

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В.П. Зверьков (НИУ «МЭИ»)

Ю.Н. Петроченко (ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского)

Применение поисковых алгоритмов оптимизации и цифрового моделирования для параметрического синтеза систем автоматического управления позволило выявить ряд новых интегральных критериев, минимизация которых обеспечивает комплексное получение эффективных по качеству переходных характеристик и достаточный запас устойчивости замкнутого контура разрабатываемой системы. Эти интегральные критерии могут быть альтернативным предложением интегральным критериям, которые применяются для оптимальной настройки регуляторов. Приведены результаты исследования эффективности нескольких групп альтернативных критериев на примерах оптимальной настройки ПИД-регулятора для объектов управления с S-образной переходной характеристикой и даны методические рекомендации по их использованию.

Ключевые слова: система автоматического управления, запас устойчивости, интегральные критерии, ПИД-регулятор, параметры регулятора, переходные характеристики, частотные характеристики.

Введение

Автоматизированные системы управления непрерывными технологическими процессами в энергетике и других отраслях промышленности реализуются в настоящее время в виде распределенных вычислительных сетей, основой которых являются микропроцессорные контроллеры, позволяющие применять достаточно сложные законы управления, контролировать их работу и при необходимости оперативно корректировать их настройку.

При разработке и наладке автоматических систем управления актуальной проблемой является параметрический синтез, целью которого является выбор значений настроечных параметров регулятора, обеспечивающих оптимальный процесс регулирования. Применение интегральных критериев с различными подынтегральными функциями для параметрического синтеза изменяет динамические свойства системы управления. Исследование этой проблемы предлагается провести применительно к процедуре оптимальной настройки ПИД-регулятора в одноконтурной автоматической системе регулирования (АСР) типового объекта теплоэнергетики. Одноконтурные системы с ПИД-регулятором относятся к наиболее распространенному типу систем регулирования [1, 2].

Общепринятая методика динамической настройки промышленных регуляторов [3, 4] предусматривает решение двух задач:

— определение в пространстве параметров регулятора границы заданного запаса устойчивости разрабатываемой системы управления;

— поиск на этой границе точки минимума некоторого, заранее выбранного, интегрального критерия качества переходных характеристик системы.

Напомним, что под переходной характеристикой понимается реакция настраиваемой системы, отнесенная к величине ступенчатого входного воздействия. Для оценки запаса устойчивости удобно использовать частотный показатель колебательности M , определяемый по величине максимума амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы регулирования по каналу задания.

Интегральные критерии для параметрического синтеза

В общепринятой методике настройки промышленных регуляторов интегральные критерии: линейный

$$J = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) dt \text{ и квадратичный } J = \int_0^{\infty} [\varepsilon(t)]^2 dt \text{ дают косвен-$$

ную оценку качества переходных процессов ошибки регулирования $\varepsilon(t)$ при единичном ступенчатом воздействии [3]. Поэтому после минимизации выбранного критерия разработчик воспроизводит полученные переходную и частотную характеристики разрабатываемой системы и выясняет, какие прямые показатели качества имеют эти характеристики в оптимально настроенной АСР. Прямыми показателями качества принято считать [4] максимальное динамическое отклонение ошибки регулирования ε_{\max} , длительность переходного процесса $T_{\text{пр}}$, а также значения резонансной частоты и максимума амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы по каналу задания.

С практической точки зрения от переходной характеристики требуются минимальные динамическое отклонение и длительность переходного процесса при допустимой колебательности регулируемой величины. Этот компромисс может быть обеспечен минимизацией площади S под кривой переходного процесса при возмущении по каналу регулирующего воздействия, то есть интегралом от модуля рассогласования ε на входе в регулятор $S = \int_0^{\infty} |\varepsilon(t)| dt$.

Применение известных линейного и квадратичного интегральных показателей для оптимизации значений параметров настройки регуляторов мотивировано, главным образом, простотой аналитических (линейный интегральный критерий) и численно-аналитических (решение уравнения Риккати как в одномерном, так и в многомерном вариантах; квадратичный интегральный критерий) методов их минимизации и очевидностью физического смысла. Вместе с тем известно, что эти показатели приводят к настройкам регуляторов, не в полной мере соответствующим совокупности инженерных требований к переходным процессам в замкнутых типовыми регуляторами системах управления.

Они используются, когда известна граница заданного запаса устойчивости системы. Определение границы заданного запаса устойчивости системы является самостоятельной непростой задачей. Искомые оптимальные значения параметров регулятора в процессе оптимизации должны принадлежать этой границе. Необходимо заметить, что в случае минимизации линейного интегрального показателя без учета области заданного запаса устойчивости системы, полученные настройки регулятора приводят к незатухающим колебаниям регулируемой величины, а в случае квадратичного интегрального показателя его минимум приводит к настройкам, соответствующим слабозатухающему переходному процессу.

Выполнение аналитических расчетов параметров регулятора, особенно в системах с ПИД законом регулирования, сопряжено со значительными трудностями. Поэтому оптимальные значения параметров настройки регуляторов целесообразно находить методом численного моделирования систем регулирования с использованием средств вычислительной техники.

Опыт применения средств вычислительной техники для параметрического синтеза АСР показал, что решение двух вышеуказанных задач можно объединить в решение одной задачи, если оптимизацию значений параметров настройки регуляторов проводить не по общепринятым, а по другим, специально подобранным, интегральным критериям, существенно отличающимся от общепринятых критериев по виду подынтегральных функций. Будем называть эти критерии, характеризующие качество переходных характеристик системы регулирования, альтернативными.

Такие альтернативные критерии удобно применять при автоматизированной настройке алгоритмов управления в вычислительных сетях, образующих нижний уровень автоматизации технологических процессов.

В качестве базы для сравнения оптимальных переходных характеристик системы регулирования, получаемых при минимизации различных альтернативных критериев, принята переходная характеристика, полученная по типовой методике настройки системы на минимум линейного интегрального критерия при ограничении значения частотного показателя запаса устойчивости системы величиной $M = 1,6$ [3].

Целью статьи является поиск и анализ альтернативных интегральных критериев, минимизация которых в пространстве параметров регулятора одновременно обеспечивает как оптимальную по принятому критерию переходную характеристику, так и достаточный запас устойчивости настраиваемой системы регулирования.

При формировании подынтегральных функций разных видов интегральных критериев учитывались основные свойства переменных величин, характеризующие переходные процессы в системе регулирования. К ним относятся:

- текущее время переходного процесса t ;
- ошибка регулирования (рассогласование на входе в регулятор) ε ;
- изменение воздействия на объект μ ;
- скорость изменения ошибки регулирования $\frac{d\varepsilon}{dt}$;
- скорость изменения регулирующего воздействия $\frac{d\mu}{dt}$.

Совокупность возможных интегральных критериев можно представить в следующем обобщенном виде:

$$J = \int_0^{\infty} f(t, \varepsilon, \mu, \frac{d\varepsilon}{dt}, \frac{d\mu}{dt}) dt. \quad (1)$$

В обширном множестве модификаций соотношения (1) были выделены для исследования три характерные группы.

- В первую группу собраны критерии, подынтегральные функции которых зависят от ошибки регулирования ε и времени t .
- Во вторую группу собраны критерии, подынтегральные функции которых зависят от квадрата ошибки регулирования ε^2 и различных степеней времени t .
- В третью группу собраны критерии с подынтегральными функциями, каждая из которых представляют собой совокупность некоторых зависимостей от изменения воздействия на объект μ , ошибки регулирования ε и времени t .

После рассмотрения в группах различных модификаций соотношения (1) и предварительного моделирования были отобраны варианты, представляющие интерес по показателям качества для разработчиков систем регулирования.

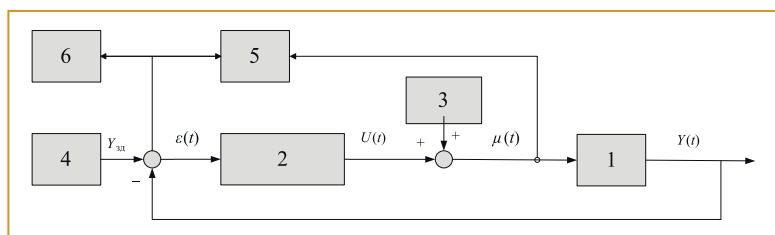


Рис. 1. Структурная схема моделирующего комплекса, где 1 – объект управления; 2 – регулятор; 3,4 – блоки формирования ступенчатых возмущений; 5 – блок расчета критерия оптимальности; 6 – блок расчета площади под кривой переходного процесса

Практика ввода систем регулирования в работу показывает, что испытание работоспособности системы осуществляется, как правило, при дистанционном воздействии на регулирующий орган с последующей постановкой системы на «автомат». К тому же в процессе эксплуатации системы регулирования в различных отраслях промышленности ее целью является устранение результата влияния случайных возмущений, действующих на объект регулирования, а не на регулятор. Поэтому при параметрическом синтезе системы регулирования с ПИД-регулятором использовались переходные характеристики, получаемые при ступенчатом воздействии $\mu(t)$ на объект управления.

Моделирование системы управления

Изучение особенностей указанных выше групп интегральных критериев при решении задач параметрического синтеза осуществлялось путем численного моделирования и оптимизации системы управления во временной области. Структурная схема моделирующего комплекса для исследования эффективности интегральных критериев, приведена на рис. 1.

В качестве алгоритма управляющего устройства используем ПИД закон управления с передаточной функцией:

$$W_p(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{II} \cdot s} + T_D \cdot s \right),$$

где K_p , T_{II} , T_D – параметры динамической настройки управляющего устройства; s – аргумент преобразования Лапласа.

Сравнивались оптимальные переходные характеристики замкнутой одноконтурной системы регулирования с ПИД-регулятором при ступенчатом воздействии $\mu(t)$ на объект, полученные для различных интегральных критериев.

Особенностью рассматриваемых переходных характеристик системы является выполнение условия:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = 0.$$

Такой вид переходных характеристик позволяет в качестве обобщенного показателя для сравнения эффективности рассматриваемых вариантов интегральных критериев использовать площадь S получаемых оптимальных переходных характеристик ошибки регулирования $\varepsilon(t)$ при подаче единичного ступенчатого возмущения на вход объекта по каналу регулирующего воздействия $\mu(t)$.

С помощью моделирующего комплекса определялись варианты настройки регулятора, соответствующие минимальным значениям исследуемых интегральных критериев. Минимальные значения интегральных критериев определялись в пространстве параметров настройки регулятора с помощью программного пакета для моделирования динамических систем 20-sim.Pro [5,6] при использовании поискового метода деформируемого многогранника [7].

Исследование эффективности рассматриваемых вариантов интегральных критериев проводилось применительно к объектам с выраженным инерционным запаздыванием, характерным для теплоэнерге-

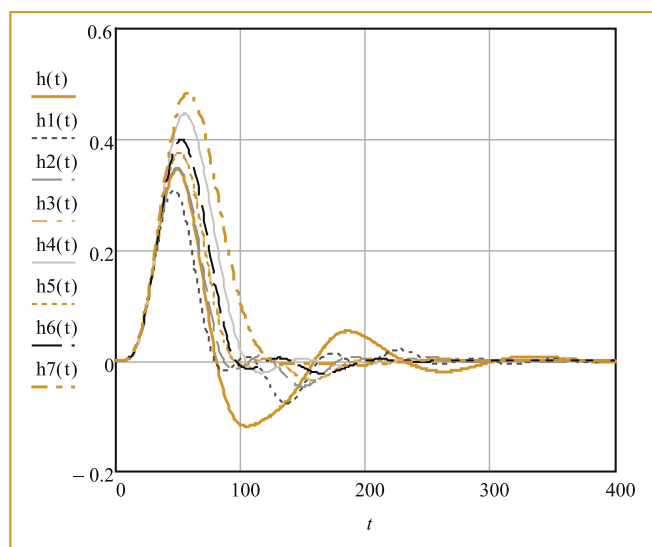


Рис. 2. Оптимальные переходные характеристики для интегральных критериев первой группы

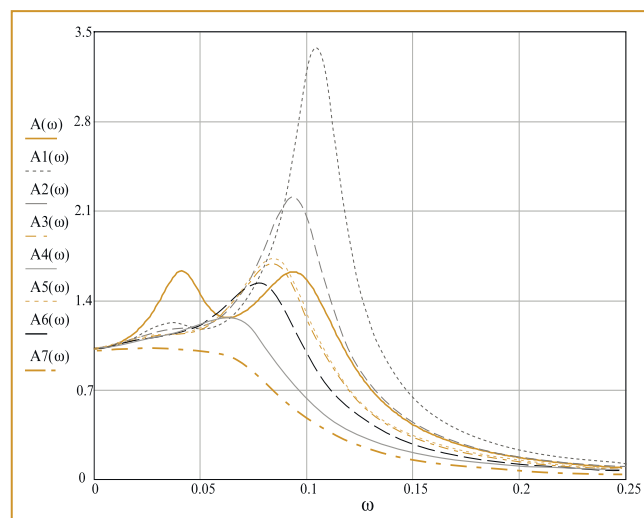


Рис. 3. АЧХ оптимально настроенной системы регулирования относительно задающего воздействия для первой группы критериев

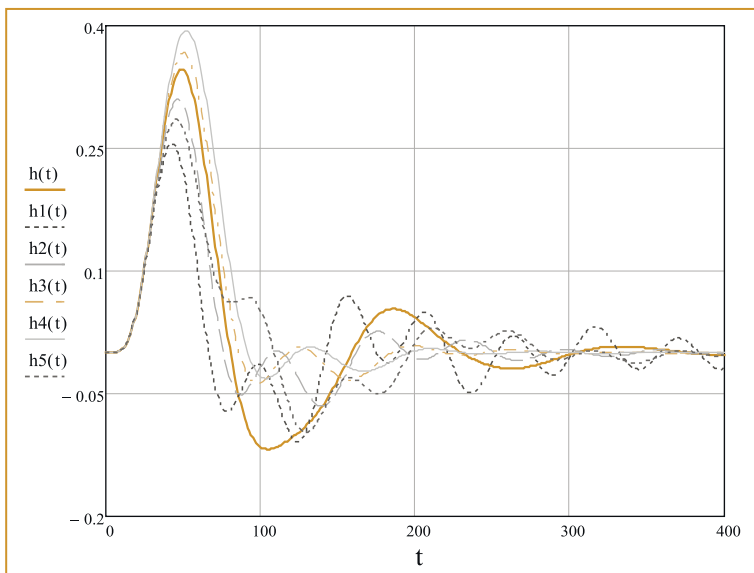


Рис. 4. Оптимальные переходные характеристики для интегральных критериев второй группы

тики. В качестве примера реального объекта управления при построении его математической модели для исследования интегральных критериев был выбран пароперегреватель острого пара котла ТГМП-204 энергоблока мощностью 800 МВт и использована его экспериментальная переходная характеристика по каналу расход воды на впрыск — температура перегретого пара при нагрузке энергоблока 100% [8]. Математическое описание такого объекта управления удобно представить передаточной функцией, которая имеет следующий общий вид:

$$W_{об}(S) = \frac{K_{об}}{(T_{об} \cdot s + 1)^n} \quad (2)$$

Математическая модель объекта управления представляет собой последовательное соединение

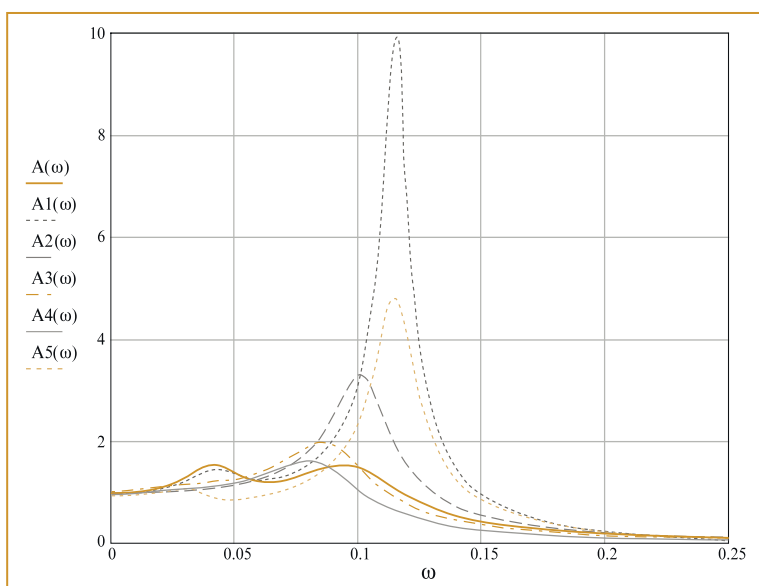


Рис. 5. АЧХ оптимально настроенной системы регулирования относительно задающего воздействия для второй группы критериев

n одинаковых аperiodических звеньев. У аperiodических звеньев постоянная времени $T_{об}$, а общий коэффициент передачи соединения — $K_{об}$.

Для многих технологических процессов подобные модели при параметрическом синтезе системы автоматического регулирования позволяют выполнить требования системного подхода, заключающееся в том, что отличие процессов управления в системе с моделью объекта от системы управления с реальным объектом находится в пределах допустимой погрешности [9].

Путем аппроксимации экспериментальной переходной характеристики были определены коэффициенты передаточной функции:

$$W_{об}(S) = \frac{0,9}{(10 \cdot s + 1)^5}, \frac{^{\circ}C}{m / ч} \quad (3)$$

Существует множество объектов управления, имеющих подобные S —образные переходные характеристики, которые могут быть описаны представленной в работе математической моделью того же порядка. Например, для теплоэнергетики это изменение температуры теплоносителя на выходе теплообменника при изменении расхода греющей или нагреваемой среды, изменение содержания кислорода в входящих газах котла при изменении расхода топлива или воздуха и т. п.

На структурной схеме моделирующего комплекса кроме регулятора и объекта управления показаны блоки формирования ступенчатых возмущений, блок расчета критерия оптимальности и блок расчета площади под кривой переходного процесса. Эти блоки предназначены для решения задач исследования.

Результаты расчетов

Отобранные в группы интегральные критерии, приведены в табл. 1–3. При исследовании эффективности рассматриваемых вариантов интегральных критериев осуществлялся прямой поиск их абсолютных минимумов при изменении значений настроечных параметров устройства управления. Результаты расчетов по каждой группе критериев приведены в соответствующей таблице.

При минимальном значении каждого критерия получены оптимальные значения параметров настройки ПИД-регулятора, переходная характеристика системы $h(t)$ по каналу регулирующего воздействия $\mu(t)$ и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) замкнутой системы относительно задающего воздействия.

Для оценки качества конкретных переходных характеристик, полученных в результате оптимизации настроек регулятора, в таблицах представлены следующие показатели:

Таблица 1. Результаты расчетов для первой группы критериев

	Критерии качества	Площадь S	Оптимальные настройки			Прямые показатели качества			
			$K_p \cdot K_{об}$	$T_n / T_{об}$	$T_d / T_{об}$	ε_{\max}	$T_{пер\cdot c}$	$A_{рез}$	$\omega_{рез}$
1	$J = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) dt$	15,8	2,45	2,23	2,20	0,31	210	3,31	0,106
2	$J = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) \cdot t dt$	15,91	2,25	2,78	1,77	0,349	133	2,18	0,093
3	$J = \int_0^{\infty} \sqrt{\left \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right } dt$	17,60	2,00	2,98	1,65	0,378	180	1,66	0,086
4	$J = \int_0^{\infty} \sqrt{ \varepsilon(t) } \cdot t dt$	22,08	1,62	3,32	1,25	0,447	130	1,17	0,053
5	$J = \int_0^{\infty} \sqrt{ \varepsilon(t) } \cdot t dt$	17,42	2,02	2,96	1,66	0,377	181	1,68	0,086
6	$J = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) \cdot t^2 dt$	18,68	1,91	3,17	1,47	0,40	187	1,51	0,08
7	$J = \int_0^{\infty} \sqrt{\left \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right } \cdot t dt$	26,97	1,32	3,36	1,24	0,485	118	1,04	0,061

– максимальное динамическое отклонение ошибки регулирования при единичном ступенчатом возмущении по каналу регулирующего воздействия, ε_{\max} ;

– длительность переходного процесса регулирования, $T_{пер}$;

– максимальное значение амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы по каналу задания, $A_{рез}$;

– значение резонансной частоты системы, $\omega_{рез}$;

Значения времени регулирования $T_{пер}$ определялись входом переходной характеристики системы по каналу регулирующего воздействия в однопроцентный интервал от $K_{об}$. Для всех рассматриваемых интегральных критериев, после получения их минимальных значений определялась площадь S под кривой переходного процесса на выходе системы, значения которой также приведены в таблицах.

В таблицах приведены значения параметров настройки ПИД регулятора в виде произведения коэффициентов передачи регулятора и объекта $K_p \cdot K_{об}$, и значений постоянных времени интегрирования T_n и дифференцирования T_d , отнесенных к постоянной времени объекта $T_{об}$. Эти параметры соответствуют минимальным значениям приведенных интегральных критериев.

Применительно к базовому интегральному критерию:

$$J = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) dt,$$

приводим результаты расчета тех же показателей, полученные при $M = 1,60$ по типовой методике настройки системы:

$S = 22,74$. $K_p \cdot K_{об} = 1,84$. $T_n / T_{об} = 1,59$. $T_d / T_{об} = 2,32$.

$\varepsilon_{\max} = 0,348$. $A_{рез} = 1,60$. $\omega_{рез1} = 0,042$ [рад/с]. $\omega_{рез2} = 0,095$ [рад/с]. $T_{пер} = 287$ с.

Таблица 2. Результаты расчетов для второй группы критериев

	Критерии качества	Площадь S	Оптимальные настройки			Прямые показатели качества			
			$K_p \cdot K_{об}$	$T_n / T_{об}$	$T_d / T_{об}$	ε_{\max}	$T_{пер\cdot c}$	$A_{рез}$	$\omega_{рез}$
1	$J = \int_0^{\infty} [\varepsilon(t)]^2 dt$	21,31	2,73	1,37	2,85	0,256	591	8,54	0,116
2	$J = \int_0^{\infty} [\varepsilon(t)]^2 \cdot t^2 dt$	15,19	2,59	2,25	1,98	0,311	270	3,24	0,101
3	$J = \int_0^{\infty} [\varepsilon(t)]^2 \cdot t^4 dt$	16,84	2,20	2,90	1,56	0,368	178	1,97	0,087
4	$J = \int_0^{\infty} [\varepsilon(t)]^2 \cdot t^5 dt$	18,35	2,00	3,11	1,43	0,395	186	1,64	0,08
5	$J = \int_0^{\infty} [\varepsilon(t)]^2 + \left[K \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right]^2 dt$ $K = 14,5$	16,40	2,35	1,63	3,03	0,274	379	5,91	0,115

Таблица 3. Результаты расчетов для третьей группы критериев

	Критерии качества	Площадь S	Оптимальные настройки			Прямые показатели качества			
			$K_p \cdot K_{об}$	$T_n / T_{об}$	$T_d / T_{об}$	ϵ_{\max}	$T_{пер.с.}$	$A_{рез}$	$\omega_{рез}$
1	$J = \int_0^{\infty} \mu(t) dt$	29,47	1,48	3,16	1,76	0,43	213	1,05	0,080
2	$J = \int_0^{\infty} \mu(t) ^2 dt$	24,59	1,52	2,24	3,01	0,357	290	1,72	0,104
3	$J = \int_0^{\infty} \mu(t) ^2 \cdot t dt$	24,07	1,56	3,06	2,02	0,404	224	1,22	0,089
4	$J = \int_0^{\infty} [\epsilon(t) + \lambda \cdot \mu(t)] dt$ $\lambda = 0,2$	15,70	2,23	2,57	1,94	0,340	179	2,27	0,097
5	$J = \int_0^{\infty} [\epsilon(t) ^2 + \lambda \cdot \mu(t) ^2] dt$ $\lambda = 0,8$	19,59	1,85	1,96	2,83	0,325	276	2,32	0,106
6	$J = \int_0^{\infty} [\epsilon(t) \cdot t + \lambda \cdot \mu(t) \cdot t] dt$ $\lambda = 0,2$	17,59	2,01	3,02	1,60	0,381	182	1,67	0,086

На приведенных ниже рисунках сплошной линией показаны переходная характеристика $h(t)$ и амплитудно-частотная характеристика $A(\omega)$ системы регулирования, полученные по типовой методике настройки системы.

В табл. 1 приведены результаты расчетов для первой группы критериев, подынтегральные функции которых зависят от ошибки регулирования ϵ и времени t .

На рис. 2 приведены оптимальные переходные характеристики системы для интегральных критериев первой группы. Номер переходной характеристики $h(t)$ соответствует номеру критерия из табл. 1.

На рис. 3 приведены АЧХ оптимально настроенной системы регулирования относительно задающего воздействия для первой группы критериев. Номер АЧХ соответствует номеру критерия из табл. 1.

В табл. 2 приведены результаты для второй группы критериев, подынтегральные функции которых зависят от квадрата ошибки регулирования ϵ^2 и различных степеней времени t .

В пятой строке табл. 2 приведены данные, соответствующие значению коэффициента K , обеспечивающему минимальную для данного критерия площадь под переходной характеристикой системы.

На рис. 4 приведены оптимальные переходные характеристики системы для интегральных критериев второй группы. На рис. 5 приведены АЧХ оптимально настроенной системы регулирования относительно задающего воздействия для второй группы критериев. В табл. 3 приведены результаты расчетов для третьей группы критериев с подынтегральными функциями, каждая из которых зависит от изменения воздействия на объект μ , ошибки регулирования ϵ и времени t .

На рис. 6 приведены оптимальные переходные характеристики системы для критериев третьей группы.

На рис. 7 приведены АЧХ оптимально настроенной системы регулирования относительно задающего воздействия для третьей группы критериев.

Анализ результатов и рекомендации

Проведенное исследование показало, что настройки регулятора, определенные по выбранным интегральным критериям всех трех групп, обеспечивают устойчивые переходные процессы в системе управления, но с различными запасами устойчивости. В практике настройки приемлемыми значениями параметров регулятора являются такие, при которых величина максимума АЧХ оптимально настроенной системы регулирования относительно задающего

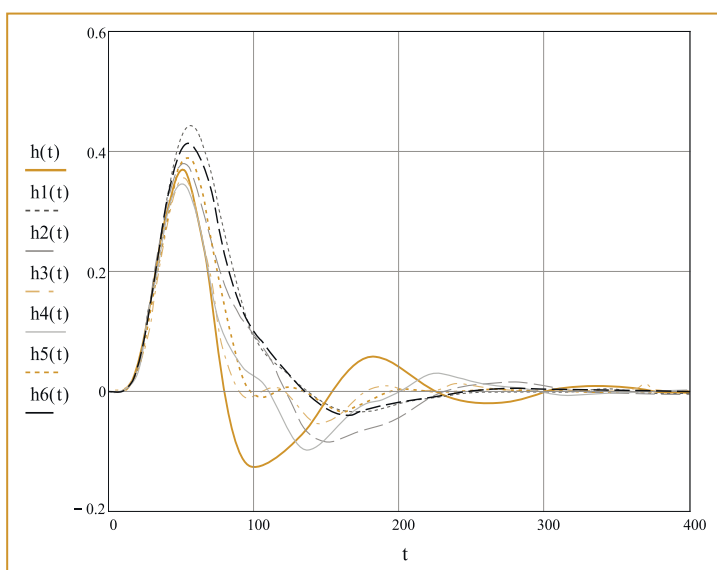


Рис. 6. Оптимальные переходные характеристики для интегральных критериев третьей группы

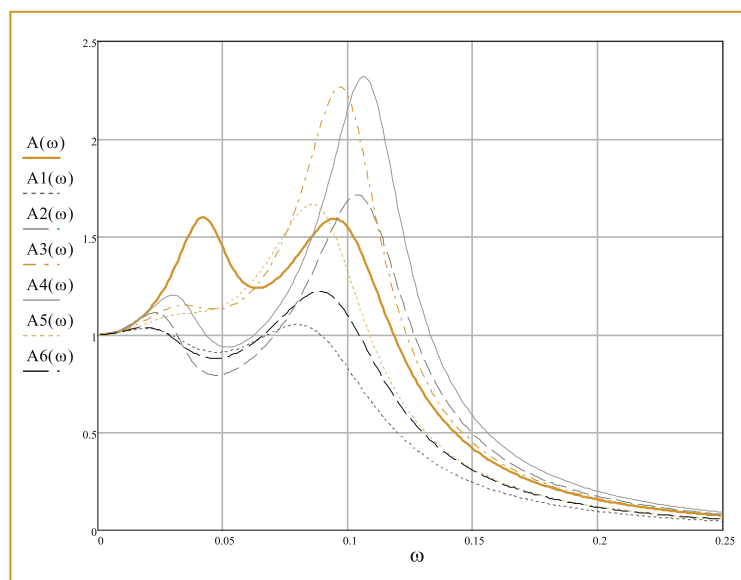


Рис. 7. АЧХ оптимально настроенной системы регулирования относительно задающего воздействия для третьей группы критериев

шего воздействия находится в пределах $1,12 \dots 2,38$, что соответствует изменению степени затухания переходного процесса в диапазоне $0,98 \dots 0,75$ [3]. Из этого следует, что критерии, приводящие к завышенному значению максимума АЧХ ($A_{\text{рез}} > 2,38$) не являются альтернативными для общепринятой процедуры настройки.

Таким образом, в первой группе альтернативными являются все критерии кроме первого, во второй группе — только третий и четвертый, а в третьей группе — все критерии являются альтернативными.

Рассмотрим особенности, которые проявляются при применении альтернативных критериев для настройки систем регулирования.

Каждому найденному минимальному значению критерия соответствует своя оптимальная переходная характеристика со своими значениями прямых показателей качества регулирования. Выбор необходимой переходной характеристики зависит от технологического назначения разрабатываемой системы регулирования.

Так, рассматривая результаты расчетов на примерах применения первой группы критериев, можно видеть, что максимальное динамическое отклонение переходной характеристики изменяется в диапазоне $0,349 \dots 0,485$. Время регулирования изменяется от 118 с до 187 с соответственно. Максимум АЧХ оптимально настроенной системы регулирования относительно задающего воздействия изменяется в пределах $1,04 \dots 2,18$, то есть прямые показатели качества регулирования отличаются в первой группе критериев друг от друга от 1,4 до 2 раз. Таким образом, у разработчика АСР имеется возможность выбора вида оптимальной переходной характеристики.

Значения площадей оптимальных переходных характеристик системы для альтернативных интегральных критериев из первой группы принимают значения от 15,91 до 26,97. Настройка по типовой методике позволяет получить площадь равной 22,74, величина которой говорит о том, что в первой группе есть критерии, позволяющие полнее использовать управляющие свойства регулятора.

Из сравнения результатов, полученных для критериев второй группы, следует, что повышение степени рассогласования ε с первой до второй ε^2 в подынтегральной функции приводит к уменьшению динамического отклонения регулируемой величины, но при этом значительно повышается колебательность и длительность переходного процесса. С другой стороны, увеличение значения степени времени приводит к уменьшению колебательности и длительности переходного процесса, но при этом повышается динамическое отклонение регулируемой величины.

Модификация квадратичного критерия путем включения фактора времени в подынтегральную функцию привела к существенному повышению запаса устойчивости настраиваемой системы. С увеличением значения степени, с которой время входит в подынтегральную функцию, колебательность и длительность переходного процесса уменьшаются, но при этом повышается отклонение регулируемой величины и площадь под переходной характеристикой. Этот способ модификации позволяет повысить эффективность интегральных критериев, подынтегральные функции которых включают в себя квадрат ошибки настраиваемой системы.

Использование в подынтегральной функции производной от интегрируемого процесса с целью улуч-

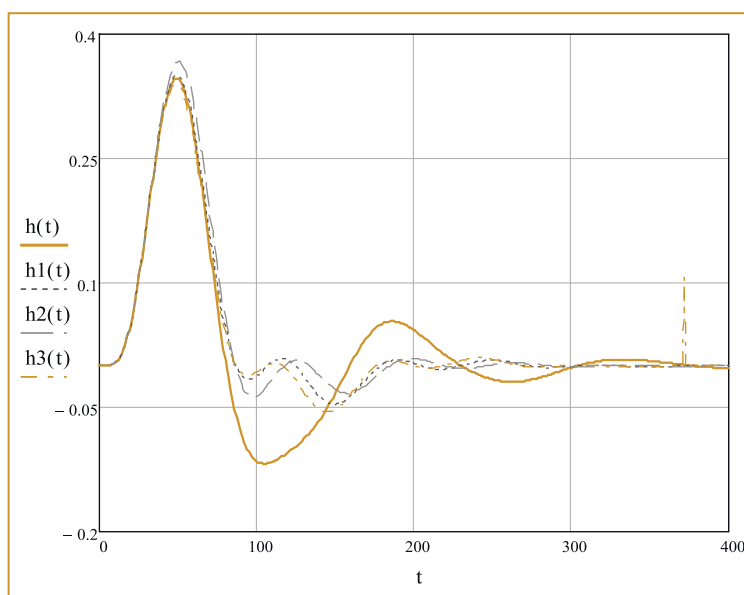


Рис. 8. Переходные характеристики минимальной площади из групп альтернативных критериев

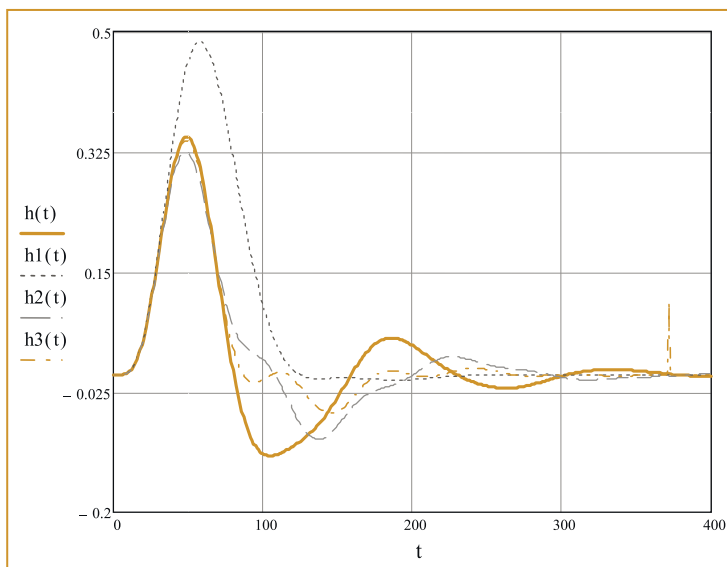


Рис. 9. Переходные характеристики с лучшими прямыми показателями качества управления при настройке по альтернативным критериям

шения результата оптимальной настройки регулятора оказалось нецелесообразным, так как не обеспечивает достаточного запаса устойчивости в системе регулирования. В табл. 2 в строке 5 приведен пример, когда площадь под переходной характеристикой системы, настроенной по приведенному критерию минимальна, но это не обеспечивает достаточного запаса устойчивости системы.

При формировании подынтегральных функций в критериях третьей группы используется отклонение $\mu(t)$ регулирующего воздействия $u(t)$ от его установившегося значения $u(\infty)$, которое определяется величиной действующего возмущения: $\mu(t) = u(t) - u(\infty)$.

Использование величины отклонения регулирующего воздействия $\mu(t)$ в интегральных критериях приводит к существенному повышению запаса устойчивости системы, но при этом увеличиваются площадь и длительность переходных характеристик.

Отметим, что для комбинированных критериев третьей группы, содержащих в подынтегральных функциях одновременно величины отклонения регулирующего воздействия $\mu(t)$ и рассогласования $\varepsilon(t)$ необходимо определять оптимальное значение весового коэффициента λ таким образом, чтобы значение АЧХ замкнутой системы на резонансной частоте не превышало предельное значение 2,38. При этом увеличение значения λ приводит к уменьшению величины $A_{рез}$. Коэффициент λ не только определяет вес второго слагаемого, но и приводит размерность $\mu(t)$ к размерности регулируемой переменной $y(t)$ и сигнала задания $y_{зд}$ путем умножения на коэффициент передачи объекта $K_{об}$. Величину весового коэффициента λ выбирают в зависимости от желаемого запаса устойчивости системы управления.

Анализ приведенные в таблицах результаты показывает, что для большинства рассмотренных альтер-

нативных критериев площадь под кривой переходной характеристики и прямые показатели ее качества лучше по сравнению с полученными при настройке регулятора по базовому интегральному критерию. На рис. 8 приведены переходные характеристики минимальной площади из групп альтернативных критериев. Номер переходной характеристики соответствует номеру таблицы, а переходная характеристика без номера $h(t)$ получена для системы регулирования, настроенной по типовой методике.

На рис. 9 представлены переходные характеристики с лучшими прямыми показателями качества управления при настройке по альтернативным критериям: $h1(t)$ — соответствует минимальному времени регулирования; $h2(t)$ — минимальному отклонению регулируемой величины; $h3(t)$ — соответствует минимальному значению площади под кривой переходного процесса; $h(t)$ получена для настроек системы регулирования по базовому интегральному критерию. Эти графики наглядно подтверждают преимущества альтернативных критериев для настройки регулятора перед базовым интегральным критерием.

В результате проведенного исследования параметрического синтеза рассмотренной системы регулирования удалось найти подынтегральные функции, объединяющие основные требования, предъявляемые к процессу регулирования в одном критерии. Найденные альтернативные критерии обеспечивают повышение эффективности регулирования при оценке по площади под кривой переходной характеристики почти в полтора раза по сравнению с типовой методикой настройки.

Выполненное исследование позволяет рекомендовать следующие применения альтернативных интегральных критериев для параметрического синтеза систем регулирования для семейства объектов типа (2) при $n = 5$, рассмотренного в статье.

1. Если требуется быстро затухающая переходная характеристика, то целесообразно использовать кри-

$$терий J = \int_0^{\infty} \sqrt{|\varepsilon(t)|} \cdot t dt.$$

2. Если требуется переходная характеристика с минимальной длительностью, то предпочтение сле-

$$дует отдать критерию $J = \int_0^{\infty} \sqrt{\left| \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right|} \cdot t dt.$$$

3. Если требуется переходная характеристика с минимальным динамическим отклонением, то предпочтение следует отдать комбинированному критерию

$$J = \int_0^{\infty} \left[|\varepsilon(t)|^2 + |\lambda \cdot \mu(t)|^2 \right] dt.$$

В рассматриваемой системе значение $A_{рез} = 2,38$ соответствует величине $\lambda = 0,8$.

4. Если требуется переходная характеристика, учитывающая большинство требований к устойчивости и прямым показателям качества работы системы управления, то предпочтение следует отдать критерию $J = \int_0^{\infty} |\varepsilon(t)| \cdot t dt$.

5. Если параметрический синтез систем регулирования осуществляется с использованием для математического описания объекта управления передаточной функции вида (2) при $n = 5$, то значения настроечных коэффициентов ПИД регулятора K_p , T_i , T_d , для выбранного альтернативного интегрального критерия можно взять из табл. 1–3.

Для объектов с моделями, отличными от рассмотренной в статье, для получения конкретных результатов по выбору альтернативного интегрального показателя необходимо проделать все этапы рассмотренных в статье исследований.

Выводы

1. Выявлено существование интегральных критериев, альтернативных общепринятым, минимизация которых в пространстве параметров регулятора одновременно обеспечивает как оптимальную переходную характеристику, так и достаточный запас устойчивости настраиваемой системы регулирования.

2. Показано, что использование альтернативных интегральных критериев позволяет настраивать ПИД-регулятор на отработку возмущений, действующих на объект с S-образной переходной характеристикой с большей эффективностью, чем применение такого регулятора, настроенного на минимум линейного интегрального критерия по общепринятой методике.

3. Проведенное исследование позволяет рекомендовать для начального прямого поиска оптимальных параметров настройки ПИД-регулятора критерий

$$J = \int_0^{\infty} |\varepsilon(t)| \cdot t dt \text{ как обеспечивающий выполнение}$$

большинства требований по устойчивости и качеству процессов регулирования.

4. Выполненное исследование показывает возможности применения различных альтернативных интегральных критериев для получения переходных характеристик системы управления на этапе параметрического синтеза регулятора.

Список литературы

1. 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. 559576.
2. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society). 2006. 460 p.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М: Энергоатомиздат. 1985. 296 с.
4. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. Изд. 2-е, перераб. М. «Энергия». 1972. 376 с.
5. Зверьков В.П., Павлов С.П. Моделирование динамических систем на ПЭВМ с использованием программы "20-sim". Ч.1. Одноконтурные системы. Учеб. пособие - Лабораторный практикум. М.: МЭИ. 2003. 68 с.
6. Зверьков В.П., Кузицин В.Ф., Павлов С.П., Петроченко Ю.Н. Моделирование динамических систем на ПЭВМ с использованием программы «20-sim». Ч. 2. Системы повышенной сложности. Учеб. пособие — Лабораторный практикум. М.: Изд. МЭИ, 2007. 104 с.
7. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 536 с.
8. Доверман Г.И., Соколов Ю.Н., Зотов Л.Г. Экспериментальные динамические характеристики парового котла ТГМП-204 энергоблока мощностью 800 МВт // Теплоэнергетика. 1980. № 7. стр. 12 - 17.
9. Зверьков В.П., Мерзликина Е.И., Хоанг Ван Ва. Метод получения математических моделей с использованием поисковых алгоритмов // Новое в Российской энергетике 2016. №4. стр. 34 - 42.

Зверьков Владимир Петрович — канд. техн. наук, доцент кафедры АСУТП Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Петроченко Юрий Николаевич — ведущий специалист по автоматизации экспериментальных установок Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского. E-mail: ZverkovVP@mpei.ru PetrochenkoYN@mail.ru

Определение причины износа инструмента с помощью смартфона

Компания Sandvik Coromant усовершенствовала мобильное приложение Tool Wear Inspection (анализатор износа инструмента) и добавила к нему накладную линзу, позволяющую многократно приближать изображение и делать его точным до миллиметра.

Приложение было запущено в конце 2019 г. и уже успело завоевать доверие широкого круга технических специалистов. Анализатор износа позволяет быстро и четко определить вид износа инструмента. Для этого достаточно сделать фотографию на смартфоне и загрузить её в личный кабинет — система автоматически измерит размер повреждения, а затем в «библиотеке износов» подберёт изображение со схожими повреждениями и даст рекомендации.

Если раньше для того, чтобы выяснить степень повреждения инструмента и причину, нужно было связываться со специалистами, обращаться к каталогу или пособию, использовать дополнительные измерительные инструменты, то с Tool Wear Inspection достаточно настроить свет, и программа все сделает сама. Встроенная библиотека обладает всеми необходимыми данными для того, чтобы дать точные рекомендации. Например, для предотвращения появления проточин, подбора режущей кромки, угла в плане и глубины резания. Приложение подходит для анализа износа на токарных и фрезерных инструментах. Новая линза легко крепится к смартфону, а в обычное время хранится в небольшой коробочке, которую удобно носить с собой.

[Http://www.sandvik.coromant.com](http://www.sandvik.coromant.com)