

Рисунок 4 – Зависимость ТКС пленок TiBN от температуры подложки

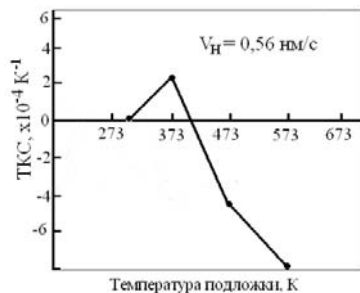


Рисунок 5 – Зависимость ТКС пленок TiB₂+20% TiC от температуры подложки

Измерение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) пленок показало, что повышение V_n способствует снижению ТКС до $3,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (рисунок 4). Покрyтия наносились при $T_n = 313 \text{ K}$.

В тоже время повышение $T_n > 373 \text{ K}$ приводит к переходу к отрицательным значениям ТКС (рисунок 5). Это можно связать с окислением поверхности кристаллитов и образованием пленок из оксидов титана и бора, наличие которой способствует

механизму токопереноса путем туннелирования электронов через диэлектрический барьер.

На рисунке 6 представлена зависимость микротвердости пленок от температуры подложки.

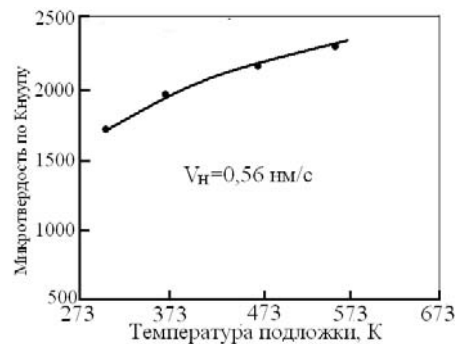


Рисунок 6 – Зависимость микротвердости пленок TiB₂+20% TiC от температуры подложки

Установлено, что высокая T_n способствует получению покрытий с более плотной структурой, что повышает их твердость.

Литература

1. Shu, S. Fabrication of $\text{TiC}_x\text{-TiB}_2/\text{Al}$ composite for application as a heat sink / S. Shu, H. Yang, C. Tong, F. Qiu // *Materials*. – 2016. – № 9. – P. 642–672.
2. Sundgren, J.E. Growth, structural characterization and properties of hard and wear-protective layered materials // J.E. Sundgren, J. Brich, G. Hakansson, I. Haltman, U. Helmersson // *Thin Solid Films*. – 1990. – V. 193–194. – P. 818–831.

УДК 681.5

КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ

Уласюк Н.Н., Сычик В.А.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Критерий качества управления является краеугольным камнем при построении управляющих функций и всей системы управления в целом.

При проектировании управляемых систем, необходимо, прежде всего, конкретизировать:

- критерий качества управления и способ его минимизации (максимизации);
- ограничения системы и способ их удовлетворения;
- средства, обеспечивающие адаптивность управления;
- способы идентификации ненаблюдаемых координат и коррекции ошибок наблюдаемых координат, чтобы исключить автоколебательные процессы;
- способ выбора оптимальных значений параметров алгоритма управления;
- средства, гарантирующие устойчивость управляемой системы.

Без корректного ответа на эти вопросы не может быть корректно сформулирована и решена задача управления системой.

Пусть желаемые свойства движения управляемой системы для выходных координат

$x = (x_1, \dots, x_n)^T$ заданы в виде многообразия

$$\Omega: w_\mu(x, t) = C_\mu, \mu = 1, \dots, m \quad (1)$$

где $w_\mu(\cdot)$ – заданные операторы; C_μ – константы; $C_\mu > 0$; t – время.

Форма представления желаемых свойств движения системы в виде (1) не является единственно возможной. Свойства движения могут быть заданы в дифференциальной форме, например уравнениями эталонного движения:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(\bar{x}, x, t), \\ t &\geq t_o: x(t_o) = x_o, \end{aligned} \quad (2)$$

где $f = (f_1, \dots, f_n)^T$; $f_i(\cdot)$ – заданные операторы, в общем случае нелинейные, определяемые на нечетких множествах; $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ – вектор обобщенных координат; $\dot{x} = (\dot{x}_1, \dots, \dot{x}_n)^T$ – вектор обобщенных скоростей; $\bar{x} = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)^T$ – вектор командных величин; $x_o = (x_{1o}, \dots, x_{no})^T$ – вектор начального состояния.

В соответствии с условиями (1) либо (2) могут быть построены при определенных предположениях уравнения движения управляемой системы. Однако в широко используемых формулировках задач управления уравнения движения системы предполагаются известными с точностью до вектора управления $u = (u_1, \dots, u_m)^T$ ($m \leq n$):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= F(x, u, t), \\ t &\geq t_o: x(t_o) = x_o, \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $F = (F_1, \dots, F_n)^T$ – вектор правых частей системы.

Критерий качества управления может быть задан также в интегральной форме. При этом требуется минимизировать выражение вида:

$$J_n = \int_{t_o}^{t_1} \left[\tau_0^2 \varepsilon_k^2 + \tau_1^2 \dot{\varepsilon}_k^2 + \dots + \tau_n^2 \varepsilon_k^{(n)^2} \right] dt \quad (4)$$

где $\varepsilon_k(t) = \bar{x}_k(t) - x_k(t)$ – ошибка. Используя уравнение Эйлера-Пуассона и требуя, чтобы при $t \rightarrow \infty$ функция $x_k(t)$ стремилась к заданной величине \bar{x}_k , а ее производные стремились к нулю, можно показать, что оптимизация системы (3) по критерию минимума интегральной квадратичной ошибки n -го порядка вида (4) сводится к требованию, чтобы выходная переменная управляемой системы изменялась в соответствии с решением линейного дифференциального уравнения n -го порядка:

$$x_k^{(n)} + \beta_{n-1} x_k^{(n-1)} + \dots + \beta_1 \dot{x}_k + \beta_0 x_k = \beta_0 \bar{x}_k, \quad (5)$$

с начальными условиями, соответствующими системе (3). Коэффициенты $\beta_0, \dots, \beta_{n-1}$ определяются через константы τ_0, \dots, τ_n , входящие в критерий (4). Таким образом, критерий качества в интегральной форме (4) можно представить в дифференциальной форме (5) и наоборот.

Уравнение (5) можно рассматривать как исходное уравнение эталонного движения. В общем случае, желаемые свойства движения управляемой системы могут задаваться нелинейными дифференциальными уравнениями вида:

$$x_k^{(n)} = f(x_k^{(n-1)}, \dots, x_k, \bar{x}_k, t), \quad (6)$$

где $f(\cdot)$ – заданный нелинейный оператор; \bar{x}_k – заданные величины; $k = 1, \dots, m$.

Желаемые свойства движения управляемой системы обычно задаются линейным дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\ddot{x} + 2\psi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = \omega_0^2 \bar{x}, \quad (7)$$

где ψ и ω_0 – заданные константы: $\psi \geq 0$, $\omega_0 > 0$; \bar{x} – заданная командная величина.

Формирование модели эталонного движения

Этот вопрос рассматривается применительно к случаю, когда синтезируемый алгоритм управления предназначен для вывода управляемого объекта в точку $x(\infty) = \bar{x}$, $\dot{x}(\infty) = 0$. Это означает, что дифференциальное уравнение эталонного движения должно быть принято в виде (7). Более упрощенно уравнение записывается:

$$\ddot{x}^* + \beta_1 \dot{x}^* + \beta_0 x^* = \beta_0 \bar{x}. \quad (8)$$

Коэффициенты β_0, β_1 подлежат определению из условия, чтобы динамика движения эталонной системы (8) соответствовала желаемой динамике синтезируемой замкнутой системы.

При проектировании систем автоматического управления обычно бывают известны с определенной степенью приближения динамические характеристики управляемого объекта. Поэтому, оказывается возможным в требованиях к системе управления назначить длительность t_x переходных процессов по управляемой переменной x при отработке постоянных задающих воздействий, а также указать характеристики переходного процесса: перерегулирование, показатель колебательности и др. Эти данные являются исходными при определении искомым коэффициентов β_0, β_1 .

Далее примем, что дифференциальные уравнения эталонной системы имеют вид:

$$\tau_x^2 \ddot{x}^* + 2\psi\tau_x \dot{x}^* + x^* = \bar{x}$$

или

$$\ddot{x}^* + 2\psi\omega_0\dot{x}^* + \omega_0^2 x^* = \omega_0^2 \bar{x}, \quad (9)$$

где

$$\tau_x = \frac{t_x}{3}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\tau_x}. \quad (10)$$

Таблица 1 – Показатели, характеризующие свойства линейного эталонного движения

ψ	η	$\sigma, \%$	t_x
1	0	0	$5 \tau_x$
0,707	1,0	5	$3 \tau_x$
0,50	1,73	18	$6 \tau_x$
0,25	3,87	42	$12 \tau_x$

Применительно к этим уравнениям в таблице 1 приведены числовые показатели, ха-

рактически характеризующие динамику движения. Здесь ψ – коэффициент апериодичности колебаний, σ – перерегулирование, а $\eta = \psi^{-1} \sqrt{1 - \psi^2}$ – коэффициент колебательности. В случае $\psi = 1$ уравнение (9) соответствует апериодическому звену второго порядка.

Соответствующее уравнению эталонного движения характеристическое уравнение:

$$p^2 + 2\psi\omega_0 p + \omega_0^2 = 0$$

имеет действительный корень $p_1 = -\psi\tau_x^{-1}$ кратности 2. Показатель колебательности $\eta = 0$, а время переходного процесса $t_x \approx 5\tau_x$.

При уменьшении коэффициента затухания показатель колебательности η увеличивается, что приводит к перерегулированию и увеличению длительности переходных процессов t_x .

При $\psi = \sqrt{2}/2 \approx 0,707$ показатель колебательности $\eta = 1$, а величина перерегулирования $\sigma = 5\%$. При этом длительность переходного процесса оказывается равной $t_x \approx 3\tau_x$. Такой переходный процесс в технике автоматических систем считают наилучшим. В случае $\psi < \sqrt{2}/2$ показатели переходного процесса ухудшаются: увеличиваются η , σ и t_x .

Таким образом, по заданным требованиям к управляемой системе можно указать (с помощью данных, аналогичных таблице 1) параметры уравнения эталонной системы.

Далее считают, что задана длительность t_x переходных процессов в замкнутой системе. Наряду с этим принимается, что эталонная система (8) должна обладать такими динамическими свойствами, при которых коэффициент затухания, или коэффициент демпфирования колебаний, $\psi = \sqrt{2}/2$. В таком случае переходный процесс $x^*(t) \rightarrow \bar{x}$ в системе (8) будет иметь перерегулирование $\sigma \approx 5\%$. Параметры β_0 , β_1 находят из зависимости:

$$2\psi\omega_0 = \beta_1, \quad \omega_0^2 = \beta_0. \quad (11)$$

Принимая $\psi = \sqrt{2}/2$, формулы (11) можно записать с учетом (10) в следующем виде:

$$\beta_0 = \frac{1}{\tau_x^2}, \quad \beta_1 = \frac{\sqrt{2}}{\tau_x}. \quad (12)$$

Таким образом, параметры эталонного управления β_0 , β_1 вычисляются непосредственно по величине t_x , характеризующей качество переходных процессов в проектируемой системе управления.

УДК 621.306

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Сычик В.А., Уласюк Н.Н., Глухманчук В.В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Для контроля качества структуры изоляционных изделий широко используются радиотехнический, ультразвуковой и методы, базирующиеся на интенсивности поглощения либо отражения от образцов высокоэнергетических частиц. Эффективным методом контроля целостности изоляционных изделий, например изделий из кожи, является электрический метод, базирующийся на измерении электрических полей и их градиентов [1].

Способ точного измерения электростатических полей [2] основан на периодическом экспонировании и экранировании помещенного в электростатическое поле металлического электрода и измерении информационного сигнала в нагрузке-затворе МДП-триодной структуры с индцированным каналом. В случае, если время экспонирования $t_{es} = \tau_1$, а время экранирования $t_{ec} = \tau_2$, где τ_1 – постоянная времени индукции на измерительном электроде максимально достижимого заряда q_m ; τ_2 – время стекания q_m через входное сопротивление МДП-структур, выходное напряжение, выделяемое

в истоковой цепи МДП-транзистора, максимальное и составляет:

$$U_{вых.} = K_1 SR_H E_x \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий площадь электрода $S_э$ и свойства окружающей среды; $K_1 = \epsilon_a S_э / C$, C – суммарная емкость системы измерительный электрод–МДП-структура. Поскольку контролируемая напряженность $E_x = q / (4\pi\epsilon r^2)$, то для снижения систематической погрешности необходимо обеспечить $r = \text{const}$ и стабилизировать ϵ_a . Реализация этих условий заложена в конструкции преобразователя электрических полей.

Контроль качества структуры и выявление дефектов в изоляционных материалах и изделиях базируется на методике, связанной с выявлением локальных участков повышенной напряженности электрического поля, излучаемого заряженной плоскостью металлических поверхностей. Механизм выявления областей нарушения целостности структуры изоляционных материалов следующий.