

УДК 681.515.8

НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМЕ С ОБЪЕКТОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

© Г. В. Саблина, В. А. Маркова

*Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: sablina@corp.nstu.ru, markova98@mail.ru*

Обсуждается возможность применения различных методов настройки параметров пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора в системе с объектом второго порядка с транспортным запаздыванием. По экспериментально полученной характеристике разгона определена передаточная функция объекта, её параметры, оценены показатели качества переходного процесса, сформулирована задача исследования. Так как объект управления обладает существенным запаздыванием, планируется исследовать несколько методов настройки регулятора с целью выбора наиболее подходящего из них. Исследуются методы: Циглера — Никольса (частотный способ), Чина — Хронеса — Ресвика, Куна (быстрая настройка), Стогестада, численной оптимизации с различными стоимостными функциями. По результатам расчёта выполнено моделирование синтезированных систем в интегрированных средах MATLAB Simulink и VisSim. Проведено сравнение графиков переходных процессов, полученных при использовании различных методов. Показано, что из всех исследованных подходов метод численной оптимизации позволяет обеспечить наилучшее качество переходного процесса на выходе замкнутой системы.

Ключевые слова: транспортное запаздывание, переходный процесс, ПИД-регулятор, настройка параметров регулятора.

DOI: 10.15372/AUT20220411

Введение. В промышленности существует достаточно много задач управления объектами с временными запаздываниями сигналов, которыми нельзя пренебречь [1]. Временное запаздывание связано с тем, что при изменении входного сигнала выходной сигнал объекта управления (ОУ) начинает изменяться не сразу, а с некоторой задержкой во времени. Это обстоятельство негативно влияет на управление рядом технологических процессов и может привести к потере устойчивости системы управления или ухудшению качества её переходных процессов [2].

Для улучшения качества регулирования систем с запаздыванием применяются типовые пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы и их модификации, распространённость которых обусловливается простотой реализации и промышленного использования, ясностью функционирования, пригодностью для решения различных практических задач и низкой стоимостью [3]. Универсальная структура таких регуляторов позволяет добиться приемлемых результатов применительно к широкому классу объектов низкого порядка. Однако необходимые статические и динамические показатели качества регулирования типовые ПИД-регуляторы не всегда могут обеспечить [4]. К настоящему времени накоплен огромный опыт эксплуатации таких регуляторов, разработаны различные методы синтеза и настройки параметров. У каждого из известных методов существуют определённые достоинства и недостатки, свои ограничения и области применения. Внимание не ослабевает к методам анализа и синтеза систем с ПИД-регуляторами и в последние годы [5–11], поэтому настройка параметров ПИД-регулятора является одной из важных задач при проектировании систем автоматического регулирования. Существует

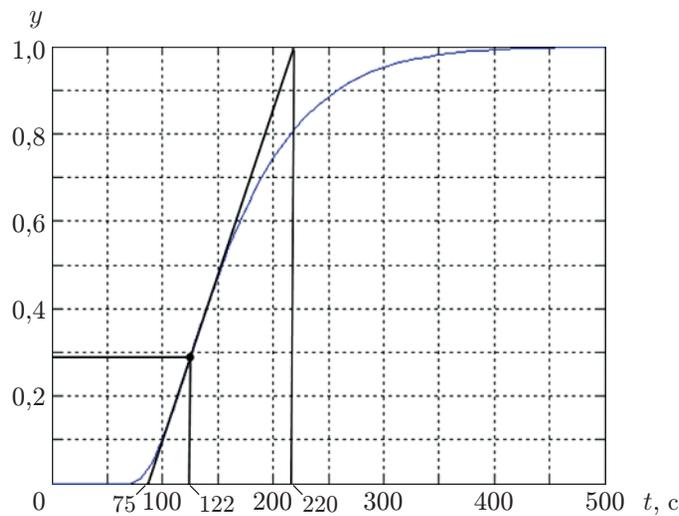


Рис. 1. Характеристика разгона

множество методов настройки, поэтому возникает необходимость проведения сравнительного анализа и нахождения самого приемлемого из них для решения конкретного вида задач.

Целью данной работы является синтез системы с ПИД-регулятором для объекта второго порядка с запаздыванием с последующей настройкой параметров регулятора различными способами, моделирование замкнутых систем в средах MATLAB Simulink и VisSim, сравнение полученных результатов.

Восстановление передаточной функции объекта по характеристике разгона и постановка задачи исследования.

В работе рассмотрен объект, который представляет систему из двух баков: основного и вспомогательного. Жидкость из основного бака переливается во вспомогательный по длинному трубопроводу, представляющему собой звено чистого запаздывания. Подробно функционирование данного объекта описано в работах [12, 13], где показано, что он имеет характеристику разгона, представленную на рис. 1. Характеристика разгона получена путём подачи на вход разомкнутой системы тестового сигнала в виде единичного ступенчатого воздействия.

По данной характеристике можно определить, что после подачи входного сигнала выход системы изменяется не сразу, а спустя время, равное 75 с. Также по виду переходной характеристики можно восстановить передаточную функцию объекта, которая представляет собой звено второго порядка с запаздыванием и имеет следующий вид:

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

где K — коэффициент усиления объекта ($K = 1$), T — постоянная времени объекта, d — коэффициент демпфирования ($d = 1$), τ — время запаздывания.

Постоянная времени определяется методом касательной к точке перегиба переходной характеристики, которая соответствует переходу характеристики от режима ускорения к режиму замедления темпа нарастания выходного сигнала. На рис. 1 эта точка соответствует 122 с при амплитуде сигнала, равной 0,3. От полученного значения времени отнимается время запаздывания и определяется постоянная времени объекта: $T = 122 \text{ с} - 75 \text{ с} = 47 \text{ с}$.

С учётом найденных значений передаточная функция исследуемого объекта управления принимает вид

$$W(p) = 1/(2209p^2 + 94p + 1)e^{-75p}. \quad (2)$$

Показатели качества переходного процесса в системе без регулятора следующие:

$$t_{п.п} \approx 350 \text{ с}, \quad \Delta_{ст} = 0, \quad \sigma = 0 \%,$$

где $t_{п.п}$ — время переходного процесса, $\Delta_{ст}$ — статическая ошибка, σ — перерегулирование.

Задачей исследования является расчёт параметров ПИД-регулятора различными методами для обеспечения наилучших показателей качества переходных процессов в замкнутой системе.

Расчёт и настройка параметров ПИД-регулятора. Непрерывная реализация ПИД-регулятора описывается уравнением

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (3)$$

Структурная схема системы с регулятором представлена на рис. 2.

Для исследуемого объекта рассчитаем параметры ПИД-регулятора различными методами.

Метод Циглера — Никольса. В методе предлагается два способа настройки параметров ПИД-регулятора.

Первый способ основан на запасах устойчивости системы. Здесь используется экспериментальное исследование, которое заключается в том, что необходимо обнулить коэффициенты интегральной и дифференциальной составляющих и увеличивать коэффициент пропорциональной составляющей K_p до тех пор, пока система не окажется на границе устойчивости. Фиксируется значение коэффициента усиления объекта, при котором произошёл выход на границу устойчивости, и измеряется период установившихся колебаний. В зависимости от полученных значений рассчитываются коэффициенты регулятора. Данный способ называется частотным.

Второй вариант метода является эмпирическим, в нём необходимо использовать реакцию объекта управления на ступенчатое воздействие (см. рис. 1), именно этот вариант

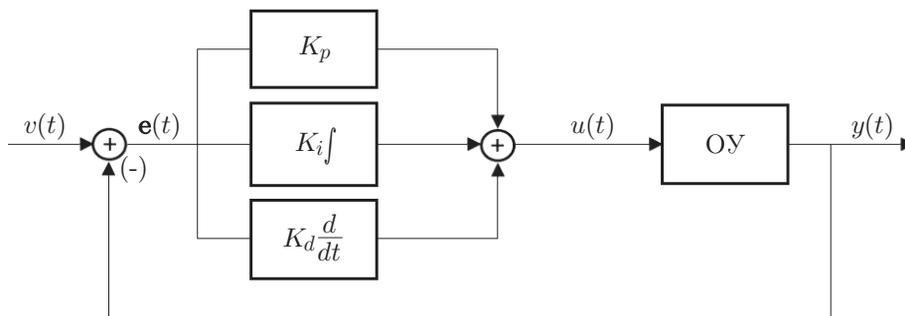


Рис. 2. Структурная схема системы: $v(t)$ — задающее воздействие, $u(t)$ — управляющее воздействие, $e(t)$ — ошибка регулирования, K_p — коэффициент пропорциональной составляющей, K_i — коэффициент интегральной составляющей, K_d — коэффициент дифференциальной составляющей

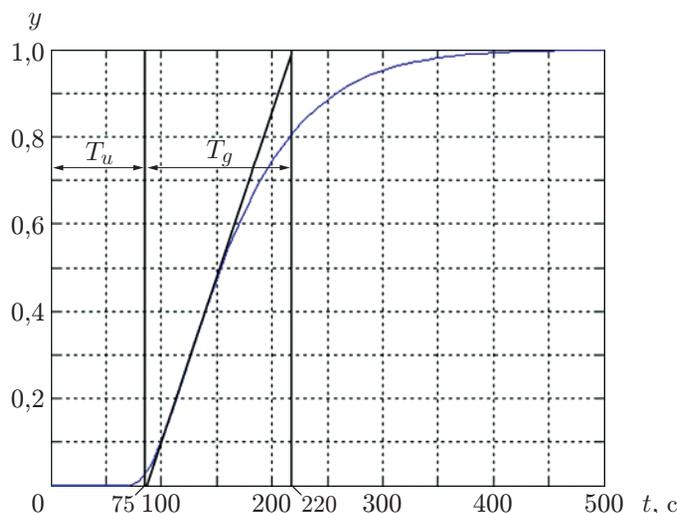


Рис. 3. График расчёта параметров регулятора по методу Чина — Хронеса — Ресвика

будем использовать в работе. Значения в данном случае рассчитываются по следующим формулам: $K_p = 1,2T/K\tau$, $K_i = 0,6T/K\tau^2$, $K_d = 0,6T/K$.

В результате расчёта получились следующие значения параметров ПИД-регулятора:

$$K_p = 0,752, \quad K_i = 0,005, \quad K_d = 28,2.$$

Метод Чина — Хронеса — Ресвика. Метод является приближённым, его преимущество заключается в простоте настройки параметров [14]. По характеристике разгона (рис. 3) определяются время задержки T_u и время выравнивания T_g .

Формулы для расчёта параметров ПИД-регулятора данным методом следующие:

$$K_p = 1,66KT_u/T_g, \quad K_i = 1/T_g, \quad K_d = 0,5T_u. \quad (4)$$

На их основе вычислены значения параметров регулятора:

$$K_p = 0,859, \quad K_i = 0,007, \quad K_d = 37,5.$$

Метод Куна. В методе вводится постоянная времени T_Σ . Данный параметр характеризует быстродействие любого рассматриваемого объекта [15]. Он вводится для передаточной функции общего вида

$$W(p) = \frac{K_s(1 + T_{D1}p)(1 + T_{D2}p) \dots (1 + T_{Dm}p)}{(1 + T_1p)(1 + T_2p) \dots (1 + T_np)} e^{-p\tau}, \quad (5)$$

где суммарная постоянная времени $T_\Sigma = T_1 + T_2 + \dots + T_n - T_{D1} - T_{D2} - \dots - T_{Dm} + \tau$.

Метод Куна основан на аппроксимации объекта звеном третьего порядка

$$W(p) = \frac{K_s}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)(T_3p + 1)}, \quad (6)$$

где $T_1 = T_2 = T_3 = T_\Sigma/3$.

Параметры ПИД-регулятора T_i и T_d выбираются так, чтобы обеспечить компенсацию влияния двух полюсов объекта. Условие имеет следующий вид:

$$(T_{\Sigma}p/3 + 1)^2 = 1 + T_i p + T_i T_d p^2, \quad (7)$$

в этом случае $T_i = 2T_{\Sigma}/3$, $T_d = T_{\Sigma}/6$.

После компенсации влияния двух полюсов передаточная функция замкнутой системы имеет вид

$$W_{\text{зам}}(p) = K_p K_s / (T_i T_{\Sigma} p^2 / 3 + T_i p + K_p K_s). \quad (8)$$

В методе Куна существует два способа настройки: быстрая и нормальная. Быстрая настройка применяется для систем с объектами первого или второго порядка, нормальная используется для систем управления объектами более высокого порядка. Параметры ПИД-регулятора в случае быстрой настройки рассчитываются по следующим соотношениям:

$$K_p = K_s^{-1}, \quad T_i = 0,8T_{\Sigma}, \quad T_d = 0,12T_{\Sigma}, \quad K_i = K_p/T_i, \quad K_d = K_p T_d. \quad (9)$$

Разложим знаменатель передаточной функции исследуемого объекта на множители:

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} e^{-\tau p} = \frac{1}{(47p + 1)(47p + 1)} e^{-75p}. \quad (10)$$

Суммарная постоянная времени равна 169 с. Параметры ПИД-регулятора при быстрой настройке принимают следующие значения: $K_p = 0,5$, $K_i = 135,2$, $K_d = 10,14$.

Метод Стогестада. Суть этого метода заключается в том, что по идентифицированным параметрам модели объекта управления задаётся желаемый вид переходной характеристики замкнутой системы [11, 15] (желаемый вид описывается инерционным звеном первого порядка) путём выбора постоянной времени T_c :

$$W(p) = K_s / (T_s p + 1) e^{-\tau p}. \quad (11)$$

Для аperiodического звена второго порядка с транспортным запаздыванием параметры ПИД-регулятора находятся по формулам:

$$K'_p = T_1 / (K_s(T_c + \tau)), \quad K'_d = T_2, \quad K'_i = \min [T_1; c(T_c + \tau)], \quad (12)$$

где T_1 , T_2 , K , τ — параметры объекта, c — параметр, обеспечивающий аperiodический вид переходного процесса на выходе системы управления, который рекомендуют принимать равным 4.

Переход к стандартному виду ПИД-регулятора происходит по формулам:

$$K_p = K'_p (K'_i + K'_d) / K'_i, \quad K_i = K'_p / K'_i, \quad K_d = K'_p K'_d. \quad (13)$$

Учитывая, что $T_c = 75$ с, $T_1 = 47$ с, $T_2 = 47$ с, параметры при расчёте методом Стогестада принимают следующие значения: $K'_p = 0,313$, $K'_d = 47$, $K'_i = 47$, а параметры ПИД-регулятора значения: $K_p = 0,626$, $K_i = 0,007$, $K_d = 14,711$.

Метод численной оптимизации. При использовании данного метода в задаче оптимизации регулятора на первом этапе входят идентификация объекта и моделирование (выбор структуры регулятора, средства и способа оптимизации, целевой функции, вида воздействия, времени моделирования, метода и шага интегрирования).

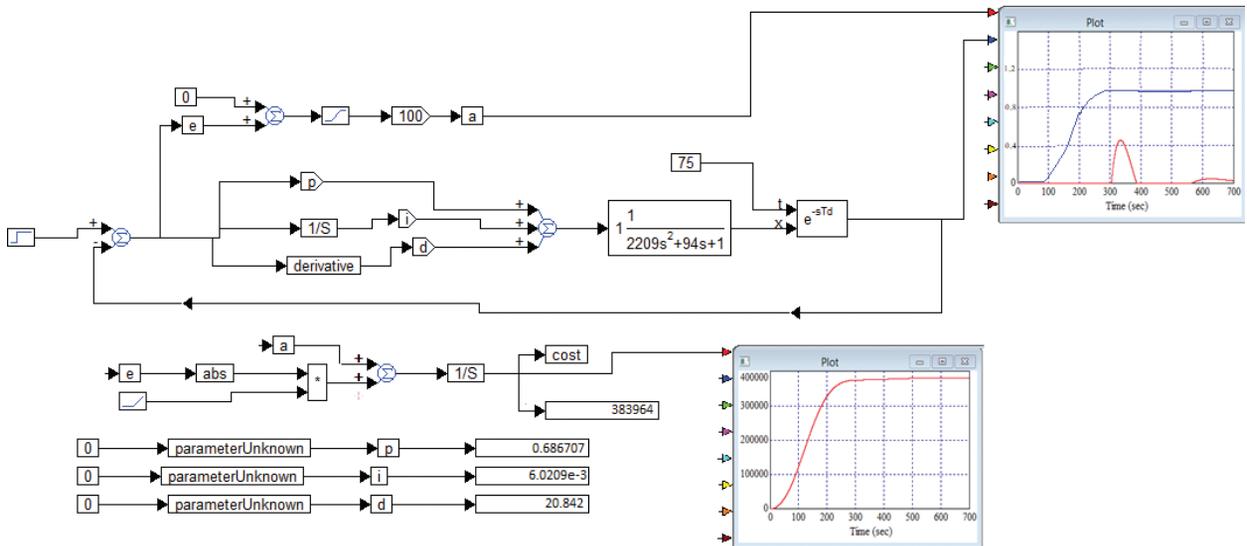


Рис. 4. Оптимизация ПИД-регулятора по критерию интеграла от модуля ошибки, усиленному запретом перерегулирования более чем на 0 %

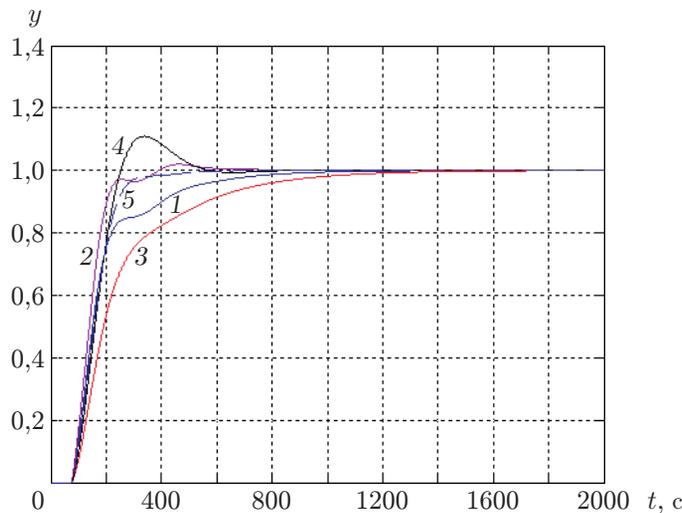


Рис. 5. Переходные процессы в системе с ПИД-регулятором: 1 — метод Циглера — Никольса, 2 — метод Чина — Хронеса — Ресвика, 3 — метод Куна, 4 — метод Стогестада, 5 — метод численной оптимизации

Сравнение результатов

Метод	Параметр					
	K_p	K_i	K_d	$t_{п.п.}, c$	$\sigma, \%$	Δ^0
Циглера — Никольса	0,752	0,005	28,20	600	2	0
Чина — Хронеса — Ресвика	0,859	0,007	37,50	400	2	0
Куна	0,50	0,0037	10,14	900	0	0
Стогестада	0,626	0,007	14,711	500	10	0
Численной оптимизации	0,687	0,006	20,842	300	0	0

Требования к коэффициентам регулятора формируются в виде целевой функции — критерия качества замкнутой системы [9]. Критерием качества может быть любая функция, удовлетворяющая требованиям, предъявляемым к этому критерию. Он необходим для возможности нахождения оптимального (относительно данного критерия) набора параметров системы. В работах [12, 14] критерием качества выбирались следующие стоимостные

функции: $\Psi_1(T) = \int_0^T |e(t)| dt$ — интеграл от модуля ошибки, $\Psi_2(T) = \int_0^T e^2(t) dt$ — ин-

теграл от квадрата ошибки, $\Psi_{N/M}(T) = \int_0^T t^N |e(t)|^M dt$ — обобщённый интеграл модуля ошибки с весом и степенями.

На основе результатов моделирования, полученных в программной среде VisSim в работах [11, 13] следует, что применение в проектах оптимизации всех перечисленных стоимостных функций даёт нежелательное перерегулирование на выходе замкнутой системы. Поскольку применение критерия интеграла от модуля ошибки даёт наименьшее перерегулирование, выберем его для дальнейшей оптимизации и введём в критерий функцию, которая будет принимать нулевое значение, если перерегулирование находится в заданных пределах, а в случае превышения этой величины данная функция будет резко возрастать [16, 17]. Пример такой функции представлен на рис. 4. Параметры ПИД-регулятора, полученные данным способом, принимают следующие значения: $K_p = 0,687$, $K_i = 0,006$, $K_d = 20,842$.

Численное моделирование и сравнение полученных результатов. Результаты моделирования замкнутых систем в программной среде MATLAB Simulink приведены на рис. 5.

В таблице представлены численные значения параметров регулятора, а также показатели качества переходного процесса в системе при настройке параметров различными методами.

Заключение. Рассмотрена возможность применения различных методов настройки параметров ПИД-регулятора в системе с объектом второго порядка с транспортным запаздыванием. По экспериментально полученной характеристике разгона определена передаточная функция объекта, её параметры, оценены показатели качества переходного процесса, сформулирована задача исследования.

Для расчёта параметров регулятора использовались методы: Циглера — Никольса, Чина — Хронеса — Ресвика, Куна (быстрая настройка), Стогестада, численной оптимизации с различными стоимостными функциями.

Выполнено моделирование синтезированных систем в программных средах MATLAB Simulink и VisSim. Проведено сравнение графиков переходных процессов, полученных при использовании различных методов. Показано, что в системе с ПИД-регулятором, параметры которого рассчитаны методом численной оптимизации по критерию интеграла от модуля ошибки с запретом перерегулирования более чем на 0 %, удаётся получить оптимальный процесс с наилучшим быстродействием, нулевым перерегулированием и нулевой статической ошибкой. Все остальные методы показывают более низкое быстродействие, а три из них (Циглера — Никольса, Чина — Хронеса — Ресвика и Стогестада) дают нежелательное перерегулирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жмудь В. А.** Замкнутые системы автоматического управления: уч. 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: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2013. 16 с.
3. **Вадутов О. С.** Синтез ПИД-регулятора в системах с запаздыванием методом условной оптимизации с ограничениями на размещение полюсов // Изв. Томского политехнического университета. Информационные технологии. 2014. **325**, № 5. С. 16–22.
4. **Бесекеерский В. А., Попов Е. П.** Теория систем автоматического регулирования. Изд. 4-е, перераб. и доп. СПб: Изд-во «Профессия», 2003. 752 с.
5. **Sanz R., Garcia P., Albertos P.** Enhanced disturbance rejection for a predictor-based control of LTI systems with input delay // Automatica. 2016. **72**. P. 205–208.
6. **Furtat I., Fridman E., Fradkov A.** Disturbance compensation with finite spectrum assignment for plants with input delay // IEEE Trans. Autom. Control. 2018. **63**, N 1. P. 298–305.
7. **Zuo Z., Lin Z., Ding Z.** Truncated prediction output feedback control of a class of Lipschitz nonlinear systems with input delay // IEEE Trans. Circuits and Systems II: Express Briefs. 2016. **63**, N 8. P. 788–792.
8. **Shi K., Liu X., Zhu X. et al.** Novel delay-dependent master-slave synchronization criteria of chaotic Lur'e systems with time-varying-delay feedback control // Appl. Math. Comput. 2016. **282**. P. 137–154.
9. **Zhmud V. A., Dimitrov L. V., Nosek J.** Numerical Optimization of Regulators for Automatic Control System: Textbook for Higher Education. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2019. 296 с.
10. **Воробьев В. Ю., Саблина Г. В.** Расчёт и оптимизация параметров дискретного ПИД-регулятора методом Циглера — Никольса // Автоматика и программная инженерия. 2019. **27**, № 1. С. 9–13.
11. **Дёмин И. О., Саблина Г. В.** Исследование методов настройки параметров ПИД-регулятора // Автоматика и программная инженерия. 2020. **31**, № 1. С. 174–180.
12. **Курганов В. В., Цавнин А. В.** Управление объектом с запаздыванием // Автоматика и программная инженерия. 2015. **21**, № 2. С. 9–13.
13. **Миллер Ю. В., Саблина Г. В.** Расчёт параметров ПИД-регулятора // Автоматика и программная инженерия. 2020. **31**, № 1. С. 148–153.
14. **Стельмащук С. В.** Настройка ПИД-регулятора по кривой разгона объекта с самовыравниванием для максимального быстрогодействия с заданным перерегулированием при идентификации объекта моделью первого порядка с запаздыванием. Информатика, вычислительная техника и управление // Вестн. ТОГУ. 2013. **29**, № 2. С. 81–90.
15. **Сидорова А. А.** Выбор эффективного метода настройки ПИД-регулятора // Тр. XV Международ. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и современные информационные технологии». Томск: Изд-во ТПУ, 2017. С. 175–176.
16. **Жмудь В. А., Востриков А. С., Ивойлов А. Ю., Саблина Г. В.** Синтез робастных ПИД-регуляторов методом двойной оптимизации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. **21**, № 2. С. 67–74.
17. **Жмудь В. А., Димитров Л., Саблина Г. В. и др.** О целесообразности и возможностях аппроксимации звена с чистым запаздыванием // Информатика и автоматизация. 2022. **21**, № 1. С. 41–67.

Поступила в редакцию 18.05.2022

После доработки 11.06.2022

Принята к публикации 24.06.2022