

DOI: 10.33955/2307-2180(3)2020.50-55

УДК 677.017

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ШЛЯХОМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ЇХНЬОЇ АПЕРІОДИЧНОСТІ

Improving the Quality of Management of Technological Processes by Ensuring Their Maximum Periodicity

С. М. Лісовець, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та вимірювальної техніки, Київський національний університет технологій та дизайну, e-mail: ser.lis.290171@gmail.com

М. А. Зенкін, доктор технічних наук, професор кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», e-mail: nikolay_zenkin@ukr.net

І. Л. Ківа, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та вимірювальної техніки, e-mail: leonidovich1259@gmail.com

Я. Т. Недлінський, магістр кафедри, e-mail: yarosha1337@gmail.com Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

S. M. Lisovets, candidate of technical sciences, associate professor of computer integrated technologies and measurement technology, Kyiv national university of technology and design, e-mail: ser.lis.290171@gmail.com

M. A. Zenkin, doctor of engineering, professor of the department of machines and units of printing production, National technical university of Ukraine «Kyiv polytechnic institute named Igor Sikorsky», e-mail: nikolay_zenkin@ukr.net

I. L. Kiva, candidate of technical sciences, associate professor of department of computer integrated technologies and measurement technics, e-mail: leonidovich1259@gmail.com

Ya. T. Nedlinskyi, master of the department, e-mail: yarosha1337@gmail.com Kyiv national university of technology and design, Ukraine



С. М. Лісовець



М. А. Зенкін



І. Л. Ківа



Я. Т. Недлінський

Показана можливість, використовуючи типову методику, синтезу цифрових регуляторів у такий спосіб, щоби забезпечувалася максимальна аперіодичність технологічних процесів, для яких вони використовуються. На прикладі об'єкта керування 2-го порядку наведено розрахунок таких регуляторів для стрибкоподібних і лінійно-змінюваних вхідних сигналів. Також показано, що внаслідок незначної коливальності, можна забезпечити високу якість перехідних процесів одночасно для кількох різних вхідних впливів.

The article discusses obtaining aperiodicity for most technological processes that are used in industry, such as maintaining temperature, moisture content, angular velocity, and so on. Some of these processes do not allow significant or even minor overshoot, as this can lead to damage to materials, equipment or finished products.

Also, the article analyzes the general issues of calculating aperiodic digital controllers, and also analyzes the operation of an automated control system, which contains a digital controller, a zero-order lock and a control object. For such a system, based on a typical calculation methodology, a synthesis of

several regulators is presented. The essence of the calculation method was that with a known transfer function of the control object, the desired transfer function of the closed-loop automated control system is set, and the required controller is synthesized on the basis of these transfer functions.

This calculation method assumes that the resulting transient processes will have not only aperiodicity, but also the absence of a static error and a minimum flow time. At the same time, the quality of transient processes essentially depends on the type of input signals: a step signal, a linearly varying signal, or a signal of any other type.

In addition, in the article, using a typical calculation methodology, the synthesis of a digital controller is presented in such a way that it provides a satisfactory transient process simultaneously with both jump-like and linearly varying signals. This result was achieved by introducing a special weighting factor.

The article also shows that it is possible, in principle, to synthesize digital controllers that provide aperiodicity of transient processes for control objects not only of the second order, but also of higher orders, as well as for input signals of other types (for example, changing according to a parabolic or harmonic law).

Ключові слова: аперіодичність, об'єкт керування, перерегулювання, статична помилка, технологічний процес, цифровий регулятор.
Keywords: aperiodicity, control object, overshoot, static error, technological process, digital controller.

Багато технологічних процесів у різних галузях промисловості полягають у підтриманні різних технологічних параметрів (таких як температура, тиск, рівень, витрата і так далі) або на заданому рівні, або згідно з певним законом. Зміна таких параметрів залежно від часу, тобто перехідні процеси, у більшості випадків повинна здійснюватися або без перерегулювання, або з невеликим перерегулюванням (не більше кількох відсотків). Автоматизовані системи керування, які призначені для керування такими технологічними процесами, часто мають назву систем з мінімальним часом перехідного процесу (або систем, оптимальних за швидкодією) [1].

Наявність перерегулювання вказує на таке. По-перше, це те, що технологічні параметри можуть виходити за допустимі діапазони (наприклад, об'єкт керування може перегрітися або переохолодитися). По-друге, це те, що в перехідному процесі є коливальність — тобто технологічний параметр спочатку збільшується, потім трохи зменшується, потім знову трохи збільшується і так далі. У багатьох випадках наявність перерегулювання, особливо достатньо великого (кілька десятків відсотків), є недопустимим.

Мета цієї статті полягає в тому, щоби для типових передатних функцій об'єктів керування різних галузей промисловості визначити алгоритм синтезу цифрових регуляторів у такий спосіб, щоби вони забезпечували повністю аперіодичні перехідні процеси або аперіодичні перехідні процеси з невеликим перерегулюванням за вхідних впливів у виді ступінчатого або лінійно-змінюваного сигналу. При цьому синтезовані цифрові регулятори повинні бути мати нульову статичну помилку, мати мінімально можливу тривалість перехідних процесів і бути такими, щоби їх можна було фізично реалізувати [2]. Оскільки нулі і полюси дискретної передаткової функції неперервного об'єкта керування на практиці можна визначити лише приблизно, то отримані перехідні процеси також будуть не ідеальними, а з невеликими похибками (псевдоідеальними) [2].

Розглянемо типову структурну схему побудови автоматизованої системи керування технологічним процесом за використання цифрового регулятора (рис. 1). До складу такої системи входять цифровий регулятор з дискретною передатковою функцією $C(z)$, фіксатор з неперервною передатковою функцією $H(s)$ і об'єкт керування з неперервною передатковою функцією $W(s)$. На вхід надходить сигнал $x_{\text{вх}}(t)$, а на виході отримується сигнал $x_{\text{вих}}(t)$. Різниця між сигналами $x_{\text{вх}}(t)$ і $x_{\text{вих}}(t)$ представляє собою розузгодження $\varepsilon(t)$.

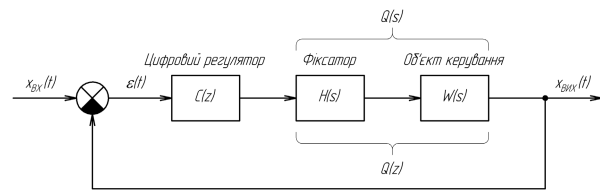


Рис. 1. Структурна схема автоматизованої системи керування

Fig. 1. Block diagram of the automated control system

Отже, z -перетворення розузгодження $\varepsilon(t)$ матиме такий вид:

$$\varepsilon(z) = x_{\text{вх}}(z) - x_{\text{вих}}(z) = \frac{x_{\text{вх}}(z)}{1 + C(z)Q(z)} = x_{\text{вх}}(z)(1 - \Phi(z)), \quad (1)$$

де $\Phi(z)$ — передаткова функція автоматизованої системи керування у замкненому стані. Вона має такий вид:

$$\Phi(z) = \frac{C(z)Q(z)}{1 + C(z)Q(z)}. \quad (2)$$

Із формули (2) також можна отримати, що

$$C(z) = \frac{1}{Q(z)} \frac{\Phi(z)}{1 - \Phi(z)}. \quad (3)$$

Оскільки в автоматизованій системі керування застосовується цифровий регулятор, то вимірювання вхідних і формування вихідних сигналів необхідно виконувати з періодом дискретизації T (який під час роботи такої системи переважно є незмінним) в моменти часу kT , де $k = 0, 1, 2, \dots$. Вхідні сигнали автоматизованих систем керування (наприклад, таких, які працюють у режимі слідкування) зазвичай представляють собою сигнали, які змінюються або стрибкоподібно, або лінійно. Якщо вхідний сигнал таких систем має більш складну форму, то його більшу частину можна представити в виді стрибкоподібних або лінійно-змінюваних функцій.

Стрибкоподібний сигнал виду $x_{\text{вх}}(t) = 1$ має z -перетворення $z/(z-1)$, а лінійно-змінюваний сигнал виду $x_{\text{вх}}(t) = t$ — z -перетворення $Tz/(z-1)^2$. Якщо зробити припущення, що $(z-1)\varepsilon(z)/z$ не має полюсів у області $1 \leq |z|$ й існує скінченне значення послідовності $\{\varepsilon[k]\}$, то, згідно з теоремою про кінцеве значення, воно може бути отримано у такий спосіб [3, 4]:

$$\begin{aligned} \lim_{k \rightarrow \infty} \{\varepsilon[k]\} &= \lim_{z \rightarrow 1} \left(\frac{z-1}{z} \right) \varepsilon(z) = \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} \left(\frac{z-1}{z} \right) \frac{x_{\text{вх}}(z)}{(1 + C(z)Q(z))} = \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} \left(\frac{z-1}{z} \right) x_{\text{вх}}(z) (1 - \Phi(z)). \end{aligned} \quad (4)$$

Оскільки z -перетворення від стрибкоподібних і лінійно-змінюваних сигналів $x_{\text{BX}}(t)$ не утримують нулів $z = 1$, то для того, щоби для вхідного сигналу $x_{\text{BX}}(t) = 1$ виконувалася умова:

$$\lim_{z \rightarrow 1} \left(\frac{z-1}{z} \right) x_{\text{BX}}(z) (1 - \Phi(z)) =$$

$$= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z}{z-1} (1 - \Phi(z)) = 0, \quad (5)$$

а для вхідного сигналу $x_{\text{BX}}(t) = t$ виконувалася умова:

$$\lim_{z \rightarrow 1} \left(\frac{z-1}{z} \right) x_{\text{BX}}(z) (1 - \Phi(z)) =$$

$$= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{T}{z-1} (1 - \Phi(z)) = 0, \quad (6)$$

необхідно, відповідно, щоби множник $1 - \Phi(z)$ утримував складові $(z - 1)/z$ і $(z - 1)^2/z^2$. Тоді для цих вхідних сигналів повинні виконуватися, відповідно, умови

$$1 - \Phi(z) = \frac{z-1}{z} P(z) \quad (7)$$

і

$$1 - \Phi(z) = \frac{(z-1)^2}{z^2} P(z), \quad (8)$$

де $P(z)$ — поліном від змінної $1/z$. Звідси для стрибкоподібних і лінійно-змінюваних сигналів $x_{\text{BX}}(t)$ отримаємо, відповідно, що

$$\Phi(z) = \frac{z - (z-1)P(z)}{z} \quad (9)$$

і

$$\Phi(z) = \frac{z^2 - (z-1)^2 P(z)}{z^2}. \quad (10)$$

Підставляючи формули (9) і (10) у формулу (1), можна отримати, що

$$\varepsilon(z) = P(z), \quad (11)$$

і

$$\varepsilon(z) = \frac{T}{z} P(z). \quad (12)$$

Як показано в [2], для стрибкоподібних і лінійно-змінюваних сигналів $x_{\text{BX}}(t)$ можна прийняти, що $P(z) = 1$. Підставляючи цей вираз у формули (9) і (10), для таких сигналів можна отримати, що

$$\Phi(z) = 1/z \quad (13)$$

і

$$\Phi(z) = (2z-1)/z^2. \quad (14)$$

Звідси для таких сигналів

$$C(z) = \frac{1}{Q(z)} \frac{1}{1 - \frac{1}{z}} = \frac{1}{Q(z)} \frac{1}{z-1} \quad (15)$$

і

$$C(z) = \frac{1}{Q(z)} \frac{\frac{2z-1}{z^2}}{1 - \frac{2z-1}{z^2}} = \frac{1}{Q(z)} \frac{2z-1}{z^2 - 2z + 1}. \quad (16)$$

Отже, для отримання аперіодичного перехідного процесу, за стрибкоподібного вхідного сигналу $x_{\text{BX}}(t)$, необхідно дискретну передаткову

функцію $\Phi(z)$ автоматизованої системи керування в замкненому стані (див. формулу (13)) за відомої дискретної передаткової функції $Q(z)$ неперервної частини цієї системи підставити у формулу (3), отримавши у такий спосіб дискретну передаткову функцію $C(z)$ цифрового регулятора. Для лінійно-змінюваних вхідних сигналів алгоритм синтезу передаткової функції $C(z)$ цифрового регулятора є таким же, але замість передаткової функції (13) повинна використовуватися передаткова функція (14).

ОСНОВНИЙ ТЕКСТ СТАТТІ

Розглянемо об'єкт керування, який має аперіодичну передаткову функцію $W(s)$ 2-го порядку. Як такий об'єкт може виступати плавильна піч, сушильна камера, екструдер і так далі. Припустимо, що його передаткова функція $W(s)$ має такий вид [5—10]:

$$W(s) = \frac{1}{(25s+1)(5s+1)}, \quad (17)$$

де сталі часу 25 і 5 задаються у хвилинах. Припустимо, що як фіксатор застосовується фіксатор нульового порядку, — отже, його передаткова функція $H(s)$ матиме такий вид:

$$H(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s}. \quad (18)$$

Оберемо період дискретизації T меншим в десять раз, ніж найменша із сталих часу об'єкта керування: отже, приймемо, що $T = 0,5$ хв. Відтак, передаткова функція $Q(s)$ неперервної частини автоматизованої системи керування матиме такий вид:

$$Q(s) = H(s)W(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s(25s+1)(5s+1)}. \quad (19)$$

Виконавши над нею дискретне перетворення, отримаємо дискретну передаткову функцію $Q(z)$ неперервної частини автоматизованої системи керування:

$$Q(z) = \frac{z-1}{z} Z\{Q(s)\} = \frac{z-1}{z} Z\{H(s)W(s)\} =$$

$$= \frac{z-1}{z} Z\left\{ \frac{1 - e^{-Ts}}{s(25s+1)(5s+1)} \right\} =$$

$$= \frac{z-1}{z} Z\left\{ \frac{1,25(1 - e^{-Ts})}{s(25s+1)} \right\} - \frac{z-1}{z} Z\left\{ \frac{0,25(1 - e^{-Ts})}{s(5s+1)} \right\} = \quad (20)$$

$$= \frac{0,024752}{z - 0,980199} - \frac{0,023791}{z - 0,904837} =$$

$$= \frac{0,000961z + 0,000923}{z^2 - 1,885036z + 0,886920}.$$

Отже, для стрибкоподібного вхідного сигналу $x_{\text{BX}}(t)$ аперіодичний перехідний процес буде за умови, коли

$$C(z) = \frac{z^2 - 1,885036z + 0,886920}{(0,000961z + 0,000923)(z-1)} = \frac{z^2 - 1,885036z + 0,886920}{0,000961z^2 - 0,000038z - 0,000923}, \quad (21)$$

а для лінійно-змінюваного — за умови, коли

$$C(z) = \frac{(z^2 - 1,885036z + 0,886920)(2z-1)}{(0,000961z + 0,000923)(z^2 - 2z + 1)} = \frac{2z^3 - 4,770072z^2 + 3,658877z - 0,886920}{0,000961z^3 - 0,000999z^2 - 0,000886z + 0,000923}. \quad (22)$$

Результати моделювання в пакеті *Simulink* наведено на рис. 2—5. Із цих результатів видно, що цифровий регулятор (згідно з формулою (21)) забезпечує повністю аперіодичний перехідний процес з нульовою статичною помилкою за стрибкоподібного вхідного сигналу $x_{BX}(t)$ (рис. 2). За лінійно-змінюваного вхідного сигналу $x_{BX}(t)$ (рис. 3) перехідний процес також є аперіодичним, але статична помилка присутня.

Аналогічно до цього, цифровий регулятор (згідно з формулою (22)) забезпечує повністю аперіодичний перехідний процес з нульовою статичною помил-

кою за лінійно-змінюваного вхідного сигналу $x_{BX}(t)$ (рис. 4). За стрибкоподібного вхідного сигналу $x_{BX}(t)$ статична помилка також є нульовою, але перерегулювання становить не менше (10...12) % (рис. 5).

Основним недоліком цифрового регулятора, розрахованого як згідно з формулою (21), так і згідно з формулою (22), є те, що він забезпечує повну аперіодичність і нульову статичну помилку тільки для одного виду вхідного сигналу $x_{BX}(t)$: або для стрибкоподібного, або для лінійно-змінюваного. Забезпечити наведені вище властивості перехідних процесів одночасно для сигналів різних видів не вдається. Але можна, використовуючи введення спеціального вагового коефіцієнта α в діапазоні від -1 до 1 , забезпечити як для стрибкоподібних, так і для лінійно-змінюваних сигналів $x_{BX}(t)$ синтез такого цифрового регулятора, щоби він забезпечував одночасно і незначне перерегулювання, і незначну статичну помилку [2]. Це досягається заміною передаткової функції $\Phi(z)$ автоматизованої системи керування у замкненому стані на аналогічну їй модифіковану передаткову функцію $\Phi_{\text{МОД}}(z)$ згідно з таким виразом:

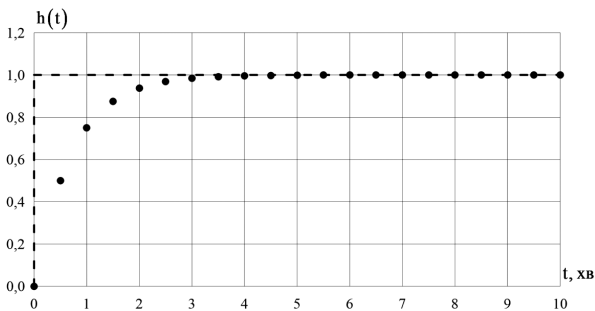


Рис. 2. Перехідний процес за стрибкоподібного вхідного сигналу (настроювання цифрового регулятора — згідно з формулою (21))

Fig. 2. Transition process with abrupt input signal (setting the digital controller — according to formula (21))

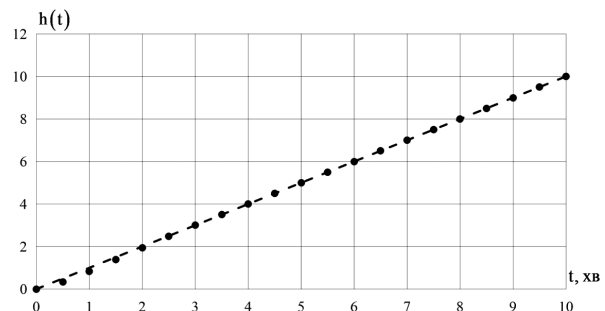


Рис. 4. Перехідний процес за лінійно-змінюваного вхідного сигналу (настроювання цифрового регулятора — згідно з формулою (22))

Fig. 4. The transient process with a linearly variable input signal (setting the digital controller — according to formula (22))

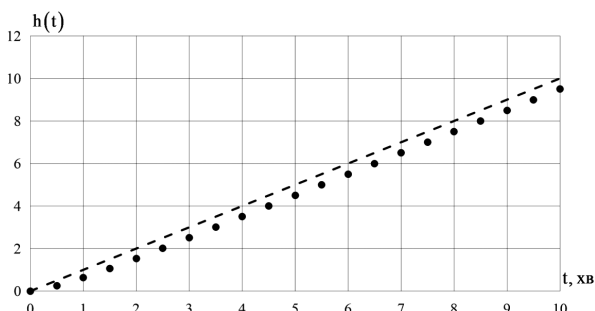


Рис. 3. Перехідний процес за лінійно-змінюваного вхідного сигналу (настроювання цифрового регулятора — згідно з формулою (21))

Fig. 3. Transient process with a linearly variable input signal (setting the digital controller — according to formula (21))

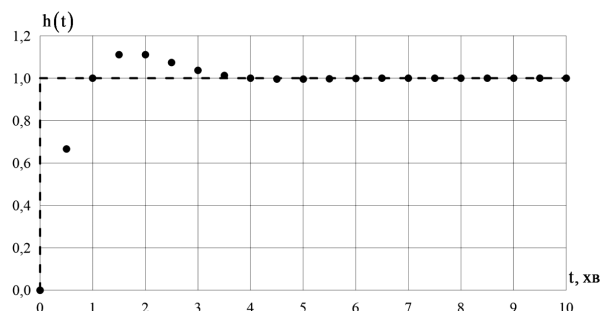


Рис. 5. Перехідний процес за стрибкоподібного вхідного сигналу (настроювання цифрового регулятора — згідно з формулою (22))

Fig. 5. Transient process with abrupt input signal (digital controller setting — according to formula (22))

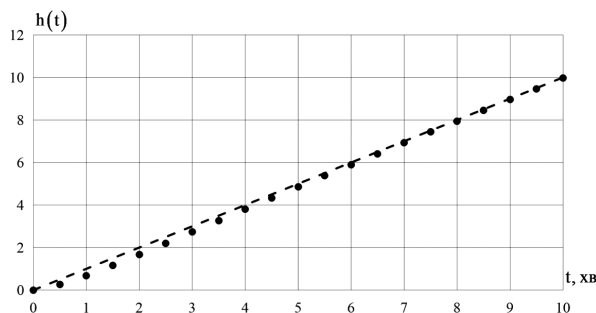


Рис. 6. Перехідний процес за лінійно-змінюваного вхідного сигналу (настроювання цифрового регулятора — згідно з формулою (27))
 Fig. 6. The transient process with a linearly variable input signal (setting the digital controller — according to formula (27))

$$\Phi_{\text{мод}}(z) = \frac{z\Phi(z) - \alpha}{z - \alpha} \quad (23)$$

Зокрема, для стрибкоподібних сигналів $x_{\text{вх}}(t)$ можна отримати, що

$$\Phi_{\text{мод}}(z) = \frac{1 - \alpha}{z - \alpha}, \quad (24)$$

а для лінійно-змінюваних — що

$$\Phi_{\text{мод}}(z) = \frac{(2 - \alpha)z - 1}{z^2 - \alpha z}. \quad (25)$$

Звідси для таких сигналів

$$C(z) = \frac{1}{Q(z)} \frac{\frac{1 - \alpha}{z - \alpha}}{1 - \frac{1 - \alpha}{z - \alpha}} = \frac{1}{Q(z)} \frac{1 - \alpha}{z - 1} \quad (26)$$

і

$$C(z) = \frac{1}{Q(z)} \frac{(2 - \alpha)z - 1}{z^2 - \alpha z} = \frac{1}{Q(z)} \frac{(2 - \alpha)z - 1}{z^2 - 2z + 1}. \quad (27)$$

Наприклад, за $\alpha = 0,85$ цифровий регулятор (згідно з формулою (27)) також забезпечує повністю апе-

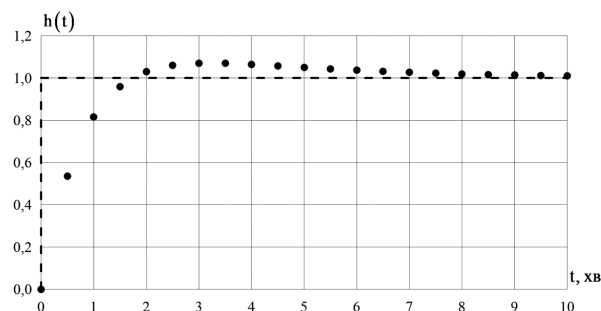


Рис. 7. Перехідний процес за стрибкоподібного вхідного сигналу (настроювання цифрового регулятора — згідно з формулою (27))
 Fig. 7. Transition process with abrupt input signal (setting the digital controller — according to formula (27))


ріодичний перехідний процес з нульовою статичною помилкою за лінійно-змінюваного вхідного сигналу $x_{\text{вх}}(t)$ (рис. 6), але за стрибкоподібного вхідного сигналу перерегулювання зменшується до (6...8) % (рис. 7). Отже, експериментально підбираючи коефіцієнт α в діапазоні від -1 (більш коливальний режим) до 1 (більш аперіодичний режим), можна синтезувати цифровий регулятор так, щоб автоматизована система керування реагувала на різні вхідні впливи у потрібний спосіб. Такий підхід до синтезу цифрових регуляторів може бути застосовний і за інших вхідних впливів: наприклад, виду $x_{\text{вх}}(t) = t^2$.

ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

Наведений підхід до синтезу цифрових регуляторів дозволяє отримувати аперіодичні (або з невеликим перерегулюванням) перехідні процеси, в яких відсутня статична помилка і які мають близький до мінімального час перебігу, для різних видів вхідних сигналів. Проведене в пакеті *Simulink* моделювання підтверджує правильність аналітичних розрахунків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Поляков К.Ю. (2012) Основы теории цифровых систем управления: Учеб. пособие / К.Ю. Поляков. — СПб.: Изд-во СПбГМУ (Polyakov K.Yu. (2012). Fundamentals of the theory of digital control systems: Textbook [Osnovy teorii tsifrovyykh sistem upravleniya: Ucheb. posobie]. SPb.: Publishing house SPbGMTU [in Russian].). — 154 с/р.
2. Куо Б. (1986) Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер. с англ. / Б. Куо. — М.: Машиностроение (Kuo B. (1986). Theory and design of digital control systems: Translated from English [Teoriya i proektirovanie tsifrovyykh sistem upravleniya: Per. s angl.]. М.: Mechanical Engineering [in Russian]). — 448 с/р., ил.
3. Григорьев В.В. (2019) Цифровые системы управления: Учебное пособие / В.В. Григорьев, С.В. Быстров, В.И. Бойков, Г.И. Болтунов, О.К. Мансурова. — СПб: Университет ИТМО (Grigoriev V.V., Bystrov S.V., Boykov V.I., Boltunov G.I., & Mansurov O.K. (2019). Digital control systems: A study guide [Tsfroyve sistemy upravleniya: Uchebnoe posobie]. SPb: ITMO University [in Russian]). — 133 с/р.
4. Григорьев В.В. (1983) Синтез дискретных регуляторов при помощи ЭВМ / В.В. Григорьев, В.Н. Дроздов, В.В. Лаврентьев, А.В. Ушаков. — Л.: Машиностроение (Grigoriev V.V., Drozdov V.N., Lavrentiev V.V., & Ushakov A.V. (1983). Synthesis of discrete controllers using a computer [Sintez diskretnyykh regulyatorov

- pri pomoshchi EVM]. L.: Mechanical engineering [in Russian]). — 245 с/р.
5. Олссон Г. (2001) Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Д. Пиани. — 3-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Невский Диалект (Olsson G., & Piani D. (2001). Digital automation and control systems [Tsifrovye sistemy avtomatizatsii i upravleniya]. SPb.: Nevsky Dialect [in Russian]). — 557 с/р.
 6. Ту Ю.Т. (2004) Цифровые и импульсные системы автоматического управления: Пер. с англ. / Ю.Т. Ту; Под ред. В.В. Солодовникова. — М.: Машиностроение (Tu Yu.T. (2004). Digital and pulse automatic control systems: Translation from English [Tsifrovye i impulsnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya: Per. s angl.]. M.: Mechanical Engineering [in Russian]). — 703 с/р.
 7. Розенвассер Е.Н. (2005) Линейная теория цифрового управления в непрерывном времени / Е.Н. Розенвассер. — М.: Наука (Rosenwasser E.N. (2005). Linear theory of digital control in continuous time [Lineynaya teoriya tsifrovogo upravleniya v nepreryvnom vremeni]. M.: Science [in Russian]). — 125 с/р.
 8. Гайдук А.Р. (2018) Анализ и аналитический синтез цифровых систем управления [Электронный ресурс]: Монография / А.Р. Гайдук, Е.А. Плаксиенко. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань (Gaiduk A.R., & Plaksienko E.A. (2018). Analysis and analytical synthesis of digital control systems: Monograph [Analiz i analiticheskiy sintez tsifrovyykh sistem upravleniya: Monografiya]. SPb.: Lan [in Russian]). — 272 с. — Режим доступа (Access mode): <https://e.lanbook.com/book/107282>.
 9. Гаврилов Е.Б. (2010) Цифровые системы управления: Сборник задач для индивидуальных заданий [Электронный ресурс]: Учеб. пособие / Е.Б. Гаврилов, Г.В. Саблина. — Новосибирск: Изд-во НГТУ (Gavrilov E.B., & Sablina G.V. (2010). Digital control systems: Collection of tasks for individual assignments: Textbook [Tsifrovyye sistemy upravleniya: Sbornik zadach dlya individualnykh zadaniy: Ucheb. posobie]. Novosibirsk: NSTU Publishing House [in Russian]). — 46 с/р. — Режим доступа (Access mode): <https://rucont.ru/efd/206016>.
 10. Ощепков А.Ю. (2012) Проектирование цифровых систем управления. Теория и моделирование в MATLAB: Учебно-методическое пособие / А.Ю. Ощепков; Перм. гос. нац. иссл. ун-т. — 2-е изд. — Пермь (Oshchepkov A.Yu. (2012). Design of digital control systems: Theory and modeling in MATLAB: Study guide [Proektirovanie tsifrovyykh sistem upravleniya: Teoriya i modelirovanie v MATLAB: Uchebno-metodicheskoe posobie]. Perm: Perm state national research university [in Russian]). — 138 с/р.
 11. Григорьев В.В. (2013) Проектирование регуляторов для стохастических систем и объектов с неопределёнными параметрами / В.В. Григорьев, С.В. Быстров, В.И. Бойков, Г.И. Болтунов, А.Н. Коровьяков, О.К. Мансурова, И.М. Першин. — СПб: НИУ ИТМО (Grigoriev V.V., Bystrov S.V., Boykov V.I., Boltunov G.I., Korovyakov A.N., Mansurova O.K., & Pershin I.M. (2013). Designing controllers for stochastic systems and objects with undefined parameters [Proektirovanie regulyatorov dlya stokhasticheskikh sistem i obektov s neopredelennymi parametrami]. SPb.: ITMO University [in Russian]). — 172 с/р.
 12. Бойков В.И. (2018) Цифровая техника систем управления: Учебное пособие / В.И. Бойков, Г.И. Болтунов, С.В. Быстров, В.В. Григорьев, Ю.В. Литвинов. — СПб.: Университет ИТМО (Boikov V.I., Boltunov G.I., Bystrov S.V., Grigoriev V.V., & Litvinov Yu.V. (2018). Digital technology of control systems: Textbook [Tsifrovaya tekhnika sistem upravleniya: Uchebnoe posobie]. SPb.: ITMO University [in Russian]). — 139 с/р. 

Отримано / received: 25.08.2020.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В.Б. Кисельовим (Україна).
 Prof. V.B. Kyseliov, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.