МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАБОТЫ ПЬЕЗОДВИГАТЕЛЯ ТИПА «ЗАХВАТ»

А. В. Азин¹ ✉, С. А. Кузнецов², С. А. Пономарев¹,
С. В. Пономарев¹, С. В. Рикконен¹

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Российская Федерация

² АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва»,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

В статье представлены результаты разработки шагового пьезоэлектрического двигателя. Оригинальность конструкции шагового пьезоэлектрического двигателя состоит в конструкционном рычажном элементе – захвате, который позволяет организовать прямой и обратный ход штока при работе одного пьезоэлемента.

Для выбора эффективного процесса работы шагового пьезоэлектрического двигателя разработана математическая модель. Данная математическая модель описывает функционирование пьезоэлектрического двигателя как нелинейной колебательной системы. Математическая модель позволяет определить скорость движения элементов пьезоэлектрического двигателя за период колебания при разных частотах, уровнях нагрузки и величине напряжения.

Изготовлен прототип пьезоэлектрического двигателя. Проведены экспериментальные исследования. Техническими характеристиками двигателя являются точность позиционирования до 1 мкм и скорость перемещения штока до 10 мм/мин. при весе груза до 1 кг и напряжении до 100 В.

По результатам проведенных экспериментальных исследований определено, что предложенная математическая модель позволяет смоделировать процесс работы пьезоэлектрического двигателя с погрешностью не более 10 %.

Ключевые слова: пьезоэлектрический двигатель, шаговый двигатель, пилообразный сигнал управления, математическая модель, пьезопакет.

Введение

Анализ современных тенденций развития крупногабаритных трансформируемых антенных рефлекторов с вантовой формообразующей системой показывает постоянную необходимость увеличения габаритов антенных рефлекторов и точности настройки отражающей поверхности (ОП) в связи с повышением объема передаваемой информации и увеличения частоты передаваемого сигнала [1–4]. Увеличение размеров и усложнение конструкций рефлекторов космических аппаратов приводит к увеличению веса

конструкции и усложняет процесс настройки формы ОП.

Для настройки формы ОП рефлектора с высокой точностью предлагается использовать автономные натяжители вантовых элементов. Автономный натяжитель состоит из источника питания, блока управления и прецизионного привода. Широкое применение в технике миниатюрных двигателей определяет появление ряда конкурирующих типов преобразователей энергии. Активную конкуренцию традиционным электромагнитным двигателям представляют пьезодвигатели (ПД) [5; 6].

Преобразование энергии из электрической в механическую в электромагнитных двигателях происходит в зоне «воздушного зазора» и обусловлено взаимодействием магнитных полей статора и ротора. Только в зоне подшипниковых узлов происходит контактное механическое взаимодействие, которое определяет

✉ antonazin@mail.ru

© Азин А. В., Кузнецов С. А., Пономарев С. А.,
Пономарев С. В., Рикконен С. В., 2019

Работа выполнена при финансовой поддержке
Минобрнауки России, уникальный идентификатор
RFMEFI57817X0257

ресурс и надежность механических элементов конструкции.

Преобразование энергии из электрической в механическую в ПД происходит непосредственно в пьезоэлементах, которые находятся в механическом контактом взаимодействии друг с другом и с элементами конструкции. В этом случае ресурс и надежность ПД будет существенно зависеть от работы материалов устройства в зоне упругости.

Ряд преимуществ ПД перед электромагнитными двигателями определяет эффективность применения ПД в миниатюрных приводах и устройствах [7; 8]. К основным преимуществам ПД перед электромагнитными двигателями относятся: широкий диапазон регулировки частот возбуждения, возможность малых перемещений в пределах долей микрон, высокое значение силы на нагрузке, высокий КПД, большая сила удержания нагрузки в обесточенном состоянии, малые масса и габариты. Область применения пьезодвигателей – это жесткие безлюфтовые и безредукторные электромеханические исполнительные механизмы с низкой регулируемой скоростью перемещений с высокой точностью позиционирования и быстродействием.

Все преимущества пьезодвигателей, приведенные выше, относятся к возвратно-поступательному режиму работы. Основные энергетические параметры (КПД, сила на нагрузке, скорость движения подвижных элементов) в этом режиме работы физически понятны и прогнозируемы. Однако при переходе в пошаговый режим работы для реализации больших линейных перемещений энергетические параметры ПД резко снижаются. Поэтому предприятия-производители в техническом паспорте ПД указывают не КПД устройства, а его удельную мощность.

Цель исследования состояла в разработке математической модели процесса работы ПД типа «Захват» для эффективного проектирования подобного типа конструкций.

Конструкция ПД типа «Захват» представлена на рис. 1 [9; 10]. Двигатель состоит из внешнего корпуса, внутреннего корпуса, подвижного штока, захвата, толкателя, пьезопакета и торцевых щитов. Отверстие захвата имеет диаметр больше, чем диаметр штока и шток свободно движется в захвате.

Рис. 1. Конструкция разработанного шагового пьезоэлектрического двигателя

Основное отличие ПД типа «Захват» от ПД других конструкций заключается в наличии контактной пары «захват – шток» (рис. 2). При организации угла наклона между толкателем с захватом и штоком (угол $\alpha \approx 5^\circ$) захват одной гранью упирается в шток и упруго деформирует его. При этом захват фиксирует шток. Данный контакт обладает существенным значением силы трения F_{fr1} , которая позволяет удерживать и преодолевать значительные силы нагрузки F_{nag} вплоть до разрушения корпуса ПД.

Перемещение захвата относительно штока в сторону нагрузки ограничивается силой трения F_{fr2} , которое много меньше F_{fr1} ($F_{fr1} \gg F_{fr2}$). Эта особенность данного контакта позволяет организовать пошаговый режим движения штока вместе с нагрузкой.

Рис. 2. Принципиальная схема контактного взаимодействия захвата и штока

1. Моделирование колебательной системы ПД

Основные допущения, принятые при математическом моделировании:

1. Не учитываются потери механической энергии в зоне контактных взаимодействий.
2. Величина силы трения в зоне контактных взаимодействий F_{fr1} при движении захвата в противоположную сторону от нагрузки принята бесконечности.
3. Источник электрической энергии является источником бесконечной мощности.
4. Сила нагрузки представлена в виде веса груза.
5. Деформации материала захвата и штока за период колебания носит упругий характер.

6. Поведение пьезопакета ПД происходит в соответствии с техническим паспортом производителя.

Преобразование электрической мощности в механическую происходит в колебательной системе (КС), которая состоит из: колебательной подсистемы ПД и подсистемы нагрузки.

Непосредственно преобразование электрической энергии в механическую происходит в пьезоэлементах.

зопакете. Все остальные элементы КС передают механическую энергию в нагрузку.

Для описания процесса формирования механической силы пьезопакета рассмотрим уравнение обратного пьезоэффекта [11; 12]:

$$S = d \cdot E, \quad (1)$$

где $S = \Delta l / l$ – деформация пьезопакета; d – пьезоэлектрический модуль, Кл/Н; $E = U / l$ – напряженность электрического поля, В/м; l – толщина пьезопластины, м.

Запишем его с учетом того, что механическое напряжение материала препятствует деформации из-за пьезоэффекта:

$$S = -s^E \cdot T + d_n \cdot E, \quad (2)$$

где $s^E = 1/Y$ – упругая податливость пьезокерамики, Па⁻¹; Y – модуль Юнга, Па; T – механическое напряжение, Па.

Умножив все члены уравнения (2) на произведение $(Y \cdot S_0)$, получим:

$$\Delta l / l_0 \cdot Y \cdot S_0 = d_n \cdot Y \cdot S_0 \cdot E - S_0 \cdot T, \quad (3)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения пьезопакета, м².

Левая часть выражения (3) описывает усилие упругой деформации:

$$F_y = (Y \cdot S_0) / l_0 \cdot \Delta l = K_y \cdot \Delta l, \quad (4)$$

где K_y – коэффициент упругости пьезопакета, Н/м.

Первое слагаемое правой части выражения (3) определяет усилие, вызванное приложенным электрическим полем:

$$F_{el} = d_n \cdot Y \cdot S_0 \cdot E. \quad (5)$$

Механическое напряжение, входящее во второе слагаемое правой части уравнения (3) определяется нагрузкой F_{nag} , приложенной к ПД. Кроме того, во время движения подвижных частей ПД возникают динамическая сила F_{din} , пропорциональная ускорению, и демпфирующее усилие F_R , пропорциональное скорости смещения штока ПД, вызванное процессами, связанными с потерей энергии в пьезопакете. Определив все действующие силы, можно составить уравнение равновесия сил, приложенных к подвижной границе активной части пьезопакета:

$$F_y = F_{el} + F_{nag} + F_R + F_{din}, \quad (6)$$

где: $F_{el} = \frac{d_{33} \cdot n \cdot U(t) \cdot S_0}{S_{33}^E \cdot l} - \frac{\Delta l \cdot S_0}{l \cdot S_{33}^E}$ – результирующая

сила пьезопакета, имеющая нелинейный характер;

$F_{din} = -(M_\Sigma d^2 \Delta l) / dt^2$ – динамическая сила;

$F_R = -(R_\Sigma d \Delta l) / dt$ – демпфирующая сила;

$F_y = K_\Sigma \cdot \Delta l$ – сила упругой деформации.

Уравнение (6) соответствует дифференциальному уравнению движения. Заменив Δl на x , получим уравнение для решения поведения механической системы, состоящей из ПД и нагрузки:

$$M_\Sigma \cdot d^2 x / dt^2 + R_\Sigma \cdot dx / dt + K_\Sigma \cdot x + F_{nag} = \quad (7)$$

$$= (d_{33} \cdot n \cdot U(t) \cdot S_0) / (S_{33}^E \cdot l) - (x(t) \cdot S_0) / (l \cdot S_{33}^E),$$

где M_Σ – суммарная масса движущихся частей пьезопривода и нагрузки (спиц рефлектора или на-

грузки испытательного стенда); R_Σ – коэффициент диссипации (рассеяния) энергии на трение и полезную работу за цикл работы ПД и конструкции рефлектора или испытательного стенда; K_Σ – суммарная жесткость ПД и конструкции рефлектора или испытательного стенда; F_{nag} – сила, создаваемая нагрузкой; $U(t)$ – напряжение питания пакета ПД; $x(t)$ – вибро смещение подвижных частей системы ПД.

2. Результаты расчета

Рассмотрена конструкция ПД типа «Захват», содержащая пьезопакет АПМ2-22 [13]. Технические характеристики пьезопакета АПМ 2-22 при статическом напряжении 100 В: максимальное перемещение при нулевой силе – 40 мкм, максимальная сила при нулевом перемещении – 1000 Н.

Дифференциальное уравнение (7) решалось в системе Mathcad. В результате расчета получены временные зависимости смещения, скорости и ускорения подвижных частей колебательной системы ПД (рис. 3 и 4) для пилообразной формы питающего напряжения.

Рис. 3. Временные зависимости для элементов конструкции пьезоэлектрического двигателя при пилообразном сигнале управления:
1 – скорость; 2 – ускорение

Рис. 4. Процесс движения элементов ПД:
а) зависимость перемещения захвата и штока от времени; б) зависимость изменения динамической составляющей силы от времени

Изменение смещения пьезопакета ПД сопровождается обратно пропорциональным изменением силы ПД. При резком изменении напряжения на пьезопакете ПД (отрицательный фронт смещения) образуется отрицательное ускорение, которое дает появление динамической составляющей силы (инерционная сила сопротивления) с отрицательным знаком. В зоне «А» динамическая составляющая силы может превышать силу ПД и силу трения, что приводит к нарушению контакта «захват-шток» и перемещению захвата относительно штока. Шаг перемещения захвата по штоку составляет 0,85 мкм (рис. 5). При снижении динамической составляющей силы F_{din} контакт «захват-шток» восстанавливается. Происходит пошаговый режим работы ПД.

Рис. 5. Зависимость перемещения штока от динамической составляющей силы в пошаговом режиме работы: X – перемещение штока, F_{din} – динамическая составляющая силы

3. Результаты экспериментальных исследований

На рис. 6 представлена схема проведения эксперимента по исследованию режимов работы ПД с источником питания пилообразного напряжения. Эксперименты проводились на специальном стенде, который состоит из: жесткого основания с фиксатором для крепления пьезоэлектрического двигателя, троса с грузом, блока питания и устройств измерения: индикатора перемещения (ГОСТ 577-68, точность 0,01 мм), акселерометра AP10 и предварительного усилителя ZET 440 фирмы ZETLAB, осциллографа GW Instek GDS-72104E (рис. 6). Акселерометр фиксировался на захвате ПД. На рис. 7 представлена осциллограмма работы ПП типа «Захват»: 1 – напряжение на пакете актуатора, 2 – ускорение толкателя. Режим работы ПД: $U = 80$ В, $M_{\Sigma} = 500$ гр., $f = 20$ Гц.

На рис. 8 показано согласование результатов теоретических расчетов и экспериментальных исследований. Приведены временные зависимости ускорения движения толкателя и штока в пошаговом режиме работы ПД при напряжении $U = 80$ В, весе груза $M_{\Sigma} = 500$ гр. и частоте сигнала $f = 20$ Гц.

Рис. 6. Схема эксперимента

Рис. 7. Экспериментальные данные: АЧХ напряжения (1) и ускорения (2)

Рис. 8. Временные зависимости ускорения движения толкателя и штока в пошаговом режиме работы ПД: а) результаты математического моделирования; б) экспериментальные данные

В табл. приведены результаты экспериментальных исследований. Для определения достоверности предложенной математической модели проведено сравнение теоретических расчетов и экспериментальных данных.

Задавались одинаковые условия: амплитуда напряжения $U = 80$ В, частота сигнала $f = 20$ Гц и масса груза $M_{\Sigma} = 500$ гр.

По результатам расчета определено, что скорость перемещения штока равна $V = 0,0242$ мм/с, при этом шаг за период колебания составил $h = 0,85$ мкм. Таким образом, механическая мощность ПД равна:

$$P_{mech} = V \cdot F_{nag} = 0,0242 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

По результатам эксперимента определено, что скорость перемещения штока равна $V = 1,2 \text{ мм/мин.} = 0,022 \text{ мм/с}$, при этом шаг за период колебания составил $h = 1 \text{ мкм}$. Таким образом, механическая мощность ПД равна:

$$P_{\text{mech}} = V \cdot F_{\text{наг}} = 0,022 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0,11 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

Расхождение результатов моделирования с экспериментальными данными составляет 10 % по механической мощности.

Таблица

Результаты экспериментальных исследований ПД типа «Захват»

№ опыта	Частота, Гц	Напряжение, В	Масса груза, гр.	Скорость, мм/мин. (мм/с)	Величина шага, мкм	Мощность ПД, Вт
1	20	80	500	1,2 (0,02)	1	$0,1 \cdot 10^{-3}$
2	140	140	1000	1,5 (0,025)	0,178	$0,25 \cdot 10^{-3}$
3	156	100	1000	1,5 (0,025)	0,1603	$0,25 \cdot 10^{-3}$
4	150	80	500	2(0,033)	0,22	$0,166 \cdot 10^{-3}$
5	150	150	500	3 (0,05)	0,333	$0,25 \cdot 10^{-3}$
6	178	80	500	1,8 (0,0295)	0,1657	$0,15 \cdot 10^{-3}$
7	500	100	500	9,96 (0,166)	0,332	$0,83 \cdot 10^{-3}$

Заключение

Все пьезодвигатели осуществляют преобразование энергии за счет контактных взаимодействий элементов конструкций, это относится к пошаговому и возвратно-поступательному режимам работы.

Математическая модель ПД рассматривает ПД как нелинейную колебательную систему. За счет формы питающего напряжения (пилообразная форма напряжения) во время отрицательного фронта образуется отрицательная динамическая составляющая силы, которая позволяет проскользнуть штоку в захвате при возвращении захвата в первоначальное положение, тем самым организуя пошаговый режим работы ПД.

Рассмотренная математическая модель ПД позволяет рассчитать скорость движения подвиж-

ных частей системы по шагу за период колебания при разных частотах, нагрузках и амплитудах питающего напряжения.

В приведенном примере представлен математический расчет и эксперимент исследования работы ПД, шаг смещения штока за период колебания которого составляет $0,85 \div 1 \text{ мкм}$, скорость передвижения нагрузки составляет $1 \div 10 \text{ мм/мин.}$, мощность составляет $0,1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$. ПД с такими режимными параметрами могут применяться в системе настройки отражающей поверхности крупногабаритного рефлектора космического аппарата, а также использоваться в сферах, где требуется высокая точность, допускаются невысокие скорости работы и не ограничено время отработки задания. Предложенная математическая модель отображает процесс работы ПД типа «Захват» с погрешностью, не превышающей 10 %.

Список литературы

- [1] Ozawa S. Design concept of large deployable reflector for next generation L-band SAR satellite // The 2nd International Scientific Conference Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas Proceedings, Tbilisi, 2014, pp. 43–51.
- [2] Nakamura K., Nakamura N. Concept Design of 15m class Light Weight Deployable Antenna Reflector for L-band SAR Application // 3rd AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech Forum, San Diego, 2016. doi: 10.2514/6.2016-0701.
- [3] Zheng F., Chen M. New Conceptual Structure Design for Affordable Space Large Deployable Antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, vol. 63, no. 4, pp. 1351–1358. doi: 10.1109/TAP.2015.2404345
- [4] Пономарев С. В. Трансформируемые рефлекторы антенн космических аппаратов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. №4 (16). С. 110–119.
- [5] Peng Y., Gu X., Wang J., Yu H. A review of long range piezoelectric motors using frequency leveraged method // Sensors and Actuators, 2015, vol. 235, pp. 240–255. doi: 10.1016/j.sna.2015.10.015
- [6] Wang L., Chen W., Liu J., Deng J., Liu Y. A review of recent studies on non-resonant piezoelectric actuators // Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, vol. 133, no. 106254. doi: 10.1016/j.ymssp.2019.106254
- [7] Azin A., Rikonen S., Ponomarev S., Kuznetsov S. Alignment of distributed oscillation systems in piezo motors // IOP Conf. Series: Journal of Physics, 2019, vol. 1145, no. 012007. doi: 10.1088/1742-6596/1145/1/012007

- [8] Azin A., Rikkonen S., Ponomarev S., Kuznetsov S. Design issues of the piezo motor for the spacecraft reflector control system // MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 158, no. 01005. doi: 10.1051/mateconf/201815801005
- [9] Азин А. В., Рикконен С. В., Пономарев С. В., Орлов С. А. Линейный реверсивный вибродвигатель. Пат. № 2187888, Российская Федерация, 2019, бюл. № 10.
- [10] Azin A., Rikkonen S., Ponomarev S., Kuznetsov S., Maritsky N. Designing a precision motor for the spacecraft reflector control system // AIP Conference Proceedings, 2019, vol. 2103, no. 020001. doi: 10.1063/1.5099865
- [11] Панич А. Е. Пьезокерамические актюаторы : учеб. пособие / Ростов н/Д : Изд-во Южного федерального университета, 2008. – 159 с.
- [12] Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В., Карев П. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений : учеб. пособие / СПб : Университет ИТМО, 2017. – 134 с.
- [13] Многослойные пьезоактюаторы. URL: <https://www.elpapiezo.ru/Datasheets/AKTUATORS%20multilayer.pdf> (дата обращения: 23.09.2019)

MATHEMATICAL MODELING OF PIEZOELECTRIC STEP-ENGINE WORK

A. V. Azin¹, S. A. Kuznetsov², S. A. Ponomarev¹,
S. V. Ponomarev¹, S. V. Rikkonen¹

¹ Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

² JSC Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation

In the article the results of new piezoelectric step-engine research are presented. The original construct of piezoelectric step-engine is contained in special engineering lever called grab device that can organize back and forward rod's motion with only one piezo element activity.

To choose the effective process of piezoelectric step-engine work the mathematical model was created. This mathematical model describes inner piezoelectric step-engine process like a non-linear vibrational system. The mathematical model identifies speed of piezoelectric step-engine elements over the vibration period with different frequency, load level and voltage.

The prototype of piezoelectric step-engine was produced. Experimental issues were conducted. Piezoelectric step-engine's technical specifications are positioning accuracy over 10^{-6} meter, speed of movement over 10 mm per minute with weight of load to 1 kg and voltage to 100 Volt. On the results of experimental research it is defined that mathematical model enables to model working process of piezoelectric step-engine with an error not more than 10 %.

This research verifies viability of proposed construction and provides the way to increase output power of piezoelectric step-engine.

Keywords: piezoelectric motor, step-engine, sawtooth driving signal, mathematical model, PZT stack.

References

- [1] Ozawa S. Design concept of large deployable reflector for next generation L-band SAR satellite // The 2nd International Scientific Conference Advanced Lightweight Structures and Reflector Antennas Proceedings, Tbilisi, 2014, pp. 43–51.
- [2] Nakamura K., Nakamura N. Concept Design of 15m class Light Weight Deployable Antenna Reflector for L-band SAR Application // 3rd AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA SciTech Forum, San Diego, 2016. doi: 10.2514/6.2016-0701.
- [3] Zheng F., Chen M. New Conceptual Structure Design for Affordable Space Large Deployable Antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, vol. 63, no. 4, pp. 1351–1358. doi: 10.1109/TAP.2015.2404345
- [4] Ponomarev S. V. *Transformiruemye reflektory anten kosmicheskikh apparatov* [Transformable reflectors of spacecraft antennas] // Tomsk State University Bulletin. Mathematics and mechanics, 2011, no. 4 (16), pp. 110–119. (In Russian)
- [5] Peng Y., Gu X., Wang J., Yu H. A review of long range piezoelectric motors using frequency leveraged method // Sensors and Actuators, 2015, vol. 235, pp. 240–255. doi: 10.1016/j.sna.2015.10.015
- [6] Wang L., Chen W., Liu J., Deng J., Liu Y. A review of recent studies on non-resonant piezoelectric actuators // Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, vol. 133, no. 106254. doi: 10.1016/j.ymssp.2019.106254

- [7] Azin A., Rikkonen S., Ponomarev S., Kuznetsov S. Alignment of distributed oscillation systems in piezo motors // IOP Conf. Series: Journal of Physics, 2019, vol. 1145, no. 012007. doi: 10.1088/1742-6596/1145/1/012007
- [8] Azin A., Rikkonen S., Ponomarev S., Kuznetsov S. Design issues of the piezo motor for the spacecraft reflector control system // MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 158, no. 01005. doi: 10.1051/mateconf/201815801005
- [9] Azin A., Rikkonen S., Ponomarev S., Orlov S. Linejnyj reversivnyj vibrodvigatel' [Linear reversible vibration motor]. Patent RU 2187888, 2019, bulletin no. 10.
- [10] Azin A., Rikkonen S., Ponomarev S., Kuznetsov S., Maritsky N. Designing a precision motor for the spacecraft reflector control system // AIP Conference Proceedings, 2019, vol. 2103, no. 020001. doi: 10.1063/1.5099865
- [11] Panich A. E. *P'ezokeramicheskie aktyuatory* [Piezoceramic actuators]. Rostov-on-Don, Southern Federal University, 2008, 159 p. (In Russian)
- [12] Bobtsov A. A., Boykov V. I., Bystrov S. V., Grigoriev V. V., Karev P. V. *Ispolnitel'nye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshcheniy* [Actuators and systems for micromotion]. St. Petersburg, ITMO University, 2017, 134 p. (In Russian)
- [13] Multilayer piezoelectric actuators. Available at: <https://www.elpapiezo.ru/Datasheets/AKTUATORS%20multilayer.pdf> (accessed: 23.09.2019)