

Cushnij Sergej Yukovlevich

E-mail: ncschs@rnd.runnet.ru.

Phone: +788632509817.

Leading Researcher; Dr. of Phil. Sc.

Ryabtsev Vladimir Nikolaevich

Laboratory of Geopolitical Problems, Black and Caucasian SFU SKNTs VSH.

E-mail: ncschs@rnd.runnet.ru.

140, Pushkinskaya Street, Rostov-on-Don, 344006, Russia.

Phone: +79281302064.

The Department of Theoretical and Applied Political SFU; Laboratory Head; Cand. of Phil. Sc; Associate Professor.

УДК 681.51:518.5

Т.А. Пьявченко, Е.В. Моисеева

**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД СИНТЕЗА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТОТНЫХ КРИТЕРИЕВ НА ОСНОВЕ
ДАННЫХ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Представлен метод синтеза алгоритма управления с предварительной идентификацией по данным натурального эксперимента с использованием частотных критериев. Требуемые показатели качества управления получаются в ПИ-регуляторе с корректирующей обратной связью. Приводится пример использования предлагаемого метода синтеза для реального объекта управления.

Идентификация; ПИ-регулятор; корректирующая обратная связь; натуральный эксперимент; частотные критерии.

Т.А. Pyavchenko, E.V. Moiseeva

**MATHEMATICAL METHOD OF THE SYNTHESIS ALGORITHM OF
CONTROL WITH USE THE FREQUENCY CRITERION IN BASE GIVEN
PRACTICAL EXPERIMENT**

In working presented Method of the syntheses of the algorithm of control with simultaneous identification as practical the experiment with use the frequency criterion. Demanded indicators of quality of control receive in PI-regulator with corrective feedback. Happens to the example of the use the method of the syntheses for real object of control.

Identification; PI-regulator; corrective feedback; practical experiment; frequency criteria.

Введение. Модели многих объектов в виде передаточных функций содержат звено $e^{-p\tau_{\text{зап}}}$ – звено запаздывания, называемое иногда звеном с транспортной задержкой [1]. Уже по уточненному названию можно говорить о том, что в чистом виде такое звено может присутствовать в технологических конвейерных установках, в записывающих устройствах, в процессах, связанных с перемещением тел в пространстве, скажем, транспортировке по трубам. В действительности же многие процессы (процессы нагрева, изменения влажности, процессы абсорбции, процессы ректификации и т.п.) на начальном участке разгонной характеристики объекта (процесса) имеют изменение выходной переменной, но медленное, что и позволяет заменить его чистым запаздыванием [1, 2, 3].

Такая замена не всегда сказывается благоприятно на синтезе алгоритма управления указанными процессами. К примеру, промышленный регулятор при

наличии звена запаздывания должен содержать дифференциальную составляющую, которая как при реализации, так и в эксплуатации имеет существенные недостатки. Известно [1, 4], что реализовать производную как в аналоговом, так и в цифровом вариантах без погрешности не удастся, что создает внутренние шумы в системе. Кроме того, наличие дифференциальной составляющей в алгоритме управления расширяет полосу пропускания объекта, что обуславливает внешние помехи и для их ограничения требует дополнительных фильтров [1, 3].

В настоящей работе на основе описанного ранее метода идентификации объекта с медленно меняющейся на начальном участке разгонной характеристикой [2] предлагается синтез алгоритма управления в виде ПИ-регулятора с корректирующей обратной связью.

Метод синтеза. Предлагаемый метод синтеза основывается на нескольких постулатах теории автоматического управления:

1. Одним из критериев построения алгоритма управления для промышленных объектов может быть критерий, обеспечивающий технически оптимальный переходный процесс [5. С. 468] с нулевой статической ошибкой.
2. Большинство систем управления могут быть сведены к колебательному звену с коэффициентом затухания $d = 0,7$ [6. С. 238]. При этом основные требования к запасам устойчивости определяются требованием необходимого запаса по фазе $\Delta\varphi_{\text{ср}}$ на частоте среза $\omega_{\text{ср}}$.
3. С целью повышения устойчивости и качества процессов управления объектами с запаздыванием используется предиктор Смита [1, 7].

Предлагаемый метод синтеза алгоритма управления для объектов с медленно меняющейся на начальном участке разгонной характеристикой основывается на предварительном этапе идентификации этого объекта по данным натурального эксперимента [2] и получении его модели в виде передаточной функции

$$W_{\text{оу}}(p) = \frac{K_{\text{оу}}}{(Tp + 1)^N (T_{\text{оу}}p + 1)}, \quad (1)$$

где $K_{\text{оу}}$ – коэффициент передачи, $T_{\text{оу}}$ – наиболее значимая постоянная времени, определяющая длительность переходного процесса $t_{\text{п.п}}$, T и N – постоянная времени и порядок инерционного звена, соответствующего начальному участку разгонной характеристики идентифицируемого объекта.

По данным натурального эксперимента рассчитываются следующие параметры его модели:

коэффициент передачи

$$K_{\text{оу}} = \frac{h_{\text{уст}} - h_{\text{нач}}}{U_{\text{доп}}}, \quad (2)$$

максимальная постоянная времени

$$T_{\text{оу}} = 1,25(t_2 - t_1). \quad (3)$$

Время переходного процесса $t_{\text{п.п}}$ – время, при котором разность $h_i - h_{(i-1)}$ составляет $(0,01 \div 0,05)\Delta h$, $(\Delta h = h_{\text{уст}} - h_{\text{нач}})$.

В выражениях (2) и (3) $h_{\text{уст}}$, $h_{\text{нач}}$ – установившееся и начальное значения выходной переменной объекта, $U_{\text{доп}}$ – допустимая величина тестового сигнала управления на его входе во время снятия разгонной характеристики, t_2 , t_1 – мо-

менты времени, соответствующие значениям $0,7\Delta h$ и $0,33\Delta h$. Очевидно, что для определения перечисленных выше параметров приходится выполнить пару итераций съема разгонной характеристики: с большим шагом дискретности для определения $t_{п.п}$ и с малым, таким, который позволит выявить указанные точки.

Чтобы определить величины T и N в передаточной функции (1), следует на идентифицируемый объект подать гармонический сигнал $u(t) = \sin \omega t$ с частотой

$$\omega_u \leq \frac{\pi}{t_{п.п}} \quad (4)$$

и по данным эксперимента определить амплитуду $A_{оу}$ и запаздывание по фазе $\Delta\varphi_{оу}$ гармонического сигнала на выходе объекта после его окончательного установления, т.е. спустя $(2 - 2,5) \cdot t_{п.п}$.

Записав систему алгебраических уравнений для модуля и фазы комплексного коэффициента передачи $W_{оу}(p)|_{p=j\omega}$ и воспользовавшись пакетом Editor среды Mat Lab, можно определить неизвестные параметры передаточной функции (1). Идентичность модели и идентифицируемого объекта устанавливается по результатам сравнения экспериментальной и модельной разгонных характеристик в соответствии с критерием

$$\rho(y, y_M) = \max_{t \in [0, t_{п.п}, 1]} |y(t) - y_M(t)| \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $y(t)$ – выход объекта, $y_M(t)$ – выход его модели, $\delta(y, y_M)$ – отклонение выхода модели от выхода реального объекта.

После получения в результате идентификации числовых значений параметров передаточной функции (1) составляем структурную схему замкнутой системы с управляющим устройством (УУ) в виде ПИ-регулятора с корректирующей обратной связью (КОС) (рис. 1). Пунктиром на рис. 1 выделено УУ, алгоритм которого должен быть реализован в контроллере.

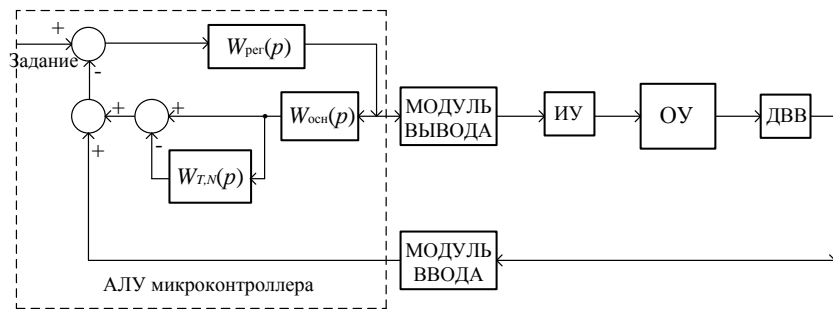


Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы с УУ в виде ПИ-регулятора с КОС

КОС представляет собой соединение модели ОУ $W_{T,N}(p)$, отражающей начальный участок разгонной характеристики, и модели $W_{очн}(p)$, определяющей длительность переходного процесса $t_{п.п}$ в ОУ, так как $T_{оу} \gg T$. Таким образом, имеем:

$$W_{T,N}(p) = \frac{1}{(Tp+1)^N}, \quad W_{\text{очн}}(p) = \frac{K_{\text{оу}}}{(T_{\text{оу}}p+1)}. \quad (6)$$

Модулем вывода может быть широтно-импульсный преобразователь, управляющий обмоткой реле, подключающего питание к исполнительному устройству, например нагревателю, если объект представлен процессом нагрева. Модуль ввода, подключенный к датчику выходной величины ДВВ, должен включать аналоговый фильтр низких частот и аналого-цифровой преобразователь.

Назначение КОС такое же, как и предиктора Смита [3], с той разницей, что содержит не звено с запаздыванием, а набор звеньев, моделирующих начальный участок разгонной характеристики объекта.

Расчет параметров ПИ-регулятора основывается на запасе устойчивости по фазе $\gamma_{\text{ср}}$, величина которого, как рекомендуется в литературе [4] и как подтверждается в рассмотренном ниже примере, должна лежать в пределах 60–75 угловых градусов. Выбрав значение постоянной времени интегрирования как $T_{\text{и}} = 0,6T_{\text{оу}}$, задавая запас по фазе из указанного выше диапазона, решаем нелинейное уравнение фазочастотной характеристики для комплексного коэффициента передачи $W_{\text{оу}}(j\omega)|_{\omega=\omega_{\text{ср}}}$ графически и определяем частоту среза $\omega_{\text{ср}}$, после чего рассчитываем коэффициент передачи регулятора $K_{\text{рег}}$ из условия, что модуль комплексного коэффициента передачи $W_{\text{оу}}(j\omega)|_{\omega=\omega_{\text{ср}}}$ на частоте среза равен 1.

Моделируем замкнутую систему с полученными параметрами управляющего устройства и проверяем выполнение условия технически оптимального переходного процесса, а именно, перерегулирование – не более 5 % и время переходного процесса – не больше постоянной времени $T_{\text{оу}}$.

Если указанные условия не выполняются, изменяем запас устойчивости по фазе $\gamma_{\text{ср}}$, уменьшая его, если показатели качества процесса управления больше заданных, и повторяем перечисленные выше расчеты с одновременной проверкой. Результат – переходный процесс, удовлетворяющий поставленным требованиям и параметры управляющего устройства: $K_{\text{рег}}$, $T_{\text{и}}$, T и N .

Пример. В результате натурального эксперимента получили таблицу значений разгонной характеристики объекта нагрева при подключении нагревателя на полный ток, равный 2,4 А (табл. 1).

В соответствии с изложенным выше по данным табл. 1 определяем:

- ◆ длительность переходного процесса $t_{\text{п.п}} = 4600$ с,
- ◆ коэффициент передачи объекта нагрева

$$K_{\text{оу}} = \frac{h_{\text{уст}} - h_{\text{нач}}}{U_{\text{доп}}} = \frac{42,46 - 20}{2,4} = 9,36^\circ \text{ C/ A},$$

- ◆ максимально значимую постоянную времени

$$T_{\text{оу}} = 1,25(t_2 - t_1) = 1,25(967 - 431) = 670 \text{ с},$$

- ◆ величину запаздывания [2] $\tau_{\text{оу}} = 0,5(3t_1 - t_2) = 0,5(1293 - 967) = 163$ с.

Таблица 1

Значения разгонной характеристики процесса нагрева
(жирным шрифтом в табл. 1 выделены значения t_1 и t_2)

t, c	0	72,8	104	139	158	203	244	297	360	431	437
$T^{\circ}C$	20	20,03	20,11	20,28	20,7	20,97	21,19	21,75	22,4	27,4	23,2
t, c	447	471	511	550	592	634	680	743	814	891	957
$T^{\circ}C$	23,4	23,45	23,8	24,11	24,43	24,72	25,04	25,42	25,82	28,2	30,5
t, c	967	985	1010	1020	1100	1210	1200	1320	1440	1590	1760
$T^{\circ}C$	35,7	35,86	36,1	36,21	36,91	37,75	37,68	38,47	38,12	39,79	40,39
t, c	1970	2230	2460	2740	2970	3160	3390	3640	4260	4600	4700
$T^{\circ}C$	40,95	41,44	41,73	41,98	42,13	42,21	42,28	42,34	42,42	42,45	42,46

Поскольку на исследуемый объект невозможно подать гармонический сигнал, пришлось воспользоваться пакетом Simulink системы Mat Lab. При подаче на вход модели объекта в виде $W_{\text{очн}}(p)e^{-p\tau_{\text{оу}}}$ гармонического сигнала $u(t) = \sin \omega t$ с частотой $\omega_u = \frac{\pi}{6100}$ рад/с (см. (4)) спустя 2,5 периода, т.е. после установления переходного процесса получили запаздывание по фазе на выходе модели объекта $\Delta\varphi_{\text{оу}} = \Delta t_{\text{зап}} \cdot \omega_u = -0,4197$ и амплитуду выходного сигнала $A_{\text{оу}} = 8,8472$.

После подстановки полученных значений в систему алгебраических уравнений, состоящих из фазочастотной и амплитудно-частотной характеристик комплексного коэффициента передачи $W_{\text{оу}}(j\omega)|_{\omega=\omega_u}$, в пакете Editor среды Mat Lab были вычислены значения T и N . При решении эти переменные должны быть представлены как символьные:

```
syms N T
[N,T]=solve(-atan(670*pi/6100)-N*atan(T*pi/6100)+0.4161,-
8.84+9.36/(sqrt(670^2*(pi/6100)^2+1))*...
(sqrt(T^2*(pi/6100)^2+1)^N))
%otvet:N = 3.85766540; T = 42.20.
```

Следовательно, начальный участок разгонной характеристики объекта может быть представлен четырьмя инерционными звеньями с постоянной времени $T = 42,2$ с.

Для проверки результатов идентификации была построена разгонная характеристика модели объекта (1), и после сравнения с данными табл. 1 вычислена погрешность идентификации $\delta_{\text{и}}$, максимальное значение которой составило 1,18 % по отношению к диапазону изменения выходной переменной объекта.

Расчет параметров ПИ-регулятора основан на частотном критерии Найквиста, в соответствии с которым на частоте среза $\omega_{\text{ср}}$ модуль комплексного коэффициента передачи разомкнутой системы равен

$$M(\omega)|_{\omega=\omega_{\text{ср}}} = |W_{\text{рег}}(j\omega_{\text{ср}}) \cdot W_{\text{оу}}(j\omega_{\text{ср}})| = 1, \quad (7)$$

а запас по фазе $\gamma_{\text{ср}}$ должен лежать в указанном выше диапазоне.

Задавая значение постоянной интегрирования $T_{\text{и}} = 0,6T_{\text{оу}}$ и величину запаса по фазе $\gamma_{\text{ср}}$ из этого диапазона, можно вычислить частоту среза путем графиче-

ского решения нелинейного уравнения фазочастотной характеристики комплексного коэффициента передачи разомкнутой системы $\varphi(\omega_{cp})$ по выражению

$$\varphi(\omega_{cp}) = -\frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg}(0,6T_{oy}\omega_{cp}) - \operatorname{arctg}(T_{oy}\omega_{cp}) - N \cdot \operatorname{arctg}(T\omega_{cp}) = -\pi + \gamma_{cp},$$

или после тригонометрических преобразований

$$\varphi(\omega_{cp}) = + \operatorname{arctg} \frac{0,6T_{oy}\omega_{cp} - T_{oy}\omega_{cp}}{1 + 0,6T_{oy}^2\omega_{cp}^2} - N \cdot \operatorname{arctg}(T\omega_{cp}) = \frac{\pi}{2} - \pi + \gamma_{cp}. \quad (8)$$

Для решения графическим способом уравнения (8) при $\gamma_{cp} = 60^\circ$ в пакете Editor системы Mat Lab составлена следующая программа, в которой введены обозначения $T_i = T_i$, $G_{cp} = \gamma_{cp}$:

```
Ti=0.6*670; Toy=670; T=42.2; Koy=9.36; Gcp=pi/3;
for i=1:1000;
x(i)=0.00001*i;
y(i)=atan(270*x(i)/(1+268000*x(i)^2));
z(i)=4*atan(42.2*x(i))+(pi/3-pi/2);
end;
plot(x,y,'k',x,z,'r');grid on.
```

Ответ: $\omega_{cp1} = 0,00427$ рад/с. При $\gamma_{cp} = 75^\circ$ получим $\omega_{cp2} = 0,0043$ рад/с. После того как значение ω_{cp} найдено, с учетом указанных выше параметров системы решается уравнение (7) относительно коэффициента передачи регулятора

$$K_{рег} = (T_i \omega_{cp} (1 + T^2 \omega_{cp}^2)^2 \cdot \sqrt{1 + T_{oy}^2 \omega_{cp}^2} / (K_{oy} \cdot \sqrt{1 + T_i^2 \omega_{cp}^2})) \quad (9)$$

Найденным выше значениям ω_{cp} соответствуют величины $K_{рег1} = 0,2982$, $K_{рег2} = 0,3009$.

Как видим, при изменении запаса по фазе на 15° для системы с *корректирующей связью* коэффициент регулятора меняется весьма незначительно.

Результат работы ПИ-регулятора с КОС при управлении реальным объектом – процессом нагрева, который получен в виде тренда в SCADA-системе Trace Mode, представлен на рис. 2. При этом кривая 1 соответствует регулируемой температуре, кривая 2 – контролируемой влажности в замкнутом объеме.

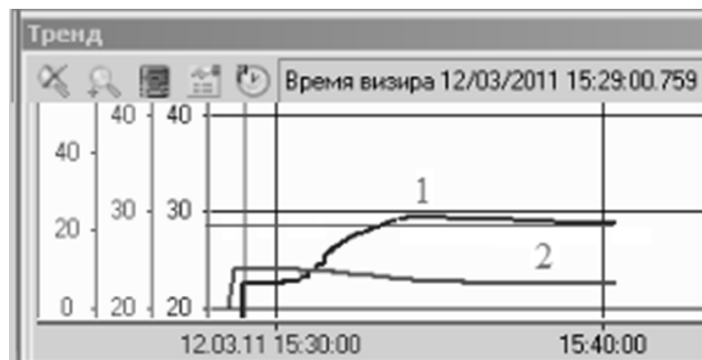


Рис. 2. Результат работы ПИ-регулятора с КОС при управлении процессом нагрева

Время переходного процесса составило 600 с, перерегулирование не более 5 %, что соответствует поставленным требованиям.

В пакете Simulink среды Mat lab было проведено сравнение результатов управления процессом нагрева предлагаемым УУ в виде ПИ-регулятора с КОС и общепринятыми промышленными регуляторами. Отключение КОС существенно повышает перерегулирование и даже приводит к колебательности. Использование ПИД-регулятора вместо предлагаемого управляющего устройства, также приводит к ухудшению показателей процесса управления, особенно при незначительных постоянных времени дифференцирования.

Выводы. На наш взгляд, предлагаемый метод синтеза алгоритма управляющего устройства в виде ПИ-регулятора, охваченного корректирующей обратной связью, прост в использовании, дает результаты, отвечающие критерию технически оптимального переходного процесса с нулевой статической ошибкой. При этом время расчетов незначительно, так как не требует многих итераций, как в системе с адаптивной настройкой ПИД-регулятора. Основное время занимает идентификация объекта, величина которого зависит от значения его максимальной постоянной времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Денисенко В.В.* Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.
2. *Пьявченко Т.А.* Метод идентификации промышленного объекта по его временной и частотной характеристикам // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7 (108). – С. 216-219.
3. *Astrom K.J., Hagglund T.* Advanced PID control. – ISA. The Instrumentation System and Automation Society, 2006. – 460 p.
4. *Бесекерский В.А., Изранцев В.В.* Системы автоматического управления с микроЭВМ. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 320 с. (Теоретические основы технической кибернетики).
5. *Чиликин М.Г., Сандлер А.С.* Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
6. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория автоматического регулирования. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1975. – 768 с.
7. *Smith O.J.M.* Close control of Loops with Dead Time // Chemical Engineering Progress. – 1957. – Vol. 53. – P. 217-235.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Нейдорф.

Пьявченко Тамила Алексеевна

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: pta@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634360418; +79185139107.

Кафедра систем автоматического управления; профессор; к.т.н.; доцент.

Моисеева Елена Викторовна

ОАО "Промтяжмаш".

E-mail: leskor1986@yandex.ru.

347913, г. Таганрог, ул. Химическая, 11-1.

Тел.: +79185023056.

Кафедра систем автоматического управления; инженер-конструктор; соискатель.

P'yavchenko Tamila Alexeevna

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: pta@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634360418; +79185139107.

The Department of Automatic Control Systems; Professor; Cand. of Eng. Sc.; Associate Professor.

Moiseeva Elena Alexeevna

PromTyazhMash OJSG.

E-mail: leskor1986@yandex.ru.

11-1, Ximicheskaya Street, Taganrog, 347913, Russia.

Тел.: +79185023056.

The Department of Automatic Control Systems; Engineer-Designer; Competitor.