

**УДК 681.5.03****ПИД-РЕГУЛЯТОР С ПРЕДИКТОРОМ СМИТА В СИСТЕМАХ НАГРЕВА  
ВАКУУМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**Александр Андреевич Шатаев<sup>(1)</sup>, Никита Андреевич Сизых<sup>(2)</sup>*Студент 4 курса<sup>(1)</sup>, студент 4 курса<sup>(2)</sup>,**кафедра «Электронные технологии в машиностроении»**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана**Научный руководитель: В. Т. Рябов,**кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в  
машиностроении»*

Регулятор системы нагрева в вакуумном технологическом оборудовании необходим для выдерживания стабильных параметров режима конденсации молекул на поверхности подложки, что определяет адгезию и структуру пленки [1].

Для нагрева подложки в вакууме можно записать уравнение теплового баланса [2]:

$$Q = Q_i + Q_o, \quad (1)$$

где  $Q = k_1(T_2 - T_1)$  – количество теплоты, затрачиваемое на нагрев,

$Q_i(\tau) = \int_0^\tau P(t)dt$  – количество теплоты, поступающее от нагревателя,

$Q_o(\tau) = -k_2 \int_0^\tau [T_0 - T_i(t)]dt$  – количество теплоты, расходуемое на

нагрев окружающей среды.

Продифференцировав (1), получаем дифференциальное уравнение (2).

$$k_1 \frac{dT}{dt} = k_2 [T_0 - T_i(t)] + P(t), \quad (2)$$

где  $P(t) = \frac{U^2}{R} x(t)$  – мощность нагревателя,

$x(t) = 0..1$  – сигнал управления мощностью.

Разделим обе части уравнения (2) на  $k_2$  и приведем его стандартному виду (4):

$$T \frac{dT}{dt} + [T_i(t) - T_0] = Kx(t), \quad (3)$$

$$T \frac{dT}{dt} + y(t) = Kx(t), \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение вида (4) описывает апериодическое звено первого порядка. Передаточная функция такого звена имеет вид (5).

$$W(S) = \frac{K}{TS + 1}, \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент усиления,  $T$  – постоянная времени.

На рисунке 1 приведен экспериментально полученный график переходного процесса нагрева подложки в вакууме.

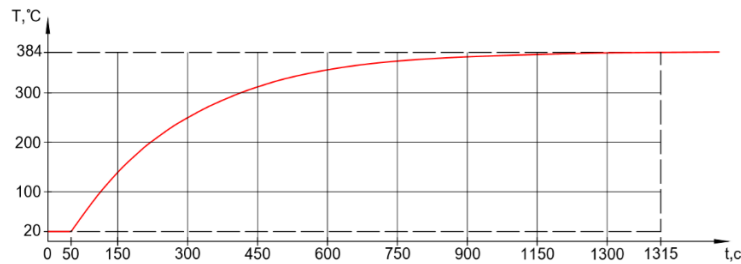


Рис. 1. Переходный процесс резистивного нагрева в вакууме

Но, помимо апериодического звена 1-го порядка (5), в реальной системе присутствует транспортная задержка, тогда передаточная функция объекта примет вид (6).

$$W(S) = \frac{e^{-s\tau} K}{TS + 1}, \tag{6}$$

Транспортная задержка (запаздывание) – типовой элемент реальных объектов регулирования, который передает сигнал со входа на выход без искажения, но с некоторым запаздыванием  $\tau$ , что создает проблемы при проектировании САР (систем автоматического регулирования).

Зачастую системы нагрева базируются на ПИД-регуляторе (пропорционально-интегрально-дифференцирующем регуляторе), который является самым распространённым в АСУ ТП (автоматизированных системах управления технологическими процессами). Была проведена настройка традиционного ПИД-регулятора по кривой отклика с помощью метода Зиглера-Никольса с ручным уточнением коэффициентов [3].

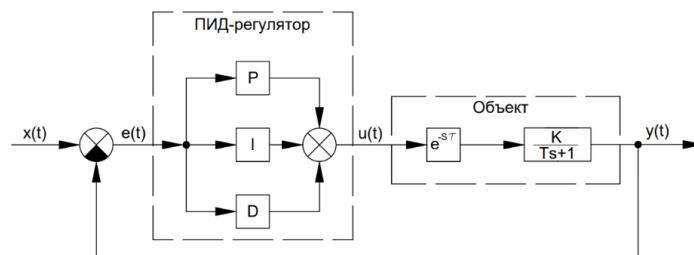


Рис. 2. Структурная схема САР на базе ПИД-регулятора

Однако регуляторы объектов с существенной величиной транспортной задержки могут быть дополнены предсказательным блоком (предиктором Смита) [4]. Основная идея состоит в том, чтобы создать внутри регулятора параллельную модель регулируемого объекта, которая будет предсказывать сигнал на его выходе до того, как он появится на самом деле. Благодаря данному блоку возможно улучшить характеристики САР, а также повысить устойчивость системы.

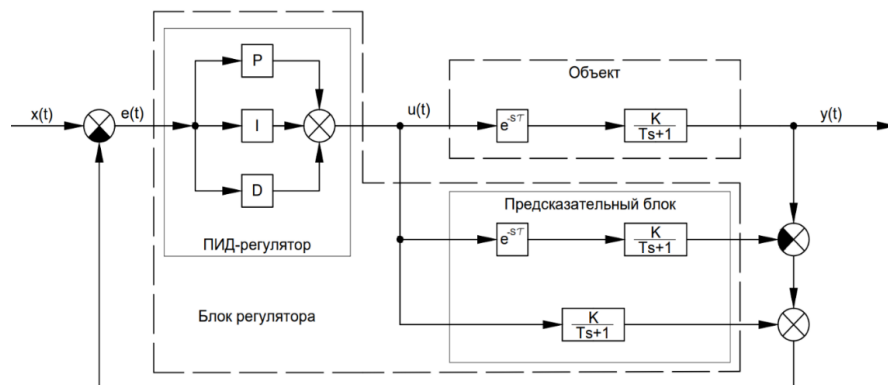


Рис. 3. Структурная схема САР на базе ПИД-регулятора с предиктором Смита

Настройка ПИД-регулятора с предиктором Смита проводилась вручную. Был проведен сравнительный анализ регуляторов на основании моделей их переходных процессов.

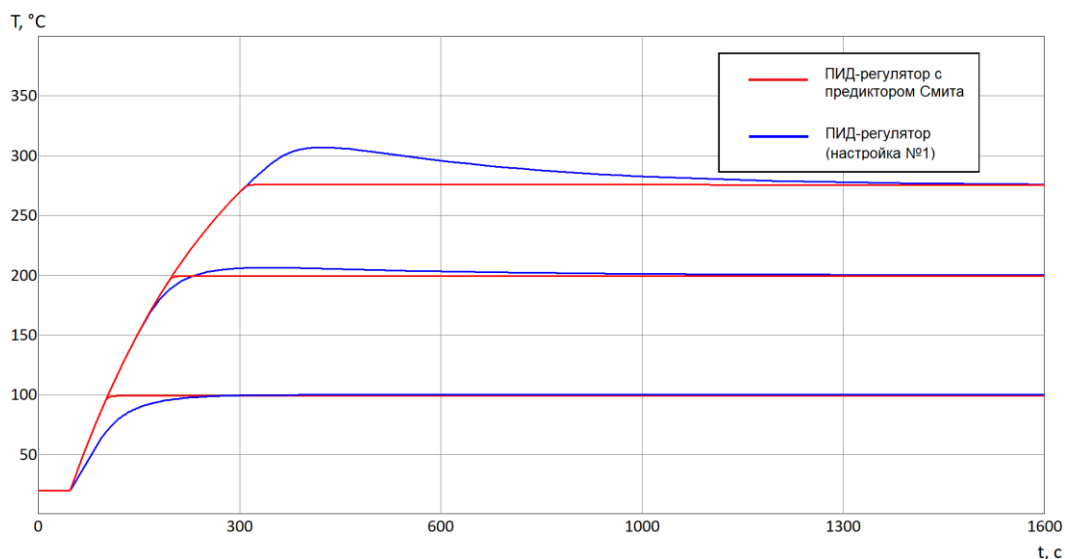


Рис. 4. Реакция систем (на базе ПИД-регулятора с предиктором Смита и ПИД-регулятора с настройкой №1) при уставках в 100 °С, 200 °С, 275 °С

Как видно из эксперимента на модели, характеристики регулирования ПИД-регулятора с предиктором Смита лучше, чем у традиционного ПИД-регулятора в диапазоне температур 100..275 °С. При уставке в 100 °С ПИД-регулятор с предиктором Смита демонстрирует время регулирования на 112% меньше, чем традиционный ПИД-регулятор при величине  $\Delta=1\%$ . При той же температуре и  $\Delta=5\%$  время регулирования у ПИД-регулятора с предиктором Смита меньше на 62%, чем у ПИД-регулятора. Однако такая настройка ПИД-регулятора при уставках в 200 °С, 275 °С имеет гораздо большее время регулирования относительно ПИД-регулятора с предиктором Смита, чем при 100 °С. При уставке в 275 °С ПИД-регулятор с предиктором Смита имеет время регулирования на 486% меньше, чем ПИД-регулятор при  $\Delta=1\%$ .

Так как традиционный ПИД-регулятор при уставках в 200 °С, 275 °С имеет неприемлемое время регулирования, было принято решение перенастроить коэффициенты ПИД-закона. Результаты продемонстрированы на рисунке 5.

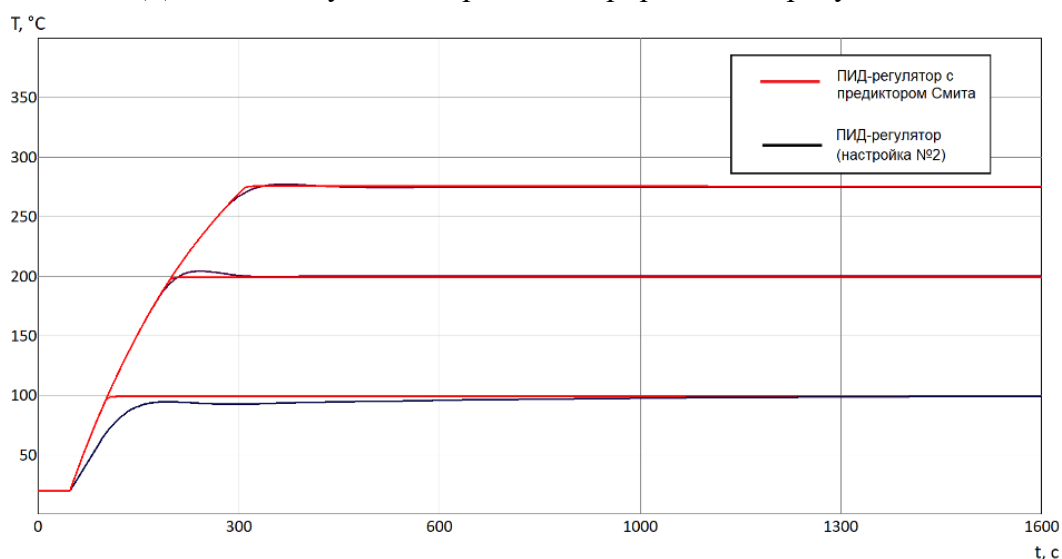


Рис. 5. Реакция систем (на базе ПИД-регулятора с предиктором Смита и ПИД-регулятора с настройкой №2) при уставках в 100 °С, 200 °С, 275 °С

Перенастроенный традиционный ПИД-регулятор практически приблизился по своим характеристикам к ПИД-регулятору с предиктором Смита при уставке в 275°C, однако заметно ухудшились характеристики регулирования для данной настройки при уставке в 100°C.

Таблица 1. Сравнение характеристик регуляторов

Допустимое отклонение $\Delta$ , %	Уставка, °C	Время регулирования, с		
		ПИД-регулятора (настройка №1)	ПИД-регулятора (настройка №2)	ПИД-регулятора с предиктором Смита
1	100	270	1434	127
5	100	201	530	124
1	200	1007	314	228
5	200	469	213	207
1	275	1601	448	329
5	275	1102	329	320

### Выводы

Для данного объекта характеристики регулирования ПИД-регулятора с предиктором Смита заметно лучше, чем характеристики традиционного ПИД-регулятора на всем диапазоне температур. Настройка традиционного ПИД-регулятора позволяет обеспечить заданную точность регулирования только лишь в сравнительно узком диапазоне температур, что обуславливает необходимость постоянной перенастройки для регулирования в широком диапазоне температур.

ПИД-регулятор с предиктором Смита проявляет стабильные характеристики регулирования на всем диапазоне температур. Его время регулирования ограничивается мощностью нагревателя и конструкцией самой системы. Для улучшения характеристик регулирования требуется исследование происхождения транспортной задержки переходной характеристики системы.

### Литература

1. Технология тонких пленок. Справочник: пер. с англ. / под ред. *М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко М.*: Сов. Радио, 1977. Т. 2. 663 с. [Leon I. Maissel, Reinhard Glang handbook of thin film technology. New York: McGraw-Hill, 1970.]
2. *Борисевич А.В.* Теория автоматического управления: элементарное введение с применением MATLAB. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 200 с.
3. Проектирование систем управления: пер. с англ. / под ред. *А.М. Епанешникова М.*: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004 - 911 с., ил. [*Goodwin Graham C., Graebe Stefan F., Salgado Mario E.* Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2001.]
4. *Smith, O.* Feedback control systems. McGraw-Hill, New York - 1958