

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ САМОНАСТРАИВАЮЩИЕСЯ СЛЕДЯЩИЕ ПИ-СИСТЕМЫ МАКСИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ УСТОЙЧИВОСТИ****А.М. Шубладзе, С.В. Гуляев, В.Р. Ольшванг, В. А. Малахов (ИПУ РАН),  
С.И. Кузнецов (ОАО "НИИТеплоприбор), А.В. Кротов (ОАО "Газавтоматика")**

Предлагаются быстродействующие самонастраивающиеся ПИ-системы максимальной степени устойчивости, предназначенные для построения высокоточных следящих систем управления аperiodическими объектами, поведение которых с достаточно высокой точностью аппроксимируется моделью, представляющей собой  $n$  последовательно соединенных инерционных звеньев с постоянной времени  $T_1$ , а одно инерционное звено – с постоянной времени  $T_2$ , которая существенно больше  $T_1$ .

Ключевые слова: быстродействие, самонастройка, ПИ-системы, регулятор, аппроксимация, постоянная времени.

Институтом проблем управления РАН совместно с ОАО "Ниитеплоприбор" и ОАО "Газавтоматика" разработаны самонастраивающиеся быстродействующие следящие ПИ-системы максимальной степени устойчивости, предназначенные для управления аperiodическими объектами, поведение которых с достаточно высокой точностью аппроксимируется моделью, представляющей собой последовательно соединенные одинаковые инерционные звенья с постоянной времени  $T_1$ , а одно инерционное звено – с постоянной времени  $T_2$ , которая существенно больше  $T_1$ . Передаточная функция аппроксимирующей модели объекта управления имеет вид:

$$W(p) = \frac{k_0}{(T_1 p + 1)^n (T_2 p + 1)}, \quad T_2 > T_1, \quad (1)$$

где  $k_0$  – коэффициент усиления объекта,  $n$  – число инерционных звеньев с постоянной времени  $T_1$ .

Передаточной функцией (1) можно с высокой точностью аппроксимировать поведение многих промышленных объектов, работающих в режиме обработки различных задающих воздействий, поэтому построенные самонастраивающиеся быстродействующие следящие ПИ-системы управления объектами с моделью (1) имеют большое практическое значение. Самонастройка системы состоит в определении настроечных параметров ПИ-регулятора при начальном запуске системы с использованием разгонных характеристик. Момент начала самонастройки определяется оператором по отсутствию в данный момент значительных возмущений или автоматически с помощью специального алгоритма, определяющего этот момент.

Поскольку в следящих системах поведение объекта определяется преимущественно управляющим воздействием, выбор способа идентификации на основе анализа разгонных характеристик представляется обоснованным. Наиболее эффективно использование предлагаемого алгоритма идентификации для объектов, в которых происходит обработка сравни-

тельно медленных возмущений, например, для управления тепловыми процессами в различных нагревательных печах.

Решение задачи построения быстродействующих следящих ПИ-систем будет основано на том, что при синтезе систем максимальной степени устойчивости, описанном в работах [1-3], наряду с определением настроечных параметров ПИ-регулятора для модели (1) вычисляется также значение максимальной степени устойчивости замкнутой ПИ-системы управления. В этом случае крайним правым корнем замкнутой системы является действительный отрицательный корень кратности три, отстоящий от мнимой оси на величину степени устойчивости. Поэтому при известных  $T_1$ ,  $n$ ,  $T_2$ ,  $k_0$  и вычисленных в соответствии с [1] значениях настроек и величины максимальной степени устойчивости появляется возможность устранения влияния трех крайних правых, самых "медленных" действительных корней характеристического полинома замкнутой системы при обработке задающего воздействия путем преобразования этого задающего воздействия форсирующим фильтром не ниже третьего порядка. Числителем этого фильтра является полином третьего порядка, который имеет тот же действительный корень кратности три, что и характеристический полином замкнутой системы.

В связи со сказанным решение задачи построения самонастраивающихся быстродействующих следящих ПИ-систем управления аperiodическими объектами должно содержать:

- 1) идентификатор параметров  $T_1$ ,  $n$ ,  $T_2$  и  $k_0$  модели (1);
- 2) блок пересчета параметров  $T_1$ ,  $n$ ,  $T_2$  и  $k_0$  в оптимальные по степени устойчивости настроечные параметры ПИ-регулятора  $k_{п0}$  и  $k_{и0}$ ;
- 3) дифференцирующий входной фильтр, передаточная функция которого может иметь, например, вид

$$W_{\text{дф}}(p) = \frac{(I_0^{-1} p + 1)^3}{\sum_3 a_{\text{фи}} p^i + 1}, \quad (2)$$

где  $I_0$  – значение максимальной степени устойчивости ПИ системы с моделью (1),  $a_{phi}$  – параметры полинома, крайний правый корень которого расположен существенно левее  $I_0$ .

Одним из наиболее простых и с практической точки зрения достаточно точным способом идентификации параметров  $T_1, n, T_2$  и  $k_0$  (1) является способ, описанный в работах [4-6]. Основан способ на использовании ступенчатого управляющего воздействия

$$\Delta u(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ \delta u & \text{при } t \geq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\delta u$  – постоянная величина, которая подается на вход объекта, и ее последующая обработка выходного сигнала объекта  $x_u(t)$  и его первой производной  $x'_u(t)$  на это ступенчатое воздействие. Подачу идентифицирующего ступенчатого воздействия следует производить в момент относительной стабилизации выхода объекта, то есть при  $|x_u(0)| \leq \epsilon_0, |x'_u(0)| \leq \epsilon_1$ . Величина скачка  $\delta u$  выбирается исходя из свойств объекта таким образом, чтобы реакция на этот скачок была заметна на фоне шумов. Подробно способ идентификации параметров  $T_1, n, T_2$  и  $k_0$  модели (1) с помощью идентифицирующего воздействия описан в работах [4-6].

Рассмотрим пример работы описываемых систем с типичным апериодическим объектом, чтобы оценить эффективность предлагаемого способа построения быстродействующих следящих систем. Пусть таким объектом будет, например, объект с передаточной функцией вида:

$$W_o(p) = \frac{1}{(p+1)(2p+1)(3p+1)(4p+1)(50p+1)}. \quad (4)$$

Идентифицируя в соответствии с методикой, изложенной в работах [4-6], параметры  $T_1, n, T_2$  и  $k_0$  модели (1) объекта (4), получим  $T_1 = 2,19, n = 4, T_2 = 2,19$  и  $k_0 = 1$ , при которых передаточная функция модели:

$$w_m(p) = \frac{1}{(2,19p+1)^4(49,55p+1)}. \quad (5)$$

Для параметров модели (5) найдем оптимальные по степени устойчивости параметры ПИ-регулятора способом, описанном в [3], для стандартной структуры такого регулятора, имеющей вид:

$$u_{пис}(t) = k_{пi}\varepsilon(t) + k_{и}\int_0^t \varepsilon(\tau)d\tau, \quad (6)$$

где  $u_{пис}(t)$  – управляющее воздействие,  $\varepsilon(t) = g(t) - x(t)$  – ошибка регулирования,  $g(t)$  – задающее воздействие,  $x(t)$  – выходной сигнал объекта,  $k_{пi}$  и  $k_{и}$  настроечные параметры регулятора.

Как следует из [1], оптимальные по степени устойчивости настройки, соответствующие ПИ управлению, задаются формулами:

1) для определения максимальной степени устойчивости  $I_{оп}$ :

$$\begin{aligned} I_{оп} &= -0,5(-b + \sqrt{b^2 - 4ac})a^{-1}, \\ a &= (n+1)(n+2)T_1T_2, \\ b &= (n+1)(nT_1 + 4T_2)T_1, \\ c &= 2(nT_1 + T_2) \end{aligned} \quad (7)$$

2) для определения оптимальных значений  $k_{пi}$  и  $k_{и}$ :

$$\begin{aligned} k_{пi} &= -(-T_1 + 1)^{n-1}((n+2)T_1T_2I^2 - \\ &\quad ((n+1)T_1 + 2T_2)I + 1)k_0^{-1}, \\ k_{и} &= -(-T_1I + 1)^n(T_2T_2I^2 - I)k_0^{-1} + k_{пi}I. \end{aligned} \quad (8)$$

Для модели (5) из уравнений (7) и (8) получаем:

$$I_{оп} = 0,065, k_{пi} = 2,146 \text{ и } k_{и} = 0,061. \quad (9)$$

Системе управлений с объектом (4) и регулятором (6-9) соответствует передаточная функция замкнутой системы:

$$W_c(p) = \frac{p2,146 + 0,061}{\left[ p(p+1)(p+2)(p+3)(p+4)(50p+1) + p2,146 + 0,061 \right]}. \quad (10)$$

Наличие полинома первой степени в числителе (12) приводит к тому, что, например, процессы отработки ступенчатого задающего воздействия происходят с перерегулированием, что увеличивает время регулирования и снижает качество процессов управления. От числителя в (10) можно избавиться, если использовать закон (6) в следующем модифицированном виде:

$$u_{пик}(t) = -k_{пi}x(t) + k_{и}\int_0^t \varepsilon(\tau)d\tau, \quad (11)$$

при котором передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

$$W_c(p) = \frac{0,061}{\left[ p(p+1)(p+2)(p+3)(p+4)(50p+1) + p2,146 + 0,061 \right]}. \quad (12)$$

Передаточной функции (12) соответствует процесс, который при ступенчатом задающем воздействии происходит без перерегулирования, но время отработки этого воздействия увеличивается, что также не совсем желательно. Оптимальным по времени регулирования будет процесс, который задается комбинацией законов (6) и (11), то есть закон управления вида:

$$u_{пик}(t) = (1-\alpha)k_{пi}\varepsilon(t) - \alpha k_{пi}x(t) + k_{и}\int_0^t \varepsilon(\tau)d\tau, \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \quad (13)$$

которому соответствует передаточная функция замкнутой системы:

$$W_c(p) = \frac{p(1-\alpha)2,146 + 0,061}{\left[ p(p+1)(p+2)(p+3)(p+4)(50p+1) + p2,146 + 0,061 \right]}. \quad (14)$$

Для передаточной функции (14) при различных значениях  $\alpha$  можно получить семейство переходных процессов, показанных на рис. 1.

Из приведенных графиков следует, что наиболее предпочтительная по быстродействию структура ПИ-регулятора имеет место при  $\alpha = 0,4$  (13), то есть когда

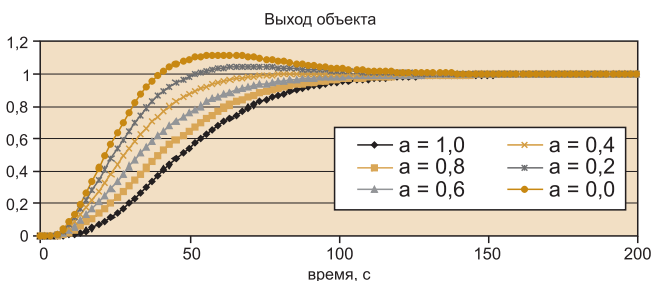


Рис. 1

$$u_{\text{ПИК}}(t) = 1,2876\varepsilon(t) - 0,8684x(t) + 0,061 \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau. \quad (15)$$

В дальнейшем будем проводить сравнение предлагаемых быстродействующих следящих ПИ-систем максимальной степени устойчивости с ПИ-системой управления (15) и объектом с передаточной функцией  $W_o(p)$  (4).

Входной форсирующий фильтр, который должен скомпенсировать отрицательное влияние трех крайних правых действительных корней характеристического полинома замкнутой системы, можно представить, например, в виде:

$$3,641g_1^{(3)}(t) + 70,98g_1^{(2)}(t) + 4,615g_1^{(1)}(t) + g_1(t) = 3641g^{(3)}(t) + 709,78g^{(2)}(t) + 46,15g^{(2)}(t) + g(t) \quad (16)$$

или передаточной функцией:

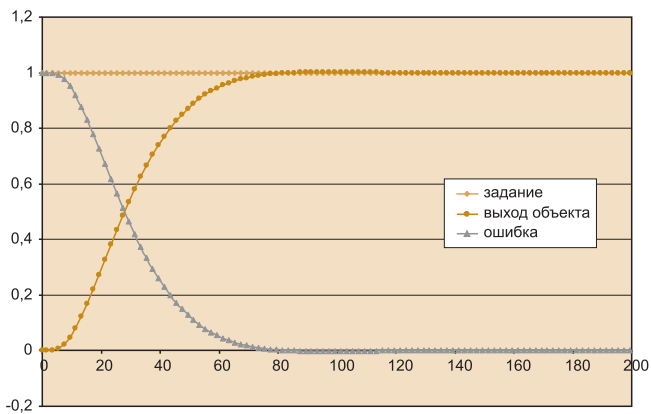


Рис. 3

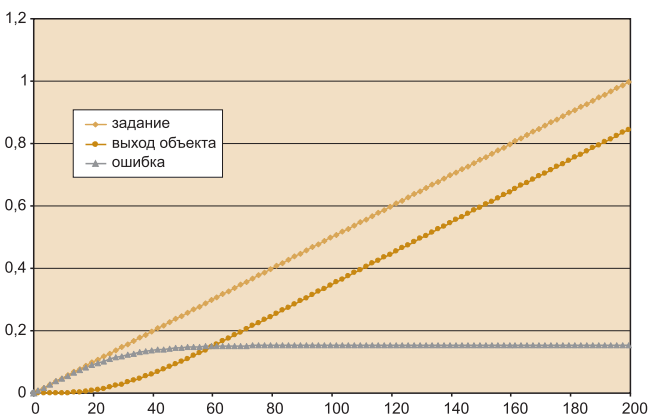


Рис. 5

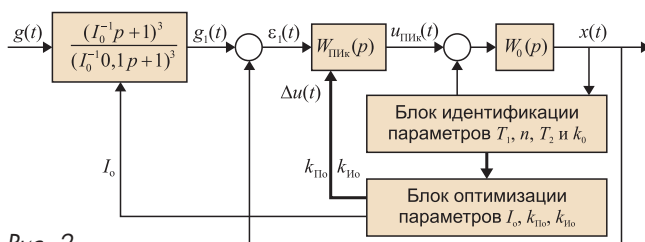


Рис. 2

$$W_{\text{оф}}(p) = \frac{(I_0^{-1}p + 1)^3}{(I_0^{-1}0,1p + 1)^3}, \quad (17)$$

где  $I_0 = 0,065$ .

Блок-схема предлагаемой быстродействующей самонастраивающейся следящей системы с дифференцирующим фильтром изображена на рис. 2.

При проведении сравнения качества работы предлагаемой быстродействующей самонастраивающейся следящей ПИ-системы максимальной степени устойчивости с дифференцирующим фильтром (рис. 2) с комбинированной ПИ-системой  $u_{\text{ПИК}}(t)$  (15) предполагалось, что в блок-схеме рис. 2

$$u_{\text{ПИК}}(t) = 0,1k_{\text{ПД}}\varepsilon(t) - 0,9k_{\text{ПИ}}x(t) + k_{\text{ПИ}} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau.$$

На рис. 3 коричневым цветом показан процесс отработки ступенчатого задающего воздействия комбинированной ПИ-системой  $u_{\text{ПИК}}(t)$  (15), где попадание в 5% трубку происходило за 60 с. На этом рисунке и

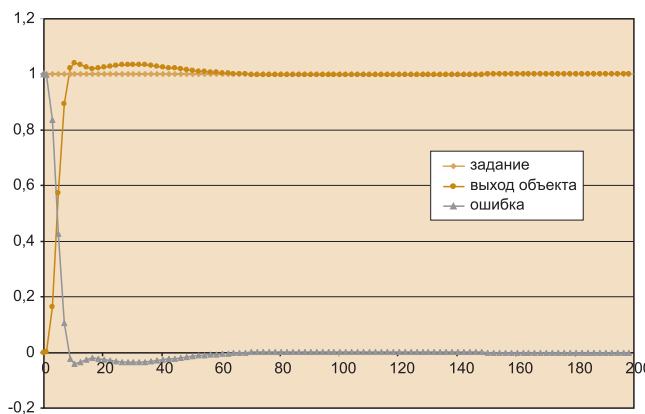


Рис. 4

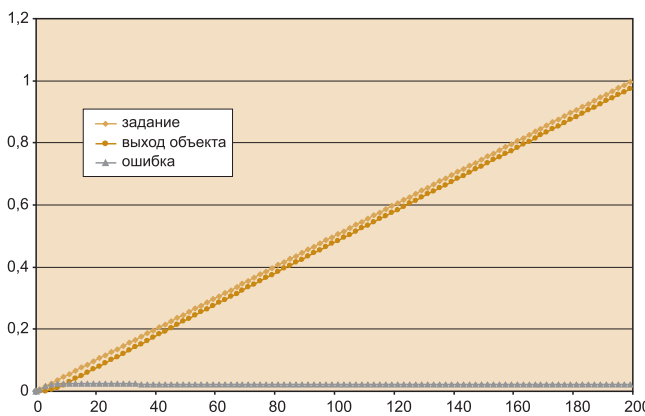


Рис. 6

на всех последующих светлокоричневым цветом показано задающее воздействие, черным – ошибка регулирования.

На рис. 4 изображен процесс обработки ступенчатого задающего воздействия предлагаемой быстродействующей самонастраивающейся следящей ПИ-системы максимальной степени устойчивости с дифференцирующим фильтром, где попадание в 5% трубку происходило за 7 с, то есть почти на порядок быстрее чем, в случае  $u_{\text{ПИК}}(t)$  (15). Вторая волна перерегулирования в выходном сигнале объекта вызвана неполным соответствием оптимальных настроек модели (1) и реальным объектом  $W_o(p)$  (4).

На рис. 5 показан процесс обработки линейно возрастающего задающего воздействия комбинированной ПИ-системой  $u_{\text{ПИК}}(t)$  (15), где уровень установившейся статической ошибки равен 0,15.

На рис. 6 показан процесс обработки линейно возрастающего задающего воздействия предлагаемой быстродействующей самонастраивающейся следящей ПИ-системой (рис. 5), где уровень установившейся статической ошибки равен 0,021, что также примерно на порядок лучше, чем в системе  $u_{\text{ПИК}}(t)$  (15).

Таким образом, предложенные в статье быстродействующие самонастраивающиеся следящие ПИ-системы максимальной степени устойчивости, предназна-

ченные для управления аperiodическими объектами, позволяют, используя известную информацию о крайних правых корнях характеристического полинома замкнутой системы, более эффективно и с более высокой точностью решать задачи слежения при различных видах задающих воздействий в сравнении с обычными широко применяемыми на практике ПИ-системами.

#### Список литературы

1. Шубладзе А.М. Достаточные условия оптимальности структур в системах максимальной степени устойчивости произвольного вида // Автоматика и Телемеханика. 1999. № 8.
2. Гуляев С.В., Черепова Т.И., Шубладзе А.А., Шубладзе А.М. Оптимальные по степени устойчивости системы управления динамическими объектами // Проблемы управления. 2003. №3.
3. Черепова Т.И., Шубладзе А.М. Оптимальные по степени устойчивости системы управления аperiodическими объектами // Автоматика и Телемеханика. 2004. №1.
4. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А. Оптимальные автоматически настраивающиеся общепромышленные регуляторы // Приборы и системы. 2002. №10.
5. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А. Оптимальные автоматически настраивающиеся регуляторы // Датчики и системы. 2002. №10.
6. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А. Адаптивные автоматически настраивающиеся ПИД-регуляторы // Промышленные АСУ и контроллеры. 2003. №6.

*Шубладзе А.М. – д-р техн. наук, зав. лабораторией, Гуляев С.В. – канд. техн. наук,*

*Ольшванг В.Р. – канд. техн. наук,*

*Малахов В.А. – канд. физ.-мат. наук, ст. научные сотрудники ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН,*

*Кузнецов С.И. – ген. директор ОАО "НИИТеплоприбор,*

*Кротов А.В. – канд. техн. наук, начальник управления ОАО "Газавтоматика".*

*Контактный телефон (495) 334-88-81.*

#### Высокоэффективные светодиодные источники питания с мощностями 40 и 60 Вт от Mean Well

АВИТОН, официальный дистрибьютор компании Mean Well в России, сообщает о выпуске новых серий высокоэффективных светодиодных источников питания – HLG-40H/60H.

Компания Mean Well продолжает расширять модельный ряд светодиодных источников питания с высоким КПД в металлическом корпусе в сторону малых мощностей. Серии HLG-40H (40 Вт) и HLG-60H (60 Вт) имеют четыре различных исполнения с разными возможностями подстройки выходных параметров. Основное исполнение не имеет возможностей изменения выходных параметров. Исполнение А позволяет подстраивать выходной ток и выходное напряжение при помощи встроенных потенциометров, доступ к которым осуществляется без разборки корпуса при снятии резиновых заглушек. Исполнение В имеет вход управления выходным током, который позволяет управлять при помощи напряжения 1...10 В, ШИМ сигнала или переменного сопротивления. Это обеспечивает большую гибкость при построении систем с регулированием яркости. Исполнение D (опциональное) имеет таймерную функцию регулирования выходного тока. После включения питания такой источник питания запускает внутренний таймер, управляемый контроллером с предварительно настроенной программой, имеющей до

трех интервалов по времени и четыре уровня яркости. Путем изменения программы можно определить автоматическую подстройку и уровень яркости для каждого интервала времени в соответствии с запросами клиентов.

Серии HLG-40H/60H имеют широкий диапазон входного напряжения 90...305 В и встроенный корректор коэффициента мощности.

Эти источники питания соответствуют нормам по гармоническому составу потребляемого тока по EN61000-3-2 класс С (более 60% нагрузки). Они обеспечивают  $\cos \varphi > 0,9$  при нагрузке более 60% и выдерживают импульсные помехи большой энергии до 4 кВ (по EN61000-4-5) в соответствии с требованиями, предъявляемыми к уличному освещению.

Высокоэффективные современные схемные решения обеспечивают КПД этих источников питания до 91%, так что они могут работать с естественным охлаждением -40...70°C окружающей среды.

**Источники питания HLG-40H/60H** имеют все стандартные функции защиты: от короткого замыкания, перенапряжения, перегрузки и перегрева. Также они имеют сертификаты соответствия требованиям безопасности, включая UL8750 и EN61347-2-13 от UL/CUL/TÜV/CB/CE. Размеры 171x61,5x36,8 мм.

[Http://www.aviton.spb.ru](http://www.aviton.spb.ru)