

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПЬЕЗОАКТЮАТОРА С УЧЕТОМ НЕЖЕСТКОСТИ ОСНОВАНИЯ

В. И. БОЙКОВ, А. И. СМИРНОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: icar08@yandex.ru*

Предложена динамическая модель пьезоактюатора, учитывающая влияние нежесткости основания на перемещение полезной нагрузки. Модель позволяет оценить негативное влияние деформаций на качество функционирования системы управления. На основе полученных результатов средствами компьютерного моделирования выполняются идентификация параметров и анализ качества системы. Принятая схема позволяет выбрать измерительные средства системы и при необходимости выполнить коррекцию закона управления так, чтобы свести к минимуму погрешности функционирования.

Ключевые слова: *пьезоактюатор, управление пьезодвигателем, нано- и микроперемещения, математическая модель пьезопривода, параметры пьезоэлемента, нежесткое основание*

Миниатюрные пьезоактюаторы — приводы измерительных устройств, например, электронных туннельных микроскопов, приводы манипуляторов различных роботов, приводы форсунок в системах впрыска топлива, приводы оптических систем, например, телескопы, состоящие из фрагментированных зеркальных поверхностей, — могут применяться в различных областях техники. Можно заметить, что пьезоприводы зачастую не могут обладать такими силовыми показателями, как обычные электродвигатели. Основное преимущество пьезоэлектрических двигателей — способность позиционирования активной части с высокой (до 1 нм) точностью [1]. Также использование пьезопривода позволяет избежать встраивания в систему преобразователя вращательного движения в поступательное, тем самым снизить массогабаритные показатели системы и увеличить ее износостойкость. Кроме того, пьезоприводы не создают при работе электромагнитных волн, что позволяет использовать их вместе с измерительными приборами, чувствительными к таким воздействиям [2, 3].

В зависимости от решаемой технической задачи ход подвижной части пьезоактюатора обычно составляет от 10 до 200 мкм, а погрешность позиционирования (или разрешающая способность) — от 10 до 200 нм. Высокие точностные характеристики хорошо сочетаются с высокой жесткостью конструкции. Резонансная частота подвижной части привода может достигать несколько десятков килогерц [4—8]. Сочетание небольших перемещений и высокого быстродействия приводит к специфической особенности привода — при малых скоростях исполнительного органа системы возникают ускорения до десятков g. Возникающие в результате силы инерции, приложенные к элементам конструкции привода, вызывают упругие деформации, влияющие на точностные и динамические характеристики системы. Расчеты показывают, что суммарная деформация элементов может достигать нескольких сотен нанометров, т.е. заметно влиять на показатели качества привода [9—12].

В настоящей работе приведена математическая модель динамики пьезопривода, учитывающая упругие деформации основания конструкции. Пьезоактюатор представляет собой двухмассовый электромеханический управляемый объект, состоящий из эквивалентной массы подвижной части пьезопривода эквивалентной массы упруго деформируемого основания. Для достижения лучших эксплуатационных характеристик — точности позиционирования,

линейности, скорости, диапазона перемещения, нагрузочного усилия (момента вращения) необходимо оптимизировать конструкцию пьезоактюатора.

В отличие от пьезоактюатора на жестком основании система с деформируемым основанием (рис. 1) представляет собой последовательное соединение масс движимой части основания m_0 , эквивалентной массы актюатора и полезной нагрузки m_1 . Можно представить систему как соединение этих масс через пружины и демпферы. Изменение длины пьезоактюатора y вызывает деформацию основания x , вследствие чего под действием упругих сил система возвращается в первоначальное положение, тем самым совершая колебания.

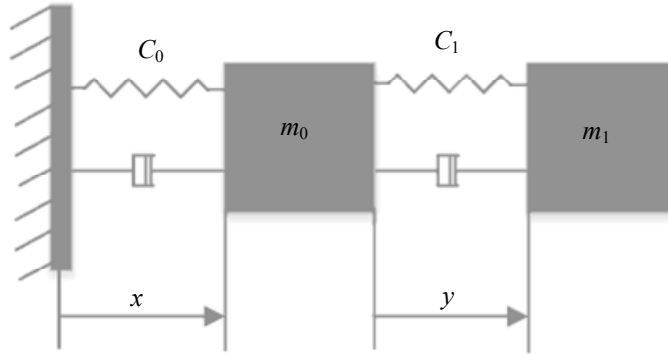


Рис. 1

Будем рассматривать пьезоактюатор поперечного сечения S_0 , закрепленный одним концом на основании. Первоначальный размер l_0 пьезоактюатора изменяется под действием электрического напряжения E на величину Δl_n и перемещающегося объекта управления (полезной нагрузки) массой m_n . Подробный вывод уравнения динамики в линейном приближении для такого устройства рассмотрен в [9]: деформация пьезоактюатора из-за действия приложенного электрического напряжения считается однородной по длине, а сам пьезоактюатор представляется электроупругой системой с одной степенью свободы, т.е. рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами. Деформации элементов конструкции не учитываются.

Как показано в работе [9], приложенное управляющее электрическое напряжение за счет обратного пьезоэффекта создает силу $F_3(t)$, определяемую уравнениями

$$\begin{cases} \frac{dU_a(t)}{dt} = \frac{1}{C_a R} (E(t) - U_a(t)) - \frac{K_{пп}}{C_a} \frac{d\Delta l_n(t)}{dt}, \\ F_3(t) = K_{оп} U_a(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $U_a(t)$ — электрическое напряжение на электродах пьезоактюатора, В; E — ЭДС источника управляющего напряжения, В; Δl_n — перемещение объекта управления, м; C_a — электрическая емкость пьезоактюатора, Ф; R — внутреннее сопротивление источника управляющего напряжения, Ом; $K_{пп}$ — коэффициент прямого пьезоэффекта, Кл/м; $K_{оп}$ — коэффициент обратного пьезоэффекта, Н/В.

Сила F_3 вызывает деформацию пьезоактюатора и перемещение нагрузки, эквивалентная приведенная масса которых равна

$$m_3 = m_n + 0,382m_a, \quad (2)$$

где m_n , m_a — масса нагрузки и пьезоактюатора соответственно, кг.

Рассматриваемая механическая система обладает двумя степенями свободы и для нее справедливо уравнение Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + F_i, \quad (3)$$

где q_i — i -я обобщенная координата; \dot{q}_i — i -я обобщенная скорость, $i=1, 2$; T — кинетическая энергия; Π — потенциальная энергия; Φ — диссипативная функция; F_i — внешняя сила.

В качестве обобщенных координат примем координаты перемещения нагрузки Δx и основания Δy относительно начальных положений x и y .

Кинетическая энергия системы составит

$$T = \frac{m_0 \dot{x}^2}{2} + \frac{m_1 (\dot{x} + \dot{y})^2}{2}, \quad (4)$$

где \dot{x}, \dot{y} — скорость перемещения основания и нагрузки; потенциальная энергия

$$\Pi = C_0 \frac{x^2}{2} + C_1 \frac{y^2}{2}, \quad (5)$$

где C_0, C_1 — коэффициенты упругости (см. рис. 1).

Диссипативная функция определяет механические потери из-за деформаций

$$\Phi = K_{dx} \frac{\dot{\Delta y}^2}{2} + K_{dy} \frac{(\dot{\Delta x} - \dot{\Delta y})^2}{2}, \quad (6)$$

где K_{dx}, K_{dy} — коэффициенты демпфирования отдельных масс.

Исходя из уравнений можно найти частные производные

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial x} = 0 & \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} = m_0 \dot{x} + m_1 (\dot{x} + \dot{y}), \\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0 & \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} = m_1 (\dot{x} + \dot{y}), \\ \frac{\partial \Pi}{\partial x} = C_0 x & \frac{\partial \Pi}{\partial y} = C_1 y, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) &= (m_0 + m_1) \ddot{x} + m_1 \ddot{y}, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) &= m_1 \ddot{x} + m_1 \ddot{y}, \end{aligned} \quad (8)$$

где \ddot{x}, \ddot{y} — ускорения перемещения основания и нагрузки.

Тогда уравнения Лагранжа примут вид:

$$\begin{aligned} (m_0 + m_1) \ddot{x} + m_1 \ddot{y} &= -C_0 x - d_0 \dot{x}, \\ m_1 \ddot{x} + m_1 \ddot{y} &= -C_1 y - d_1 \dot{y}. \end{aligned} \quad (9)$$

Учтем, что при управлении пьезоактюатором внешней ЭДС E возникает дополнительная сила:

$$\begin{aligned} F_{доп} &= K_U U_a, \\ T \frac{\partial U_a}{\partial t} + U_a &= E - RK_0 \dot{y}. \end{aligned} \quad (10)$$

В результате получаем систему уравнений

$$\begin{cases} T \frac{\partial U_a}{\partial t} + U_a = E - RK_0 \dot{y}, \\ m_1 \ddot{x} + m_1 \ddot{y} = -C_1 y - d_1 \dot{y} + K_U U_a, \\ (m_0 + m_1) \ddot{x} + m_1 \ddot{y} = -C_0 x - d_0 \dot{x}. \end{cases} \quad (11)$$

Путем некоторых преобразований удалим из нее алгебраическую петлю:

$$\begin{bmatrix} m_0 + m_1 & m_1 \\ m_1 & m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_0x - d_0\dot{x} \\ -C_1y - d_1\dot{y} + K_0U_a \end{bmatrix}. \tag{12}$$

Следующим образом

$$\begin{bmatrix} m_0 + m_1 & m_1 \\ m_1 & m_1 \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{(m_0 + m_1)m_1 - m_1^2} \begin{bmatrix} m_1 & -m_1 \\ -m_1 & m_0 + m_1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\begin{bmatrix} m_0 + m_1 & m_1 \\ m_1 & m_1 \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{m_0m_1} \begin{bmatrix} m_1 & -m_1 \\ -m_1 & m_0 + m_1 \end{bmatrix}$$

Тогда получаем систему уравнений без алгебраической петли:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \frac{1}{m_0m_1} \begin{bmatrix} m_1 & -m_1 \\ -m_1 & m_0 + m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -C_0x - d_0\dot{x} + F_B \\ -C_1y - d_1\dot{y} + K_0U_a \end{bmatrix}, \tag{14}$$

где F_B — возмущающая (внешняя) сила, или в развернутом виде:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -\frac{C_0}{m_0}x - \frac{d_0}{m_0}\dot{x} + \frac{C_1}{m_0}y + \frac{d_1}{m_0}\dot{y} - \frac{K_U}{m_0}U_a, \\ \ddot{y} = \frac{C_0}{m_0}x + \frac{d_0}{m_0}\dot{x} - \frac{C_1(m_0 + m_1)}{m_0m_1}y - \frac{d_1(m_0 + m_1)}{m_0m_1}\dot{y} + \frac{K_U(m_0 + m_1)}{m_0m_1}U_a, \\ T \frac{\partial U_a}{\partial t} + U_a = E(t) - RK_0\dot{y}. \end{cases} \tag{15}$$

С помощью (15) можно построить модель пьезоактюатора, обеспечивающую учет нежесткости основания при управлении от источника ЭДС (рис. 2).

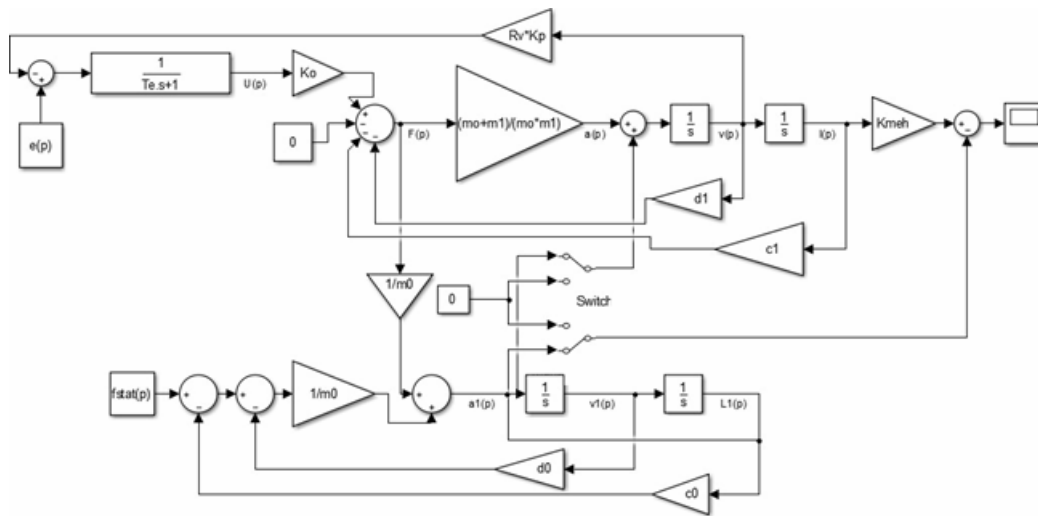


Рис. 2

В отличие от [9], в предложенной модели для расчета влияния основания добавлен специальный контур, который может включаться переключателем Switch. На этот контур может подаваться статическое воздействие. При работе актюатора суммируются силы, воздействующие на основание. Эта сумма сил вызывает деформацию основания, величина деформации отличается от общего перемещения системы, что позволяет получить истинное перемещение актюатора, а не относительное, рассчитываемое с помощью моделей, не учитывающих нежесткость основания.

Очевидно, что основное влияние деформация основания оказывает на динамические характеристики пьезопривода. Наиболее явно это влияние проявится при резких изменениях положения нагрузки, например, при ступенчатых изменениях управляющего напряжения. Для примера рассмотрим пьезопривод на основе пакетного тонкопленочного пьезоактюатора

марки АПН-2-N из пьезокерамики ЦТС-46 [2]. Длина активной части пьезоактюатора 0,02 м, площадь основания $60 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. При массе полезной нагрузки $m_0=0,3 \text{ кг}$ эквивалентная масса с учетом подвижной части пьезоактюатора составляет $m_3=0,303 \text{ кг}$. Коэффициенты упругости пьезоактюатора и основания $1,7 \cdot 10^8$ и $9,4 \cdot 10^8 \text{ Н/м}$ соответственно.

На рис. 3 показана реакция пьезопривода на ступенчатое изменение напряжения E от 0 до 100 В (переходная характеристика) от источника ЭДС с внутренним сопротивлением $R=25 \text{ Ом}$. Установившееся перемещение нагрузки составляет 21,5 мкм. Небольшая колебательность на переходной характеристике в основном обусловлена упругими свойствами пьезоактюатора. Частота этих колебаний совпадает с частотой собственных колебаний привода. Полученный график на рис. 4 характеризует нежесткость основания.

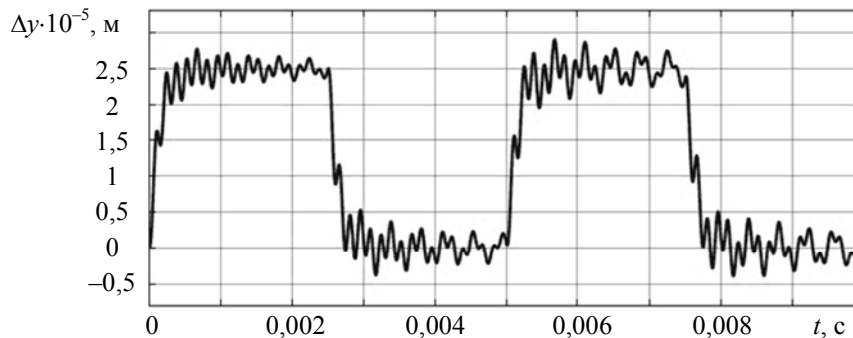


Рис. 3

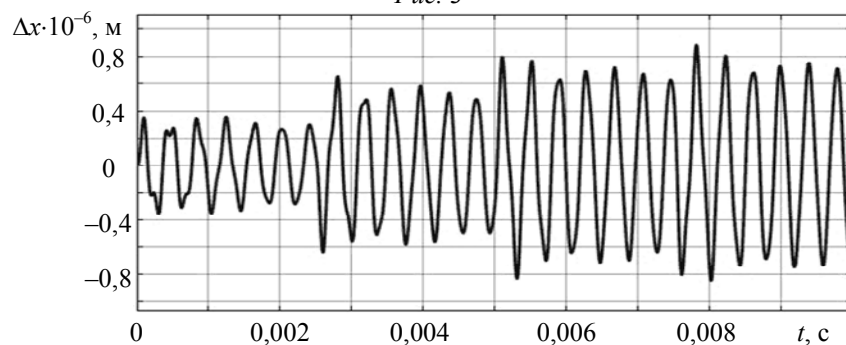


Рис. 4

В работе рассмотрена система пьезоактюатора, обеспечивающая учет влияния нежесткости основания. В прецизионных системах микроперемещений (до 1 нм), любые искажения процесса негативно влияют на всю систему. Деформация нежесткого основания происходит всегда, от геометрических параметров используемого материала и силы воздействия зависит лишь ее величина. В реальных условиях эксплуатации деформация может составлять от 10^{-8} до 10^{-5} м , что пагубно сказывается на качестве проектируемой системы. Полученные результаты позволяют выполнять идентификацию параметров с применением программного обеспечения MATLAB. Полученные погрешности могут быть связаны с наличием обратных связей в схеме. Дальнейшее исследование предполагает апробацию алгоритмов с использованием машины реального времени и средств программного обеспечения MATLAB.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), министерства образования и науки РФ 14.Z50.31.0031 и гранта Президента Российской Федерации №14.Y3116.9281-НШ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панич А. Е. Пьезокерамические актюаторы. Ростов-на-Дону, 2008. 153 с.
2. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб: Университет ИТМО, 2017. 134 с.

3. Роцин А. В. Основы теории автоматического управления. М.: МГПИ, 2010. 110 с.
4. Лазарева Т. Я., Мартемьянов Ю. Основы теории автоматического управления. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2017. 352 с.
5. Бардин В. А., Васильев В. А. Актуаторы нано- и мироперемещений для систем управления, контроля и безопасности // Современная техника и технологии. 2014. № 2.
6. Чернов В. А. Совершенствование конструктивно-технологических параметров многослойных пьезоэлектрических пьезоактуаторов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 212 с.
7. Аронов Б. С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. Л.: Энергоатом, 1990. 271 с.
8. Никольский А. А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
9. Staworko M., Uhl T. Modeling and Simulation of Piezoelectric Elements — Comparison of Available Methods and Tools // Mechanics. 2008. Vol. 27, N 4. P. 161—171.
10. Кэди У. Пьезоэлектричество и его практическое применение. М.: ИЛ, 1949. 721 с.
11. Казаков В. К. и др. Современные многослойные пьезоэлектрические актуаторы. Методы расчета параметров актуаторов в статических и динамических режимах // Изв. ЮФУ. Сер. Технические науки. 2008. № 11. С. 225—234.

Сведения об авторах

Владимир Иванович Бойков

— канд. техн. наук, доцент; университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: viboykov@mail.ru

Андрей Ильич Смирнов

— аспирант; университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: icar08@yandex.ru

Поступила в редакцию
14.11.18 г.

Ссылка для цитирования: Бойков В. И., Смирнов А. И. Построение модели пьезоактуатора с учетом нежесткости основания // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 4. С. 393—399.

CONSTRUCTION OF A MODEL OF PIEZOACTUATOR CONSIDERING THE NON-RIGIDITY OF THE BASE

V. I. Boykov, A. I. Smirnov

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: icar08@yandex.ru

A dynamic model of a piezoactuator is proposed, which accounts for the effect of non-rigidity of the base on the payload displacement. Application of the model makes it possible to evaluate the negative effect of deformations on the quality of the control system operation. The results obtained allow to perform parameter identification and system quality analysis using computer simulation tools. In the adopted scheme, provision is made for choosing measuring means of the system and, if necessary, correcting the control law to minimize the operating errors.

Keywords: piezoactuator, piezo motors control, nano- and micromovings, mathematical model of piezo drive, parameters of piezoceramics, non-rigid base

REFERENCES

- 1 Panich A.E. *P'yezokeramicheskiye aktyuatory* (Piezoceramic Actuators), Rostov-on-Don, 2008, 153 p. (in Russ.)
- 2 Bobtsov A.A., Boykov V.I., Bystrov S.V., Grigor'yev V.V. *Ispolnitel'nyye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshcheniy* (Actuators and Systems for Microdisplacement), St. Petersburg, 2017, 134 p. (in Russ.)
- 3 Roshchin A.V. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya* (Fundamentals of Automatic Control Theory), Moscow, 2010, 110 p. (in Russ.)
- 4 Lazareva T.Ya., Martem'yanov Yu. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya* (Fundamentals of Automatic Control Theory), Tambov, 2017, 352 p. (in Russ.)
- 5 Bardin V.A., Vasil'yev V.A. *Modern technics and technology*, 2014, no. 2. (in Russ.)

- 6 Chernov V.A. *Sovershenstvovaniye konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov mnogosloynnykh p'yezoelektricheskikh p'yezoaktyuatorov* (Improving the Design and Technological Parameters of Multilayer Piezoelectric Piezo Actuators), Candidate's thesis, Moscow, 2009, 212 p. (in Russ.)
- 7 Aronov B.S. *Elektromekhanicheskiye preobrazovateli iz p'yezoelektricheskoy keramiki* (Electromechanical Transducers from Piezoelectric Ceramics), Leningrad, 1990, 271 p. (in Russ.)
- 8 Nikol'skiy A.A. *Tochnyye dvukhkanal'nyye sledyashchiye elektroprivody s p'yezokompensatorami* (The Exact Two-Channel Watching Electric Drives with Piezocompensators), Moscow, 1988, 160 p. (in Russ.)
- 9 Staworko M., Uhl T. *Mechanics*, 2008, no. 4(27), pp. 161–171.
- 10 Cady W. *Piezoelectricity an introduction to the theory and applications of electromechanical phenomena in crystals*, NY, London, 1946.
- 11 Kazakov V.K. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2008, no. 11, pp. 225–234. (in Russ.)

Data on authors

- Vladimir I. Boykov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: viboykov@mail.ru
- Andrey I. Smirnov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: icar08@yandex.ru

For citation: Boykov V. I., Smirnov A. I. Construction of a model of piezoactuator considering the non-rigidity of the base. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 4. P. 393–399 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-393-399