



УДК 681.5.08

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОАКТЮАТОРА

А.А. Головин^{a,b}^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация^b АО «Навис», Санкт-Петербург, 199106, Российская Федерация

Адрес для переписки: asd-1234@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 05.06.17, принята к печати 30.10.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1116-1122

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Головин А.А. Идентификация параметров пьезоактюатора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 6. С. 1116–1122. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1116-1122

Аннотация

Рассмотрен вариант технической реализации автоматизированной установки и алгоритмы ее функционирования для определения параметров пьезоактюатора. Оценка произведена по передаточной функции, представленной в форме линейной регрессии. В качестве производных использованы первые приближения. Для анализа результатов процедуры идентификации и определения параметров объекта использованы известные параметры пьезоактюатора. В первом способе на вход подавалось ступенчатое воздействие. На основе анализа полученных результатов сделан вывод, что для обеспечения погрешности меньше 1% необходимо производить измерения с частотой более 200 кГц. Освещены проблемы, связанные с проведением измерений в режиме реального времени и с обработкой больших объемов данных. Для улучшения качества процедуры предложено воспользоваться особенностью работы пьезоактюатора – возможностью непосредственного измерения ускорения, а также формированием широтно-модулированного сигнала переменной скважности для получения более информативного выходного сигнала. Сделан вывод, что применение метода наименьших квадратов совместно с широтно-импульсным входным воздействием и использованием акселерометра позволяет получить результаты с малой погрешностью оценок параметров даже при работе на частотах дискретизации порядка 20 кГц. При использовании встроенного пакета System Identification Toolbox происходит точное определение модели при работе на технически реализуемой в режиме реального времени частоте 20 кГц. В результате проделанной работы предложен вариант технической реализации установки и алгоритм функционирования. Обеспечивается сходжение параметров с точностью до 0,5% при частоте измерения порядка 20 кГц, что позволяет осуществлять работу в режиме реального времени с использованием программного обеспечения MATLAB Simulink Desktop Real-Time.

Ключевые слова

идентификация параметров, метод наименьших квадратов, алгоритм идентификации, пьезоактюатор, MATLAB Simulink, Simulink Desktop Real-Time, Real-Time Simulink, System Identification Toolbox

IDENTIFICATION OF PIEZOACTUATOR PARAMETERS

A.A. Golovin^{a,b}^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^b JSC “Navis”, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation

Corresponding author: asd-1234@yandex.ru

Article info

Received 05.06.17, accepted 30.10.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1116-1122

Article in Russian

For citation: Golovin A.A. Identification of piezoactuator parameters. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 6, pp. 1116–1122 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1116-1122

Abstract

The paper presents a version of technical implementation of automated installation and its performance algorithms for determining the piezoactuator parameters. The evaluation was carried out by a linear regression form of transfer function. The first approximations were used as the derivatives. The known parameters of the piezoactuator were used to analyze identification procedure results and determine the object parameters. A stepwise action was applied to the input in the first method. In this case, it is necessary to perform measurements with a frequency more than 200 kHz to ensure an error less than 1%. The paper deals with the problems related to making measurements in real time mode and to processing large amounts of data. The feature of the piezoactuator operation was used to improve the quality of the procedure – its ability to

direct acceleration measurement. Also, a pulse width modulated signal with a variable duty cycle was formed to obtain a more informative output signal. The conclusion was drawn that the application of the least-squares method in conjunction with the pulse-width input action and the usage of the accelerometer makes it possible to obtain results with a small error in the estimation even when operating at sampling frequencies near 20 kHz. The embedded System Identification Toolbox enables accurate determination of a model on 20 kHz frequency, technically realizable in real time mode. As a result, the variant of technical implementation of automated installation and performance algorithms were proposed. The parameters convergence was provided with an accuracy of 0.5% at measurement frequency of 20 kHz that allows for real-time operation in MATLAB Simulink Desktop Real-Time software.

Keywords

parameters identification, least-squares method, identification algorithm, piezoactuator, MATLAB Simulink, Simulink Desktop Real-Time, Real-Time Simulink, System Identification Toolbox

Введение

Микрометровый и даже нанометровый диапазоны хода пьезоактюаторов позволяют использовать их для решения задач во многих современных прецизионных системах приборостроения, оптических, микроэлектронных, робототехнических системах, а также в различных областях науки и техники [1]. Энергосбережение, компактность, адаптивность к компьютерным системам управления и другие показатели выгодно отличают пьезоэлектрические приводы от электромашинных устройств [2]. Для качественного управления системой необходимо с достаточной точностью построить ее математическую модель. Сформированная только на основе теоретических данных упрощенная модель значительно отличается от реальной системы. Существующие нелинейности характеристик, описанные в [3], а также сложное внутреннее строение пьезокерамики требуют непрерывного мониторинга ее параметров.

Постановка задачи

Настоящая работа направлена на обзор и разработку алгоритмов определения параметров пьезоэлектрических актюаторов. Для решения задачи необходимо применить теоретические знания теории идентификации, специальное программно-аппаратное обеспечение, предложить практическую реализацию метода исследования.

Обзор методов и устройств для определения конструктивных постоянных пьезоэлементов показал, что ни одно из рассмотренных решений не дает полного представления о функционировании исследуемого объекта. В частности, в работе [4] не раскрыто применение методов теории идентификации, описанных в [5], а в отечественных разработках [6, 7] не показаны программно-прикладные средства для реализации этих методов. Экспериментальные методы определения параметров пьезоэлектрических керамических элементов пользуются преимуществом по сравнению с теоретическим расчетом, привязанным к упрощенным математическим моделям или, точнее, физическим закономерностям.

Влияние внешней среды, особенности доменной структуры и характер протекания процессов вынуждают использовать специальные методы для определения параметров и динамических характеристик пьезоактюаторов.

Таким образом, настоящая работа направлена на решение следующей задачи. Необходимо разработать автоматизированную установку и алгоритм для идентификации параметров и снятия динамических характеристик пакетных пьезоактюаторов. Управление процессом идентификации и сбор информации должно осуществляться от персонального компьютера с использованием программного обеспечения MATLAB Simulink.

Математическая модель

В качестве базовой воспользуемся теоретической математической моделью пьезоактюатора (рис. 1), предложенной в [8].

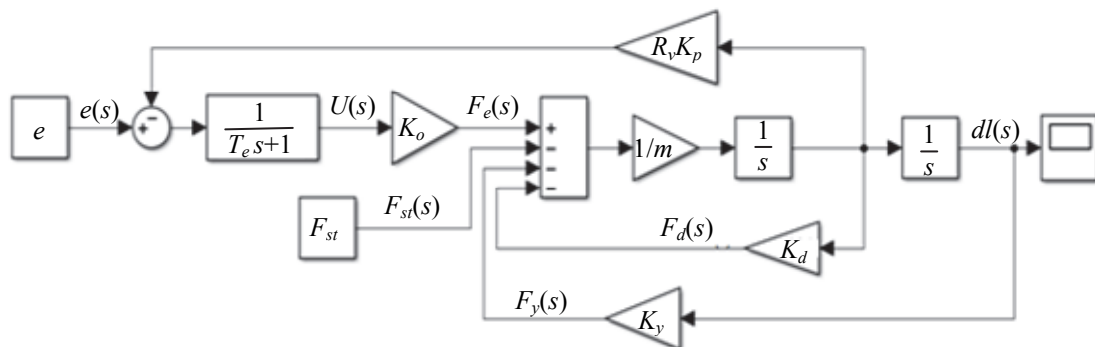


Рис. 1. Схема модели пьезоактюатора в среде MATLAB Simulink

В данной математической модели входной управляющий сигнал на пьезоактюатор представлен изображением Лапласа э.д.с. – $e(s)$. Далее: $U(s)$ – образ электрического напряжения на обкладках пьезоактюатора; $F_e(s)$, $F_{s_i}(s)$ – образы управляющего и внешнего возмущающего механических усилий; $F_y(s)$, $F_d(s)$ – образы усилий упругой деформации материала и внутреннего вязкого трения; $V(s)$ – образ скорости; $dl(s)$ – образ микроперемещений объекта.

Итоговая передаточная функция объекта идентификации имеет следующий вид [8]:

$$W_A(s) = \frac{dl(s)}{e(s)} = \frac{K_o/K_y}{\frac{T_e m_{\Sigma} s^3 + (m_{\Sigma} + \frac{T_e K_d}{K_y}) s^2 + (T_e + \frac{K_d}{K_y} + \frac{R_v K_p K_o}{K_y}) s + 1}}, \quad (1)$$

где K_o – коэффициент обратного пьезоэффекта; K_p – коэффициент прямого пьезоэффекта; K_y – коэффициент упругости материала актюатора; K_d – коэффициент внутреннего демпфирования; m – эквивалентная приведенная масса (сумма нагрузки m_0 и части пьезокерамики m_k); $T_e = R_v C$ – постоянная времени; R_v – сопротивление усилителя; C – емкость актюатора.

В работе использованы следующие допущения: выходное сопротивление усилителя R_v предварительно измерено и постоянно, коэффициент K_p равен K_o , эквивалентная масса m известна. На исследуемый объект не действует внешнее возмущение, он рассматривается как линейный и описывается передаточной функцией (1) вида

$$W(s) = \frac{b}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}. \quad (2)$$

Если с помощью процедуры идентификации определить неизвестные параметры передаточной функции a_3, a_2, a_1, b , то относительно неизвестных физических параметров T_e, K_y, K_o, K_d получим систему из 4 уравнений, которая имеет единственное решение [9].

Линейная регрессия и метод наименьших квадратов

Для определения процедуры идентификации параметров a_3, a_2, a_1, b запишем передаточную функцию (2) в форме линейной регрессии [10–12], где вектор-регрессор $\phi(t)$ состоит из производных по перемещению и управлению:

$$y(t) = \theta \phi(t) = [a_3, a_2, a_1, b] [-\ddot{y}(t), -\dot{y}(t), -y(t), u(t)]^T.$$

Входное и выходное воздействия обычно измеряют непосредственно на всем интервале времени идентификации, однако измерение производных часто связано с техническими трудностями. Исходя из этого, в качестве производных будем использовать их приближенные значения, вычисляемые по конечным разностям:

$$\dot{y}(kT) = \frac{y(k) - y(k-1)}{T},$$

где $y(k)$ – значение в момент времени kT ; $y(k-1)$ – значение в момент времени $(k-1)T$; T – фиксированный интервал времени между соседними измерениями; k – целочисленная переменная (дискретное время).

Произведя измерения с выбранным периодом квантования времени, сформируем массивы измерений. Тогда выражение для вычисления вектора оценки неизвестных параметров по методу наименьших квадратов примет следующий вид [13]:

$$\theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y, \quad (3)$$

где $Y = \begin{bmatrix} y(0) \\ \vdots \\ y(NT) \end{bmatrix}$ – вектор выходных измерений $y(kT)$; $\Phi = \begin{bmatrix} \Phi^T(0) \\ \vdots \\ \Phi^T(NT) \end{bmatrix}$ – регрессионная матрица размера

$4 \times (N+1)$ измеряемых значений $\phi(kT)$, $k = 0, 1, \dots, N$.

Для анализа свойств процедуры идентификации и расчета конкретных параметров объекта воспользуемся известными параметрами пьезоактюатора APA120S, детальная информация о котором представлена на официальном сайте производителя¹. Определим оценку по выражению (3) при различных частотах измерений.

Первоначально на вход пьезоактюатора было подано ступенчатое управляющее воздействие величиной 120 В. Полученный массив измерений обрабатывался с применением встроенных подпрограмм пакета MATLAB. Графики выходного сигнала для частот 2 кГц и 20 кГц представлены на рис. 2. Легко видеть, что при малой частоте измерений выходной величины складывается недостоверное представление о характере переходной характеристики вследствие быстрого протекания колебательных процессов в объекте.

Результаты оценки параметров при различных частотах измерения приведены в табл. 1. По данным табл. 1 можно сделать вывод, что для уменьшения ошибки оценивания необходимо увеличивать частоту измерений. Погрешность меньше одного процента можно получить при частоте дискретизации более 200 кГц. Данное обстоятельство порождает проблемы, связанные с проведением измерений в режиме

¹ Сайт компании Cedrat Technologies [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cedrat-technologies.com/fileadmin/userupload/cedratgroupe/Mechatronicproducts/Piezoactuatorselectronics/APAs/TechnicalDataseet/APA120SGBv3.4.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 28.05.2017).

реального времени и с обработкой больших объемов данных. В таком случае на микроконтроллер установки должны быть возложены задачи формирования входного сигнала, измерения компонент вектора переменных $\phi(kT)$, накопления массива измерений и передачи их в компьютер для последующей обработки. Другими словами, для микроконтроллера должна быть написана программа, делающая установку узкоспециализированной, что существенно снижает гибкость ее применения в задаче идентификации.

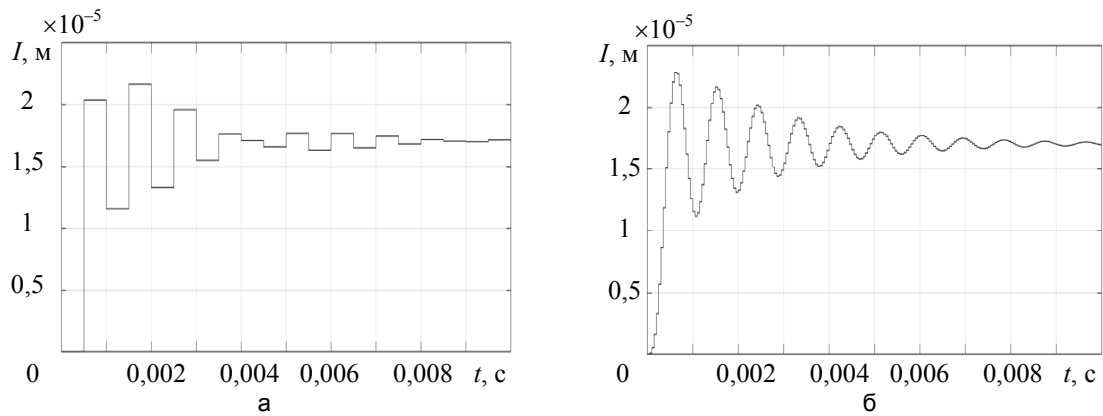


Рис. 2. Графики данных выходного перемещения $I(t)$ при частоте записи в 2 кГц (а) и 20 кГц (б)

Частота дискретизации времени, кГц	Значения параметров			
	a_3, c^3	a_2, c^2	a_1, c	$b, м/В$
Расчетные значения	$4,92 \cdot 10^{-12}$	$2,48 \cdot 10^{-8}$	0,000258	$1,42 \cdot 10^{-7}$
2	$45,1 \cdot 10^{-12}$	$39,6 \cdot 10^{-8}$	0,001126	$1,42 \cdot 10^{-7}$
20	$5,63 \cdot 10^{-12}$	$3,92 \cdot 10^{-8}$	0,000334	$1,42 \cdot 10^{-7}$
200	$4,98 \cdot 10^{-12}$	$2,61 \cdot 10^{-8}$	0,000263	$1,42 \cdot 10^{-7}$
2000	$4,92 \cdot 10^{-12}$	$2,48 \cdot 10^{-8}$	0,000258	$1,42 \cdot 10^{-7}$

Таблица 1. Результаты идентификации при ступенчатом входном воздействии

Одной из проблем с точки зрения математики является приближенное вычисление производной до третьего порядка включительно. Особенностью работы пьезоактюатора является возможность непосредственного измерения ускорения, что позволяет улучшить оценки переменных. Следующий шаг – формирование специального входного сигнала, воздействующего на пьезоактюатор. Для улучшения сходимости оценки к истинным значениям полезно возбуждать объект насыщенным входным воздействием. При использовании прямоугольного сигнала с постоянным периодом выходной вектор будет компоноваться блоками одинаковых значений. Решение может заключаться в применении сигнала с переменной скважностью. В этом случае, воздействуя на пьезоактюатор последовательностью импульсов разной длительности, получаем более информативный выходной сигнал. Рекомендуется изменять длительность импульса от половины времени переходного процесса до удвоенного его значения. Формирование входного широтно-импульсного сигнала и обработка результатов измерений были выполнены с применением встроенных подпрограмм пакета MATLAB. Результаты расчета параметров приведены в табл. 2.

Частота дискретизации времени, кГц	Значения параметров			
	a_3, c^3	a_2, c^2	a_1, c	$b, м/В$
Расчетные значения	$4,92 \cdot 10^{-12}$	$2,48 \cdot 10^{-8}$	0,000258	$1,42 \cdot 10^{-7}$
2	$6,69 \cdot 10^{-12}$	$0,62 \cdot 10^{-8}$	0,000516	$1,42 \cdot 10^{-7}$
20	$4,95 \cdot 10^{-12}$	$2,47 \cdot 10^{-8}$	0,000259	$1,42 \cdot 10^{-7}$
200	$4,92 \cdot 10^{-12}$	$2,48 \cdot 10^{-8}$	0,000258	$1,42 \cdot 10^{-7}$
2000	$4,92 \cdot 10^{-12}$	$2,48 \cdot 10^{-8}$	0,000258	$1,42 \cdot 10^{-7}$

Таблица 2. Результаты идентификации при широтно-модулированном входном воздействии

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что применение метода наименьших квадратов совместно с широтно-модулированным входным воздействием переменной скважности и использованием акселерометра позволяет получить результаты с малой погрешностью оценок параметров даже при работе на частотах дискретизации порядка 20 кГц.

Особенности технической реализации

В работе использован пакет System Identification Toolbox, который позволяет определять математические модели динамических систем по измеренным данным, совместно с пакетом Simulink Desktop Real-Time, который обеспечивает исполнение моделей и работу с внешними физическими устройствами в реальном времени на компьютере под управлением Windows. Контроль исполнения, визуализация сигналов, запись данных, настройка параметров происходят напрямую из Simulink. В режиме External Mode производительность обеспечивается до 20 кГц¹. Схема предлагаемой реализации метода идентификации представлена на рис. 3.

Изложим алгоритм процесса идентификации. С помощью программного обеспечения на компьютере формируется сигнал управления, который, пройдя через микроконтроллер и усилитель, воздействует на пьезоактюатор. Информация о состоянии объекта исследования, полученная с акселерометра, поступает обратно на компьютер, где производится расчет оценки по методу наименьших квадратов. При необходимости данные визуализируются.

При использовании пакета System Identification Toolbox в схеме не требуется акселерометр, входное воздействие – единичный импульс. Данные, полученные с датчика перемещений по линии связи, поступают в блок управления идентификацией, в качестве которого может выступать любой компьютер, на котором установлено ядро реального времени, поставляемое вместе с пакетом программ MATLAB. Данные поступают на обработку во встроенный пакет System Identification Toolbox, необходимая информация визуализируется.

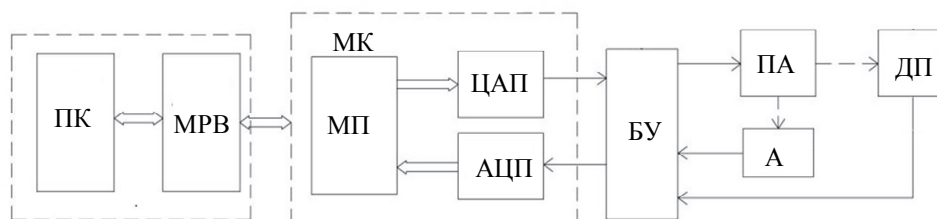


Рис. 3. Функциональная схема технической реализации алгоритма идентификации под управлением продукта Desktop Real-Time (Simulink Real-Time): ПК – персональный компьютер; МРВ – машина реального времени; МК – микроконтроллер; МП – микропроцессор; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БУ – блок усилителей; А – акселерометр; ДП – датчик перемещения; ПА – пьезоактюатор

Возможно также использование продукта Real-Time Simulink. Отличие от вышеописанного варианта состоит в наличии в схеме дополнительного компьютера (машины реального времени), на котором установлено ядро реального времени, т.е. в его физическом разделении с Windows.

Так как использование продуктов MATLAB не всегда возможно, то можно предложить альтернативный, более экономичный вариант без работы в реальном времени. В этом случае вместо обычного микроконтроллера можно использовать специальный микроконтроллер с расширенным модулем памяти². Данные, полученные с высокоскоростного АЦП, первоначально записываются в память микроконтроллера, а затем постепенно передаются на компьютер для дальнейшей обработки. При такой реализации необходимо обеспечить формирование входного сигнала с использованием элементной базы, запрограммировать микроконтроллер, согласовать работу всех компонентов схемы в целом.

Предложенные варианты технической реализации установки и алгоритм функционирования были протестированы. Параметры сходятся с точностью до 0,5% при частоте измерения порядка 20 кГц, что позволяет осуществлять работу в режиме реального времени с использованием программного обеспечения MATLAB Simulink Desktop Real-Time.

¹ Сайт компании The MathWorks, Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/solutions/rapid-prototyping/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 28.05.2017).

² Сайт компании Stmicroelectronics [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www2.st.com/content/stcom/en/products/mems-and-sensors/automotive-sensors.html/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 28.05.2017).

Заключение

Рассмотрены алгоритмы и методы для определения параметров модели пьезоактюатора. По результатам анализа литературы сделан вывод об отсутствии решений задачи с применением теории идентификации, а также специальных программно-аппаратных средств.

Исследована динамика процесса идентификации методом наименьших квадратов с возбуждением объекта единичным входным воздействием. Построены графики переходных процессов при разных частотах измерений. Предложен усовершенствованный способ оценивания с формированием сигнала переменной скважности и получением дополнительной информации о переменной состоянии ускорения пьезоактюатора. Опробован встроенный в MATLAB пакет System Identification Toolbox. Полученные теоретические результаты позволяют выполнять идентификацию параметров с применением программного обеспечения MATLAB в реальном времени.

Предложен вариант технической реализации процесса идентификации в режиме реального времени под управлением обычного персонального компьютера или машины реального времени. Рассмотрен вариант работы с большой частотой измерений и без использования программного обеспечения MATLAB.

Полученные погрешности в оценках могут быть связаны с наличием обратных связей в схеме и взаимной корреляцией компонентов регрессионного вектора. Дальнейшее исследование предполагает апробацию алгоритмов с использованием машины реального времени и средств программного обеспечения MATLAB. Также на данной модели испытывается новый способ идентификации параметров улучшенного метода наименьших квадратов, связанного с процедурой динамического расширения регрессора [14], и исследуются способы повышения быстродействия пьезоактюаторов [15, 16].

Литература

1. Панич А.Е. Пьезокерамические актюаторы. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. 159 с.
2. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. 131 с.
3. Никольский А.А. Новые высокоточные электроприводы с пьезокомпенсаторами для станков, механизмов и приборов // *Электротехника*. 1993. № 1. С. 27–31.
4. Livingston J.A., Kemner C.A., Dam C.Q., Davis J.R., Clemens L.C. Testing apparatus for a multilayer piezoelectric actuator. Patent US5301558. 1994.
5. Лjung Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. М.: Наука, 1991. 432 с.
6. Быстров С.В., Бобцов А.А., Григорьев В.В., Бойков В.И., Бушуев А.Б. Устройство для испытания пьезоэлектрического привода и его элементов. Патент на полезную модель №76138. 2008.
7. Субботин М.И. Устройство для определения частоты установочного резонанса пьезоэлектрических датчиков. Патент РФ №2176383. Бюл. 2000. №28.
8. Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
9. Бойков В.И., Головин А.А. Особенности идентификации параметров пьезоактюаторов // Международная научно-практическая конференция "Инновационные механизмы решения проблем научного развития". Сызрань, 2016. Часть 1. С. 9–13.
10. Sastry S., Bodson M. Adaptive Control. Stability, Convergence, and Robustness. New Jersey: Prentice-Hall, 1989. 377 p.
11. Soderstrom T.S., Stoica P.G. System Identification. New Jersey: Prentice-Hall, 1994. 612 p.
12. Андриевский Б.Р. Идентификация и диагностика систем [Электронный ресурс]. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 83 с.
13. Aarts R.G. System Identification and Parameter Estimation. Enschede: Universiteit Twente, 1998. 103 p.
14. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2016. V. 62. N 7. P. 3546–3550. doi: 10.1109/tac.2016.2614889
15. Головин А.А. Повышение быстродействия силовых пьезоактюаторов // Сборник трудов VI Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб.: Университет ИТМО, 2017. С. 56–59.
16. Головин А.А., Луценко Д.С., Бойков В.И. Способы

References

1. Panich A.E. *Piezoceramic Actuators*. Rostov-on-Don, Russia, SFU Publ., 2008, 159 p. (In Russian)
2. Bobtsov A.A., Boikov V.I., Bystrov S.V., Grigor'ev V.V. *Implementing Devices and Systems for Microspaces*. St. Petersburg, SPbSU ITMO Publ., 2011, 131 p. (In Russian)
3. Nikol'skii A.A. New high-precision electric drives with piezo-compensators for machines, mechanisms and devices. *Elektrotekhnik*, 1993, no. 1, pp. 27–31. (In Russian)
4. Livingston J.A., Kemner C.A., Dam C.Q., Davis J.R., Clemens L.C. *Testing apparatus for a multilayer piezoelectric actuator*. Patent US5301558, 1994.
5. Ljung L. *System Identification: Theory for the User*. 2nd ed. New Jersey, Prentice-Hall, 1999, 409 p.
6. Bystrov S.V., Bobtsov A.A., Grigor'ev V.V., Boikov V.I., Bushuev A.B. *Device for testing a piezoelectric drive and its components*. Patent for utility model, no. 76138, 2008. (In Russian)
7. Subbotin M.I. *Device for determining the frequency of the mounting resonance of piezoelectric sensors*. Patent RU2176383, 2000.
8. Nikol'skii A.A. *Precise Two-Channel Servo Drives with Piezo-compensators*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, 160 p. (In Russian)
9. Boikov V.I., Golovin A.A. Features of identification of piezoactuator parameters. *Proc. Int. Conf. on Innovative Mechanisms for Solving Problems of Scientific Development*. Syzran', Russia, 2016, part 1, pp. 9–13. (In Russian)
10. Sastry S., Bodson M. *Adaptive Control. Stability, Convergence, and Robustness*. New Jersey, Prentice-Hall, 1989, 377 p.
11. Soderstrom T.S., Stoica P.G. *System Identification*. New Jersey, Prentice-Hall, 1994, 612 p.
12. Andrievskii B.R. *Identification and Diagnostics of Systems* [Electronic resource]. St. Petersburg, NRU ITMO Publ., 2012, 83 p. (In Russian)
13. Aarts R.G. *System Identification and Parameter Estimation*. Enschede, Universiteit Twente, 1998, 103 p.
14. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, vol. 62, no. 7, pp. 3546–3550. doi: 10.1109/tac.2016.2614889
15. Golovin A.A. Increasing power piezoactuator speed. *Proc. 6th All-Russian Congress of Young Scientists*. St. Petersburg, 2017, pp. 56–59. (In Russian)
16. Golovin A.A., Lutsenko D.S., Boikov V.I. Methods for

повышения быстродействия управления силовыми пьезоактюаторами // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых [Электронный ресурс]. СПб.: Университет ИТМО, 2017.

increasing the speed of control of power piezo actuators. *Proc. Congress of Young Scientists* [Electronic resource]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2017. (In Russian)

Авторы

Головин Артем Андреевич – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер, АО «Навис», Санкт-Петербург, 199106, Российская Федерация, asd-1234@yandex.ru

Authors

Artyom A. Golovin – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; engineer, JSC “Navis”, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation, asd-1234@yandex.ru