

УДК 681.5.01

В.В. Соловьев, Е.А. Шестова

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ С НЕЧЕТКИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Разработана структура адаптивного регулятора с нечеткими параметрами. Показан принцип заполнения базы правил и изменения расположения функций принадлежности выходного сигнала регулятора. Определен принцип усреднения сигнала ошибки для блока адаптации. Выявлены внутренние и внешние параметры оптимизации нечеткого регулятора. Выполнен анализ зависимости интервалов изменения параметров от технологических требований. Установлена связь параметров оптимизации блока адаптации с параметрами нечеткого регулятора. Определены масштабные коэффициенты интервалов универсальных множеств для всех сигналов регулятора и блока адаптации.

Адаптивный регулятор; нечеткие параметры; оптимизация значений.

V.V. Soloviev, E.A. Shestova

**OPTIMIZATION REGULATOR COMPLEX TECHNICAL MANAGERIAL
SYSTEM WITH FUZZY PARAMETERS**

The designed structure of the adaptive regulator with fuzzy parameters. It is shown principle of the filling rulebase and change the location function accessories of the output signal of the regulator. The certain principle of the averaging the signal of the mistake for block of the adaptation. They are revealed internal and external parameters to optimization of the fuzzy regulator. The executed analysis to dependencies interval change parameter from technological requirements. The installed relationship parameter to optimization of the block to adaptation with parameter of the fuzzy regulator. Scale factors intervals of universal sets for all signals of a regulator and the adaptation block are defined.

Adaptive regulator; fuzzy parameters; optimization of the values.

Развитие систем управления технологическими процессами идет в направлении интеграции локальных систем регулирования с системами диспетчерского управления. Это связано с необходимостью получения комплексных оценок функционирования сложных технических систем и повышения эффективности управления [1]. В работах [2, 3] разработаны и исследованы локальные регуляторы для объектов управления нижнего уровня автоматизации. В работе оптимизировался адаптивный регулятор с нечеткими параметрами [4]. Отличительной его особенностью является наличие пустой базы правил и неопределенного положения функций принадлежности выходного сигнала, которые доопределяются в режиме нормального функционирования объекта управления.

Структура и принцип работы адаптивного регулятора. Адаптация регулятора заключается в автоматическом построении базы правил и расположении функций принадлежности выходного сигнала регулятора при функционировании объекта управления в рабочем режиме без использования тестовых воздействий. Структура системы управления с адаптивным нечетким регулятором приведена на рис. 1. Исследуемая система представляет собой адаптивную систему управления с эталонной моделью (ЭМ) в дискретном виде.

Задающее воздействие $g(kT)$ поступает на вход ЭМ и на вход сравнивающего элемента (С1) основного контура управления. На выходе ЭМ формируется ее реакция $u_m(kT)$. На выходе сравнивающего элемента (С2) формируется сигнал ошибки $e_y(kT)$, как рассогласование между выходным сигналом $u_m(kT)$ ЭМ и выходным сигналом $y(kT)$ объекта управления (ОУ). По сигналу ошибки $e_y(kT)$ рассчитывается

ся ее производная $\sigma_y(kT)$ и средняя ошибка $\tau_y(kT)$ за m отсчетов в блоке усреднения (БУ). После масштабирования ($m_{e_y}, m_{\sigma_y}, m_{\tau_y}$) сигналы поступают на вход блока адаптации (БА). Выходной сигнал БА p_y представляет собой величину сдвига функций принадлежности выходного сигнала НР. В НР выполняется фазификация сигнала ошибки e и ее производной σ . В пустой базе правил ищутся правила (далее активные правила), посылки которых включают сочетания активных ФП, т.е.

$$\mu_i(e(kT), \sigma(kT)) > \eta,$$

где η ($0 \leq \eta \leq 1$) - параметр, который определяет "грубость" операции агрегирования.

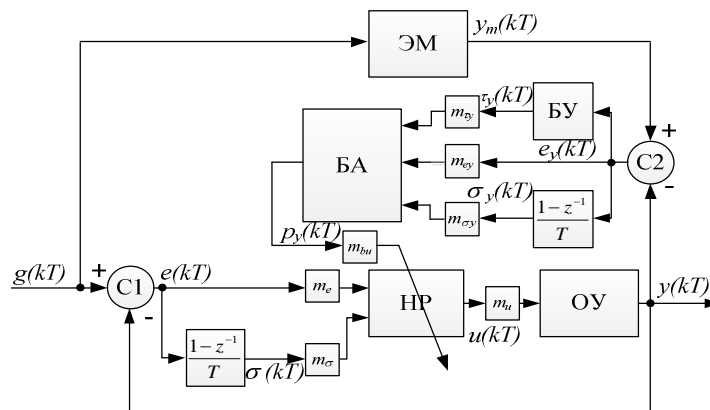


Рис. 1. Структура системы управления с адаптивным нечетким регулятором:

НР – нечеткий регулятор; БА – блок адаптации; ОУ – объект управления; ЭМ – эталонная модель; C1, C2 – сравнивающие элементы; БУ – блок усреднения

Для активных правил выполняется сдвиг ФП выходного сигнала НР. Рассчитываются координаты центров $c_j(kT)$ функций принадлежности выходного сигнала в момент времени kT для активных заключений в соответствии с выражением

$$c_j(kT) = c_j(kT - T) + \psi p_u(kT),$$

где $c_j(kT - T)$ – центры функций принадлежности выходного сигнала для активных правил на предыдущем такте; ψ – модификатор величины сдвига.

Так выполняется заполнение базы правил и определение положения ФП выходного сигнала НР в режиме нормального функционирования ОУ. В БУ рассчитывается средняя ошибка за m отсчетов в соответствии с рис. 2 по формуле

$$\tau_y = \frac{kT - (k - m)T}{m} \cdot \sum_{i=1}^m e_y(k - i),$$

где m – диапазон расчета, на котором величина e_y не изменяет знак.

Если на m тактах знак ошибки меняется, то принимается $\tau_y = 0$.

Выбор эталонной модели для системы управления процедура сложная и неоднозначная. Сложно определить желаемую динамику ОУ и обеспечить эту динамику. На данном этапе естественно прибегнуть к опыту экспертов в соответствующей предметной области для получения рекомендаций относительно желаемой динамики ОУ.

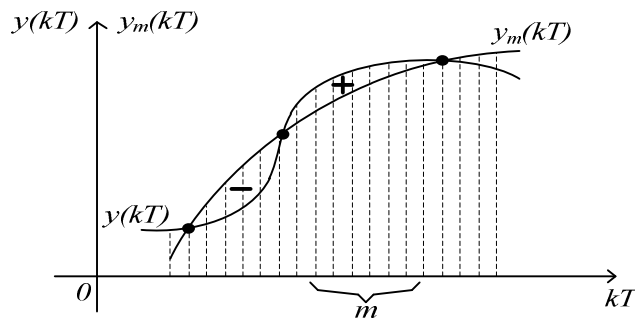


Рис. 2. Иллюстрация подсчета приращения интеграла ошибки

В адаптивной системе управления при исследовании использованы эталонные модели в виде дискретных передаточных функций первого порядка, полученные на основе преобразования Тастина (Tustin) [4] из непрерывных функций, путем замены $s = (2(z-1)) / (T(z+1))$:

$$W(s) = \frac{y_m(s)}{g(s)} = \frac{k_m}{T_m s + 1} \rightarrow W(z) = \frac{y_m(z)}{g(z)} = \frac{k_m T (z+1)}{(2T_m + T)z + (T - 2T_m)}, \quad (1)$$

где k_m, T_m – коэффициент передачи и постоянная времени эталонной модели соответственно; T – период квантования.

Из (1) получим уравнение

$$y_m(k) = \frac{1}{T + 2T_m} (k_m \cdot T \cdot g(k) + k_m \cdot T \cdot g(k-1) + y_m(k-1)(2 \cdot T_m - T)),$$

которое использовано при моделировании ЭМ.

С их помощью можно провести исследование динамики широкого класса систем с апериодическими и колебательными переходными процессами для устойчивых и неустойчивых ОУ [5].

Оптимизация параметров регулятора. Для рассмотренного выше адаптивного нечеткого регулятора можно выделить ряд параметров оптимизации, которые оказывают влияние на качество процесса управления. В первую группу относятся параметры входных и выходных сигналов нечеткого контроллера и блока адаптации: параметры входных и выходных сигналов контроллера (m_e, m_σ, m_u) и универсальные множества его лингвистических переменных (R_e, R_σ, R_u); параметры входных и выходных сигналов блока адаптации ($m_\tau, m_\sigma, m_{e\tau}, m_{bu}$) и универсальные множества его лингвистических переменных ($R_\tau, R_\sigma, R_{e\tau}, R_{bu}$).

Во вторую группу относятся внутренние параметры нечеткого регулятора: модификатор величины сдвига ψ функций принадлежности выходного сигнала нечеткого контроллера; параметры функций принадлежности выходного сигнала нечеткого контроллера.

Определим величины параметров для одномерного объекта управления. В случае многосвязного объекта, параметры устанавливаются аналогично для каждого канала управления.

Параметры сигналов нечеткого контроллера. Параметры m_e, R_e . В адаптивной нечеткой системе управления применяется принцип управления по отклонению [5]. Сигнал ошибки определяется как $e(kT) = g(kT) - y(kT)$. Рассмотрим случай постоянного сигнала задания $g = const > 0$. В начальный момент времени $e(kT) = g(kT) - 0 = g$ и при монотонно возрастающем выходном сигнале объекта

управления ошибка будет стремиться к нулю. Если технологическое требование к монотонному виду переходного процесса при проектировании системы управления строго оговорено, то в этом случае рекомендуется установить $m_e=1/g$, и ширину универсального множества лингвистической переменной "Ошибка" в нечетком контроллере $R_e \in [0, 1]$. В случае аperiodического или колебательного переходного процесса при $g=const>0$ в системе управления возникает перерегулирование ($\sigma = (y_{max}-g)/g \cdot 100\%$) [5] и величина ошибки может быть отрицательной $\varepsilon(kT)<0$ ($y(kT)>g$) в случае положительного перерегулирования или положительной $\varepsilon(kT)>1$ ($y(kT)<0$) в случае отрицательного перерегулирования. В этом случае, в зависимости от технологических требований к синтезу систем управления рекомендуются следующие величины параметров: допустимо только положительное перерегулирование с технологическим ограничением $\sigma \leq \sigma_{max}$: $m_e=1/g$ и $R_e \in [-\sigma_{max}/100, 1]$; допустимо только отрицательное перерегулирование с технологическим ограничением $\sigma \leq \sigma_{min}$: $m_e=1/g$ и $R_e \in [0, 1+\sigma_{min}/100]$; допустимо отрицательное и положительное перерегулирование с технологическим ограничением $\sigma_{min} \leq \sigma \leq \sigma_{max}$: $m_e=1/g$ и $R_e \in [-\sigma_{max}/100, 1+\sigma_{min}/100]$.

Для переменного сигнала задания $g=var>0$ рекомендуется установить $m_e=1/g_{max}$ (где g_{max} – максимальное отклонение сигнала задания), и $R_e \in [-1, 1]$. В этом случае величина сигнала задания будет целиком отображаться на универсальное множество лингвистической переменной "Ошибка". Как представлено выше, технологические ограничения на вид переходного процесса объекта управления, требуют изменения не только параметра m_e , но и ширины универсального множества лингвистической переменной "Ошибка". Это необходимо для минимизации количества ее функции принадлежности и повышения качества управления.

Параметры m_σ R_σ В процессе функционирования систем управления, в зависимости от типа объекта управления и типа входного воздействия, сигнал в канале производной может достигать больших амплитуд и иметь в своем составе высокочастотную составляющую. Это особенно проявляется для объектов, функционирующих в условиях неопределенности, при изменении структуры и параметров.

На рис. 3 приведены графики ошибки (а) и ее производной (б) для объекта, описанного дискретной передаточной функцией второго порядка. В момент времени $kT=0,5$ с (k – номер отсчета, T – шаг квантования) произошло изменение сигнала задания $g: 1 \rightarrow 1+0,01 \cdot \sin(100 \cdot kT)$ и постоянной времени $T_f: 0,4 \rightarrow 0,1$ с. Это привело к резкому увеличению амплитуды производной ошибки и возникновению колебаний.

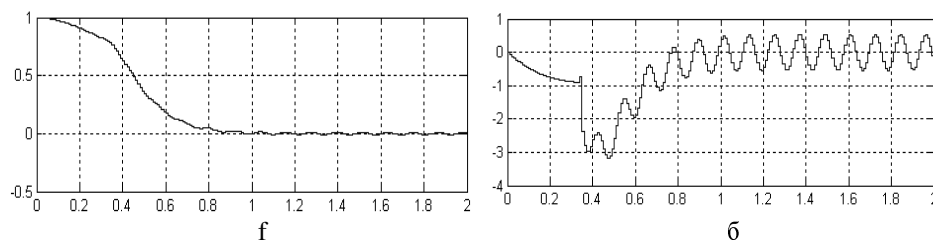


Рис. 3. График ошибки (а) и ее производной (б) для объекта второго порядка

Здесь можно сделать два вывода. Во-первых, если по технологическим требованиям небольшие отклонения выходного сигнала в установившемся режиме (для $kT>1$ с) допустимы, то наличие колебаний производной ошибки большей амплитуды, может привести к колебательному процессу на выходе регулятора и повышенному износу исполнительных механизмов. Во-вторых, для объекта, функ-

ционирующего в условиях неопределенности, сложно заранее определить амплитуду отклонения сигнала производной ошибки. Положим $m_\sigma=1$ и определим универсальное множество лингвистической переменной "Производная ошибки".

Для повышения эффективности управления объектом в условиях неопределенности воспользуемся методом вариации универсального множества лингвистической переменной "Производная ошибки". Суть метода состоит в том, что при изменении амплитуды сигнала производной ошибки, ширина универсального множества лингвистической переменной варьируется в динамике таким образом, чтобы устранить колебания управляющего сигнала регулятора.

На рис. 4 приведена иллюстрация метода вариации универсального множества для изменения сигнала производной ошибки, представленного на рис. 3,б.

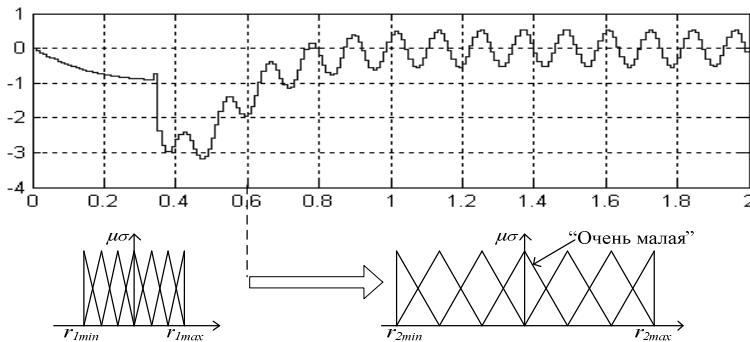


Рис. 4. Иллюстрация метода вариации универсального множества

Изначально, задана ширина универсального множества лингвистической переменной "Производная ошибки" $R_\sigma \in [r_{1min}, r_{1max}]$. В момент времени $kT=0,6$ с, при уменьшении величины ошибки до $e(kT) < e_{nop}$ (e_{nop} – заданное пороговое значение величины ошибки) (см. рис. 3,а) производится растяжение универсального множества $R_\sigma \in [r_{2min}, r_{2max}]$. То есть отклонения сигнала ошибки в установившемся режиме, для нового универсального множества, будут принадлежать терму "Очень малая". Это приведет к ослаблению влияния колебаний сигнала производной ошибки на процесс управления. При увеличении сигнала ошибки до значений $e(kT) > e_{nop}$ производится сжатие универсального множества лингвистической переменной $R_\sigma \in [r_{1min}, r_{1max}]$ для усиления влияния сигнала производной ошибки на процесс управления.

Параметры m_w, R_w . Величина выходного сигнала нечеткого регулятора зависит от его конструктивной реализации и от устройств сопряжения регулятора с объектом управления. На сегодняшний день известны несколько способов реализации нечетких регуляторов [4], каждый из которых предполагает конструктивное исполнение на микроконтроллере.

В связи с этим, для управления даже маломощными объектами управления в технических системах, не обойтись без устройств сопряжения устройства управления с объектом. Разработка и исследования указанных устройств выходит за рамки данной работы, поэтому при исследовании и синтезе системы управления принимался $m_u=1$ и $R_u \in [-1, 1]$.

Параметры сигналов блока адаптации. **Параметры m_{ey}, R_{ey} .** В общем случае величина рассогласования выхода эталонной модели и объекта управления $e_y(kT) = y_m(kT) - y(kT)$ может иметь произвольную амплитуду и знак. Положим $m_{ey}=1$, а для определения параметра R_y необходимо определить пороговые отклонения

ошибки, при которых производится вариация выходного сигнала БА. Пороговые отклонения $e_{y.min}$ и $e_{y.max}$ зависят от точности задания эталонной модели и соответствия ее динамики реальному объекту управления. Следовательно, положим $R_y \in [e_{y.min}, e_{y.max}]$.

Параметры m_{σ_y} , R_{σ_y} . Скорость отклонения выходного сигнала объекта управления от выходного сигнала эталонной модели $\sigma_y(kT)$ может достигать больших амплитуд на участках резкого изменения выходного сигнала модели. Это происходит, например, при изменении сигнала задания или при влиянии внутренних или внешних возмущений на объект управления. Требование к соответствию динамики объекта управления динамике эталонной модели одно из основных при разработке адаптивных систем с эталонной моделью. В связи с этим ограничим влияние сигнала $\sigma_y(kT)$ больших амплитуд, положив $R_{\sigma_y} \in [-1, 1]$ и $m_{\sigma_y} = 1$.

Параметры m_{τ_y} , R_{τ_y} . Введение в структуру БА сигнала усреднения ошибки $\tau_y(kT)$ повышает качество управления в переходных режимах и при действии возмущений. Величина данного сигнала зависит от амплитуды сигнала рассогласования $e_y(kT)$. Поэтому положим $m_{\tau_y} = 1$ и $R_{\tau_y} = R_y$.

Параметры m_{b_u} , R_{b_u} . Величина сдвига функций принадлежности выходного сигнала $p_u(kT)$ в нечетком контроллере не должна превышать границы его универсального множества $R_u \in [-1, 1]$. Следовательно, положим $m_{b_u} = 1$ и $R_{b_u} \in [-1, 1]$.

Внутренние параметры нечеткого контроллера. Модификатор величины сдвига ψ . Параметр ψ существенно влияет на амплитуду выходного сигнала регулятора и на качество управления. Большая величина ψ может приводить к резкому изменению знака ошибки, приводить к колебательному переходному процессу и повышенной нагрузке на исполнительные механизмы. Меньшая величина ψ может приводить к большим энергетическим затратам на управление и большой величине функционала по ошибке отклонения от динамики эталонной модели.

Из представленных заключений можно сделать вывод о связи параметра ψ со скоростью отклонения выходного сигнала объекта управления от выходного сигнала эталонной модели $\sigma_y(kT)$. Поэтому при исследовании и синтезе системы управления положим $\psi = \sigma_y(kT)$.

Параметры функций принадлежности выходного сигнала нечеткого контроллера. В переходном режиме функционирования объекта управления, а также под влиянием возмущающих воздействий, величина ошибки $e_y(kT)$ может достигать пороговых отклонений $e_{y.min}$ и $e_{y.max}$. В этом случае применим операцию растяжения нечетких множеств [4] для функций принадлежности выходного сигнала активных правил на текущем такте $\mu(r)^* = \mu(r)^{0.5}$.

Иллюстрация предложенной операции представлена на рис. 5.

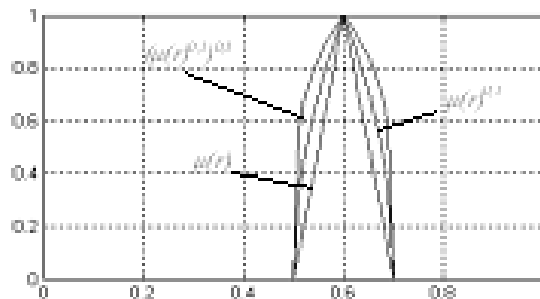


Рис. 5. Иллюстрация операции растяжения

Операция растяжения применяется последовательно несколько раз ($\mu(r) \rightarrow \mu(r)^{0.5} \rightarrow (\mu(r)^{0.5})^{0.5}$ и т.д.) в том случае, если два и более раза подряд на смежных тактах управления одни и те же активные правила участвуют в механизме нечеткого вывода. Как только происходит изменение активных правил, форма функций принадлежности возвращается к исходной ($\mu(r)^* \rightarrow \mu(r)$). Перечисленные параметры оптимизации адаптивного регулятора с нечеткими параметрами приводят к повышению эффективности управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соловьев В.В., Финаев В.И. Постановка задачи синтеза управления сложной системой в условиях априорной неопределенности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 5 (94). – С. 59-65.
2. Соловьев В.В. Разработка моделей энергетических систем с применением аппарата нечеткой логики // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 2 (91). – С. 251-256.
3. Соловьев В.В., Финаев В.И. Модель регулятора для локальных систем регулирования с применением методов искусственного интеллекта // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 2 (115). – С. 166-172.
4. Passino, Kevin M. Fuzzy control. Addison Wesley Publishing Company. 1997. – 475 p.
5. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического управления. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Соловьев Виктор Владимирович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371773; кафедра систем автоматического управления; ст. преподаватель.

Шестова Елена Александровна – e-mail: shestovaelena@mail.ru; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; ассистент.

Soloviev Victor Vladimirovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371773; the department of automatic control systems; senior lecturer.

Shestova Elena Alexandrovna – e-mail: shestovaelena@mail.ru; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; assistant.