

## УЧЕТ ОГРАНИЧЕНИЙ НА УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ИНЕРЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Для многих объектов промышленной автоматики характерны явления инерционности и запаздывания. Преодоление значительной инерционности при компенсации действующих на объект возмущений требует сильных управляющих воздействий, которые могут выходить за допустимые границы. Вместе с тем, большинство существующих методик расчета параметров законов регулирования с обратной связью не учитывают допуски на величину управляющих воздействий. В данной работе обосновывается простой метод расчета коэффициентов наиболее распространенных в промышленности пропорционально-интегральных регуляторов (ПИ-регуляторов), учитывающий ограничения на управление и обеспечивающий приемлемое качество отработки возмущений.

Пусть уравнения системы “объект — регулятор” в отклонениях имеют вид

$$y = H(p) u + n, \quad u = - W(p) y. \quad (1)$$

Будем полагать, что динамика объекта описывается наиболее распространенной динамической моделью инерционного звена первого порядка с запаздыванием, а для управления с обратной связью по отклонению от задания используется ПИ-регулятор, то есть

$$H(p) = \frac{K e^{-p\tau}}{Tp + 1}, \quad W(p) = k_n + k_u / p. \quad (2)$$

В работе [1] предложен компенсационный метод настройки типовых регуляторов, который, в частности, дает возможность простого расчета параметров ПИ-регулятора. Рассмотрим модификацию данного метода, учитывающую ограничения на отклонения управляющих воздействий от режимных значений  $|u(t)| \leq U$ .

Согласно компенсационному методу коэффициенты ПИ-регулятора, обеспечивающего отработку ступенчатого возмущения  $n(t) = N$  при  $t > 0$ , рассчитываются по формулам:

$$K_n = \frac{aT}{K\tau}, \quad K_u = \frac{a}{K\tau}, \quad (3)$$

где константа  $a$  выбирается из условия минимизации того или иного показателя качества управления для эталонного безынерционного объекта с единичным запаздыванием.

Тогда на интервале времени  $0 < t \leq \tau$  управляющее воздействие изменяется по линейному закону, достигая к моменту  $t = \tau$  значения

$$u(\tau) = -\frac{a}{K} \left( \frac{T}{\tau} + 1 \right) N. \quad (4)$$

Учитывая, что в правильно настроенной системе управления спустя время запаздывания начинает действовать обратная связь, способствующая скорейшему уменьшению отклонений выходной переменной, а значит, и снижению до нуля пропорциональной составляющей, а также переходу на новый установившийся уровень интегральной составляющей в законе регулирования (2), можно предполагать (и это подтверждают результаты моделирования), что  $|u(\tau)|$  близко к максимальному по абсолютной величине значению управляющих воздействий  $u^{\max}$ , достигаемому за время переходного процесса. Полагая далее, что максимальное значение управлений не должно превосходить допустимого значения, приходим к ограничению

$$\frac{a}{K} \left( \frac{T}{\tau} + 1 \right) N \leq U, \quad (5)$$

которое должно учитываться при выборе константы  $a$  в формулах (3). В расчете на максимальные возмущения  $N^{\max}$  это ограничение приобретает вид

$$a \leq a^{\max} = \bar{a} \frac{1}{\frac{T}{\tau} + 1}, \quad (6)$$

где величина  $\bar{a} = KU / N^{\max}$  может быть названа запасом по управлению.

Таким образом, в модифицированном компенсационном методе настройки параметров ПИ-регулятора при выборе коэффициента  $a$  в (3) следует брать рекомендуемое в [1] значение  $a^0$ , если оно не превосходит  $a^{\max}$ , и значение  $a^{\max}$  в противном случае.

Для проверки полученных теоретических результатов была выполнена большая серия автоматизированных имитационных экспериментов в программной среде Matlab–Simulink. Рассмотренный метод (модифицированный компенсационный) сравнивался с двумя другими методами управления. Первый из них (линейный оптимальный) представляет собой ПИ-регулятор, коэффициенты которого были найдены методом прямого перебора при учете ограничений на управляющие воздействия, причем качество управления для каждой пары коэффициентов оценивалось по интегральному квадратичному критерию  $J$  путем имитационного моделирования. Для второго метода (оптимальный линейно-усеченный), использовался нелинейный регулятор, который представляет собой последовательное соединение ПИ-регулятора и звена, «замораживающего» управляющие воздействия на границе допусков в случае, если выход ПИ-регулятора нарушает допустимые границы. Два параметра линейно-усеченного регулятора также определялись путем поисковой минимизации квадратичного критерия на имитационной модели.

Моделирование проводилось в диапазоне параметров  $T/\tau = 0.5, 1, 2, 4, 8, 12$  и  $\bar{a} = 1.2, 1.4, 1.8, 2.0, 2.4$  при  $a^0 = 0.739$  [1]. В табл. 1 представлены результаты для случая  $\bar{a} = 1.4$ .

Таблица 1.

Методы управления		$T/\tau = 0.5$	$T/\tau = 1$	$T/\tau = 2$	$T/\tau = 4$	$T/\tau = 8$	$T/\tau = 12$
Модифицированный компенсационный	Ku	0.739	0.7	0.46	0.28	0.15	0.107
	Kp	0.370	0.7	0.92	1.12	1.24	1.29
	J	1,532	1,536	1,752	2,372	3,811	5,189
Линейный оптимальный	Ku	0.624	0.524	0.424	0.324	0.216	0.156
	Kp	0.740	0.892	0.980	1.064	1.152	1.200
	J	1,329	1,441	1,734	2,346	3,560	4,797
Оптимальный линейно-усеченный	Ku	0.620	0.680	0.480	0.336	0.192	0.140
	Kp	0.736	1.320	1.400	2.072	2.552	6.932
	J	1,330	1,349	1,605	2,202	3,408	4,605

Анализ всей совокупности имитационных экспериментов приводит к выводу, что предложенный модифицированный компенсационный метод уступает линейному оптимальному не более, чем на 15 %, а оптимальному линейно-усеченному — не более, чем на 20 %, причем допуски на управление могут нарушаться не более, чем на 8 %.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кондрат А.С., Яковис Л.М. XXXII Неделя науки СПбГПУ: Ч. IV. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004, с.27-28.