

УДК 681.5

Д.И. ГОРБОВ, А.В. МАМАТОВ  
D.I. GORBOV, A.V. MAMATOV**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПИД РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ  
НЕ ПОЛНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ****APPLICATION OF PID CONTROL FOR SYSTEMS  
WITH PARTIALLY KNOWN MODELS**

*В условиях современных требований к адаптивности и надежности автоматизированных систем особую значимость приобретает задача управления динамическими объектами с частично известной или изменяющейся моделью. В данной работе рассматриваются методы применения классического пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора в управлении не полностью определенными объектами, характеризующимися параметрической, структурной или временной неопределенностью. Анализируется применимость традиционных подходов к настройке ПИД-регулятора, предлагаются модификации и стратегии адаптации, повышающие устойчивость и качество управления.*

**Ключевые слова:** система управления; ПИД-регулятор; не полностью определенный объект; адаптация, наблюдатель состояния, неопределенность.

*In the context of modern requirements for adaptability and reliability of automated systems, the task of controlling dynamic objects with partially known or time-varying models becomes increasingly significant. This paper examines the application of classical Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers for the control of systems with incomplete definitions, characterized by parametric, structural, or temporal uncertainty. The applicability of conventional PID tuning methods is analyzed, and modifications and adaptation strategies are proposed to enhance control robustness and performance.*

**Keywords:** control system; PID controller; partially defined system; adaptation; state observer; uncertainty.

Современные системы автоматизации все чаще сталкиваются с необходимостью управления объектами, чьи динамические характеристики заранее неизвестны или изменяются во времени. Это связано как с усложнением технологических процессов, так и с необходимостью обеспечения надежности функционирования в условиях внешних возмущений и внутренней неопределенности.

Под не полностью определенным объектом управления будем понимать систему, для которой отсутствует точная аналитическая модель, либо модель содержит существенную степень неопределенности – параметрической, структурной или временной [1]. Такие объекты могут быть описаны в терминах:

- систем с ограниченной информацией о передаточной функции;
- нелинейных систем с переменными параметрами;
- систем с запаздыванием, не поддающимся точному моделированию;
- систем, подверженных внешним шумам и возмущениям.

Несмотря на наличие более сложных подходов к управлению (например, робастное, адаптивное, предиктивное), классический ПИД-регулятор остается наиболее распространенным в промышленности благодаря своей простоте, физической интерпретируемости и устойчивости к небольшим изменениям характеристик объекта. Однако его эффективность в условиях неопределенности ограничена, что делает актуальным

исследование возможностей расширения классического ПИД через адаптацию, интеграцию с другими алгоритмами и модификацию структуры.

Рассмотрим объект управления, описываемый в общем виде как:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), \theta(t)) + w(t), \\ y(t) &= h(x(t)) + v(t),\end{aligned}$$

где  $x(t) \in R^n$  – вектор состояния;  $u(t) \in R^m$  – вектор управления;  $y(t) \in R^p$  – вектор измеряемых выходов;  $\theta(t)$  – неизвестный (или меняющийся) вектор параметров;  $w(t)$  и  $v(t)$  – внешние и измерительные шумы.

Цель управления – обеспечить слежение за заданным выходным сигналом  $y_{ref}(t)$  с допустимой погрешностью:

$$|y(t) - y_{ref}(t)| \leq \varepsilon, \quad \forall t \geq 0.$$

При этом гарантировать:

- устойчивость замкнутой системы;
- ограниченность управляющих воздействий;
- нечувствительность к допустимым изменениям  $\theta(t), w(t), v(t)$ .

В данной работе предлагается использовать модифицированные алгоритмы ПИД-регулирования, способные компенсировать влияние неопределенности параметров и обеспечивать требуемое качество управления.

Стандартный ПИД-закон имеет вид [2]:

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

где  $e(t) = r(t) - y(t)$  – сигнал ошибки;  $K_p, K_i, K_d$  – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих соответственно.

На практике часто применяется дискретная форма реализации, например:

$$u_k = K_p e_k + K_i T_s \sum_{i=0}^k e_i + K_d \frac{e_k - e_{k-1}}{T_s},$$

где  $T_s$  – шаг дискретизации.

Однако при использовании данного закона управления для не полностью определенного объекта могут наблюдаться следующие проблемы:

- неустойчивость из-за несоответствия параметров объекта и настроек регулятора;
- накопление ошибки в интегральной части при наличии постоянных возмущений;
- чувствительность дифференциальной части к шуму измерений.

Для преодоления указанных проблем применяются следующие подходы:

- адаптивная настройка коэффициентов;
- введение фильтрации сигнала ошибки;
- использование наблюдателей состояния;
- комбинирование с другими алгоритмами управления.

Механизмы самонастройки позволяют изменять коэффициенты регулятора в реальном времени на основе текущих данных. Примерами данных методов являются:

1. Адаптивное управление с эталонной моделью (Model Reference Adaptive Control (MRAC)) – использует эталонную модель  $G_m(s)$ , задающую желаемую динамику объекта. Цель данного метода – обеспечить приближение выхода объекта  $y(t)$  к выходу эталона

$y_m(t)$ . При этом параметры ПИД-регулятора  $K_P, K_I, K_D$  обновляются по МПТ-правилу адаптации:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e(t) \frac{d\gamma(t)}{d\theta},$$

где  $\theta \in \{K_P, K_I, K_D\}$ ,  $e(t) = y(t) - y_m(t)$ ,  $\gamma$  – коэффициент адаптации.

Метод не требует точной модели объекта, но предполагает аппроксимацию его порядка.

2. Gain Scheduling (Планирование коэффициентов усиления). В данном методе заранее формируются таблицы параметров регулятора, зависящих от текущего режима работы системы.

$$K_P^{(i)}, K_I^{(i)}, K_D^{(i)}, i = 1, \dots, N.$$

При этом текущий режим определяется переменной (например, выходом  $y(t)$  или скоростью ошибки), и выбираются соответствующие коэффициенты. Применение данного метода оправдано для процессов с четко определенными режимами (нагрузка, температура и пр.) [4].

Для управления не полностью определенными объектами все чаще используются гибридные подходы:

- Fuzzy-PID: замена одного или нескольких коэффициентов нечеткими правилами, зависящими от ошибки и скорости ее изменения [3];
- Neural PID: обучение нейросетевой структуры на исторических данных для прогнозирования оптимальных параметров регулятора.

Эти методы особенно полезны при наличии нелинейностей и нестационарности объекта.

Для объектов с частичной наблюдаемостью и присутствием внешних возмущений даже адаптивного ПИД-регулятора может быть недостаточно. Повышение точности и устойчивости возможно при использовании наблюдателей и компенсаторов, встроенных в структуру управления.

3. Наблюдатель за помехами (Disturbance Observer (DOB)) – метод, который для компенсации внешних помех использует наблюдатель возмущений:

$$\hat{d}(t) = Q(s)(y(t) - G(s)u(t)),$$

где  $Q(s)$  – фильтр наблюдателя,  $G(s)$  – модель объекта.

Компенсирующий сигнал добавляется к управляющему воздействию:

$$u(t) = u_{PID}(t) - \hat{d}(t).$$

Этот подход позволяет значительно повысить помехоустойчивость системы.

В случае, если не все состояния объекта доступны измерению, применяются наблюдатели:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}),$$

где  $\hat{x}$  – оценка состояния;  $L$  – матрица усиления. Выходное значение наблюдателя можно использовать, например, для расчета производной ошибки  $\dot{e}(t)$  в ПИД-регуляторе, что особенно важно при зашумленных измерениях  $y(t)$ .

Преимущества:

1. Уменьшение чувствительности дифференциального звена к шуму.

2. возможность построения более точных адаптивных и предсказательных ПИД-алгоритмов.

Обеспечение устойчивости замкнутой системы при использовании модифицированных ПИД-регуляторов в условиях неполной определенности является принципиально важной задачей.

Рассмотрим три основных подхода для анализа устойчивости:

1. Анализ в области Лапласа, который применяется в случае, если параметры ПИД-регулятора изменяются в реальном времени (например, по МПТ-правилу). Предположим, что объект управления описывается моделью:

$$\dot{x}(t) = A(\theta)x(t) + B(\theta)u(t), y(t) = Cx(t),$$

и имеется эталонная модель:

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r(t).$$

Ошибка слежения:

$$e(t) = y(t) - y_m(t).$$

Функция Ляпунова выбирается в виде:

$$V(t) = 12e^2(t) + \frac{1}{2\gamma_P} (K_P(t) - K_P^*)^2 + \frac{1}{2\gamma_I} (K_I(t) - K_I^*)^2 + \frac{1}{2\gamma_D} (K_D(t) - K_D^*)^2,$$

где  $K_P^*, K_I^*, K_D^*$  – идеальные (неизвестные) параметры, обеспечивающие точное слежение.

Если параметры регулятора настраиваются по закону МПТ:

$$\frac{dK_i}{dt} = -\gamma_i e(t) \frac{\partial y(t)}{\partial K_i}, i \in P, I, D,$$

то производная  $V(t)$  по времени примет вид:

$$\dot{V}(t) = -e^2(t) \left( 1 - \sum \frac{1}{\gamma_i} \left( \frac{\partial y}{\partial K_i} \right)^2 \right).$$

При соблюдении определенных условий на  $\gamma_i$ , производная  $V(t)$  будет неотрицательной, что обеспечивает асимптотическую устойчивость (по первой теореме Ляпунова) [5].

Таким образом, если адаптационные законы выбраны корректно и параметры системы удовлетворяют условиям регулярности, ошибка слежения сходится к нулю, и система устойчива.

2. Частотные методы. Особенно эффективны при оценке устойчивости ПИД-регулятора, настроенного для различных режимов работы объекта (например, при Gain Scheduling или Fuzzy-регулировании).

Рассмотрим замкнутую систему:

$$T(s) = \frac{G(s)C(s)}{1 + G(s)C(s)},$$

где  $G(s)$  – передаточная функция объекта (или его аппроксимации);  $C(s)$  – передаточная функция ПИД-регулятора:

$$C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s.$$

Анализ проводится с использованием:

- диаграмм Боде – для оценки фазового и амплитудного запаса;
- критерия Найквиста – для анализа обхода критической точки  $(-1,0)$  в комплексной плоскости.

Если запасы по фазе превышают  $30^\circ$ , а по усилению – 6 дБ, система считается устойчивой с достаточным робастным резервом.

При использовании нескольких режимов (в таблице коэффициентов) проверка проводится для каждого режима отдельно. Общая устойчивость возможна при выполнении условия длительности пребывания (dwell time) – система должна достаточно долго находиться в каждом режиме, прежде чем переключиться.

В данной статье проведен системный теоретико-инженерный анализ применимости ПИД-регуляторов к управлению объектами с неполной определенностью. Подобные объекты характеризуются отсутствием полной информации о структуре, параметрах или динамике, что типично для многих промышленных, энергетических, транспортных и робототехнических систем.

Было показано, что, несмотря на наличие сложных алгоритмов управления (робастное, предиктивное, адаптивное управление с полными моделями), ПИД-регуляторы остаются универсальным и практически применимым инструментом, особенно в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и высокой надежности требований.

Рассмотрены ключевые подходы к модификации ПИД-регулятора:

- адаптивная настройка параметров (MRAC, MIT-правило);
- режимная преднастройка (Gain Scheduling);
- интеллектуальные методы (Fuzzy-PID, нейросетевые PID);
- компенсация возмущений (DOB) и восстановление скрытых переменных (наблюдатели состояния).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маматов А.В., Подлесный В.Н., Рубанов В.Г. Робастная устойчивость линейных систем автоматического управления. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1997. – 78 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2004. – 751 с.
3. Рубанов В.Г., Филатов А.Г. Интеллектуальные системы автоматического управления: нечеткое управление в технических системах. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2005. – 171 с.
4. Zhao Z.-Y., Tomizuka M., Isaka S. Нечеткая настройка коэффициентов ПИД-регуляторов по расписанию усиления // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1993. – Т. 23, № 5. – С. 1392-1398.
5. Калинин А.И. Асимптотические методы оптимизации возмущенных динамических систем. – Минск: Экоперспектива, 2000. – 183 с.

**Горбов Даниил Игоревич**

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,  
г. Белгород

Аспирант кафедры «Техническая кибернетика»

Тел.: 8 909 202 77 12

E-mail: gorbov.dania@yandex.ru

---

**Маматов Александр Васильевич**

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,

г. Белгород

Доктор технических наук, доцент

Тел.: 8 910 321 12 95