

Адаптивное управление с модифицированной эталонной моделью в условиях параметрической неопределенности и ограничения на входное воздействие

Зуи Хань Нгуен, В. В. Путов, В. Н. Шелудько, Т. Л. Русяева

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

khanhnguyen.mta@gmail.com

Аннотация. В статье предлагается новый алгоритм адаптивного управления с модифицированной эталонной моделью для нелинейных объектов в условиях параметрической неопределенности и ограничения на входное воздействие. Исходная система преобразуется в новую расширенную систему с нижней треугольной формой, состоящую из двухкаскадных подсистем. Синтез виртуального управления для первой подсистемы осуществляется на основе адаптивного управления с модифицированной эталонной моделью, что позволяет компенсировать параметрическую неопределенность. Параметры виртуального управления вычисляются средством линейных матричных неравенств (ЛМН). На основе разработанного виртуального управления, динамического поверхностного управления (упрощенного бэкстеппинга) и барьерной функции Ляпунова синтезируется закон управления с компенсацией ограничения на входное воздействие для второй подсистемы. Устойчивость замкнутой системы с разработанным алгоритмом адаптивного управления доказывается методом функций Ляпунова. Результаты численного моделирования демонстрируют высокую эффективность предложенного алгоритма управления по сравнению с традиционным адаптивным управлением с эталонной моделью.

Ключевые слова: адаптивное управление; модифицированная эталонная модель; динамическое поверхностное управление; нелинейные системы; параметрическая неопределенность; ограничения на входное воздействие; линейные матричные неравенства (ЛМН); барьерная функция Ляпунова; моделирование

I. ВВЕДЕНИЕ

На практике системы управления часто сталкиваются с неопределенностью параметров и ограничениями входных сигналов, что создает серьезные проблемы для традиционных стратегий управления. Хотя классическая схема адаптивного управления с эталонной моделью обеспечивает асимптотическую устойчивость и высокое качество управления в условиях параметрической неопределенности [1], [2], данный подход имеет ряд недостатков. К ним относятся высокочастотные колебания управляющих сигналов, возникающие при больших коэффициентах усиления в процессе адаптации, а также чувствительность к внешним возмущениям, приводящая к неограниченному росту адаптивных параметров. Для решения указанных проблем возможно применение модифицированной эталонной модели [3], [4], а также использование ϵ -модификации [5] или σ -модификации [6] в законе адаптации.

Отдельную серьезную проблему представляет ограничение управляющих сигналов, которое может вызывать значительное ухудшение показателей качества системы, нежелательные колебания или даже приводить к потере устойчивости системы управления. Современные исследования предлагают различные решения данной проблемы, включая положительную μ -модификацию [7], анти-виндап схему [8], использование вспомогательных динамических систем [9] и применение барьерных функций Ляпунова [10]. Разработка методов адаптивного управления, способных одновременно решать проблемы неопределенности параметров и ограниченности управляющих воздействий, продолжает оставаться важной и актуальной научной задачей.

В данной работе предложен новый алгоритм адаптивного управления для нелинейных объектов, работоспособный в условиях параметрической неопределенности и ограничений на управляющие сигналы. Разработанный метод сочетает адаптивное управление с модифицированной эталонной моделью, метод динамического поверхностного управления (упрощенный метод бэкстеппинга) и аппарат барьерных функций Ляпунова. Такая комбинация обеспечивает значительное улучшение динамических характеристик системы и точности управления в указанных условиях по сравнению с классической схемой адаптивного управления с эталонной моделью.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим нелинейные объекты следующего вида:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}[u(t) + \mathbf{W}\mathbf{f}(\mathbf{x})], \quad (1)$$

где $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния; $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ и $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ – неизвестные постоянные матрицы, удовлетворяющие условию управляемости, $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^q$ – вектор известных функций; $\mathbf{W}^T \in \mathbb{R}^q$ – вектор неизвестных постоянных параметров; $u \in \mathbb{R}$ – управляющий сигнал системы; $|u| \leq u_M$, где $u_M > 0$ – априори известная константа, определяющая пределы управляющего сигнала.

Целью управления является синтез адаптивного закона управления $u(t)$, обеспечивающего в условиях параметрической неопределенности и ограничения на управляющий сигнал выполнение следующих требований: 1) $|u(t)| \leq u_M$ для всех $t \geq 0$; 2) сходимость

вектора $\mathbf{x}(t)$ к окрестности желаемого вектора $\mathbf{x}_m(t)$; 3) робастная устойчивость замкнутой системы.

III. СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Пусть заданы матрицы $\mathbf{A}_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ($\mathbf{A}_m$ – гурвицева) и $\mathbf{B}_m \in \mathbb{R}^n$. Тогда существуют матрица $\mathbf{K}_1 \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ и коэффициент $k_0 \in \mathbb{R}$ такие, что выполняются равенства

$$\mathbf{B} = k_0 \mathbf{B}_m; \quad \mathbf{A} = \mathbf{A}_m + \mathbf{B} \mathbf{K}_1 \quad (2)$$

Рассмотрим модифицированную эталонную модель, описываемую следующей системой [4]:

$$\dot{\mathbf{x}}_m(t) = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{B}_m r(t) + \mathbf{K}_e \mathbf{e}(t), \quad (3)$$

где $\mathbf{x}_m \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния модифицированной эталонной модели; $r(t) \in \mathbb{R}$ – командный сигнал; $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_m(t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор ошибок слежения; $\mathbf{K}_e \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – постоянная матрица.

Пусть $k_2 = -k_0^{-1} \in \mathbb{R}$; $k_u = u_M$; $z = u$; $\dot{z} = v$; $|z(t)| \leq k_u$. Тогда учитывая (1) и (2), получим расширенную систему с каскадной структурой вида

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_m \mathbf{x} + \mathbf{B}_m r + k_0 \mathbf{B}_m [z + \mathbf{K}_1 \mathbf{x}(t) + k_2 r + \mathbf{W} \mathbf{f}(\mathbf{x})]; \\ \dot{z} = v. \end{cases} \quad (4)$$

Поставленная цель управления преобразуется к синтезу закона управления $v(t)$ для расширенной системы (4), обеспечивающего выполнение следующих требований: 1) ограничение переменной $z(t)$ заданным условием $|z(t)| \leq k_u$; 2) сходимости $\mathbf{x}(t)$ к $\mathbf{x}_m(t)$; 3) робастная устойчивость замкнутой системы. Тогда фактический закон управления $u(t)$ системы (1) можно получить с помощью следующего выражения:

$$u(t) = u(0) + \int_0^t v(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

Данный подход позволяет избежать трудностей, связанных с непосредственным синтезом управления $u(t)$ при наличии ограничения на управляющий сигнал.

Шаг 1: синтез закона виртуального управления для первой подсистемы в (4). Пусть $\hat{\mathbf{K}}_1$, $\hat{k}_2$, $\hat{\mathbf{W}}$ – оценки параметров $\mathbf{K}_1$, k_2 , $\mathbf{W}$; $\tilde{\mathbf{K}}_1 = \hat{\mathbf{K}}_1 - \mathbf{K}_1$, $\tilde{k}_2 = \hat{k}_2 - k_2$, $\tilde{\mathbf{W}} = \hat{\mathbf{W}} - \mathbf{W}$ – ошибки оценивания.

Из (3) и (4) получим динамику ошибок слежения

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A}_m - \mathbf{K}_e) \mathbf{e} + k_0 \mathbf{B}_m [z + \mathbf{K}_1 \mathbf{x}(t) + k_2 r + \mathbf{W} \mathbf{f}(\mathbf{x})]. \quad (6)$$

Учитывая цель управления, выбираем закон виртуального управления следующего вида:

$$\alpha_0 = -\hat{\mathbf{K}}_1 \mathbf{x} - \hat{k}_2 r - \hat{\mathbf{W}} \mathbf{f}(\mathbf{x}). \quad (7)$$

Пропускаем α_0 через фильтр первого порядка вида

$$\tau \dot{\alpha} + \alpha = (k_u - \gamma_0) \cdot \tanh(\alpha_0), \quad (8)$$

где α – отфильтрованный сигнал; $\tau > 0$ – постоянная времени фильтра; $\gamma_0 > 0$ – малое положительное число.

Пусть $\varepsilon = \alpha - \alpha_0$; $s_1 = z - \alpha$, тогда $z = s_1 + \varepsilon + \alpha_0$. Для нахождения алгоритма адаптации для виртуального управления (7) рассмотрим функцию Ляпунова следующего вида:

$$V_1 = \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{e} + |k_0| \left(\gamma_1^{-1} \tilde{\mathbf{K}}_1 \tilde{\mathbf{K}}_1^T + \gamma_2^{-1} \tilde{k}_2^2 + \gamma_3^{-1} \tilde{\mathbf{W}} \tilde{\mathbf{W}}^T \right), \quad (9)$$

где $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – симметричная положительно определенная матрица; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 > 0$ – положительные числа.

Дальше найдем ее производную по времени как

$$\dot{V}_1 = -\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} - 2k_0 \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_m (\tilde{\mathbf{K}}_1 \mathbf{x} + \tilde{k}_2 r + \tilde{\mathbf{W}} \mathbf{f}) + 2k_0 \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_m (s_1 + \varepsilon) + 2|k_0| \left(\gamma_1^{-1} \tilde{\mathbf{K}}_1 \dot{\tilde{\mathbf{K}}}_1^T + \gamma_2^{-1} \tilde{k}_2 \dot{\tilde{k}}_2 + \gamma_3^{-1} \tilde{\mathbf{W}} \dot{\tilde{\mathbf{W}}}^T \right),$$

где $\mathbf{Q} = -[(\mathbf{A}_m - \mathbf{K}_e)^T \mathbf{P} + \mathbf{P}(\mathbf{A}_m - \mathbf{K}_e)] < 0$.

С помощью этого выражения выбираем адаптивный закон настройки параметров вида

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{K}}}_1 = \gamma_1 \text{sign}(k_0) (\mathbf{B}_m^T \mathbf{P} \mathbf{e} \mathbf{x}^T - \sigma_1 \hat{\mathbf{K}}_1); \\ \dot{\hat{k}}_2 = \gamma_2 \text{sign}(k_0) (\mathbf{B}_m^T \mathbf{P} \mathbf{e} r - \sigma_2 \hat{k}_2); \\ \dot{\hat{\mathbf{W}}} = \gamma_3 \text{sign}(k_0) (\mathbf{B}_m^T \mathbf{P} \mathbf{e} \mathbf{f}^T - \sigma_3 \hat{\mathbf{W}}), \end{cases} \quad (10)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 > 0$ – малые положительные числа.

Тогда получаем следующее уравнение:

$$\dot{V}_1 = -\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} + 2k_0 \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_m (s_1 + \varepsilon) - 2|k_0| \left(\sigma_1 \tilde{\mathbf{K}}_1 \hat{\mathbf{K}}_1^T + \sigma_2 \tilde{k}_2 \hat{k}_2 + \sigma_3 \tilde{\mathbf{W}} \hat{\mathbf{W}}^T \right). \quad (11)$$

Видно, что если $s_1(t)$ и $\varepsilon(t)$ стремятся к нулю, то $\mathbf{e}(t)$ также стремится к нулевой окрестности.

Шаг 2: синтез закона управления $v(t)$ системы (4). Для синтеза управления с учетом заданного ограничения переменной $z(t)$ предлагается новая барьерная функция Ляпунова вида $V_{BLF} = L^2(z, \alpha, \varepsilon)$, где

$$L(z, \alpha, \varepsilon) = \ln \left(\frac{k_u + z}{k_u - z} \right) - \ln \left(\frac{k_u + \alpha}{k_u - \alpha} \right) - k_\varepsilon \varepsilon, \quad k_\varepsilon > 0. \quad (12)$$

Производная по времени функции (12), полученная с учетом (8), имеет вид

$$\dot{L}(z, \alpha, \varepsilon) = \frac{2k_u}{k_u^2 - z^2} v - g(\alpha, \varepsilon), \quad (13)$$

где $g(\alpha, \varepsilon) = \frac{2k_u (k_u - \gamma_0) \cdot \tanh(\alpha_0) - \alpha}{\tau (k_u^2 - \alpha^2)} + k_\varepsilon \dot{\varepsilon}$,

аппроксимацию функции $\dot{\varepsilon}$ можно получить с помощью фильтром первого порядка.

Рассмотрим следующую функцию Ляпунова на втором шаге синтеза управления:

$$V_2 = V_1 + \frac{|k_0|}{2} V_{BLF} + \frac{\varepsilon^2}{2}. \quad (14)$$

Учитывая (11)–(13), получим ее производную в виде

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} + 2k_0 \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_m (s_1 + \varepsilon) - \\ & -2|k_0| \left(\sigma_1 \tilde{\mathbf{K}}_1 \hat{\mathbf{K}}_1^T + \sigma_2 \tilde{k}_2 \hat{k}_2 + \sigma_3 \tilde{\mathbf{W}} \hat{\mathbf{W}}^T \right) + \\ & + |k_0| L \left[\frac{2k_u}{k_u^2 - z^2} v - g(\alpha, \dot{\varepsilon}) \right] + \varepsilon \dot{\varepsilon}. \end{aligned} \quad (15)$$

Спроектируем закон управления $v(t)$ для расширенной системы (4) как

$$v(t) = \frac{k_u^2 - z^2}{2k_u} \left[g(\alpha, \dot{\varepsilon}) - k_L L - k_u \text{sign}(L) \cdot \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_m \right], \quad (16)$$

где $k_L > 0$ – положительное число.

Имеем следующие неравенства:

$$\begin{cases} |s_1| \leq \frac{k_u}{2} |L| + \frac{k_u k_\varepsilon}{2} |\varepsilon|; \\ 2\mu_0 |k_0 \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_m| |\varepsilon| \leq \mu_1 |\mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_m|^2 + \frac{k_0^2 \mu_0^2}{\mu_1} \varepsilon^2; \\ \varepsilon \dot{\varepsilon} \leq \frac{1}{2\mu_2} \varepsilon^2 + \frac{\mu_2}{2} \delta^2, \end{cases} \quad (17)$$

где $\mu_0, \mu_1, \mu_2, \delta > 0$ – положительные числа;

$$\mu_0 = 1 + \frac{k_u k_\varepsilon}{2}; \quad \delta \geq \left| \frac{(k_u - \gamma_0) \cdot \tanh(\alpha_0) - \alpha}{\tau} - \dot{\alpha}_0 \right|.$$

Учитывая (8), (15)–(17) получим неравенство вида

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq & -\left[\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) - \mu_1 \|\mathbf{P} \mathbf{B}_m\|^2 \right] \|\mathbf{e}\|^2 - \\ & -|k_0| k_L L^2 - \left[\frac{1}{\tau} - \frac{k_0^2 \mu_0^2}{\mu_1} - \frac{1}{2\mu_2} \right] \varepsilon^2 - \\ & -|k_0| \left(\sigma_1 \|\tilde{\mathbf{K}}_1\|^2 + \sigma_2 \tilde{k}_2^2 + \sigma_3 \|\tilde{\mathbf{W}}\|^2 \right) + \Delta, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{где } \Delta = \left[|k_0| \left(\sigma_1 \|\mathbf{K}_1\|^2 + \sigma_2 k_2^2 + \sigma_3 \|\mathbf{W}\|^2 \right) + \mu_2 \delta^2 / 2 \right] > 0.$$

Выбираем параметры в (18) и число β так, чтобы

$$\begin{cases} \lambda_{\min}(\mathbf{Q}) - \mu_1 \|\mathbf{P} \mathbf{B}_m\|^2 > 0; \quad \frac{1}{\tau} - \frac{k_0^2 \mu_0^2}{\mu_1} - \frac{1}{2\mu_2} > 0; \\ \beta = \min \left\{ \frac{\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) - \mu_1 \|\mathbf{P} \mathbf{B}_m\|^2}{\lambda_{\max}(\mathbf{P})}, \frac{2}{\tau} - \frac{2k_0^2 \mu_0^2}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2} \right\}. \end{cases} \quad (19)$$

Следовательно, из (9), (12), (14), (18) и (19) имеем

$$\dot{V}_2 \leq -\beta V_2 + \Delta.$$

Таким образом, все сигналы замкнутой системы (4) с адаптивным управлением (5), (7), (10), (16) ограничены и экспоненциально сходятся к наибольшему инвариантному множеству, размер которого является регулируемым. Это означает, что можно сделать $\mathbf{e}$, L и ε достаточно малыми. Функция (12) показывает, что

если $z(0)$ и $\alpha(0)$ лежат в интервале $[-k_u, k_u]$, то $z(t)$ и $\alpha(t)$ также остаются в этом интервале. Следовательно, $u(t)$ всегда удовлетворяет условию $|u(t)| \leq u_M$.

Матрицы $\mathbf{P}$ и $\mathbf{K}_e$ спроектированы таким образом, чтобы минимизировать $\mathbf{e}$, L и ε с использованием следующего линейного матричного неравенства (ЛМН):

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \mathbf{P} + \mathbf{A}_m^T \mathbf{P} + \mathbf{M}^T + \mathbf{P} \mathbf{A}_m + \mathbf{M} & \mathbf{P} \mathbf{B}_m \\ \mathbf{B}_m^T \mathbf{P} & -\rho_2 \end{bmatrix} < 0, \quad (20)$$

где $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{n \times n}$; ρ_1, ρ_2 – заданные положительные числа.

Решение ЛМН (20), представленное матрицами $\mathbf{P}$ и $\mathbf{M}$, может быть получено с помощью LMI Toolbox в MATLAB. Матрица $\mathbf{K}_e$ вычисляется как $\mathbf{K}_e = -\mathbf{P}^{-1} \mathbf{M}$.

IV. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В этом разделе проведено моделирование нелинейной системы второго порядка со следующими

параметрами: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -10 & -3 \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$; $u_M = 10$;

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} -2 & -1.25 & 3 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_1^2 x_2 & x_2 |x_2| & x_1^3 \end{bmatrix}^T.$$

Параметры предложенного адаптивного управления

выбираются как $\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -20 & -9 \end{bmatrix}$; $\mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 20 \end{bmatrix}$;

$$\mathbf{K}_e = \begin{bmatrix} 75.5 & 0.245 \\ 9.6115 & 94.2245 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1.5784 & 0 \\ 0 & 0.0402 \end{bmatrix}; \quad \tau = 10^{-4};$$

$$k_L = 100; \quad k_\varepsilon = 1.5; \quad \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 10^{-4}; \quad \gamma_0 = 10^{-3}; \quad \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 10^3.$$

Параметры традиционного адаптивного управления с эталонной моделью, используемого для сравнения с предложенным алгоритмом, выбираются следующим образом $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 10^3$; $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 10^{-4}$;

$$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -20 & -9 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 20 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 8.125 & 0.625 \\ 0.625 & 0.125 \end{bmatrix}.$$

Результаты моделирования показаны на рис. 1–4, где «AW-M-MRAC» – предложенное в статье адаптивное управление с модифицированным эталонным моделью и компенсацией эффекта насыщения; «M-MRAC» – адаптивные управления с модифицированным эталонным моделью из [4]; «MRAC» – традиционное адаптивное управление с эталонной моделью из [1].

Анализ этих результатов показывает, что в условиях параметрической неопределенности и ограничения управляющего сигнала адаптивные управления с модифицированной эталонной моделью превосходят традиционное адаптивное управление как по динамическим характеристикам, так и по точности слежения. Особенно выделяется предложенное управление, демонстрирующее наилучшие показатели качества управления. Проблемы традиционного управления проявляются в генерации чрезмерно большого управляющего сигнала. При условии его насыщения это приводит к существенному искажению фактического управляющего сигнала, появлению недопустимых высокочастотных колебаний и

значительному ухудшению качества управления. Адаптивное управление из [4], хотя снижает амплитуду управляющего сигнала, не гарантирует его соблюдение в допустимых пределах, что ухудшает качество управления. В отличие от этого, предложенное адаптивное управление обеспечивает соблюдение заданного ограничения на управляющее воздействие, устранение высокочастотных колебаний и сохранение высокой точности слежения.

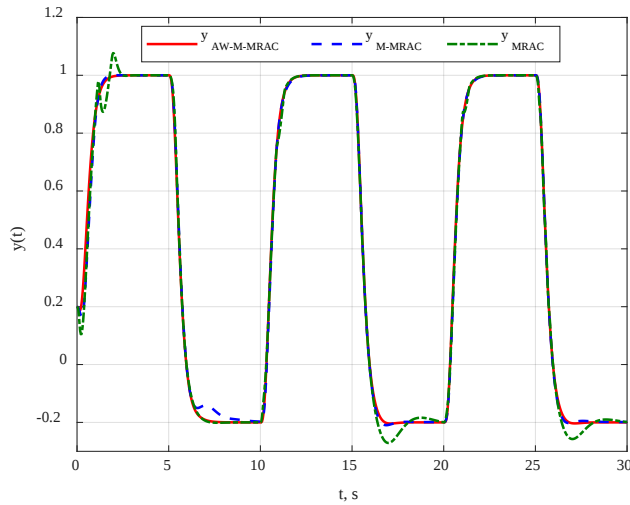


Рис. 1. Графики выходных сигналов сравниваемых систем

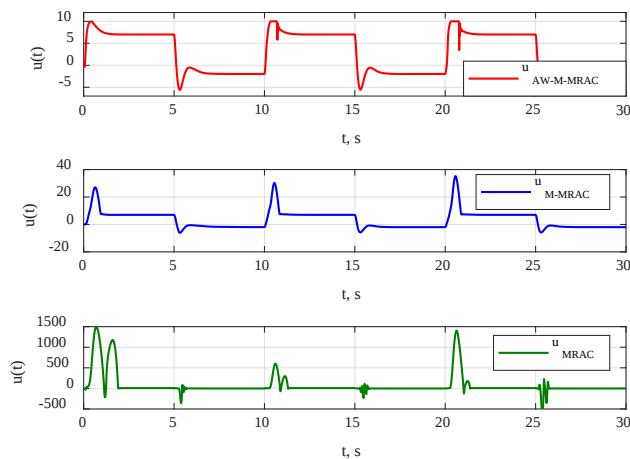


Рис. 2. Графики управляющих сигналов, генерируемые сравниваемыми регуляторами

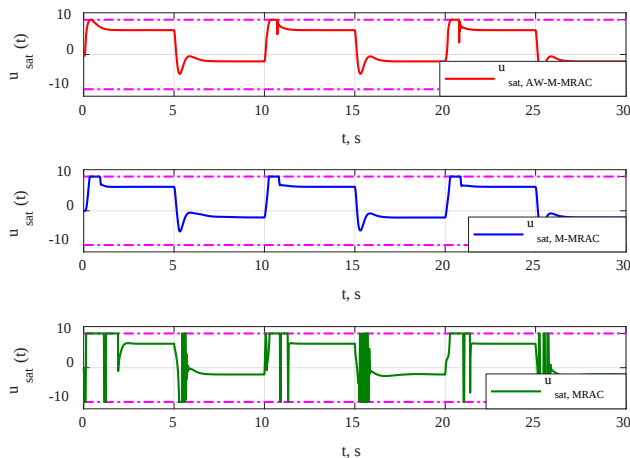


Рис. 3. Графики фактических управляющих сигналов сравниваемых систем при условии насыщения

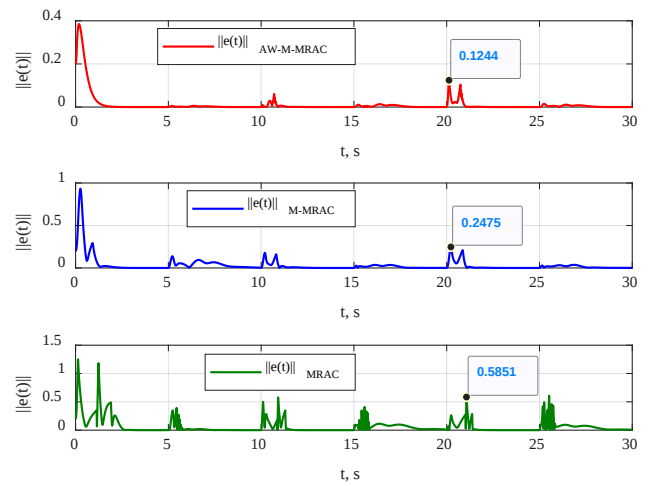


Рис. 4. Норма вектора ошибок слежения сравниваемых систем

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен новый алгоритм адаптивного управления, эффективно компенсирующий влияние параметрической неопределенности и эффекта насыщения управляющего сигнала. Данный метод сочетает адаптивное управление с модифицированной эталонной моделью и динамическое поверхностное управление с новой барьерной функцией Ляпунова. Методом функций Ляпунова доказывается робастная устойчивость замкнутой системы. Результаты сравнительного исследования показывают высокую эффективность предложенного алгоритма управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] S. Coman, C. Boldisor and C. Ciusdel, "Combining the MIT and Lyapunov stability adaptive methods for second order systems," 2018 International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, Romania, 2018, pp. 31-37, doi: 10.1109/DAAS.2018.8396066.
- [2] A. Shekhar and A. Sharma, "Review of Model Reference Adaptive Control," 2018 International Conference on Information, Communication, Engineering and Technology (ICICET), Pune, India, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICICET.2018.8533713.
- [3] V. Stepanyan and K. Krishnakumar, "M-MRAC for nonlinear systems with bounded disturbances," 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, FL, USA, 2011, pp. 5419-5424, doi: 10.1109/CDC.2011.6161416.
- [4] Нгуен З. Х., Путов В. В., Шелудько В. Н. Модифицированные алгоритмы адаптивного робастного управления с эталонной моделью нелинейными объектами в условиях неопределенности и неизвестных возмущений // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 2. С. 90–100. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-90-100.
- [5] K. Narendra and A. Annaswamy, "A new adaptive law for robust adaptation without persistent excitation," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 32, no. 2, pp. 134-145, Feb. 1987.
- [6] P. Ioannou and P. Kokotovic, "Instability analysis and improvement of robustness of adaptive control," Automatica, vol. 20, no. 5, pp. 583-594, Sep. 1984.
- [7] E. Lavretsky and N. Hovakimya. Positive μ -modification for stable adaptation in the presence of input constraints. Proceedings of the 2004 American Control Conference. IEEE: Boston, MA, USA, 2004. P. 2545-2550. doi: 10.23919/ACC.2004.1383848.
- [8] Fertik, H.A. and Ross, C.W. (1967). Direct digital control algorithm with anti-windup feature. ISA transactions, 6(4), 317.
- [9] S. P. Karason and A. M. Annaswamy. Adaptive control in the presence of input constraints. IEEE Transactions on Automatic Control. 1994. Vol. 39, no. 11. P. 2325-2330. doi: 10.1109/9.333787.
- [10] Bojun Liu, Mingshan Hou, Junkang Ni, Yajun Li, Zhonghua Wu. Asymmetric integral barrier Lyapunov function-based adaptive tracking control considering full-state with input magnitude and rate constraint. Journal of the Franklin Institute. 2020. Vol. 357, iss. 14. P. 9709-9732. doi: 10.1016/j.jfranklin.2020.07.037.