьому випадку фільтр швидко розбігається.



Другою причиною розбіжності фільтра Калмана є похибки обробки результатів вимірювань („обнуління”), особливо з використанням ПЕ-ОМ. Ці похибки можливо розглядати як похибки фільтра. У той же час механізм їх появи та виявлення тісно пов’язаний з похибками першої групи. Похибки розрахунків значень елементів послідовності матриць  $K_k$  стають адекватними та співмірними з дискретністю розрядної сітки ПЕ-ОМ. З кожним кроком обчислення ці похибки накопичуються, що приводить до таких же самих наслідків, які характерні першій групі.

Для регуляризації роботи фільтра пропонується використовувати вже описаний вище метод „введення фіктивного шуму”. Його застосування дозволяє вирішити дві задачі – зниження впливу розбіжності фільтра Калмана та обсягу, періодичності і точності вимірювань на похибку оцінки стану засобів випробувань. Оцінки стану, які при цьому будуть отримані, слід використовувати як абсолютні у випадку прийняття послідовності (17), що достатньо адекватна реальним умовам, та як відносні при умові їх нормування до вибраних фіксованих значень.

**Висновки.** Запропонована модель процесу метрологічного забезпечення випробувань складних зразків військової техніки відповідає вимогам адекватності, точності, збіжності, дозволяє враховувати й оцінювати вплив управляємості та спостереження системи на якість метрологічних робіт відповідно до обґрунтованого критерію ефективності, застосовувати її для оптимізації характеристик і параметрів системи атестації засобів випробувань.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Исаев С.А., Клишин Ю.П. Цифро-натурный метод оценки характеристик радиоэлектронных систем // Радиотехника. – 2001. – № 8. – С. 61 – 64.*
2. *Хижняк В.В. Постановка задачі оптимізації планування роботи засобів полігонного вимірювального комплексу з використанням інформаційно-вартісного підходу // Збірник наукових праць ОНДІ ЗС. – Х.: ОНДІ. – 2006. – № 2 (2). – С. 73 – 82.*
3. *Месарович М.Д., Такахара Т.Х. Общая теория систем. – М.: Мир, 1975. – 456 с.*
4. *Бусленко А.В. Исследование операций. – М.: Воениздат, 1972. – 247 с.*
5. *Соболев В.И. Информационно-статистическая теория измерений. – М.: Машиностроение, 1983. – 224 с.*
6. *Моисеев Л.Ф. Метрологическое обеспечение испытаний на комплексные воздействия // Законодательная и прикладная метрология. – 1993. – № 2. – С. 16 – 18.*

Надійшла 10.10.2005

**Рецензент:** доктор технічних наук, професор В.П. Деденок,  
Об'єднаний науково-дослідний інститут Збройних Сил, Харків.