УДК 681.5

В.М. Чинков, С.В. Герасимов

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗРАЗКІВ ОЗБРОЄННЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМУ ОБМЕЖЕННІ

Обґрунтовано, що при синтезі оптимальних вимірювальних сигналів для контролю параметрів зразків озброєння з метою визначення їх технічного стану необхідно враховувати обмеження. Запропонована методика синтезу оптимального вимірювального сигналу для контролю технічного стану зразка озброєння при локальному обмежені. Показано, що інтегральне обмеження при визначених умовах може зводитися до локального. Поставлена та вирішена задача синтезу оптимального вимірювального сигналу при врахуванні як локального, так і інтегрального обмежень.

Ключові слова: *вимірювальний сигнал, синтез, контроль технічного стану, озброєння та військова техніка.*

Вступ

Постановка проблеми та аналіз літератури. Метою технічної експлуатації зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) за фактичним станом є підвищення надійності та зниження експлуатаційних витрат, при цьому призначають необхідні роботи з технічного обслуговування ОВТ залежно від фактичного технічного стану конкретного його блоку (елементу) і передбачуваної зміни цього стану в процесі експлуатації [1, 2].

Основою експлуатації за технічним станом є діагностування та прогнозування реального (фактичного) стану зразка. За допомогою засобів діагностування проводять безперервний або періодичний контроль параметрів стану ОВТ. Прогнозування виконують при безперервному контролі для визначення інтервалу часу, за який збережеться працездатний стан, а при періодичному контролі – для визначення моменту часу наступного контролю.

Результати контролю параметрів ОВТ за допомогою військових засобів вимірювальної техніки (ВЗВТ) представляють інформаційну основу для прийняття рішень щодо управління технічним станом озброєння та є основою для ухвалення рішень про необхідність технічного обслуговування, часу його проведення й об'ємів, а також про час проведення чергового контролю технічного стану [3, 4]. Тому розробка засобів контролю та діагностування фактичного стану зразків ОВТ є актуальною науковою задачею.

Аналіз літератури. Проведений аналіз робот [1–5], які направлені на обґрунтування переведення зразків ОВТ на експлуатацію за технічним станом і досліджують питання визначення технічного стану складних систем, показав, що вони не вирішують проблему розробки та обґрунтування методів та засобів діагностування зразків з метою визначення їх фактичного технічного стану.

Метою даної статті є розробка методики синтезу вимірювального сигналу при локальному обмежені та обґрунтування алгоритму визначення оптимальних параметрів сигналу при інтегральному та локальному обмеженнях.

Основна частина

Результати аналізу кількісних оцінок показали, що для більшості практичних випадків для оптимізації вхідного вимірювального сигналу можна використовувати оцінку по чутливості S:

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

де $k(\tau, \tau')$– функція, яка визначає зв'язок тривалості τ вимірювального сигналу реального ВЗВТ з теоретично обґрунтованою тривалістю вимірювального сигналу τ' (еталонна тривалість); $u(\tau)$, $u(\tau')$ – вхідний вимірювальний сигнал, що синтезується, і еталонний сигнал відповідно; T – тривалість контролю параметрів зразка ОВТ.

Вхідний вимірювальний сигнал u (τ) не може бути абсолютно довільним. Вхідні сигнали для системи, що контролюється, задаються реальними ВЗВТ – генераторами (калібраторами) сигналів, а це, в свою чергу, накладає на них певні обмеження, які необхідно враховувати при синтезі. Так, вхідні сигнали формуються реальними генераторами сигналів. Тому енергія сигналу E_c є пропорційною величині $\int_0^T u^2(\tau) d\tau$, і його середня потужність пропорційна величині $\frac{1}{T}\int_0^T u^2(\tau) d\tau$.

Енергія та середня потужність сигналу не можуть бути нескінченно великими. Це накладає на вхідний сигнал таке інтегральне обмеження:

$$\int_0^T u^2(\tau)d\tau \le E_c .$$

Амплітуда U_m сигналу $u(\tau)$ і його миттєва потужність, яка пропорційна величині $u^2(\tau)$, не можуть також бути нескінченно великими. Це накладає на вимірювальний сигнал наступне локальне обмеження:

$$|u(\tau)| \le U_m .$$

Зазначені інтегральні та локальні обмеження необхідно враховувати при синтезі оптимальних вимірювальних сигналів.

Якщо $x_i(t)$ сигнал на i-м блоці в момент часу t, то позначив передатну характеристику від входу до даного блоку через $h_i(t,\tau)$, можна локальне обмеження на сигнал $x_i(t)$ записати в вигляді:

$$|x_i(t)| = \left|\int_0^t h_i(t,\tau)u(\tau)d\tau\right| \le U_{i\,m} , \tag{1}$$

де $U_{i\,m}$ – максимальна амплітуда на i-м блоці.

Умова локального обмеження визначає в функціональному просторі допустиму область сигналів. Ця область відповідно (1) обмежена „гіперплощинами” $u(\tau) = \pm U_m$; $\int_0^t h_i(t,\tau)u(\tau)d\tau = \pm U_{i\,m}$.

Задача полягає в знаходженні такого оптимального вимірювального сигналу $u_{опт}(\tau)$ з допустимої безлічі сигналів, при якому досягається максимальне значення чутливості: $u_{опт}(\tau)$: $\sup S(\{u(\tau)\})$.

Максимальне значення функціоналу S досягається в „кутових” точках допустимої області, тобто на безлічах площин, які мають нульові розмірності. Іншими словами, оптимальний сигнал повинен бути таким, щоб в кожен момент часу спрацьовувало одне з обмежень. Доведемо це твердження.

Доказ простіше провести для випадку дискретного часу з наступним переходом до межі.

Нехай $\{u_i\} = \{u(t_1), u(t_2), ..., u(t_n)\}$ – дискретна вибірка вимірювального сигналу $u(\tau)$, де n – кількість точок дискретизації. Дискретний аналог $\tilde{S}$ функціоналу S має вид

$$\tilde{S} = \sum_{i,j=1}^{n} k_{ij}u_iu_j . \tag{2}$$

Обмеження в цьому випадку можна записати як

$$|u_i| \le U_m ,\ i = \overline{1,n} ; \tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^{n} h_{ikj}u_j \le U_{i\,m} ,\ k, j, i = \overline{1,n} . \tag{4}$$

При дискретизації величина $\tilde{S}$ згідно (2) є функцією n змінних $u_1, ..., u_n$, на які накладені відповідні обмеження (3) і (4).

Покажемо, що усередині допустимої області функція $\tilde{S}$ не має максимуму. Дійсно, в точці екстремуму

$$\frac{\partial \tilde{S}}{\partial u_i} = 2\sum_{j=1}^{n} k_{ij}u_j = 0 .$$

Оскільки S – позитивно визначена квадратична форма, то матриця k_{ij} не має нульових власних чисел. Тому дискримінант отриманої системи рівнянь $\det\|k_{ij}\| \ne 0$ і система має одиничне рішення $u_i = 0$. В точці $\{u_i\} = 0$ величина S = 0. З іншого боку, в сусідніх точках в силу позитивної визначеності S > 0. Тобто, в точці $\{u_i\} = 0$ функція $\tilde{S}$ має не максимум, а мінімум.

Покажемо тепер, що функція $\tilde{S}$ не має максимумів на граничних безлічах площин (3) і (4) кінцевої розмірності. Доказ проведемо від противного. Нехай максимум досягається на одній з внутрішніх точок граничної гіперплощини, наприклад, на гіперплощині $\sum_{j=1}^{n} h_{11j}u_j \le U_{1m}$. Це значить (в відповідності з методом Лагранжа [6]), що функція

$$\Psi = \sum_{k,j=1}^{n} k_{ij}u_iu_j - \mu\sum_{j=1}^{n} h_{11i} = 0 \tag{5}$$

повинна мати максимум.

В точці екстремуму u_i^o градієнт функції Ψ

$$\nabla_i\Psi = \sum_{j=1}^{n} k_{ij}u_j - \mu h_{11i} = 0 . \tag{6}$$

Тому поблизу точки екстремуму h_{11i} функція Ψ, з врахуванням (5) і (6), може бути записана так:

$$\Psi = \Psi(..., u_j^o, ...) + \frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{n} k_{ij}(u_i - u_i^o)(u_j - u_j^o). \tag{7}$$

Оскільки матриця k_{ij} – позитивно визначена, то поблизу екстремуму

$$\Psi(..., u_j, ...) > \Psi(..., u_j^o, ...).$$

Таким чином, відповідно до (7), точка $\{u_j^o\}$ є мінімумом, а не максимумом. Аналогічно можна довести, що функція $\tilde{S}$ не має максимуму на безлічі площин не нульової розмірності, які є перетином декількох гіперплощин.

Оскільки з іншого боку, область, яка визначається умовами (3) і (4) є замкнутою, а функція $\tilde{S}(u_1, ..., u_n)$ обмежена в цій області, то, як випливає з теореми Вейерстраса [6], функція $\tilde{S}$ досягає в цій області максимального значення. Це максимальне значення, відповідно до доказаного вище, може досягатися тільки на безлічі ненульової розмірності, тобто в „кутових” точках області. „Кутовою” точкою області є перетин n гіперплощин, які обмежують область (3) або (4).

Для переходу до безперервного випадку достатньо зробити граничний перехід $n \to \infty$. При такому граничному переході точці $\{u_1, ..., u_n\}$ буде відповідати функція $u(\tau)$ – точка в функціональному просторі. Використовуючи компактність отриманого функціонального простору й за допомогою узагальненої теореми Вейерстраса, можна довести, що доказане вище твердження переноситься на випадок нескінченного числа розмірностей. Тому, остаточно сформулюємо наступне твердження: оптимальний вимірювальний сигнал $u_{опт}(\tau)$, який забезпечує максимальне значення функціоналу $S(\{u\})$, знаходиться в класі функцій, для яких в кожен момент часу виконується одна з умов обмеження

$$|u(\tau)| = U_m\,; \quad \left|\int\limits_0^t h_i(t,\tau)u(\tau)d\tau\right| = U_{im}\,.$$

Іншими словами, для оптимального сигналу в кожен момент часу повинне „спрацьовувати” одне з обмежень.

Наприклад, якщо обмеження стосується амплітуди вхідного сигналу, то оптимальний сигнал $u_{опт}(\tau)$ представляє собою кусочно-постійну функцію $u(\tau) = \pm U_m$ з можливими точками „перемикання”. Якщо обмежена амплітуда сигналу $|u(\tau)| \le U_m$ і його похідна $|\dot{u}(\tau)| \le U_1$, то оптимальний сигнал складається з відрізків горизонтальних прямих $u(\tau) = \pm U_m$ і похилих прямих $u(\tau) = \pm U_1\tau + \text{const}$.

Після того, як розрахований клас оптимальних вимірювальних сигналів необхідно визначити точки „перемикання”, тобто моментами часу, в які відбувається зміна обмежень

Розрахуємо рівняння, яке визначає точки „перемикання” вхідного сигналу й запропонуємо метод вирішення цього рівняння. Нехай на сигнал накладено локальне обмеження

$$|u(\tau)| \le U_m\,.$$

Оскільки для оптимального сигналу $u_{опт}(\tau)$ величина $S(\{u\})$ має максимум, то люба варіація сигналу повинна приводити до зменшення функціоналу $S : \dot{S} \le 0$.

З формули для варіації $\dot{S}$ отримаємо:

$$\dot{S} = 2\int\limits_0^T\int\limits_0^T k(\tau,\tau')u^*_{опт}(\tau)u_{опт}(\tau')d\tau d\tau' \le 0\,, \tag{8}$$

де $u^*_{опт}(\tau)$– оптимальний вимірювальний сигнал при локальному обмеженні.

Як показано вище, оптимальний сигнал є кусково-постійною функцією, то в співвідношенні (8) можна розглядати лише „голчаті” варіації величини $u_{опт}(\tau)$ поблизу точки „перемикання” τ_0:

$$u^*_{опт}(\tau) = \\ = \begin{cases} u(\tau) - u_{опт}(\tau) & \tau_0 - \varepsilon \le \tau \le \tau_0 + \varepsilon \\ 0 & |\tau - \tau_0| > \varepsilon \end{cases}, \tag{9}$$

де ε – похибка визначення точки „перемикання” τ_0.

Після підстановки (9) в (8) та необхідних перетворень отримаємо

$$\begin{aligned} &u^*_{опт}(\tau_0)\int\limits_0^T k(\tau_0,\tau')u_{опт}(\tau')d\tau' \ge \\ &\ge u(\tau_0)\int\limits_0^T k(\tau_0,\tau)u_{опт}(\tau')d\tau'. \end{aligned} \tag{10}$$

Співвідношення (10) буде виконане, якщо в кожний момент часу абсолютна величина оптимального сигналу буде дорівнювати максимальному значенню U_m, а знак $u_{опт}(\tau)$ буде співпадати зі знаком інтегралу

$$\int\limits_0^T k(\tau_0,\tau')u_{опт}(\tau')d\tau'\,.$$

Ця умова призводить до такого рівняння для оптимального сигналу при врахуванні обмеження:

$$u^*_{опт}(\tau_0) = U_m \text{sign}\int\limits_0^T k(\tau_0,\tau')u_{опт}(\tau')d\tau'\,. \tag{11}$$

Співвідношення (11) представляє собою рівняння, яке визначає точки „перемикання”. Функція (11) є нелінійним інтегральним рівнянням і його аналітичне вирішення в загальному вигляді не може бути отримане. Тому для розв’язання рівняння (11) може бути запропонована ітераційна методика, яка дозволяє отримати рішення методом послідовних наближень:

$$u_{n+1}(\tau) = U_m \text{sign}\int\limits_0^T k(\tau_0,\tau')u_n(\tau')d\tau'\,. \tag{12}$$

Співвідношення (12) дозволяє визначити $u_{опт}(\tau)$ за допомогою ЕОМ за циклічної програми. Алгоритм розрахунку $u_{опт}(\tau)$ відповідно до (12) зводиться до процесу, що сходиться.

В загальному випадку задача визначення $u_{опт}(\tau)$ у відповідності з алгоритмом (12) є багатоекстремальною. Якщо в якості початкової функції $u_0(\tau)$ узяти рішення відповідної задачі при інтегральному обмеженні $u_0(\tau) = U_m \text{sign}\varphi_0(\tau)$, то алгоритм (12) призводить до глобального екстремуму.

Проведені розрахунки за допомогою ЕОМ для конкретних випадків показали, що необхідна точність досягається за 2-3 шага .

Ця обставина дозволяє в тих випадках, коли не вимагається висока точність, записати наближене рішення рівняння (11) в наступному виді:

$$u^*_{опт}(\tau) \approx U_m \text{sign}\varphi_0(\tau)\,. \tag{13}$$

Співвідношення (13) встановлює внутрішній зв'язок між вирішенням задачі про визначення оптимального вимірювальний сигналу $u_{опт}(\tau)$ при наявності локальних і інтегральних обмеженнях.

Таким чином методика синтезу оптимального вимірювального сигналу при локальному обмежені представлена співвідношеннями (2)–(4), (10)–(12). Крім того, в деяких випадках за допомогою співвідношення (13) можливо визначити характеристики оптимального вимірювального сигналу при локальному та інтегральному обмеженнях.

Висновки

В статті розроблена методика синтезу вимірювального сигналу при врахуванні локального обмеження, яка може бути використана при обґрунтуванні параметрів діагностичної апаратури для визначення технічного стану зразка озброєння та військової техніки при його експлуатації за фактичним станом. Наведені розрахунки дозволили визначити наближене співвідношення для синтезу оптимального вимірювального сигналу при локальному та інтегральному обмеженнях.

Список літератури

1. Смирнов Н.Н. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию / Н.Н. Смирнов, А.А. Ицкевич. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.

2. 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.

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

4. Данилов А.А. Метрологическое обеспечение измерительных систем / А.А. Данилов. – Пенза: Профессионал, 2008. – 63 с.

5. Бесекерський В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерський, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1972. – 768 с.

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

Поступила до редколегії 16.12.2013

Рецензент: д-р техн. наук проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Хаарків.

МЕТОДИКА СИНТЕЗА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ОГРАНИЧЕНИИ

В.Н. Чинков, С.В. Герасимов

Обосновано, что при синтезе оптимальных измерительных сигналов для контроля параметров образцов вооружения с целью определения их технического состояния необходимо учитывать ограничения. Предложена методика синтеза оптимального измерительного сигнала для контроля технического состояния образца вооружения при локальном ограничении. Показано, что интегральное ограничение при определенных условиях может сводиться к локальному. Поставлена и решена задача синтеза оптимального измерительного сигнала при учете как локального, так и интегрального ограничений.

***Ключевые слова**: измерительный сигнал, синтез, контроль технического состояния, вооружение и военная техника.*

METHOD OF SYNTHESIS OF MEASURINGS SIGNALS FOR CONTROL OF THE TECHNICAL STATE OF STANDARDS OF ARMAMENT AT LOCAL LIMITATION

V.N. Chinkov, S.V. Gerasimov

It is grounded, that at the synthesis of optimum measuring signals for control of parameters of standards of armament with the purpose of determination of their technical state it is necessary to take into account limitations. The method of synthesis of optimum measuring signal is offered for control of the technical state of standard of armament at local limitation. It is retuned that integral limitation at certain terms can be taken to local. Put and decided task of synthesis of optimum measuring signal at an account both local and integral limitations.

***Keywords**: measuring signal, synthesis, control of the technical state, armament and military technique.*