Уфа: УГАТУ Вестник УГАТУ 2000. № 2. С. 149–156

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ И ДОКЛАДЫ • УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 62.506

АДАПТИВНОЕ КООРДИНАТНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВИАЦИОННЫМИ СИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ

Ю. С. КАБАЛЬНОВ

Факультет информатики и робототехники УГАТУ
Тел: (3472) 23 78 76 E-mail: informatic@ugatu.ac.ru

Предложены пропорционально-интегральные, пропорциональные и релейные алгоритмы адаптации для систем адаптивного координатно-параметрического управления на основе беспоисковых самонастраивающихся систем с эталонной моделью применительно к управлению авиационными силовыми установками. С помощью прямого метода Ляпунова показана работоспособность данных алгоритмов. Дана оценка основных преимуществ и недостатков алгоритмов с точки зрения динамической и статической точности процессов адаптации. Приведены примеры использования различных алгоритмов адаптации для адаптивного координатно-параметрического управления авиационной силовой установкой

Адаптивное координатно-параметрическое управление; пропорционально-интегральные, интегральные, пропорциональные, релейные алгоритмы адаптации

ВВЕДЕНИЕ

Одно из перспективных направлений в теории управления, интенсивно развиваемых в течение последних 10–20 лет, связано с использованием принципов координатно-параметрического управления для построения высокоэффективных систем управления объектами, находящимися под действием как параметрических, так и сигнальных возмущений [1]. Наиболее ярким представителем таких объектов являются авиационные силовые установки, устанавливаемые на многоцелевых, высокоманевренных и широкодиапазонных летательных аппаратах (как пилотируемых, так и беспилотных). В качестве параметрических возмущений, приводящих к изменению коэффициентов динамического оператора авиационной силовой установки как объекта управления, выступают достаточно медленные изменения температуры $T^*_{\text{вх}}$ и давления $p^*_{\text{вх}}$ заторможенного потока воздуха на входе в двигатель, в качестве сигнальных (не приводящих к изменению коэффициентов динамического оператора объекта, но изменяющих значения его управляемых координат) выступают достаточно быстрые изменения $p^*_{\text{вх}}$ и $T^*_{\text{вх}}$, а также воздействия других подсистем управления в рамках единой системы управления авиационной силовой установкой [2, 3].

Принцип координатно-параметрического управления предполагает использование для отработки действующих на объект возмущений как традиционного координатного управления, представляющего целенаправленное изменение управляющих сигналов или координат объекта, так и нетрадиционного параметрического управления, представляющего целенаправленное изменение конструктивных параметров объекта или его исполнительных органов (в линейном приближении это изменение коэффициентов его динамического оператора).

Известный подход [1] к построению систем координатно-параметрического управления предусматривает выделение в системе контура координатного управления (и соответственно регулятора координатного управления) и контура параметрического управления (и соответственно регулятора параметрического управления). Задачей контура координатного управления является парирование действующих на систему сигнальных возмущений, задачей контура параметрического управления — парирование действующих на систему параметрических возмущений. Подобное разделение задач между соответствующими контурами в значительной мере упрощает их синтез и существенно расширяет границы эффективной работы систем координатно-параметрического управления. Поскольку в этом случае контур параметрического управления по существу решает задачу адаптации системы к действующим на нее параметрическим возмущениям, можно говорить о том, что данные системы реализуют алгоритмы адаптивного координатно-параметрического управления.

Синтез контура координатного управления, как правило, не представляет особой сложности, в большинстве случаев в нем могут быть использованы линейные регуляторы координатного управления. Синтез контура параметрического управления представляет более сложную задачу, так как алгоритмы параметрического управления в большинстве своем являются принципиально нелинейными.

В настоящее время широкое распространение получило использование беспоисковых самонастраивающихся систем (БСНС) с эталонной моделью в контуре параметрического управления. Это в значительной степени объясняется наличием математически строгой теории и принципов построения данных систем. Так, структура контура параметрического управления выбирается с использованием принципов теории инвариантности на основе так называемой концепции обобщенного настраиваемого объекта (ОНО), а алгоритмы адаптации — на основе прямого метода Ляпунова [1].

В известных работах предлагается использовать в качестве алгоритмов адаптации (самонастройки) БСНС с эталонной моделью интегральные законы (алгоритмы) изменения настраиваемых коэффициентов ОНО. Однако данные законы, обеспечивая асимптотическую устойчивость системы в целом, равномерную по начальному моменту времени и начальным рассогласованиям в системе относительно движения эталонной модели, зачастую приводят к медленно затухающим и сильно колебательным процессам отработки параметрических возмущений.

В этой связи весьма актуальным является расширение класса возможных алгоритмов адаптации, что позволило бы существенно повысить динамическую точность отработки широкого класса параметрических возмущений и тем самым расширить границы применения адаптивного координатно-параметрического управления.

В настоящей работе предлагаются пропорционально-интегральные и как их частные случаи пропорциональные и релейные алгоритмы адаптации контуров параметрического управления, использующих БСНС с эталонной моделью. Необходимо отметить, что идея использования более широкого класса алгоритмов адаптации и, в частности, пропорционально-интегральных сама по себе не является новой [4], однако строгое доказательство возможности их использования применительно к рассматриваемому классу систем в существующей литературе отсутствуют.

1. ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ АДАПТАЦИИ

Рассмотрим обобщенный настраиваемый объект [1], описываемый дифференциальными уравнениями вида

$$\varphi^{(m)} + \sum_{\nu=0}^{m-1}[b_\nu^0 - \Delta b_\nu(t)]\varphi^{(\nu)} = \sum_{\alpha=0}^{h}[d_\alpha^0 - \Delta d_\alpha(t)]\rho^{(\alpha)}, \quad (1)$$

$$\sum_{\alpha=0}^{h} d_\alpha^0\rho^{(\alpha)} = \sum_{\alpha=0}^{h} d_\alpha^0\mu^{(\alpha)} - \sum_{\alpha=0}^{h}\Delta n_\alpha(t)\rho^{(\alpha)} - \sum_{\nu=0}^{m-1}\Delta k_\nu(t)\varphi^{(\nu)}, \quad (2)$$

где φ — управляемая координата; ρ — управляющее воздействие объекта; b_ν^0 и d_α^0 — номинальные (эталонные) значения коэффициента дифференциального управления объекта; $\Delta b_\nu(t)$ и $\Delta d_\alpha(t)$ — параметрические возмущения, действующие на объект; $\Delta k_\nu(t)$ и $\Delta n_\alpha(t)$ — настраиваемые коэффициенты ОНО; μ — управляющее воздействие ОНО.

Пусть эталонная модель ОНО описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\varphi_{\text{М}}^{(m)} + \sum_{\nu=0}^{m-1} b_\nu^0\varphi_{\text{М}}^{(\nu)} = \sum_{\alpha=0}^{h} d_\alpha^0\mu^{(\alpha)}. \quad (3)$$

Дифференциальное уравнение ОНО относительно ошибки адаптации

$$\varepsilon = \varphi - \varphi_{\text{М}}, \quad (4)$$

и переменных φ и ρ будет иметь вид

$$\varepsilon^{(m)} + \sum_{\nu=0}^{m-1} b_\nu^0 \varepsilon^{(\nu)} =$$
$$= \sum_{\nu=0}^{m-1} [\Delta b_\nu(t) - \Delta k_\nu(t)]\varphi^{(\nu)} +$$
$$+ \sum_{\alpha=0}^{h} [\Delta d_\alpha(t) - \Delta n_\alpha(t)]\rho^{(\alpha)}. \quad (5)$$

В отличие от [1], представим настраиваемые коэффициенты $\Delta n_\alpha(t)$ и $\Delta k_\nu(t)$ состоящими из двух слагаемых:

$$\Delta n_\alpha(t) = \Delta\tilde{n}_\alpha(t) + \beta_\alpha \sigma_\text{п} \rho_{(\alpha)}, \quad (6)$$

$$\Delta k_\nu(t) = \Delta\tilde{k}_\nu(t) + \gamma_\nu \sigma_\text{п} y_{(\nu)}, \quad (7)$$

где

$$\sigma_\text{п} = \sum_{\nu=0}^{m-1} c_{\nu+1,m}\varepsilon^\nu, \quad (8)$$

$\beta_\alpha = \text{const}$, $\gamma_\nu = \text{const}$, $c_{\nu+1,m} = \text{const}$, а $\Delta\tilde{n}_\alpha(t)$ и $\Delta\tilde{k}_\nu(t)$ — некоторые функции, определяющие законы изменения настраиваемых коэффициентов.

Очевидно, что для устойчивой системы

$$\lim_{t\to\infty} \sigma_\text{п} = 0,$$

и, следовательно,

$$\lim_{t\to\infty} n_\alpha(t) = \lim_{t\to\infty} \Delta\tilde{n}_\alpha(t),$$
$$\lim_{t\to\infty} \Delta k_\nu(t) = \lim_{t\to\infty} \Delta\tilde{k}_\nu(t).$$

Обозначим через $y_{\nu+1}$ и $z_{\alpha+1}$ параметрические рассогласования (полагаем $\Delta b_\nu(t) = \text{const}$ и $\Delta d_\alpha(t) = \text{const}$):

$$y_{\nu+1} = \Delta b_\nu(t) - \Delta k_\nu(t), \quad (9)$$

$$z_{\alpha+1} = \Delta d_\alpha(t) - \Delta n_\alpha(t). \quad (10)$$

С учетом (6) и (7) данные выражения можно записать следующим образом:

$$y_{\nu+1}(t) = \tilde{y}_{\nu+1}(t) - \gamma_\nu \sigma_\text{п} \varphi^{(\nu)}, \quad (11)$$

$$z_{\alpha+1}(t) = \tilde{z}_{\alpha+1}(t) - \beta_\alpha \sigma_\text{п} \rho^{(\alpha)}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} \gamma_\nu > 0, \ \nu = \overline{0, m-1}, \\ \beta_\alpha > 0, \ \alpha = \overline{0, h}, \end{cases}$$

где

$$\tilde{y}_{\nu+1} = \Delta b_\nu(t) - \Delta\tilde{k}_\nu(t), \quad (13)$$

$$\tilde{z}_{\alpha+1} = \Delta d_\alpha(t) - \Delta\tilde{n}_\alpha(t) \quad (14)$$

есть искомые функции, определяющие законы (6) и (7) изменения во времени настраиваемых коэффициентов.

После несложных тождественных преобразований (они подробно приведены в [5,6]), уравнение (5) с учетом (6), (7), (13) и (14) можно записать в векторно-матричной форме Коши относительно переменных состояния $x_1 = \varepsilon^{(0)}$, $x_2 = \varepsilon^{(1)}, \ldots, x_{\nu+1} = \varepsilon^{(\nu)}, \ldots, x_m = \varepsilon^{(m-1)}$:

$$\dot{x} = Ax + u, \quad (15)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \ldots & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ldots & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & \ldots & 1 \\ -(b_0^0 + g(t)c_{1m}) & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & -(b_{m-1}^0 + g(t)c_{mm}) \end{bmatrix}_{m\times m}, \quad (16)$$

$$x = [x_1, x_2, \ldots, x_m]^T_{1\times m},$$
$$u = [0, 0, \ldots, f]^T_{1\times m},$$

$$f = \sum_{\nu=0}^{m-1} \tilde{y}_{\nu+1}(t)\varphi^{(\nu)} + \sum_{\alpha=0}^{h} \tilde{z}_{\alpha+1}(t)\rho^{(\alpha)}, \quad (17)$$

$$g(t) = \sum_{\lambda=0}^{m-1} \gamma_\lambda [\varphi^{(\lambda)}]^2 + \sum_{\alpha=0}^{h} \beta_\alpha [\rho^{(\alpha)}]^2. \quad (18)$$

Очевидно, что $g(t) \geq 0$, причем равенство нулю $g(t)$ соответствует случаю, когда одновременно $\varphi(t) = 0$ и $\rho(t) = 0$.

Законы изменения настраиваемых коэффициентов будем задавать неявно в виде

$$\frac{d\Delta\tilde{k}_\nu}{dt} = -\tilde{\psi}_{y\nu},\ \nu = \overline{0, m-1}, \qquad (19)$$

$$\frac{d\Delta\tilde{n}_\alpha}{dt} = -\tilde{\psi}_{z\alpha},\ \alpha = \overline{0, h}. \qquad (20)$$

Векторы $\tilde{\psi}_y = [\tilde{\psi}_{y0}, \tilde{\psi}_{y1}, \ldots, \tilde{\psi}_{y,m-1}]^T$ и $\tilde{\psi}_z = [\tilde{\psi}_{z0}, \tilde{\psi}_{z1}, \ldots, \tilde{\psi}_{z,h}]^T$ находятся из условия асимптотической устойчивости системы, состоящей из ОНО и контура его адаптации, описываемой уравнениями (15), (19) и (20).

В соответствии с прямым методом Ляпунова V выберем квадратичную форму

$$V = \chi x^T P x + \tilde{y}^T I_1 \tilde{y} + \tilde{z}^T I_2 \tilde{z}, \qquad (21)$$

где $\chi = \mathrm{const} > 0$, P — положительно-определенная симметрическая матрица размерности $(m \times m)$; I_1 — единичная матрица размерности $(m \times m)$; I_2 — единичная матрица размерности $(h \times 1) \times (h \times 1)$.

Если искомые функции (компоненты векторов $\tilde{\psi}_y$ и $\tilde{\psi}_z$) взять в виде

$$\begin{cases} \tilde{\psi}_{y,\nu} = \chi\sigma_{\text{и}}\varphi^{(\nu)}, \\ \tilde{\psi}_{z,\alpha} = \chi\sigma_{\text{и}}\rho^{(\alpha)}, \end{cases} \qquad (22)$$

где

$$\sigma_{\text{и}} = \sum_{\nu=1}^{m} p_{\nu m} x_\nu, \qquad (23)$$

а $p_{\nu m}$ — соответствующие элементы матрицы P, то производная функции Ляпунова $\dot{V}$ в силу системы (15), (19) и (20) равна

$$\dot{V} = \chi x^T Q x, \qquad (24)$$

где

$$Q = A^T P + PA. \qquad (25)$$

Поскольку матрицу A можно представить в виде

$$A = A_1 + g(t) A_2, \qquad (26)$$

где

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & 1 \\ -b_0^0 & -b_1^0 & -b_2^0 & \ldots & -b_{m-1}^0 \end{bmatrix}_{m\times m}, \qquad (27)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ -c_{1m} & -c_{2m} & -c_{3m} & \ldots & -c_{mm} \end{bmatrix}_{m\times m}, \qquad (28)$$

то матрица Q соответственно примет вид

$$Q = Q_1 + g(t) Q_2, \qquad (29)$$

где

$$Q_1 = A_1^T P + PA_1, \qquad (30)$$

$$Q_2 = A_2^T P + PA_2. \qquad (31)$$

С учетом (29) производная функции Ляпунова V' примет вид

$$\dot{V} = x^T Q_1 x + g(t) x^T Q_2 x. \qquad (32)$$

Так как все корни характеристического уравнения, описывающего движение эталонной модели, лежат в левой полуплоскости, то, согласно [7], при выполнении определенных условий, накладываемых на коэффициенты матрицы P, любой положительно-определенной функции $x^T P x$ можно поставить в соответствие отрицательно-определенную квадратичную форму $x^T Q_1 x$. В [5, 6] показано, что при выполнении определенных условий, накладываемых на коэффициенты матрицы P и коэффициенты матрицы A_2, квадратичная форма $x^T Q_2 x$ будет отрицательно-знакопостоянной функцией.

В этом случае $\dot{V}$, согласно (32), будет представлять собой сумму отрицательно-определенной функции $x^T Q_1 x$ и отрицательно-знакопостоянной функции $g(t) x^T Q_2 x$, т. е. производная $\dot{V}$ также является отрицательно-знакоопределенной функцией.

С учетом (6), (7), (19), (20) и (22) законы изменения настраиваемых коэффициентов (алгоритмы адаптации) примут вид:

$$\Delta k_\nu(t) = \chi \int_0^t \sigma_{\text{и}}\varphi^{(\nu)}(t)dt + \gamma_\nu \sigma_{\text{п}}\varphi^{(\nu)}(t), \quad (33)$$

$$\Delta n_\alpha(t) = \chi \int_0^t \sigma_{\text{и}}\rho^{(\alpha)}(t)dt + \beta_\alpha \sigma_{\text{п}}\rho^{(\alpha)}(t). \quad (34)$$

Как видно, в отличие от известных [1], полученные алгоритмы наряду с интегральными составляющими

$$\chi \int_0^t \sigma_{\text{и}} \varphi^{(\nu)}(t)\,dt,$$

$$\chi \int_0^t \sigma_{\text{и}} \rho^{(\alpha)}(t)\,dt$$

содержат пропорциональные составляющие $\gamma_\nu \sigma_\text{п} \varphi^{(\nu)}(t)$ и $\beta_\alpha \sigma_\text{п} \rho^{(\alpha)}(t)$, что существенно расширяет возможности придания системе заданной высокой точности отработки параметрических возмущений.

2. ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ АДАПТАЦИИ

Как следует из (33) и (34), реализация как интегральных (при $\gamma_\nu = \beta_\alpha = 0$), так и пропорционально-интегральных алгоритмов адаптивного параметрического управления требует большого числа интеграторов (равного числу настраиваемых коэффициентов) в контуре параметрического управления. В ряде случаев это может привести к недопустимому снижению запасов устойчивости системы.

Покажем, что упрощение алгоритмов адаптации (33) и (34) можно произвести, исключив из них интегральную составляющую, т.е. положив $\chi = 0$. Действительно, в этом случае $\Delta\tilde{n}_\alpha(t) = \Delta\tilde{k}_\nu(t) = 0$, $\tilde{y}_{\nu+1}(t) = \Delta b_\nu(t)$ и $\tilde{z}_{\alpha+1}(t) = \Delta d_\alpha(t)$. Следовательно, движение системы будет полностью описываться уравнением (15) с той разницей, что функция $f(t)$, в отличие от (17), равна

$$f(t) = \sum_{\nu=0}^{m-1} \Delta b_\nu(t) \varphi^{(\nu)}(t) + \\ + \sum_{\alpha=0}^{h} \Delta d_\alpha(t) \rho^{(\alpha)}(t). \quad (35)$$

Очевидно, что в этом случае $f(t)$ можно рассматривать как внешнее возмущение, действующее на систему. Поскольку $|\Delta b_\nu(t)|$, $|\Delta d_\alpha(t)|$, $|\varphi^{(\nu)}(t)|$ и $|\rho^{(\alpha)}(t)|$ являются ограниченными по модулю функциями, то $f(t)$ также является ограниченной по модулю функцией. В этом случае, согласно [1], при выполнении свойства асимптотической устойчивости для системы при $f(t) = 0$ обеспечивается также ее устойчивость (не асимптотическая) и при $f(t) \neq 0$.

В качестве функции Ляпунова для системы (15) с учетом (35) можно взять

$$V = x^T P x, \quad (36)$$

причем производная функции Ляпунова в силу системы (15) равна

$$\dot{V} = x^T Q x, \quad (37)$$

где матрица Q определяется выражениями (29)–(31).

Отсюда следует, что условия устойчивости системы с пропорциональными алгоритмами адаптации

$$\Delta n_\nu(t) = \gamma_\nu \sigma_\text{п} \varphi^{(\nu)}(t), \quad (38)$$

$$\Delta k_\alpha(t) = \beta_\nu \sigma_\text{п} \rho^{(\alpha)}(t) \quad (39)$$

совпадают с условиями асимптотической устойчивости системы с пропорционально-интегральными алгоритмами адаптации.

3. РЕЛЕЙНЫЕ АЛГОРИТМЫ АДАПТАЦИИ

Если положить коэффициенты γ_ν и β_ν достаточно большими (в пределе $\gamma_\nu = \infty$ и $\beta_\nu = \infty$), то можно получить релейные алгоритмы адаптации вида

$$\Delta k_\nu(t) = x_{1\nu} \operatorname{sign}[\sigma_\text{п} \varphi^{(\nu)}(t)], \quad (40)$$

$$\Delta n_\alpha(t) = x_{2\alpha} \operatorname{sign}[\sigma_\text{п} \rho^{(\alpha)}(t)]. \quad (41)$$

Работоспособность системы с релейными алгоритмами адаптации вида (40) и (41) вытекает из того, что в этом случае $g(t)$ является достаточно большой величиной (в пределе $g(t) = \infty$) и матрица $Q = g(t) Q_2$ и производная функции Ляпунова равна

$$\dot{V} = g(t) x^T Q_2 x, \quad (42)$$

т. е. является отрицательно-знакопостоянной функцией при выполнении определенных условий, о которых было изложено выше.

Отметим, что возможность использования релейных алгоритмов адаптации применительно к рассматриваемому классу систем впервые показана в работе [1] как предельный вариант (при $\chi = \infty$) интегральных алгоритмов адаптации.

Очевидно, что при использовании пропорциональных и релейных алгоритмов адаптации не будет выполняться свойство асимптотической устойчивости системы: система будет просто устойчива и, как следствие, действующие параметрические возмущения будут обрабатываться с некоторой статической ошибкой. Однако этот недостаток в значительной степени компенсируется существенным повышением запасов устойчивости и быстродействия системы.

В заключение отметим, что конкретные значения коэффициентов, входящих в алгоритмы адаптации (33) и (34), можно определить с помощью линеаризированных эквивалентов контуров адаптации, предложенных в [8–10].

4. ПРИМЕР

Пусть дифференциальное уравнение ОНО для двухвального газотурбинного двигателя (ГТД) в составе авиационной силовой установки на одном из режимов ее работы имеет вид[1]:

$$\frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} + b_1^0\frac{d\varphi(t)}{dt} + (b_0^0 - \Delta b_0(t))\varphi(t) = (d_0^0 - \Delta d(t))\rho(t), \quad (43)$$

$$d_0^0\rho(t) = d_0^0\mu(t) - (\Delta k_0(t)\varphi(t) + \Delta n_0(t)\rho(t)), \quad (44)$$

где $\varphi(t)$ — частота вращения турбокомпрессора; $\rho(t)$ — расход топлива в основную камеру сгорания; $\mu(t)$ — сигнал на входе исполнительного механизма–дозатора топлива (передаточная функция исполнительного механизма полагается равной 1) в основную камеру сгорания; $b_1^0 = 4,27$; $b_0^0 = 4,67$ и $d_0^0 = 9,34$ — номинальные значения коэффициентов дифференциального уравнения ОНО; $\Delta b_0^0(t) = 2{\bullet}1[t]$ и $\Delta d_0^0(t) = 4{\bullet}1[t]$ — параметрические возмущения.

С помощью линеаризованных эквивалентов контуров адаптации были определены численные значения коэффициентов, входящих в интегральные, пропорционально-интегральные, пропорциональные и релейные алгоритмы адаптации. Полученные алгоритмы имеют вид:

- *интегральные алгоритмы:*

$$\Delta k_0(t) = 50\int_0^t \sigma_{\text{и}}\varphi(t)\,dt, \quad (45)$$

$$\Delta n_0(t) = 50\int_0^t \sigma_{\text{и}}\rho(t)\,dt; \quad (46)$$

- *пропорционально-интегральные алгоритмы:*

$$\Delta k_0(t) = 50\int_0^t \sigma_{\text{и}}\varphi(t)\,dt + 50\sigma_{\text{п}}\varphi(t), \quad (47)$$

$$\Delta n_0(t) = 50\int_0^t \sigma_{\text{и}}\rho(t)\,dt + 50\sigma_{\text{п}}\rho(t); \quad (48)$$

- *пропорциональные алгоритмы:*

$$\Delta k_0(t) = 100\sigma_{\text{п}}\varphi(t), \quad (49)$$

$$\Delta n_0(t) = 100\sigma_{\text{п}}\rho(t); \quad (50)$$

- *релейные алгоритмы:*

$$\Delta k_0(t) = 10\,\mathrm{sign}\,[\sigma_{\text{п}}\varphi(t)], \quad (51)$$

$$\Delta n_0(t) = 10\,\mathrm{sign}\,[\sigma_{\text{п}}\rho(t)]. \quad (52)$$

Здесь всюду $\sigma_{\text{и}} = \sigma_{\text{п}} = \dot{\varepsilon} + \varepsilon$.

На рис. 1 приведены структурные схемы БСНС управления рассматриваемым объектом, использующие интегральные, пропорционально-интегральные, пропорциональные и релейные алгоритмы адаптации.

На рис. 2 приведены графики изменения ошибки адаптации $\varepsilon(t)$ при применении интегральных (обозначен буквой И) и пропорционально-интегральных (обозначен буквами ПИ) алгоритмов адаптации, на рис. 3 — графики изменения ошибки адаптации $\varepsilon(t)$ при применении пропорциональных (обозначен буквой П) и релейных (обозначен буквой Р) алгоритмов адаптации. При этом управляющее воздействие $\mu(t) = \mathrm{sign}\,(\sin t)$.

Из рис. 2 и 3 видно, что пропорционально-интегральные алгоритмы адаптации обладают существенным преимуществом по сравнению с интегральными с точки зрения динамической точности, а по сравнению с пропорциональными и релейными обеспечивают

[1] Для простоты пренебрегаем влиянием нуля в динамическом операторе объекта управления.

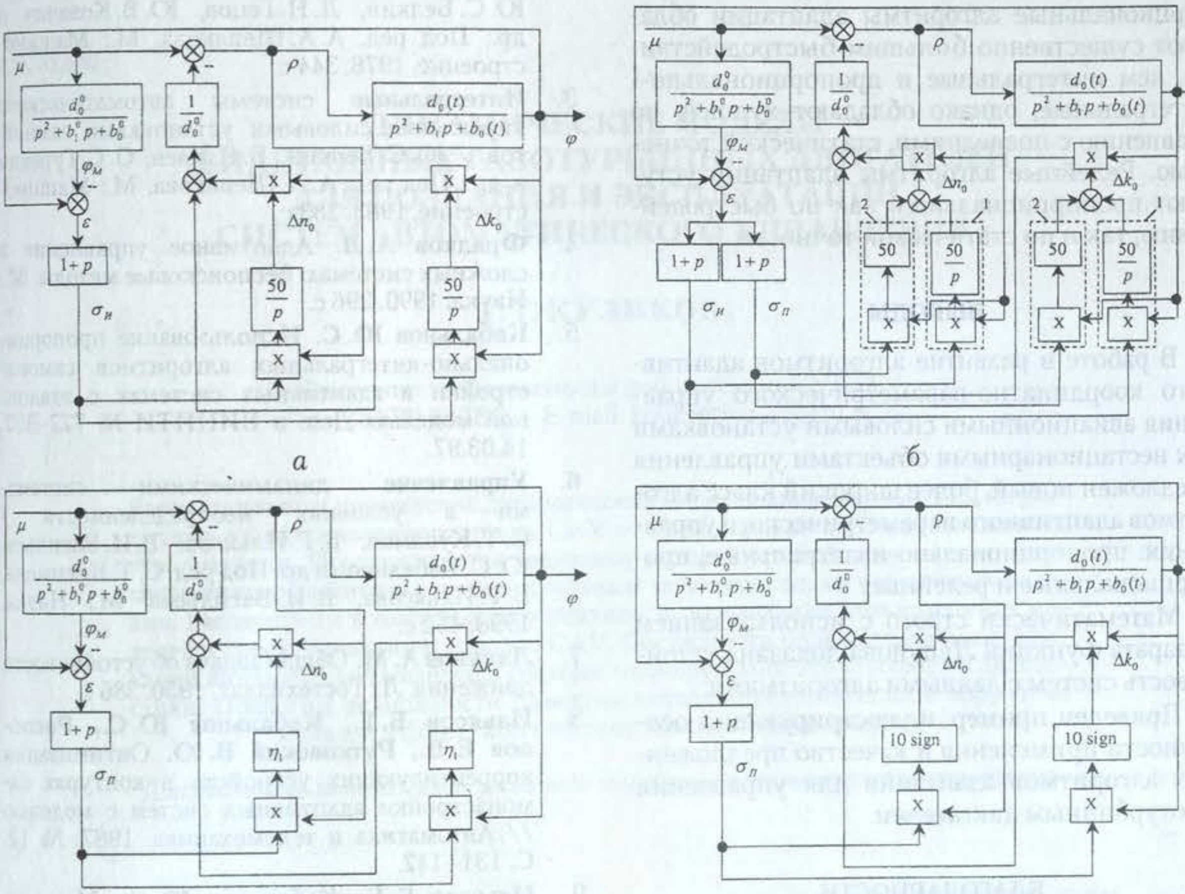

Рис. 1. Структурные схемы БСНС управления объектом, использующие интегральные (*а*), пропорционально-интегральные (*б*), пропорциональные (*в*) и релейные (*г*) алгоритмы адаптации

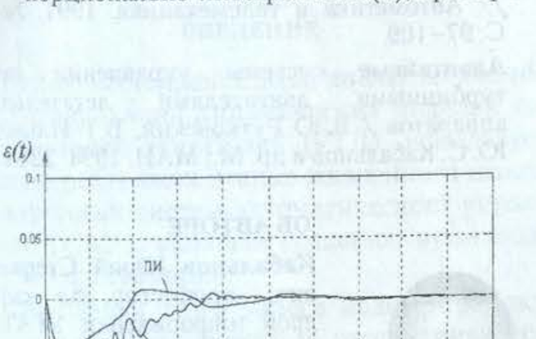

Рис. 2. Изменение ошибки адаптации $\varepsilon(t)$ при применении интегральных (И) и пропорционально-интегральных (ПИ) алгоритмов адаптации

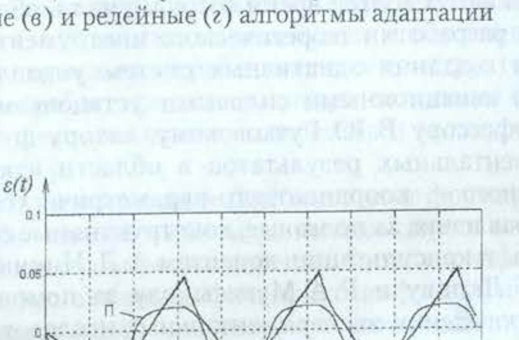

Рис. 3. Изменение ошибки адаптации $\varepsilon(t)$ при применении пропорциональных (П) и релейных (Р) алгоритмов адаптации

к тому же и нулевую статическую ошибку отработки параметрических возмущений. Пропорциональные алгоритмы адаптации обладают существенно бóльшим быстродействием, чем интегральные и пропорционально-интегральные, однако обладают худшей, по сравнению с последними, статической точностью. Релейные алгоритмы адаптации уступают пропорциональным как по быстродействию, так и по статической точности.

ВЫВОДЫ

В работе в развитие алгоритмов адаптивного координатно-параметрического управления авиационными силовыми установками как нестационарными объектами управления предложен новый, более широкий класс алгоритмов адаптивного параметрического управления: пропорционально-интегральные, пропорциональные и релейные.

Математически строго с использованием аппарата функций Ляпунова доказана устойчивость систем с данными алгоритмами.

Приведен пример, иллюстрирующий особенности применения и качество предложенных алгоритмов адаптации для управления газотурбинным двигателем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает свою глубокую признательность профессору Б. Г. Ильясову, с которым автор долгое время сотрудничал в области разработки теоретического инструментария создания адаптивных систем управления авиационными силовыми установками, профессору В. Ю. Рутковскому, автору фундаментальных результатов в области адаптивного координатного-параметрического управления, за полезные, конструктивные советы и консультации, доцентам А. Д. Никину, А. Г. Лютову и Р. А. Мунасыпову за помощь в проведении экспериментальных исследований и активное обсуждение полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петров Б. Н., Рутковский В. Ю., Земляков С. Д.** Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами. М.: Наука, 1980. 244 с.
2. **Теория** автоматического управления силовыми установками летательных аппаратов / Ю. С. Белкин, Л. Н. Гецов, Ю. В. Ковачич и др.; Под ред. А. А. Шевякова. М.: Машиностроение, 1976. 344 с.
3. **Интегральные** системы автоматического управления силовыми установками самолетов. / Ю. С. Белкин, Б. В. Боев, О. С. Гуревич и др.; Под ред. А. А. Шевякова. М.: Машиностроение, 1983. 283 с.
4. **Фрадков А. Л.** Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. М.: Наука, 1990. 296 с.
5. **Кабальнов Ю. С.** Использование пропорционально-интегральных алгоритмов самонастройки в адаптивных системах с эталонной моделью. Деп. в ВИНИТИ № 777-В97, 14.03.97.
6. **Управление** динамическими системами в условиях неопределенности / С. Т. Кусимов, Б. Г. Ильясов, В. И. Васильев, Ю. С. Кабальнов и др. Под ред. С. Т. Кусимова, Б. Г. Ильясова, В. И. Васильева. М.: Наука, 1998. 452 с.
7. **Ляпунов А. М.** Общая задача об устойчивости движения. Л.: Гостехиздат, 1950. 386 с.
8. **Ильясов Б. Г., Кабальнов Ю. С., Распопов Е. В., Рутковский В. Ю.** Оптимизация корректирующих устройств в контурах самонастройки адаптивных систем с моделью // Автоматика и телемеханика. 1987. № 12. С. 131–142.
9. **Ильясов Б. Г., Кабальнов Ю. С., Мунасыпов Р. А., Рутковский В. Ю.** Оптимизация корректирующих устройств в контурах самонастройки адаптивных систем с моделью на основе их линеаризированных эквивалентов // Автоматика и телемеханика. 1991. № 7. С. 97–109.
10. **Адаптивные** системы управления газотурбинными двигателями летательных аппаратов / В. Ю. Рутковский, Б. Г. Ильясов, Ю. С. Кабальнов и др. М.: МАИ. 1994. 224 с.

ОБ АВТОРЕ

Кабальнов Юрий Степанович, профессор, зав. кафедрой информатики УГАТУ. Дипл. инженер электронной техники (УАИ, 1971), д-р техн. наук по управлению в технических системах (УГАТУ, 1993). Исследования в области адаптивного и интеллектуального управления сложными техническими объектами.