

# СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РОСТОМ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО ПОД УПРАВЛЕНИЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ПИД РЕГУЛЯТОРА

## SYSTEMS FOR AUTOMATIC CONTROL OF CRYSTAL GROWTH BY THE CHOCHRALSKI METHOD UNDER THE CONTROL OF A CONTINUOUS PID REGULATOR

**K. Lebedev  
A. Shatalova**

*Summary.* The article describes systems for automatic control of crystal growth using the Czochralski method under the control of a continuous PID controller. A description is given of a series of computational experiments in the interactive software environment SimInTech, during which the accumulation of experimental data on crystal growth using the Czochralski method under the control of a continuous PID controller was carried out: the coefficients of the model of the control object were calculated and the coefficients of the PID controller were determined based on the constructed mathematical model and a given reference transient process. Conclusions are drawn about the operation of the systems: the controller gain plays a key role in this system, two other parameters play an auxiliary role to ensure the stability and quality of the transient process; the greater the gain of the regulator, the shorter the control time and the greater the damping coefficient of process oscillations with complex roots and the greater the damping effect; the control object was described by a first-order aperiodic link. A more accurate approximation will be obtained when described by an aperiodic or conservative second-order link. The article substantiates the thesis that an even more accurate description of the control object should take into account the slight delay of the signal on the transient response, using a pure delay link. It is also justified why it should be taken into account that as the crystal grows, the parameters of the controlled object change, in which case they resort to adaptive optimization of the control process by changing the parameters of the PID controller; it is also possible to use the optimizer built into the SimInTech system. In the future, to create a regulatory process, it is currently possible to use regulators based on fuzzy principles.

*Keywords:* PID controller, automatic control systems, growing single crystals, Czochralski method, technologies for producing single crystals from a melt, automatic control systems.

**Лебедев Константин Андреевич**

д.ф.-м.н., профессор, Кубанский Государственный университет, Краснодар, Россия  
klebedev@fpm.kubsu.ru

**Шаталова Алевтина Юрьевна**

Старший преподаватель, Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Россия  
ayshatalova@fa.ru

*Аннотация.* В статье описываются системы автоматического управления ростом кристаллов методом Чохральского под управлением непрерывного ПИД регулятора. Приводится описание серии вычислительных экспериментов в интерактивной программной среде SimInTech, в ходе которой произошло накопление экспериментальных данных о выращивании кристалла методом Чохральского под управлением непрерывного ПИД регулятора: производилось вычисление коэффициентов модели объекта управления и определения коэффициентов ПИД регулятора на основе построенной математической модели и заданного эталонного переходного процесса. Сделаны выводы о работе систем: коэффициент усиления регулятора играет ключевую роль в данной системе, два других параметра играют вспомогательную роль, для обеспечения устойчивости и качества переходного процесса; чем больше коэффициент усиления регулятора, тем меньше время регулирования и больший коэффициент затухания колебаний процесса при комплексных корнях и больший эффект демпирования; объект регулирования описывался аperiodическим звеном первого порядка. Более точная аппроксимация получится при описании аperiodическим или консервативным звеном второго порядка. В статье обосновывается тезис, что ещё более точное описание объекта регулирования должно учитывать небольшое запаздывание сигнала на переходной характеристике, с помощью звена чистого запаздывания. Также обосновывается, почему следует учитывать, что по мере роста кристалла, параметры объекта регулирования меняются, в таком случае прибегают к адаптивной оптимизации процесса регулирования, с помощью изменения параметров ПИД-регулятор, также возможно, использовать оптимизатор, встроенный в систему SimInTech. В дальнейшем для создания процесса регулирования, в настоящее время, возможно, использовать регуляторы, основанные на нечётких принципах.

*Ключевые слова:* ПИД-регулятор, системы автоматического управления, выращивание монокристаллов, метод Чохральского, технологий получения монокристаллов из расплава, системы автоматического регулирования.

## Введение

**П**ропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы представляют собой системы управления, которые используются для регулирования выходной величины на основе ошибки между желаемым и фактическим значением этой величины.

Такой тип регуляторов является одним из основных инструментов в области автоматического управления. Они широко применяются в различных системах, таких как промышленные процессы, робототехника, электроника и другие.

В целом, ПИД регуляторы являются широко применяемыми и эффективными инструментами в автоматическом управлении, позволяющими достичь желаемого контроля и стабильности в различных системах. Однако, их эффективность зависит от правильной настройки и адекватного применения в конкретных приложениях.

## Литературный обзор

Сегодня многие промышленные процессы управляются с помощью ПИД контроллеров, особенно в перерабатывающей промышленности. ПИД-регулятор относится к наиболее распространённому типу регуляторов. Порядка 90–95 % регуляторов [8, 12], находящихся в настоящее время в эксплуатации, используют ПИД-алгоритм. Причинами столь высокой популярности являются простота построения и промышленного использования, ясность функционирования, пригодность для решения большинства практических задач и низкая стоимость. Среди ПИД-регуляторов 64 % приходится на одноконтурные регуляторы и 36 % — на многоконтурные [13]. Контроллеры с обратной связью охватывают 85 % всех приложений, контроллеры с прямой связью — 6 %, и контроллеры, соединённые каскадно, — 9 % [13].

Популярность ПИД-регуляторов можно объяснить их высокой производительностью в широком диапазоне условий эксплуатации, функциональной простотой, которая позволяет инженерам управлять ими простым и понятным способом, и знакомством, с которым они воспринимаются исследователями и практиками в отраслях управления технологическими процессами [33].

Первый ПИД-регулятор был изобретён ещё в 1910 году [8]. Через 32 года, в 1942 году, Циглер и Никольс разработали методику его настройки [9].

Среди традиционных методов настройки ПИД-регулятора, метод Циглера-Николса [23], возможно, является наиболее известным. Для широкого спектра практических процессов этот подход к настройке работает довольно эффективно. Однако иногда это не обеспечивает

достаточной настройки и приводит к большому перерегулированию.

Поэтому этот метод обычно нуждается в перенастройке перед применением для управления промышленными процессами. Для расширения возможностей традиционных методов настройки параметров PID было предложено несколько интеллектуальных подходов для улучшения настройки PID, таких как использование генетических алгоритмов (GA) [41, 25, 34, 14] и оптимизация роя частиц (PSO) [21, 29]. С развитием вычислительных методов в последнее время появились алгоритмы оптимизации часто предлагается настроить параметры управления, чтобы найти оптимальную производительность [21, 29].

После появления микропроцессоров в 1980-х годах развитие ПИД-регуляторов происходит нарастающими темпами. Общее количество публикаций по ПИД-регуляторам за 9 лет с 1973 по 1982 год составило 14 шт., с 1983 по 1992 год — 111 шт., а за период с 1998 по 2002 год (всего за 4 года) — 225 шт. [10]. На одном только семинаре IFAC (International Federation of Automatic Control) в 2000 году было представлено около 90 докладов, посвящённых ПИД-регуляторам [11]. Количество патентов по этой теме, содержащихся в патентной базе данных <http://gb.espacenet.com>, в январе 2006 года составило 364 шт.

Утверждается, что более половины промышленных контроллеров, используемых сегодня, используют PID или модифицированные схемы управления PID [24]. Такое широкое признание ПИД-регуляторов в значительной степени объясняется их простотой и надёжной работой в широком диапазоне условий эксплуатации. Одной из основных проблем, с которой сталкиваются при внедрении ПИД-регуляторов, является правильная настройка значения усиления [42]. На протяжении многих лет предлагались различные эвристические методы настройки ПИД-регулятора. Одним из самых ранних методов является классическая процедура настройки Циглера-Николса, однако с ее помощью трудно определить оптимальные или близкие к оптимальным параметры, поскольку большинство промышленных установок часто очень сложны, имеют высокий порядок, временные задержки и нелинейности [21, 27, 28].

Несмотря на долгую историю развития и большое количество публикаций [43], остаются проблемы в вопросах устранения интегрального насыщения, регулирования объектов с гистерезисом и нелинейностями, автоматической настройки и адаптации. Практические реализации ПИД-контроллеров не всегда содержат антиалиасные фильтры, чрезмерный шум и внешние возмущения затрудняют настройку параметров. Проблемы усложняются тем, что в современных системах управ-

ления динамика часто неизвестна, регулируемые процессы нельзя считать независимыми, измерения сильно зашумлены, нагрузка непостоянна, технологические процессы непрерывны.

Далее рассмотрены только регуляторы для одномерных объектов (с одним входом и одним выходом), для медленных (тепловых) процессов, которые наиболее распространены в АСУ.

Целью работы является разработка методов адаптивного управления процессами роста кристаллов из расплава методом Чохральского, а также разработка метода управления процессом выращивания тел вращения методом локального динамического формообразования.

### Метод выращивания кристаллов

Технология Чохральского широко применяется для промышленного производства монокристаллов различных оксидов, которые необходимы в микроэлектронике, акустоэлектронике, лазерной технике, оптике и оптоэлектронике. Мировые объемы производства монокристаллов ниобата и танталата лития, сапфира, алюмоиттриевого граната, силиката и германата висмута и ряда других монокристаллов составляют десятки тонн в год [1].

Обычно для кристаллов тугоплавких оксидов управление процессом роста осуществляется по Т-каналу (по каналу мощности нагрева  $P$ ) Уравнение наблюдения датчика и ПИД закон регулирования стали «классическими» и используется практически во всех системах, обеспечивающих автоматический контроль диаметра кристалла в методе Чохральского при управлении процессом роста по каналу мощности. В начале 80-х годов двадцатого века разработчики систем автоматического управления получили средства микропроцессорной техники с их поистине безграничными возможностями. Появилось множество работ, посвящённых самонастраивающимся регуляторам и адаптивным алгоритмам. В настоящее время активно развиваются теория самонастраивающихся регуляторов на основе частотных методов, оптимального оценивания, нейронных сетей, генетических алгоритмов и нечёткой логики. Однако публикации о применении систем автоматического управления для контроля технологических процессов роста кристаллов отсутствуют [2, 3].

В качестве информационного сигнала о поперечном сечении растущего кристалла выбрана производная сигнала датчика веса. Управляющим воздействием является мощность нагрева. Тогда, под динамической характеристикой объекта управления будем понимать изменение производной сигнала датчика веса во вре-

мени при изменении мощности нагрева на заданную величину. Диаметр кристалла составлял  $d = 40$  мм. Скорость вытягивания поддерживалась  $v = 1$  мм/час, скорость вращения штока  $\omega = 12-15$  об/мин. Выращивание проводили в атмосфере аргона при давлении  $P = 1$  атм. Применялся прямой индукционный нагрев иридиевого тигля диаметром 100 мм и высотой 150 мм.

В качестве теплоизоляции использовали керамику из диоксида циркония. Описание теплового узла представлено в работах. Для метода Чохральского при выращивании кристалла оценка максимальной длительности переходного процесса составляет  $T = 1000$  секунд, рассмотрим результаты эксперимента для выращивания нелегированного кристалла алюмоиттриевого граната методом Чохральского.

### Разгонная характеристика объекта

На рис. 1, полученным с помощью интерактивной программной среды SimInTech [5] представлены реальные переходные процессы рассматриваемого ростового процесса подобранной математической модели.

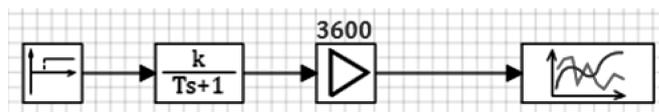


Рис. 1. Модель роста кристалла с переходными процессами

Рис. 1 показывает динамическую модель (печь Чохральского) регулирования, состоящую из источника сигнала  $k_c = 1$  квт, апериодического звена  $k = 1/15$  мм/(сек·квт),  $T = 300$  сек, усилителя (датчик скорости вытягивания)  $k = 15$  (квт сек)/мм, измерительного прибора (осциллограф).

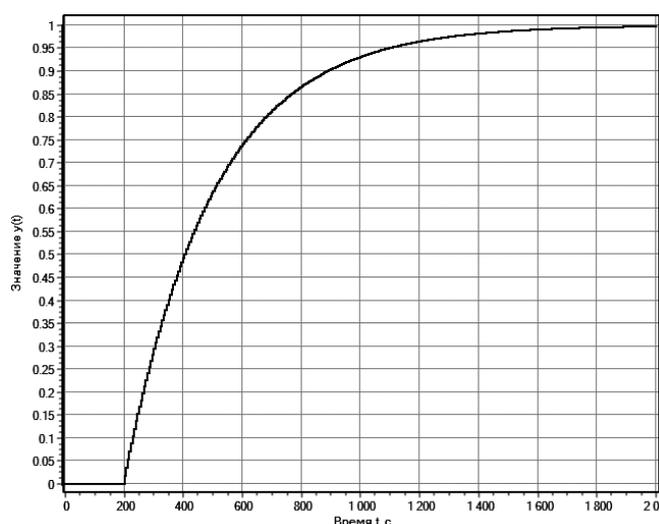


Рис. 2. Разгонная характеристика переходного процесса (2000 сек.)

Как видно из рис. 2 переходной процесс аппроксимируется линейной дифференциальной моделью первого порядка. Наш объект управления является автономным, мы предполагаем в рамках данной модели, что его динамическая характеристика не изменяется в процессе роста монокристалла. Поэтому в случае использования классического ПИД регулятора, для обеспечения прецизионного управления процессом роста нет необходимости осуществлять корректировку коэффициентов регулятора. Поэтому, для управления ростовым процессом будем использовать ПИД регулятор с постоянными коэффициентами [3, 4].

**Построение контура регулирования с ПИД регулятором**

На рис. 3 представлена схема классической системы управления с обратной связью. Она состоит из задающего устройства, сумматора, регулятора и объекта, датчика.

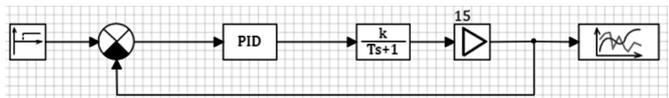


Рис. 3. Система регулирования с отрицательной обратной связью

Задающее устройство служит для формирования опорного сигнала, служащего эталоном, к которому регулятор должен привести отклик объекта управления. Сумматор вычисляет рассогласование между опорным сигналом и откликом объекта управления. Регулятор служит для формирования сигнала управления на основе величины рассогласования [5].

Выберем параметры регулятора.

Блок реализует передаточную функцию ПИД-регулятора следующего вида:  $W(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{T_d s + 1}$ ,

где  $K_p, K_i, K_d$  — коэффициенты усиления пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющих регулятора соответственно,  $T_d$  — постоянная времени дефинирования.

Тогда переходный процесс примет вид на рис. 5.

**Влияние внешних помех на переходной процесс в замкнутой САУ**

Подадим на вход объекта периодический сигнал прямоугольной формы.

Посмотрим, как регулятор сглаживает возмущающие воздействия, подаваемые на вход объекта, причём размах колебаний нереалистично большой 2 квт, тогда как переход в новый режим осуществляется в пределах 1 квт. Из вычислительного эксперимента видно, что визу-

Название	Имя	Формула	Значение
Тип регулятора	mode		PID
Начальные условия	y0		[0]
Дифференциальная составляющая	kd	10	[10]
Интегральная составляющая	ki	100	[100]
Постоянная времени дифференцирования, сек	tdif	100	[100]
Пропорциональная составляющая	kp	2000	[2000]

Рис. 4. Параметры ПИД регулятора

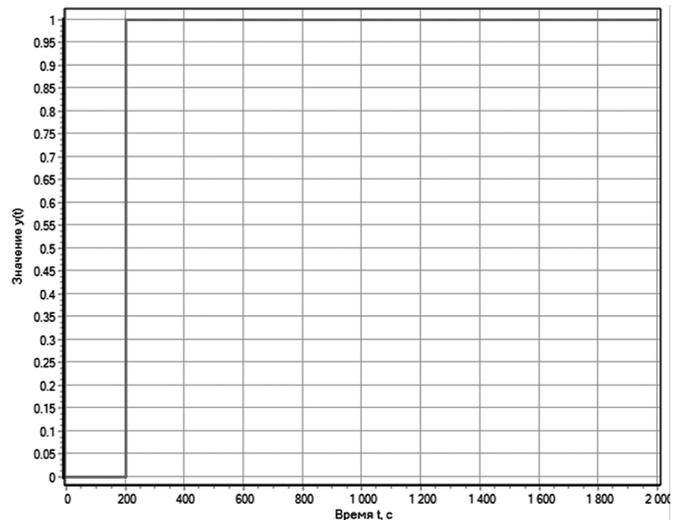


Рис. 5. Разгонная характеристика переходного процесса (2000 сек.)

ально не наблюдается отклонения от заданной величины, по-прежнему вывод на стационарное значение происходит за ничтожно малый промежуток времени.

Но если увеличить размах прямоугольных импульсов до совершенно нереальных значений 20 квт, от -10 до +10 квт, то становятся заметными колебания вокруг стационарного значения.

**Устойчивость системы регулирования**

Передаточная функция объекта  $W_0 = \frac{k_0}{T_0 p + 1}$ , где

$$k_0 = k \cdot 15 = \frac{1}{15} \cdot 15 = 1$$

— коэффициент усиления объ-

екта регулирования вместе с датчиком измерения скорости изменения веса кристалла;  $T = T_0 = 300$  — временная постоянная объекта;  $p = \sigma + j\omega$  — комплексное переменное.

Преобразование Лапласа  $L()$  даёт:

$$L\left(\frac{dx}{dt}\right) = pX(p) - x(0), \quad L\left(\int_0^e x(t)dt\right) = \frac{X(p)}{p}$$

Передаточная функция ПИД-регулятора в стандартном виде  $W_p = \left(k_p + \frac{1}{T_i p} + T_d p\right)$

$k_p$  — коэффициент пропорционального усиления ПИД-регулятора;

$T_i$  — постоянная времени интегрирования, сек., а коэффициент интегрирования, 1/сек.;

$T_d$  — постоянная времени дифференцирования, сек.

Отметим, что в программе SimINTech используется более общая формула для ПИД регулятора

$$W_p = \left(k_p + \frac{k_i}{p} + \frac{k_d p}{T_{dif} \cdot p + 1}\right).$$

Видно, что между традиционными обозначениями и в пакете имеется соотношения:  $k_p = kp$ ;  $T_i = \frac{1}{ki}$ ;  $T_d = kd$ ;  $T_{dif} = tdif = 0.1 \approx 0$ .

Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W = W_p W_0 = \left(k_p + \frac{1}{T_i p} + T_d p\right) \cdot \frac{k_0}{T_0 p + 1}.$$

Тогда передаточная функция замкнутой системы равна  $W_3 = \frac{W}{1 + W}$ ,

$$W_3 = \frac{W}{1 + W} = \frac{k_0 (T_d \cdot T_i p^2 + T_i k_p p + 1)}{(T_0 T_i + T_d T_i k_0) p^2 + (T_i + T_i k_0 k_p) p + k_0}.$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы будет равно

$$(T_0 T_i + T_d T_i k_0) p^2 + (T_i + T_i k_0 k_p) p + k_0 = 0 \text{ или} \\ ap^2 + bp + k_0 = 0$$

$$\text{Корни равны } p_{12} = -\frac{b}{2a} \pm \frac{\sqrt{b^2 - 4ak_0}}{2a}.$$

Так как  $a$  и  $b$  больше нуля, то система устойчива при любом выборе параметров ПИД-регулятора  $T_i, T_d, k_p$ .

В программе SimINTech  $k_p = kp$ ;  $kd = T_d$ ,  $ki = \frac{1}{T_i}$  представлены формулы.

### Выбор параметров регулятора

Выберем значения

$$k_p = kp = 4000; \quad kd = T_d = 10;$$

$$ki = \frac{1}{T_i} = 10; \quad T_i = \frac{1}{ki} = \frac{1}{10}.$$

Уберём сигнал прямоугольных возмущений, установив его коэффициент усиления равным нулю. Рассмотрим переходной процесс по входному заданию, которое изменяет задание с нуля до единицы в момент времени  $t = 200$  с. Можно видеть, что при заданных параметрах, регулируемая величина практически совпадает с заданным сигналом, регулирование осуществляется с высоким качеством, нет видимого перерегулирования.

Однако, если уменьшить коэффициент усиления регулятора до значения  $k_p = kp = 1000$  оставив остальные параметры настройки неизменными, то перерегулирование становится заметным  $y_{\max} - y_3 = 0,002$ .

Если уменьшить коэффициент усиления регулятора до значения  $k_p = kp = 500$ , то перерегулирование становится равным  $y_{\max} - y_3 = 0,009$ .

$$\text{При } k_p = kp = 100, \quad y_{\max} - y_3 = 0,14.$$

При  $k_p = kp = 60$ ,  $y_{\max} - y_3 = 0,26$  и появляется колебательность процесса:

При  $k_p = kp = 10$ ,  $y_{\max} - y_3 = 0,7$  и колебательность процесса носит выраженный характер, что свидетельствует о наличии комплексных корней в характеристическом уравнении.

### Корневые методы оценки качества регулирования

Выясним границы появления комплексных корней. Характеристическое уравнение замкнутой системы  $(T_0 T_i + T_d T_i k_0) p^2 + (T_i + T_i k_0 k_p) p + k_0 = 0$  или  $ap^2 + bp + k_0 = 0$ .

$$\text{Корни задаются формулой } p_{12} = -\frac{b}{2a} \pm \frac{\sqrt{b^2 - 4ak_0}}{2a}.$$

Корни всегда имеют отрицательную вещественную часть.

Чтобы появились комплексные корни необходимо, чтобы подкоренное выражение было отрицательным.

$$b^2 - 4ak_0 < 0, \quad b^2 < 4ak_0, \\ (T_i)^2 (1 + k_0 k_p)^2 < 4T_i (T_0 + T_d k_0), \\ T_i < \frac{4}{(1 + k_0 k_p)} (T_0 + T_d k_0).$$

Равенство, очевидно, задаёт прямую линию в координатах  $T_i, T_d$  при фиксированном  $k_p$ , или дробно рациональную функцию в координатах  $T_i, k_p$  при фиксирован-

ном  $T_d$ :  $T_i = \frac{4}{(1 + k_0 k_p)} (T_0 + T_d k_0)$  на которых имеется действительный двухкратный отрицательный корень.

В переменных программы SimInTech имеем

Если  $ki = \frac{1}{T_i} = \frac{(1 + k_0 k_p)^2}{4(T_0 + T_d k_0)}$ , имеется отрицательный

двухкратный корень.

Если  $ki > \frac{(1 + k_0 k_p)^2}{4(T_0 + T_d k_0)}$ , то имеется два сопряжённых

корня с отрицательной вещественной частью (система принадлежит к классу 1).

Если  $ki < \frac{(1 + k_0 k_p)^2}{4(T_0 + T_d k_0)}$ , то имеется два отрицатель-

ных действительных корня, (система принадлежит к классу 0).

### Выводы

Таким образом, была проведена серия вычислительных экспериментов в интерактивной программной среде SimInTech, в ходе которой производилось накопление экспериментальных данных о выращивании кристалла методом Чохральского под управлением непрерывного ПИД регулятора: производилось вычисление коэффициентов модели объекта управления и определения коэффициентов ПИД регулятора на основе построенной математической модели и заданного эталонного пере-

ходного процесса. В результате чего можно сделать нижеизложенные выводы.

1. Коэффициент усиления регулятора играет ключевую роль в данной системе, два других параметра играют вспомогательную роль, для обеспечения устойчивости и качества переходного процесса.
2. Чем больше коэффициент усиления регулятора, тем меньше время регулирования и больший коэффициент затухания колебаний процесса при комплексных корнях и больший эффект демпирования.
3. Объект регулирования описывался аperiodическим звеном первого порядка. Более точная аппроксимация получится при описании аperiodическим или консервативным звеном второго порядка.
4. Ещё более точное описание объекта регулирования должно учитывать небольшое запаздывание сигнала на переходной характеристике, с помощью звена чистого запаздывания.
5. Следует учитывать, что по мере роста кристалла, параметры объекта регулирования меняются, в таком случае прибегают к адаптивной оптимизации процесса регулирования, с помощью изменения параметров ПИД-регулятора. Возможно, использовать оптимизатор, встроенный в систему SimInTech.
6. Для создания процесса регулирования, в настоящее время, возможно, использовать регуляторы, основанные на нечётких принципах.

В рамках продолжения исследования предлагается сравнить результаты процесса регулирования, получаемые регуляторами разных принципов действия [6, 7].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Метод Чохральского. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Чохральского> (Дата обращения 15.04.2023 г.)
2. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Учебник и справочник для академического бакалавриата. Москва. Юрайт. 2015. 276 с.
3. Теория автоматического управления / под ред. академика А.А. Воронова. Москва. Высшая школа. 1986. Т1. 367 с. Т2. 504 с.
4. Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования и управления. Москва. Наука. 1989. 304 с.
5. Среда динамического моделирования SimInTech. <https://simintech.ru> (Дата обращения 15.04.2023 г.)
6. Гостев В.И. Нечёткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев. Радиомотор. 2008. 972 с.
7. Леоненков А. Нечёткое моделирование в средах MATLAB и fuzzyTECH. Санкт-Петербург. 2005. 736 с.
8. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559–576.
9. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759–768.
10. O'Dwyer A. PID compensation of time delayed processes 1998–2002: a survey // Proceedings of the American Control Conference, Denver, Colorado, 4–6 June 2003. P. 1494–1499.
11. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control // Proceedings of the IFAC Workshop, Eds., Terrassa, Spain, 5–7 Apr. 2000.
12. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. — ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. — 460 p.
13. Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. P. 41–54.
14. A.Varsek, T. Urbacic and B. Filipic, 1993, Genetic Algorithms in Controller Design and Tuning, IEEE Trans. Sys. Man and Cyber, Vol. 23/5, pp1330–1339.
15. Astrom, K.J. and T., Hagglund, 1995, PID Controllers: Theory, Design and Tuning, ISA, Research Triangle, Par, NC.

16. B.Nagaraj, S.Suba and B.Rampriya: Tuning Algorithms for PID Controller Using Soft Computing Techniques; International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS), VOL.8 No.4, April 2008. pp. 278–281.
17. Clerc, M., 1999, The Swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization. Proceedings of the Conference on Evolutionary Computation, pp. 1951–1957.
18. Cohen G.H. and Coon G.A., «Theoretical consideration of retarded control», Trans. ASME, Vol. 75, pp. 827–834, 1953
19. Eberhart, R.C. and Shi, Y.H., 2000, Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. Proc. The 2000 Congress on Evolutionary Computation. Vol.1, pp. 84–88.
20. Engineering and Information Technology 2011
21. Gaing, Z.L., 2004, A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.19(2), pp. 384–391.
22. Hugo, J. Alan, 2002, Process Controller Performance Monitoring and Assessment, <http://www.controlartsinc.com/support/articles/PerformanceAssessment.PDF>. Accessed 31/6/10
23. K Ogata, 1987, Modern Control Systems, University of Minnesota, Prentice Hall.
24. K Ogata, 2005, Modern Engineering (fifth edition), University of Minnesota, Prentice Hall.
25. K. Krishnakumar and D. E. Goldberg, 1992, Control System Optimization Using Genetic Algorithms, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 15, No. 3, pp. 735–40.
26. Kennedy, J. and Eberhart, R.C., 1995, Particle swarm optimization. Proc. IEEE International Conference on Neural Networks (Perth,Australia), IEEE Service Center, Piscataway, NJ, pp. IV: 1942–1948.
27. Krohling RA, Rey JP., 2001, Design of optimal disturbance rejection PID controllers using genetic algorithm. IEEE Trans Evol Comput;5: pp. 78–82.
28. Kwok, D.P., T.P. Leung and F.Sheng, 1993, Genetic algorithm for optimal dynamic control of robot arms. Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics,Control and Instrumentation.15–19 November,San Francisco,CA, pp. 380–385.
29. Mahmud Iwan Solihin, Lee Fook Tack and Moey Leap Kean, Tuning of PID Controller Using Particle Swarm Optimization (PSO), Proceeding of the International Conference on Advanced Science, 2011.
30. Mitsukura Y, Yamamoto T, Kaneda M., June 1999, A design of self-tuning PID controllers using a genetic algorithm. In: Proc Am Contr Conf, San Diego, CA, pp. 1361–5.
31. Nagaraj B, Subba S and Rampriya B, 2005, Tuning Algorithm for PID Using Soft-Computing Techniques. International Journal of Computer Science and Network Security, Vol 8, No 4 April, pp. 278–289.
32. Ou, C. and Lin, W., 2006, Comparison between PSO and GA for parameters optimization of PID controller. Proc. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Luoyang, China.
33. Pillay N. and Govender P., 2007, A Particle Swarm Optimization Approach for Model Independent Tuning of PID Control Loop, IEEE Africon 2007, IEEE Catalog: 04CH37590C, ISBN: 0-7803-8606-X.
34. Q.Wang, P Spronck and R Tracht, 2003, An Overview of Genetic Algorithms Applied to Control Engineering Problems. Proceedings of the Second International Conference on Machine Learning and Cybernetics.
35. Qu Sun, Renhou Li and Ping and Zhang, 2003, Stable and Optimal Adaptive Fuzzy Control of Complex Systems using Fuzzy Dynamic Model. Fuzzy Sets and Systems, No 133 pp. 1–17.
36. Rasmussen H., 2002, Automatic Tuning of PID Regulator. <http://www.volgask.dk/nores/auto.pdf> downloaded 30/6/10.
37. Schei, Tor Steiner, 1994, Automatic Tuning of PID Controllers Based on Transfer Function Estimation, Automatica, pp. pp. 1983–1989.
38. Seng TL, Khalid MB, Yusof R., 1999, Tuning of a neuro-fuzzy controller by genetic algorithm. IEEE Trans Syst Man Cybern B,29, pp. 226–36.
39. Shi, Y.H. and Eberhart, R.C., 1998, A modified particle swarm optimizer. IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Anchorage, Alaska.
40. Shi, Y.H. and Eberhart, R.C., 2001, Fuzzy Adaptive Particle Swarm Optimization. Proc. Congress on Evolutionary Computation. Seoul, Korea.
41. T. O.Mahony, C J Downing and K Fatla, 2000, Genetic Algorithm for PID Parameter Optimization: Minimizing Error Criteria, Process Control and Instrumentation, University of Strathclyde, pp. 148–153.
42. Visioli A., 2001, Tuning of PID controllers with fuzzy logic. Proc Inst Elect Eng Contr Theory Appl, 148(1), pp. 1–8.
43. Zhong Jinghua, 2006, PID Controller Tuning: A Short Tutorial, <http://saba.kntu.ac.ir/eecd/pd/download/PIDtutorial.pdf> downloaded 1/7/2010