

УДК 681.3**Температурный контроль в тонкоплёночных технологиях с помощью ПИД-регулятора**Мавлявиев Тимур Ильгизарович ⁽¹⁾ Попков Михаил Геннадьевич ⁽²⁾Студент 3 курса ⁽¹⁾, магистрант 2 года ⁽²⁾ кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: С.Ю. Хыдырова,
ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»

Контроль температуры является критически важным аспектом в процессе нанесения тонкоплёночных покрытий, особенно при использовании методов магнетронного распыления. Температура оказывает значительное влияние на морфологию, структуру и адгезию получаемых пленок, что, в свою очередь, определяет их функциональные свойства и применение в различных областях, таких как электроника, оптика и энергетика. Не менее важным является влияние температуры на узлы установки.

Неправильный температурный режим может привести к образованию дефектов в плёнке, а также к перегреву и повреждению узлов оборудования. Поэтому внедрение высокоточных систем контроля и регулирования температуры является необходимым условием для достижения желаемых характеристик пленок.

ПИД-регулирование (пропорционально-интегрально-дифференциальное регулирование) является одним из самых эффективных методов контроля температуры благодаря своей способности обеспечивать высокую точность и стабильность в динамических системах [1].

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt},$$

где $u(t)$ – выходной сигнал регулятора;

$e(t)$ – ошибка регулирования;

K_p, K_i, K_d – коэффициенты усиления пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющих регулятора соответственно.

Этот регулятор работает на основе трех основных компонентов: пропорционального, интегрального и дифференциального (рисунок 1). Пропорциональная часть (P) измеряет текущее отклонение от заданной температуры и выдает управляющее воздействие, пропорциональное этому отклонению. Интегральная часть (I) накапливает прошлые ошибки, позволяя регулятору корректировать системные смещения и обеспечивать более точное достижение целевой температуры. Наконец, дифференциальная часть (D) анализирует скорость изменения отклонения, предсказывая будущие изменения и позволяя системе реагировать заранее, что предотвращает колебания и обеспечивает стабильность. Сумма этих частей выдаёт управляющий сигнал регулятора $u(t)$, который используется для поддержания целевого значения $r(t)$ необходимой величины $y(t)$ [2, 3].

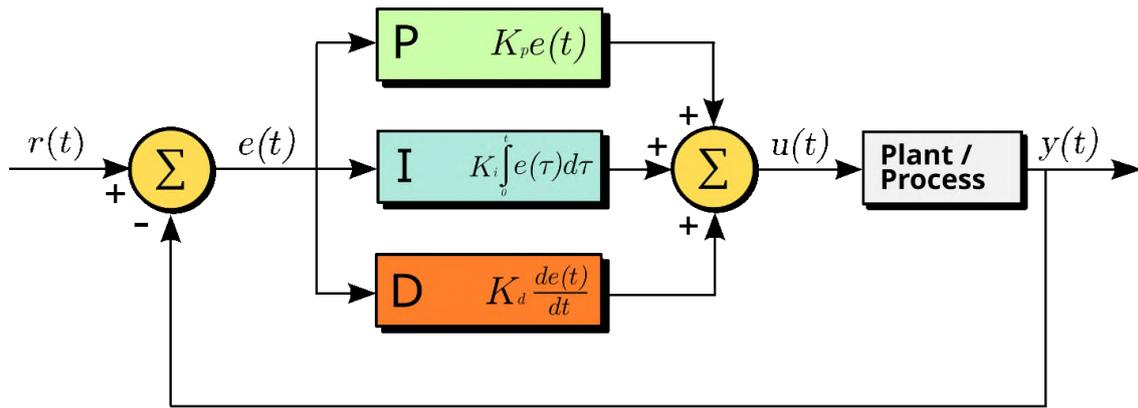


Рисунок 1 – Схема ПИД регулятора

Для вычисления коэффициентов ПИД-регулирования существует несколько методов, каждый из которых имеет свои преимущества и особенности. Среди наиболее популярных — метод С-Н-Р и метод Зиглера-Николя. Метод С-Н-Р основывается на анализе динамических характеристик системы и предлагает более систематический подход к настройке коэффициентов, что позволяет достичь высокой точности управления. В то же время, метод Зиглера-Николя, основанный на экспериментальных данных и реакциях системы на управляющее воздействие, предлагает более быстрый способ настройки, используя заранее определенные таблицы для расчета коэффициентов [4, 5].

ПИД-регулятор был успешно интегрирован в систему контроля температуры на платформе Arduino с использованием ESP32 и датчиков MAX31855. ESP32 обеспечивает беспроводную передачу данных, позволяя удобно следить за процессом. Контроль температуры осуществляется с помощью твердотельного реле, а выходным параметром ПИД-регулятора является скважность для реле.

Внедрение ПИД-регулятора в систему управления температурой подложкодержателя на установке ВУП-11М позволяет осаждать плёнки с нагревом подложки при заданной температуре подложкодержателя.

Литература

1. *Bennett S.* A brief history of automatic control //IEEE Control Systems Magazine. – 1996. – Т. 16. – №. 3. – С. 17-25.
2. *Ang K. H., Chong G., Li Y.* PID control system analysis, design, and technology //IEEE transactions on control systems technology. – 2005. – Т. 13. – №. 4. – С. 559-576.
3. *Sheel S., Gupta O.* New techniques of PID controller tuning of a DC motor-development of a toolbox //MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering. – 2012. – Т. 2. – №. 2. – С. 65-69.
4. *Ziegler J. G., Nichols N. B.* Optimum settings for automatic controllers //Transactions of the American society of mechanical engineers. – 1942. – Т. 64. – №. 8. – С. 759-765.
5. *Basu A., Mohanty S., Sharma R.* Tuning of FOPID controller for meliorating the performance of the heating furnace using conventional tuning and optimization technique //International journal of electronics engineering research. – 2017. – Т. 9. – №. 1. – С. 69-85.