

Загальні питання

УДК 389.001

В.В. Хижняк

Інститут державного управління у сфері цивільного захисту, Київ

МОДЕЛЬ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОЛІГОННИХ ВИПРОБУВАНЬ СКЛАДНИХ РУХОМИХ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Запропоновано модель процесу метрологічного забезпечення полігонних випробувань складних рухомих технічних об'єктів, яка достатньо адекватна реальним умовам і може бути застосована для оптимізації характеристик і параметрів системи атестації засобів випробувань.

Ключові слова: метрологічне забезпечення, технічний об'єкт, полігонні випробування.

Вступ

Вирішення проблеми метрологічного забезпечення полігонних випробувань зразків техніки відноситься до задач дослідження операцій в зворотній постановці [1,2]. Тому задачу оптимізації системи метрологічного забезпечення полігонних випробувань можна сформулювати таким чином: необхідно створити систему метрологічного забезпечення полігонних випробувань зразків складних рухомих технічних об'єктів таким чином, щоб витрати на його 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 в процесі подальшої експлуатації зразка техніки тощо. Такий підхід дає змогу 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 зразків складних рухомих технічних об'єктів;

принципу динамічного управління метрологічним забезпеченням випробувань, втілення якого дає змогу своєчасно реагувати в процесі всього випробування та на його окремих етапах на зміни в стратегії діагностики і контролю та прогнозувати і 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 зразків складних рухомих технічних об'єктів.

Результати досліджень

Розглянемо можливість синтезу моделі метрологічного забезпечення полігонних випробувань зразків складних рухомих технічних об'єктів, що відповідає цим принципам та адекватна реальним умовам проведення випробувань.

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

Визначимо у якості об'єкта управління процес зміну стану засобів випробувань

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

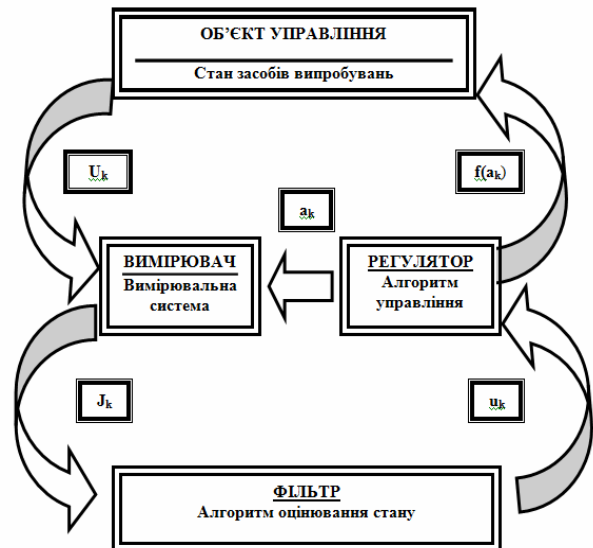


Рис. 1. Формалізована схема процесу метрологічного забезпечення випробувань

В 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:

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

В 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. Звичайно, що така ідентифікація має проводитися виходячи з вимог нормативних документів, що регламентують методику і технологію задач випробувань зразка техніки.

Визначимо α_k , як управляючий вплив, що поступає на вхід вимірюючої системи та забезпечує формування вектора параметрів, достатніх для аналізу стану засобів випробувань у кожний момент часу t_k .

Алгоритм управління, що входить до складу регулятора, забезпечує необхідні показники процесу змін стану засобів випробувань відповідно до управляючого впливу α_k .

Мета управління (K) полягає в тому, щоб перевести засіб випробувань з первинного стану $u(t_k=0)$ в кінцевий $u(t_k=T)$, що обов'язково належить підобласті $Q1$ з області дозволених станів $Q: u(t_k=T) \in Q1(u)$.

Таким чином, задачу управління можна сформулювати в такому вигляді: підібрати (сформувати) $\alpha_k \in \Omega(\alpha) \sim K$, (\sim – еквіваленція).

Задача управління у такому вигляді має нескінченне число рішень. Це обумовлюється тим, що будь-яке $\alpha_k \in \Omega(\alpha)$ є рівноцінним в області $Q1$. Однак, до управляючої системи висувуються вимоги, які якісно окреслюють процес досягнення мети управління. Множинність факторів самого різного характеру, що впливають на цей процес, дають змогу побудувати лише стохастичні моделі змін стану засобів випробувань на протязі етапу експлуатації, але не в змозі апіорі визначити їх конкретні значення чи показники.

Підхід до вирішення цієї проблеми, що застосовується наразі і регламентований майже у всіх нормативних документах з випробувань складних зразків технічних об'єктів, полягає в використанні так званого „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 значних обсягів метрологічних робіт, зростання вартості процесів технічного забезпечення тощо. Доля часу на виконання метрологічних операцій

зростає до 25 – 30 % від всього часу робіт, що проводяться в процесі експлуатації.

Тому така система метрологічного забезпечення випробувань зразків техніки є малоефективною 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 якості, 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 представляє собою ступінь (міру) ефективності досягнення мети управління за допомогою конкретно-го управляючого впливу.

Враховуючи, що задача оптимізації системи метрологічного забезпечення відноситься до задач дослідження операцій в зворотній постановці, будемо визначати критерій якості функцією витрат на проведення атестації (повірки), основним параметром якої є „обсяг вимірювань”, під яким розуміємо номенклатуру параметрів, що контролюються, кількість вимірювань, періодичність атестації засобів вимірювань та точність приладів і еталонного обладнання. Тоді, беручи до уваги, що для конкретного обсягу вимірювань загальною характеристикою якості є похибка оцінювання стану засобів випробувань Δ_k , критерій якості можна представити у вигляді:

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

де $G[\dots]$ – функція, що визначає конкретний фізичний зміст показника якості.

Застосування цього критерію дає змогу 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 $u_k(t_k=0)$ в кінцевий $u_k(t_k=T)$ в області дозволених значень.

В даному випадку 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 недостатньою умовою рішення задачі оптимального управління. Зазначена вище безкінечна кількість управлінь, що переводять об'єкт з первинного в кінцеве значення (стан), в дійсних умовах випробувань обмежена низкою специфічних властивостей об'єкта випробувань. Такі властивості мають враховува-

тися в моделі метрологічного забезпечення випробувань шляхом застосування принципів керованості та спостережності об'єкта, які у своїй сукупності визначають достатні умови рішення 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 різностне 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 розмірністю $n \times n$; v_k – випадковий n -вектор збурюючих впливів на засіб випробувань.

Припустимо, якщо $\Delta t = t_{k+1} - t_k$, то послідовність векторів $\{u_k\}$, $k=0,1,2,\dots$ є гауссово-марківською послідовністю, а v_k має нормальний закон розподілення ймовірностей. Тоді для випадкових моментів $t_1 < t_2 < \dots < t_k$ має місце співвідношення:

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

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-марківською, то її показники повністю визначаються математичним очікуванням та коваріаційною матрицею;

періодичний контроль засобів випробувань проводиться у дискретні моменти часу t_k , що відповідають моментам проведення операцій метрологічного забезпечення;

марківська випадкова послідовність у зворотньому часі також є марківською, 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); α_k – матриця розмірності $m \times m$, елементи якої α_k^{ff} ($f = \overline{1, m}$) мають „булевські” 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 $m \times n$;

u_k – n -вектор результатів вимірювань, на основі якого визначаються параметри стану об'єкта випробувань;

φ_k – m -вектор результату впливу збурень на вимірювальну систему, що має нормальне розподілення.

Враховуючи прийнятті вище означення запишемо обмеження, що накладаються на (4) та (7):

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

Умови (9) дають підстави стверджувати, що випадкові послідовності φ_k і v_k не залежать від поточного значення фазових координат та не корельовані між собою, а послідовності φ_k і v_k з математичними очікуваннями $E(\varphi_k), E(v_k)$ 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 вирішується, як задача фільтрації, коли „вимірювач” рухається за об'єктом досліджень та отримує скореговані значення оцінок стану. До складу 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 [3]. При цьому до уваги приймаються властивості фільтра Калмана:

- фільтр заснований на зручній обчислювальній процедурі і містить у собі 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 дає змогу використовувати апріорну інформацію про цей об'єкт, наприклад результати попередніх атестацій.

Варіанти рішень задачі оцінювання за допомогою фільтрації результатів вимірювань викладені в [4]. 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:

$$u_k = u_{k-1} + W[f_k - \alpha_k(c_k + F_k u_{k-1})]. \quad (10)$$

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

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

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

Для рішення 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 гауссово-марковської випадкової послідовності повністю оцінюються математичним очікуванням 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) та (13).

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

При цьому, ймовірнісна залежність між параметрами стану дає змогу припустити можливість зменшення задіяних вимірювальних каналів відносно порядку вектора стану.

Стосовно 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 за допомогою матриці α_k , забезпечує можливість рішення задачі оптимального управління вимірюваннями.

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

Властивістю фільтра Калмана є те, що алгоритм обчислень (розрахунків) завжди буде асимптотично сталим, якщо стан динамічного об'єкту є повністю спостережним 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. В 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_∞ , 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 формули (11), також набуває сталого значення:

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

Кількісні показники K_∞ і W_∞ визначаються параметрами B_k, ϕ_k, v_k моделей (4), (7) та відповідно значеннями $B_k R v_k B_k^T, R\phi_k$.

При відсутності ймовірних збуджуючих параметрів стану $v_k (Rv_k = 0)$ та похибок вимірювань $\phi_k (R\phi_k = 0)$ сталий режим роботи фільтра характеризується значеннями $K_\infty = 0$ і $W_\infty = 0$. Тому похибки оцінювання фільтра можуть бути зведеними до нуля.

Але такі припущення можуть бути прийняті у екстремальних випадках для рішення достатньо вузького кола задач метрологічного забезпечення випробувань.

Як зазначалося вище, допущення щодо незбудженості 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 [4,5]. Застосування цього методу направлене на збільшення ваги результатів вимірювань, що отримуються на τ -у кроці, та полягає у введенні в рівняння (10) скалярного коефіцієнта ваги $S \geq 1$:

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

В роботі [4] 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 сліdstва умов (5), можуть бути використані для рішення задачі оптимізації системи метрологічного забезпечення.

Відомо [1, 2], що створити повністю адекватну та абсолютно точну модель будь-якого реального процесу практично не вдається. Безумовним є вплив на значення критерію та параметрів, що отримуються і характеристик моделі похибок засобів обчислення та методик обробки результатів вимірювань, а, відповідно, є реальним їх вплив і на сталу роботу алгоритму. Тому, при розгляді теоретичної сталості

алгоритму фільтра Калмана, необхідно розглядати і проблему його розбіжності.

Розбіжність фільтра проявляється 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 якій ріст „невизначеності” оцінки параметрів складає відповідно від 0 до 50 % в рік. Збільшення „шумів” процесу прискорює розбіжність фільтрації.

Першою мотивацією розбіжності є невідповідність властивостей математичної моделі вимірювань, що використовується в фільтрі, статистичним та динамічним властивостям реального об'єкту внаслідок відсутності необхідної інформації про умови функціонування засобів випробувань, а також спрощення моделі фільтра для зменшення „шуму” вимірювань [4].

Похибки фільтрації, що з'являються при цьому, є методичними, а механізм їх прояви тісно пов'язаний з особливостями методу оцінювання Калмана, що приводить до старіння вимірювальної інформації. Таке явище має в своїй основі процес зменшення з кожним новим кроком порядку матриці K_k , що приводить, в 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”. В цьому випадку фільтр швидко розбігається.

Іншою причиною розбіжності фільтра Калмана є похибки обробки результатів вимірювань („обнуління”). Ці похибки можна розглядати як похибки фільтра. В той же час, механізм їх появи та прояви тісно пов'язаний з похибками першої групи. Похибки розрахунків значень елементів послідовності матриць K_k стають адекватними та співрозмірними з дискретністю розрядної сітки обчислювальної техніки. 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 дає змогу 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.

Висновок

Таким чином, запропонована модель процесу метрологічного забезпечення полігонних випробувань складних технічних об'єктів відповідає вимогам адекватності, точності, збіжності, дає змогу враховувати і оцінювати управляючий вплив та вплив спостереження системи на якість метрологічних робіт відповідно до обґрунтованого критерію ефективності, застосовувати її для оптимізації характеристик і параметрів системи атестації засобів випробувань.

Список літератури

1. Месарович М.Д. *Общая теория систем* / М.Д. Месарович, Т.Х. Такаха. – М.: Мир, 1975. – 456 с.
2. Бусленко А.В. *Исследование операций* / А.В. Бусленко. – М.: Воениздат, 1972. – 247 с.
3. Хижняк В.В. *Структура, завдання та напрямки розвитку полігонних вимірювально-обчислювальних комплексів* / В.В. Хижняк // *Наука і оборона*. – 1999. – № 1. – С. 59 – 63.
4. Соболев В.И. *Информационно-статистическая теория измерений* / В.И. Соболев. – М.: Машиностроение, 1983. – 224 с.
5. Моисеев Л.Ф. *Метрологическое обеспечение испытаний на комплексные воздействия* / Л.Ф. Моисеев // *Законодательная и прикладная метрология*. – 1993. – №2. – С. 16 – 18.

Надійшла до редколегії 30.10.2013

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.В. Певцов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МОДЕЛЬ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛИГОННЫХ ИСПЫТАНИЙ СЛОЖНЫХ ПОДВИЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В.В. Хижняк

Предложена модель процесса метрологического обеспечения полигонных испытаний сложных подвижных технических объектов, которая достаточно адекватна реальным условиям и может быть применена для оптимизации характеристик и параметров системы аттестации средств испытаний.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, технический объект, полигонные испытания.

PROCESS MODEL METROLOGICAL FIELD TESTING COMPLEX MOBILE TECHNICAL FACILITIES

V.V. Khizhnyak

A model of the process of metrological provision of ground tests of complex moving of technical objects, which is quite adequate to the actual conditions and can be used to optimize the characteristics and parameters of the system certification of testing.

Keywords: metrological support, technical object, field testing.