

УДК 681.53

**Д. А. Гринюк, Н. М. Олиферович, И. Г. Сухорукова**  
Белорусский государственный технологический университет

### **МЕТОД НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ЧЕРЕЗ DEADBEAT-РЕГУЛЯТОР НА РАЗЛИЧНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ**

В статье рассматривается метод настройки ПИД-регулятора. Для этого предлагается использовать deadbeat-регулятор с различными вариантами синтеза. В основе синтеза лежит аппроксимация переходной характеристики deadbeat-регулятора ПИД-регулятором. Предложенные варианты позволяют легко настроить замкнутую систему регулирования на различные качества переходного процесса. В качестве параметра вариации выступает время квантования цифрового регулятора. Используя только один данный параметр, можно подстраивать все три параметра настройки ПИД-регулятора. Параметры, получаемые в результате настройки, оказываются близкими к оптимальным выбранным критериям.

Выполнен сравнительный анализ настройки замкнутых контуров регулирования для четырех различных объектов управления с использованием данного метода. Параллельно проводилась численная оптимизация трех настроек ПИД-регулятора по четырем различным интегральным критериям. Для настройки могут быть использованы различные варианты цифрового регулятора с ограничением на управляющее воздействие. Результаты показали, что вариант прототипа цифрового регулятора для настройки ПИД-регулятора зависит от выбранного критерия. Установлено, что оптимизацию ПИД-регулятора по квадратичному интегральному критерию целесообразно проводить по параметрам классического deadbeat-регулятора. Другие интегральные критерии имеют лучшую корреляцию с deadbeat-регулятором с ограничением на управляющее воздействие. Энергетические интегральные критерии наилучшим образом оптимизируются с помощью предложенного метода настройки. Наименьшие отличия между настройками ПИД-регулятора двумя методиками наблюдались с определением времени интегрирования и коэффициента усиления.

**Ключевые слова:** ПИД-регулятор, deadbeat-регулятор, настройка регулятора, интегральные критерии.

**D. A. Hryniuk, N. M. Oliferovich, I. G. Suhorukova**  
Belarusian State Technological University

### **METHOD OF PID-CONTROLLER TUNING THROUGH DEADBEAT-REGULATOR FOR VARIOUS INTEGRAL CRITERIA**

The method of the PID-controller tuning is discussed in the article. For this purpose, it is proposed to use the deadbeat-regulator with various synthesis options. The synthesis is based on the approximation of the transient response of the deadbeat-regulator to the PID-controller. The proposed variants allow to easily configure a closed system of regulation on the various qualities of the transition process. The variation parameter is the quantization time of the digital controller. Using only one of this parameter, you can adjust all three parameters of the PID-controller tuning. The resulting controller settings are close to the optimal selected criteria.

A comparative analysis of closed control loops tuning for four different control objects has been carried out by this method. In parallel, the numerical optimization of the three PID-controller settings was carried out according to four different integral criteria. For tuning, various variants of a digital controller with a limitation on the control action can be used. The results showed that the prototype version of the digital controller for the PID-controller tuning depends on the selected tuning criteria. It is shown that the optimization of the PID-controller by the quadratic integral criterion is best carried out by the parameters of the classical deadbeat-controller. Other integral criteria have a better correlation with a deadbeat-regulator with a limitation on the control action. Energy integral criteria are best optimized using the proposed tuning method. The smallest differences between the PID-controller tuning by the two techniques were observed with the determination of the integration time and the gain.

**Key words:** PID-controller, deadbeat-regulator, regulator tuning, integral criterion.

**Введение.** ПИД-регулятор продолжает оставаться одним из популярных решений для построения систем управления. Его универ-

сальность для большого класса объектов способствует широкому использованию как в технологических процессах в промышленности,

так и в технических электронных системах. За время векового применения предложено множество решений по развитию классического метода построения ПИД-регулирования. Одновременно происходит и развитие методов настройки регуляторов данного типа. Основными методами настройки являются коэффициент усиления  $K$ , время интегрирования  $I$  и дифференцирования  $D$  передаточной функции регулятора:

$$W_R(s) = K + \frac{1}{Is} + Ds. \quad (1)$$

В литературе можно найти большое количество методов настройки. Среди них выделяют два основных полюса. Один полюс – это обеспечение требуемого запаса по устойчивости, другой – обеспечение желаемого качества переходного процесса. Большинство наиболее популярных методик настройки ПИД-регулятора используют один из полюсов как отправную точку, а затем, по необходимости, обеспечивают компромисс в отношении другого полюса.

Среди популярных критериев устойчивости различают частотные (критерий Найквиста и Михайлова) и критерии, основанные на анализе характеристического уравнения передаточной функции канала управления (корневой критерий, критерий Стодолы и Гурвица). Соответственно, среди частотных методов можно выделить модифицированный метод Ziegler – Nichols [1–3], Takahashi [4], метод расширенных частотных характеристик [5], использование логарифмических частотных характеристик [6]. Принцип настройки [7] основан на обеспечении декремента затухания переходного процесса. На основе данного подхода базируется также метод Schaedel [8]. Корневой метод настройки лежит в основе метода Дудникова [9].

На обеспечении аperiodического переходного процесса основан метод настройки амплитудного оптимума [10] и метод Skogestad [11]. Сюда можно отнести метод Cohen – Coon [12] с нахождением эквивалентной передаточной функции и метод с использованием таблиц Chien – Hrones – Reswick [13].

Однако вышеуказанные методы для обеспечения качества переходного процесса требуют последующей коррекции настроек.

По этой причине, а также благодаря широкому возможностям современных компьютеров и контроллеров происходит развитие онлайн-методов анализа настройки с использованием различных поисковых методов. Среди них можно выделить как методы, основанные на классических подходах минимизации инте-

гральных критериев [14], так и широко применяемые нечеткие [15, 16] и генетические алгоритмы [17]. Эти методы более универсальны, могут использоваться для линейных и нелинейных объектов управления. С помощью онлайн-методов настраиваются нелинейные регуляторы [18, 19]. Однако они требуют высокой вычислительной мощности.

**Метод настройки.** В [20] предложено осуществлять настройку ПИД-регулятора через deadbeat (в русскоязычной литературе встречаются различные варианты перевода: аperiodический, компенсационный и т. д.). Однако были отмечены ограничения этого подхода. Данный метод прямого проектирования для дискретных ПИД-регуляторов может представлять интерес для следующих случаев:

1. Применение самонастраивающегося управления для уникальной настройки параметров ПИД-контроллеров.

2. Определение подходящих начальных значений для оптимизации числовых параметров.

Предложенный в [21] подход основан на анализе коэффициентов передаточной функции объекта управления. Однако это не применимо, если мы используем для синтеза deadbeat-регулятор с ограничением на управляющее воздействие [22, 23]. Для нахождения коэффициентов  $K$ ,  $I$ ,  $D$  можно воспользоваться прямой аппроксимацией передаточной функции deadbeat-регулятором ПИД-регулятора. Построение импульсной характеристики цифрового регулятора по его передаточной функции

$$W_{DB}(z) = \frac{p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_m z^{-m}}{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_m z^{-m}} \quad (2)$$

не требует решения дифференциального уравнения. В (2)  $z$  – переменная  $z$ -преобразования,  $z = \exp(T_0 s)$ ;  $T_0$  – время квантования;  $m$  – порядок полинома. Значение на каждом такте может быть найдено путем простейших арифметических операций. Особенно если учитывать, что значение на входе всегда равно 1.

После построения импульсной характеристики deadbeat на количестве тактов, когда градиент приращения становится постоянным (рис. 1), можно взять два соседних значения управления и вычислить время интегрирования:

$$I = \frac{u(k+1) - u(k)}{T_0}, \quad (3)$$

где  $k$  – дискретные отсчеты ( $k = t / T_0 = 0, 1, 2, \dots$ ;  $t$  – время).

Коэффициент усиления рассчитывается как

$$K = u(k) - I k T_0. \quad (4)$$

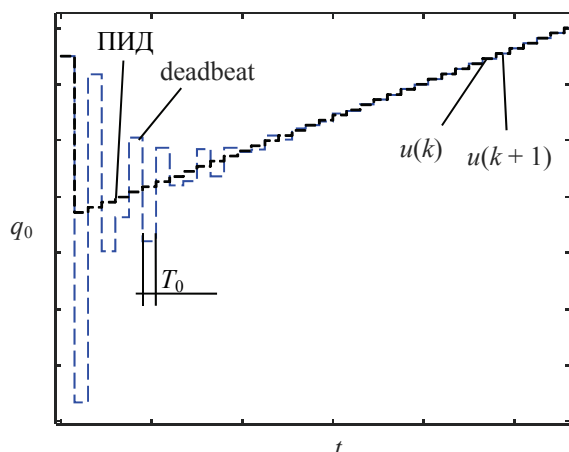


Рис. 1. Переходная характеристика deadbeat и ПИД

Время дифференцирования зависит от формы записи регулятора. Для идеального регулятора формула следующая:

$$D = q_0 - K. \quad (5)$$

В случае формы реального регулятора, как наиболее интересной с практической точки зрения:

$$W_R(s) = K + \frac{1}{Is} + \frac{Ds}{Fs + 1}. \quad (6)$$

Тогда расчетная формула будет иметь следующий вид:

$$D = \frac{q_0 - K}{F}. \quad (7)$$

Для вариации настроек можно воспользоваться изменением времени  $T_0$  и величины первичного управляющего воздействия на различном количестве тактов  $N$ . В качестве критерия выбора можно использовать различные интегральные критерии. При этом полученные настройки ПИД-регулятора не требуют обязательного применения simple time, который использовался для синтеза deadbeat (DBC).

**Методика сравнительного анализа метода настройки ПИД-регулятора.** Рассмотрим в качестве примера несколько объектов управления. За основу возьмем передаточную функцию  $W_{O1}(s)$  из [21]:

$$W_{O1}(s) = \frac{(2s+1)}{(10s+1)(7s+1)(3s+1)} \times \exp(-4s), \quad (8)$$

а также варианты с небольшим запаздыванием  $W_{O2}(s)$ , его отсутствием  $W_{O3}(s)$  и отрицательным коэффициентом в передаточной функции  $W_{O4}(s)$ :

$$W_{O2}(s) = \frac{(2s+1)}{(10s+1)(7s+1)(3s+1)} \times \exp(-0,4s); \quad (9)$$

$$W_{O3}(s) = \frac{(2s+1)}{(10s+1)(7s+1)(3s+1)}; \quad (10)$$

$$W_{O4}(s) = \frac{(1-2s)}{(10s+1)(7s+1)(3s+1)} \times \exp(-0,4s). \quad (11)$$

Последняя передаточная функция характерна для таких технологических объектов, как стабилизация уровня в парогенераторах, теплообменниках с фазовыми превращениями и др.

Качество настройки будем оценивать с помощью интегральных критериев:

$$J_1 = \int_0^{tf} e(t)^2 dt \rightarrow \min; \quad (12)$$

$$J_2 = \int_0^{tf} t^2 |e(t)| dt \rightarrow \min; \quad (13)$$

$$J_3 = \int_0^{tf} u(t)^2 dt \rightarrow \min; \quad (14)$$

$$J_4 = \int_0^{tf} (0,5e(t)^2 + 0,5u(t)^2) dt \rightarrow \min, \quad (15)$$

где  $e(t)$  – отклонение выхода сигнала задания;  $u(t)$  – сигнал управления на выходе регулятора;  $tf$  – время моделирования.

Для моделирования использован непрерывный ПИД-регулятор (6)  $F = 0,01$ . Данный параметр оказывает влияние на качество переходного процесса [24], однако чаще всего его значение на практике определяется особенностью технической реализации ПИД-регулятора.

Время переходного процесса оценивалось по уровню 3% от сигнала задания.

Также для сравнения проведена численная оптимизация интегральных критериев в программном пакете MATLAB.

Следует отметить, что для каждой из передаточных характеристик существует критическое значение величины  $F$ , при котором расчетное значение  $D$  выходит за рамки реализации. В некоторых случаях для достижения минимального значения интегрального критерия приходилось уменьшать значение  $F$ .

**Результаты моделирования и настройки ПИД-регулятора.** Характер зависимости основных параметров качества переходных процессов от времени переходного процесса  $tp$  приведен на рис. 2, перерегулирования  $A$  – на рис. 3 и интегральных критериев  $J_1$ – $J_4$  – на рис. 4–7.

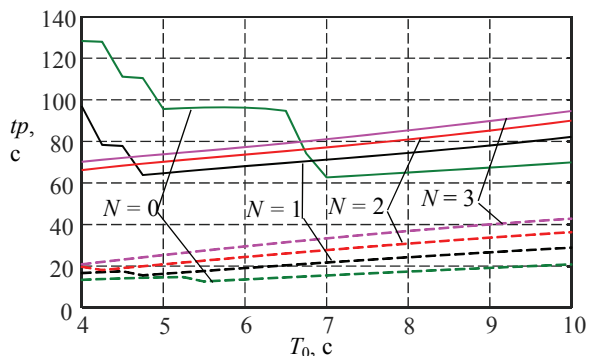


Рис. 2. Время переходного процесса  $tp$  для  $W_{01}$ .  
Сплошная линия – ПИД;  
штриховая линия – deadbeat

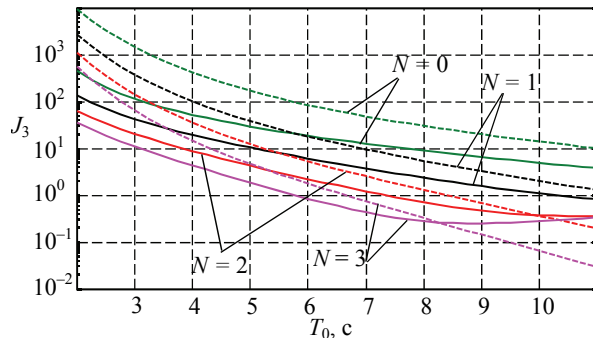


Рис. 6. Интегральный критерий  $J_3$  для  $W_{02}$ .  
Сплошная линия – ПИД;  
штриховая линия – deadbeat

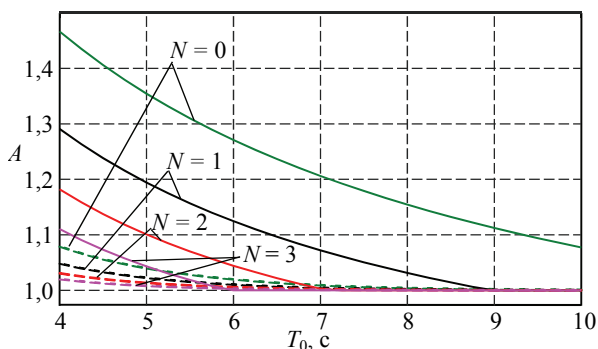


Рис. 3. Перерегулирование  $A$  для  $W_{01}$ .  
Сплошная линия – ПИД;  
штриховая линия – deadbeat

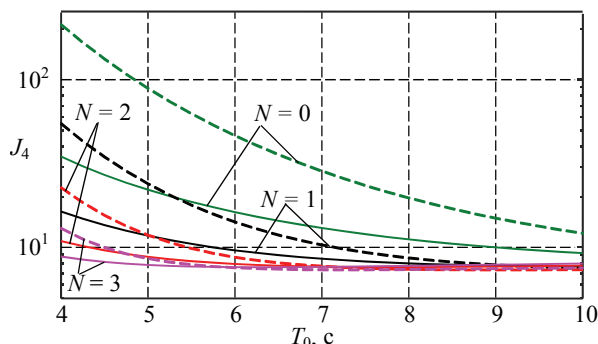


Рис. 7. Интегральный критерий  $J_4$  для  $W_{01}$ .  
Сплошная линия – ПИД;  
штриховая линия – deadbeat

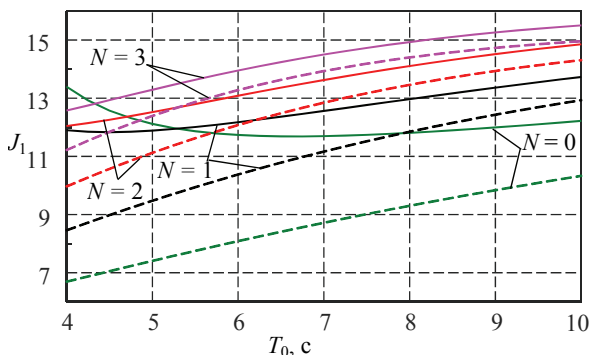


Рис. 4. Интегральный критерий  $J_1$  для  $W_{01}$ .  
Сплошная линия – ПИД;  
штриховая линия – deadbeat

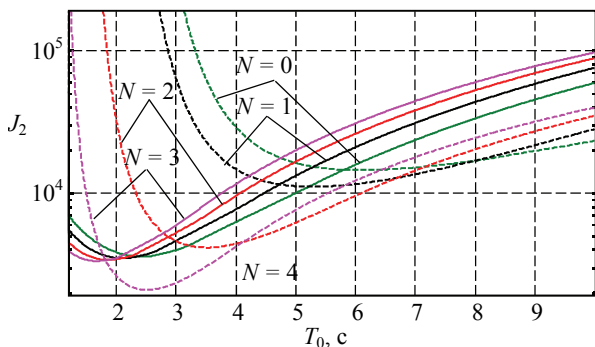


Рис. 5. Интегральный критерий  $J_2$  для  $W_{03}$ .  
Сплошная линия – ПИД;  
штриховая линия – deadbeat

Наибольшие отличия в зависимостях выбранных параметров наблюдаются между объектом  $W_{03}$  и остальными.

Ступеньки на графиках переходных процессов указывают на наличие колебательности. Нижняя ступенька соответствует аperiodическому характеру переходного процесса.

Графики показывают, что в случае необходимости минимизации времени  $tp$  переходного процесса для поиска настроек ПИД-регулятора следует использовать deadbeat-регулятор с  $N = 0$ . Запуск поискового алгоритма желательно начинать со значений  $T_0$ , которые близки к значению большей постоянной времени. При наличии запаздывания deadbeat лучше справляется с обеспечением минимального значения данного критерия настройки регулятора. Но следует отметить, что его применение имеет существенные ограничения по сравнению с ПИД.

Минимальное значение классического интегрального критерия  $J_1$  наблюдается при  $N = 0$ . Расположение минимума зависит от величины запаздывания. В этом случае минимум находится близко к зоне неустойчивых значений настройки. Влияние времени квантования на настройки достаточно незначительно. В данном методе настройки  $J_1$  может быть использован только как дополнительный фактор при комплексном рассмотрении.

$J_2$  имеет более сильный минимум в сравнении с  $J_1$ . По этому критерию deadbeat-регулятор на порядок превосходит ПИД при наличии запаздывания. Минимальное значение  $J_2$  наблюдается при  $N = 3$ .

Минимальное значение  $J_3$  отмечается также при  $N = 3$ . Для его представления, как и для  $J_3$ , также использована логарифмическая шкала. Критерий  $J_3$  имеет сравнимые значения для ПИД и deadbeat.

Соотношения между значениями ПИД и deadbeat для последнего интегрального критерия существенно различаются только при малых значениях  $T_0$ . По мере увеличения  $T_0$  в исследуемом диапазоне они начинают сближаться. В области малых значений  $J_4$  для ПИД значительно ниже, чем для deadbeat-регулятора.

**Сравнение результатов настройки ПИД-регулятора разными методами.** Результаты настройки с использованием deadbeat-регулятора  $J_{*,DB}$  и численной оптимизации  $J_{*,C}$  отражены на рис. 8, 9 и в табл. 1–4, где \* – номер критерия. В последней колонке табл. 1–4 показано время квантования, которое соответствует минимальному значению интегрального критерия.

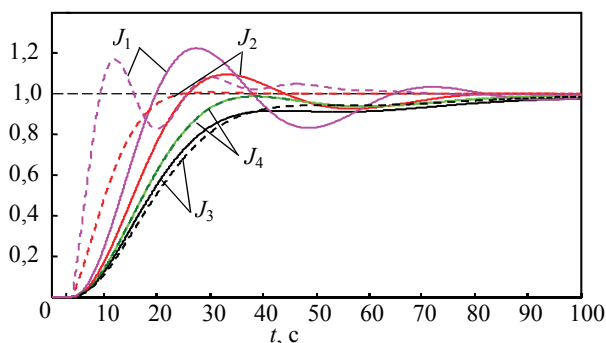


Рис. 8. Оптимальные переходные процессы для  $W_{01}$ . Сплошная линия – через deadbeat-регулятор; штриховая линия – численным методом оптимизации

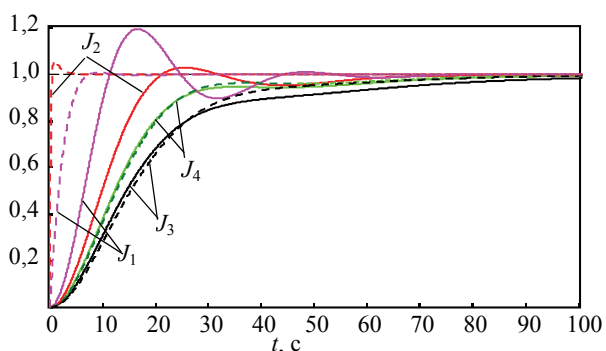


Рис. 9. Оптимальные переходные процессы для  $W_{03}$ . Сплошная линия – через deadbeat-регулятор; штриховая линия – численным методом оптимизации

Горизонтальные строки в таблицах отражают минимальное значение критерия и параметры, которые этому соответствуют.

Таблица 1

Результаты для  $W_{01}$ 

Параметр	$J$	$K$	$D$	$I$	$T_0$
$J_{1,DB}$	11,68	1,683	0,020763	13,301	6,665
$J_{1,C}$	5,955	2,457	21,143	5,5347	
$J_{1,DB}/J_{1,C}$	1,962	0,6849	$9,82 \cdot 10^{-4}$	2,4032	
$J_{2,DB}$	11 286	1,1560	0,004991	16,244	4,235
$J_{2,C}$	813,3	1,5923	6,9098	10,922	
$J_{2,DB}/J_{2,C}$	13,88	0,726	$7,22 \cdot 10^{-4}$	1,4873	
$J_{3,DB}$	0,4717	0,842	0,002095	24,921	9,43
$J_{3,C}$	0,3112	0,737	0,006753	24,181	
$J_{3,DB}/J_{3,C}$	1,5156	1,142	0,31014	1,0306	
$J_{4,DB}$	7,5899	0,932	0,002853	20,643	6,295
$J_{4,C}$	7,5870	0,932	0,013992	20,643	
$J_{4,DB}/J_{4,C}$	1,0004	1,0	0,20391	1,0	

Таблица 2

Результаты для  $W_{02}$ 

Параметр	$J$	$K$	$D$	$I$	$T_0$
$J_{1,DB}$	5,497	4,704	0,11808	4,1076	3,085
$J_{1,C}$	0,639	21,48	172,92	0,6536	
$J_{1,DB}/J_{1,C}$	8,602	0,219	0,000683	6,285	
$J_{2,DB}$	3788	2,023	0,008038	8,5414	2,76
$J_{2,C}$	91,29	6,414	29,3	2,6393	
$J_{2,DB}/J_{2,C}$	41,5	0,316	0,000274	3,2362	
$J_{3,DB}$	0,249	0,923	0,001439	20,69	8,895
$J_{3,C}$	0,122	0,809	0,004569	19,533	
$J_{3,DB}/J_{3,C}$	2,05	1,141	0,31485	1,0592	
$J_{4,DB}$	5,468	1,089	0,001907	16,077	5,785
$J_{4,C}$	5,466	1,087	0,008213	15,999	
$J_{4,DB}/J_{4,C}$	1,0003	1,002	0,23217	1,0049	

Таблица 3

Результаты для  $W_{03}$ 

Параметр	$J$	$K$	$D$	$I$	$T_0$
$J_{1,DB}$	4,295	11,869	1,0827	1,56	1,21
$J_{1,C}$	0,0927	327,62	584,48	0,175	
$J_{1,DB}/J_{1,C}$	46,32	0,0363	0,00185	8,896	
$J_{2,DB}$	3330,4	2,952	0,0273	6,17	1,67
$J_{2,C}$	40,317	8,3830	38,101	2,144	
$J_{2,DB}/J_{2,C}$	82,604	0,352	0,000717	2,88	
$J_{3,DB}$	0,273	0,934	0,00252	21,2	5,69
$J_{3,C}$	0,108	0,814	0,00427	19,2	
$J_{3,DB}/J_{3,C}$	2,541	1,145	0,59032	1,10	
$J_{4,DB}$	5,269	1,157	0,00362	16,3	4,18
$J_{4,C}$	5,249	1,107	0,0077	15,5	
$J_{4,DB}/J_{4,C}$	1,005	1,046	0,47	1,05	

Наибольшие несовпадения наблюдаются для среднеквадратичного отклонения  $J_1$  как при визуальном анализе графиков, так и при рассмотрении соотношений параметров настройки  $K$ ,

$D$ ,  $I$  в табл. 1–4. Значения критерия имеют большие отличия только для объекта без запаздывания. Получаемые настройки ПИД-регулятора через deadbeat-регулятор могут выступать только в качестве отправной точки для последующих численных методов оптимизации.

Таблица 4

Результаты для  $W_{04}$

Параметр	$J$	$K$	$D$	$I$	$T_0$
$J_{1,DB}$	12,211	1,62	0,0195	14,0	6,89
$J_{1,C}$	6,22719	2,40	20,583	5,81	
$J_{1,DB}/J_{1,C}$	1,9608	0,675	$9,48 \cdot 10^{-4}$	2,41	
$J_{2,DB}$	12204	1,13	0,00496	16,9	4,32
$J_{2,C}$	900,39	1,55	6,8358	11,4	
$J_{2,DB}/J_{2,C}$	13,555	0,727	$7,26 \cdot 10^{-4}$	1,49	
$J_{3,DB}$	0,49218	0,836	0,00213	25,4	9,48
$J_{3,C}$	0,32651	0,732	0,007098	24,5	
$J_{3,DB}/J_{3,C}$	1,5074	1,142	0,30072	1,04	
$J_{4,DB}$	7,8172	0,920	0,0029	21,1	6,36
$J_{4,C}$	7,81374	0,921	0,0143	21,2	
$J_{4,DB}/J_{4,C}$	1,0004	0,999	0,202	0,997	

Значение  $D$  имеет наибольшее отличие при настройке выбранными методами.

Настройки ПИД-регулятора, которые найдены двумя методами по критериям  $J_3$  и  $J_4$ , демонстрируют наилучшее совпадение. Отличия значения  $K$  не превышают 15%, а значения  $I$  – 10% для  $J_3$ . Для  $J_4$  значения  $K$  и  $I$  имеют отличие в 5% только для объекта без запаздывания  $W_{03}$ , в остальных случаях вариации не превышают 1%. Большие расхождения в параметре  $D$  не оказывают влияния на значение интегральных критериев  $J_3$  и  $J_4$ . Несмотря на существенные расхождения значения  $D$ , расхождение  $J_4$  меньше 1%. Их значения можно несколько улучшить, если использовать отличную от [23] методику формирования значений deadbeat-регулятора.

Максимальное значение  $N = 3$  обусловлено порядком передаточной функции объекта. При получении передаточной функции другого порядка оптимальное значение  $N$  будет другим.

**Заключение.** Предложенная методика настройки ПИД-регуляторов через deadbeat-регулятор является очень удобной с практической точки зрения. Вариацией параметра времени квантования  $T_0$  можно сбалансированно менять одновременно три настройки ПИД-регулятора. Она может играть роль, аналогичную линии равного затухания в частотных методах [5, 6]. Все выбранные в исследовании параметры переходного процесса имеют один глобальный минимум в зависимости от  $T_0$ .

Для интегральных критериев  $J_3$  и  $J_4$ , которые ориентированы только на выходной параметр объекта управления, использование предложенной методики может служить отправной точкой для дальнейшего использования в численных методах оптимизации. При проведении представленных исследований оптимизация начальных настроек через deadbeat-регулятор позволила получить результат за меньшее количество итераций, чем ранее с использованием метода Ziegler – Nichols.

В случае необходимости получения энергоэффективных параметров ПИД, к которым относятся критерии  $J_3$  и  $J_4$ , настройка через deadbeat-регулятор с вариацией simple time позволяет решить проблему на порядок быстрее, чем прямая численная оптимизация.

Методика достаточно просто реализуется для автономной настройки линейных объектов и состоит из последовательности простых операций.

1. Используя правила выбора времени квантования [21], задаемся начальным значением  $T_0$ .

2. Через передаточную функцию объекта или методом прямой идентификации [21] находим ее представление в  $z$ -области.

3. Применяем методику настройки deadbeat-регулятора как в [23] для максимально возможного значения  $N$  (в случае минимизации времени переходного процесса  $N = 0$ ).

4. Линейно меняем  $T_0$  до достижения минимума выбранного критерия  $A$ ,  $tr$ ,  $J_3$  или  $J_4$ .

Литература

1. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern control system. Boston: Pearson Educat, 2008. 933 p.
2. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759–768.
3. Ziegler J. C., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers. New York: Res. Triangle Park, 1992. 759 p.
4. Takahashi Y., Chan C. S., Auslander D. M. Parameter in stellung bei linearen DDC Algorithmen. Regelungstech // ProzeBdatenverarb. 1971. Tom 19. S. 237–244.
5. Ротач В. Я. Теория автоматического управления. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 396 с.
6. Стефани Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. М.: Энергия, 1972. 376 с.
7. Макаров И. М., Менский Б. М. Линейные автоматические системы. М.: Машиностроение, 1982. 505 с.

8. Schaedel H. M. A new method of direct PID controller design based on the principle of cascaded damping ratios // Proc. 4th European Control Conference, Brüssel, 1–7 July, 1997. Brüssel, 1997. P. 1–4.
9. Дудников Е. Г. Основы автоматического регулирования тепловых процессов. М.: Госэнергоиздат, 1956. 110 с.
10. Vrani D., Kocijan J., Strmnik S. Rejection tuning method for PID controllers. URL: <http://ascc2004.ee.mu.oz.au> (date of access: 10.03.2019).
11. Skogestad's method for PID tuning. URL: [http://techteach.no/fag/emar2101/h08/prosjekt\\_sim/skogestad.pdf](http://techteach.no/fag/emar2101/h08/prosjekt_sim/skogestad.pdf) (date of access: 12.03.2019).
12. Cohen G. H., Coon G. A. Theoretical consideration of retarded control // Trans. ASME. 1953. Vol. 75. P. 827–834.
13. Chien K. L., Hrones J. A., Reswick J. B. On the automatic control of generalized passive systems // Trans. ASME. 1952. Vol. 74. P. 175–185.
14. Visioli A. Tuning of PID controllers with fuzzy logic // IEE Proceedings – Control Theory and Applications. 2001. Vol. 148, no. 1. P. 1–8.
15. Complex tuning of the PID controller according to integral criteria / D. Hryniuk [et al.] // Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, 26 April, 2018. Vilnius, 2018. P. 1–4.
16. Online tuning of fuzzy PID controllers via rule weighing based on normalized acceleration / O. Karasakal [et al.] // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2013. Vol. 26, issue 1. P. 184–197.
17. Lisauskas S., Udris D., Uznys D. Direct Torque Control of Induction Drive Using Fuzzy Controller // Elektronika Ir Elektrotechnika. 2013. Vol. 19, no. 5. P. 13–16.
18. Meena D. C., Devanshu A. Genetic algorithm tuned PID controller for process control // International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), Coimbatore, 19–20 Jan, 2017. Coimbatore, 2017. P. 1–6.
19. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its settings // Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, 27 April, 2017. Vilnius, 2017. P. 1–4.
20. Alyoussef F., Kaya I. Nonlinear PID Based on the Dynamic of Biological Cell Membrane for Controlling the Pitch Angle of the Twin Rotor System // International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2018), Diyarbakir, November, 2018. Diyarbakir, 2018. P. 1625–1633.
21. Isermann R. Digital Control Systems. Berlin: Springer, 1989. 565 p.
22. Plsek S., Matusu R. Application of Adaptive Dead-beat Controller in Drying Process // Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 756–764.
23. Increasing the robustness of the digital controller / N. Oliferovich [et al.] // Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, 26 April, 2018. Vilnius, 2018. P. 1–6.
24. Aström K. J., Hägglund T. Advanced PID control. ISA – the Instrumentation, Systems, and Automation Society. Durham: Research Triangle Park, 2006. 461 p.

### References

1. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern control system. Boston, Pearson Educat, 2008. 933 p.
2. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers. *Trans. ASME*, 1942, vol. 64, pp. 759–768.
3. Ziegler J. C., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers. New York, Res. Triangle Park, 1992. 759 p.
4. Takahashi Y., Chan C. S., Auslander D. M. Parameter in stellung bei linearen DDC Algorithmen. Regelungstech. *ProzeBdatenverarb*, 1971, tom 19, ss. 237–244.
5. Rotach V. Ya. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control theory]. Moscow, Izdatel'stvo MEI Publ., 2005. 396 p.
6. Stefani E. P. *Osnovy rascheta nastroyki regulyatorov teploenergeticheskikh protsessov* [The basics of calculating the settings of regulators of heat and power processes]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 376 p.
7. Makarov I. M., Menskiy B. M. *Lineynyye avtomaticheskkiye sistemy* [Linear automation systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1982. 505 p.
8. Schaedel H. M. A new method of direct PID controller design based on the principle of cascaded damping ratios. *Proc. 4th European Control Conference*. Brüssel, 1997, pp. 1–4.
9. Dudnikov E. G. *Osnovy avtomaticheskogo regulirovaniya teplovykh protsessov* [Fundamentals of automatic regulation of thermal processes]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1956. 110 p.



10. Vrani D., Kocijan J., Strmnik S. Rejection tuning method for PID controllers. Available at: <http://ascc2004.ee.mu.oz.au> (accessed 10.03.2019).
11. Skogestad's method for PID tuning. Available at: [http://techteach.no/fag/emar2101/h08/prosjekt\\_sim/skogestad.pdf](http://techteach.no/fag/emar2101/h08/prosjekt_sim/skogestad.pdf) (accessed 12.03.2019).
12. Cohen G. H., Coon G. A. Theoretical consideration of retarded control. *Trans. ASME*, 1953, vol. 75, pp. 827–834.
13. Chien K. L., Hrones J. A., Reswick J. B. On the automatic control of generalized passive systems. *Trans. ASME*, 1952, vol. 74, pp. 175–185.
14. Visioli A. Tuning of PID controllers with fuzzy logic. *IEE Proceedings – Control Theory and Applications*, 2001, vol. 148, no. 1, pp. 1–8.
15. Hryniuk D., Suhorukova I., Oliberovich N., Orobei I. Complex tuning of the PID controller according to integral criteria. *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. Vilnius, 2018, pp. 1–4.
16. Karasakal O., Guzelkaya M., Eksin I., Yesil E., Kumbasar T. Online tuning of fuzzy PID controllers via rule weighing based on normalized acceleration. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, vol. 26, issue 1, pp. 184–197.
17. Lisauskas S., Udrys D., Uznys D. Direct Torque Control of Induction Drive Using Fuzzy Controller. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 2013, vol. 19, no. 5, pp. 13–16.
18. Meena D. C., Devanshu A. Genetic algorithm tuned PID controller for process control. *International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*. Coimbatore, 2017, pp. 1–6.
19. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its setting. *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. Vilnius, 2017, pp. 1–4.
20. Alyoussef F., Kaya I. Nonlinear PID Based on the Dynamic of Biological Cell Membrane for Controlling the Pitch Angle of the Twin Rotor System. *International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2018)*, Diyarbakir, 2018, p. 1625–1633.
21. Isermann R. *Digital Control Systems*. Berlin, Springer, 1989. 565 p.
22. Plsek S., Matusu R. Application of Adaptive Dead-beat Controller in Drying Process. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 756–764.
23. Oliberovich N., Hryniuk D., Orobei I., Suhorukova I. Increasing the robustness of the digital controller. *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. Vilnius, 2018, pp. 1–6.
24. Åström K. J., Hägglund T. *Advanced PID control*. ISA – the Instrumentation, Systems, and Automation Society. Durham, Research Triangle Park, 2006. 461 p.

### Информация об авторах

**Гринюк Дмитрий Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [hryniuk@tut.by](mailto:hryniuk@tut.by)

**Олиферович Надежда Михайловна** – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [oliferovich@belstu.by](mailto:oliferovich@belstu.by)

**Сухорукова Ирина Геннадьевна** – старший преподаватель кафедры программной инженерии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [irina\\_x@rambler.ru](mailto:irina_x@rambler.ru)

### Information about the authors

**Hryniuk Dzmitry Anatol'yevich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [hryniuk@tut.by](mailto:hryniuk@tut.by)

**Oliberovich Nadezhda Mikhaylovna** – assistant lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [oliferovich@belstu.by](mailto:oliferovich@belstu.by)

**Suhorukova Irina Gennad'yevna** – Senior Lecturer, the Department of Information Systems and Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [irina\\_x@rambler.ru](mailto:irina_x@rambler.ru)

Поступила 15.05.2019