УДК 681.3

С.В. Герасимов

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ РОЗРОБКИ ОПТИМАЛЬНОЇ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗА СТАНОМ

Показана необхідність розробки методик контролю параметрів технічних систем з метою визначення їх фактичного стану при переведенні систем на експлуатацію за технічним станом. Обґрунтована математична залежність між параметрами контролю системи та функцією від узагальненого параметра контролю. Сформульовані особливості вирішення задач удосконалення методики контролю залежно від співвідношень між значеннями відхилень параметрів контролю та часу контролю. Обґрунтована постановка проблеми розробки методики контролю параметрів технічних систем при переведенні їх на експлуатацію за технічним станом і задачі розрахунку кількісних оцінок оптимальних методик контролю.

Ключові слова: *методика контролю, контроль технічного стану, технічна система.*

Вступ

Постановка проблеми. Основою експлуатації за технічним станом є визначення, діагностування й прогнозування реального стану технічної системи. За допомогою засобів контролю та діагностування проводять безперервний або періодичний контроль параметрів стану технічних систем. Прогнозування виконують по результатах контролю (вимірювання параметрів) системи для визначення інтервалу часу, за який збережеться працездатний стан, і для визначення моменту часу наступного контролю.

Результати контролю (вимірювання) параметрів технічної системи є основою для ухвалення рішень про необхідність технічного обслуговування, часу його проведення й об'ємів. При цьому важливе значення мають методики та методи проведення контролю технічного стану систем. Тому розробка та обґрунтування методик контролю параметрів технічних систем при їх експлуатації за фактичним станом є актуальною науковою задачею.

Аналіз літератури. Проведений аналіз робот [1 – 4], які направлені на обґрунтування переведення технічних систем на експлуатацію за станом, показав, що вони не вирішують проблему розробки та обґрунтування методик і методів проведення контролю технічного стану систем з метою визначення їх фактичного стану.

Метою даної статті є формулювання сучасної математичної постановки проблеми розробки (визначення) оптимальних методик контролю параметрів технічних систем при їх експлуатації за станом.

Основна частина

При проведенні контролю з метою визначення стану технічної системи при її експлуатації за станом застосовують вхідні вимірювальні сигнали (тестові сигнали) $u(\tau)$, які можуть перетворюватися на виході системи, що контролюється, в вихідний сигнал (сигнал-відгук) $y(\tau)$. В загальному випадку може бути кілька паралельних вхідних і вихідних сигналів, тому маємо вектори вхідних і вихідних сигналів. Якість перетворення описується оператором системи $\Phi(\{u\})$ і це перетворення можна записати у вигляді $Y = \Phi(\{u\})$.

Для лінійних систем з зосередженими параметрами оператор $\Phi(\{u\})$ залежить від кінцевої кількості параметрів. Якщо $G(p)$ – лапласівське зображення передатної функції системи

$$G(p) = \sum_{i=1}^{m} a_i p^i \Big/ \sum_{j=1}^{n} b_j p^j ,$$

де a_i, b_j – коефіцієнти, $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$, m, n – кількість параметрів контролю вихідного та вхідного вимірювального сигналів відповідно, то в якості таких параметрів можна використати, наприклад, коефіцієнти a_i і b_j або їх комбінації (коефіцієнт підсилення, постійні часу та затухання, власні частоти). Можна також в якості цих параметрів для електричних систем застосувати активний опір, індуктивність або ємність.

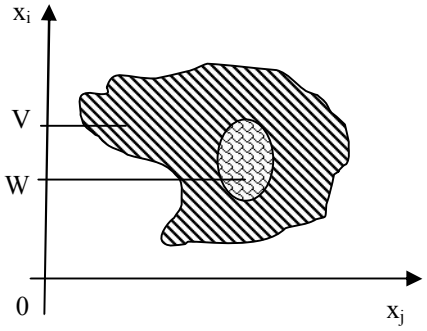
Оператор нелінійної системи не визначається кінцевим числом параметрів. Але, з відомою ступеню точності його завжди можна апроксимувати оператором (в загальному випадку нелінійним), але залежним від кінцевого числа параметрів. Так, наприклад, якщо система вміщує ланки типових елементів з насиченням, то, представивши характеристику такої ланки на окремих ділянках відповідною функцією апроксимації (відрізками прямих, арктан-

© С.В. Герасимов

генсом, гіперболічним тангенсом тощо), можна в якості параметрів системи використати характеристики цих апроксимуючих функцій.

Позначимо параметри контролю технічного об'єкта вектором $X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$, так, що оператор системи $\Phi(\{u\})$ буде функцією цих параметрів: $\Phi(\{u\}) = \Phi(x_1, x_2, ..., x_n)$. Значення параметрів x_j, $j = \overline{1,n}$, є випадковими величинами, так як вони можуть в процесі зберігання та експлуатації системи змінюватися. Будемо вважати в процесі контролю ці параметри незмінними, оскільки контрольні операції, як правило, проводяться за час, який значно менший часу зміни параметрів.

Таким чином, стан технічної системи визначається вектором параметрів $X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$. Якщо відома апріорна (до проведення операції контролю) функція розподілу параметрів або дисперсія параметрів і кореляційні зв'язки між ними, то тим самим відома й апріорна область, в якій знаходиться вектор X – апріорна область „відхилень" параметрів системи. Чим менше апріорна інформація о системі, тим ширше ця область „відхилення". Інформація, отримана в результаті контролю, уточнює функцію розподілу параметрів x_j, так що область „відхилення" параметрів звужується (рис. 1). Чим точніше та повніше проведений контроль, тим вуже апостеріорна область (після проведення контролю).



V – апріорна область;
W – апостеріорна область

Рис. 1. Області відхилення параметрів контролю

Часто метою контролю є визначення не самих параметрів x_j, а якоїсь функції від цих параметрів $Y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$, тобто визначення технічного стану системи за узагальненим параметром. Прикладом такої функції може бути яка-небудь величина, яка дає числову оцінку запасу стійкості системи. Хоча величина Y (при $m < n$) несе меншу інформацію о системі, чим повний набір величин X, однак в більшості випадків вдалий вибір відносно невеликої кількості величин y_i, вважається достатнім для порівняно повної оцінки якості системи, а, з іншого боку, може істотно спростити контроль. В загальному випадку величини y_i можуть співпадати з величинами x_j. Повнота контролю П системи залежить від кількості параметрів, які не підлягають контролю, тобто $П = m/n$.

Функціональна схема контролю може бути представлена в вигляді, зображеному на рис. 2. На цій схемі Г – генератор вхідних вимірювальних сигналів (сигналів-калібраторів) системи $u(\tau)$; $G(p)$ – технічна система – об'єкт контролю; А – аналізатор вихідних сигналів системи. Під аналізатором в подальшому будемо розуміти сукупність вимірювального приладу та пристрою обробки інформації, що дозволяє по вимірюваним значенням вихідного сигналу системи $y(\tau)$ визначити значення параметрів системи x_j або величин y_i.

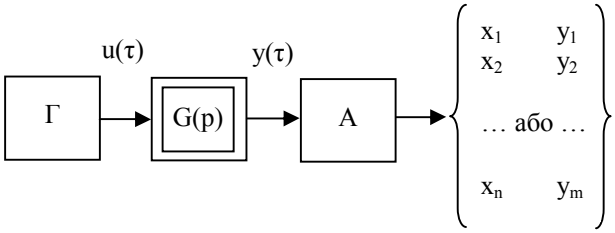


Рис. 2. Функціональна схема контролю

Таким чином, вихідний сигнал $y(\tau)$ є функцією від параметрів системи x_j і функціоналом від вхідного вимірювального сигналу $u(\tau)$: $y = y_0(\{u\}, x, t)$. На цей вихідний сигнал накладаються перешкоди. До цих перешкод відносяться перешкоди, що виникають із-за похибки генератора, різного роду зовнішні перешкоди, і наводки (якщо такі є) і, що саме суттєво, похибки вимірювального пристрою аналізатора. Ці перешкоди з відомою ступеню точності можна вважати адитивними. Позначимо величину перешкоди через $\xi(t)$. Тоді вихідний сигнал можна записати наступним чином:

$$y = y_0(\{u\}, x, t) + \xi(t). \qquad (1)$$

До перешкоди необхідно віднести також складові вихідного сигналу, обумовлені відхиленням від номінальних значень тих параметрів, які не підлягають визначенню в результаті контролю. Відмітимо, що з цієї точки зору складова вихідного сигналу, обумовлена відхиленням від номінальних значень параметрів, які підлягають визначенню, є корисним сигналом.

Зазначимо, що задача розробки оптимальної методики контролю набуває сенсу тільки при врахуванні названих перешкод. Дійсно, інакше, при відсутності перешкоди, для визначення n параметрів контролю системи $\{x_1, x_2, ..., x_n\}$ достатньо провести вимірювання значень вихідного сигналу $y(\tau)$ в

точках $\{t_1, t_2, ..., t_d\}$, де d – кількість моментів відліку (точок дискретизації) і вирішити систему рівнянь (1), складену для моментів часу $\{t_1, t_2, ..., t_d\}$ відносно величин $\{x_1, x_2, ..., x_n\}$.

Вибір вхідного вимірювального сигналу $u(\tau)$ в значному ступені довільний, єдиним обмеженням є те, що Якобіан відповідної системи рівнянь $Y = \det\left|\frac{\partial y(\tau_k)}{\partial x_j}\right|$, $k = \overline{1,d}$ не звертається до нуля. Всі вхідні сигнали $u(\tau)$, для яких $Y \neq 0$, є рівнозначними, тобто нема необхідності визначати оптимальний вихідний сигнал.

Оскільки в реальних об'єктах контролю вказані перешкоди в тій або іншій мірі присутні й можуть вносити значні похибки, то така методика контролю, без врахування перешкод, достатньо приближена, що, в свою чергу, знижує достовірність контролю технічного стану системи, що контролюється.

Тому необхідно проводити контроль систем з урахуванням перешкод, які присутні в вихідному сигналі. Задача контролю систем з урахуванням перешкод, що вносяться системою, вимірювальними приладами й іншими факторами, може бути вирішена за допомогою оптимальної методики контролю, розробці якої присвячена дана стаття.

Сформулюємо проблему визначення оптимальної методики контролю. Оптимальний є така методика, яка при заданій апріорній області „відхилення" параметрів системи, заданому рівні перешкоди (похибки вимірювальних приладів), заданому часі контролю дозволяє максимально звузити апостеріорну (після проведення контролю) область „відхилення" параметрів системи (або функції цих параметрів). Еквівалентній попередній постановці проблеми є проблема визначення методики, яка забезпечує мінімальний час контролю при заданій апріорній області „відхилення" параметрів системи, заданих розмірах апостеріорної області, або проблема визначення методики, яка дозволяє при фіксованих умовах максимально знизити необхідну точність вимірювальних приладів. Використання якої-небудь з цих еквівалентних постановок проблеми визначається конкретними ситуаціями.

Проблема визначення оптимальної методики складається з декількох, не зв'язаних друг з другом, задач.

По-перше, необхідно встановити кількісну оцінку методики контролю. Така оцінка (або оцінки) повинна бути зв'язана з розмірами апостеріорної області „відхилення" значень y_i. Вся інформація про параметри y_i, отримана по результатах контролю, міститься в функції розподілу $p(Y/u)$, яка надає імовірність для різних значень y_i, при умові, що на виході об'єкту контролю спостерігалась реалізація $y(\tau)$. Коли мова йшла про апостеріорну область „відхилення" величин y_i, то малася на увазі область, імовірність потрапляння якої для величин y_i більше деякої встановленої імовірності. Якщо є декілька параметрів, то для завдання цієї області необхідно відповідно декілька величин (наприклад, при нормальному законі розподілу можна задавати напіввісі еліпсоїду розсіювання).

Різні статистичні оцінки якості контролю по різному зв'язані з величинами, які характеризують область „відхилення". Виняток складає випадок одної змінної, коли практично всі оцінки еквівалентні.

Аналізу різних статистичних оцінок, перевірки наявності зв'язків між ними і розробці на підставі цього аналізу кількісної міри якості контролю – критерію оптимальності – будуть присвячені наступні публікації.

По-друге, після того, як встановлена кількісна міра оцінки, виникає питання про вибір таких вхідних вимірювальних сигналів для контролю системи (тестових сигналів), які забезпечували би для даної системи максимальне значення цієї кількісної оцінки. Визначення оптимальних параметрів вимірювальних сигналів зводиться для різних класів систем до різних варіаційних задач. Ці варіаційні задачі й методи їх вирішення будуть розглянуті в інших публікаціях. Ці результати є основою при розробці вимог до генераторів (калібраторів) вхідних вимірювальних сигналів і їх конструюванню. Тому необхідно вирішити проблему розробки методик (методів) оптимальної обробки вихідного сигналу, що в значному ступеню засновано на класичних методах статистичного аналізу та теорії оптимального приймання (обробки) сигналів.

Отримані на базі цих методів алгоритми є основою при розробці вимог до апаратури аналізатора та його конструювання. В наступних публікаціях будуть розглянуті деякі модифікації оптимальної методики обробки сигналу, яка дозволить спростити алгоритм обробки сигналу при одночасному збереженні перешкодозахищеності методу контролю. На основі отриманих результатів будуть викладені принципи побудови і варіанти конструкції цифрових автоматичних приладів (вимірювальних систем) для визначення параметрів технічних систем.

При аналізі статистичних оцінок якості контролю системи будемо вважати, що зразковий (номінальний) вихідний вимірювальний сигнал $y_0(\{u\}, x, t)$ може бути розкладений в ряд по значенням відхилень параметрів x_j від номінальних значень x_{0j}: $(\Delta x_j = x_j - x_{0j})$. Утримуючи перший член цього розкладу отримаємо

$$\Delta y = \sum_{j=1}^{n} b_j\left(\{u\},\ x_0,\ t\right)\Delta x_j + \xi(t), \qquad (2)$$

де $\Delta y = y_j\left(\{u\},\ \{x\},\ t\right) - y_0\left(\{u\},\ x_0,\ t\right)$.

Аналогічно, розкладаючи величини

$$Y_i = y_i\left(\{x\}\right),$$

запишемо

$$\Delta y_i = \sum_{j=1}^{n} c_{ij}\Delta x_j, \qquad (3)$$

де $\Delta y_i = y_i\left(\{x\}\right) - y_i\left(\{x_0\}\right)$; $c_{ij} = \left(\frac{\partial Y}{\partial x_j}\right)\Big|_{x_j = x_{j0}}$.

Доведемо правильність (адекватність) розкладів (2) і (3).

При контролі технічної системи однією з актуальних задач є задача удосконалення методики контролю в випадках, коли відхилення параметрів невеликі, так що чутливості та точності вимірювальної апаратури при заданому часі, відведеному на контроль системи, виявляється недостатньо для виявлення цих відхилень, або для визначення їх величини з потрібним ступенем точності. Тому методика контролю, яка є оптимальною при малих відхиленнях параметрів і за рахунок отримання найбільшого значення чутливості (або точності), яка дозволяє виявляти такі відхилення, буде придатна й при нелінійних відхиленнях параметрів. При малих відхиленнях параметрів для визначення величини цих відхилень, може бути застосована лінійна обробка сигналу $\Delta y(t)$. При цьому оцінки параметрів системи x_j або величин y_i будуть лінійними функціями від величини вихідного сигналу $\Delta y(t)$ [5].

Якщо відхилення дійсно є малими, то лінійна обробка вихідного сигналу дозволяє визначити значення відхилень параметрів від номінальних значень. Якщо в результаті застосування методики обробки вихідного сигналу, яка заснована на використанні співвідношень (2) і (3), будь-які параметри будуть поза межами області лінійності, то в цьому випадку значення відхилень визначені не будуть, а буде встановлено факт виходу параметрів за ці межі. Ситуація, в якій комбінація великих відхилень декількох параметрів призводить до малого відхилення якості системи від номінальних, малоймовірна, особливо, якщо контролюється достатньо велика кількість параметрів системи, хоча така ситуація не може бути повністю виключена без попереднього аналізу, який повинен бути проведений в кожному окремому випадку.

Таким чином, при малих відхиленнях параметрів системи від номінальних значень лінійна обробка вихідного сигналу дозволяє встановити як факт відхилення параметрів, так і визначити їх значення.

При великих відхиленнях параметрів лінійна обробка дозволяє встановити тільки факт відхилення, а величина відхилення визначена не буде. Для визначення величини відхилення параметра в цьому випадку необхідно застосувати нелінійну обробку вихідного сигналу. Необхідно підкреслити, що методика контролю, за винятком останньої стадії обробки вихідного сигналу, в силу вище наведеного, може основуватися на співвідношеннях (2) і (3).

Для лінійних систем можна провести оцінку точності наближення (2) [5]. З цією метою передатну функцію системи запишемо в наступному вигляді:

$$G(p) = k\prod_{i=1}^{m}\left(\tau_i p + 1\right) \Big/ \prod_{j=1}^{n}\left(T_j p + 1\right),$$

де τ_i і T_j – тривалості контролю параметрів y_i і x_j відповідно.

Серед величин τ_i і T_j при наявності коливальних ланок можуть бути пари комплексно зв'язаних величин. Якщо тепер узяти в якості параметрів Δx_j відносні уходи величин k, τ_i і T_j від їх номінальних значень k_0, τ_{i0} і T_{j0}, тобто

$$\Delta x = \left\{\frac{\Delta k}{k_0},\ \frac{\Delta\tau_i}{\tau_{i0}},\ \frac{\Delta T_j}{T_{j0}}\right\},$$

то для величин $G(p)$ отримаємо:

$$G\left(x_0 + \Delta x\right) = G\left(x_0\right)\left(1 + \delta k\right)\times$$
$$\times\prod_{i=1}^{m}\left(1 + \gamma_i\delta\tau_i\right) \Big/ \prod_{i=1}^{n}\left(1 + \gamma_i'\delta T_i\right), \qquad (4)$$

де $\delta k = \frac{\Delta k}{k_0}$; $\gamma_i = \frac{\tau_i p}{\tau_i p + 1}$; $\gamma_j' = \frac{T_j p}{T_j p + 1}$; $\delta\tau_i = \frac{\Delta\tau_i}{\tau_{i0}}$; $\delta T_j = \frac{\Delta T_j}{T_{j0}}$.

Оскільки величини γ_i і γ_j' по модулю не перевершують одиниці ($|\gamma_i| \le 1$, $|\gamma_j'| \le 1$), то останній член в формулі (4) буде мати порядок $0(\Delta x)$.

Параметри системи Δx_j є, в загальному випадку, статистично залежними. Позначимо кореляційну матрицю цих величин Q_{ij}: $Q_{ij} = <\Delta x_i\ \Delta x_j>$, де символ $<\ >$ означає середнє значення за ансамблем величин Δx_j. Оскільки матриця Q_{ij} є позитивно визначеною ($\sum_{i,j} Q_{ij}\xi_i\xi_j > 0$ при будь-яких $\xi_i \ne 0$) і симетричною ($Q_{ij} = Q_{ji}$), то завжди можна лінійним перетворенням перейти до нових змінних $\Delta x_j'$, які будуть статистично незалежними й дисперсії їх будуть дорівнювати одиниці, тобто

$$Q_{ij}' = <\Delta x_i'\ \Delta x_j'> = \delta_{ij}$$

(δ_{ij} – символ Кронекера [5]). Для практичної реалізації такого переходу необхідно вирішити систему лінійних рівнянь:

$$\sum_{j=1}^{n} Q_{ij}\xi_j^{(k)} = \lambda_k \xi_i^{(k)} . \qquad (5)$$

При цьому нові ортонормовані змінні $\Delta x'_j$ (незалежні параметри) будуть зв'язані зі старими Δx_j (залежні один від одного чи від перешкоди параметри) наступним співвідношенням:

$$\Delta x'_i = \frac{\Delta x_i}{\sqrt{\lambda_i}} \sum_{j=1}^{n} \xi_j^{(i)} . \qquad (6)$$

Можна вважати, що такий процес ортогоналізації виконаний і в співвідношенні (2) всі змінні статистично незалежні й мають одиничні дисперсії. При необхідності за допомогою співвідношень (5), (6) повернутися до початкових статистично залежних змінних. Доведене відноситься також і до змінних y_i зі співвідношення (3), які також можна вважати статистично незалежними.

Висновки

В статті обґрунтовано, що проблема розробки методик контролю параметрів технічних систем з метою визначення їх фактичного стану та визначення часу наступного контролю складається з декількох, не зв'язаних друг з другом, задач: задачі розрахунку кількісних оцінок оптимальної методики контролю та, після встановлення кількісних значень оцінок, задачі розрахунку параметрів вхідних вимірювальних сигналів для контролю системи, які забезпечували би для даної системи максимальне значення цієї кількісної оцінки.

Обґрунтована постановка проблеми розробки методики контролю параметрів технічних систем при переведенні їх на експлуатацію за технічним станом, яка математично описана співвідношеннями (1) – (6), і задачі розрахунку кількісних оцінок оптимальних методик контролю.

В наступних публікаціях будуть розглянуті методи розв'язання проблеми розрахунку кількісних оцінок оптимальних методик контролю параметрів технічних систем при експлуатації за станом. При цьому буде з'ясований зв'язок між різними кількісними оцінками (чутливість і точність контролю, кількість інформації, закони розподілу параметрів контролю) оптимальних методик контролю параметрів технічних систем.

Список літератури

1. Мелещенко Ю.С. Техніка й закономірності її розвитку / Ю.С. Мелещенко. – К.: Наука, 2005. – 176 с.

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

3. Авиация: Большая Российская Энциклопедия / Под ред. Г.П. Свищева. – М.: Энциклопедия, 1994. – 736 с.

4. Гриб Д.А. Експлуатація та ремонт за технічним станом озброєння військової техніки зенітних ракетних військ: проблемні питання та шляхи їх вирішення / Д.А. Гриб, Б.М. Ланецький, В.В. Лук'янчук, В.П. Михиденко // Системи озброєння і військова техніка. – 2010. – № 4(24). – С. 28-31.

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

Надійшла до редколегії 10.10.2013

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

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ОПТИМАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО СОСТОЯНИЮ

С.В. Герасимов

Показана необходимость разработки методик контроля параметров технических систем с целью определения их фактического состояния при переводе систем на эксплуатацию по техническому состоянию. Обоснована математическая зависимость между параметрами контроля системы и функцией от обобщенного параметра контроля. Сформулированы особенности решения задач усовершенствования методики контроля в зависимости от соотношений между значениями отклонений параметров контроля и времени контроля. Обоснована постановка проблемы разработки методики контроля параметров технических систем при переводе их на эксплуатацию по техническому состоянию и задачи расчета количественных оценок оптимальных методик контроля.

Ключевые слова: *методика контроля, контроль технического состояния, техническая система.*

RAISING OF PROBLEM OF DEVELOPMENT OF OPTIMUM METHOD TO CONTROL OF PARAMETERS OF THE TECHNICAL SYSTEMS DURING EXPLOITATION ON THE STATE

S.V. Gerasimov

The necessity of development of methods of control of parameters of the technical systems is retuned with the purpose of determination of their actual state during the translation of the systems on exploitation on the technical state. Mathematical dependence is grounded between the parameters of control of the system and function from the generalized parameter of control. The features of decision of tasks of improvement of control method are formulated depending on between's by the values of rejections of parameters of control and control time. Raising of problem of development of method of control of parameters of the technical systems is grounded during a translation them on exploitation on the technical state and tasks of calculation of quantitative estimations of optimum methods of control.

Keywords: *control method, control of the technical state, technical system.*