

УДК 681.51

АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ДВУМЯ ЭТАЛОННЫМИ МОДЕЛЯМИ

Задорожная Н.М.¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Москва, Россия (105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), e-mail: zanatalie@yandex.ru

Статья посвящена реализации адаптивных систем автоматического управления. В статье рассматривается алгоритм синтеза самонастраивающихся систем автоматического управления с двумя эталонными моделями. Применение дополнительной эталонной модели в процессе идентификации динамики настраиваемой системы автоматического управления обеспечивает возможность накопления знаний о динамике системы управления и использования полученной информации для улучшения качества ее работы. Представлена функциональная схема автомата-настройщика с использованием подстраиваемой модели. Приведен пример реализации алгоритма настройки на основе следящей системы и параметров колебательного звена. Сделан вывод о том, что разработанный алгоритм адаптации системы автоматического управления обеспечивает накопление информации о динамике управляемого объекта и дает возможность построения многовариантного прогноза состояния системы в пространстве настраиваемых параметров.

Ключевые слова: система автоматического управления, самонастройка, идентификация, эталонная модель

ADAPTIVE AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS WITH TWO REFERENCE MODELS

Zadorozhnaya N.M.¹

¹Federal budget-funded institution Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia (105005, Vtoraya Baumanskaya St., 5, Bld. 1), e-mail: zanatalie@yandex.ru

The article is devoted to implementation of adaptive automatic control systems. Synthesis algorithm of self-adjusting automatic control systems with two reference model is scrutinized there. Additional reference model applied for identification of adjustable system's dynamics provides for possibilities to accumulate knowledge on control system's dynamics and to use the data received for quality improvement of the system's work. The author presents functional scheme of automatic adjuster using the adjustable model. The example of tuning algorithm's implementation on the basis of servo system and vibrational level parameters is also given.

It is concluded that the algorithm elaborated for automatic control system's adaptation ensures data accumulation regarding controlled object' dynamics and provides for opportunities of multiple predictions concerning system's status within the scope of adjustable settings.

Keywords: automatic control system, self-djusting system, identification, reference model, adaptive system

Развитие вычислительной техники открывает новые возможности в области реализации адаптивных систем автоматического управления (САУ), например, в случае настройки САУ в процессе эксплуатации в реальном масштабе времени при изменении динамических характеристик объектов управления [7].

К подобным системам относятся самонастраивающиеся системы с эталонными моделями (СНС с ЭМ). Исследование СМС с ЭМ показало их большие возможности, однако широкое внедрение сдерживается трудностью выбора эталонной модели, высокой чувствительностью

настройки параметров к характеристикам входных сигналов, взаимовлиянием контуров настройки.

С целью преодоления недостатков работы САУ в алгоритм настройки САУ (и в его структуру) в дополнение к эталонной модели вводится вторая эталонная модель, называемая подстраиваемой моделью (ПМ) [2]. С помощью ПМ осуществляется параметрическая идентификация САУ, при которой ПМ подстраивается к настраиваемой САУ. После чего выполняется настройка ПМ к заданным требованиям качества работы САУ с использованием эталонной модели (ЭМ) специального вида (параметрическое множество ЭМ).

Дуальный характер рассматриваемой схемы настройки САУ, наряду с использованием алгебраических методов анализа САУ, дает возможность с помощью алгоритма самонастройки решить задачу идентификации [6]. Поэтому в статье основное внимание уделяется алгоритму настройки, поскольку аналогичные вычислительные процедуры могут быть использованы и на этапе идентификации динамики объекта.

1. Алгоритм синтеза самонастраивающейся системы автоматического управления с двумя эталонными моделями

Для нахождения области допустимых настроек используются методы нелинейного программирования [1]. Причем в качестве искомым значений коэффициентов данной зоны выбирается точка, в которую вырождается область допустимых настроек при пропорциональном увеличении требований к переходным процессам (например, уменьшение максимально допустимого перерегулирования, уменьшение времени вхождения в трубку точности и т.д.).

Математическое описание ПМ формируется в виде совокупности дробно-рациональных (полиномиальных) выражений от настраиваемых параметров, определяющих реакцию САУ на соответствующий тестовый сигнал [3, 4].

Приведенная на рис. 1 схема функционирования поясняет взаимодействие частей программы, реализующей алгоритм автомата-настройщика (АН) в его классическом понимании. В соответствии со схемой порядок работы алгоритма следующий.

Тестовый сигнал поступает на вход настраиваемой системы и подстраиваемой модели. Параметры ПМ k_i и α_i , равны номинальным значениям соответствующих параметров в реальной настраиваемой системе. После прохождения тестового сигнала ошибка рассогласования поступает в блок идентификации.

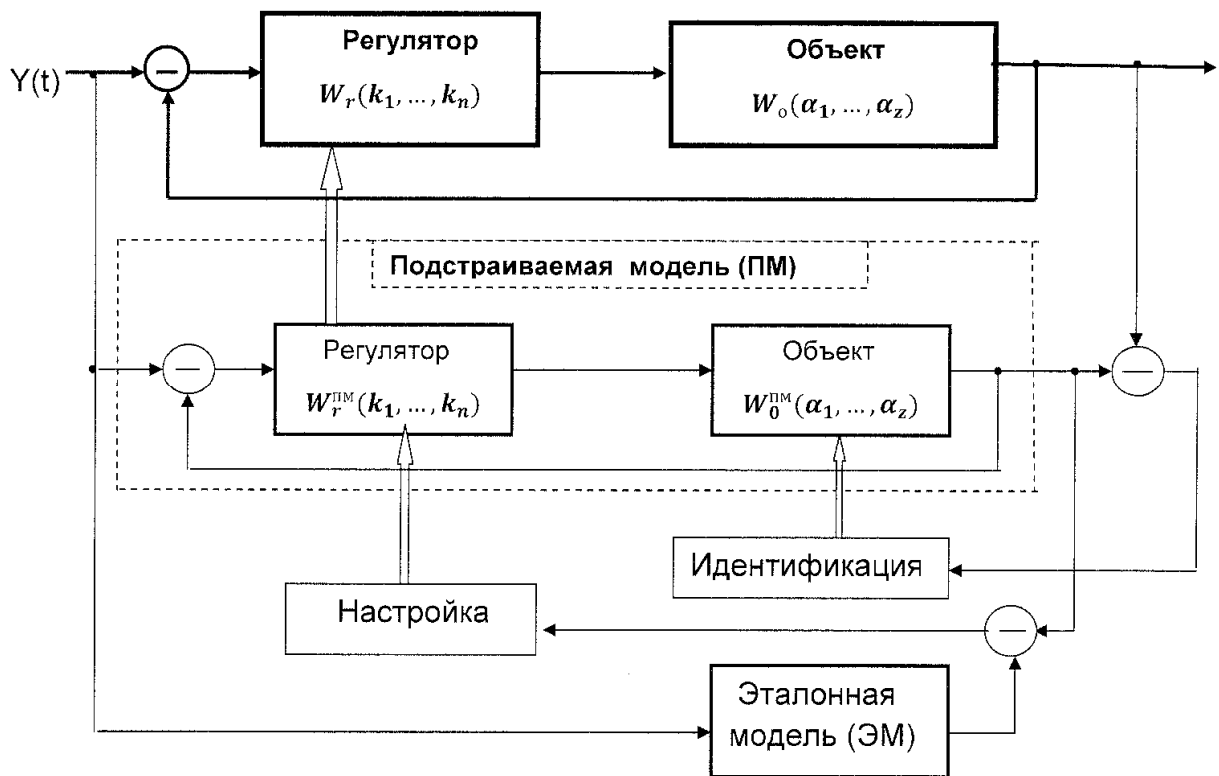


Рис. 1. Функциональная схема автомата-настройщика (АН)

В соответствии с алгоритмом идентификации в ПМ вычисляются значения параметров α_i , которые являются соответствующими оценками данных параметров в реальной системе [5]. Оценки параметров a_1, \dots, a_z вычисляются путем минимизации выражений:

$$\min_{t \in [0, T]} \|y_i(t) - y_{\text{ПМ}}(t)\|, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где n – число тестовых сигналов, $y_i(t)$ – реакция настраиваемой САУ на тестовый сигнал $g_i(t)$, $y_{\text{ПМ}}(t)$ – реакция ПМ на тестовый сигнал.

В случае, если настраиваемая САУ линейна, достаточно рассмотреть лишь один тестовый сигнал на этапе идентификации, например, ступенчатый, как наиболее широкополосный и вынуждающий систему проявить все динамические особенности. Таким образом, ПМ подстраивается к реальной системе, и в дальнейшем происходит настройка подстраиваемой модели, а реальная система отключается от процесса настройки [8].

После этапа идентификации тестовый сигнал подается на вход подстраиваемой модели и эталонной модели. ЭМ задает множество желаемых переходных процессов, удовлетворяющих требованиям к качеству регулирования. Ошибка рассогласования поступает в блок настройки, в котором минимизируется выражение:

$$\min_{k_j \in K_d, p_i \in P_{\text{эТ}}} \sum_{i=1}^n |y_{\text{ипм}}(k_1, k_2, \dots, k_l, t) - y_{\text{изм}}(p_1, p_2, \dots, p_r)|,$$

где k_1, k_2, \dots, k_l – настраиваемые параметры; $y_{\text{ипм}}(k_1, k_2, \dots, k_l, t)$ – выходные сигналы подстраиваемой модели для тестового сигнала $g_i(t)$; $y_{\text{изм}}(p_1, p_2, \dots, p_r)$ – выходные сигналы эталонной модели при заданных значениях параметров p_i ; K_d – область допустимых изменений настраиваемых параметров k_i (например, область тех значений параметров k_i , при которых настраиваемая система устойчива); $P_{\text{эТ}}$ – область допустимых значений параметров p_i , то есть тех значений p_i , при которых реакция эталонной модели удовлетворяет предъявляемым требованиям. Таким образом, задается не одна фиксированная ЭМ, а целое множество, которое определяется путем указания диапазона изменений параметров передаточных функций ЭМ.

Предположим, что для рассматриваемой ПМ и для входного скачкообразного тестового сигнала получена зависимость реакции системы (переходной процесс) от настраиваемых параметров в виде выражения:

$$y_{\text{пм}}(t) = \sum_{j=0}^N \rho_j(k_1, \dots, k_m) T_j(t),$$

где в соответствии с алгоритмом, изложенным в [3], $\rho_j(k_1, \dots, k_m)$ – полиномы относительно параметров k_1, \dots, k_m , а $\{T_j(t)\}_0^N$ – система ортогональных полиномов Чебышева 1-го рода, определенных на отрезке $[0, T]$, на котором анализируется переходный процесс. Напомним, что в случае, когда известна область значений параметров k_1, \dots, k_m , при которых система устойчива, величину T целесообразно выбирать равной $3T_{\text{пп}}$, где $T_{\text{пп}}$ – время переходного процесса рассматриваемой САУ.

Предположим далее, что при полученных значениях настраиваемых параметров (k_1, \dots, k_m) (обозначим значения настраиваемых параметров в виде вектора \bar{K}), не удовлетворяются первичные показатели качества, то есть перерегулирование $\delta > \delta_d$, $T > T_{\text{пнд}}$. Следовательно, необходимо найти такой вектор \bar{K} , при котором требования, предъявляемые к первичным показателям качества удовлетворяются.

2. Пример реализации алгоритма настройки

Построение алгоритма настройки рассмотрим на примере следящей системы (СС) с учетом следующих показателей качества: перерегулирование δ , время переходного процесса $T_{\text{пнд}}$ и статическая точность $\epsilon_{\text{ст}}$. В качестве передаточной функции ЭМ рассмотрим

колебательное звено, которое, как известно, хорошо аппроксимирует реакцию СС на единичное ступенчатое воздействие $1(t)$.

Пусть постоянная времени T и коэффициент демпфирования ξ передаточной функции ЭМ такие, что $y_{эТ}(t)$ удовлетворяет предъявленным требованиям к качеству регулирования. Далее представим $y_{эТ}(t)$ в виде разложения в ряд по полиномам Чебышева:

$$y_{эТ}(t) = \sum_{j=0}^N \mu_j T_j(t) + \varepsilon_k(t).$$

Число N выбирается таким, что $|\varepsilon_k(t)| \leq \frac{\varepsilon_{ст}}{10}$. Тогда

$$y_{пм}(t) - y_{эТ}(t) = \sum_{j=0}^N (\rho_j(\bar{K}) - \mu_j) T_j(t),$$

а решение системы нелинейных алгебраических уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} \rho_0(\bar{K}) - \mu_0 &= 0 \\ \rho_1(\bar{K}) - \mu_1 &= 0 \\ &\dots\dots\dots \\ \rho_N(\bar{K}) - \mu_N &= 0 \end{aligned} \right\}$$

относительно \bar{K} и есть искомые настройки ПМ. Однако, учитывая проблемы доказательства и поиска решения нелинейных систем уравнений, ослабим условие и будем искать вектор \bar{K} , который минимизирует выражение:

$$\min_{\bar{K}} F_N(\bar{K}) = \sum_{j=0}^N (\rho_j(\bar{K}) - \mu_j)^2.$$

Если в результате минимизации $F_N(\bar{K})$ получен \bar{K} такой, что

$$y_{пм}(t) = \sum_{j=0}^N \rho_j(\bar{K}) T_j(t)$$

удовлетворяет предъявляемым требованиям, то задача считается решенной.

Следует отметить, что успех решения задачи в значительной степени зависит от удачного выбора кривой $y_{эТ}(t)$, то есть параметров эталонного колебательного звена. Поэтому имеет смысл, исходя из заданных требований к качеству регулирования, определить область $G_{эТ}$, такую, что переходная функция колебательного звена со значениями ξ и T из этой области, удовлетворяет требуемому качеству. Пусть имеется разложение переходной функции колебательного звена в виде явной зависимости коэффициентов разложения от ξ и T , то есть

$$y_{эТ}(t) = \sum_{j=0}^N \mu_j(\xi, T) T_j(t).$$

Тогда получим функцию $F_N(\bar{K})$ в виде $F_N(\bar{K}, \xi, T)$ и будем ее минимизировать по переменным \bar{K}, ξ, T :

$$\min_{\bar{K}, \xi, T \in G_{эТ}} F_N(\bar{K}, \xi, T).$$

Таким образом, из всего множества допустимых реакций выбирается та, которая наиболее адекватна динамике рассматриваемой системы. Для решения задачи необходимо выбрать N и определить области допустимых значений для заданных требований к качеству управления.

Рассмотрим методику определения $G_{эТ}$ для заданных требований к качеству управления, то есть $\beta_d, T_{пзд}, \varepsilon_{ст}$ на примере СС. Как известно, переходная функция колебательного звена имеет вид:

$$y_{эТ}(t) = \left[1 - e^{-\beta t} \left(\cos \omega_1 t + \frac{\beta}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right) \right] 1(t),$$

где $\beta = \frac{\xi}{T} = \omega_0 \xi$ – коэффициент затухания, $\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} = \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{T}$ – собственная частота колебательного звена. Вычислим $\mu_j(\xi, T)$, используя метод тригонометрического интерполирования [7].

Переопределим функцию $y_{эТ}(t)$ на отрезок $[-1, 1]$, выполнив следующую замену переменных $t = \frac{1}{2}(t' + 1)$, получим:

$$y_{эТ} \left(\frac{1}{2}(t' + 1) \right) = 1 - e^{-\frac{\beta(t'+1)}{2}} \left(\cos \left(\frac{\omega_1(t'+1)}{2} \right) + \frac{\beta}{\omega_1} \sin \left(\frac{\omega_1(t'+1)}{2} \right) \right)$$

или, проводя соответствующие преобразования:

$$\tilde{y}_{эТ}(t') = y_{эТ} \left(\frac{1}{2}(t' + 1) \right) = 1 - e^{-1} e^{-\beta t'/2} \left(\cos \left(\frac{\omega_1(t'+1)}{2} \right) + \frac{\beta}{\omega_1} \sin \left(\frac{\omega_1(t'+1)}{2} \right) \right).$$

В соответствии с алгоритмом треугольной интерполяции коэффициенты разложения определяются по формулам:

$$\mu_0(\beta, \omega_1) = \rho^2 \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^N \tilde{y}_{эТ}(\lambda_k)$$

$$\mu_j(\beta, \omega_1) = \rho^2 \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^N \tilde{y}_{эТ}(\lambda_k) \cos \left(j \frac{2k-1}{2N} \pi \right),$$

где $\rho^2 \frac{2}{\pi} = 1 / \left(\frac{1}{2} + \sum_{k=1}^N \left(\cos \left(k \frac{\pi}{2N} \right) \right)^2 \right)$.

Для выбранного отрезка и функции $\tilde{y}_{эТ}(t')$ коэффициент $\rho^2 \frac{2}{\pi} = 0,4$ для $N=5$, а $\lambda_k = \cos \pi \frac{2k-1}{2N}$, $k=1,2,3,4,5$. Тогда получаем следующие выражения для $\mu_j(\beta, \omega_1)$:

$$\mu_0(\beta, \omega_1) = 1 - \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 e^{-\alpha_k \beta} (\cos(\alpha_k \omega_1) + \frac{\beta}{\omega_1} \sin(\alpha_k \omega_1))$$

$$\alpha_k = \frac{1}{2} (\cos \frac{2k-1}{10} \pi + 1), k = 1,2,3,4,5$$

$$\alpha_1 = 0,975529, \alpha_2 = 0,793893, \alpha_3 = 0,5, \alpha_4 = 0,206108, \alpha_5 = 0,024472$$

$$\mu_j(\beta, \omega_1) = \sum_{k=1}^5 \Upsilon_k^j + \sum_{k=1}^5 \Upsilon_k^j e^{-\beta \alpha_k} (\cos(\alpha_k \omega_1) + \frac{\beta}{\omega_1} \sin(\alpha_k \omega_1))$$

$$\Upsilon_k^j = \rho^2 \frac{2}{\pi} \cos(j \frac{2k-1}{2N} \pi).$$

Далее получим ограничения на β при заданных ограничениях на переходной процесс. Пусть задано максимально допустимое время переходного процесса $T_{пнд}$ и максимально допустимое перерегулирование $\bar{b}_д$. Найдем выражение для экстремальных значений $y_{эТ}(t)$:

$$\frac{dy_{эТ}(t)}{dt} = (\frac{\beta^2}{\omega_1} + \omega_1) e^{-\beta t} \sin \omega_1 t = 0,$$

откуда $\omega_1 t_n = \pi n$, следовательно, максимальное значение равняется:

$$\max_t y_{эТ}(t) = y_{эТ}(\frac{\pi}{\omega_1}) = 1 + e^{-\frac{\beta}{\omega_1} \pi}.$$

Таким образом, $\bar{b} = e^{-\frac{\beta}{\omega_1} \pi}$ и для того, чтобы $\bar{b} \leq \bar{b}_д$, коэффициенты β и ω_1 должны удовлетворять следующему неравенству:

$$(\frac{1}{\pi} \ln \frac{1}{\bar{b}_д}) \omega_1 - \beta \leq 0.$$

Теперь найдем условия на ω_1 и β , при которых время переходного процесса, то есть время вхождения в трубку точности, задаваемой статической ошибкой $\varepsilon_{ст}$, меньше максимально допустимой величины $T_{пнд}$. Поскольку значения $y_{эТ}(t)$ ограничены сверху и снизу, а именно:

$$1 - e^{-\beta t} \leq y_{эТ}(t) \leq 1 + e^{-\beta t},$$

следовательно, если $e^{-\beta t} \leq \varepsilon_{ст}$, и переходной процесс находится в трубке точности:

$$T_{пнд} \leq \frac{1}{\beta} \ln \frac{1}{\varepsilon_{ст}}.$$

$$\text{Если же } \ln \frac{1}{\varepsilon_{ст}} \leq T_{пнд} \beta, \text{ то } \frac{1}{T_{пнд}} \ln \frac{1}{\varepsilon_{ст}} - \beta \leq 0.$$

В результате получены ограничения на β и ω_1 , при которых переходный процесс $y_{эТ}(t)$ удовлетворяет предъявляемым требованиям к качеству управления с точки зрения заданных показателей качества, значит для рассматриваемого примера определена $G_{эм}$.

Выводы

Разработанный алгоритм адаптации САУ обеспечивает накопление информации о динамике управляемого объекта и построение многовариантного прогноза состояния системы в пространстве настраиваемых параметров. Таким образом, в контур САУ фактически вводится акцептор действия, прогнозирующий в реальном масштабе времени наилучший вариант настройки САУ в рамках заданных критериев качества.

Список литературы

1. Дивеев А.И., Пупков К.А., Софронова Е.А. Синтез системы управления – задача тысячелетия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. — 2011. - № 2. — С. 113-125.
2. Задорожная Н.М. Адаптивные САУ с двумя эталонными моделями // Интеллектуальные системы: Труды Десятого международного симпозиума / Под ред. К.А.Пупкова. — М.: РУСАКИ, 2012.
3. Задорожная Н.М., Лунев А.А. Разработка адаптивной системы автоматического управления испытательного стенда для проведения теплопрочностных испытаний // Интеллектуальные системы: Труды Шестого международного симпозиума / Под ред. К.А.Пупкова. — М.: РУСАКИ, 2004.
4. Задорожная Н.М., Лунев А.А. Разработка адаптивной системы управления теплопрочностными испытаниями // Материалы конференции «Информационные системы и технологии ИСТ-2009» // II Международный форум информационных технологий «IT FORUM 2020» / Ярмарка антикризисных решений», XV Международная научно-техническая конференция. — Н.Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, 2009.
5. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю. Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. — 2009. - № 10. — С.35-44.
6. Пупков К.А., Цибизова Т.Ю. Реализация фильтра Вольтерра второго порядка для идентификации нелинейных систем управления // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. — 2006. - № 6. — URL <http://technomag.edu.ru/doc/58741.html>. (дата обращения 19.05.2015).

7. Фам С.Ф., Цибизова Т.Ю. Системы управления летательными аппаратами // В сборнике: *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: Труды международной научно-практической конференции.* — М.: ИИУ МГОУ, 2014. — С. 194-196.
8. Чумаков А.В., Илюшин В.С., Феофилов Е.И. Один из вариантов построения адаптивных систем управления // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика.* — 2002. - № 6. — С. 26-28.

Рецензенты:

Пролетарский А.В., д.т.н., профессор, декан факультета «Информатика и системы управления», зав. кафедрой «Компьютерные системы и сети», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва;
Неусыпин К.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Системы автоматического управления», МГТУ им. Н.Э. Баумана», г. Москва.