

СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОВТ

УДК 681.3

С.В. Герасимов

Харківський університет Повітряних Сил, Харків

АНАЛІЗ ОПТИМАЛЬНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО СИГНАЛУ ЗАЛЕЖНО ВІД ТРИВАЛОСТІ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БОРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ РАКЕТНОГО ОЗБРОЄННЯ

У статті наведена узагальнена схема контролю технічного стану бортового обладнання ракетного озброєння. Запропонована варіаційна задача синтезу оптимального вимірювального сигналу та обґрунтовані обмеження, які необхідно враховувати при синтезі оптимальних сигналів. Проведено порівняльний аналіз оптимальних вимірювальних сигналів, отриманих за допомогою запропонованого методу та відомих частотних і часових методів, залежно від тривалості контролю.

Ключові слова: вимірювальний сигнал, контроль технічного стану, ракетне озброєння

Постановка проблеми

Складові ракетного озброєння (РО) – наземне, бортове навігаційно-пілотажне та цільове обладнання – є складними електромеханічними та радіотехнічними системами і тому попри на всі заходи попереднього контролю при їх використанні можуть виникати відмови як на старті, так і у польоті [1–3]. Аналіз результатів застосування РО в останніх збройних конфліктах показав, що деякі зразки не виконали поставлене завдання, були втрачені або призвели до аварій через несправність бортового обладнання (БО) [1, 2]. При цьому відзначимо, що в умовах фінансових обмежень і відсутності закупки нових зразків озброєння актуальним є обґрунтування термінів продовження ресурсу РО (особливо БО) і перевід озброєння на експлуатацію за технічним станом. У цих умовах важливе значення набуває своєчасність визначення відмов при оцінці технічного стану РО при підготовці до бойового застосування. Таку оцінку можна проводити за допомогою вимірювальних сигналів, параметри яких характеризують технічний стан РО, особливо БО.

Аналіз літератури

Проведений аналіз робіт [4–7] з вирішення проблем синтезу вимірювальних сигналів показав, що в основному вони направлені на розрахунок параметрів синусоїдальних або прямокутних сигналів без врахування як особливостей функціонування систем контролю, так і перехідних процесів у цих системах. Тому існуючі вимірювальні сигнали синусоїдальної та прямокутної форми не дозволяють визначати технічний стан систем контролю з необхідною вірогідністю та не придатні для діагностування їх технічного стану. Отже, дослідження характеристик оптимальних входних вимірювальних сигналів (далі – вимірювальних

сигналів) для дослідження параметрів радіотехнічних і електронних систем БО РО є актуальною науковою проблемою.

Метою статті є аналіз застосування оптимального вимірювального сигналу залежно від тривалості контролю технічного стану бортового обладнання ракетного озброєння.

Основна частина

Постановка задачі синтезу оптимального вимірювального сигналу для контролю технічного стану бортового обладнання ракетного озброєння

Основою визначення технічного стану БО РО є дослідження параметрів [8] за узагальненою схемою, наведеною на рисунку.

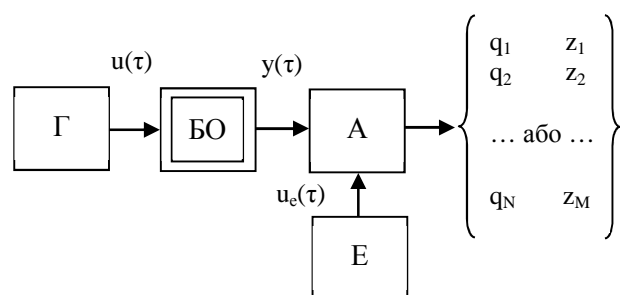


Рис. Структурна схема контролю

За цією схемою на вхід БО РО діють відомим вимірювальним (тестовим, стимулюючим, випробувальним) сигналом $u(\tau)$, який формується генератором тестових сигналів Γ і має певні характеристики. Під впливом вимірювального сигналу $u(\tau)$ на виході БО РО утворюється вихідний сигнал (сигнал-відгук) $y(\tau)$, або реакція певної форми залежно від форми вимірювального сигналу та параметрів БО. Еталонний

вимірювальний сигнал $u_e(\tau)$ з еталонного блока Е та вихідний сигнал $y(\tau)$ БО РО подаються в аналізатор А, за допомогою якого визначаються параметри системи q_j , $j = \overline{1, N}$, де N – кількість параметрів контролю системи, або апостеріорні параметри z_i , $i = \overline{1, M}$, M – кількість значень i -го параметра, що отримана після проведення контролю системи (апостеріорна кількість параметрів контролю), значення яких дозволяють визначити технічний стан БО РО.

Проведений аналіз кількісних оцінок показав [8], що для більшості практичних випадків для оптимізації вимірювального сигналу можна використовувати оцінку за чутливістю S

$$S = \int_0^T \int_0^T k(\tau, \tau') u(\tau) u(\tau') d\tau d\tau', \quad (1)$$

де T – тривалість проведення контролю технічного стану БО РО; $k(\tau, \tau')$ – функція, яка визначає зв'язок тривалості τ вимірювального сигналу реального засобу вимірювальної техніки з теоретично обґрунтованою тривалістю вимірювального сигналу τ' (еталонна тривалість).

У цьому співвідношенні функція $k(\tau, \tau')$ зв'язана з похідними від перехідної характеристики системи $h(t, \tau, q_1, \dots, q_N)$ за параметрами контролю q_j залежністю

$$k(\tau, \tau') = \int_0^T \sum_{j=1}^N g_j(t, \tau) g_j(t, \tau') dt, \quad (2)$$

де функція $g_j(t, \tau)$ дорівнює

$$g_j(t, \tau) = \frac{\partial h(t, \tau, q_1, \dots, q_N)}{\partial q_j}. \quad (3)$$

Як видно з (1)–(3), чутливість S є функціоналом від вимірювального сигналу $u(\tau)$ і параметрів контролю БО РО q_j . Таким чином, визначення оптимального вимірювального сигналу при контролі технічного стану БО РО зводиться до вирішення варіаційної задачі знаходження найбільшого (найменшого) значення деякого функціоналу $\Phi(\{u\})$, наприклад, чутливості S , залежно від вимірювального сигналу $u(\tau)$. При цьому вимірювальний сигнал $u(\tau)$ не може бути абсолютно довільним, бо він визначається реальними засобами вимірювальної техніки – генераторами (калібраторами) сигналів, а це, в свою чергу, накладає на них певні обмеження.

По-перше, вимірювальні сигнали формуються реальними генераторами сигналів, тому енергія та середня потужність сигналу не можуть бути нескінченно великими. Це накладає на вимірювальний сигнал інтегральне обмеження

$$\int_0^T u^2(\tau) d\tau \leq E_c. \quad (4)$$

З іншого боку, амплітуда U_m сигналу $u(\tau)$ також не може бути нескінченно великою. Це накладає на вимірювальний сигнал локальне обмеження

$$|u(\tau)| \leq U_m. \quad (5)$$

Зазначимо, що тривалість контролю вважається незначною, якщо вона суттєво менше часу перехідних процесів в об'єкті контролю, тобто в БО РО. Відповідно, значною тривалістю будемо вважати ту, яка значно більше часу перехідних процесів в БО РО.

Дослідження форми оптимального сигналу для значних і незначних тривалостей контролю являє інтерес, оскільки при цьому визначається зв'язок між запропонованими варіаційним методом синтезу вимірювального сигналу, з одного боку, і часовими та частотними методами, які використовуються при контролі технічного стану БО РО, з іншого.

Відмітимо наступне твердження, яке є справедливим при будь-якій тривалості контролю T : якщо функція $g_j(t, \tau)$ не змінює знак інтегрування на інтервалі $[0, T]$, то оптимальний вимірювальний сигнал знакопостійний. Це твердження може бути доведено як для інтегрального, так і для локального обмежень, безпосереднім використанням співвідношення (1) для величин $S\{u\}$.

Доказ легко проводити від протилежного. Нехай оптимальний сигнал $u(\tau)$ змінює знак. Якщо ввести знакопостійний сигнал $u_1 = |u(\tau)|$, можна довести, що $S\{u_1\} > S\{u\}$ і, отже, сигнал $u(\tau)$ не може бути оптимальним.

З наведеного твердження виходить, що у випадку, коли функції $g_j(t, \tau)$ на інтервалі $[0, T]$ не змінюють знак, оптимальний вимірювальний сигнал $u_{\text{опт}}(\tau)$ при будь-якій тривалості контролю T за умови локального обмеження (5) являє собою стрибок

$$u_{\text{опт}}^{\text{II}}(\tau) = U_m 1(\tau), \quad (6)$$

де $1(\tau)$ – одинична функція [9].

Оптимальний вимірювальний сигнал при незначному часі контролю

Перейдемо тепер до випадку незначних тривалостей контролю T . Очевидно, для довільної функції $g_j(t, \tau)$ завжди знайдеться таке значення оптимальної тривалості T^0 , що при $T < T^0$ функція $g_j(t, \tau)$ на інтервалі $[0, T^0]$ не змінює знак. Тому при довільних функціях $g_j(t, \tau)$ при досить незначних тривалостях контролю T оптимальний сигнал є знакопостійним.

Таким чином, за умовою локального обмеження (5) оптимальний сигнал при незначному часі контролю завжди має форму стрибка (6).

З'ясуємо тепер більш детально форму оптимального сигналу за умовою інтегрального обмеження (4) при незначній тривалості контролю.

При незначній тривалості контролю T функції $g_j(t, \tau)$ можна представити у вигляді

$$g_j(t, \tau) \approx g_j^{(k)}(t, 0) \frac{\tau^k}{k!} \cdot 1(\tau).$$

Степінь, з якого починається розклад функцій $g_j(t, \tau)$ в степеневий ряд за τ , може бути різним. Позначимо через n найменшу з степенів, з якого починається розклад функцій $g_j(t, \tau)$, і нехай відповідна функція буде $g_1(t, \tau)$. Очевидно, у співвідношенні для $k(\tau, \tau')$ (2) з усієї суми необхідно при незначних тривалостях контролю T утримати тільки член з найменшим степенем τ , тобто член з $g_1(t, \tau)$. Відповідне перетворення Лапласа [9] буде дорівнювати

$$g_1(t, \tau) = g_1^{(n)}(t, 0) \frac{\tau^n}{n!} \equiv \frac{g_1^{(n)}(t, 0)}{p^{n+1}}.$$

Це рівняння після перетворень прийме наступний вигляд

$$(-1)^{n+1} \frac{[g_1^{(n)}(0)]^2}{p^{2n+2}} = \lambda, \quad (7)$$

де λ – певний параметр вимірювального сигналу.

Нехай p_k ($k = 1, \dots, 2n+2$) будуть корені рівняння (7). Тоді оптимальний вимірювальний сигнал запишемо

$$u_{\text{опт}}(\tau) = \sum_{k=1}^{2n+2} B_k e^{p_k \tau}, \quad (8)$$

де $B_k(\lambda)$ – постійні коефіцієнти вимірювального сигналу.

Підставивши (8) в (7), отримаємо після розрахунку систему рівнянь для коефіцієнтів B_k :

$$\sum_{k=1}^{2n+2} p_k^m e^{p_k T} B_k = 0; \quad 0 \leq m \leq n; \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{2n+2} p_k^m B_k = 0; \quad n+1 \leq m \leq 2n+1. \quad (10)$$

Рівняння (9), (10) надають можливість наглядно представити форму оптимального сигналу.

Дійсно, з рівнянь (9) випливає, що на кінці інтервалу контролю $\tau = T$ звертається в нуль функція $u(\tau)$ і її перші n похідних. З рівнянь (10) випливає, що при $\tau = 0$ звертаються в нуль наступні $n+1$ похідних функції $u(\tau)$.

Так, наприклад, якщо $g_1(t, \tau)$ при $\tau = 0$ змінюється стрибком ($n=0$), то при $\tau = T$ звертається в нуль функція $u(\tau)$ ($u(T) = 0$), а при $\tau = 0$ звертається в нуль перша похідна ($\dot{u}(0) = 0$). При $n = 1$, тобто $g(0) = 0$, $\dot{g}(0) \neq 0$, $u(T) = 0$, $\dot{u}(T) = 0$, $\ddot{u}(0) = 0$, $\ddot{u}(0) = 0$.

Взагалі зі збільшенням n функція $u_{\text{опт}}(\tau)$ прагне до осі абсцис поблизу точки $\tau = T$.

Як висновок зазначимо, що вказана вище форма вимірювального сигналу буде оптимальною при будь-яких тривалостях контролю T (а не тільки незначних) для контролю безінерціального підсилювача та інтегруючих ланцюгів будь-якого порядку, характеристика яких має вигляд $g(\tau) = A\tau^n$ ($n = 0, 1 \dots$).

Оптимальний вимірювальний сигнал при значному часі контролю

Розглянемо форму оптимального вимірювального сигналу при значному часі контролю за умови інтегрального обмеження. З цією метою необхідно дослідити асимптотичний вид розв'язань рівняння (2) при $T \rightarrow \infty$. Зробимо в цьому рівнянні заміну змінних $x = \tau - T/2$, $x' = \tau' - T/2$:

$$\int_{-T/2}^{T/2} k(x + T/2, x' + T/2) u(x') dx' = \lambda u(\tau). \quad (11)$$

Дослідження співвідношення (2) для $k(\tau, \tau')$ показує, що при значних тривалостях контролю T функція $k(\tau, \tau')$ стає різницевою

$$k(\tau, \tau') = k(|\tau, \tau'|) = \int_0^{\infty} g_j(x) g_j(x + |\tau - \tau'|) dx. \quad (12)$$

Після переходу до граничного стану в рівнянні (11) отримаємо з урахуванням (12)

$$\int_{-\infty}^{\infty} k(|x' - x|) u(x') dx' = \lambda u(x). \quad (13)$$

Отримане інтегральне рівняння можна розв'язати, зробивши перехід до Фур'є-перетворень:

$$u(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x) e^{-j\omega x} dx, \quad (14)$$

$$k(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} k(|x|) e^{-j\omega x} dx. \quad (15)$$

При цьому отримаємо рівняння для $u(\omega)$

$$[k(\omega) - \lambda_{\omega}] u(\omega) = 0.$$

Розв'язання цього рівняння має вигляд:

$$u(\omega') = A \delta(\omega' - \omega),$$

$$[k(\omega) - \lambda_{\omega}] u(\omega) = 0. \quad (16)$$

Застосовуючи зворотне перетворення Фур'є, знайдемо з (14)

$$u(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u(\omega') e^{j\omega' x} d\omega' = A e^{j\omega x}.$$

Так як $k(|x|)$ – парна дійсна функція аргументу x , то, як видно з (15), $k(\omega)$ також дійсна функція аргументу ω , тобто $k(\omega) = k(-\omega)$. Рівняння (16) показує, що кожному власному значенню λ_{ω} відповідають дві власні функції $e^{j\omega x}$ та $e^{-j\omega x}$. Тому всі розв'язання рівняння (13) можна записати в дійсній формі

$$u_{\omega}(x) = A \sin(\omega x + \psi).$$

Повертаючись до змінної τ , маємо

$$u_{\omega}(\tau) = A \sin(\omega \tau + \psi_1). \quad (17)$$

З усіх можливих розв'язань (17) необхідно вибрати те, для якого величина $\lambda_{\omega} = k(\omega)$, а значить, і величина S – найбільша. Позначимо через ω_0 значення частоти, при якому величина $k(\omega)$ максимальна. Тоді оптимальний сигнал за умови інтегрального обмеження запишемо так

$$u_{\text{опт}}^i(\tau) = A \sin(\omega_0 \tau + \psi). \quad (18)$$

Частота ω_0 в (18) визначається з умови максимуму $k(\omega)$. Величина $k(\omega)$ зв'язана з функцією $g_j(\omega)$.

Дійсно, підставивши (12) в (15) і виконавши розрахунки, отримаємо

$$k(\omega) = \sum_j |g_j(j\omega)|^2. \quad (19)$$

Таким чином, при значній тривалості контролю оптимальний сигнал за умови інтегрального обмеження являє собою синусоїду, фаза якої довільна, а частота визначається з умови максимуму функції $k(\omega)$ (19). Що стосується амплітуди, то вона повністю визначається умовою нормування, тобто фіксованим значенням енергії або середньої потужності сигналу.

Для з'ясування виду оптимального сигналу при значному часі контролю за умови локального обмеження (5) звернемось до рівняння [8]

$$u(\tau) = U_m \text{sign} \int_0^T k(\tau, \tau') u(\tau') d\tau'. \quad (20)$$

Зробимо в (20) заміну $x = \tau - T/2$, $x' = \tau' - T/2$, скористаємось тим, що при значних тривалостях контролю T функція $k(\tau, \tau')$ звертається до різнищевої, перейдемо до рівняння, яке визначає оптимальний сигнал при значному часі контролю,

$$u(x) = U_m \text{sign} \int_{-\infty}^{\infty} k(|x' - x|) u(x') dx'. \quad (21)$$

Виходячи з виду функції $k(|x' - x|)$ рівняння (21) нескладно показати, що розв'язання цього рівняння є періодично перемикаюча функція амплітуди U_m – „прямокутна синусоїда”

$$u(x) = U_m \text{sign} \sin(\omega x + \psi). \quad (22)$$

Для визначення частоти перемикач ω або періоду $2\Delta\tau$ простіше підставити (22) у вираз для S (1). При цьому величина S стане функцією однієї змінної ω (або $\Delta\tau$), так що, розрахувавши екстремальне значення $S(\Delta\tau)$, знайдемо тим самим оптимальне значення $\Delta\tau_0$ і $\omega = \pi/\Delta\tau_0$. Після цього оптимальний сигнал може бути записаний так

$$u_{\text{опт}}^l(\tau) \equiv U_m \text{sign} \sin\left(\frac{\pi\tau}{\Delta\tau_0} + \psi\right). \quad (23)$$

Функцію $S(\Delta\tau)$ знайдемо безпосередньою підстановкою (22) в (1). В результаті перетворень отримаємо

$$S(\Delta\tau) = \frac{4U_m^2 T}{\Delta\tau} \int_0^{\Delta\tau} \sum_{j=1}^N \left\{ \sum_k R \left[\frac{g_j(p_k)}{p_k} \frac{e^{-p_k \Delta\tau}}{1 + e^{-p_k \Delta\tau}} e^{p_k \tau} \right] \right\}^2 d\tau. \quad (30)$$

У формулі (24) $\sum R[\dots]$ означає суму різниць за всіма полюсами функції $\frac{g_j(p)}{p}$.

Розглянемо в якості ілюстрації задачу визначення оптимального сигналу при контролі постійної часу T_0 аперіодичного ланцюга, коли тривалість контролю T є значною, а на оптимальний сигнал накладене локальне обмеження (5). Передатна функція ланцюга дорівнює $h(p) = \frac{k}{T_0 p + 1}$, так що функція

$$g_{T_0}(p) = \frac{\partial h}{\partial T_0} = -\frac{kp}{(T_0 p + 1)^2}.$$

Функція $g_{T_0}(p)$ має простий полюс в точці $p = 0$ і полюс другої кратності в точці $p = -\frac{1}{T_0}$. Розрахунки за формулою (24) надають наступний результат

$$S(\Delta\tau) = \frac{k^2 U_m^2 T}{T_0^2} \cdot \frac{1}{(1 + e^{-\tau_0})} \cdot \frac{1 - e^{-2\tau_0} - 2\tau_0 e^{-\tau_0}}{\tau_0},$$

де $\tau_0 \equiv \Delta\tau/T_0$.

Дорівнюємо похідну $\dot{S}(\Delta\tau)$ нулю, отримаємо для величин τ_0

$$\text{sh}\tau_0 = \tau_0 + \tau_0^2 \text{th} \frac{\tau_0}{2}.$$

Числове розв'язання цього рівняння дає $\tau_0 \approx 3,27$.

Оптимальний вимірювальний сигнал відповідає функції

$$u_{\text{опт}}^l(\tau) \equiv U_m \text{sign} \sin\left(0,96 \frac{\tau}{T_0} + \psi\right). \quad (25)$$

Порівняємо отриманий результат із знайденою раніше формою оптимального сигналу при контролі аперіодичного ланцюга для значної тривалості контролю та за умови інтегрального обмеження. З точністю до обвідної, що повільно змінюється, частоти $\Delta\omega = \pi/T$, яка при $T \rightarrow \infty$ прямує до постійної амплітуди, маємо

$$u_{\text{опт}}^i(\tau) = A \sin\left(\frac{\tau}{T_0} + \psi\right). \quad (26)$$

Як видно з порівнянь співвідношень (25) і (26), з точністю в 4 % періоди функцій $u_{\text{опт}}^i(\tau)$ і $u_{\text{опт}}^l(\tau)$ збігаються.

Висновки

Таким чином, результати аналізу застосування оптимального вимірювального сигналу, який отриманий за допомогою розв'язання запропонованої варіаційної задачі синтезу, для контролю технічного стану бортового обладнання ракетного озброєння та відомих сигналів показують, що розроблена методика синтезу є більш універсальною, порівняно з відомими часовими та частотними методами. Залежно від тривалості контролю та перехідних процесів у бортовому обладнанні ракетного озброєння розрахований оптимальний вимірювальний сигнал збігається з сигналами, отриманими відомими методами. Збіг отриманих результатів з відомими свідчить про їх достовірність.

Список литературы

1. Павлушенко М. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза / М. Павлушенко, Г. Евстафьев, И. Макаренко. – М.: Изд-во “Права человека”, 2005. – 611 с.
2. Дрожжин А. Воздушные войны в Ираке и Югославии / А. Дрожжин, Е. Алтухов. – М.: Техника молодежи, 2008. – 80 с.

3. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнем артиллерии / Под общ. ред. А.А. Бобрикова. – СПб.: “Галлея Принт”, 2006. – 424 с.

4. Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов Сухопутных войск / Под ред. В.Л. Солунина. – М.: Изд-во МГТУ, 2001. – 328 с.

5. Техническая эксплуатация летательных аппаратов: Учеб. для ВУЗов / Н.Н. Смирнов, Н.И. Владимиров, Ж.С. Черненко и др.; под ред. Н.Н. Смирнова. – М.: Транспорт, 1990. – 423 с.

6. Дмитриев А.К. Основы теории построения и контроля сложных систем / А.К. Дмитриев, П.А. Мальцев. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.

7. Данилов А.А. Метрологическое обеспечение измерительных систем / А.А. Данилов. – Пенза: Проффессионал, 2008. – 63 с.

8. Герасимов С.В. Математична постановка проблеми синтезу вимірювальних сигналів для визначення технічного стану зразків озброєння при їх експлуатації за технічним станом / Системи озброєння та військова техніка. – 2013. – Вип. 4 (36). – С. 267.

9. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

Рецензент: д.т.н., с.н.с. Яковлев М.Ю., Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів.

Анализ оптимального измерительного сигнала в зависимости от длительности контроля технического состояния бортового оборудования ракетного вооружения

С.В. Герасимов

В статье приведена обобщенная схема контроля технического состояния бортового оборудования ракетного вооружения. Предложена вариационная задача синтеза оптимального измерительного сигнала и обоснованы ограничения, которые необходимо учитывать при синтезе оптимальных сигналов. Проведен сравнительный анализ оптимальных измерительных сигналов, полученных с помощью предложенного метода и известных частотных и часовых методов в зависимости от длительности контроля.

Ключевые слова: измерительный сигнал, контроль технического состояния, ракетное вооружение

Analysis of optimum measuring signal depending on duration of control of the technical state of side equipment of rocket armament

S. Herasimov

In the article generalized chart of control of the technical state of side equipment of rocket armament is given. The variation task of synthesis of optimum measuring signal is offered and limitations which must be taken into account at the synthesis of optimum signals are grounded. The comparative analysis of optimum measuring signals, got by the offered method and known frequency and sentinel methods depending on duration of control is conducted.

Key words: measuring signal, control of the technical state, rocket armament