

2. Bambang, K. Design and Development of Small Electric Vehicle Using MATLAB/SIMULINK [Text] / K. Bambang, M. Soebagio, P. Hery. – Institute of Technology, Indonesia, 2011.
3. Richard, A. Mathematical Modelling and Simulation of a PWM Inverter Controlled Brushless Motor Drive System from Physical Principles for Electric Vehicle Propulsion Applications [Text] / A. Richard. – Cork Institute of Technology, Ireland, 2011. doi: 10.5772/16652
4. Simpower System Toolbox [Text]. – Matlab “R2010”.
5. Мокін, Б. І. Ідентифікація параметрів моделей та оптимізація режимів системи електропривода трамвая з тяговими електро-двигунами постійного струму [Текст] / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2008. – 92 с.
6. Вешеневский, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе [Текст] / С. Н. Вешеневский. – М.: «Энергия», 1977. – 432 с.
7. Вишник, Г. В. Троллейбус пассажирский ЗиУ–682Б [Текст] / Г. В. Вишник, В. И. Шабалин, И. Г. Осипов и др. – М.: «Транспорт», 1977. – 208 с.
8. Корягина, Е. Е. Электрооборудование трамваев и троллейбусов [Текст] / Е. Е. Корягина, О. А. Коськин. – М.: Транспорт, 1982. – 296 с.
9. Преобразователь ПТКД–203М [Электронный ресурс]. – <http://www.eltroll.ru/>
10. Кривовяз, В. Тяговый электропривод постоянного тока модернизированного трамвайного вагона «Татра – 3Е» [Текст] / В. Кривовяз, П. Васильев, В. Маевский // Силовая электроника – 2007. – № 3. – С. 36–38.
11. Далека, В. Х. Основи електричної тяги: навч. посібник [Текст] / В. Х. Далека, П. М. Пушков, В. П. Андрійченко, Ю. В. Мінецьва. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 312 с.

Проведено аналіз проблеми розробки робастних систем керування для об'єктів із значним часом запізнення. Для таких об'єктів важно забезпечити якісне керування, оскільки керування ведеться за попереднім станом виходу об'єкту. Досліджені основні методи налаштування ПІД регуляторів, а також альтернативних типів регуляторів. Рекомендовані найкращі методи синтезу робастних систем керування для об'єктів з великим запізненням

Ключові слова: пропорціональний, інтегральний, диференціальний, регулятор, упереджувач, модель, прогнозуючий, робастний, важкокерований, запізнення

Проведен анализ проблемы разработки робастных систем управления для объектов с большим временем запаздывания. Для таких объектов трудно обеспечить качественное управление, поскольку управление ведется по прошлому состоянию выхода объекта. Исследованы основные методы настройки ПИД регуляторов, а также альтернативных типов регуляторов. Рекомендованы лучшие методы синтеза робастных систем управления для объектов с большим запаздыванием

Ключевые слова: пропорциональный, интегральный, дифференциальный, регулятор, упредитель, модель, прогнозирующий, робастный, труднорегулируемый, запаздывание

УДК 681.51

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59107

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБАСТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ОБЪЕКТАМИ С БОЛЬШИМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

А. А. Стопакевич

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра компьютерно-интегрированных
технологических процессов и производств
Одесская национальная академия
связи им. О. С. Попова
ул. Кузнечная, 1, г. Одесса, Украина, 65029
E-mail: stopakevich@gmail.com

А. А. Стопакевич

Кандидат технических наук, доцент
Кафедра автоматизации
теплоэнергетических процессов
Одесский национальный
политехнический университет
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044
E-mail: stopakevich@mail.ru

1. Введение

Модели каналов динамики большинства технологических процессов являются устойчивыми и имеют в своем составе звено запаздывания, причиной появления которого являются особенности массо- и энергообмена, а также конструктивные особенностями технологических установок. И хотя известно множество

разных типов регуляторов, при разработке систем с запаздыванием используются, как правило, регуляторы ПИД-семейства и некоторые регуляторы специальной структуры.

Простота и эффективность регуляторов ПИД-семейства является основной причиной их широкого применения в промышленности. Больше 90 % всех систем управления технологическими процессами ис-

пользуют такие регуляторы [1]. За время их активной эксплуатации возникло множество методик для определения настроек ПИД-регуляторов, число которых исчисляется сотнями [2]. Такое количество обусловлено различием эталонных моделей динамики каналов, критериев качества переходных процессов, условий применимости, точности и достоверности алгоритмов расчета и оптимизации параметров.

Предметом исследования являются системы управления с объектами, в которых время запаздывания занимает большую часть времени реакции на изменение управляющего воздействия. Кроме регуляторов ПИД-семейства в системах управления для объектов указанного типа используется упредитель Смита [3], который также включает регулятор ПИД-семейства, а также специальные регуляторы, такие как МРС регуляторы. В качестве эталонной принята наиболее распространенная в промышленности модель в виде инерционного звена с запаздыванием, в котором k_0 – коэффициент передачи, T_0 – постоянная времени, τ_0 – время запаздывания и $\tau_0/T_0 > 1$. ПИД-регулятор примем в стандартной форме с вынесенным коэффициентом передачи K_p , временем T_n при интеграле и временем T_d при производной.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Первым официально опубликованным методом настройки регуляторов ПИД-семейства является метод Циглера-Николсона, предложенный в 1942 году [4]. Оптимальным считается переходной процесс с затуханием амплитуды колебаний равным $1/4$. Разработан табличный вариант метода, не требующий перевода объекта в режим автоколебаний.

Метод Коен-Куна – это табличный метод, который базируется на том же представлении об оптимальном переходном процессе, что и метод Циглера-Николсона. Это второй по популярности метод в промышленности. В соответствии с [5] метод дает робастные настройки при $\tau_0/T_0 < 8.7$.

Современными популярными методами настройки ПИД регуляторов являются IMC и SIMC [6]. Параметром настройки методов является число τ_c , связанное с желаемым временем переходного процесса. Первая версия метода IMC-PID описана в [7], а улучшенная – в работе [8]. Но рекомендации по поводу выбора для объектов с большим запаздыванием оказались неудовлетворительными, на что обращено внимание в работе [9]. Также отмечено завышенное значение T_n , что увеличивает время переходного процесса. Указанные недостатки пытается преодолеть метод SIMC, который ограничивает величину T_n .

Частотный алгоритм Matlab [10] позволяет достичь баланс между скоростью переходных процессов и робастностью САУ. Функционирование метода для объектов с большим запаздыванием не исследовано.

Робастный метод настройки ПИД-регуляторов, описанный в [11], предназначен для ПИД-регулятора с фильтром. На основе анализа функции чувствительности [1] и допуска несоответствия модели на 30% были получены оптимальные границы функции чувствительности и частоты среза, на основе которых

были выведены табличные правила. Разработан для процессов с большим запаздыванием.

Отметим, что широко распространенные методы Копеловича [12] и Кона [13] неприменимы при $\tau_0/T_0 > 1$. Для методов, построенных по решению оптимизационной задачи при различных интегральных критериях качества, $\tau_0/T_0 < 2$ [14]. Для частотного метода Михалевича [15] не существует ограничений, однако он требует указывать в качестве исходных данные значения частоты среза и запаса по фазе, которые не могут быть достаточно легко определены для объектов с произвольным отношением τ_0/T_0 . Для приблизительного определения исходных данных можно было бы использовать номограмму Солодовникова [16], однако она адекватна только для $\tau_0/T_0 < 1.2$.

Для улучшения ситуации был предложен упредитель Смита [3]. Однако оказалось, что система с упредителем, показывая хорошие качества, теряла устойчивость при отклонении параметров модели объекте от параметров объекта. Среди попыток улучшить упредитель [17], наилучшие результаты показала модификация Хуанга [18].

Другой альтернативой для объектов со значительным временем запаздывания являются регуляторы, задача синтеза которых базируется на решении уравнения Риккати. В работе [19] показано, что при применении цифрового регулятора с аperiodическим наблюдателем, синтез регулятора не зависит от запаздывания. А, например, в [20] утверждается преимущество модельно-прогнозирующих регуляторов в сравнении с ПИД регуляторами для объектов со значительным временем запаздывания. Однако исследуются только ограниченные случаи, поэтому требуется дополнительные исследования.

Таким образом, анализ показал, что вопрос синтеза систем управления объектом с большим запаздыванием является проблемой, требующей дальнейших исследований. Требуется найти компромисс между качеством и скоростью регулирования, устойчивостью системы и робастностью к отклонениям параметров модели.

3. Цели и задачи исследования

Целью работы является выбор оптимального метода проектирования робастных типовых и специальных регуляторов для объектов с большим запаздыванием.

Наилучшим методом проектирования робастного регулятора для объектов с большим запаздыванием будем считать такой, который позволяет достичь максимально качественных переходных процессов при условии значительного отклонения реального поведения объекта управления от его модели. Среди близких по качеству регулирования методов лучшим будем считать такой, реализация которого является более простой.

Таким образом, для достижения поставленной цели необходимо:

- определить эталонную модель объекта и соответствующую ей модель инерционного звена с запаздыванием для настройки регуляторов; границы неопределенности параметров для исследования робастности и критерии качества переходных процессов;
- выбрать оптимальный метод синтеза регуляторов ПИД-семейства, целесообразность использования

упредителя Смита с модификацией Хуанга; целесообразность использования специальных регуляторов.

4. Робастный синтез регулятора объекта с большим запаздыванием

4. 1. Выбор моделей для исследования

В качестве эталонной модели объекта принято инерционное звено второго порядка с запаздыванием (SOPDT)

$$W_{o2} = \frac{k_o}{(T_{o2}s+1)^2} e^{-\tau_2 s} = \frac{1}{(4.7s+1)^2} e^{-\tau_2 s}.$$

Для настройки регуляторов принято инерционное звено первого порядка с запаздыванием (FOPDT) с коэффициентами, которые делают его динамику подобной динамике эталонного объекта

$$W_o = \frac{k_o}{T_o s+1} e^{-\tau_o s} = \frac{1}{6.386s+1} e^{-\tau_o s}.$$

Исследование функционирования и робастности методов синтеза проводится при сочетании следующих наборов параметров

$$\tau_o = [1.0, 1.5, 3.0, 6.0, 9.0] \cdot T_o,$$

$$T_{o2} = (0.5; 0.75; 1.0; 1.25; 1.5) \cdot 4.7,$$

$$\tau_{20} = \tau_o - 2.61,$$

$$\tau_2 = (0.5; 0.75; 1.0; 1.25; 1.5) \cdot \tau_{20}.$$

4. 2. Выбор критериев качества переходных процессов

Для оценки качества переходных процессов используются критерии нескольких типов: прямые, интегральные и частотные.

Наиболее важными прямыми показателями являются модуль максимального отклонения $|y_{max}|$ и время регулирования T_r .

Наиболее сбалансированным интегральным показателем является

$$J = \int_0^{\infty} (e(t)^2 + 0.25 \cdot \dot{e}(t)^2) dt.$$

Среди частотных показателей качества наиболее удобно воспользоваться функцией чувствительности [1], которая определяется в следующем виде

$$M_s = \max_{\omega} \left| \frac{1}{P(j\omega) \cdot C(j\omega) + 1} \right|,$$

где P(s), C(s) – передаточные функции объекта управления и регулятора, ω – круговая частота, j – мнимая единица.

Значение функции чувствительности обычно находится в диапазоне 1.2–2.0 [21] и является показателем баланса между робастностью (меньшее значение) и скоростью переходного процесса (большее значение).

По значению функции чувствительности можно оценить запасы устойчивости по амплитуде и фазе:

$$g_m \geq \frac{M_s}{M_s + 1}, \quad \phi_m \geq 2 \arcsin \left(\frac{1}{2M_s} \right).$$

4. 3. Синтез систем управления с регуляторами ПИД-семейства

Проведем исследование следующих методов настройки ПИ и ПИД регуляторов: Циглера-Николсона (ZN), Коена-Куна (CC), робастного синтеза для регулятора с фильтрацией (PIDF), ИМС-PID, SIMC, частотный метод Matlab.

ПИ и ПИД регуляторы в стандартной форме по табличному методу Циглера-Николсона рассчитываются по следующим формулам

$$W_{PI-ZN} = (0.9/a) \left(1 + \frac{1}{3\tau_o s} \right);$$

$$W_{PID-ZN} = (1.2/a) \left(1 + \frac{1}{2\tau_o s} + (\tau_o/2)s \right),$$

где $a = k_o \cdot \tau_o / T_o$.

ПИ и ПИД регуляторы в стандартной форме по табличному методу Коена-Куна рассчитываются по следующим формулам

$$W_{PI-CC} = \left(\frac{1}{k_o} \cdot (0.9r + 0.083) \right) \times \left(1 + \frac{1}{T_o \left(\frac{3.33r + 0.31r^2}{1 + 2.22r} \right) s} \right),$$

$$W_{PID-CC} = \left(\frac{1}{k_o} \cdot (1.35r + 0.25) \right) \times \left(1 + \frac{1}{T_o \left(\frac{2.5r + 0.46r^2}{1 + 0.61r} \right) s} + (0.365T_o \cdot r^{0.95}) s \right),$$

где $r = \tau_o / T_o$.

ПИД регуляторы с фильтрацией по табличному методу робастного синтеза рассчитываются по формуле

$$W_{PIDF} = \left(\frac{0.35(\tau_o + 2T_o)}{k_o \tau_o} \right) \times \left(\frac{1}{0.15\tau_o s + 1} \right) \times \left((b \cdot z - y) + \frac{1}{\left(T_o + \frac{\tau_o}{2} \right) s} (z - y) + \left(\frac{\tau_o T_o}{\tau_o + 2T_o} \right) s \cdot (c \cdot z - y) \right),$$

где $b=c=1$ если $T_o \ll \tau_o$, z – задание, y – выход объекта.

ПИ и ПИД регуляторы по усовершенствованному методу IMC-PID рассчитываются следующим образом

$$W_{PI-IMC} = \left(\frac{T_o + \frac{\tau_o}{2}}{k_o \tau_c} \right) \left(1 + \frac{1}{\left(T_o + \frac{\tau_o}{2} \right) s} \right),$$

$\tau_c = 1.5\tau_o$ для $\tau_o > T_o$,

$$W_{PID-IMC} = \left(\frac{T_o}{k_o (\tau_c + \tau_o)} \right) \left(1 + \frac{1}{\left(T_o + \frac{\tau_o}{2} \right) s} + \frac{T_o \frac{\tau_o}{2}}{T_o + \frac{\tau_o}{2}} s \right),$$

где

$$\tau_c = 0.7\tau_o.$$

Правила расчета ПИ и ПИД регуляторов по методу SIMC следующие

$$W_{PI-SIMC} = \left(\frac{1}{k_o} \cdot \frac{T_o}{(\tau_c + \tau_o)} \right) \left(\frac{1}{\min(T_o, 4(\tau_c + \tau_o))s} \right),$$

$$W_{PID-SIMC} = \left(\frac{1}{k_o} \cdot \frac{T_{o2}}{(\tau_c + \tau_2)} \right) \times \left(\frac{\min(T_o, 4(\tau_c + \tau_o))s + 1}{\min(T_o, 4(\tau_c + \tau_2))s} \right) (T_{o2}s + 1).$$

Расчет ПИД-регулятора по методу Matlab W_{PID-M} проводится программой pidtune.

4. 4. Синтез систем управления на базе упредителя Смита с модификацией Хуанга

Для выбранного эталонного объекта устойчивость упредителя Смита теряется при $T_{o2} < 0.5 \cdot 4.7$ и $\tau_2 = 7.644$. А, например, для объекта управления, представленного передаточной функцией $W(s) = e^{-100s} / 50s$ допустимо отклонение времени запаздывания на 1, т. е. на 1 %, что достаточно мало. Поэтому синтез будем проводить на основании модификации Хуанга [18]. Структура системы управления с упредителем в Matlab Simulink с использованием модификации приведена на рис. 1.

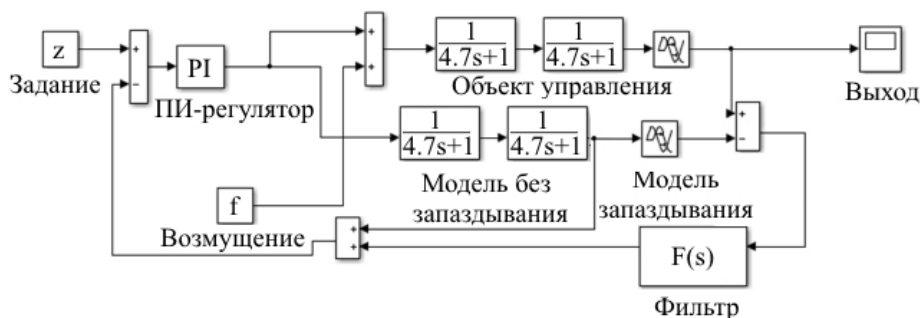


Рис. 1. Структура замкнутой САУ с упредителем Смита и модификацией Хуанга

Оптимальная передаточная функция фильтра в предложенной структуре должна быть $F(s) = e^{\tau_2 s}$. Поскольку такая функция нереализуемая, предлагается следующая аппроксимация

$$F(s) = e^{\tau_2 s} \approx \frac{1 + B(s)}{1 + B(s)e^{-\tau_2 s}},$$

где

$$B(s) = \frac{0.05}{\tau_2 s + 1}.$$

Для синтеза системы управления выбран ПИ-регулятор, параметры которого рассчитываются по модели без запаздывания с помощью частотного метода Matlab. Установлено, что настройки оказываются робастными только при указании величины запаса по фазе 90° , вместо стандартных 60° .

4. 5. Синтез систем управления на базе специальных регуляторов

Для синтеза системы управления на базе MPC-регулятора воспользуемся его Matlab-реализацией. SOPDT модель объекта была представлена в пространстве состояний с помощью добавлений тактовых задержек. Шаг дискретности выбран $T_s = 1$ с, поскольку это минимальное реалистичное время решения оптимизационной задачи. Горизонт предсказания определен по формуле $P = ((\tau_o + 5T_o) / T_s) \cdot 1.5$. Горизонт управления принят $M = 3$. Границы отклонений не задавались.

5. Моделирование замкнутых систем управления

Математическое моделирование замкнутых систем управления проведем при скачкообразном изменении возмущения ($f=1$).

5. 1. Моделирование систем управления с ПИ и ПИД регуляторами

Переходные процессы в замкнутых системах управления с различными вариантами настроек ПИ и ПИД регуляторов при различном отношении τ_o / T_o без отклонения параметров объекта управления от номинала приведены на рис. 2, а-г и 3, а-г.

Зависимость ряда показателей качества переходных процессов при отношениях τ_o / T_o от 1 до 9, значениях T_{o2} и τ_2 от 50 % до 150 % номинального значения, шести методах настройки регуляторов, приведена в табл. 1–3.

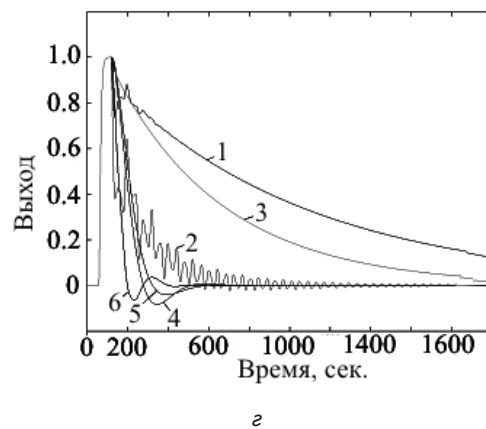
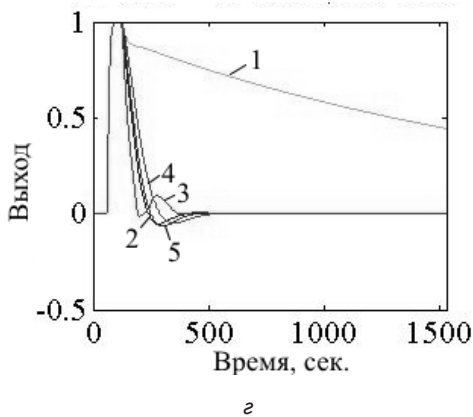
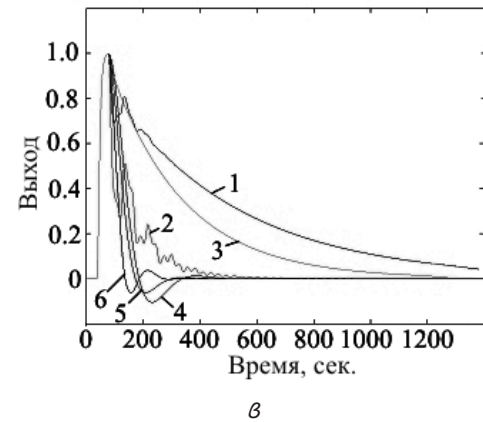
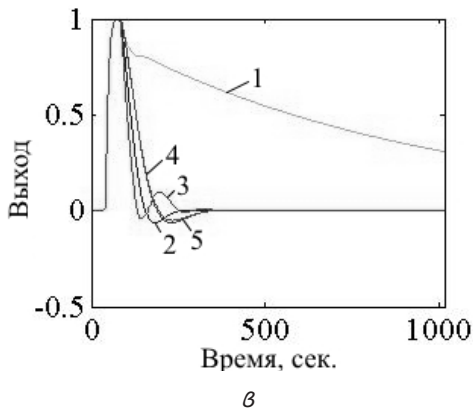
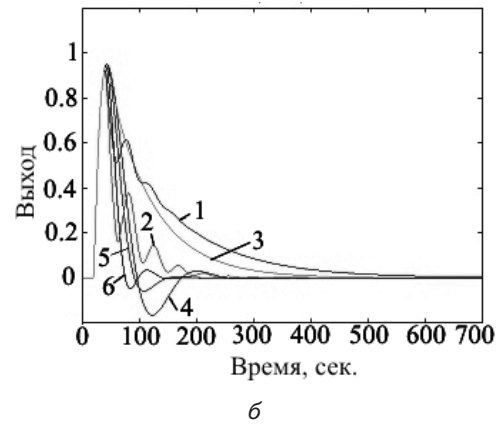
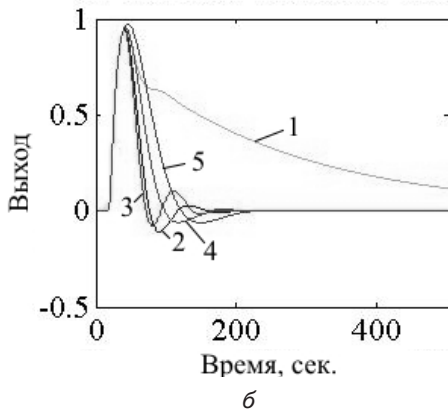
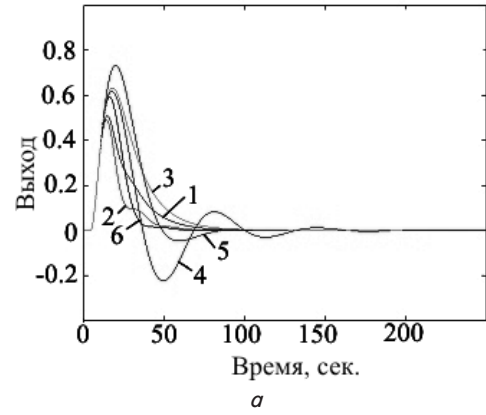
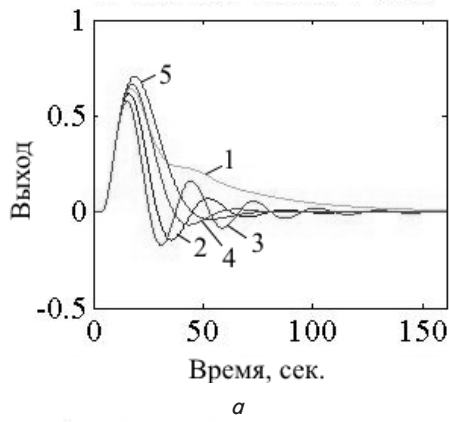


Рис. 2. Процессы в системе управления с ПИ регулятором:
 а – $\tau_0/T_0=1$; б – $\tau_0/T_0=3$; в – $\tau_0/T_0=6$; г – $\tau_0/T_0=9$,
 1 – Циглер-Николсон, 2 – Коен-Кун, 3 – ИМС-PID,
 4 – СИМС, 5 – частотный метод Matlab, 6 – метод для ПИД регулятора с фильтрацией

Рис. 3. Процессы в системе управления с ПИД регулятором:
 а – $\tau_0/T_0=1$; б – $\tau_0/T_0=3$; в – $\tau_0/T_0=6$;
 г – $\tau_0/T_0=9$

Таблица 1

Зависимость времени регулирования в системе при отклонении T_{o2}

τ_o/T_o	T_{o2}	Per	PIDF	ZN	CC	SIMC	IMC-PID	Matlab	
1	50 %	ПИ	–	145	64.5	50.8	328	60.8	
		ПИД	61.4	614	∞	76.8	89.6	61.5	
	75 %	ПИ	–	147	71.5	55.4	131	50.6	
		ПИД	54.4	75.8	62.2	89.1	86.6	49.1	
	100 %	ПИ	–	147	76.5	68.1	118	66.3	
		ПИД	51.1	73.9	59.3	126	80.8	76.2	
	125 %	ПИ	–	146	108	88.3	125	78.7	
		ПИД	56.7	69.4	56.2	194	70.9	86.9	
	150 %	ПИ	–	144	130	124	144	119	
		ПИД	87.4	62.1	39.2	249	84.6	130	
	3	50 %	ПИ	–	922	116	105	155	122
			ПИД	104	494	∞	149	349	113
75 %		ПИ	–	924	128	123	168	177	
		ПИД	115	480	242	158	346	87	
100 %		ПИ	–	928	145	151	134	196	
		ПИД	126	482	217	223	343	134	
125 %		ПИ	–	932	166	165	146	208	
		ПИД	139	484	198	243	340	150	
150 %		ПИ	–	935	187	220	160	219	
		ПИД	162	486	197	259	335	206	
6		50 %	ПИ	–	2.64e+03	153	193	281	254
			ПИД	219	1.76e+03	∞	293	1.09e+03	170
	75 %	ПИ	–	2.64e+03	200	275	229	282	
		ПИД	230	1.75e+03	∞	304	1.08e+03	248	
	100 %	ПИ	–	2.64e+03	227	296	241	299	
		ПИД	243	1.75e+03	467	314	1.08e+03	267	
	125 %	ПИ	–	2.65e+03	245	311	253	311	
		ПИД	258	1.75e+03	427	324	1.08e+03	281	
	150 %	ПИ	–	2.65e+03	260	323	266	323	
		ПИД	277	1.75e+03	429	426	1.07e+03	293	
	9	50 %	ПИ	–	4.26e+03	235	389	332	350
			ПИД	336	3.69e+03	∞	437	2.24e+03	424
75 %		ПИ	–	4.26e+03	327	421	339	373	
		ПИД	347	3.69e+03	∞	450	2.23e+03	463	
100 %		ПИ	–	4.26e+03	351	441	349	389	
		ПИД	361	3.68e+03	972	461	2.23e+03	485	
125 %		ПИ	–	4.26e+03	369	456	360	403	
		ПИД	376	3.68e+03	706	472	2.22e+03	502	
150 %		ПИ	–	4.26e+03	384	469	371	415	
		ПИД	394	3.68e+03	676	482	2.22e+03	516	

Таблица 2

Зависимость времени регулирования в системе при отклонении τ_2

τ_o/T_o	τ_2	Per	PIDF	ZN	CC	SIMC	IMC-PID	Matlab	
1	50 %	ПИ	–	154	52.4	41	48.7	50	
		ПИД	54.6	80.5	64.2	94.1	88	51.5	
	75 %	ПИ	–	150	57.1	50.1	71.7	46	
		ПИД	51.6	77.2	61.3	121	84.5	72.1	
	100 %	ПИ	–	147	76.5	68.1	118	66.3	
		ПИД	51.1	73.9	59.3	126	80.8	76.2	
	125 %	ПИ	–	143	116	77.2	222	69.5	
		ПИД	58.6	70.3	65.8	157	76.9	78.6	
	150 %	ПИ	–	140	180	102	511	92.7	
		ПИД	66	70.6	86.7	190	72.7	102	
	3	50 %	ПИ	–	961	122	131	151	145
			ПИД	130	522	224	133	372	130
75 %		ПИ	–	942	116	105	147	124	
		ПИД	114	498	211	156	357	104	
100 %		ПИ	–	928	145	151	134	196	
		ПИД	126	482	217	223	343	134	
125 %		ПИ	–	917	218	215	227	212	
		ПИД	160	470	216	303	330	200	
150 %		ПИ	–	909	313	252	317	307	
		ПИД	275	460	200	411	316	285	
6		50 %	ПИ	–	2.66e+03	240	264	281	255
			ПИД	246	1.81e+03	472	225	1.13e+03	244
	75 %	ПИ	–	2.65e+03	206	215	267	204	
		ПИД	215	1.77e+03	437	256	1.1e+03	196	
	100 %	ПИ	–	2.64e+03	227	296	241	299	
		ПИД	243	1.75e+03	467	314	1.08e+03	267	
	125 %	ПИ	–	2.64e+03	366	417	355	434	
		ПИД	318	1.73e+03	474	471	1.06e+03	403	
	150 %	ПИ	–	2.64e+03	541	508	524	601	
		ПИД	568	1.72e+03	481	664	1.03e+03	583	
	9	50 %	ПИ	–	4.26e+03	359	398	412	356
			ПИД	364	3.72e+03	719	363	2.29e+03	432
75 %		ПИ	–	4.26e+03	304	327	386	288	
		ПИД	319	3.7e+03	874	288	2.26e+03	357	
100 %		ПИ	–	4.26e+03	351	441	349	389	
		ПИД	361	3.68e+03	972	461	2.23e+03	485	
125 %		ПИ	–	4.26e+03	556	613	504	596	
		ПИД	476	3.67e+03	1.19e+03	686	2.2e+03	553	
150 %		ПИ	–	4.27e+03	824	765	659	869	
		ПИД	860	3.65e+03	1.32e+03	971	2.16e+03	825	

Результаты моделирования систем управления труднорегулируемыми объектами на базе ПИ и ПИД регуляторов показывают, что выбор типа регулятора и метода настройки на качество регулирования влияет существенно.

Таблица 3

Зависимость интегрального критерия ISEDE и M_s в системе при отклонении τ_2

τ_0/T_0	Крит.	Reg	PIDF	ZN	CC	SIMC	IMC-PID	Matlab
1	M_s	ПИ	-	1.59	2.34	1.74	3.37	1.53
		ПИД	1.66	1.64	1.88	1.85	1.25	1.51
	ISEDE	ПИ	-	75	43.2	59.2	35.3	78.4
		ПИД	40.7	34.6	23.3	64.5	72.3	93.1
3	M_s	ПИ	-	1.27	1.79	1.58	1.96	1.57
		ПИД	1.74	1.89	2.55	1.76	1.15	1.61
	ISEDE	ПИ	-	869	233	293	212	396
		ПИД	209	434	192	319	456	267
6	M_s	ПИ	-	1.14	1.6	1.55	1.79	1.57
		ПИД	1.68	1.82	4	1.64	1.08	1.58
	ISEDE	ПИ	-	3.74e+03	527	642	459	643
		ПИД	474	1.88e+03	508	673	1.47e+03	581
9	M_s	ПИ	-	1.1	1.55	1.54	1.71	1.57
		ПИД	1.66	1.72	8.42	1.59	1.06	1.52
	ISEDE	ПИ	-	8.59e+03	820	989	700	871
		ПИД	734	4.34e+03	851	1.02e+03	3e+03	1.11e+03

5. 2. Моделирование систем управления с упредителем Смита с модификацией Хуанга

Переходные процессы в системе с упредителем приведены на рис. 4.

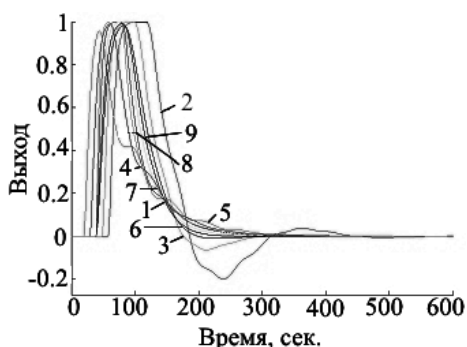


Рис. 4. Процессы в системе управления с упредителем, 1 – номинальные параметры, 2 – при 1.5 τ_{20} , 3 – при 1.25 τ_{20} , 4 – при 0.75 τ_{20} , 5 – при 0.5 τ_{20} , 6 – при 1.5 T_{20} , 7 – при 1.25 T_{20} , 8 – при 0.75 T_{20} , 9 – при 0.5 T_{20}

ПИ регулятор настроен с помощью частотного метода Matlab по модели объекта управления без запаздывания с требованием запаса по фазе 90°. Особенностью рассмотренной системы является примерно одинаковое поведение при различной величине τ_0/T_0 . Результаты моделирования приведены в табл. 4.

Таблица 4

Время регулирования и ISEDE в системе при изменении τ_0 и T_0

τ_0/T_0	Критерий	Ном.	1.5 τ_0	0.5 τ_0	1.5 T_0	0.5 T_0
1	Tr	154	148	160	142	159
	ISEDE	169	179	159	174	164
3	Tr	176	127	205	152	189
	ISEDE	301	374	246	309	294
6	Tr	215	406	283	185	240
	ISEDE	506	713	372	518	495
9	Tr	256	720	471	291	289
	ISEDE	711	1090	503	725	696

Таким образом, система управления обеспечивает удовлетворительное качество управления при достаточной робастности. Поведение системы и процедура её настройки не зависят от соотношения τ_0/T_0 .

5. 3. Моделирование систем управления с модельно-прогнозирующим регулятором

Моделирование показало значительную зависимость качества системы управления Matlab-реализации MPC-регулятора от соотношения τ_0/T_0 объекта управления. Переходные процессы при $\tau_0/T_0=1$ показаны на рис. 5.

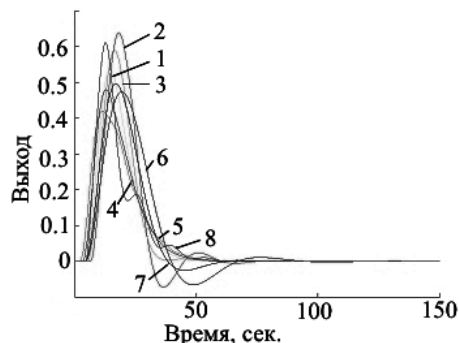


Рис. 5. Процессы в системе управления с Matlab-реализацией MPC-регулятора при $\tau_0/T_0=1$, 1 – номинальные параметры, 2 – при 1.5 τ_{20} , 3 – при 1.25 τ_{20} , 4 – при 0.75 τ_{20} , 5 – при 0.5 τ_{20} , 6 – при 1.5 T_{20} , 7 – при 1.25 T_{20} , 8 – при 0.75 T_{20}

В соответствии с рекомендациями Matlab, робастность системы можно улучшить изменением весовых коэффициентов. Для этого следует умножить на произвольный коэффициент параметр Weight.MVRate и поделить на него же параметры Weight.OV и Weight.MV. Однако такое решение вносит значительную статическую ошибку в систему [22]. Возможным выходом является модификация наблюдателя MPC-регулятора, однако это выходит за рамки исследования. Результаты моделирования приведены в табл. 5.

Таблица 5

Время регулирования и ISEDE при изменении τ_0 и T_0 и MPC регуляторе

τ_0/T_0	Критерий	Ном.	1.5 τ_0	0.5 τ_0	1.5 T_0	1.25 T_0	0.75 T_0	0.5 T_0
1	Tr	42.7	56	49.5	80.6	55.1	45.9	∞
	ISEDE	29.8	41.5	23.8	33.1	31.3	29.2	∞
3	Tr	68.2	∞	∞	146	103	108	∞
	ISEDE	148	∞	∞	153	149	154	∞
6	Tr	109	∞	∞	188	162	187	∞
	ISEDE	352	∞	∞	355	352	359	∞
9	Tr	150	∞	∞	268	224	268	∞
	ISEDE	556	∞	∞	560	557	563	∞

Таким образом, поскольку в ряде случаев переходные процессы расходятся, сделаем вывод, что MPC регулятор не обеспечивает достаточной робастности для объектов со значительным временем запаздывания.

6. Обсуждение результатов моделирования

Представленные результаты показывают следующие основные закономерности:

1. Метод Циглера-Николсона позволяет достичь робастности относительно τ_0 и T_0 , однако время регулирования сопоставимо с другими методами только при $\tau_0/T_0=1$, при $\tau_0/T_0>1$ время регулирования слишком большое. Для случая $\tau_0/T_0=1$ указанный метод лучше использовать для ПИД регулятора.

Метод Коен-Куна позволяет достичь робастности при ПИ регулировании во всех случаях. Для ПИД регулятора при $\tau_0/T_0=6$ и отклонении T_{20} на -25% переходной процесс переходит в режим автоколебаний, при $\tau_0/T_0=9$ переходной процесс расходится. Также переходной процесс расходится с ПИД регулятором во всех случаях при отклонении T_{20} на -50% . Метод Коен-Куна позволяет достичь более качественных переходных процессов с ПИД регулятором при $\tau_0/T_0=1$, а при $\tau_0/T_0>1$ лучшее качество достигается с ПИ регулятором.

2. Метод ИМС-PID позволяет достичь робастных удовлетворительных переходных процессов при использовании ПИ, но не ПИД регулятора.

3. Метод SIMC можно использовать как для ПИ, так и для ПИД регулятора. Качество регулирования с ПИ регулятором несколько лучше. Особенностью метода является незначительное снижение качества управления при изменении параметров объекта управления.

4. Частотный метод Matlab позволяет достичь качественных и робастных переходных процессов. Для случая $\tau_0/T_0=1$ и $\tau_0/T_0=9$ использование ПИ регулятора позволяет достичь более качественных переходных процессов, для случаев $\tau_0/T_0=3$ и $\tau_0/T_0=6$ – использование ПИД регулятора. Особенностью метода является практически неизменная величина M_s . Также стоит отметить, что во всех случаях Д-составляющая регулятора при использовании ПИД настроек близка к нулю, однако, в целом настройки ПИД регуляторов отличаются от настроек ПИ регуляторов.

5. Метод PIDF позволяет достичь высокого качества регулирования в сравнении с другими методами

настроек ПИД регуляторов, поэтому введение фильтра в формулу ПИД регулятора оказывается целесообразным.

6. Для улучшения качества регулирования в сравнении с системой с ПИ регулятором также можно использовать упредитель Смита с модификацией Хуанга, в сравнении с ПИД регулятором с фильтрацией его использование позволяет несколько улучшить качество регулирования при $\tau_0/T_0 \geq 6$.

7. Для объектов с отношением $\tau_0/T_0=1$ целесообразным является использование модельно-прогнозирующего регулятора.

7. Выводы

Определена эталонная модель объекта в виде инерционного звена второго порядка с запаздыванием и соответствующая ей модель инерционного звена первого порядка с запаздыванием для настройки регуляторов; заданы границы неопределенности параметров для исследования робастности от 50% до 150% от номинальных значений, принято отношение τ_0/T_0 от 1 до 9, приняты время регулирования, интегральный критерий качества ISED и чувствительность M_s в качестве критериев качества переходных процессов.

Выбран оптимальный метод синтеза регуляторов ПИД-семейства – таким оказывается метод синтеза SIMC применяемый к ПИ-регулятору.

Если основной причиной неопределенности модели объекта является постоянная времени, а запаздывание известно значительно более точно, несколько лучшие результаты дает использование модифицированного ПИД.

При $6 \leq \tau_0/T_0 \leq 9$, быстродействие системы повышает использование упредителя Смита-Хуанга с ПИ-регулятором, настраиваемым по частотному методу Matlab.

Использование специального MPC-регулятора не рекомендуется, поскольку он не поддерживает требование робастности при $3 \leq \tau_0/T_0$, а выигрыша в качестве регулирования нет.

Литература

1. Åström, K. J. Advanced PID control [Text] / K. J. Åström, T. Hägglund. – USA: Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. – 460 p.
2. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules [Text] / A. O'Dwyer. – London: Imperial College Press, 2006. – 564 p.
3. Смит, Д. Автоматическое регулирование [Текст] / Д. Смит. – М.: Физматгиз, 1962. – 280 с.
4. Ziegler, J. G. Optimum setting for automatic controllers [Text] / J. G. Ziegler, N. B. Nichols // Trans. American Society of Mechanical Engineers. – 1942. – Vol. 64. – P. 759–768.
5. Silva, G. PID controllers for time-delay systems [Text] / G. Silva, A. Datta, S. P. Bhattacharyya. – Boston: Birkhäuser, 2005. – 330 p.
6. Skogestad, S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning [Text] / S. Skogestad // Modeling, Identification and Control. – 2004. – Vol. 25, Issue 2. – P. 85–120. doi: 10.4173/mic.2004.2.2
7. Rivera, D. Internal model control: PID controller design [Text] / D. Rivera, M. Morari, S. Skogestad // Engineering Chemistry Process Design and Development. – 1986. – Vol. 25, Issue 1. – P. 252–265. doi: 10.1021/i200032a041
8. Morari, M. Robust Process Control [Text] / M. Morari, E. Zafiriou. – USA, NJ: Prentice Hall, 1989. – 512 p.

9. Skogestad, S. Probably the best simple PID tuning rules in the world [Text] / S. Skogestad // Journal of Process Control. – 2001. – Vol. 1. – P. 3–29.
10. Чертков, А. А. Параметрическая настройка ПИД-регуляторов динамических систем средствами MATLAB [Текст] / А. А. Чертков, Д. С. Тормашев, С. Б. Сабуров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2014. – Вып. 27, №. 5. – С. 164–171.
11. Normey-Rico, J. E. Control of Dead-time Processes [Text] / J. E. Normey-Rico, E. F. Camacho. – Springer-Verlag, 2007. – 488 p. doi: 10.1109/MCS.2008.927324
12. Копелович, А. П. Инженерные методы расчета при выборе автоматических регуляторов [Текст] / А. П. Копелович. – М.: Металлургиядат, 1960. – 192 с.
13. Харабет, А. Н. Вивчення класичної теорії автоматичного управління за допомогою сучасного персонального комп'ютера [Текст]: навч. пос. / А. Н. Харабет. – Одеса: Бахва, 2014. – 188 с.
14. Zhuang, M. Automatic tuning of optimum PID controllers [Text] / M. Zhuang, D. P. Atherton // IEE Proceedings D Control Theory and Applications. – 1993. – Vol. 140, Issue 3. – P. 216–224. doi: 10.1049/ip-d.1993.0030
15. Mikhalevich, S. Development of a tunable method for PID controllers to achieve the desired phase margin [Text] / S. Mikhalevich, S. A. Baydali, F. Manenti // Journal of Process Control. – 2015. – Vol. 25. – P. 28–34. doi: 10.1016/j.jprocont.2014.10.009
16. Бабаков, Н. А. Теория линейных систем автоматического управления [Текст] / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.
17. Normey-Rico, J. E. Dead-time compensators: A survey [Text] / J. E. Normey-Rico, E. F. Camacho // Control Engineering Practice. – 2008. – Vol. 16, Issue 4. – P. 407–428. doi: 10.1016/j.conengprac.2007.05.006
18. Huang, A H.-P. modified smith predictor with an approximate inverse of dead time [Text] / H.-P. Huang, C.-L. Chen, Y.-C. Chao, P.-L. Chen // AIChE Journal. – 1990. – Vol. 36, Issue 7. – P. 1025–1031. doi: 10.1002/aic.690360708
19. Стопакевич, А. А. Новые соотношения для синтеза цифровых оптимальных одномерных систем управления для объектов с запаздыванием [Текст] / А. А. Стопакевич // ААЭКС. – 2007. – Вып. 19. – С. 115–117.
20. Sha, Y. A. PID versus MPC Performance for SISO Dead-time Dominant Processes [Text] / Y. A. Sha, B. L. D. Laur // 10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems. – Mumbai India, 2013. – P. 241–246. doi: 10.3182/20131218-3-in-2045.00054
21. Visioli, A. Practical PID control [Text] / A. Visioli. – London: Springer, 2009. – 310 p. doi: 10.1007/1-84628-586-0
22. MPC tuning weights [Electronic resource]. – Available at: http://www.mathworks.com/help/mpc/ug/tuning-weights.html#buj3_8a