

УДК 517.9

## ОСОБЕННОСТИ ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЯ В СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

**Петров Александр Павлович**<sup>1</sup>, доцент, кандидат технических наук, профессор

*e-mail:* [petrovap@gumrf.ru](mailto:petrovap@gumrf.ru)

**Живлюк Григорий Евгеньевич**<sup>1</sup>, доцент, кандидат технических наук, доцент

*e-mail:* [zhivlyukge@gumrf.ru](mailto:zhivlyukge@gumrf.ru)

<sup>1</sup> Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** В статье представлены современное состояние пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования и перспективы его применения в судовой энергетике. Одной из причин повышения интереса к теме является необходимости адаптации автоматизированных систем управления к появлению автоматической настройки, другой – более широкое использование модельного прогностического управления, которое требует хорошо настроенных систем управления. В системах регулирования находят применение новые правила и методы. Обсуждаемые вопросы включают технические характеристики, устойчивость систем регулирования путем настройки коэффициентов усиления современных регулятора.

**Ключевые слова:** судовая энергетика, ПИД-регулирование, регулятор, помехи, настройка, интегральные критерии, коэффициенты усиления, устойчивость.

## FEATURES OF PID CONTROL IN SHIP POWER ENGINEERING

**Alexander P. Petrov**<sup>1</sup>, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Professor

*e-mail:* [petrovap@gumrf.ru](mailto:petrovap@gumrf.ru)

**Grigory E. Zhivlyuk**<sup>1</sup>, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

*e-mail:* [zhivlyukge@gumrf.ru](mailto:zhivlyukge@gumrf.ru)

<sup>1</sup> Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** The article presents the current state of proportional-integral-differential control and the prospects for its application in ship power engineering. One of the reasons for the increased interest in the topic is the need to adapt automated control systems to the emergence of automatic tuning, another is the wider use of model predictive control, which requires well-tuned control systems. New rules and methods are used in control systems. The issues discussed include technical characteristics, stability of control systems by adjusting the gain coefficients of modern regulators.

**Keywords:** marine power engineering, PID, PID control, governor, noise, tuning, integral criteria, gain factors, stability.

## Введение

Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор), безусловно, является наиболее распространенной формой организации обратной связи, используемой сегодня. Более 90% всех контуров управления включают ПИД - регулирование. Однако, наибольшее количество контуров на самом деле являются ПИ, потому что производное действие используется не очень часто. Интегральная, пропорциональная и производная обратная связь основана на прошлой (П), настоящей (И) и будущей (Д) ошибках управления. Использование такой простой стратегии позволяет достичь очень хороших результатов. Сильной стороной ПИД-регулятора является то, что он также решает важные практические вопросы, такие как насыщение привода и запуск интегратора [1]. Таким образом, ПИД-регулятор является основой современного автоматического управления.

ПИД-регулятор в судовой энергетике используется для решения широкого спектра задач: управление технологическими процессами в технических системах судна, включая главные и вспомогательные двигатели, котельные установки и их системы обеспечения, рулевые устройства, рефрижераторные установки, системы кондиционирования воздуха, общесудовые системы, магнитная и оптическая память, контрольно-измерительные приборы и т.д. Использование ПИД-регулирования диктуется профессиональными компетенциями в осуществлении производственно-технологической деятельности в части эффективного использования материальных ресурсов, оборудования, применяя соответствующие алгоритмы и программы расчетов параметров технологических процессов. Центральное звено ПИД-регулятора – контроллер – поставляется в самых разных формах: в виде стандартных одноконтурных контроллеров, в качестве программного компонента в программируемых логических контроллерах и распределенных системах управления, в локальных системах управления.

Одним из немногочисленных примеров использования в управлении СЭУ является ПИД-регулятор в составе блока регулирования DGU 8800e цифровой системы регулирования частоты вращения главных двигателей DGS 8800 фирмы Kongsberg Maritime. Этот регулятор использует все три закона регулирования (включая производную составляющую), что вызвано сложным влиянием внешних воздействий на режимах работы двигателей при сильном волнении.

Целью настоящей работы является рассмотрение и анализ основных, наиболее важных аспектов и проблем ПИД-регулирования, включая использование интегральных критериев качества систем управления, учета помех, влияния настройки контуров автоматического управления на устойчивость систем.

## Методы и материалы

Чтобы описать проблему проектирования, процесс, окружающая среда/объект регулирования и требования к управлению должны быть охарактеризованы путем моделирования на стадии проектирования судовой энергетической установки. Типичная ситуация проиллюстрирована на рис.1. Динамика и статика процессов описывается как линейная система с передаточной функцией  $W_{oc}(p)$ ; контроллер также линейный с двумя степенями свободы. Передаточная функция  $W_y(p)$  описывает обратную связь от выходного сигнала ОС  $u_{oc}$  к регулирующему воздействию (сигналу)  $e$ ; а передаточная функция  $W(p)$  описывает прямую связь от заданного значения  $x_{зад}$  к  $e$ . Для ПИД-регулирования обычно используется

$$\begin{aligned} W_{oc}(p) &= k_p + \frac{k_i}{p} + k_d p, \\ W_y(p) &= b k_p + \frac{k_i}{p} + c k_d p. \end{aligned} \quad (1)$$

Это означает, что отношение ввода–вывода для контроллера может быть описано как

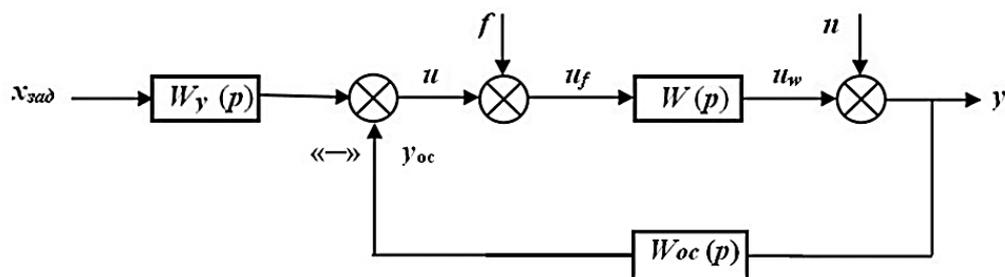
$$e(t) = k_p [bx_{зад}(t) - y(t)] + k_i \int_0^t [x_{зад}(\tau) - y(\tau)] d\tau + k_d \left[ c \frac{dx_{зад}(t)}{dt} - \frac{dy(t)}{dt} \right]. \quad (2)$$


Рисунок 1 – Структурная схема, описывающая типичную задачу управления

Важно, чтобы контроллер был реализован как показано в [2] только с одним интегратором. Параметры  $b$  и  $c$  называются весами заданного значения. Они не оказывают влияния на реакцию от помехи, но оказывают значительное влияние на реакцию от изменения уставки  $x_{зад}$ . Взвешивание по заданному значению – это способ получить структуру с двумя степенями свободы. Также стоит отметить, что так называемый ПИ-ПД контроллер эквивалентен взвешиванию по заданному значению. На контур управления воздействуют три внешних сигнала, а именно заданное значение  $x_{зад}$ , возмущение нагрузки  $f$  и шум измерения  $n$ . Возмущение нагрузки отклоняет выходные параметры объекта управления от их заданных значений, а шум измерения искажает информацию, получаемую от датчиков.

Обратим внимание на то, что реальный ПИД-регулятор использует отфильтрованную производную  $dy_\phi/dt$  вместо  $dy/dt$ , где  $T_d \frac{dy_\phi}{dt} + y_\phi = y$ .

Также могут быть использованы дополнительные фильтры. Контроллер должен следить за тем, чтобы интегральная часть не сворачивалась, когда исполнительный механизм находится при максимальной нагрузке. Это очень подробно обсуждается в [3].

Целью проектирования является определение параметров контроллера в  $W(p)$  так, чтобы система работала предписанным образом. Это означает, что влияние помехи должно быть уменьшено, чтобы в систему не поступало слишком много шума при измерениях, и чтобы система была устойчива к умеренным изменениям характеристик процесса. Для этого в технических данных излагаются требования к реакции на возмущение нагрузки, шумовой характеристике измерения, отклику/отклонению на заданное значение, устойчивости к моделированию неопределенностей.

Соотношением между внешними входными сигналами  $x_{зад}$ ,  $f$  и  $n$ , промежуточным сигналом процесса  $u_w$ , измеренным сигналом  $y$  и регулирующим сигналом/воздействием  $u=e$  является ошибка управления, полученная при названных возмущениях.

Часто производители регуляторов, зная об этом, гарантируют предусмотренные показатели статики и динамики САР только при отсутствии помех. Таким образом, на производителя механизма возлагается ответственность по исключению шума на входе в регулятор. Существующая ныне элементная база для производства регулятора позволяет справиться с этими шумами/помехами, насыщая регулятор аппаратными и параметрическими свойствами адаптации.

Проблема устойчивости САР. Потеря устойчивости – это недостаток настройки обратной связи, при использовании которой всегда существует риск того, что система с замкнутым контуром станет нестабильной. Таким образом, устойчивость является основным требованием к организации системы обратной связи. Многие сведения о ПИД-регулировании можно получить, проанализировав область устойчивости, которая

представляет собой набор параметров регулятора, обеспечивающих устойчивость систем с замкнутым контуром. Это область, для которой были получены интересные результаты [5-7].

Полезные результаты могут быть получены из теоремы Найквиста об устойчивости. Рассмотрим это предположение с различными коэффициентами усиления.

*Постоянный коэффициент усиления производной.* Рассмотрим линейные системы с передаточной функцией  $W(p)$ . Предполагается, что передаточная функция не имеет полюсов в правой полуплоскости, кроме, возможно, полюса в самом начале, создающего признаки неустойчивости. Кроме того, предполагается, что  $W(0) > 0$ , если система стабильна, или что  $\lim_{n \rightarrow \infty} p W(p) > 0$ , когда система имеет полюс в начале координат. Также предполагается, что контроллер обладает параметрами  $k, k_i$  и  $k_d$ , передаточная функция не имеет полюсов в правой полуплоскости, кроме, возможно, полюса в самом начале, создающего признаки неустойчивости, а также, что  $W(0) > 0$ , если система стабильна, или что  $\lim_{n \rightarrow \infty} p W(p) > 0$ , когда система имеет полюс в начале координат. Также предполагается, что контроллер обладает параметрами  $k_n, k_u$  и  $k_d$ .

Тогда характеристическое уравнение замкнутого контура имеет вид

$$1 + \left( k_n + \frac{k_i}{p} + k_d p \right) W(p) = 0 \quad (5)$$

Уравнение показывает, что устойчивость соблюдается при условии  $k_u > 0$ . Рассмотрим условия для корней уравнения на мнимой оси, которая будет представлять собой границу устойчивости.

Вводя  $p = i\omega$  и после некоторых вычислений, получим границу области устойчивости. На Рисунке 2 показана область устойчивости для системы с передаточной функцией  $W(p) = \frac{1}{(p+1)^4}$  при различных значениях  $k_d$ . На рисунке показано, что в данном конкретном случае интегральный коэффициент усиления может быть существенно увеличен с помощью действия производной. На рисунке также показано, что контроллер, максимизирующий интегральное усиление, имеет параметры, которые сосредоточены в остром углу области устойчивости. Для систем с монотонными передаточными функциями область устойчивости представляет собой выпуклое множество, но для других передаточных функций область устойчивости может состоять из нескольких непересекающихся множеств.

*Постоянный пропорциональный коэффициент усиления* для области устойчивости является подмножеством  $R^3$ . Расчет дает двумерные пересечения с постоянным коэффициентом усиления производной. Дополнительную информацию можно получить из другого представления областей устойчивости. Для исследования устойчивости используется критерий Найквиста и строится местоположение передаточной функции цикла  $L(i\omega) = W(i\omega) \cdot W_c(i\omega)$  (Рисунок 3). При изменении пропорциональных и производных коэффициентов усиления кривая Найквиста смещается от точки А вдоль линии АС.

Такой же анализ может быть проведен для случая, когда пересечение кривой Найквиста и окружности происходит в верхней полуплоскости.

*Интегральное усиление* имеет свой максимум  $k_n = 36$  на границе области устойчивости для  $k_n = 8$  и  $k_d = 20$ . Анализируя системы с запаздыванием по времени, из уравнений следует, что если  $G(p)$  приближается к константе при больших  $s$  тогда для устойчивости требуется, чтобы  $k_d = 0$ . Если  $\lim_{n \rightarrow \infty} p W(p) = k_n$ , тогда интегральный коэффициент усиления ограничен значением  $|k_d| < 1 = k_u$ .

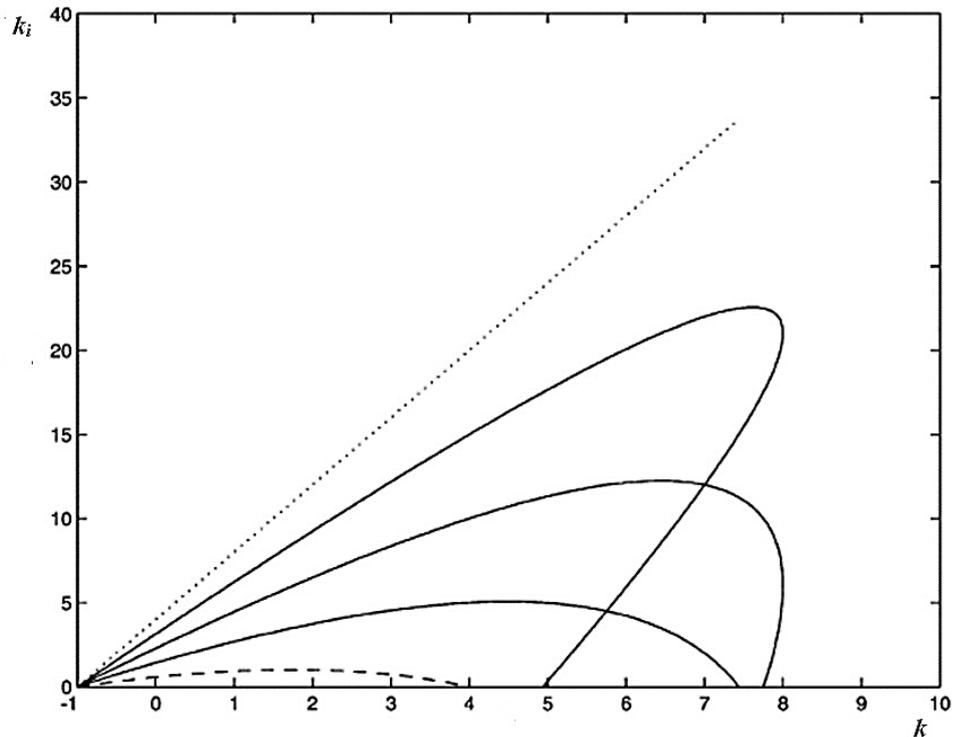


Рисунок 2 – Области устойчивости для  $W(p)=1/(p+1)^4$  для  $k = 0$  (штриховая линия), 5, 10, 15 и 20 (пунктирная линия)

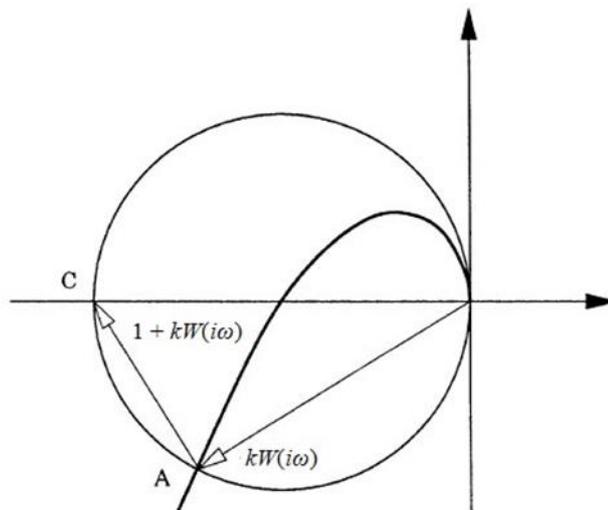


Рисунок 3 – Кривая Найквиста для передаточной функции  $kW(p)$

Проектирование и настройка ПИД-регуляторов были обширной областью исследований с тех пор, как Циглер и Николс представили свои методы в 1942 году. Существует много аспектов, которые следует принимать во внимание при проектировании ПИД-регулятора. Следовательно, существует необходимость в нескольких различных процедурах проектирования с различными целями и сложностью [4].

Технические требования к проектированию. Необходимо позаботиться о переходных процессах при воздействии трёх внешних сигналов  $x_{зд}$ ,  $f$ , и  $n$ , а также о надёжности в отношении изменений в процессе. Поскольку контроллер имеет две степени свободы, можно разделить технические характеристики. Реакцию на измерительный шум можно устранить, разработав фильтр нижних частот для измерительного сигнала. Желаемый

отклик на заданное значение может быть получен с помощью прямой связи. Один из способов - выбрать правильное значение заданного веса  $b$  в уравнении (2). Также возможно подавать заданное значение через фильтры или модули регулирования.

Нагрузочное возмущение часто является наиболее распространенным нарушением в управлении технологическим процессом. Поэтому большинство методов проектирования должны быть ориентированы на этот вид возмущения и попытку найти подходящий компромисс между требованиями к производительности при возмущениях нагрузки и надежностью. Если пользователь может достичь компромисса с помощью настраиваемого параметра, то это будет значительным преимуществом.

Существует два типа параметров настройки: те, в которых задается надежность, и те, в которых задается эффективность. Коэффициент усиления и запас по фазе часто используются в качестве конструктивных параметров, связанных с надежностью. В [4] используется норма динамической системы, имеющая смысл максимального усиления системы по энергии  $H_\infty$ . Распространенным параметром настройки, связанным с производительностью, является кажущаяся постоянная времени замкнутого цикла. Он используется в лямбда-настройке и во многих других аналитических методах настройки.

Процедура проектирования также включает в себя выбор структуры контроллера. Например, если нет требований к нулевой установившейся ошибке, то нет необходимости в интегральном действии. Если время простоя велико или динамика процесса близка к первому порядку, не следует использовать производное действие. Процедура проектирования также должна учитывать ограничения в сигналы принимаются во внимание. Всегда существуют ограничения в управляющем сигнале, а часто и в скорости передачи управляющего сигнала.

Управление ПИ может быть очень хорошо зафиксировано таким образом, чтобы максимизировать интегральный коэффициент усиления  $k_{\text{и}}$ , что эквивалентно минимизации интегральной погрешности, т.е. при возмущениях нагрузки, с учетом ограничения надежности.

Причина в том, что параметры  $k_{\text{п}}$  и  $k_{\text{и}}$ , удовлетворяющие ограничению надежности, являются хорошим выпуклым множеством. Это не очень хорошо работает для ПИД-регулирования, поскольку набор параметров  $k_{\text{п}}$ ,  $k_{\text{и}}$  и  $k_{\text{д}}$ , удовлетворяющих требованиям надежности ограничение может иметь узкие выступы.

Метод проектирования, приведенный в [1], также можно использовать для оценки более простых методов проектирования. Результаты приведены для двух значений расчетного параметра  $M_s$  (максимальное усиление чувствительности),  $M_s = 1,4$  и  $M_s = 2$ . Метод Циглера–Николса снова дает слишком высокие значения, а для большинства процессов интегральное время слишком велико. Это показывает, что невозможно получить хорошие правила настройки, которые основаны только на двух параметрах процесса, которые могут быть улучшены достаточно точными методами с использованием трех параметров, где третьим параметром может быть относительный коэффициент усиления  $k_{\text{п}}$ .

Знание процесса. Знание процесса, требуемое процедурами проектирования, варьируется от простых характеристик, описываемых двумя параметрами (коэффициентом усиления и временем), как в правилах Циглера–Николса, до передаточных функций более высокого порядка. При управлении технологическими процессами обычно имеется мало времени для создания подробных моделей процессов.

Таким образом, ранние методы проектирования были основаны на очень простых моделях. Никаких сложностей, часто имеется в наличии оборудование, позволяющее быстро и просто приобрести модели. В процедурах автоматической настройки модели процессов получаются быстро и с минимальными усилиями со стороны пользователя. Многие методы проектирования предполагают, что процесс полностью известен с точки



зрения ступенчатых характеристик, частотных характеристик или передаточных функций. На самом деле, достаточно знать частотную характеристику в довольно узком диапазоне частот.

**Вычислительные аспекты.** Оборудование, вычислительная мощность и время, отведенное на проектирование, также являются важными аспектами, которые необходимо принимать во внимание. Ранние методы, по понятным причинам, основывались на простой регистрации технологических характеристик и вычислениях, которые можно было легко выполнить вручную. По-прежнему существует интерес к этим методам быстрой настройки контроллера. Они (методы) также полезны для понимания и интуиции, необходимых для ручной настройки контроллера. В процедурах автоматической настройки идентификация и проектирование выполняются автоматически. Модели процессов, используемые в этих процедурах, обычно все еще довольно просты. Однако процедуры реального проектирования зачастую гораздо более сложны. Например, можно использовать процедуры оптимизации для получения оптимальных решений, указанных в критериях проектирования, приведенных выше.

**Оценка эффективности работы.** Полезно иметь инструменты для оценки эффективности, которая может быть достигнута, и факторов, ограничивающих производительность. Для системы управления достижимая производительность обычно ограничивается динамикой процесса, нелинейностями, неопределенностью, помехами. Важно быть осведомленным о факторах, которые имеют решающее значение для конкретного применения. Больше обычного методы проектирования ПИД-регуляторов сосредоточены на динамике процесса и неопределенностях.

**Предварительная оценка.** Чтобы произвести предварительную оценку, для характеристики эффективности используется частота пересечения коэффициента усиления. Контроллер ПД имеет максимальный фазовый вывод около 60 градусов, пропорциональный контроллер имеет нулевую фазовую задержку, а ПИ-контроллер имеет фазовую задержку около 45 градусов, ПИД-регулятор может иметь фазовый вывод под углом 45 градусов. Эти оценки справедливы только в том случае, если не минимальные фазовые части динамики не являются доминирующими. Ранее было обнаружено, что добавление производного действия к ПИ-контроллеру значительно увеличивает сложность конструкции. Существует много соображений, касающихся производного действия. Чтобы получить некоторое представление об этих проблемах, используют результаты оценки эффективности. Производное действие дает существенные преимущества для системы с большими значениями  $T$ . Благодаря прогностическому действию ошибка начинает уменьшаться намного быстрее. Пиковое возмущение, полученное при ПИД-регулировании, ниже, чем при ПД-управлении.

Чтобы получить больше информации в ПД-, ПИ- и ПИД-регуляторах предложено максимальное увеличения  $k_n$ .

**Альтернативные стратегии.** Рассмотрим некоторые ситуации, когда существуют иные стратегии, которые могут работать лучше, чем ПИД-регулирование. Для этого можно произвести оценку четырех различных случаев: системы с доминирующим временем простоя, колебательные системы, многомерные системы и нелинейные системы. В них предпринимается попытка ответить на вопрос, когда можно добиться радикальных улучшений по сравнению с ПИД-регулятором.

**Общие линейные контроллеры.** ПИД-регулятор всего с несколькими параметрами, безусловно, является контроллером ограниченной сложности. Альтернативой было бы заменить его общим линейным контроллером.

Другой альтернативой было бы использование представления пространства состояний, состоящего из наблюдателя с обратной связью по состоянию исследования модели. Такие



контроллеры являются прямым дополнением к ПИД-регулятору. Некоторые проблемы, связанные с этими обычными контроллерами, связаны с параметризацией, проектированием и настройкой.

Реакция на заданное значение. Несколько раз подчеркивалось, что проблему регулирования и отклика на заданное значение следует разделять, см. рис.1. Один из подходов состоял в том, чтобы сначала спроектировать САР с обратной связью, чтобы получить систему, которая компенсирует влияние возмущений нагрузки и шума измерений и которая устойчива к неопределенностям обработки. Затем передаточная функция  $W_y(p)$  с прямым подключением формируется таким образом, чтобы получить желаемый отклик на изменения заданного значения. Это приводит к двухступенчатой структуре свободы [6]. Для изменения уставки умеренного размера хорошие результаты часто можно получить с помощью взвешивания заданного значения.

В некоторых случаях может оказаться желательным добавить линейные фильтры для уменьшения отклика [4]. Быстрое реагирование на заданное значение часто ограничено нелинейностями процесса, что дает существенные преимущества. Для систем с временными задержками время отклика может быть существенно уменьшено за счет использования предикторов Смита.

Процессы с временными задержками. Существует много работ по системам, изменяющимся со временем задержки. Такими системами можно довольно хорошо управлять с помощью ПИД-регулятора. Однако традиционные правила настройки часто дают очень плохие результаты. Производное действие весьма полезно для систем, которые также имеют задержки. Производное действие, однако, имеет ограниченную ценность для систем, в которых преобладает мертвое время. Причина этого заключается в том, что прогнозирование выходных данных на основе линейной экстраполяции неэффективно. Реальной прогнозы на основе входных данных, чем тех, которые еще не появились на выходе, например, с помощью предикторов Смита.

## Выводы

ПИД-регулирование будет по-прежнему использоваться в будущем. Обратным связям нет альтернатив, их влияние велико практически во всех областях, где они используются, будет продолжаться и может быть применено для решения широкого спектра проблем, в том числе и судовой автоматике. Появляющиеся возможности автоматической настройки значительно упростили использование ПИД-регулятора.

Нечеткое управление рассматривается как альтернатива ПИД-регулированию. Большинство нечетких контроллеров, используемых в промышленности, имеют одинаковые структуры в виде инкрементных ПИ- или ПИД-регуляторов. Основные преимущества, заявленные нечетким управлением, заключаются в простоте использования с доступным программным обеспечением. Все альтернативы предлагают потенциальные улучшения в линейном поведении системы. Это особенно полезно при работе с системами со слабым демпфированием колебательных режимов.

Проблема настройки является основной трудностью при использовании всех альтернативных вариантов. Важно понимать, что существует очень широкий спектр проблем управления и, следовательно, также существует потребность в широком спектре методов настройки.

Разработка подходящего программного обеспечения – это еще одна область, которую необходимо развивать. Желательно иметь программное обеспечение, при котором в случае ограниченных знаний о системе могло быть расширено для экспериментов с ПИД-регулятором. Инструменты для моделирования и методы автоматической настройки должны быть частью такого программного обеспечения.



### Список литературы:

1. Astrom K.J. PID controllers. Theory, design and tuning. // K.J.Astrom, T Hagglund //Isa. – 1995. – 343 p.
2. Horowitz I. Quantitative feedback theory (QFT): A natural tool for active vibration control synthesis. // I.Horowitz, O.Yaniv // Analysis and Optimization of Systems. – 2006. – DOI:10.1007/BFb0042204.
3. Atherton D. PID controller tuning. Computing & Control Engineering Journal, 44–50.
4. Panagopoulos H. PID control design and  $H_\infty$  loop shaping. // H.Panagopoulos, K.J.Astrom International Journal of Robust and Nonlinear Control – 2000, DOI:10.1002/1099-1239(20001230)10:15<1249::AID-RNC514>3.0.CO;2-7.
5. Shafiei, Z., Tuning of PID-type controllers for stable and unstable systems with time delay. // Z.Shafiei, Shenton A.T. // Automatica, 30 (10), 1609–1615. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(94\)90100-7](https://doi.org/10.1016/0005-1098(94)90100-7).
6. H.Taguchi. Two-Degree-of-Freedom PID Controller. // Taguchi. H., Araki. // International Journal of Control Automation and Systems 1(4). – 2004. DOI:10.11509/isciesci.42.1\_18.
7. Visioli A. Practical PID Control. – 2006. – XYIII. – Berlin. – Springer, 314 p.

