

УДК 681.53

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

### **ОБЩЕЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ СИНТЕЗА DEADBEAT-РЕГУЛЯТОРА НА ПРОИЗВОЛЬНОЕ КОЛИЧЕСТВО ШАГОВ**

В статье рассмотрены проблемы синтеза Deadbeat Controller with a Prescribed Controlled. Deadbeat Controller является отдельным классом алгоритмов управления в системах с обратной связью. Этот алгоритм может быть использован непосредственно для управления объектами, либо для синтеза ПИД-регуляторов.

Для обеспечения необходимой гибкости в задачах управления в условиях ограничений для реальных технологических процессов, при получении параметров ПИД-регулятора с различными показателями качества переходного процесса требуется адаптивная схема перенастройки в зависимости от свойств объекта управления.

Ранее были получены отдельные решения для возможности удлинения переходного процесса на 1, 2 и 3 шага. Однако если передаточная функция объекта имеет более высокий порядок, либо увеличение порядка обусловлено отличием структуры от последовательного соединения звеньев, данных решений может быть недостаточно. В последнем случае при получении общей передаточной функции с использованием  $z$ -преобразований происходит резкое увеличение порядка результата преобразований.

Получение расчетных формул синтеза осуществлено на основании подхода, который позволяет регулятору формировать одинаковое значение управляющего воздействия на заданном количестве шагов. При этом можно получить основные неравенства для синтеза путем определения аperiodического характера переходного процесса синтезируемого регулятора.

Адекватность полученных выражений была проверена путем построения переходных характеристик регулятора и замкнутых систем управления для объекта шестого порядка.

**Ключевые слова:** deadbeat-регулятор, настройка регулятора, переходный процесс.

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

### **GENERAL SOLUTION FOR SYNTHESIS OF DEADBEAT REGULATOR FOR ARBITRARY NUMBER OF STEPS**

This article discusses the synthesis problems of Deadbeat Controller with a Prescribed Controlled. Deadbeat Controllers are a separate class of control algorithms in feedback systems. This algorithm can be used directly for controlling objects, or for the synthesis of PID controllers.

To provide the necessary flexibility in control tasks under restrictions for real technological processes, when receiving PID controller parameters with different transient quality indicators, an adaptive reconfiguration scheme is required depending on the properties of the control object.

Separate solutions have been previously obtained for the possibility of lengthening the transition process by 1, 2 and 3 steps. However, if the transfer function of the object has a higher order, or the increase in the order is due to distinguish the structure from the serial connection of the links, these solutions may not be enough. In the latter case, upon obtaining the general transfer function using  $z$ -transformation, a sharp increase in order of the result of the transformations occurs.

Obtaining calculation formulas for the synthesis has been carried out using an approach that allows the regulator to generate the same value of the control action for given number of steps. Moreover, it is possible to obtain the main inequalities for the synthesis by determining the aperiodic nature of the transition process of the synthesized controller.

The adequacy of obtained expressions has been verified by constructing the transient characteristics of the regulator and closed control systems for an object of the sixth order.

**Key words:** deadbeat regulator, regulator tuning, transition process.

**Введение.** Теория непрерывных систем управления постоянно развивается, но техническая реализация происходит на цифровых платформах. Использование напрямую цифровых подходов к синтезу систем управления позво-

ляет получить лучшее совпадение при практической реализации.

Deadbeat-регуляторы являются одним из направлений развития цифровых систем [1–3]. Алгоритмы deadbeat-контроллера широко

применяются в управлении двигателем [4–8], в модуляции балансировки напряжения [9]. В [1] было показано, что данные виды регуляторов очень хорошо приспособлены для использования в условиях ограничения на управляющее воздействие. В этой же работе, в дополнение к [2], были получены расчетные формулы для растягивания переходного процесса на два и три такта. Полученные результаты нашли свое применение в разработке нового метода синтеза настроек ПИД-регулятора [3]. Можно добиться соответствия контроллера технологическим нормам за счет увеличения времени шаговых ответов [10].

Предложенный метод синтеза ПИД-регулятора через deadbeat-регуляторы показал, что для возможности выбора разных показателей качества процесса потребуются наличие расчетных формул для максимального удлинения переходного процесса.

Следует отметить, что существуют и другие методы проектирования deadbeat-контроллера [11–13]. Однако в прикладных решениях находят большее применение подход из [1].

**Расчетные формулы.** Синтез deadbeat производится на основании функции  $z$ -преобразования элементов систем управления. Структура системы управления показана на рис. 1.

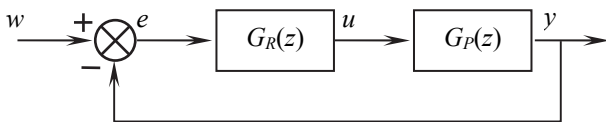


Рис. 1. Структура deadbeat-регулятора:  
 $w$  – сигнал задания;  $e$  – сигнал ошибки;  
 $u$  – управляющее воздействие;  
 $y$  – выход системы

Передаточная функция регулятора  $G_R(z)$  и объекта  $G_P(z)$  может быть записана следующим образом [1]:

$$G_R(z) = \frac{Q(z)}{1-P(z)}, \quad G_P(z) = \frac{A(z)}{B(z)}, \quad (1)$$

где  $Q(z)$ ,  $P(z)$  – многочлены передаточной функции регулятора;  $A(z)$ ,  $B(z)$  – многочлены передаточной функции объекта.

Коэффициенты многочленов  $Q(z)$ ,  $P(z)$  для классического deadbeat-регулятора могут быть найдены с использованием уравнений [2]:

$$\begin{cases} q_0 = \frac{1}{b_1 + b_2 + \dots + b_m}, \\ q_i = q_0 a_i, \\ p_i = q_0 b_i, \end{cases} \quad (2)$$

где  $a_i$ ,  $b_i$  – коэффициенты многочленов функции  $z$ -передачи непрерывного объекта  $A(z)$ ,  $B(z)$  соответственно;  $m$  – порядок передаточной функции объекта.

Коэффициенты многочлена  $Q(z)$  можно выразить как:

$$\begin{cases} q_0 = u(0), \\ q_i = u(i) - u(i-1), \quad i = 1, \dots, m. \end{cases} \quad (3)$$

Итак, начальное значение управляемой переменной  $u(0)$  зависит только от суммы (2) коэффициентов функции  $z$ -передачи объекта  $b_i$ .

В [2] получены выражения для возможности выбора первичного импульса. Расширим его на большее количество тактов:

$$w(k) = 1 \text{ для } k = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

Для случая  $b_0 = 0$   $z$ -преобразования задающей, регулируемой и управляющей переменных имеют следующий вид:

$$w(z) = \frac{1}{1-z^{-1}}, \quad (5)$$

$$y(z) = y(1)z^{-1} + y(2)z^{-2} + \dots + 1[z^{-m} + z^{-(m+1)} + \dots], \quad (6)$$

$$u(z) = u(0) + u(1)z^{-1} + \dots + u(m)[z^{-m} + z^{-(m+1)} + \dots]. \quad (7)$$

Разделив уравнения (6) и (7) на (5), получим:

$$\frac{y(z)}{w(z)} = p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_m z^{-m} = P(z), \quad (8)$$

$$\frac{u(z)}{w(z)} = q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_m z^{-m} = Q(z). \quad (9)$$

Условие построения аperiodического регулятора независимо от количества заданных тактов не меняется:

$$\frac{b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}} = \frac{p_1 z^{-1} + \dots + p'_m z^{-(m+1)}}{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_m z^{-m}}. \quad (10)$$

Условие для получения значений коэффициентов запишем в виде

$$\frac{P}{Q} = \frac{(p'_1 z^{-1} + \dots + p_m z^{-m})(\alpha_1 - z^{-1})(\alpha_2 - z^{-1})}{(q'_0 + \dots + q'_m z^{-m})(\alpha_1 - z^{-1})(\alpha_2 - z^{-1})} \times \frac{(\alpha_N - z^{-1})}{(\alpha_N - z^{-1})}. \quad (11)$$

Сокращение одинаковых множителей приводит к единому результату:

$$\frac{b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_m z^{-m}} = \frac{p'_0 z^{-1} + \dots + p'_m z^{-m}}{q'_0 + \dots + q'_m z^{-m}}. \quad (12)$$

Сопоставление коэффициентов с одинаковыми степенями дает

$$\begin{aligned} q'_1 &= a_1 q'_0, & p'_1 &= b_1 q'_0, \\ q'_2 &= a_2 q'_0, & p'_2 &= b_2 q'_0, \\ &\dots & &\dots \\ q'_m &= a_m q'_0, & p'_m &= b_m q'_0. \end{aligned} \quad (13)$$

В общем случае система при удлинении переходного процесса на  $N$  может быть представлена как:

– для четного  $N$

$$\begin{aligned} q_0 &= A_1 q'_0, \\ q_1 &= A_1 q'_1 - A_2 q'_0, \\ q_2 &= A_1 q'_2 - A_2 q'_1 + A_3 q'_0, \\ &\dots \\ q_N &= A_1 q'_N - A_2 q'_{N-1} + \dots + A_N q'_1 - q'_0, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} q_{m+N-2} &= -A_{N-1} q'_m + A_N q'_{m-1} - q'_{m-2}, \\ q_{m+N-1} &= A_N q'_m - q'_{m-1}, \\ q_{m+N} &= -q'_m; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_1 &= A_1 p'_1, \\ p_2 &= A_1 p'_2 - A_2 p'_1, \\ p_3 &= A_1 p'_3 - A_2 p'_2 + A_3 p'_1, \\ &\dots \\ p_N &= A_1 p'_N - A_2 p'_{N-1} + \dots + A_N p'_1, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} p_m &= -A_{N-1} p'_m + A_N p'_{m-1} - p'_{m-2}, \\ p_{m+N-1} &= A_N p'_m - p'_{m-1}, \\ p_{m+N} &= -p'_m; \end{aligned}$$

– для нечетного  $N$

$$\begin{aligned} q_0 &= A_1 q'_0, \\ q_1 &= A_1 q'_1 - A_2 q'_0, \\ q_2 &= A_1 q'_2 - A_2 q'_1 + A_3 q'_0, \\ &\dots \\ q_N &= A_1 q'_N - A_2 q'_{N-1} + \dots - A_N q'_1 + q'_0, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} q_{m+N-2} &= A_{N-1} q'_m - A_N q'_{m-1} + q'_{m-2}, \\ q_{m+N-1} &= -A_N q'_m + q'_{m-1}, \\ q_{m+N} &= q'_m; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_1 &= A_1 p'_1, \\ p_2 &= A_1 p'_2 - A_2 p'_1, \\ p_3 &= A_1 p'_3 - A_2 p'_2 + A_3 p'_1, \\ &\dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_N &= A_1 p'_N - A_2 p'_{N-1} + \dots - A_N p'_1, \\ &\dots \\ p_m &= A_{N-1} p'_m - A_N p'_{m-1} + p'_{m-2}, \\ p_{m+N-1} &= -A_N p'_m + p'_{m-1}, \\ p_{m+N} &= p'_m, \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} (\alpha_1 - z^{-1})(\alpha_2 - z^{-1}) \dots (\alpha_m - z^{-1}) &= \\ &= A_1 - A_2 z^{-1} + A_2 z^{-2} \dots \end{aligned}$$

Будем искать расчетные формулы исходя из равенства первых управляющих воздействий [7], тогда

$$\begin{aligned} \frac{q_0}{q'_0} &= A_1, \\ 0 &= A_1 q'_1 - A_2 q'_0, \\ 0 &= A_1 q'_2 - A_2 q'_1 + A_3 q'_0, \\ 0 &= A_1 q'_3 - A_2 q'_2 + A_3 q'_1 - A_4 q'_0, \\ &\dots \end{aligned} \quad (18)$$

или с учетом (13)

$$\begin{aligned} \frac{q_0}{q'_0} &= A_1, \\ 0 &= A_1 a_1 q'_0 - A_2 q'_0, \\ 0 &= A_1 a_2 q'_0 - A_2 a_1 q'_0 + A_3 q'_0, \\ 0 &= A_1 a_3 q'_0 - A_2 a_2 q'_0 + A_3 a_1 q'_0 - A_4 q'_0, \\ &\dots \end{aligned} \quad (19)$$

Суммированием уравнений (15) и (17) и с учетом

$$1 = p_1 + p_2 + \dots + p_{m+N}$$

можно получить:

1) для четного  $N$

$$1 = \sum_{i=1}^m b_i (A_1 q'_0 - A_2 q'_0 + \dots + A_{N-1} q'_0 - A_N q'_0 + q'_0); \quad (20)$$

2) для нечетного  $N$

$$1 = \sum_{i=1}^m b_i (A_1 q'_0 - A_2 q'_0 + \dots - A_{N-1} q'_0 + A_N q'_0 - q'_0). \quad (21)$$

После выражения  $A_1, A_2, \dots$  из (18) и (19) и подстановки в (20) и (21) соответственно можно получить:

– для четного  $N$

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^m b_i} = q_0 D + q'_0; \quad (22)$$

– для нечетного  $N$ 

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^m b_i} = q_0 D - q'_0, \quad (23)$$

где

$$D = 1 - a_{N-1} - a_{N-2}(1-a_1) - a_{N-3}(1-a_2 - a_1(1-a_1)) - a_{N-4}(1-a_3 - a_2(1-a_1) - a_1(1-a_2 - a_1(1-a_1))) - \dots$$

Используя выражение из (18) и (19)

1) для четного  $N$ 

$$0 = A_1 q'_N - A_2 q'_{N-1} + \dots + A_N q'_1 - q'_0; \quad (24)$$

2) для нечетного  $N$ 

$$0 = A_1 q'_N - A_2 q'_{N-1} + \dots - A_N q'_1 + q'_0, \quad (25)$$

можно получить:

– для четного  $N$ 

$$1 = \frac{q_0}{q'_0} H; \quad (26)$$

– для нечетного  $N$ 

$$1 = -\frac{q_0}{q'_N} H, \quad (27)$$

где

$$H = (a_N - a_{N-1}a_1 - a_{N-2}(a_2 - a_1^2) - a_{N-3}(a_3 - a_2a_1 - a_1(a_2 - a_1^2)) - \dots).$$

Тогда величину управляющего воздействия на первом такте для соблюдения условия

$$u_{SP} = u(0) = u(1) = \dots = u(N) \quad (28)$$

можно рассчитать как

$$u_{SP} = q_0 = \frac{1}{(D-H) \sum_{i=1}^m b_i}. \quad (29)$$

С учетом того, что коэффициенты  $A_1, A_2, \dots$  можно получить из (18) при известном значении  $u_{SP}$ :

$$\begin{aligned} u_{SP} &= q'_0 A_1, \\ A_2 &= A_1 a_1, \\ A_3 &= -A_1 a_2 + A_1 a_1^2, \\ A_4 &= A_1 a_3 - A_1 a_1 a_2 - A_1 a_2 a_1 + A_1 a_1^3, \\ &\dots \end{aligned} \quad (30)$$

или

$$\begin{aligned} u_{SP} &= q'_0 A_1, \\ q'_0 A_2 &= u_{SP} a_1, \\ q'_0 A_3 &= u_{SP} (-a_2 + a_1^2), \\ q'_0 A_4 &= u_{SP} (a_3 - 2a_1 a_2 + a_1^3), \\ &\dots \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} q_0 &= u_{SP}, \\ q_1 &= 0, \\ q_2 &= 0, \\ &\dots \\ q_N &= 0, \\ q_{N+1} &= q'_0 A_1 a_{N+1} - q'_0 A_2 a_{N+1} + \dots + a_1 q'_0, \\ &\dots \\ q_{m+N-2} &= q'_0 A_{N-1} a_m - q'_0 A_N a_{m-1} + a_{m-2} q'_0, \\ q_{m+N-1} &= -q'_0 A_N a_m + a_{m-1} q'_0, \\ q_{m+N} &= a_m q'_0; \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} p_1 &= q'_0 A_1 b_1, \\ p_2 &= q'_0 A_1 b_2 - q'_0 A_2 b_1, \\ p_3 &= q'_0 A_1 b_3 - q'_0 A_2 b_2 + b_1 q'_0, \\ &\dots \\ p_N &= q'_0 A_1 b_N - q'_0 A_2 b_{N-1} + \dots - v A_N b_1 + q'_0, \\ &\dots \\ p_m &= q'_0 A_{N-1} b_m - q'_0 A_N b_{m-1} + b_{m-2} q'_0, \\ p_{m+N-1} &= -q'_0 A_N b_m + q'_{m-1}, \\ p_{m+N} &= b_m q'_0; \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} q_0 &= u_{SP}, \\ q_1 &= 0, \\ q_2 &= 0, \\ &\dots \\ q_N &= 0, \\ q_{N+1} &= q'_0 A_1 a_{N+1} - q'_0 A_2 a_{N+1} + \dots - a_1 q'_0, \\ &\dots \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} q_{m+N-2} &= -q'_0 A_{N-1} a_m + q'_0 A_N a_{m-1} - a_{m-2} q'_0, \\ q_{m+N-1} &= q'_0 A_N a_m - a_{m-1} q'_0, \\ q_{m+N} &= -a_m q'_0; \\ p_1 &= q'_0 A_1 b_1, \\ p_2 &= q'_0 A_1 b_2 - q'_0 A_2 b_1, \\ p_3 &= q'_0 A_1 b_3 - q'_0 A_2 b_2 + b_1 q'_0, \\ &\dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_N &= q'_0 A_1 b_N - q'_0 A_2 b_{N-1} + \dots + q'_0 A_N b_1 - q'_0, \\ &\dots \\ p_m &= -q'_0 A_{N-1} b_m + q'_0 A_N b_{m-1} - b_{m-2} q'_0, \\ p_{m+N-1} &= q'_0 A_N b_m - b_{m-1} q'_0, \\ p_{m+N} &= -b_m q'_0. \end{aligned} \quad (35)$$

Для расчета коэффициентов deadbeat-регулятора используем системы уравнений (32), (33) или (34), (35). Величину  $u_{SP}$  получаем из (25), значения коэффициентов  $q_0'A_1, q_0'A_2, \dots$  определяем из (31) и, наконец,  $q_0'$  можно рассчитать или по (22)/(23), или по (26)/(27).

**Моделирование.** В качестве приложения методики расчета регуляторов выбран объект с передаточной функцией

$$W_o(s) = \frac{(-0,5s + 1)}{(10s + 1)(7s + 1)(3s + 1)^3} \exp(-2s). \quad (36)$$

Данного вида передаточные функции могут быть использованы при аппроксимации переходных процессов объектов с распределенными параметрами.

Максимальное управляющее воздействие  $u_{SP}$  при simple time  $t_s = 4$ , при одинаковых управляющих воздействиях первых тактов  $N = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$  убывает в следующей последовательности [23,6960 7,2037 3,6834 2,4141 1,8267 1,4646 1,2871]. Переходную характеристику регулятора можно видеть на рис. 2.

Результаты расчета (рис. 3) и моделирования замкнутой системы представлены на рис. 4–8.

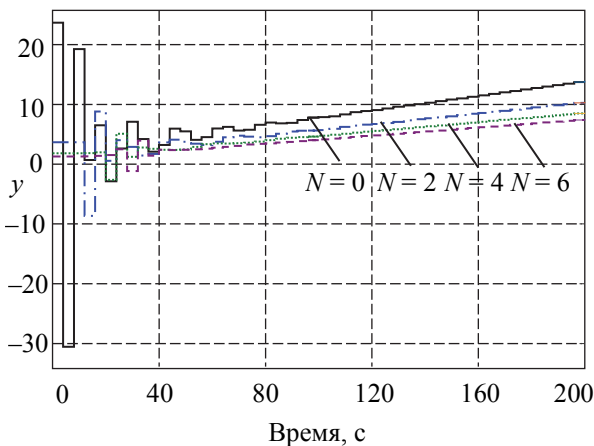


Рис. 2. Переходная характеристика deadbeat-регулятора для  $N = [0, 2, 4, 6]$

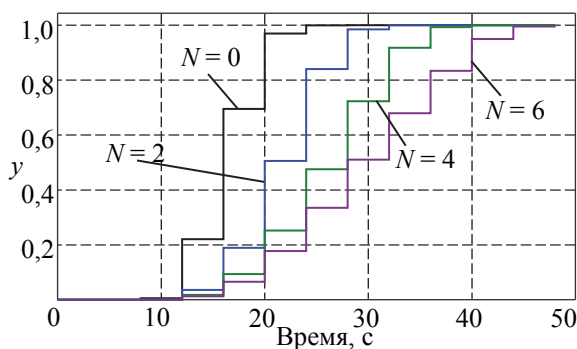


Рис. 3. Расчетный идеальный переходный процесс для  $N = [0, 2, 4, 6]$

Графики построены с использованием z-преобразований и соответствуют общей концепции deadbeat. Моделирование производилось в MATLAB с помощью SIMULINK. Для реализации deadbeat-регулятора использовался Discrete filter. Здесь при увеличении времени simple time до 8 кривые приобретают более аperiodический характер (рис. 5).

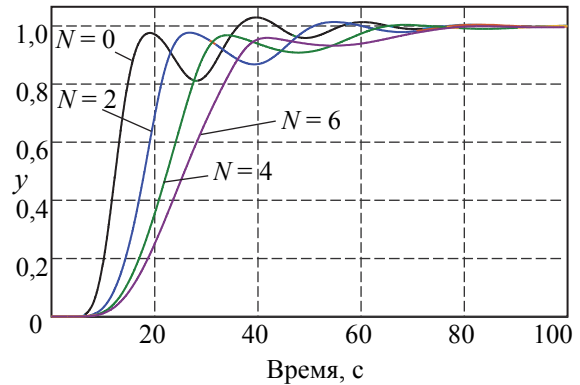


Рис. 4. Переходный процесс по сигналу задания. Результат моделирования в MATLAB для  $N = [0, 2, 4, 6]$  при  $t_s = 4$

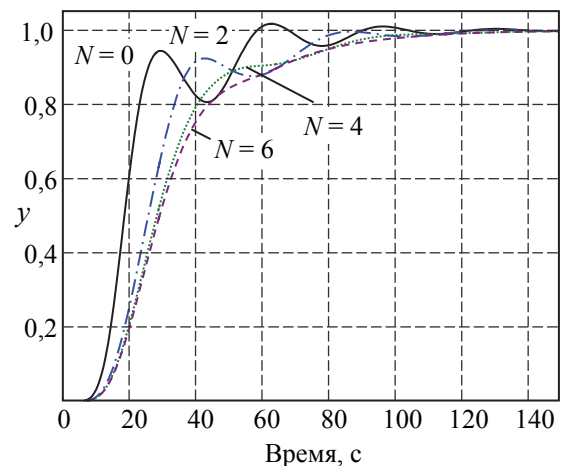


Рис. 5. Переходный процесс по отклонению. Результат моделирования в MATLAB для  $N = [0, 2, 4, 6]$  при  $t_s = 8$

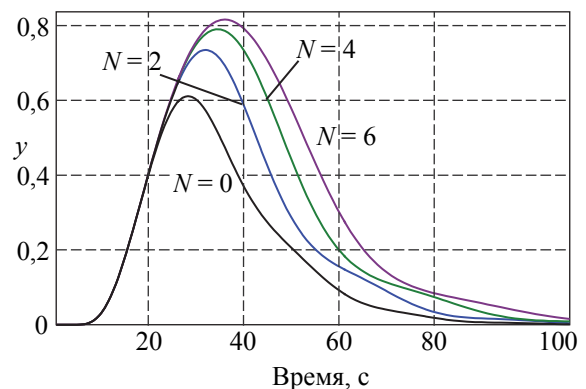


Рис. 6. Переходный процесс по возмущению. Результат моделирования в MATLAB для  $N = [0, 2, 4, 6]$

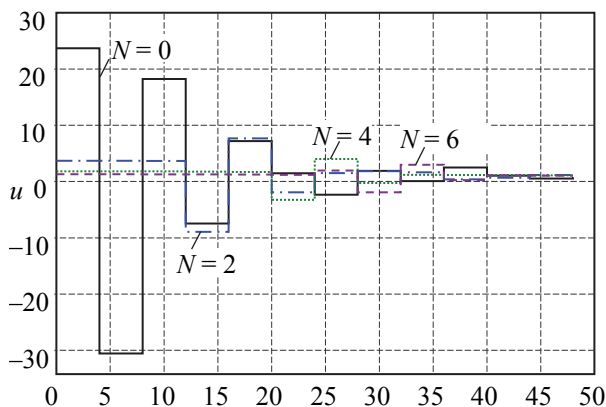


Рис. 7. Изменение сигнала управления при изменении сигнала задания. Результат моделирования в MATLAB для  $N = [0, 2, 4, 6]$

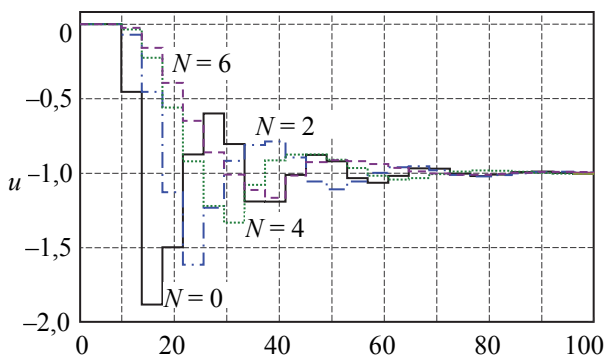


Рис. 8. Изменение сигнала управления при возмущении. Результат моделирования в MATLAB для  $N = [0, 2, 4, 6]$

Влияние времени дискретизации  $t_s$  и  $N$  на максимальное управляющее воздействие при переходном процессе можно видеть на рис. 9.

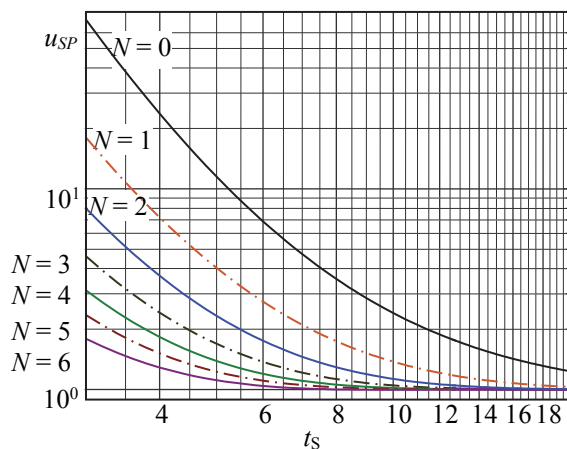


Рис. 9. Зависимость первого максимального управляющего воздействия  $u_{SP}$  от simple time  $t_s$

**Заключение.** В отличие от [1, 8], разработанная методика позволила получить формулы в общем виде, что облегчает применение deadbeat controllers для различных задач. Они могут быть легко алгоритмизированы для прикладных задач (например, при использовании deadbeat controller в условиях ограничения на управляющее воздействие; для настройки ПИД-регулятора).

Следует отметить, что, несмотря на ограничение управляющего воздействия на начальных этапах, могут проявляться большие отклонения в последующих тактах, что требует проведения оценки при синтезе регуляторов.

### Список литературы

1. Isermann R. Digital Control Systems. Berlin: Springer, 1989. 565 p.
2. Plsek S., Matusu R. Application of adaptive deadbeat controller in drying process // Procedia Engineering. 2015. Vol. 100. P. 756–764.
3. Awadallah M. A., Bayoumi E. H. E., Soliman H. M. Adaptive deadbeat controllers for brushless DC drives using PSO and ANFIS Techniques // Journal of Electrical Engineering. 2009. Vol. 60, no. 1. P. 3–11.
4. Deadbeat model-predictive torque control with discrete space-vector modulation for PMSM drives / Y. Wang [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. Vol. 64, no. 5. P. 3537–3547.
5. Deadbeat-direct torque and flux control of interior permanent magnet synchronous machines with discrete time stator current and stator flux linkage observer / L. Jae Suk [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. 2011. Vol. 47, no. 4. P. 1749–1758.
6. Deadbeat control for a single-phase cascaded H-bridge rectifier with voltage balancing modulation / Ch. Qi [et al.] // IET Power Electronics. 2018. Vol. 11, issue 3. P. 610–617.
7. Increasing the robustness of the digital controller / N. Oliferovich [et al.] // Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream). Vilnius, 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/eStream.2018.8394120.
8. Hryniuk D., Oliferovich N., Suhorukova I. Approximation PID-controllers through deadbeat controller and its tuning // Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream). Vilnius, 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/eStream.2019.8732172.
9. Kučera V. Deadbeat Control, Pole Placement, and LQ Regulation // Kybernetika. 1999. Vol. 35, no. 6. P. 681–692.
10. Westphal L. C. Handbook of Control Systems Engineering. New York: Springer, 2001. 1073 p.
11. Irfan A. Implementation of PID and deadbeat controllers with the TMS320 Family. Application report: SPRA083. Texas Instruments, 1997. 59 p.

12. Sami Fadali M., Visioli A. Digital control Engineering. Analysis and Design // Elsevier. 2013. P. 217–225.

13. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its setting // Open Conference Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream). Vilnius, 2017. P. 1–4.

### References

1. Isermann R. Digital Control Systems. Berlin, Springer, 1989. 565 p.
2. Plsek S., Matuso R. Application of adaptive deadbeat controller in drying process. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 756–764.
3. Awadallah M. A., Bayoumi E. H. E., Soliman H. M. Adaptive deadbeat controllers for brushless DC drives using PSO and ANFIS Techniques. *Journal of Electrical Engineering*, 2009, vol. 60, no. 1, pp. 3–11.
4. Wang Y., Wang X., Xie W., Wang F., Dou M., Kennel R. M., Lorenz R. D., Gerling D. Deadbeat model-predictive torque control with discrete space-vector modulation for PMSM drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, no. 5, pp. 3537–3547.
5. Jae Suk L., Chan-Hee C., Jul-Ki S., Lorenz R. D. Deadbeat-direct torque and flux control of interior permanent magnet synchronous machines with discrete time stator current and stator flux linkage observer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, vol. 47, no. 4, pp. 1749–1758.
6. Qi Ch., Chen X., Tu P., Wang P. Deadbeat control for a single-phase cascaded H-bridge rectifier with voltage balancing modulation. *IET Power Electronics*, 2018, vol. 11, issue 3, pp. 610–617.
7. Oлиферович 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. DOI: 10.1109/eStream.2018.8394120.
8. Hryniuk D., Oлиферович N., Suhorukova I. Approximation PID-controllers through deadbeat controller and its tuning. *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. Vilnius, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/eStream.2019.8732172.
9. Kučera V. Deadbeat Control, Pole Placement, and LQ Regulation. *Kybernetika*, 1999, vol. 35, no. 6, pp. 681–692.
10. Westphal L. C. Handbook of Control Systems Engineering. New York, Springer, 2001. 1073 p.
11. Irfan A. Implementation of PID and deadbeat controllers with the TMS320 Family. Application report: SPRA083. Texas Instruments, 1997. 59 p.
12. Sami Fadali M., Visioli A. Digital control Engineering. Analysis and Design. *Elsevier*, 2013, pp. 217–225.
13. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its setting. *Open Conference Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. Vilnius, 2017, pp. 1–4.

### 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

**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

**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

### Information about the authors

**Hryniuk Dzmityry 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

**Oliferovich 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

**Suhorukova Irina Gennad'yevna** – Senior Lecturer, the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina\_x@rambler.ru

Поступила после доработки 15.04.2020