

МЕХАНИКА

УДК 629.76

DOI 10.17223/19988621/45/5

А.В. Азин, С.В. Пономарев, С.В. Рикконен, А.М. Храмцов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПЬЕЗОАКТЮАТОРА¹

Проведены экспериментальные исследования режимов работы пьезоактюаторов. Получены экспериментальные частотные характеристики колебательных систем с разным типом нагрузки. Исследованы зависимости силы на нагрузке колебательной системы от силы предварительного поджатия пьезоактюатора.

Ключевые слова: *пьезоактюатор, космический аппарат, колебательная система, динамическая сила.*

В космической отрасли наиболее остро стоит вопрос уменьшения массогабаритных характеристик систем космического аппарата (КА). Одним из решений является замена электромеханических приводов различных устройств КА на пьезоп приводы, при этом массогабаритные показатели соответствующих устройств уменьшается в разы.

По сравнению с электромеханическими приводами микролинейные пьезоп приводы (МЛП) имеют существенные преимущества. Однако при эксплуатации МЛП необходимо учитывать ряд особенностей, затрагивающие электрофизические и механические свойства пьезоактюатора (ПА) [1,2]. К механическим особенностям относится обязательное требование предварительного поджатия ПА. Сила предварительного поджатия по механической прочности строго регламентируется в зависимости от материала пьезокерамики.

Целью работы являются экспериментальные исследования влияния силы предварительного поджатия на режимы работы ПА в динамическом режиме.

**Исследование влияния силы предварительного поджатия
на экспериментальном стенде с инерционной нагрузкой**

Проектирование МЛП и испытательного стенда проводилось с ориентацией на следующие параметры: сила $F_{\text{нат}} - 300 \text{ Н}$, масса – 250 г, масса нагрузки – 40 кг, перемещение толкателя с шагом $X_{\text{нат}}$ от 10 нм до 15 мкм. Колебательная система (КС) рассчитывалась на трехмерных и одномерных математических моделях.

Испытательный стенд предназначен для исследования динамических режимов работы ПА при инерционной нагрузке (рис. 1). Возмущающая сила КС представ-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор RFMEFI57814X0060.

ляет собой гармонический сигнал. Режимы работы ПА зависят от следующих параметров колебательной системы: типа и мощности ПА; массы пригруза (нагрузки); силы предварительного поджатия ПА; напряжения на ПА; тока ПА; частоты воздействия [3–5].

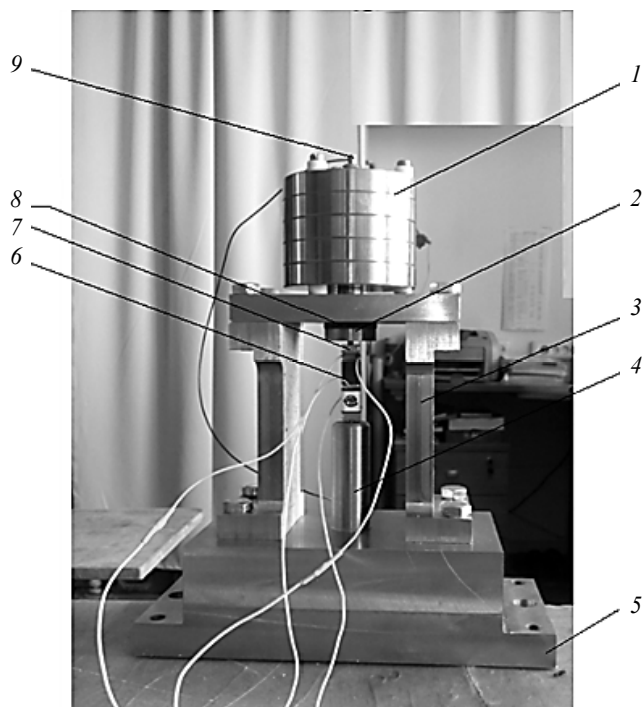


Рис. 1. Испытательный стенд работы ПА на инерционную нагрузку: 1 – инерционная масса нагрузки (пригруз); 2 – толкатель; 3 – опоры; 4 – регулировочный винт предварительного поджатия; 5 – станина; 6 – пьезоактюатор АПМ-2-7; 7 – датчик силы; 8 – упругость; 9 – акселерометр AP 1019

Fig. 1. Test stand is an operating PZT stack actuator at the inertial load: 1, inertial mass of the load cantledge; 2, pushrod; 3, support structures; 4, adjusting screw of the preload; 5, frame; 6, APM-2-7 PZT stack actuator; 7, force sensor; 8, elasticity; 9, AR 1019 accelerometer

В процессе испытаний ПА снимаются параметры режима работы в виде электрических сигналов: напряжение; ток; сигнал с датчика силы ПА; виброускорение пригруза. В процессе подготовки испытаний определяется сила предварительного поджатия. На рис. 2 показана схема эксперимента.

В результате испытаний ПА получены следующие данные:

- частотные характеристики ускорения пригруза;
- частотные характеристики вибросмещения пригруза;
- частотные характеристики силы на нагрузке.

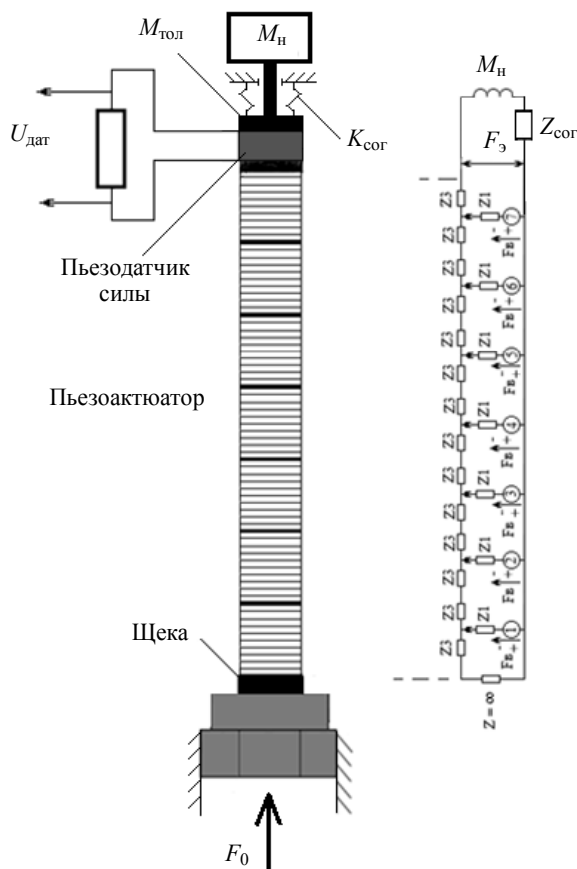


Рис. 2. Схема эксперимента по изучению влияния предварительного поджатия ПА при инерционной нагрузке: M_H – масса пригруза; $K_{сог}$ – жесткость согласующего элемента конструкции; $M_{тол}$ – масса толкателя; $Z_{сог}$ – механический импеданс согласующих элементов; $U_{дат}$ – сигнал с пьезодатчика силы; F_0 – сила предварительного поджатия; F_s – эквивалентная сила

Fig. 2. Scheme of the experiment for studying the influence of preload PZT stack actuator operating at the inertial load: cantilever mass, M_H ; rigidity of the matching structural element, K_m ; pushrod mass, M_p ; mechanical impedance of the matching elements, Z_m ; signal from the force piezo sensor, U_s ; preload force, F_0 ; equivalent force, F_e

На рис. 3 представлены экспериментальные данные, получаемые с осциллографа. В результате анализа полученных частотных характеристик определены рабочие резонансные частоты КС и амплитуды вибросмещения.

Экспериментальные исследования показали, что испытательный стенд спроектирован как КС с чисто инерционной нагрузкой, но режимы работы КС качественно схожи с режимами смешанной нагрузки (рис. 4 и 5). Резонансные частоты КС уменьшаются с увеличением инерционной массы (характерно для инерционной нагрузки), а увеличение амплитуды вибросмещения с увеличением инерции

онной нагрузки показывает, что в КС присутствует упругая составляющая – упругость предварительного поджатия, упругость опор стенда, упругость ПА, что характерно для смешанной нагрузки.

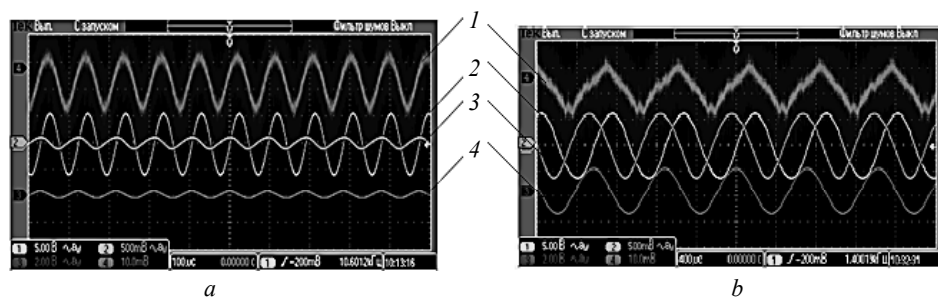


Рис. 3. Расположение сигналов с датчиков колебательной системы на экране электронного осциллографа: *a* – частота 10 кГц; *b* – частота 1 кГц; 1 – сигнал ускорения; 2 – ток ПА, 3 – сила ПА, 4 – напряжение на ПА

Fig. 3. Arrangement of signals distribution from the oscillating system transducers in the screen of an electron oscilloscope at a frequency of (*a*) 10 and (*b*) 1 kHz. 1, acceleration signal; 2, PZT stack actuator current; 3, PZT stack actuator force; 4, PZT stack actuator voltage

В КС без предварительного поджатия частотные характеристики имеют несколько резонансов (на рис. 4 резонансы отмечены цифрами), ПА резонирует на разных частотах. Максимальные значения вибросмещения ПА при силе тока $I = 0.5$ А и весе пригруза $G_{пр} = 0.5$ кг наблюдаются на рабочем резонансе при частотах $f \leq 1$ кГц.

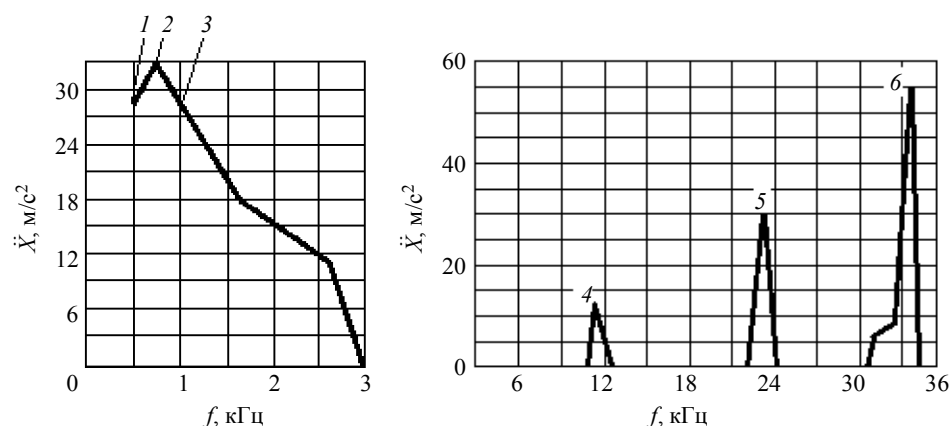


Рис. 4. Частотная характеристика вибросмещения ПА, работающего на инерционную нагрузку без предварительного поджатия

Fig. 4. Frequency-response characteristics of the vibration displacement of the PZT stack actuator operating at the inertial load without preload

В КС с предварительным поджатием система имеет один явно выраженный рабочий резонанс при частотах $f \leq 1$ кГц. Резонансы на больших частотах существенно сглажены (рис. 5).

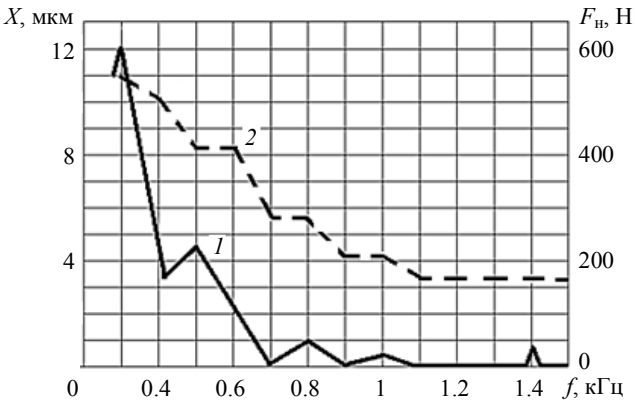


Рис. 5. Экспериментальная частотная характеристика вибросмещения нагрузки (кр. 1) и силы на нагрузку (кр. 2) при работе ПА при силе тока $I = 0.5$ А, весе пригруза $G_{np} = 3$ кг и предварительном поджатии $F_0 = 240$ Н
Fig. 5. Experimental frequency-response characteristics of the vibration displacement of the (1) load and (2) force on the load, while operating PZT stack actuator at the current strength $I = 0.5$ A, cantledge weight $G_c = 3$ kg, and preload $F_0 = 240$ N

Исследование влияния силы предварительного поджатия на экспериментальном стенде с упругой нагрузкой

ПА с пьезодатчиком силы через упругий элемент с известной жесткостью зажат в трубицу с возможностью регулирования предварительного поджатия системы. На рис. 6 представлена схема проведения эксперимента.

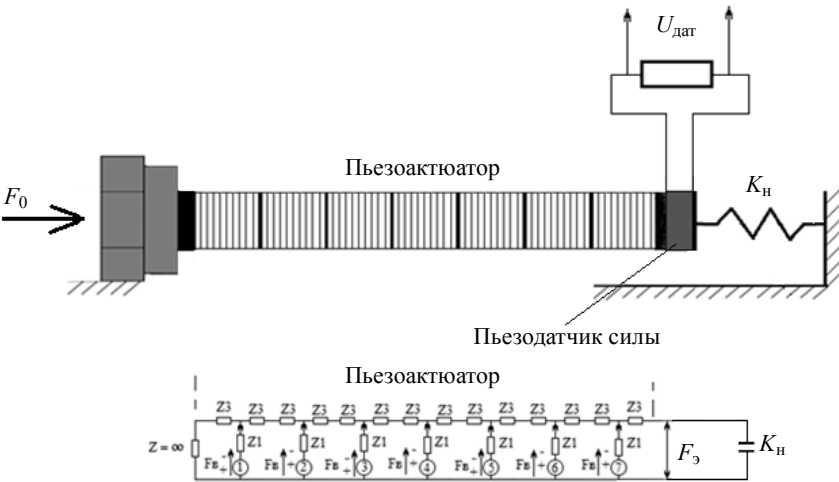


Рис. 6. Схема эксперимента по изучению влияния предварительного поджатия в режиме упругой нагрузки: K_n – жесткость упругого элемента; F_0 – сила предварительного поджатия; $U_{дат}$ – сигнал с пьезодатчика силы; F_s – эквивалентная сила
Fig. 6. Scheme of the experiment for studying the influence of preload in the mode of an elastic load: rigidity of the elastic element, K_n ; preload force, F_0 ; signal from the force piezo sensor, U_s ; equivalent force, F_e

Жесткость упругого элемента определялась экспериментально и при статическом сжатии равна $K_n = 3 \cdot 10^6$ Н/м. Сила предварительного поджатия определялась экспериментально по сигналу с пьезодатчика силы (рис. 7).

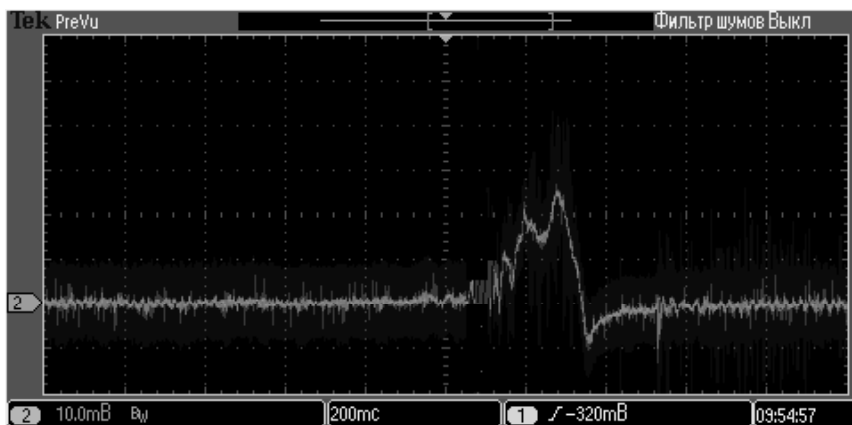


Рис. 7. Осциллограмма процесса предварительного поджатия на величину 42.8 Н
Fig. 7. Waveform of the preload process at the value of 42.8 N

Проведен ряд экспериментов, в которых варьировалась величина силы поджатия ПА. Эти исследования определяли влияние силы поджатия на динамические характеристики ПА (рис. 8 и 9). На рис. 9 представлены результаты экспериментов для 4 случаев: величина силы поджатия равна 42.8, 85.7, 102.9 и 171.5 Н.

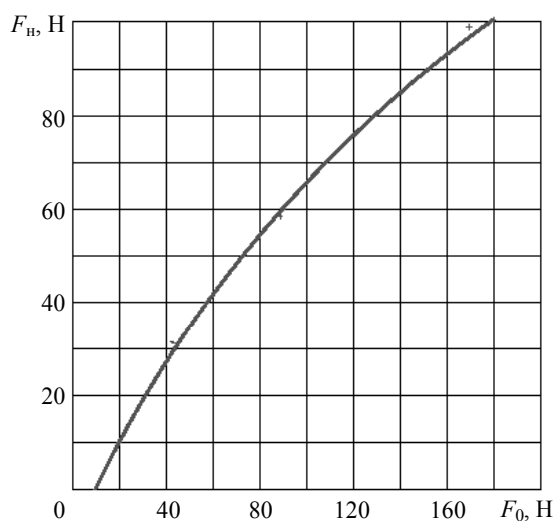


Рис. 8. Зависимость силы на нагрузке при резонансной частоте колебательной системы от силы предварительного поджатия

Fig. 8. Force on the load at the resonant frequency of the oscillating system as a function of the preload force

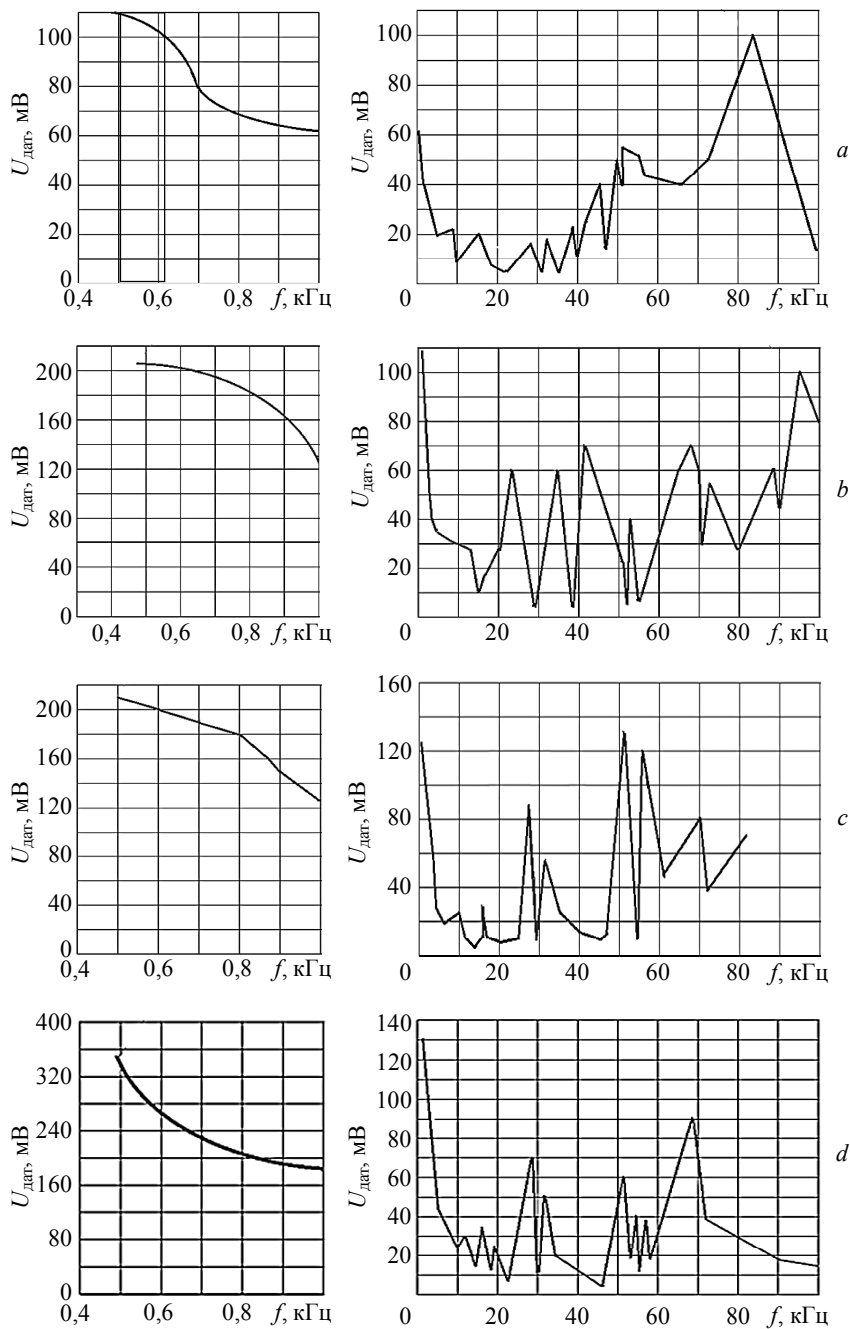


Рис. 9. Частотные характеристики ПА при разных величинах предварительного поджатия в условиях упругой нагрузки: *a* – 42.8 Н, *b* – 85.7 Н, *c* – 102.9 Н, *d* – 171.5 Н

Fig. 9. Frequency-response characteristics of the PZT stack actuator at different pre-load values in the case of elastic load: (*a*) 42.8, (*b*) 85.7, (*c*) 102.9, and (*d*) 171.5 Н

С увеличением силы предварительного поджатия частотные характеристики существенно изменяются. При малых силах предварительного поджатия частотная характеристика имеет несколько резонансов, с увеличением силы поджатия на частотной характеристике формируются 2–3 резонанса. Рабочая частота находится на частотах $f \leq 1$ кГц и при увеличении силы предварительного поджатия величина силы на нагрузке растет.

Заключение

Полученные экспериментальные данные показали, что частотные характеристики вибросмещения, полученные по трехмерным математическим моделям являются наиболее точными и имеют несовпадение с экспериментом в 5–8 %, в то время как расчетные данные по одномерным математическим моделям имеют несовпадение с экспериментом в 10–20 %.

Результаты исследования подтвердили расчетные данные [3, 5], что для принятых значений нагрузки резонансные частоты КС находятся в области низких частот (до 1 кГц) и с увеличением предварительного поджатия увеличивается динамическое усилие на нагрузке, особенно на низких частотах.

По частотным характеристикам видно, что количество пиков характеристики динамических усилий соответствует количеству контуров электрической схемы замещения. С увеличением предварительного поджатия частотные характеристики динамических усилий изменяются, значения динамических усилий промежуточных резонансов уменьшаются, формируются 2–3 основных резонанса. Предварительное поджатие «заниволивает» ПА, сглаживает неточности его производства и сборки, заставляет работать как «единое целое».

ЛИТЕРАТУРА

1. Park S. Single vibration mode standing wave tubular piezoelectric ultrasonic motor. Theses and dissertations. Toronto, 2011. 136 p.
2. Wang Z., Li T., Cao Y. Active shape adjustment of cable net structures with PZT actuators // *Aerospace Science and Technology*. 2013. P. 160–168.
3. Пономарев С.В., Рикконен С.В., Азин А.В. Анализ работы пьезопривода по частотным характеристикам механоакустической колебательной системы // *Изв. вузов. Физика*. 2014. Т. 57. № 8/2. С. 196–202.
4. Ponomarev S.V., Rikkonen S., Azin A., Karavatskiy A., Maritskiy N., Ponomarev S.A. The applicability of acoustic emission method to modeling the endurance of metallic construction elements // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 71. 2015. DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012056.
5. Пономарев С.В., Рикконен С.В., Азин А.В. Моделирование колебательных процессов пьезоэлектрического преобразователя // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2015. № 2(34). С. 86–95.

Статья поступила 07.11.2016 г.

Azin A.V., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V., Khramtsov A.M. (2017) EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE OPERATING CONDITIONS OF PZT STACK ACTUATOR. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 45. pp. 60–68

DOI 10.17223/19988621/45/5

In the space industry, the problem of reducing mass-dimensional parameters of a spacecraft (SC) system is especially urgent. One of the current solutions is the replacement of electromechanical driving systems in different SC units by piezo drives, which enable a decrease in mass-dimensional parameters by several fold.

The basic element of a piezo drive is a PZT stack actuator whose construction and operating conditions determine the efficiency and service life of the oscillating system.

This work is aimed at experimental investigating the influence of the preload force of the PZT stack actuator on frequency-response characteristics and energy parameters of the oscillating system. The experimental studies were carried out on test stands which allow one to implement physical modeling of oscillating systems with different types of loads. It is shown experimentally that an increase in the preload force significantly changes the frequency characteristics. With an increase in the preload, frequency characteristics of dynamic forces change, dynamic forces of intermediate resonances decrease, and one main resonance is formed.

The results of the study have confirmed the calculation data: for the taken values of the load, the resonant frequency of oscillating systems falls in the low-frequency region (up to 1 kHz); with an increase in the preload, the dynamic force on the load increases, especially at low frequencies.

Keywords: PZT stack actuator, spacecraft, oscillating system, dynamic force.

PONOMAREV Sergey Vasil'evich (Doctor of Physics and Mathematics,
Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: psv@niipmm.tsu.ru

RIKKONEN Sergey Vladimirovich (Candidate of Technical Science,
Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: rikk2@yandex.ru

AZIN Anton Vladimirovich (Candidate of Physics and Mathematics,
Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: antonazin@niipmm.tsu.ru

KHRAMTSOV Alexey Mikhaylovich (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: khramtsov.home@gmail.com

REFERENCES

1. Park S. (2011) *Single vibration mode standing wave tubular piezoelectric ultrasonic motor*. 136 p.
2. Wang Z., Li T., Cao Y. (2013) Active shape adjustment of cable net structures with PZT actuators. *Aerospace Science and Technology*. pp. 160–168.
3. Ponomarev S.V., Rikkonen S.V., Azin A.V. (2014) Analiz raboty p'ezoprivoda po chastotnym kharakteristikam mekhanoakusticheskoy kolebatel'noy sistemy [Analysis of the operating PZT stack actuator based on the frequency-response characteristics of mechanical-acoustical oscillating system]. *Izv. vuzov. Fizika – Russian Physics Journal*. 57(8/2). pp. 196–202.
4. Ponomarev S.V., Rikkonen S., Azin A., Karavatskiy A., Maritskiy N., Ponomarev S.A. (2015) The applicability of acoustic emission method to modeling the endurance of metallic construction elements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 71. DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012056.
5. Ponomarev S.V., Rikkonen S.V., Azin A.V. (2015) Modelirovanie kolebatel'nykh protsessov p'ezoelektricheskogo preobrazovatelya [Simulation of oscillatory processes of the piezoelectric transducer]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2(34). pp. 86–95.