

# ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.324

*А.П. Ладанюк, Д.О. Крониковский*

## ПОКАЗАТЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ С МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

### Введение

Многопараметрическим регуляторам в последнее время достаточно внимания уделяют А.М. Шубладзе, А.А. Шубладзе, С.В. Гуляев, В.В. Солдатов [1, 2] и др. К многопараметрическим регуляторам можно отнести ПИ, ПИД, ПИДД2, ПИДД2Д3, а также нейросетевые и нечеткие регуляторы [3, 4]. Остановимся на сравнении двух регуляторов: ПИД и ПИДД2Д3, в частности, на проблеме устойчивости систем с данными регуляторами для систем управления технологическими объектами. Такой подход имеет значительную практическую пользу, ведь для современных систем требуется как высокое качество регулирования, так и необходимый уровень надежности.

### Постановка проблемы

Проблемы исследования устойчивости систем с ПИД-регулятором рассматривали Ю.П. Николаев, J. Ackermann, D. Kaesbauer [3, 5, 6] и др. [7–9]. Тем не менее анализ проводился с использованием ПИ- и ПИД-регуляторов. Известно, что многопараметрические регуляторы (ПИДД2 и ПИДД2Д3) для определенных объектов способны обеспечить более высокие показатели качества управления, однако недостаточное внимание отводилось вопросу устойчивости систем с данными регуляторами. Именно эта проблематика ключевая в данной работе. Рассматриваемые регуляторы находят применение в системах автоматизации технологических объектов.

### Методика и результаты исследования

Многопараметрические регуляторы способны обеспечить лучшие показатели качества. Первая трудность, которая возникает при использовании данного класса регуляторов, в отличие от П-, ПИ- и ПИД-регуляторов, это, безусловно, большее количество параметров настройки. Для оптимизации этой  $n$ -мерной задачи необходимы большие технические ресурсы. Тем не менее с быстрым наращиванием мощностей микропроцессорной техники эта проблема отходит на задний план. Появляется возможность интегрировать алгоритмы многопараметрических регуляторов в интеллектуальные системы [10].

Для сравнительного анализа затрат технических ресурсов на оптимизацию параметров разных регуляторов при использовании одного компьютера (процессор — 1,7 МГц, оперативная память — 1 Гб) проведен ряд экспериментов, в которых использованы популярные алгоритмы оптимизации. Результаты сравнительного исследования методов оптимизации для разных регуляторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Алгоритм	Объект (апериодическое звено)	Время поиска, с		Интегрально-квадратический критерий	
		ПИД	ПИДД2ДЗ	ПИД	ПИДД2ДЗ
Нелдера–Мида	1-го порядка с запаздыванием	0,6	2,1	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$
Сетевого поиска		0,11	0,18	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$
Генетический (OptimaMGA)		2,1	8,3	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$
NCD-оптимизация		1,2	4,1	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$9,5 \cdot 10^{-6}$
Нелдера–Мида	2-го порядка с запаздыванием	0,9	2,2	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$
Сетевого поиска		0,14	0,19	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-2}$
Генетический (OptimaMGA)		3,5	11,5	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$9,5 \cdot 10^{-2}$
NCD-оптимизация		1,6	6,2	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$
Нелдера–Мида	3-го порядка с запаздыванием	1,1	2,2	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-1}$
Сетевого поиска		0,15	0,22	$4,8 \cdot 10^{-1}$	$4,8 \cdot 10^{-1}$
Генетический (OptimaMGA)		3,6	17,8	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$
NCD-оптимизация		1,9	7,1	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Нелдера–Мида	4-го порядка с запаздыванием	1,3	2,3	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-1}$
Сетевого поиска		0,18	0,23	$9,8 \cdot 10^{-1}$	$9,8 \cdot 10^{-1}$
Генетический (OptimaMGA)		3,7	28,1	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$
NCD-оптимизация		2,1	7,8	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$9,5 \cdot 10^{-1}$

Таким образом, выявлена ожидаемая тенденция, а именно:

— с ростом сложности объекта время поиска увеличивается, для алгоритмов с малым количеством итераций (Нелдера–Мида, сетевого поиска) время поиска возрастает не так стремительно;

— с увеличением сложности структуры регулятора (увеличение количества параметров, которые оптимизируются) время поиска увеличивается, это объясняется увеличением размерности задачи и алгоритмом «блуждания–перехода» между измерениями;

— с ростом сложности объекта погрешность регулирования увеличивается в геометрической прогрессии, любое дополнительное преобразование сигнала «вход–выход», т.е. дополнительно добавленное звено объекта отдаляет процесс регулирования от идеального, увеличивая дисперсию ошибки.

Для проведения сравнительного анализа качественных показателей функционирования систем с ПИД- и ПИДД2ДЗ-регуляторами использовался объект третьего порядка, который включает в себя интегральное звено и звено запаздывания ( $k = 0,25$ ,  $T = 56$  с,  $\tau_{\text{lag}} = 15$  с).

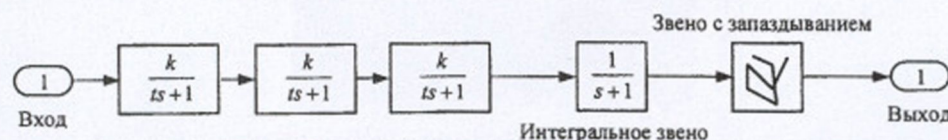


Рис. 1

Моделирование системы происходило с использованием программного пакета MatLab, в частности среды Simulink. Было создано два регулятора, структура которых приведена на рис. 2: а — ПИД; б — ПИДД2ДЗ.

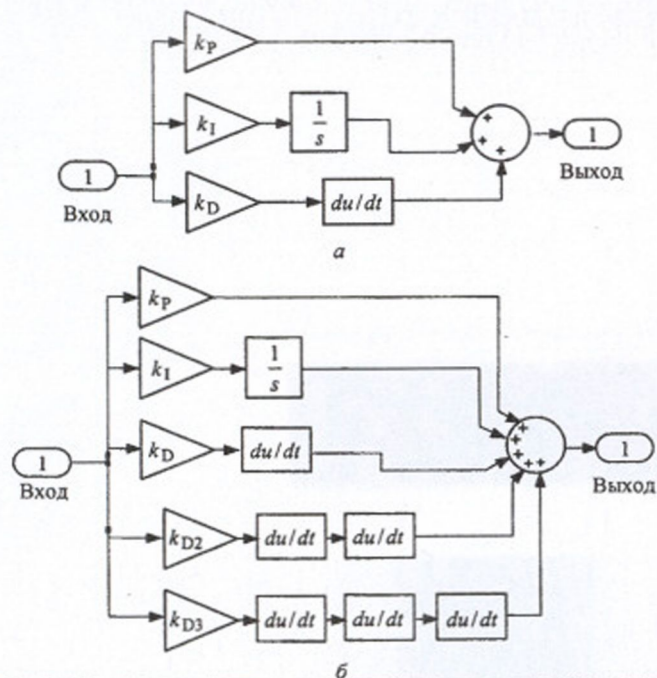


Рис. 2

Назовем наиболее распространенные алгоритмы поиска и оптимизации выбранных регуляторов: Нелдера-Мида; сетевого поиска; генетический (OptimaMC); NCD-оптимизация.

Поскольку алгоритм NCD есть в библиотеке Simulink, то выбран именно он. Результаты моделирования переходных процессов изображены на рис. 3 *a* — ПИД; *б* — ПИД2Д3.

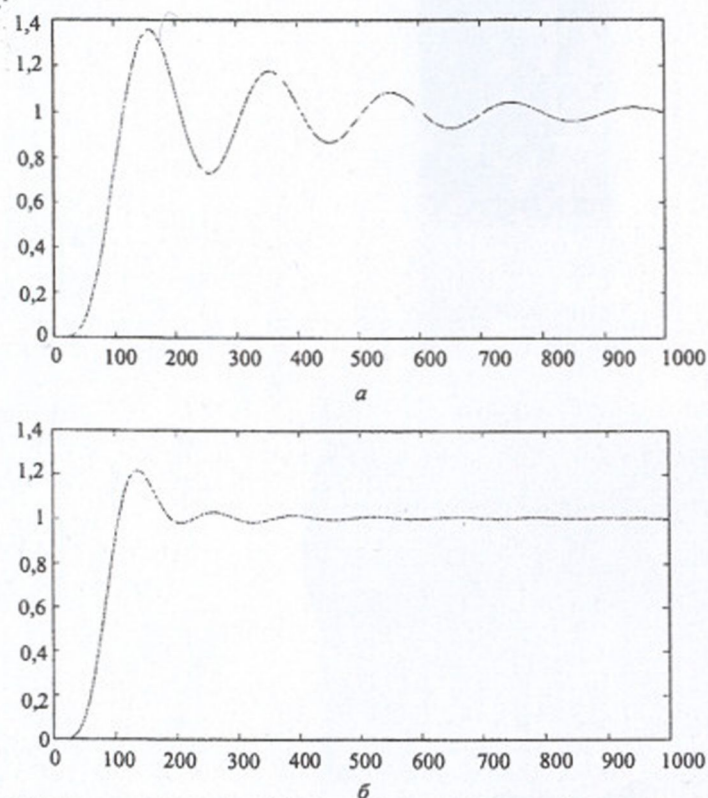


Рис. 3

Как видно из графиков, приведенных на рис. 3, многопараметрический регулятор по сравнению с ПИД-регулятором имеет заметно меньшее значение среднеквадратической ошибки, а также меньшую динамическую ошибку регулирования, при этом и время регулирования становится меньше.

Рассмотрим устойчивость замкнутой системы с ПИД- и ПИДД2Д3-регуляторами при условии отсутствия шумов на основе частотных характеристик системы. Проанализируем преимущества и недостатки качественных характеристик системы с многопараметрическим регулятором по сравнению с ПИД-регулятором.

Из анализа диаграммы Боде (рис. 4) видно, что ПИДД2Д3-регулятор имеет большую асимптотическую принадлежность, на которую указывает линейный вид отрезков до перегибов, что означает большую чувствительность системы, а более резкий скат годографа подразумевает более высокое быстродействие по сравнению с ПИД-регулятором.

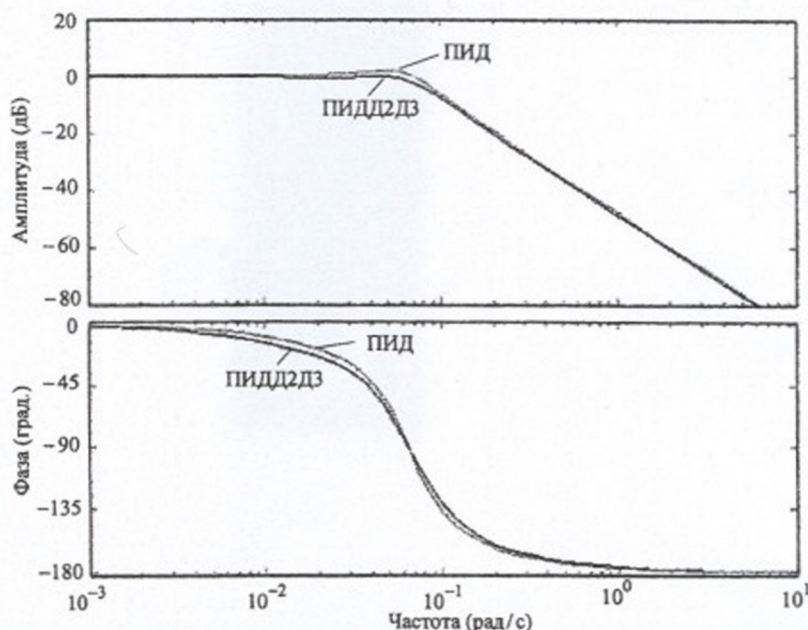


Рис. 4

Сравнительный анализ устойчивости систем с разными регуляторами целесообразно проводить с помощью критерия Найквиста. В работе [4] предлагается в структурную схему исследуемой системы добавить тестовое звено  $A \exp(-j\varphi)$ , чтобы сделать данный метод более удобным для практических внедрений систем с ПИД-регуляторами. Мы предлагаем использовать данную идею для проведения сравнительного анализа одинаковых объектов с разными регуляторами (ПИД и ПИДД2Д3). Следует отметить, что данный метод можно использовать как для «простых» годографов Найквиста, так и для «сложных», т.е. таких, что имеют сложную форму ( $n$ -кратное пересечение отрицательной реальной оси или единичной критической окружности).

В работе [4] предлагается на плоскости ПИД и ПИДД2Д3 параметров проанализировать кривую, для всех точек которой частота среза — постоянная величина. Использование метода в данном случае усложняется наличием полинома в числителе передаточной функции объекта. Эту проблему целесообразно корректировать, представив передаточную функцию разомкнутой системы таким образом:

$$L_{\text{PID}}(s) = \frac{k_I + k_P s + k_D s^2}{Q(s)}, \quad (1)$$

$$L_{\text{PIDD2D3}}(s) = \frac{k_I + k_P s + k_{D1} s^2 + k_{D2} s^2 + k_{D3} s^3}{Q(s)}, \quad (2)$$

$$Q(s) = \frac{sd(s)}{c(s)} = \frac{s(d_0 + d_1 s + \dots + d_{n-1} s^{n-1})}{c_0 + c_1 s + \dots + c_{m-2} s^{m-2}}, \quad (3)$$

где  $L(s)$  — передаточная функция разомкнутой системы,  $Q(s)$  — преобразованная передаточная функция объекта,  $d(s)$ ,  $c(s)$  — знаменатель и числитель передаточной функции объекта соответственно.

При этом в числителе (1), (2) после преобразования останется лишь один полином  $k(s) = k_I + k_P s + k_D s^2$  для системы с ПИД-регулятором и  $k(s) = k_I + k_P s + k_{D1} s^2 + k_{D2} s^2 + k_{D3} s^3$  для системы с ПИДД2Д3-регулятором.

Для дальнейшего анализа создано две системы с одинаковым объектом и анализируемыми регуляторами (см. рис. 1, 2). Сначала были найдены оптимальные настройки для обоих регуляторов с помощью алгоритма NCD-оптимизации. После этого, следуя методу Шейни, предлагается попарно разбивать плоскости: согласно количеству параметров регулятора, т.е. для ПИД:  $k_P$  и  $k_I$ ;  $k_P$  и  $k_D$ ;  $k_I$  и  $k_D$  и соответственно для ПИДД2Д3:  $k_P$  и  $k_I$ ;  $k_P$  и  $k_{D1}$ ;  $k_P$  и  $k_{D2}$ ;  $k_P$  и  $k_{D3}$ ;  $k_I$  и  $k_{D1}$ ;  $k_I$  и  $k_{D2}$ ;  $k_I$  и  $k_{D3}$ ;  $k_{D1}$  и  $k_{D2}$ ;  $k_{D1}$  и  $k_{D3}$ . Однако из-за большого количества пар и дальнейшей сложной процедуры импликации этот метод трудный в реализации, поэтому целесообразно пойти на упрощение и использовать прием, предложенный Ю.П. Николаевым [8], и «заморозить» Д-, Д2- и Д3-составляющие регуляторов. При этом для расчетов подставить предварительно найденные оптимальные значения этих параметров. Такая операция значительно упростит алгоритм и учтет на  $k_P/k_I$ -плоскости влияние Д-, Д2- и Д3-параметров на устойчивость системы.

Таким образом, геометрическим местом точек на  $k_P/k_I$ -плоскости будет эллипс:

- для ПИД

$$\frac{(k_I - k_D w^2)^2}{R_0^2} + \frac{k_P^2}{R_1^2} = 1, \quad (4)$$

- для ПИДД2Д3

$$\frac{(k_I - k_D w^2 + k_{D2} w^3 - k_{D3} w^4)^2}{R_0^2} + \frac{k_P^2}{R_1^2} = 1. \quad (5)$$

Радиусы полуосей эллипса находим из формул:

$$R_0^2 = \operatorname{Re}^2 Q(jw) + \operatorname{Im}^2 Q(jw), \quad (6)$$

$$R_1^2 = \frac{R_0^2}{w^2}. \quad (7)$$

При переходе к единичному критическому кругу  $|L(j\omega)| = 1$ , основываясь на формулах (4)–(7), имеем:

- для ПИД

$$\frac{\sqrt{(k_I - k_D \omega^2)^2 + k_P^2 \omega^2}}{\sqrt{\operatorname{Re}^2 Q(j\omega) + \operatorname{Im}^2 Q(j\omega)}} = 1, \quad (8)$$

- для ПИДД2Д3

$$\frac{\sqrt{(k_I - k_D \omega^2 + k_{D2} \omega^3 - k_{D3} \omega^4)^2 + k_P^2 \omega^2}}{\sqrt{\operatorname{Re}^2 Q(j\omega) + \operatorname{Im}^2 Q(j\omega)}} = 1. \quad (9)$$

Сформировав необходимые данные, построим эти эллипсы для ПИД- и ПИДД2Д3-регуляторов на  $k_P / k_I$ -плоскости (рис. 5).

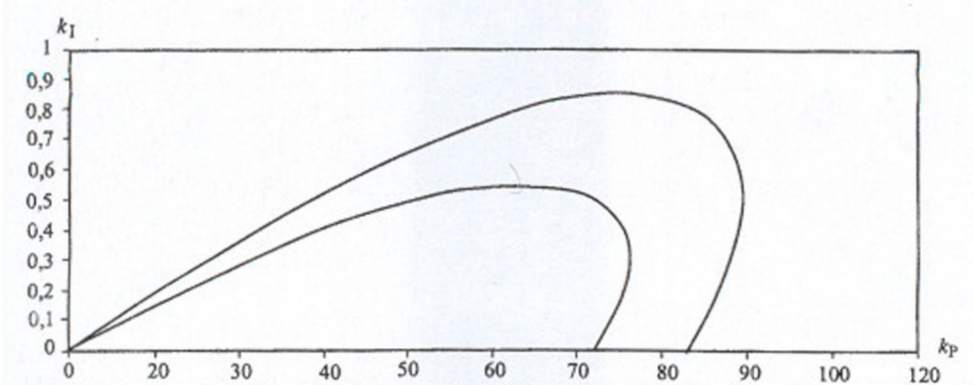


Рис. 5

Из рис. 5 видно, что площадь эллипса, построенная для ПИД-регулятора, меньше площади эллипса, построенного для ПИДД2Д3-регулятора. Это указывает на то, что устойчивость созданной с многопараметрическим ПИДД2Д3-регулятором системы больше, чем аналогичной системы с использованием ПИД-регулятора.

Одной из характеристик сложных технологических объектов является время запаздывания, которое может иметь как емкостную, так и транспортную составляющую. Отрицательное влияние запаздывания заключается в том, что система автоматизации теряет имманентность реального времени, т.е. регулятор, осуществляя управление, должен ждать определенное время, чтобы обратной связью получить реакцию объекта на данное управляющее воздействие. Для устранения эффекта запаздывания используют предикторы (прогнозаторы), такие как Ресквица, Смита и т.п. Если система автоматического управления не имеет предикторов, то при определенном соотношении времени запаздывания и постоянной времени объекта система теряет сначала качественные характеристики (увеличивается динамическая погрешность, время регулирования, степень затухания и т.д.) и при переходе критической границы вообще теряет устойчивость. Для исследования этого влияния выбран объект 2-го порядка с  $T_1 = 35$  с и  $T_2 = 20$  с с ПИД- и ПИДД2Д3-регуляторами и время запаздывания в диапазоне  $\tau_{lag} [10; 100]$  с (табл. 2 — зависимость степени затухания от времени запаздывания системы с ПИД- и ПИДД2Д3-регуляторами и табл. 3 — зависимость динамической погрешности ( $A_1$ ) от времени запаздывания системы с ПИД и ПИДД2Д3-регуляторами).

Таблица 2

$\tau_{lag}, c$	Степень затухания $\Psi$	
	ПИД	ПИДД2Д3
10	0,95	0,99
15	0,93	0,97
20	0,9	0,95
25	0,87	0,92
30	0,82	0,89
35	0,77	0,85
40	0,68	0,81
45	0,6	0,75
50	0,51	0,7
60	0,4	0,62
65	0,25	0,56
70	0,11	0,45
75	0,05	0,38
80	0,02	0,24
85	а/к	0,16
90	н/с	0,08
95	н/с	0,02
100	н/с	а/к

Примечание: а/к — автоколебательный процесс, н/с — неустойчивая система.

Таблица 3

$\tau_{lag}, c$	Динамическая погрешность $A1$	
	ПИД	ПИДД2Д3
10	1,05	1,01
15	1,07	1,03
20	1,1	1,05
25	1,13	1,08
30	1,18	1,11
35	1,23	1,15
40	1,32	1,19
45	1,4	1,25
50	1,49	1,3
60	1,6	1,38
65	1,75	1,44
70	1,89	1,55
75	1,95	1,62
80	2	1,7

показатели регулирования, так и больший запас устойчивости. Полученные результаты использовались при разработке систем автоматизации технологических объектов.

Как видно, время запаздывания отрицательно влияет на процесс регулирования, и система при отношении  $\tau_{lag} / T = 2$  теряет устойчивость, переходя в режим автоколебаний, а при дальнейшем увеличении становится неуправляемой.

Тем не менее следует отметить, что система с многопараметрическим ПИДД2Д3-регулятором менее чувствительна к времени запаздывания, т.е. проявляет лучшую устойчивость по сравнению с системой с ПИД-регулятором.

### Заключение

В настоящей работе выполнена сравнительная характеристика областей устойчивости систем с применением ПИД- и ПИДД2Д3-регуляторов. В работе использован новый подход, который предусматривает объединение классического метода годографа Найквиста и оценки влияния всех составляющих регулятора на плоскости лишь двух из них. Приведены результаты сравнительного анализа влияния времени запаздывания на устойчивость систем, в частности на степень затухания колебаний и динамическую погрешность. Во всех исследованиях системы с многопараметрическим ПИДД2Д3-регулятором проявили как лучшие качественные

А.П. Ладанюк, Д.О. Кроніковський

## ПОКАЗНИКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ І СТАБІЛЬНОСТІ СИСТЕМ З БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

Досліджено алгоритми оптимізації багатопараметричних регуляторів, якості функціонування та стійкості систем з ПИД- та ПИДД2Д3-регуляторами. Використано методологію, запропоновану Ю.П. Ніколаєвим для ПИД-регулятора, яку модифіковано для багатопараметричного ПИДД2Д3-регулятора. Проведено порівняльний аналіз стійкості систем з цими регуляторами за наявності тривалого запізнення.