

УДК 517.977.1

## О НЕКОТОРЫХ АЛГОРИТМАХ УПРАВЛЕНИЯ СООТНОШЕНИЕМ ВОЗДУХА И ТОПЛИВА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ

В. В. Стрыгин, А. Е. Поляков, М. В. Крячков

*Воронежский государственный университет*

Рассмотрена задача управления соотношением воздуха и топлива в двигателе автомобиля. Предложены непрерывный и дискретный адаптивные алгоритмы управления. Доказаны соответствующие теоремы о стабилизации. Предложены методы повышения надежности алгоритмов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Постоянно растущие требования к уровню токсичности выхлопных газов двигателей современных автомобилей приводят к необходимости увеличения точности управления соотношением воздуха и топлива в камере сгорания. При этом было бы нежелательно менять элементную базу системы управления и переходить на более дорогостоящее оборудование. На сегодняшний день одним из наиболее распространенных измерителей соотношения воздуха и топлива является  $\lambda$ -датчик. Он экономичен, надежен и обладает малым временем отклика. Однако  $\lambda$ -датчик определяет лишь факт того, что соотношение воздуха и топлива превышает некоторый уровень в запаздывающий момент времени. Это существенно усложняет разработку алгоритмов управления с его использованием.

В настоящей работе предлагается адаптивный алгоритм управления автомобильным двигателем, обеспечивающий стабилизацию соотношения воздуха и топлива в окрестности стехиометрического значения. Если соотношение воздуха и топлива близко к стехиометрическому, то уровень вредных веществ, образующихся в камере сгорания, находится в окне бифункциональности каталитического нейтрализатора [1]. В этом случае снижение токсичности отработавших газов происходит наиболее эффективно.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рисунке 1 изображена схема инжекторного двигателя внутреннего сгорания с указанием основных элементов системы управления. Регулировка воздушного потока осуществляется при помощи дросселя, топливо во впускные каналы подается через форсунки. Топливо и воздух смешиваются в камере сгорания, и полученная топливная смесь взрывается после срабатывания свечи зажигания. Далее продукты сгорания поступают в выпускной коллектор. Водитель, посредством педали акселератора, имеет возможность управлять дросселем. Количество же топлива, впрыскиваемого через форсунки, определяется электронной системой управления на основе различных показателей, среди которых большое значение

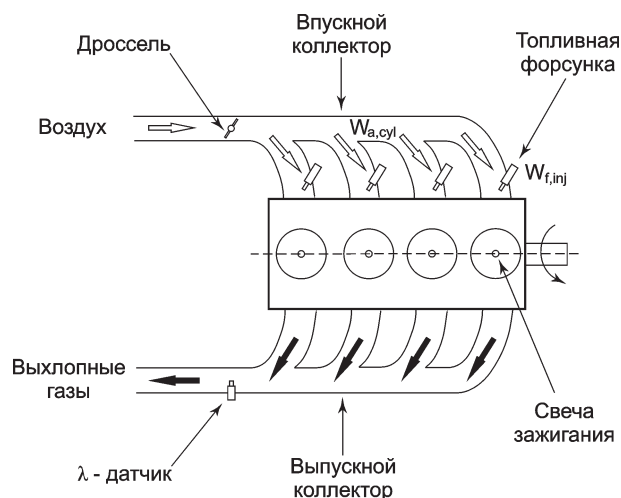


Рис. 1. Схема двигателя

имеют величина воздушного потока во впускном коллекторе и соотношение воздуха и бензина в цилиндрах, которое определяется  $\lambda$ -датчиком. Соотношение воздуха и бензина в топливной смеси влияет на состав выхлопных газов, в зависимости от которого  $\lambda$ -датчик генерирует некоторое ЭДС. Область линейной характеристики  $\lambda$ -датчика очень мала, поэтому его можно считать релейным измерителем. При этом между подачей топлива через форсунки и определением изменения соотношения воздуха и топлива, вызванного этой подачей, проходит определенное время  $h$ , что связано с конечной скоростью передачи газов по коллекторам и временем рабочего цикла двигателя.

Усредненная математическая модель [1, 2], характеризующая динамику изменения соотношения воздуха и топлива, описывается следующей системой уравнений

$$\dot{m} = -\frac{m}{\tau} + \chi W_{f,inj}, \quad (1)$$

$$W_{f,cyl} = \frac{m}{\tau} + (1 - \chi)W_{f,inj}, \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{W_{a,cyl}}{W_{f,cyl}}, \quad (3)$$

где  $W_{f,inj}$  — интенсивность подачи топлива во впускные каналы,  $W_{f,cyl}$  — интенсивность подачи топлива в цилиндры,  $m$  — масса топливной пленки во впускных каналах,  $0 < \chi < 1$  — коэффициент, определяющий, какая часть топлива оседает во впускных каналах,  $\tau > 0$  — постоянная времени, характеризующая скорость испарения топлива,  $W_{a,cyl}$  — интенсивность подачи воздуха,  $\lambda$  — коэффициент соотношения воздуха и топлива.

Пусть  $\lambda^*$  стехиометрического значение, к которому должно стремиться  $\lambda$ . Тогда интенсивность подачи топлива, при котором должно достигаться это значение может быть легко определена из уравнений (2), (3)

$$W_{f,inj}^* = \frac{1}{1 - \chi} \left( \frac{W_{a,cyl}}{\lambda^*} - \frac{m}{\tau} \right). \quad (4)$$

Поскольку параметры  $\tau$ ,  $\chi$ ,  $W_{a,cyl}$  и  $m$  не могут быть измерены с абсолютной точностью, то определить оптимальную интенсивность подачи топлива непосредственно из уравнения (4) не удается. Для корректиров-

ки подачи топлива предлагается охватить систему обратной связью, где в качестве релейного измерителя выступит  $\lambda$ -зонд.

Если обозначить  $s(t) = W_{a,cyl} - \lambda^* W_{f,cyl}$ , то очевидно, что  $\lambda$ -датчик измеряет величину  $\text{sign}[s(t-h)]$ . Учитывая все вышесказанное, несложно получить уравнение системы регулирования

$$\dot{s} = -\gamma \text{sign}[s(t-h)] + w(t), \quad t > 0, \quad (5)$$

где  $\gamma > 0$  — коэффициент усиления обратной связи, адаптивный параметр управления,  $h$  — время запаздывания,  $w(t)$  — неизвестные возмущения, связанные с неопределенностями в параметрах модели и неточностями в оценке некоторых величин. Будем предполагать, что возмущения ограничены

$$\sup_{t \geq 0} |w(t)| = w_0. \quad (6)$$

Время запаздывания  $h$  не является постоянным, оно зависит от частоты вращения двигателя, от температуры и давления выхлопных газов. Поэтому следует полагать время запаздывания неизвестным точно,  $h = h(t)$ , но ограниченным

$$0 < h(t) \leq h_0. \quad (7)$$

Наконец, для окончательного определения системы положим

$$s(t) = \varphi(t) \text{ при } t \in [-h_0, 0], \quad (8)$$

где  $\varphi(t)$  — непрерывная на  $[-h_0, 0]$  и ограниченная в нуле функция

$$|\varphi(0)| \leq R. \quad (9)$$

Чем ближе величина  $|s|$  к нулю, тем ближе соотношение воздуха и топлива  $\lambda = s / W_{f,cyl} + \lambda^*$  к стехиометрическому значению  $\lambda^*$ , поэтому очевидная цель системы управления (5) — сделать величину  $|s|$  как можно меньшей. Система управления (5) относится к системам с запаздывающей релейной обратной связью, исследованию которых посвящены работы [3]—[7]. Известно [3], что даже простейшая релейная система с запаздыванием может иметь только колебательные нетривиальные решения, амплитуда которых пропорциональна коэффициенту усиления перед релейным элементом. Поэтому для стабилизации системы (5), необходимо использовать алгоритм адаптации коэффициента усиления.

В работе [3] предложен алгоритм управления, основанный на свойствах установившихся режимов для скалярных релейных систем, который предполагает уменьшение коэффициента  $\gamma$  вблизи ожидаемого нуля решения. Однако при таком управлении действие даже малого возмущения на систему приводит к неустойчивости, что характеризует существенную неробастность данного алгоритма. В связи с этим наша основная задача состоит в том, чтобы разработать алгоритм адаптации, некритичный к малым возмущениям, и предложить методы для повышения надежности этого алгоритма управления.

### 3. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УТВЕРЖДЕНИЯ

Прежде чем предложить тот или иной алгоритм управления, необходимо установить ряд свойств решения системы (5)—(9) в предположении, что адаптивный параметр  $\gamma$  является функцией от времени. Будем считать, что функция  $\gamma = \gamma(t)$  определена, положительна и кусочно непрерывна на интервале  $[0; +\infty)$ . Будем предполагать также, что в каждой своей точке разрыва функция  $\gamma(t)$  непрерывна справа.

**Лемма 1.** *Если в некоторый момент времени  $t_1 \geq h_0$  выполнено неравенство*

$$|s(t_1)| > w_0 h_0 + \int_{t_1-h_0}^{t_1} \gamma(\tau) d\tau,$$

то  $|s(t)| > 0$  на отрезке  $[t_1 - h_0; t_1]$ .

**Доказательство.** Предположим противное. Пусть существует момент времени  $t^* \in [t_1 - h_0; t_1]$ , в котором  $s(t^*) = 0$ . Без ограничения общности можно считать, что  $s(t_1) > 0$ . Тогда из оценки

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= -\gamma(t) \operatorname{sign}[s(t - h(t))] + w(t) \leq \\ &\leq w_0 + \gamma(t) \end{aligned}$$

получаем

$$\begin{aligned} s(t_1) &\leq s(t^*) + w_0(t_1 - t^*) + \int_{t^*}^{t_1} \gamma(\tau) d\tau \leq \\ &\leq w_0 h_0 + \int_{t_1-h_0}^{t_1} \gamma(\tau) d\tau, \end{aligned}$$

что противоречит условию леммы. ■

**Лемма 2.** *Если найдется момент времени  $t_0 \geq h_0$ , такой что*

$$|s(t_0)| \leq w_0 h_0 + \int_{t_0-h_0}^{t_0} \gamma(\tau) d\tau,$$

и для любого  $t \geq t_0$  верно

$$\gamma(t) \geq \frac{w_0 + \gamma(t - h_0)}{2}, \tag{10}$$

то при всех  $t \geq t_0$  будет выполнено неравенство

$$|s(t)| \leq w_0 h_0 + \int_{t-h_0}^t \gamma(\tau) d\tau.$$

**Доказательство.** Предположим противное. Пусть существует такой момент времени  $t_1 > t_0$ , что

$$|s(t_1)| > w_0 h_0 + \int_{t_1-h_0}^{t_1} \gamma(\tau) d\tau.$$

Рассмотрим случай  $s(t_1) > 0$ . Введем обозначение

$$v(t) = s(t) - w_0 h_0 - \int_{t-h_0}^t \gamma(\tau) d\tau, \quad t \geq t_0.$$

Поскольку функция  $v(t)$  непрерывна и

$$v(t_0) \leq 0, \quad v(t_1) > 0,$$

то на промежутке  $[t_0; t_1]$  найдется момент времени, в котором  $v$  будет равна нулю. Обозначим через  $t^*$  последний такой момент. Тогда при всех  $t \in (t^*; t_1]$  будет справедливо неравенство

$$s(t) > w_0 h_0 + \int_{t-h_0}^t \gamma(\tau) d\tau.$$

Из леммы 1 получаем, что  $s(t) > 0$  для любого  $t \in (t^* - h_0; t_1]$ . Поэтому при всех  $t \in (t^*; t_1]$  будет верно

$$\operatorname{sign}[s(t - h(t))] = 1,$$

$$\dot{s}(t) = -\gamma(t) + w(t) \leq -\gamma(t) + w_0.$$

Обозначим через  $Dv$  правую производную функции  $v(t)$ . Учитывая непрерывность  $\gamma(t)$  справа на интервале  $[0; +\infty)$ , несложно показать, что

$$Dv(t) \leq -2\gamma(t) + w_0 + \gamma(t - h_0).$$

Из неравенства (10) следует, что

$$Dv(t) \leq -2 \frac{w_0 + \gamma(t - h_0)}{2} + w_0 + \gamma(t - h_0) \leq 0. \tag{11}$$

Функция  $v(t)$  получила на отрезке  $[t^*; t_1]$  положительное приращение  $v(t_1)$ , но в силу (11) этого быть не может. Мы пришли к противоречию.

Случай  $s(t_1) < 0$  рассматривается аналогично. ■

#### 4. НЕПРЕРЫВНЫЙ АЛГОРИТМ АДАПТАЦИИ

С одной стороны, известно, что амплитуда колебаний решения простейшей релейной системы с запаздыванием пропорциональна коэффициенту усиления, следовательно, чтобы стабилизировать систему, необходимо его уменьшать. С другой стороны, в нашем случае в системе присутствуют возмущения, а значит, что при слишком малом  $\gamma$ , например  $\gamma < w_0$ , система (5) может стать неустойчивой. Поэтому предлагается искать адаптивный коэффициент  $\gamma(t)$  в виде

$$\gamma(t) = w_0 + pe^{-kt}, \quad (12)$$

где  $p, k > 0$  — параметры управления.

**Теорема 1.** Для любых  $k < \frac{\ln 2}{h_0}$  и

$p > \frac{Rke^{kh_0}}{2 - e^{kh_0}}$  произвольное решение системы

(5) — (9) с адаптивным параметром управления в виде (12) будет удовлетворять неравенству

$$|s(t)| \leq 2w_0h_0 + \frac{p}{k}(e^{kh_0} - 1)e^{-kt}, \quad t \geq h_1,$$

$$h_1 = h_0 + \frac{1}{k} \ln \frac{p(2 - e^{kh_0})}{p(2 - e^{kh_0}) - Rke^{kh_0}}.$$

**Доказательство.** Несложно проверить, что при всех  $t \geq h_0$

$$\gamma(t) \geq \frac{w_0 + \gamma(t - h_0)}{2}.$$

Достаточно подставить выражение для  $\gamma(t)$ . Далее заметим, что

$$2w_0h_0 + \frac{p}{k}(e^{kh_0} - 1)e^{-kt} = w_0h_0 + \int_{t-h_0}^t \gamma(\tau) d\tau.$$

Тогда очевидно, что справедливость теоремы будет следовать из леммы 2, если удастся доказать существование такого момента времени  $t_0 \in [h_0; h_1]$ , что

$$|s(t_0)| \leq w_0h_0 + \int_{t_0-h_0}^{t_0} \gamma(\tau) d\tau.$$

Предположим противное. Пусть найдутся такие числа  $k$  и  $p$ , удовлетворяющие условиям теоремы, что при всех  $t \in [h_0; h_1]$

$$|s(t)| > w_0h_0 + \int_{t-h_0}^t \gamma(\tau) d\tau. \quad (13)$$

Найдем оценку для решения дифференциального уравнения (5) в момент времени  $t = h_1$ . Из неравенств

$$\dot{s} \leq \gamma(t) + w_0 = pe^{-kt} + 2w_0,$$

$$s(0) = \varphi(0) \leq R$$

следует, что

$$s(h_0) \leq R + 2w_0h_0 + \frac{p}{k}(1 - e^{-kh_0}).$$

Далее, учитывая (13), из леммы 1 получаем, что  $|s(t)| > 0$  при всех  $t \in [0; h_1]$ . Для определенности предположим, что  $s(t) > 0$  на данном отрезке. Из этого следует, что  $\text{sign}[s(t - h(t))] = 1$  при  $t \in [h_0; h_1]$ . Тогда

$$\dot{s} \leq -\gamma(t) + w_0 = -pe^{-kt}$$

и

$$\begin{aligned} s(h_1) &\leq s(h_0) + \int_{h_0}^{h_1} (-pe^{-k\tau}) d\tau \leq \\ &\leq 2w_0h_0 + \frac{p(e^{kh_0} - 2)}{ke^{kh_0}} \times \left( \frac{Rke^{kh_0}}{p(e^{kh_0} - 2)} + 1 \right) + \frac{pe^{-kh_1}}{k}. \end{aligned}$$

Несложно проверить, что из определения  $h_1$  следует

$$e^{-k(h_1-h_0)} = \frac{Rke^{kh_0}}{p(e^{kh_0} - 2)} + 1.$$

Отсюда получаем

$$\begin{aligned} s(h_1) &\leq 2w_0h_0 + \frac{p}{k}(e^{-k(h_1-h_0)} - e^{-kh_1}) = \\ &= w_0h_0 + \int_{h_1-h_0}^{h_1} \gamma(\tau) d\tau, \end{aligned}$$

что противоречит неравенству (13). ■

#### 5. ДИСКРЕТНЫЙ АЛГОРИТМ АДАПТАЦИИ

При практической реализации управления зачастую не возможно реализовать не-

прерывный алгоритм адаптации. Это особенно характерно для цифровых систем управления, где изменение управляющего воздействия происходит в дискретном времени. В связи с этим, будет предложен дискретный алгоритм адаптации.

1. Зафиксируем числа

$$\gamma_0 > w_0, \quad h_1 = \frac{R}{\gamma_0 - w_0} + h_0$$

и натуральное  $N$ .

2. Определим числа  $\gamma_i = \frac{\gamma_{i-1} + w_0}{2}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$

и моменты времени  $t_i$ , такие что

$$t_1 = h_1, \quad t_i \geq t_{i-1} + h_0, \quad i = 2, 3, \dots, N.$$

3. Наконец определим  $\gamma(t)$  по формуле

$$\gamma(t) = \begin{cases} \gamma_0, & t \in [0, t_1), \\ \gamma_i, & t \in [t_i, t_{i+1}), \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \\ \gamma_N, & t \geq t_N. \end{cases} \quad (14)$$

Легко показать, что предложенное управление обладает следующими свойствами.

1.  $\gamma_i = w_0 + \frac{\gamma_0 - w_0}{2^i} > w_0$ .
2.  $\gamma(t) \geq \frac{w_0 + \gamma(t-h_0)}{2}$ ,  $t > h_0$ .
3.  $\gamma_N \rightarrow w_0$ ,  $N \rightarrow \infty$ .

**Теорема 2.** Любое решение системы (5)–(9) с адаптивным параметром управления вида (14) удовлетворяет следующему неравенству

$$|s(t)| \leq w_0 h_0 + \int_{t-h_0}^t \gamma(\tau) d\tau, \quad t \geq h_1. \quad (15)$$

**Доказательство.** Управляющее воздействие вида (14) удовлетворяет условию (10) леммы 2. Поэтому, если показать, что найдется такой момент времени  $t_0 \in [h_0; h_1]$ , для которого верно неравенство

$$|s(t_0)| \leq w_0 h_0 + \int_{t_0-h_0}^{t_0} \gamma(\tau) d\tau,$$

то условия леммы 2, из которой следует справедливость теоремы, будут выполнены. Докажем существование момента времени  $t_0$  от противного.

Пусть найдется такое  $\gamma_0 > w_0$ , что для любого  $t \in [h_0; h_1]$  будет верно неравенство

$$|s(t)| > w_0 h_0 + \int_{t-h_0}^t \gamma(\tau) d\tau = (w_0 + \gamma_0) h_0, \quad (16)$$

Тогда по лемме 1 получим, что  $|s(t)| > 0$  при всех  $t \in [0; h_1]$ . Рассмотрим случай  $s(t) > 0$ .

Из неравенства  $s(0) = \varphi(0) \leq R$  следует, что  $s(h_0) \leq R + (\gamma_0 + w_0) h_0$ . В тоже время для любого  $t \in [h_0; h_1]$

$$\text{sign}[s(t - h(t))] = 1$$

и

$$\dot{s}(t) = -\gamma_0 + w(t) \leq w_0 - \gamma_0.$$

Поэтому справедлива следующая оценка

$$\begin{aligned} s(h_1) &\leq s(h_0) + \int_{h_0}^{h_1} (w_0 - \gamma_0) d\tau \leq \\ &\leq R + (\gamma_0 + w_0) h_0 + (w_0 - \gamma_0)(h_1 - h_0) = \\ &= (\gamma_0 + w_0) h_0 \end{aligned}$$

Получаем противоречие с неравенством (16).

Случай  $s(t) < 0$  рассматривается аналогично. ■

## 6. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ АЛГОРИТМОВ

В работах [6, 7] предложены алгоритмы стабилизации, основанные на многих релейных элементах. Так например, для почти полуглобальной стабилизации [6] нулевого решения скалярной линейной неустойчивой системы можно построить релейное управление вида

$$u = \sum_{i=1}^N p_i \cdot \text{sign}[s(t - h(t)) + v_i],$$

где  $N, p_i, v_i$  — параметры управления. Количество релейных элементов, входящих в управление, определяется

- размером области начальных данных;
- требуемой точностью управления;
- величиной запаздывания;
- спектральным радиусом разомкнутой системы.

Следует отметить, что рассматриваемое управление является робастным, как по отношению к неопределенному запаздыванию, так и по отношению к неизвестным внешним возмущениям и его использование значительно повысит надежность рассматриваемой системы управления.

В нашем случае, наличие нескольких релейных элементов в системе управления

подразумевает установку дополнительных  $\lambda$ -датчиков. Однако, использование большого числа датчиков с системе управления двигателем автомобиля экономически невыгодно. В тоже время, можно предложить метод повышения надежности рассмотренных выше алгоритмов на основе всего двух дополнительных  $\lambda$ -датчиков.

Согласно теореме 2 решение системы (5) с параметром  $\gamma$  вида (14) будет удовлетворять оценке (15). По определению  $\gamma(t) = \gamma_N$  при  $t > t_N$ . Тогда

$$|s(t)| \leq (w_0 + \gamma_N)h_0 = \varepsilon \text{ при } t \geq t_N + h_0.$$

Поэтому, устанавливая два дополнительных  $\lambda$ -датчика, измеряющих  $\text{sign}[s(t - h(t)) + \varepsilon]$  и  $\text{sign}[s(t - h(t)) - \varepsilon]$ , можно определить факт нарушения последней оценки и заново инициализировать процедуру адаптации.

### 7. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

Рассмотрим систему (5) для случая

$$R = 15, w(t) = 2/3(\sin(t) + 1/2),$$

$$h(t) = 0.3(0.75 + 0.25 \sin(t)).$$

Будем производить синтез дискретного управления согласно алгоритму описанному в разделе 5.

1. Выберем  $\gamma_0 = 35.657 > w_0 = 1$ ,

$$h_1 = \frac{R}{\gamma_0 - w_0} + h_0 = 0.7328 \text{ и } N = 5.$$

2. Зафиксируем числа  $\gamma_1 = 18.329$ ,  $\gamma_2 = 9.665$ ,  $\gamma_3 = 5.333$ ,  $\gamma_4 = 3.167$ ,  $\gamma_5 = 2.083$  и

моменты времени  $t_1 = h_1 = 0.7328$ ,  $t_2 = 1.0328$ ,  $t_3 = 1.3328$ ,  $t_4 = 1.6328$ ,  $t_5 = 1.9328$ .

3. Определим  $\gamma(t)$  по формуле (14).

На рисунке 2 представлена зависимость адаптивного коэффициента  $\gamma$  от времени, а на рисунке 3 показано изменение функции состояния  $s(t)$  в предположении, что  $s(t) = 15 \cos(10t)$  при  $t \in [-0.3, 0]$ .

### 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе, предложены алгоритмы синтеза управления соотношением воздуха и топлива в камере сгорания двигателя автомобиля. Доказано, что предложенные алгоритмы обеспечивают стабилизацию соотношения воздуха и топлива в близи стехиометрического значения. Рассмотрен ряд методов повышения надежности предложенных алгоритмов. Качество предложенных алгоритмов продемонстрировано на численном примере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гурявец А.К.* Теория управления автомобильным бензиновым двигателем. — М. Стройиздат. — 1997.

2. *Averina V.* Analysis and Control of Delay-Dependent Behavior of Engine Air-to-Fuel Ratio. / Averina V., Kolmanovsky I., Gibson A., Bueler E. // Submitted to the ASME World Congress, Orlando, Florida, November, 2005. (<http://www.cs.uaf.edu/bueler/AKGSBv10.pdf>)

3. *Fridman L.* Steady modes in an autonomous system with break and delay. / Fridman L., Fridman E., Shustin E. // Differential Equations — 1993. — Vol. 29, P. 1161—1166.

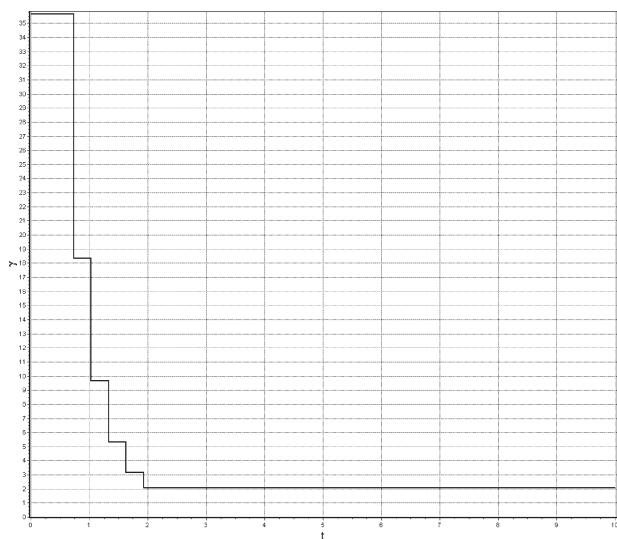


Рис. 2. Адаптивный коэффициент

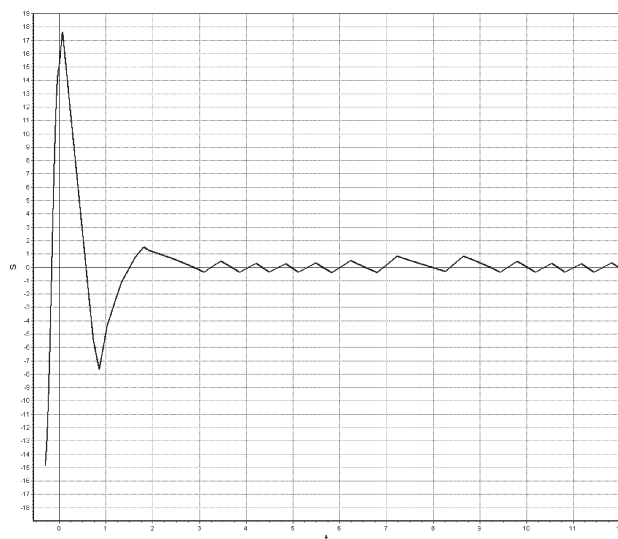


Рис. 3. Функция состояния

4. Стрыгин В.В. Локальная стабилизация релейных систем с запаздыванием. / В.В. Стрыгин, Л.М. Фридман, А.Е. Поляков // Доклады академии наук. — 2001 — том 379, № 5 — с. 603—605.

5. Fridman L. Stabilization of oscillations amplitudes via relay delay control. / Fridman L., Strygin V., Polyakov A. // International Journal of Control. — 2003. — Vol. 76, № 8, P. 770—780.

6. Fridman L. Nonlocal stabilization via delayed relay control rejecting uncertainty in a time delay. / Fridman L., Strygin V., Polyakov A. // International Journal of Robust and Nonlinear Control — 2004. — № 14, P. 15—37.

7. Fridman L. Semiglobal stabilization via delayed relay hybrid control / L. Fridman, V. Strygin, A. Polyakov // Variable Structure Systems From Principles to Implementation (Ed. A. Sabanovic, L. Fridman and S. Spurgeon) — 2004. — P. 377—400.