

Расчёт параметров ПИД-регулятора

Миллер Ю.В., Саблина Г.В.

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: В данной статье рассматривается объект второго порядка с запаздыванием, а также различные методы настройки ПИД-регулятора для данного объекта. Осуществляется расчёт параметров ПИД-регулятора методами Циглера-Никольса, Чина-Хронеса-Ресвика, методом Куна и спектральным методом. Приводятся результаты моделирования модели объекта второго порядка с регулятором. Проводится сравнение полученных результатов. Моделирование осуществляется при помощи программной среды *MATLAB* и библиотеки *Simulink*. Лучший результат для исследуемого объекта показал спектральный метод, так как в этом случае самое наименьшее перерегулирование 2% и время переходного процесса примерно 500 с. Также приемлемый результат показал метод Чина-Хронеса-Ресвика, в этом случае перерегулирование 3%, а длительность переходного процесса 450 с. Недостаток этого метода в том, что он не учитывает требования к запасу устойчивости. Переходный процесс системы с ПИД-регулятором, рассчитанным методом Куна, не имеет перерегулирования, но время переходного процесса не соответствует желаемому. Рассчитанные параметры далеки от оптимальных значений, в дальнейшем планируется применить для их расчёта метод численной оптимизации.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, запаздывание, численное моделирование, метод Циглера-Никольса, метод Чина-Хронеса-Ресвика, метод Куна, спектральный метод.

ВВЕДЕНИЕ

Многие объекты автоматического управления в различных отраслях человеческой деятельности содержат временные запаздывания сигналов, которыми нельзя пренебречь [1]. Временное запаздывание сигналов проявляется в том, что при изменении входного сигнала выходной сигнал объекта управления (ОУ) начинает изменяться не сразу, а с некоторой задержкой во времени. Это негативно влияет на возможности управления промышленными объектами и может привести к потере устойчивости системы управления, ухудшению качества переходных процессов и т. д. [2].

Для улучшения качества регулирования систем с запаздыванием применяются типовые ПИД-регуляторы и их модификации, которые получили широкое применение в промышленности. Их распространённость обуславливается простотой построения и промышленного применения, ясностью функционирования, пригодностью для решения различных практических задач и низкой стоимостью [3]. Универсальная структура таких регуляторов позволяет добиться приемлемых результатов применительно к широкому классу промышленных объектов низкого порядка. Но необходимые статические и динамические показатели качества регулирования типовые ПИД-регуляторы не всегда могут обеспечить, они требуют настройки [4]. К настоящему времени накоплен огромный опыт эксплуатации таких регуляторов, разработаны различные методы синтеза и настройки параметров. В настоящее время у каждого из известных методов существуют определённые достоинства и недостатки, свои ограничения и область применения. Внимание не ослабевает к методам анализа и синтеза систем с

ПИД-регуляторами и в последние годы [5], поэтому оптимальная настройка параметров ПИД-регулятора это одна из главных задач систем автоматического регулирования. Существует множество методов настройки ПИД-регулятора, поэтому возникает необходимость проведения сравнительного анализа различных методов и нахождения самого приемлемого для конкретного вида задач [4].

В данной статье рассмотрены четыре метода настройки параметров ПИД-регулятора.

1. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Для исследования был взят объект, состоящий из двух баков объёмом 40 м^3 . Функциональная схема объекта представлена на Рис. 1.

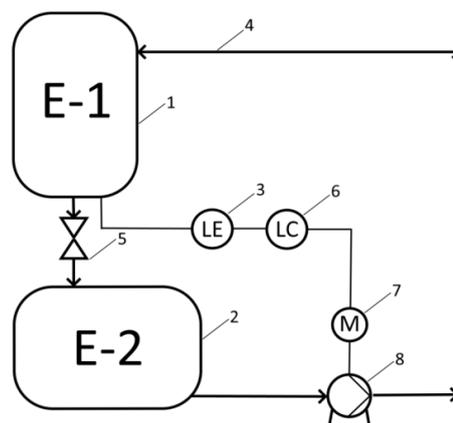


Рис. 1. Функциональная схема объекта управления: 1 – основная ёмкость; 2 – вспомогательная ёмкость; 3 – датчик уровня; 4 – линия запаздывания (незаполненный трубопровод); 5 – ручной вентиль; 6 – регулятор уровня; 7 – асинхронный двигатель (привод насоса); 8 – насос

Первый бак является основным, он представляет собой вертикальную цилиндрическую ёмкость, в которую встроен датчик уровня жидкости. Вспомогательный бак расположен ниже основного, это обеспечивает свободный слив жидкости из основной ёмкости. Необходимо обеспечить стабильную работу данного объекта.

Объём жидкости в основном баке требуется регулировать от минимального значения, равного 9 м^3 , до заданного значения в 34 м^3 .

По характеристике разгона, показанной на Рис. 2, было определено, что это объект второго порядка с запаздыванием, передаточная функция которого имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{y}{u} = \frac{K}{T^2 p^2 + 2dT p + 1} e^{-\tau s}, \quad (1)$$

где T - постоянная времени объекта, K - коэффициент усиления объекта, d - коэффициент демпфирования, τ - время запаздывания.

Также по характеристике разгона можно определить динамические характеристики объекта: $\tau = 75 \text{ с.}$, $T = 47 \text{ с.}$, $K = 1$. Для определения постоянной времени T , проводится касательная к графику переходного процесса и берется точка, в которой касательная перестает касаться графика, это 122 с. при амплитуде сигнала 0.3. Далее отнимаем время запаздывания и получаем: $122 \text{ с.} - 75 \text{ с.} = 47 \text{ с.}$

Таким образом, передаточная функция объекта управления имеет вид:

$$W_o(p) = \frac{1}{2209 p^2 + 94 p + 1} e^{-75 s}. \quad (2)$$

В замкнутой системе необходимо обеспечить следующие требования к качеству переходного процесса:

$$t_{mn} \leq 600 \text{ с.}, \sigma = 0\%, \Delta = 0.$$

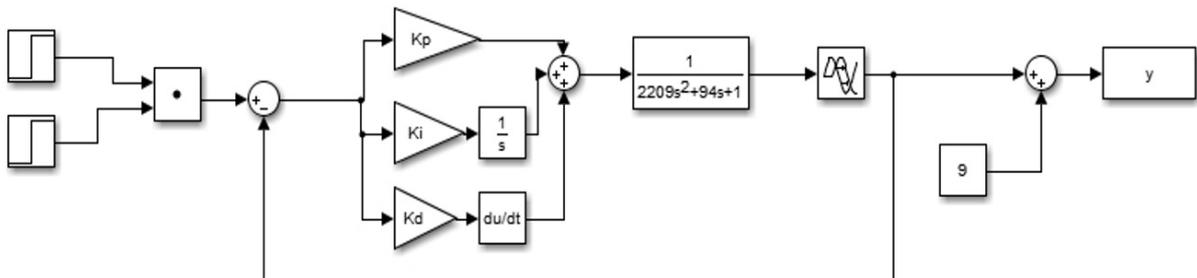


Рис.3. Структурная схема системы с ПИД-регулятором

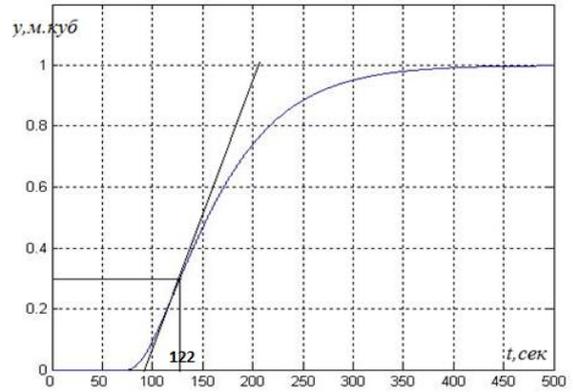


Рис.2. Характеристика разгона

2. МЕТОД ЦИГЛЕРА-НИКОЛЬСА

Метод Циглера-Никольса обладает простотой использования, но не даёт приемлемых результатов [6]. Тем не менее, он достаточно часто используется на практике. При использовании данного метода коэффициенты ПИД-регулятора рассчитываются по следующим формулам:

$$K_p = \frac{1.2T}{K\tau}, K_i = \frac{0.6T}{K\tau^2}, K_d = \frac{0.6T}{K},$$

где T - постоянная времени объекта, τ - время запаздывания.

Исходя из расчётных соотношений, эмпирические значения параметров ПИД-регулятора получаем следующие:

$$K_p = 0.752, K_i = 0.005, K_d = 28.2.$$

В программной среде *Simulink* пакета *MATLAB* выполнено численное моделирование системы с ПИД-регулятором, структурная схема которой представлена на Рис.3 Результаты моделирования показаны на Рис.4.

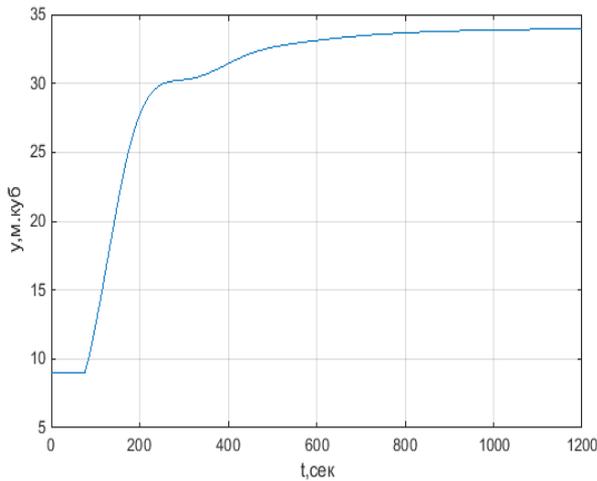


Рис.4. Переходный процесс системы с регулятором (метод Циглера-Никольса)

Недостаток данного метода состоит в том, что полученные параметры далеки от оптимальных значений. Недостаток возникает из-за упрощённости метода (использование двух параметров для описания объекта).

Параметры ПИД-регулятора определялись при декременте затухания, равном четырём, который даёт медленное затухание процесса колебаний.

Второй недостаток этого метода в том, что он не учитывает требования к запасу устойчивости системы. По причине медленного затухания переходного процесса в системе, мы получаем малый запас устойчивости [7].

3. МЕТОД ЧИНА-ХРОНЕСА-РЕСВИКА

Метод Чина-Хронеса-Ресвика является приближенным методом, его преимущество заключается в простоте настройки параметров [7]. В данном методе вводятся новые параметры, это время задержки T_H и время выравнивания T_G , которые определяются по графику, представленному на Рис. 5.

$$T_H = 75 \text{ с.}, T_G = 220 - 75 = 145 \text{ с.}$$

Тогда эмпирические параметры ПИД-регулятора примут следующие значения

$$K_p = 1.66K_o \frac{T_u}{T_g} = 0.858,$$

$$K_i = \frac{1}{T_g} = 0.007,$$

$$K_d = 0.5T_u = 37.5.$$

Результаты моделирования объекта управления с ПИД-регулятором, рассчитанным методом Чина-Хронеса-Ресвика показаны на Рис. 6.

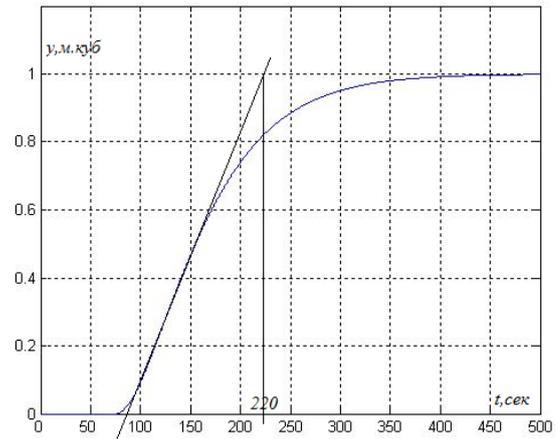


Рис.5 Определение параметров по переходной характеристике

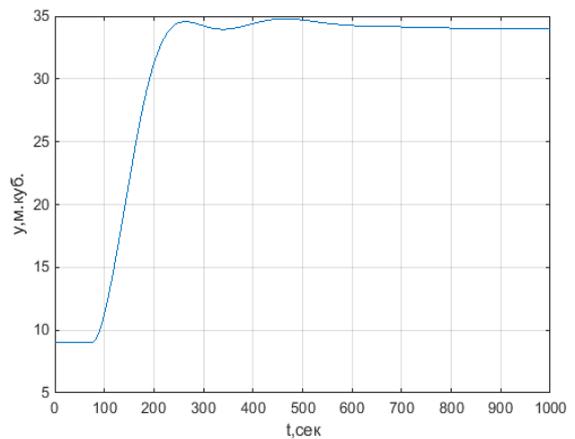


Рис.6. Переходный процесс системы с регулятором (метод Чина-Хронеса-Ресвика)

4. МЕТОД КУНА

В методе Куна вводится постоянная времени T_Σ . Данный параметр характеризует быстродействие любого рассматриваемого объекта [7].

Он вводится для передаточной функции общего вида:

$$W(s) = \frac{K_s (1+T_{D1}s)(1+T_{D2}s)...(1+T_{Dm}s)}{(1+T_1s)(1+T_2s)...(1+T_ns)} e^{-sT_t},$$

где суммарная постоянная времени равна:

$$T_\Sigma = T_1 + T_2 + \dots + T_n - T_{D1} - T_{D2} - \dots - T_{Dm} + T_t.$$

В данном методе существует два способа настройки: быстрая и нормальная (Табл. 1). Быстрая настройка регулятора применяется для систем с объектами первого или второго порядка, нормальная настройка используется для систем управления с объектами более высокого порядка [8].

Параметры ПИД-регулятора рассчитываются по следующим соотношениям:

$$K_p = K_p, K_H = K_p / T_i, K_D = K_p T_d.$$

Таблица 1.

Вид настройки	Параметры регулятора		
	K_p	T_i	T_d
Нормальная	k_s	$0.66T_\Sigma$	$0.17T_\Sigma$
Быстрая	$k_s / 2$	$0.8T_\Sigma$	$0.12T_\Sigma$

На основе передаточной функции объекта (2) определяется суммарная постоянная времени T_Σ :

$$W_o(p) = \frac{1}{(47s + 1)(47s + 1)} e^{-75s}.$$

В данном случае она равна 169 с. Для расчёта параметров используется быстрая настройка. Полученные коэффициенты ПИД-регулятора:

$$K_p = 0.5, K_i = 0.0037, K_d = 10.14.$$

Результаты моделирования объекта управления с ПИД-регулятором, рассчитанным методом Куна, показаны на Рис. 7.

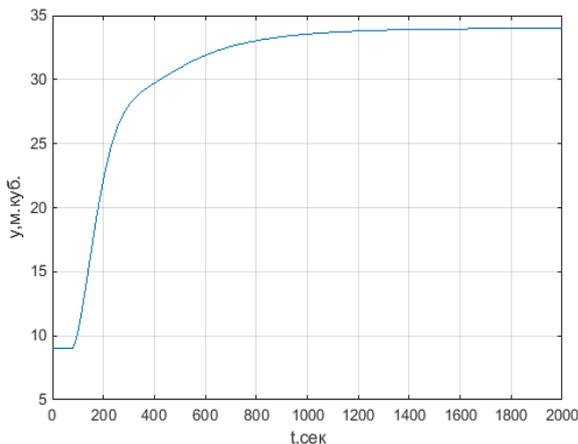


Рис.7. Переходный процесс системы с регулятором (метод Куна)

5. СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД

При использовании данного метода необходимо найти полюса объекта:

$$A(p) = 2209p^2 + 94p + 1 = 0,$$

$$p_{1,2} = -0.021276.$$

Коэффициент усиления интегрального канала рассчитывается из условия требуемой относительной скорости ошибки:

$$K_i \geq \frac{1}{K_o \delta}, \text{ где } \delta = 5\%.$$

На основе полюсов объекта $\{p_1, p_2\}$ определяются «компенсирующие» значения постоянных времени:

$$T_H = |1/p_1| = 47c, T_D = |1/p_2| = 47c.$$

Эмпирические значения коэффициентов регулятора:

$$K_p = K_i(T_H + T_D)$$

$$K_p = 0.007(47 + 47) = 0.658,$$

$$K_i \geq 0.007, K_d = \frac{K_i T_H T_D}{T_H + T_D} = 0.1645$$

Результаты моделирования системы с ПИД-регулятором представлены на Рис. 8.

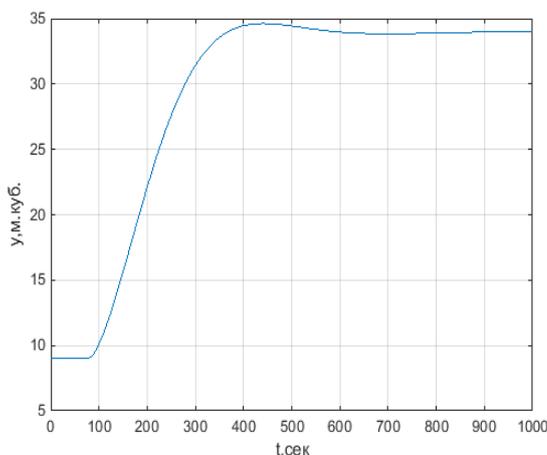


Рис.8. Переходный процесс системы с регулятором (спектральный метод)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассчитаны параметры ПИД-регулятора для объекта второго порядка с запаздыванием различными методами. Лучший результат для данного объекта показал спектральный метод, так как в этом случае самое наименьшее перерегулирование 2% и время переходного процесса примерно 500 с. Также приемлемый результат показал метод Чина-Хронеса-Ресвика, в этом случае перерегулирование равно 3%, а длительность переходного процесса 450 с. Недостаток этого метода в том, что он не учитывает требования к запасу устойчивости. Переходный процесс системы с ПИД-регулятором, рассчитанным методом Куна, не имеет перерегулирования, но время переходного процесса не соответствует желаемому. Рассчитанные параметры далеки от оптимальных значений, в дальнейшем планируется применить для их расчёта метод численной оптимизации [6].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жмудь В.А. Замкнутые системы автоматического управления. Учебное пособие. Новосибирск, Изд-во Юрайт, 2017. 270 с.
- [2] Каримов В.С. Синтез систем автоматического управления многосвязными объектами с запаздываниями на основе технологии вложения систем. 2013. URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Science/dissovet/03/2012/11.03.13/karimov_avtoreferat.pdf
- [3] Востриков А.С., Французова Г.А. Синтез ПИД-регуляторов для нелинейных нестационарных объектов. Автометрия. Т51, №5, 2015.
- [4] Французова Г.А., Толстоконева Е.П., Шилкова Н.Ю. Сравнительный анализ возможностей типовых регуляторов и регуляторов по методу

локализации. Автоматика и программная инженерия. 2015, №1(11). С.29-34.

- [5] Вадутов О.С. Синтез ПИД-регулятора в системах с запаздыванием методом условной оптимизации с ограничениями на размещение полюсов. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-pid-regulyatora-v-sistemah-s-zapazdyvaniem-metodom-uslovnnoy-optimizatsii-s-ogranicheniyami-na-razmeschenie-polyusov/viewer>
- [6] Воробьев В.Ю., Саблина Г.В. Расчет и оптимизация параметров дискретного ПИД-регулятора методом Циглера-Никольса. Автоматика и программная инженерия, 2019, № 1(27). С.9-14.
- [7] Бурцева Ю.С. Беспойсковый метод расчета настроек регуляторов на минимум квадратичного критерия. URL: https://www.mpei.ru/Science/Dissertations/dissertations/Dissertations/BurtsevaYS_diss.pdf
- [8] Сидорова А.А. Определение наиболее эффективного метода настройки ПИД-регулятора. Проблемы автоматки, 2012, №5, С. 143-150.
- [9] В.А. Жмудь, А.С. Востриков, А.Ю. Ивойлов, Г.В. Саблина. Синтез робастных ПИД-регуляторов методом двойной оптимизации. Мехатроника,

автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 2. С.67-74.



Юлия Викторовна Миллер, магистрант каф. Автоматики НГТУ.
E-mail: julia444555@mail.ru



Галина Владимировна Саблина, к.т.н, доцент каф. Автоматики НГТУ. Автор и соавтор более 40 научных и методических работ.
E-mail: sablina@corp.nstu.ru

Статья получена 01.03.2020.

Calculation of PID-Controller Parameters

Yulia V. Miller, Galina V. Sablina
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: This article discusses a second-order object with delay, as well as various PID-controller-tuning methods for this object. The Ziegler-Nichols, Chin-Hrones-Resvik methods, the Kuhn method, and the spectral method calculate the parameters of the PID- controller. The results of modeling a model of a second-order object with a regulator are presented. The results are compared. Modeling is carried out using the Matlab software environment and the Simulink library. The best result for the object under study was shown by the spectral method, since in this case the smallest overshoot is 2% and the transition process time is approximately 500 s. The Chin-Hrones-Resvik method also showed an acceptable result, in this case, the overshoot is 3%, and the duration of the transient process is 450 s. The disadvantage of this method is that it does not take into account the requirements for the stability margin. The transition process of a system with a PID controller calculated by the Kuhn method does not have overshoot, but the transition process time does not correspond to what is desired. The calculated parameters are far from optimal values; in the future it is planned to use the method of numerical optimization for their calculation.

Keywords: PID controller, delay, numerical simulation, Ziegler-Nichols method, Chin-Hrones-Resvik method, Kuhn method, spectral method.

REFERENCES

- [1] Zhmud V.A. Zamknutyie sistemy avtomaticheskogo upravleniya. Uchebnoye posobiye. Novosibirsk, Izdvo Yurayt, 2017. 270 s.
- [2] Karimov V.S. Sintez system avtomaticheskogo upravleniya mnogosvyaznymi ob"yektami s zapazdyvaniyami na osnove tekhnologii vlozheniya sistem. 2013. URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Science/dissovet/03/2012/11.03.13/karimov_avtoreferat.pdf
- [3] Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A. Sintez PID-regulyatorovdlyanelineynykhnestatsionarnykhob"yektov. Avtometriya. T51, №5, 2015.
- [4] Frantsuzova G.A., Tolstokoneva E.P., Shilkova N.Yu. A comparative analysis of the possibilities of typical regulators and regulators by the method of localization. Automation and software engineering. 2015, No 1 (11). S.29-34.
- [5] Vadutov O.S. Sintez PID-regulyatora v sistemakh s zapazdyvaniyem metodom uslovnnoy optimizatsii s ogranicheniyami na razmeshcheniye polyusov. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-pid-regulyatora-v-sistemah-s-zapazdyvaniem-metodom-uslovnnoy-optimizatsii-s-ogranicheniyami-na-razmeschenie-polyusov/viewer>
- [6] Vorobyov V.Yu., Sablina G.V. Calculation and optimization of parameters of a discrete PID controller by the Ziegler-Nichols method. Automation and Software Engineering, 2019, No. 1 (27). S.9-14.
- [7] Burtseva Yu.S. A non-search method for calculating regulator settings for a minimum of a quadratic criterion. URL: https://www.mpei.ru/Science/Dissertations/dissertations/Dissertations/BurtsevaYS_diss.pdf
- [8] Sidorova A.A. Determination of the most effective method for tuning the PID controller. Automation Problems, 2012, No. 5, S. 143-150.
- [9] V.A. Zhmud, A.S. Vostrikov, A.Yu. Ivoilov, G.V. Sablina. Synthesis of robust PID controllers by the double optimization method. Mechatronics, automation, control. 2020. T. 21, No. 2. S. 67-74.



Julia Viktorovna Miller,
undergraduate department
Automation NSTU.
E-mail: julia444555@mail.ru



Galina Vladimirovna Sablina,
Ph.D., associate professor
Automation NSTU. Author and
co-author of more than 40
scientific and methodological
works.
E-mail: sablina@corp.nstu.ru

The paper has been received on 01/03/2020.