

УДК 62-50

С. А. Бобриков, Е. Д. Пичугин, кандидаты техн. наук

### ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ДОЗАТОРОМ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

**Аннотация.** Рассмотрен метод расчета цифрового регулятора для непрерывного ленточного дозатора сыпучих материалов. Регулятор обеспечивает в системе управления астатизм второго порядка. Показателями качества выбраны максимальное перерегулирование переходной характеристик и максимальное ускорение ленты. В регуляторе использован блок деления скорости движения ленты на массу дозируемого материала, находящегося на ленте, что исключает влияние массы на динамику системы управления. Проведены исследования системы на модели в программном пакете MATLAB-Simulink.

**Ключевые слова:** система управления, дозатор, передаточные функции непрерывная и дискретная, преобразование передаточных функций, характеристическое уравнение, показатели качества, квантование сигнала по времени

S. O. Bobrikov, PhD., E. D. Pichugin, PhD.

### DIGITAL CONTROL SYSTEM OF CONTINUOUS METERING DEVICE OF FRIABLE MATERIALS CONTROL

**Abstract.** The method of digital regulator calculation is considered for the continuous band metering device of friable materials. A regulator provides an astatism the second order in control system. The indexes of quality are chosen to be: maximal over regulation in transitional description and maximal acceleration of ribbon. In a regulator, the block of ribbon movement rate division is used on mass of the measured out material, being on a ribbon, that eliminates influence of mass on the dynamics of control system. Researches of the system are conducted on a model in the MATLAB - Simulink program package.

**Keywords:** control system, metering device, transmission functions continuous and discrete, transformation of transmission functions, characteristic equalization, indexes of quality, quantum of signal at times

С. О. Бобриков, Е. Д. Пичугин, кандидаты техн. наук

### ЦИФРОВА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БЕЗПЕРЕРВНИМ ДОЗАТОРОМ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

**Анотація.** Розглянуто метод розрахунку цифрового регулятора для безперервнострічкового дозатора сипких матеріалів. Регулятор забезпечує в системі керування астатизм другого порядку. Показники якості вибрані максимальне перерегулювання перехідної характеристики і максимальне прискорення стрічки. У регуляторі використано блок ділення швидкості руху стрічки на масу матеріалу, який знаходиться на стрічці, що виключає вплив маси на динаміку системи керування. Проведені дослідження системи на моделі в програмному пакеті MATLAB - Simulink.

**Ключові слова:** система керування, дозатор, передавальні функції безперервна і дискретна, перетворення передавальних функцій, характеристичне рівняння, показники якості, квантування сигналу за часом

**Введение.** Непрерывные дозаторы сыпучих материалов широко используются в различных технологических процессах, например, в стекольной промышленности, при производстве цемента и т.д. [1].

Необходимость использования подобных дозаторов возникает в тех случаях, когда требуется для получения нужного продукта обеспечить смешивание различных компонентов в строго заданных пропорциях. Известны различные конструкции дозаторов, в частности ленточные дозаторы, в которых производительность регулируется путем изменения скорости движения транспортной ленты. В данной статье рассмотрен метод

расчета цифрового регулятора ленточного дозатора подобного типа.

Упрощенная функциональная схема системы управления ленточного дозатора приведена на рис.1, где введены следующие обозначения: ПБ – подающий бункер; ТЛ – транспортная лента; МП – массоизмерительная площадка; ДМ – датчик массы; БС – блок сравнения; Р – регулятор; УМ – усилитель мощности; Д – двигатель; ДС – датчик скорости; БУ – блок умножения;  $Q_0$  – входной сигнал (заданная производительность дозатора);  $Q_y$  – выходной сигнал (текущая производительность);  $Q_x$  – ошибка регулирования. На вход системы подается сигнал, пропорциональный заданной величине производительности дозатора  $Q_0$  [кгс<sup>-1</sup>]. На выхо-

© Бобриков С.А., Пичугин Е.Д., 2014

де системы – сигнал, пропорциональный текущей производительности дозатора  $Q_y$  [кгс<sup>-1</sup>]. В блоке сравнения определяется ошибка управления  $Q_x = Q_0 - Q_y$ . Сигнал ошибки подается на регулятор и далее через усилитель мощности на двигатель. Под лентой установлена массоизмерительная площадка. Масса груза, находящегося на площадке, измеряется датчиком массы. Сигнал, пропорциональный массе груза на площадке, подается на блок умножения, на который подается также сигнал, пропорциональный скорости движения ленты  $V$  [мс<sup>-1</sup>]. На выходе блока умножения получается сигнал, равный произведению скорости движения ленты на массу материала на массоизмерительной площадке  $M$  [кг×м<sup>-1</sup>], пропорциональный производительности дозатора  $Q_y = kVM$ .

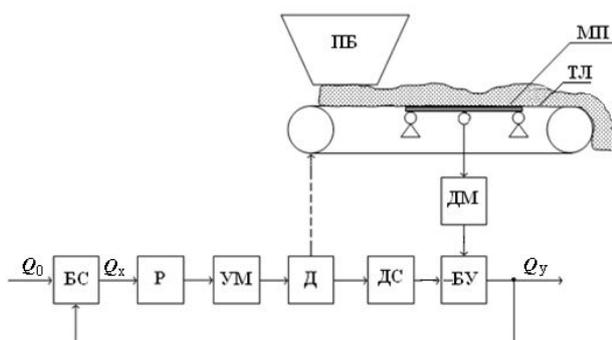


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема системы управления непрерывного ленточного дозатора

В ряде производств к системе управления дозатором предъявляются высокие требования: отсутствие ошибки управления в установившихся режимах, равенство нулю интегральной ошибки в переходных процессах, сведение к минимуму динамических ошибок в переходных процессах. Известны системы управления подобными дозаторами, в которых для выполнения необходимых показателей качества используется принцип адаптивного управления [2,3,4,6]. Это довольно сложные системы. В качестве регулятора в них использован стандартный ПИД-регулятор.

Однако, как показано в [4], чтобы свести к нулю установившиеся ошибки и интегральные ошибки в переходных процессах, необходимо использовать систему управления с астатизмом второго порядка.

Стандартный ПИД-регулятор не может обеспечить астатизм второго порядка в случае, если объект управления не обладает интегрирующими свойствами, что имеет место в рассматриваемых дозаторах. Это обстоятельство и привело к необходимости использовать адаптивный принцип управления [6].

**Цель работы.** В данной статье рассмотрен метод расчета цифрового регулятора непрерывного ленточного дозатора, который обеспечивает решение задач, предъявляемых к системе управления дозатором по точности управления, без использования адаптивного принципа управления.

**Содержание работы.** Для обеспечения высокой точности работы дозатора регулятор выполняется таким, чтобы система имела астатизм второго порядка, как по управлению, так и по возмущающему воздействию. Отметим, что если система состоит из регулятора, содержащего два последовательно включенных интегратора, и объекта управления, не обладающий интегрирующими свойствами, то такая система имеет астатизм второго порядка по задающему воздействию. Кроме того такая система имеет астатизм второго порядка и по отношению к возмущающему воздействию, приложенному к объекту управления, так как объект расположен после интеграторов [9].

Регулятор, обеспечивающий астатизм второго порядка, должен содержать два интегрирующих звена, включенных последовательно. Из стандартных регуляторов таким является ПИ<sup>2</sup>-регулятор. В данной статье за основу принят цифровой регулятор для системы с астатизмом второго порядка, описанный в [7].

Особенностью метода расчета регулятора, описанного в [7], является то, что вначале определяется передаточная функция аналогового регулятора, а затем непрерывная передаточная функция регулятора преобразуется в дискретную [8].

На рис.2 приведена структурная схема аналоговой системы управления дозатором. Здесь приняты следующие обозначения:  $K_p(p)$  – передаточная функция аналогового регулятора;  $K_y(p)$  – передаточная функция

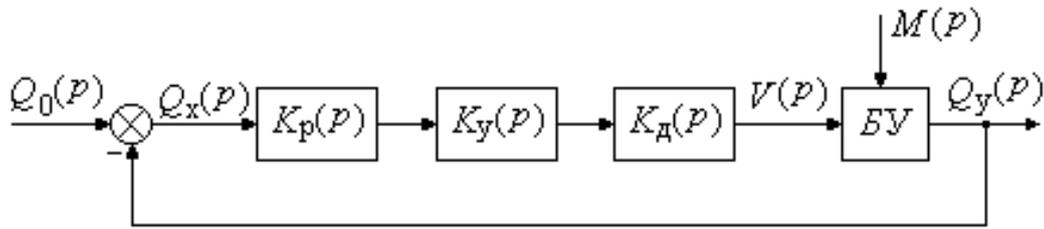


Рис.2. Структурная схема аналоговой системы регулирования

усилителя мощности;  $K_d(p)$  – передаточная функция двигателя (с учетом редуктора и транспортной ленты с грузом);  $V(p)$  – скорость движения транспортной ленты;  $M(p)$  – масса груза на массоизмерительной площадке; БУ – блок умножения.

Согласно методу, описанному в [7], передаточную функцию регулятора определяем таким образом, чтобы выполнялось следующее условие:

$$K_p(p)K_y(p)K_d(p) = \frac{Tp + 1}{p^2}. \quad (1)$$

Постоянная времени  $T$  в формуле (1) определяет показатели качества системы управления: максимальное перерегулирование в переходной характеристике и максимальную скорость изменения выходной величины – в данном случае ускорение движения ленты. Связь между постоянной времени  $T$  и показателями качества системы управления показана на графиках рис.3 [7]. Выбрав какой-либо из указанных показателей качества и задавшись его максимальной допустимой величиной, по графикам рис.3, можно определить величину постоянной времени  $T$ .

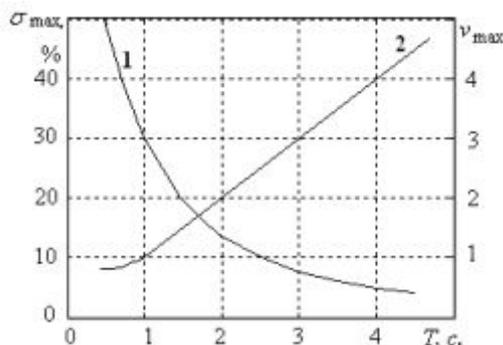


Рис.3. Зависимость максимального перерегулирования  $\sigma_{\max}(1)$  и максимальной скорости изменения выходной величины  $v_{\max}(2)$  от параметра  $T$  в переходной характеристике

Конструкция дозатора и принцип его работы определили ряд особенностей в схеме системы управления и в методе расчета регулятора.

Рассмотрим некоторые особенности системы с регулятором, определенным в соответствии с выражением (1). Упрощенная структурная схема такой системы показана на рис.4.

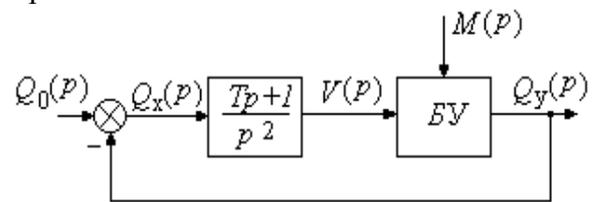


Рис.4. Упрощенная структурная схема системы

Уравнение блока БУ имеет вид:

$$Q_y(p) = M(p)V(p). \quad (2)$$

Подставив в (2)  $V(p) = \frac{Tp + 1}{p^2} Q_x(p)$ , получим

$$Q_y(p) = \frac{Tp + 1}{p^2} Q_x(p)M(p). \quad (3)$$

Учитывая, что  $Q_x(p) = Q_0(p) - Q_y(p)$ , из (3) найдем зависимость между выходным сигналом  $Q_y(p)$  и входным сигналом  $Q_0(p)$  в замкнутой системе:

$$\frac{Q_y(p)}{Q_0(p)} = \frac{(Tp + 1)M(p)}{p^2 + TM(p)p + M(p)}. \quad (4)$$

Правую часть уравнения (4) можно рассматривать как передаточную функцию замкнутой системы, а её знаменатель – как характеристический полином замкнутой системы. Из выражения (4) видно, что величина массы материала на массоизмерительной площадке входит в характеристический полином замкнутой системы, а, следовательно,

влияет на динамические свойства системы управления.

Чтобы исключить влияние массы  $M$ , вводим в структуру регулятора блок деления на эту массу  $M$  (рис.5).

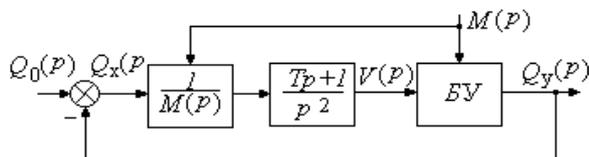


Рис. 5. Упрощенная структурная схема системы управления дозатором, с блоком деления сигнала ошибки на сигнал массы

Определим связь между входным задающим и выходным сигналами в системе по рис. 5:

$$\begin{aligned} Q_y(p) &= V(p)M(p); \\ V(p) &= \frac{Tp+1}{p^2} \frac{1}{M(p)} Q_x(p); \\ Q_x(p) &= Q_0(p) - Q_y(p). \end{aligned} \quad (5)$$

Решив совместно уравнения (5), получим

$$\frac{Q_y(p)}{Q_0(p)} = \frac{Tp+1}{p^2 + Tp+1}.$$

Из последнего выражения видно, что величина массы не влияет на динамические свойства системы, что обеспечивает работу дозатора в расчетном режиме независимо от величины массы в каждый момент времени.

Отметим, что в схеме рис.5 скорость движения ленты с грузом  $V(p)$  зависит от массы груза  $M$  (чем больше масса, тем меньше скорость), а выходная величина системы – производительность дозатора  $Q_y(p)$  при изменении массы не меняется и остаётся равной заданной величине (в установившемся режиме).

**Пример.** Предположим, что параметры заданной части системы равны:  $T_d=0,15$ с,  $T_y=0,001$ с,  $K_yK_d=1$ .

Примем условие: максимальное перерегулирование в переходной характеристике не превышает 10%. По графикам рис.3 определяем:  $T=2,5$ с. Постоянная времени усилителя мощности величина малая по сравнению с постоянной времени двигателя, поэтому ею

можно пренебречь. Используя условие (1), определим передаточную функцию непрерывного регулятора

$$K_p(p) = \frac{(2,5p+1)(0,15p+1)}{p^2}. \quad (6)$$

Для определения дискретной передаточной функции цифрового регулятора в выражение (6) подставляем

$$p = \frac{2(z-1)}{T_0(z+1)}.$$

Величину шага квантования принимаем  $T_0=0,01$  с [8]. Полученная при этом дискретная передаточная функция имеет следующий вид:

$$K(z) = \frac{s_2 z^2 + s_1 z + s_0}{g_2 z^2 + g_1 z + g_0},$$

где  $s_2=1,5531$ ;  $s_1=-2,9998$ ;  $s_0=1,4471$ ;  $g_2=4$ ;  $g_1=-8$ ;  $g_0=4$ .

Для исследования динамических свойств системы было проведено моделирование в программном пакете MATLAB-Simulink [11]. Схема модели системы приведена на рис.6. На вход системы подается единичный ступенчатый сигнал  $Q_0=1(t)$ . Масса материала на массоизмерительной площадке моделируется блоком step. Начальное значение массы равно 1,5. Через 10 с после начала моделирования масса скачком изменяется до 0,5. Результат моделирования приведен на рис.7. На графиках рис.7 видно, что при уменьшении массы (график 2) увеличивается скорость движения ленты (график 3), при этом производительность (график 1) в установившемся режиме равна заданной величине – 1. Определим величины перерегулирования выходного параметра системы  $Q_y$  (кривая 1) в начале процесса – интервал времени от 0 до 10с, во второй части процесса – от 10с до установившегося значения.

Максимальное перерегулирование определяем по формуле[9]

$$\sigma_{\max} = \frac{y_{\max} - y_{уст}}{y_{уст} - y_{нач}} 100,$$

$y_{\max}$  – максимальное значение;  $y_{уст}$  – установившееся значение;  $y_{нач}$  – начальное значение переходного процесса.

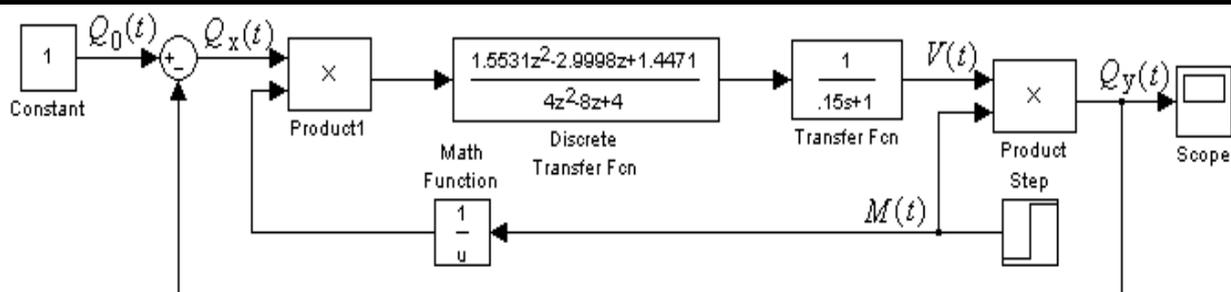


Рис.6. Схема модели системы в пакете Simulink

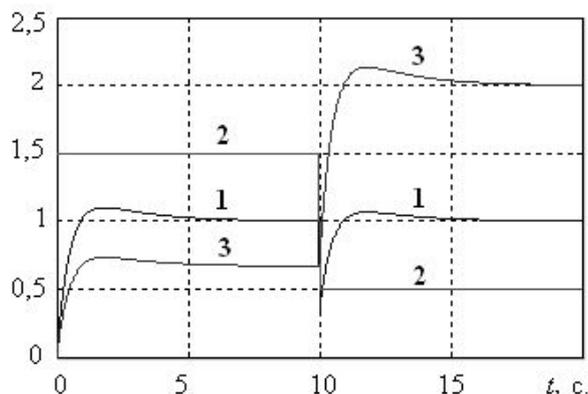


Рис. 7. Переходные характеристики при подаче на вход системы единичного сигнала:  
 1 – сигнал на выходе системы  $Q_y$ ; 2– изменение массы на площадке;  
 3 – изменение скорости движения ленты

На первом участке кривой 1 имеем:

$$y_{\max} = 1,1; \quad y_{уст} = 1; \quad y_{нач} = 0;$$

$$\sigma_{\max 1} = \frac{1,1-1}{1-0} 100 = 10\%.$$

На втором участке кривой 1:

$$y_{\max} = 1,06; \quad y_{уст} = 1; \quad y_{нач} = 0,33;$$

$$\sigma_{\max 1} = \frac{1,06-1}{1-0,33} 100 = 10\%.$$

Отметим, что программа моделирования Simulink позволяет определить величины параметров с достаточно высокой степенью точности, что не отражено на графиках рис. 7.

Результаты моделирования подтверждают, что принятый при расчете регулятора показатель качества (максимальное перерегулирование 10%) выполняется.

### Выводы

Рассмотренный метод расчета позволяет провести расчет цифрового регулятора непрерывного дозатора сыпучих материалов, при котором система управления получает

свойства системы с астатизмом второго порядка, что обеспечивает отсутствие ошибки в установившемся режиме, а также равенство нулю интегральных ошибок, накопленных в переходных режимах.

Метод позволяет провести расчет цифрового регулятора по заданным показателям качества: максимальное перерегулирование в переходном процессе, либо максимальное ускорение транспортерной ленты в переходном процессе, при этом есть возможность проконтролировать величину второго показателя качества.

### Список использованной литературы

1. Видинеев Ю.Д. Автоматическое непрерывное дозирование материалов.– М.-Л.: Энергия, 1965. – 112с.
2. А.С. № 946964 СССР, В 28 с 7/04. Система для управления и автоматического регулирования непрерывным дозированием компонентов смеси /В.И. Голенищев, А.В. Захаров, А.В. Синявский, В.И. Синявский;опубл. БИ №28, 1982.
3. Синицын Б. Н. Современное состо-

яние и тенденции развития весов и дозаторов автоматических непрерывного действия / Б. Н. Сеницын, О. Н. Крюков. – М.: ЦНИИТЭИ приборостроения ТС-7 "Машины и приборы для измерения механических величин" обзорная информация. – 1973. – Вып. 2. – 45 с.

4. Сажин С.Г. Состояние и проблемы автоматизации процессов непрерывного дозирования сыпучих материалов / С.Г. Сажин, И.В. Смирнов // *Современные наукоемкие технологии*. – М.: РАЕ. – 2005. – №11. – С.76 – 77.

5. Сажин С.Г. Синтез функциональной структуры системы управления конвейерным непрерывно-поточным дозатором / С.Г. Сажин, И.В. Смирнов // *Фундаментальные исследования*. – М.: – 2007. – №7. – С.43 – 45.

6. Смирнов И.В. Адаптивная система управления конвейерным непрерывно-поточным дозатором в стекольном производстве: диссертация канд. техн. наук Смирнов Илья Викторович. – Дзержинск, 2007. – 156с.

7. Бобриков С.А. Цифровой регулятор в системе управления с астатизмом второго порядка / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин // *Электротехнические и компьютерные системы*. – К.: Техніка. – 2013. – №12(88). – С.55 – 60.

8. Бобриков С.А. Преобразование непрерывной передаточной функции управляющего устройства в дискретную / С.А. Бобриков, Е.Д. Пичугин // *Электротехнические и компьютерные системы*. – К.: Техніка. – 2013. – №10(86). – С.68 – 72.

9. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1972. – 719 с.

10. Цифровые следящие системы судовой автоматики / [Батоврин А.А., Дашевский П.Г., Лебедев В.Д. и др.]. – Л.: Судостроение, 1972. – 445 с.

11. Краснопрошина А.А. Современный анализ систем управления с применением MATLAB, Simulink, Control System / А.А.

Краснопрошина, Н.Б. Репникова, А.А. Ильченко. – К.: Корнійчук, 1999. – 141с.  
Получено 25.04.2014

1. Vidineev Yu.D. Avtomaticheskoe nepreryvnoe dozirovanie materialov, [Automatic Continuous Dispensing of Materials], (1965), Moscow-Leningrad, Russian Federation, *Energiya Publ.*, 112 с. (In Russian).

2. Golenishchev V. I., Zakharov A. V., Sinyavskii A.V., and Sinyavskii V.I. A. S. No. 946964, SSSR, V. 28, p. 7/04. Sistema dlya upravleniya i avtomaticheskogo regulirovaniya nepreryvnyim dozirovaniem komponentov smesi, (1982), [System for Management and Automatic Control by Continuous Dispensing of mix Components]; AS opubl. BI No. 28 (In Russian).

3. Sinitsyn B.N., Sinitsyn B.N., and Kryukov O.N. Sovremennoe sostoyanie i tendentsii razvitiya vesov i dozatorov avtomaticheskikh nepreryvno go deistviya [Current State and Tendencies of Development of Scales and Batchers Automatic Continuous Action], (1973), *TsNIITEI Priborostroeniya TS-7 "Mashiny i Pribory dlya Izmereniya Mekhanicheskikh Velichin" Obzornaya Informatsiya*, Moscow, Russian Federation, Vol. 2, 45 p. (In Russian).

4. Sazhin S.G., and Smirnov I.V. Sostoyanie i problemy avtomatizatsii protsessov nepreryvno go do-zirovaniya syuchikh materialov [State and Problems of Continuous Dispensing Processes Automation of Bulks], (2005), *Sovremennye Naukoemkie Tekhnologii*, Moscow, Russian Federation, *RAE*, No. 11, pp. 76 – 77 (In Russian).

5. Sazhin S.G., Smirnov I.V. Sintez funktsional'noi struktury sistemy upravleniya konveiernym nepreryvno-potochnym dozatorom, [Synthesis of Functional Structure of Conveyor Continuous and Line Batch Control System], (2007), *Fundamental'nye Issledovaniya*, Moscow, Russian Federation, No. 7, pp. 43 – 45 (In Russian).

6. Smirnov I.V. Adaptivnaya sistema upravleniya konveiernym nepreryvno-potochnym dozatorom v stekol'nom proizvodstve: dissertatsiya kand. tekhn. nauk Smirnov Ilya Viktorovich, [Adaptive Control System of the Conveyor Continuous and Line Batch in a Glass Production: Ph.D. Dissertation. tehn. Ilya V. Smirnov Sciences], 2007, Dzerzhinsk, Russian Federation, 156 p. (In Russian).

7. Bobrikov S.A., and Pichugin E.D. Tsifrovoy regulyator v sisteme upravleniya s astatizmom vtorogo poryadka [The digital Regulator in a Control System with Astatism of the Second Order], (2013), *Elektrotekhnicheskie i Komp'yuternye Sistemy*, Kiev, *Tekhnika*, No. 12 (88), pp. 55 – 60 (In Russian).

8. Bobrikov S.A., and Pichugin E.D. Preobrazovanie ne-preryvnoi peredatochnoi funktsii upravlyayushchego ustroystva v diskretnuyu, [Transformation of Continuous Transfer Function of the Actuation Device to the Discrete], (2013), *Elektrotekhnicheskie i Komp'yuternye Sistemy*, Kiev, Ukraine, *Tekhnika*, No. 10 (86), pp. 68 – 72 (In Russian).

9. Besekerskii V.A., and Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya, [Theory of Automatic Control Systems], (1972), Moscow, Russian Federation, *Nauka Publ.*, 719 p. (In Russian).

10. Batovrin A.A., Dashevskii P.G., Lebedev V. D. i dr. Tsifrovye sledyashchie sistemy sudo-voi avtomatiki [Digital Watching System of ship Automatic Equipment], (1972), *Sudostroenie Publ.*, Leningrad, Russian Federation, 445 p. (In Russian).

11. Krasnoproshina A.A., Repnikova N.B., and Il'-chenko A.A. Sovremennyy analiz sistem upravleniya s primeneni-em MATLAB, Simulink, ControlSistem [The Modern Analysis of Control Systems with Application of MATLAB, Simulink, ControlSistem], (1999), Kiev, Ukraine, *Korniichuk Publ.* 141p. (In Russian).



Бобриков Сергей Александрович,  
доц. каф. компьютеризированных систем управления Одесского нац. политехнического ун-та,  
e-mail:  
bobrikov1932@mail.ru



Пичугин Евгений Дмитриевич, проф. каф. компьютеризированных систем управления Одесского нац. политехнического ун-та,  
тел. +38(048)7778045,  
e-mail:  
bobr\_eugen@mail.ru