

УДК 62-5(075)

## МОДЕЛИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ

*Тыманович Н.А., студент, Скудняков Ю.А., канд. техн. наук*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Институт информационных технологий  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Скудняков Ю.А. – канд. техн. наук, доцент каф. ИСиТ*

Аннотация. В работе проведен анализ возможностей и областей практического применения существующих систем автоматического регулирования, приведены их достоинства и недостатки. Рассмотрены основные законы регулирования, реализуемые пропорционально-интегрально-дифференциальными регуляторами, представлены обобщенная структура системы управления с регулятором и ее математические модели. Приведена математическая модель, отражающая полноценный процесс регулирования.

Ключевые слова: автоматическое регулирование, модели, пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, параметры, объекты, процессы.

**Введение.** Современные системы автоматического регулирования (САР) имеют широкое применение в различных сферах человеческой деятельности. Например, САР интенсивно разрабатываются и используются для мобильных устройств и систем коммуникаций.

Использование новых структурных решений и математического обеспечения САР позволяет достаточно гибко, надежно, с высокой производительностью осуществлять управление различными процессами и объектами искусственного и естественного происхождения.

**Основная часть.** Целью данной работы является исследование возможностей, достоинств и недостатков существующих САР и формулировка рекомендаций для практического применения нового структурного решения и эффективного математического обеспечения проектирования САР для стабилизации и управления различного рода процессами и объектами на основе использования пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД – регулятора) [1-7].

Для достижения сформулированной в работе цели определены следующие задачи исследования:

- 1) анализ существующих разработок;
- 2) постановка решаемой задачи;
- 3) разработка математического обеспечения ПИД – регуляторов;
- 4) обеспечение возможностей для дальнейшей модернизации САР с использованием ПИД – регуляторов;
- 5) проведение анализа полученных результатов.

Практическое использование усовершенствованных ПИД-регуляторов позволяет обеспечивать стабилизацию различного рода параметров среды, таких, например, как влажность, температура, давление и т.д.

Регуляторы в подавляющем большинстве работают по принципу отрицательной обратной связи с целью компенсировать внешние возмущения, действующие на объект или процесс регулирования, и отработать заданный извне или заложенный в системе закон управления. Для определения закона управления используется информация о математической модели объекта или процесса, которая считается заранее известной. В данной работе рассматриваются возможности существующих и перспективных регуляторов.

В рассматриваемой работе проектирование САР осуществляется для организации процесса регулирования на основе пропорционального, дифференциального и интегрального законов управления с использованием ПИД-регуляторов.

Регуляторами обычно называют устройства, которые следят за состоянием объекта или процесса управления и вырабатывают для этого объекта или процесса управляющие сигналы. Регуляторы следят за изменением параметров объекта и процесса управления через, как правило, обратную связь, и реагируют на их изменение с помощью воздействий в соответствии с заданным качеством управления.

Рассмотрим назначение, достоинства и недостатки некоторых существующих ПИД-регуляторов.

ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ101 предназначен для регулирования температуры или других физических величин в различных технологических процессах, например, для использования в упаковочном оборудовании. Используется для: экструдеров, термопластавтоматов, печей, упаковочного, полиграфического, вакуумно-формовочного оборудования.

Особенности: измерение температуры или других физических величин; регулирование по ПИД-закону; автонастройка ПИД-регулятора для конкретных объектов регулирования; подключение широкого спектра первичных преобразователей к универсальному входу; дистанционное управление режимами работы прибора; обнаружение обрыва контура (LBA); работа в сети, организованной по стандарту RS-485; регистрация измеренной величины на аналоговом выходе (ток 4...20 мА).

К основным недостаткам системы относятся: ограниченный набор используемых датчиков; отсутствие беспроводных интерфейсов; высокая цена.

Терморегулятор Ringder RC-113M. Особенности: ПИД-регулирование; безрелейное управление; в диапазоне 25 ~ 42С ° точность поддерживаемой температуры может достигать 0,1 С°; широко применяется для террариумов, ремонта инкубаторов, поддержания микроклимата в гроу-боксах и т.д. Параметры: диапазон управления: 0 ~ 60 С°; диапазон измерения температуры: - 40 ~ 110 С°; нагрузка: ~220V / 2A (линейная резистивная нагрузка); электропитание: ~220V; длина провода термодатчика: 1м.; точность может достигать ± 0,1 С° (в диапазоне 25 ~ 42 С°); ± 0,5 С° (другие диапазоны); разрешение: 0.1 С°.

К основным недостаткам системы относятся: малые выходные параметры; отсутствие беспроводных интерфейсов; невозможность подключения средств с нитями накала; относительно высокая цена; отсутствие гибкости и вариативности входных датчиков.

Регулятор температуры – термодат-18Е6, предназначен для использования в различных областях промышленности и производства для автоматизации процессов нагрева, охлаждения и др.

Прибор может работать как обычный ПИД-регулятор или обеспечивать плавное или ступенчатое изменение температуры по программе.

Программа может содержать участки роста/снижения температуры с нужной скоростью и выдержки при заданной температуре.

Назначение каждого выхода задает оператор при настройке прибора. На разных выходах могут быть заданы различные функции.

Результаты измерений с привязкой к реальному времени и дате записываются в энергонезависимую память большого объема, образуя архив данных.

Данные из архива могут быть просмотрены на дисплее прибора в виде графика, переданы на компьютер для дальнейшей обработки или сохранены на USB-носителе.

Подключение к компьютеру осуществляется по интерфейсу RS485. К компьютеру одновременно может быть подключено несколько приборов. Их количество зависит от структуры сети и от используемого на компьютере программного обеспечения.

Прибор поддерживает два протокола обмена с компьютером: «Термодат» - протокол, специфический для приборов «Термодат», и широко распространенный протокол Modbus.

Ключевые особенности: регулирование по программе; электронный самописец; большой графический дисплей 6 дюймов; ПИД-закон регулирования, автоматическая настройка коэффициентов; универсальный вход; логический (цифровой) вход; выходы: релейный, симисторный, транзисторный, аналоговый; USB-разъем; аварийная сигнализация; прочный металлический корпус.

Основные недостатки:

- 1) относительно высокая стоимость системы;
- 2) отсутствие беспроводного интерфейса;
- 3) отсутствие модульной архитектуры.

На основе проведенного обзора наиболее широко применяемых ПИД-регуляторов следует, что актуальной задачей является разработка и практическое применение регуляторов, обладающих высокими надежностью, производительностью, доступной ценой, которыми не в полной мере обладают приведенные выше существующие САР.

Рассмотрим структурную и математические модели систем регулирования.

При отклонении каких-либо (или всех) реальных текущих значений параметров объектов и процессов осуществляется приведение их к заданным величинам путем формирования управляющего сигнала ПИД-регулятором, выполняющим функции автоматического регулирования объектов и процессов различной природы и назначения.

ПИД-регулятор выполняет функцию обратной связи и используется для достижения высоких требований к качеству и точности переходных процессов.

Если какой-то из этих трех компонентов не включен в процесс сложения, то регулятор будет уже не ПИД, а просто пропорциональным, пропорционально-дифференциальным или пропорционально-интегральным.

Схема системы автоматического управления с ПИД-регулятором представлена на рисунке 1.

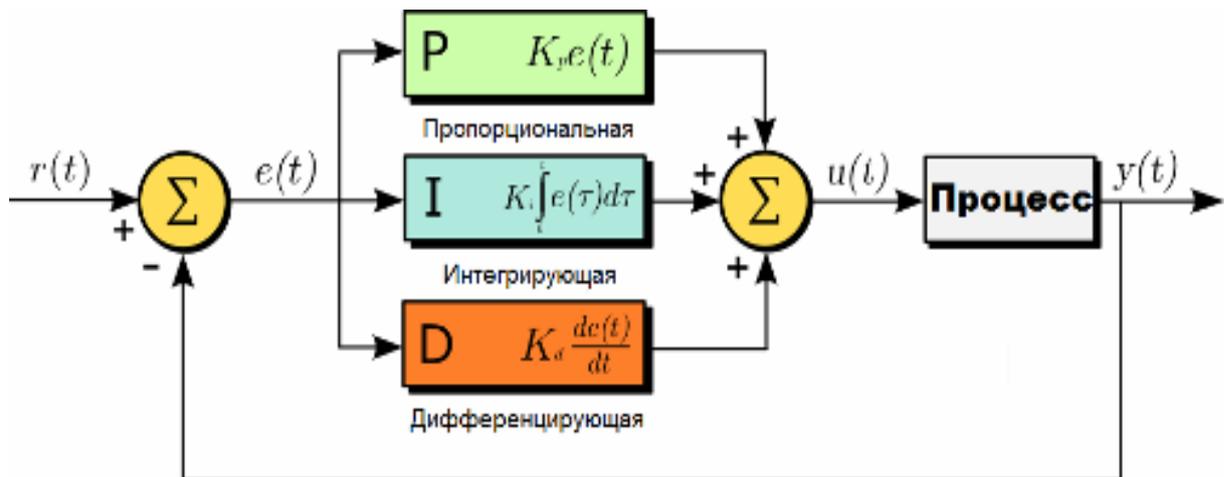


Рисунок 1 – Схема системы автоматического управления с ПИД-регулятором

На рисунке 1 обозначены:  $r(t)$  – задающий сигнал;  $e(t) = r(t) - y(t)$  – разность между задающим сигналом и сигналом обратной связи; формулы, описывающие пропорциональный, интегральный и дифференциальный законы регулирования соответственно:

$$P = K_p e(t), \quad I = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad D = K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

где  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – коэффициенты передачи (усиления) регулятора;  $u(t)$  – управляющий сигнал;  $y(t)$  – сигнал обратной связи. Использование интегрального закона  $I$  позволяет учитывать все множество возмущений, отрицательно влияющих на состояние процесса или объекта, и регулировать выходную величину  $y(t)$  по отклонению. В этом случае управление является более точным по сравнению с управлением по возмущению, но осуществляется с определенным временным запаздыванием  $\tau$ .

При использовании пропорционального закона регулирования выходной сигнал приводит к противодействию текущему отклонению входной величины. Чем больше отклонение – тем больше сигнал. Когда на входе значение регулируемой величины равно заданному, то выходной сигнал становится равным нулю.

Если использовать только пропорциональную составляющую, то значение величины, подлежащей регулированию, никогда не стабилизируется на правильном значении. Всегда есть статическая ошибка, равная такому значению отклонения регулируемой величины, что выходной сигнал стабилизируется на этом значении.

К примеру, терморегулятор управляет мощностью нагревательного прибора. Выходной сигнал уменьшается по мере приближения требуемой температуры объекта, и сигнал управления стабилизирует мощность на уровне тепловых потерь.

В итоге заданного значения температура так и не достигнет, ибо нагревательный прибор просто должен будет быть выключен, и начнет остывать (мощность равна нулю). Больше коэффициент усиления между входом и выходом – меньше статическая ошибка, но если коэффициент усиления (по сути – коэффициент пропорциональности) будет слишком большим, то при условии наличия задержек в системе (а они зачастую неизбежны), в ней вскоре начнутся автоколебания, а если увеличить коэффициент еще больше – система попросту утратит устойчивость.

Или пример позиционирования двигателя с редуктором.

При малом коэффициенте нужное положение рабочего органа достигается слишком медленно. Увеличить коэффициент – реакция получится более быстрая. Но если увеличивать коэффициент дальше, то двигатель «перелетит» правильную позицию, и система не перейдет быстро к требуемому положению, как хотелось бы ожидать. Если теперь увеличивать коэффициент пропорциональности дальше, то начнутся осцилляции около нужной точки – результат снова не будет достигнут.

Интеграл по времени от величины рассогласования – есть основная часть интегральной составляющей. Она пропорциональна этому интегралу. Интегрирующий компонент используется для исключения статической ошибки, поскольку регулятор со временем учитывает статическую погрешность.

В отсутствие внешних возмущений, через какое-то время подлежащая регулированию величина будет стабилизирована на правильном значении, когда пропорциональная составляющая окажется равной нулю, и точность выхода будет целиком обеспечена интегрирующей составляющей. Но интегрирующая составляющая тоже может породить осцилляции около точки позиционирования, если коэффициент не подобран правильно.

Темпу изменения отклонения величины, подлежащей регулированию, пропорциональна третья – дифференцирующая составляющая. Она необходима для того, чтобы противодействовать

отклонениям (вызванным внешними воздействиями или задержками) от правильного положения, прогнозируемого в будущем. Если система линейна и стационарна (практически это вряд ли возможно), то для реализации задания  $u(t)$  справедлива следующая формула:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (2)$$

С практической точки зрения в ПИД-регуляторах для их настройки лучше использовать формулу, где коэффициент передачи (усиления) применен сразу ко всем компонентам [8]:

$$u(t) = K_p(e(t) + K_{ip} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_{dp} \frac{de(t)}{dt}). \quad (3)$$

**Заключение.** Итак, в процессе проведенного исследования:

— рассмотрены основные законы регулирования, реализуемые ПИД-регуляторами для коррекции и стабилизации необходимых характеристик и параметров различных процессов и объектов в случае отклонения значений последних от заданных величин по результатам проведенного мониторинга;

— рассмотрены структурная и математические модели функционирования различных типов регуляторов;

— показано, что полноценное ПИД-регулирование возможно только при совместной реализации всех трех основных законов регулирования;

— программная реализация рассмотренных моделей осуществлена на языке С.

**Список использованных источников:**

1. Ang, K.H. *PID control system analysis, design, and technology* / K.H. Ang, G. Chong, Y. Li // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559-576.
2. O'Dwyer, A. *PID compensation of time delayed processes 1998-2002: a survey* / A. O'Dwyer // *Proceedings of the American Control Conference, Denver, Colorado, 4-6 June 2003*. – P. 1494 – 1499.
3. Quevedo, J. *Digital control: past, present and future of PID control* / J. Quevedo, T. Escobet // *Proceedings of the IFAC Workshop, Eds., Terrassa, Spain, 5-7 Apr. 2000*.
4. Astrom, K.J. *Advanced PID control*. / K.J. Astrom, T. Hagglund // *ISA (The Instrumentation System, and Automation Society)*, 2006. – 460 p.
5. Li, Y. *Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art* / Y. Li, K.H. Ang, G.C.Y. Chong // *IEEE Control Systems Magazine*. Feb. 2006. – P. 41-54.
6. Frantsuzova, G. A. *Calculation of robust PID- controller* / G. A. Frantsuzova, N. S. Zemtsov, L. Hubka, O. Modrlak // *Proc. of the 12th Intern. Conf. "Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014)"*. Novosibirsk, 2014. Vol. 1. – P. 675-678.
7. Французова, Г.А. Расчет параметров робастного ПИД-регулятора на основе метода локализации / Г.А. Французова, Н.С. Земцов // *Вести ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2013. 13, №4. – С. 134-138.
8. Тыманович, Н.А. *Микроконтроллерная система для мониторинга и управления процессами и объектами различного назначения* / Н.А. Тыманович, Ю.А. Скудняков // *XXI Международная конференция «Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2022)»*, Минск, 17 ноября 2022 г. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2022. – С. 232-235.

UDC 62-5(075)

## MODELS OF SYSTEMS FOR AUTOMATIC CONTROL OF PARAMETERS OF OBJECTS AND PROCESSES

*Tymanovich N.A., Skudnyakov Yu.A.*

*Institute of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Skudnyakov Yu.A. – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

**Annotation.** The paper analyzes the possibilities and areas of practical application of existing automatic control systems, their advantages and disadvantages are given. The basic laws of regulation implemented by proportional-integral-differential regulators are considered, the generalized structure of the control system with a regulator and its mathematical models are presented. A mathematical model reflecting a full-fledged process of regulation is given.

**Keywords:** automatic regulation, models, proportional-integral-differential regulator, parameters, objects, processes.