

ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПАКЕТНЫМИ ПЬЕЗОАКТЮАТОРАМИ

В. И. БОЙКОВ¹, С. В. БЫСТРОВ¹, П. В. КАРЕВ¹,
А. А. КУЛЬЧИЦКИЙ², Б. Х. НГУЕН¹, А. И. СМИРНОВ¹

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: viboikov@mail.ru

²Санкт-Петербургский горный университет,
199106, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены вопросы организации программно-аппаратного комплекса для прототипирования цифровых систем управления с исполнительными тонкоплечными пакетными пьезоактюаторами средствами MatLab Simulink и приведены экспериментальные характеристики этого комплекса. Комплекс построен с использованием демонстрационного стенда ACV фирмы Cedrat Technologies пьезоактюатора APA-60SM и модуля STM32F4Discovery фирмы STMicroelectronics. Автоматическая генерация программы для микроконтроллера выполняется средствами библиотеки программных средств Waijung Blockset для работы с микроконтроллерами STM32F4. Экспериментально показано, что программно-аппаратный комплекс позволяет автоматизировать исследования динамических характеристик объекта управления и отработать алгоритмы управления пакетными пьезоактюаторами в режиме реального времени на натуральных образцах.

Ключевые слова: прототипирование, пьезоактюатор, цифровое управление, режим реального времени

Введение. Разработку автоматических систем управления с исполнительными пьезоактюаторами обычно затрудняет разброс параметров как исполнительного устройства, так и объекта управления [1]. При этом многие задачи проектирования систем могут быть успешно решены с применением технологии быстрого прототипирования систем реального времени и привлечением современных компьютерных комплексов [2]. Эта технология активно поддерживается и продвигается многими ведущими разработчиками специализированного программного обеспечения, среди которых особенно выделяются программные продукты MatLab фирмы MatWork и LabView фирмы National Instruments [3—5]. В настоящей статье рассмотрены вопросы организации программно-аппаратного комплекса для быстрого прототипирования цифровых систем управления объектами с тонкоплечными пьезоактюаторами средствами MatLab Simulink и специализированной библиотеки Waijung Blockset для работы с микроконтроллером STM32F407 [6].

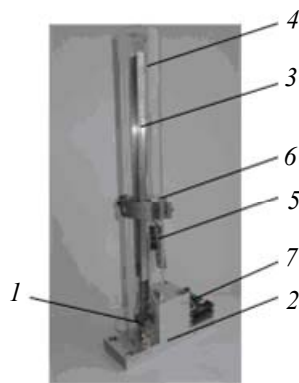


Рис. 1

Программно-аппаратный комплекс. Механическая часть комплекса построена на основе демонстрационного стенда ACV (рис. 1) фирмы Cedrat Technologies [7]. Стенд содержит тонкоплечный пакетный пьезоактюатор 1 марки APA-60SM с механическим рычажным мультипликатором микроперемещения. Пьезоактюатор закреплен на жестком массивном основании 2 и связан тягой с подвижной штангой 3. Параметры движения штанги измеряются аналоговым акселерометром 4 и оптическим датчиком перемещения 5. На стенде установлен электромагнит 6, питаемый от усилителя мощности 7, позволяющий прикладывать контролируемое возмущающее воздействие к штанге 3. Дополнительно

измеряются электрическое напряжение и сила тока в цепи управления пьезоактюатором.

Функциональная схема комплекса приведена на рис. 2. Для связи стенда с компьютером, преобразования сигналов из аналоговой формы в цифровую и обратно использован модуль STM32F4Discovery фирмы STMicroelectronics. Модуль построен на базе 32-разрядного микроконтроллера STM32F407, содержащего все необходимые для работы системы управления элементы: 12-разрядные АЦП и ЦАП, широтно-импульсные преобразователи, блоки приемопередатчиков, таймеры и пр. Модуль STM32F4Discovery служит интеллектуальным устройством ввода-вывода и регулятором прототипируемой системы управления.

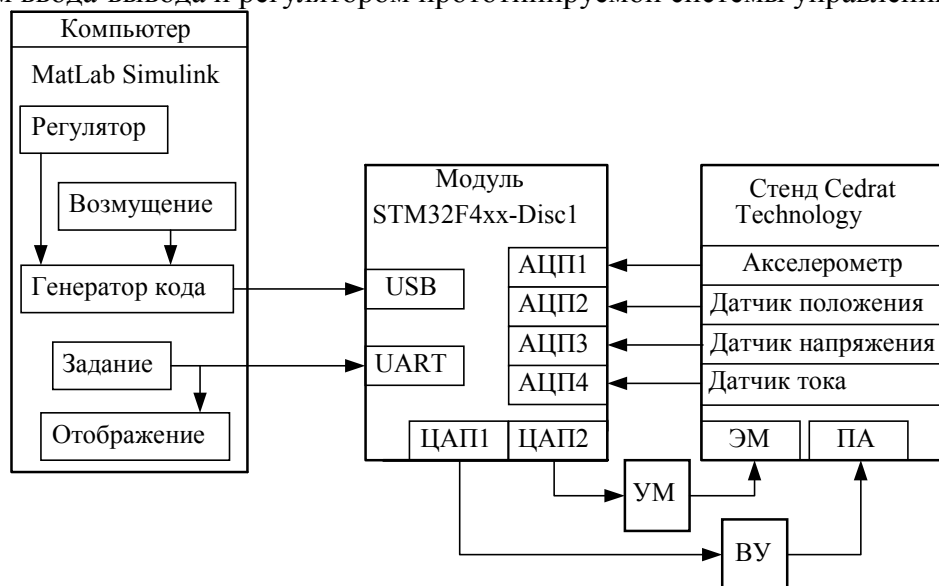


Рис. 2

Установленный на стенде пьезоактюатор способен выполнить перемещение нагрузки в диапазоне 0—80 мкм. Соединение пьезоактюатора со штангой длиной 330 мм позволяет увеличить диапазон перемещения до 500 мкм.

Управляющий сигнал пьезоактюатора ПА может быть сформирован либо цифроаналоговым, либо широтно-импульсным преобразователем микроконтроллера. Сигнал управления ПА усиливается высоковольтным усилителем ВУ с коэффициентом усиления 45 для получения рабочего напряжения пьезоактюатора в диапазоне 0—150 В. Сигнал управления электромагнитом ЭМ также формируется либо цифроаналоговым, либо широтно-импульсным преобразователем и усиливается усилителем мощности УМ.

Оперативная подготовка и реализация программной части системы управления осуществляются средствами MatLab Simulink при использовании специализированной библиотеки программных модулей Waijung Blockset для микроконтроллера STM32F407 [8]. Регулятор исследуемой системы управления, а также генератор возмущающего воздействия создаются средствами Simulink. Далее с использованием средства библиотеки Waijung Blockset выполняются генерация и загрузка кода в модуль микроконтроллера. Кроме того, поддерживается оперативная связь в реальном времени между модулем микроконтроллера и Simulink для изменения в задающем воздействии и отображения результатов пробных прогонов задачи.

Таким образом, комплекс для прототипирования цифровых систем управления позволяет реализовать так называемый режим HIL (Hardware-In-the-Loop), т.е. обеспечивает замкнутое управление физической установкой в режиме реального времени [4]. Экспериментально подтверждено, что на компьютере средней мощности под управлением операционной системы (ОС) Win7 обеспечивается функционирование комплекса с периодом квантования времени 0,0002 с. Такой малый период позволяет выполнять прототипирование систем управления с достаточно быстродействующими регуляторами, включая релейные со скользящим режимом работы или режимом максимального быстродействия.

Формирование тестовых воздействий. Типовая проблема, возникающая при прототипировании цифровых систем управления в режиме НПЛ, связана с ОС компьютера. ОС Windows является многозадачной системой и не позволяет запустить приоритетную задачу, работающую в реальном времени с периодом квантования менее 50 мс. Попытка использования таких систем управления приводит к нестабильности периода квантования времени и, как следствие, неверным результатам прототипирования. Для преодоления этой проблемы разработчики программного обеспечения применяют различные приемы — от создания специальных ОС реального времени до разработки средств автоматической генерации управляющей программы, работающей вне используемой ОС компьютера [9]. В последнем случае регулятор прототипируемой системы управления реализуется внешним подчиненным контроллером и проблема нестабильности периода квантования времени полностью снимается. Остается только обеспечить стабильность задающего воздействия, которое обычно формируется ведущим компьютером.

Типовыми задающими воздействиями систем управления можно считать ступенчатый и гармонический сигналы, для формирования которых в Simulink имеются готовые блоки. Качество формирования задающего воздействия легко проверить, загрузив в модуль STM32F4Discovery программу задержки входного сигнала на один такт и возвращения задержанного сигнала для визуализации в ведущий компьютер.

На рис. 3 приведены ответные сигналы, полученные от модуля STM32F4Discovery описываемого комплекса, соответствующие ступенчатому (а) и синусоидальному воздействию с частотой 100 рад/с (б) при периоде квантования времени 0,001 с. Из рис. 3 видно, что воздействия на начальном участке имеют задержку по времени порядка 50 мс. Кроме того, у гармонического сигнала на начальном участке существенно искажается форма.

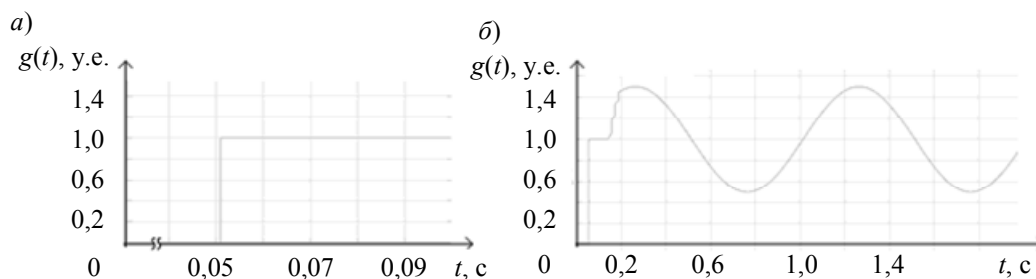


Рис. 3

Начальные задержки и искажение формы сигнала порождены особенностями программных продуктов MatLab и Waijung Blockset, которые не могут быть устранены пользователем. Поэтому в структуру прототипируемого регулятора целесообразно включать дополнительные блоки, позволяющие отсечь прием задающего воздействия на начальном участке работы программы. С этой целью может быть использован дополнительный ступенчатый сигнал, подаваемый из программной среды Simulink в модуль STM32F4Discovery, задерживаемый на фиксированное время относительно основного задающего воздействия. Этот дополнительный сигнал инициирует работу регулятора.

Идентификация параметров модели объекта управления. В отличие от обычного пакетного пьезоактюатора, используемый в стенде АРА-60SM имеет рычажный мультипликатор микроперемещений. За счет этого расстояние перемещения штока пьезоактюатора увеличивается в несколько раз, однако заметно снижается жесткость конструкции. В результате перемещение объекта управления во времени носит существенно колебательный характер. Частота основного резонанса объекта управления составляет 154 рад/с.

С использованием System Identification Toolbox из библиотеки MatLab Simulink [10] в полуавтоматическом режиме была выполнена оценка параметров математической модели

объекта управления с выходом по перемещению. Идентификация производилась по переходной характеристике объекта управления. На рис. 4 приведены статическая характеристика объекта управления (а) и типовая реакция объекта управления на ступенчатое воздействие (б).

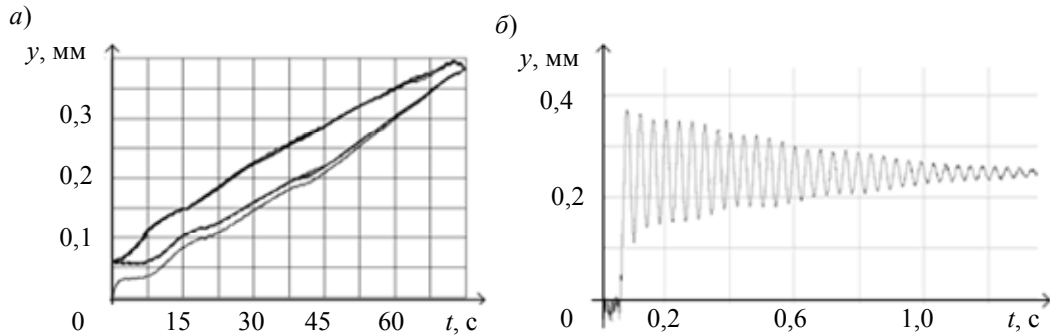


Рис. 4

По характеристикам получены приближенная линейная динамическая модель четвертого порядка [11] и уточненная нелинейная модель, учитывающая гистерезис статической характеристики. Линейная динамическая модель задана уравнениями:

$$\ddot{y}(t) + a_1\dot{y}(t) + a_0y(t) = K_1U_p(t), \quad \Delta\ddot{l}(t) + b_1\Delta\dot{l}(t) + b_0\Delta l(t) = K_2y(t), \quad (1)$$

где $y(t)$ — перемещение штока пьезоактюатора, мм; $\Delta l(t)$ — измеряемое перемещение объекта управления, мм; $U_p(t)$ — управляющий сигнал, В; $K_1=118,4$ мм/Вс², $K_2=1,91 \cdot 10^6$ 1/с², $a_0=6,34 \cdot 10^4$ 1/с², $a_1=531$ 1/с, $b_0=2,52 \cdot 10^4$ 1/с², $b_1=3,82$ 1/с. При использовании предложенного подхода к модификации совпадение результатов моделирования и экспериментальной реакции объекта составило 82 %.

Для описания петли гистерезиса использована модель, аналогичная примененной в [12] для описания гистерезиса пьезоактюатора АРА120. Нелинейное уравнение описания гистерезиса добавлено к уравнениям (1). Итоговая нелинейная модель объекта управления имеет вид:

$$\begin{aligned} \ddot{y}(t) + a_1\dot{y}(t) + a_0y(t) &= K_1U_p(t), \\ \dot{h}(t) &= \alpha\dot{y}(t) - \beta|\dot{y}(t)|h(t) - \gamma\dot{y}(t)|h(t)|, \\ \Delta\ddot{l}(t) + b_1\Delta\dot{l}(t) + b_0\Delta l(t) &= K_2[y(t) - h(t)], \end{aligned} \quad (2)$$

где $h(t)$ — выход нелинейного блока, мм; $\alpha=0,0801$, $\beta=0,0152$ 1/мм, $\gamma=-0,0227$ 1/мм. При использовании предложенного подхода к модификации совпадение результатов моделирования и экспериментальной реакции объекта составило 86 %.

Прототипирование цифрового аналога ПИ-регулятора. Для экспериментов по прототипированию регуляторов выбран цифровой аналог ПИ-регулятора. Для автоматической настройки такого регулятора в Simulink имеется специальный модуль — Control Toolbox. Таким образом, можно выполнить проверку работоспособности сервисов Simulink совместно с библиотекой Waijung Blockset в задачах автоматизации исследований.

Автоматическая настройка ПИ-регулятора для работы с объектом управления, заданным линейным уравнением (1), дала значения: коэффициент передачи пропорциональной составляющей $K_p=0,01$ В/мм, коэффициент передачи интегральной составляющей $K_i=20$ В/с·мм. Применение процедуры настройки ПИ-регулятора для работы с нелинейной моделью объекта управления определило следующие параметры регулятора: $K_p=0,1$ В/мм, $K_i=25$ В/с·мм.

На рис. 5, а сравнивается реакция (кривая 1) на ступенчатое воздействие системы управления с цифровым регулятором, настроенным по линейной модели, с аналогичной реакцией (2), полученной в Simulink. На рис. 5, б показаны аналогичные реакции систем управления с регулятором, настроенным по нелинейной модели. Период квантования времени в обоих случаях равен 0,002 с.

Сравнение реакций модели системы управления и ее натурального прототипа показало хорошее совпадение результатов, следовательно, использование библиотеки *Waijung Blockset* позволяет достаточно оперативно применять основные сервисы *Simulink* для анализа, идентификации и синтеза цифровых регуляторов систем управления натурными объектами с тонкопленочными пьезоактуаторами. Искажения при формировании задающих воздействий несущественно влияют на результаты и могут быть исключены программными средствами.

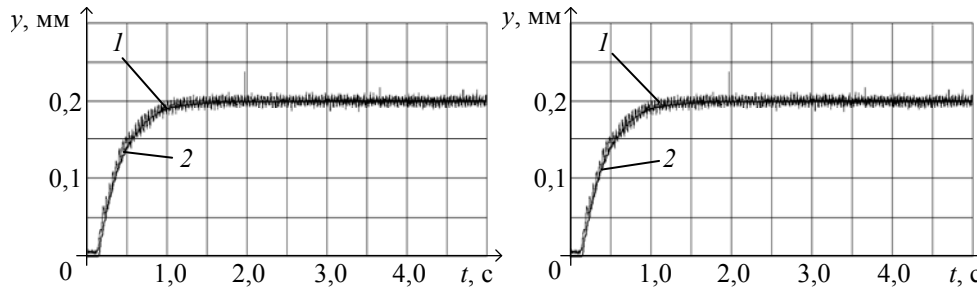


Рис. 5

Заключение. Программно-аппаратный комплекс для прототипирования цифровых систем управления пакетными пьезоактуаторами позволяет автоматизировать исследования динамических характеристик объекта управления и отработать алгоритмы управления в режиме реального времени на натуральных образцах. Отсутствие необходимости трудоемкой разработки программного кода для синтезированного регулятора делает возможным использование комплекса в учебных целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобцов А. А. и др. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2011. 131 с.
2. Дикенс М. Ускоренное прототипирование и полунатурное моделирование [Электронный ресурс]: <<http://controlengrussia.com/programmnye-sredstva/uskorennoe-prototipirovanie-i-polunaturnoe-modelirov/>>.
3. Ануфриев И. Е., Смирнов А. Б., Смирнова Е. Н. MATLAB 7. СПб: БХВ-Петербург, 2005. 1104 с. ISBN 5-94157-494-0
4. MathWorks: Rapid Prototyping for Embedded Control Systems [Электронный ресурс]: <<http://es.mathworks.com/solutions/rapid-prototyping/embedded-control-systems.html>>.
5. Тревис Дж. LabVIEW для всех / Пер. с англ. Н. А. Клушина. М.: ДМК-Пресс; ПриборКомплект, 2005. 544 с. ISBN 5-94074-257-2.
6. Торгаев С. Н., Тригуб М. В., Мусоров И. С., Чертихина Д. С. Практическое руководство по программированию STM-микроконтроллеров. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2015. 111 с.
7. Active Structure Control [Электронный ресурс]: <<https://www.cedrat-technologies.com/en/products/actuators/amplified-piezo-actuators.html>>.
8. Nguyen V. K. A Framework for Transferring Algorithms Designed on MATLAB/SIMULINK to ARM Microcontroller Embedded Systems // Can Tho University Journal of Science. 2016. Vol. 4. P. 36—45.
9. Смоленцев Н. К. Создание Windows-приложений с использованием математических процедур MATLAB. М.: ДМК-Пресс, 2008. 456 с. ISBN 5-94074-122-3.
10. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPower Systems и Simulink. М.: ДМК-Пресс, 2008. 288 с. ISBN 5-94074-395-1.
11. Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В., Обертов Д. Е. Пьезопривод на основе тонкопленочных пьезоактуаторов // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 11. С. 84—87.
12. D'Souza R. D., Benny B., Sequeira A., Karanth P. N. Hysteresis Modeling of Amplified Piezoelectric Stack Actuator for the Control of the Microgripper // American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences. 2016. Vol. 15, N 1. P. 265—281.

- Сведения об авторах**
- Владимир Иванович Бойков** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: viboikov@mail.ru
- Сергей Владимирович Быстров** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: sbystrov@mail.ru
- Павел Валерьевич Карев** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: karev_p@metrology-spb.ru
- Александр Александрович Кульчицкий** — канд. техн. наук, доцент; Горный университет; E-mail: aakul@spmi.ru
- Нгуен Ба Хю** — студент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: leningrat206@gmail.com
- Андрей Ильич Смирнов** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: ica08@yandex.ru

Поступила в редакцию
21.05.19 г.

Ссылка для цитирования: Бойков В. И., Быстров С. В., Кульчицкий А. А., Карев П. В., Нгуен Б. Х., Смирнов А. И. Прототипирование цифровых систем управления пакетными пьезоактюаторами // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 10. С. 900—906.

PROTOTYPING DIGITAL SYSTEMS OF CONTROL OVER PACKET PIEZOACTUATORS

**V. I. Boikov¹, S. V. Bystrov¹, P. V. Karev¹,
A. A. Kulchitsky², B. H. Nguyễn¹, A. I. Smirnov¹**

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: viboikov@mail.ru

² St. Petersburg Mining University,
199106, St. Petersburg, Russia

The questions of organization of a software and hardware complex for prototyping digital control systems of executive thin-film package piezoelectric actuators using MatLab Simulink are considered, characteristics of experimental complex are presented. The complex is built using the ACV demo stand by Cedrat Technologies with the piezoactuator APA-60SM and the STM32F4Discovery module by STMicroelectronics. Automatic generation of the program for the microcontroller is performed by means of the Wai-jung Blockset software library for working with STM32F4 microcontrollers. It is demonstrated experimentally that the software-hardware complex allows automating the studies of the control object dynamic characteristics and working out control algorithms for packaged piezoactuators in real time with full-scale samples.

Keywords: prototyping, piezoactuator, digital control, real-time mode

REFERENCES

1. Bobtsov A.A. et al. *Ispolnitel'nyye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshcheniy* (Actuators and Systems for Micromotion), St. Petersburg, 2011, 131 p. (in Russ.)
2. <http://controlengrussia.com/programmnye-sredstva/uskorennoe-prototipirovanie-i-polunaturnoe-modelirov/>.
3. Anufriev I.E., Smirnov A.B., Smirnova E.N. *MATLAB 7*, St. Petersburg, 2005, 1104 p. ISBN 5-94157-494-0 (in Russ.)
4. *MathWorks: Rapid Prototyping for Embedded Control Systems*, <http://es.mathworks.com/solutions/rapid-prototyping/embedded-control-systems.html>.
5. Travis J. *LabVIEW for Everyone*, 2nd Edition, Prentice Hall, 2002.
6. Torgayev S.N., Trigub M.V., Musorov I.S., Chertikhina D.S. *Prakticheskoye rukovodstvo po programmirovaniyu STM-mikrokontrollerov* (STM Microcontroller Programming Practical Guide), Tomsk, 2015, 111 p. (in Russ.)
7. *Active Structure Control*, <https://www.cedrat-technologies.com/en/products/actuators/amplified-piezoactuators.html>.
8. Nguyen V.K. *Can Tho University Journal of Science*, 2016, vol. 4, pp. 36–45.
9. Smolentsev N.K. *Sozdaniye Windows-prilozheniy s ispol'zovaniyem matematicheskikh protsedur MATLAB* (Creating Windows Applications Using MATLAB Math Procedures), Moscow, 2008, 456 p. ISBN 5-94074-122-3 (in Russ.)
10. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPower Systems i*

- Simulink* (Simulation of Electrical Devices in MATLAB, SimPower Systems and Simulink), Moscow, 2008, 288 p. ISBN 5-94074-395-1 (in Russ.)
11. Boykov V.I., Bystrov S.V., Grigor'yev V.V., Obertov D.E. *Journal of Instrument Engineering*, 2009, no. 11(52), pp. 84–87. (in Russ.)
 12. D'Souza R.D., Benny B., Sequeira A., Karanth P.N. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 2016, no. 1(15), pp. 265–281.

Data on authors

- | | |
|--------------------------------|---|
| Vladimir I. Boikov | — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: viboikov@mail.ru |
| Sergey V. Bystrov | — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: sbystrov@mail.ru |
| Pavel V. Karev | — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: karev_p@metrology-spb.ru |
| Alexander A. Kulchitsky | — PhD, Associate Professor; St. Petersburg Mining University; E-mail: aakul@spmi.ru |
| Nguyễn Bá Huy | — Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: leningrat206@gmail.com |
| Andrey I. Smirnov | — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: icar08@yandex.ru |

For citation: Boikov V. I., Bystrov S. V., Karev P. V., Kulchitsky A. A., Nguyễn B. H., Smirnov A. I. Prototyping digital systems of control over packet piezoactuators. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 10. P. 900—906 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-10-900-906