

можно активно преодолевать ограничения, обусловленные условной разрешимостью двухполюсника или неразрешимостью его отдельных элементов. Очевидно, что требование разрешимости является ключевым при развитии актуального направления, связанного с решением обратных задач в области измерений многопараметрических величин. Упомянутое деление параметров на неразрешимые, однозначно либо условно разрешимые справедливо и в общем случае. В силу этого для решения обратных задач полезным будет рассмотренное выявление условий, при соблюдении которых можно однозначно определить максимальное число неизвестных параметров. Предложенная процедура также иллюстрирует общую возможность существенного упрощения решений задач (в данном случае – проблемы разрешимости) за счёт учёта специфических характеристик многомерного объекта. Таким образом, несомненны актуальность и значимость рассмотренного подхода, применённого к важному частному случаю моделирования объекта многоэлементным двухполюсником.

Л и т е р а т у р а

1. Кнеллер В. Ю., Боровских Л. П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Horia Andrei, Fanica Spidel, Costin Cepisca, George Enciu, Mircea Popa, Marius Silaghi. Determination of the Sensitivities for Two-Ports Networks in Steady State Nonsinusoidal Regime // Proc. 5th WSEAS Intern. Conf. Appl. Electrical Eng. Prague, Czech Republic, 2006. P. 161–166.

3. Mlynek P., Misurec J., Koutny M., Silhavy P. Two-port Network Transfer Function for Power Line Topology Modeling // Radioeng. 2012. V. 21. No. 1. P. 356–363.

4. Бобылев Д. А. Оценка быстродействия помехозащищенных преобразователей параметров многоэлементных RC-двухполюсников // Датчики и системы. 2015. № 12. С. 3–7.

5. Передельский Г. И., Диденко Ю. В. Свойства частотно-независимых двухполюсников // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. № 2(219). С. 110–118.

6. Сешу С., Рид М. Б. Линейные графы и электрические цепи. М.: Высшая школа, 1971.

7. Боровских Л. П., Читашвили Н. Г. Диагностируемость аналоговых цепей в виде многоэлементных двухполюсников // Автоматика и телесистемы. 1990. № 5. С. 141–146.

8. Фаянс А. М. Возможности определения параметров объектов, представимых в виде многоэлементных RLC-двухполюсников // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения УКИ-10: Труды Рос. конф. с междунар. участием. ИПУ РАН. М., 2010. С. 236–237.

9. Фаянс А. М. Возможности выявления полного множества структур однозначно разрешимых многоэлементных двухполюсников, состоящих из элементов двух типов // Датчики и системы. 2013. № 1. С. 16–22.

Дата принятия: 23.12.2016.

519.24

Калибровка и валидация преобразователей переменной силы

М. Ю. ПРИЛЕПКО

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,
Россия, Москва, e-mail: prilepko@vniims.ru

Рассмотрена актуальность проведения процедуры валидации преобразователей переменной силы. Представлена модель динамического взаимодействия элементов преобразователя переменной силы при калибровке методом нагрузочной массы. Приведены математические выражения, описывающие процесс калибровки. Предложена схема калибровочной установки, наиболее пригодной для преобразователей переменной силы.

Ключевые слова: калибровка, верификация, валидация, преобразователь переменной силы, метод нагрузочной массы, пьезоактуатор.

The actual validation procedures for dynamic force transducers. The dynamic interaction model of elements transducer under test during the calibration by test mass method presented. The brief mathematical equations describing the calibration process represented. The schematic diagram of the calibration setup that best suited to the purposes of validation for dynamic force transducers was represented.

Key words: calibration, verification, validation, dynamic force transducers, test mass method, piezoactuator.

Одной из составных частей контрольно-измерительной аппаратуры для измерений механических величин являются пьезоэлектрические преобразователи переменных сил (ППС). Достоверность информации всей измерительной

системы зависит от метрологических характеристик таких ППС [1]. Двумя наиболее важными процедурами, обеспечивающими достоверность измерений с помощью ППС, являются периодические калибровки ППС, выполняемые

в соответствии с требованиями принятой системы управления качеством (в промышленной метрологии), и периодические поверки с целью оценки соответствия ППС требованиям нормативных документов (в законодательной метрологии) [2].

В большинстве случаев при калибровке или поверке ППС не уделяется должного внимания определению их метрологических характеристик, связанных с особенностями применения. Одной из причин такого подхода является то, что большая часть методик выполнения измерений составлена без учёта различий метрологических характеристик, полученных в условиях лабораторий и характеристик, имеющих место в условиях реальной эксплуатации ППС. Другой причиной является функциональная ограниченность и моральное устаревание существующего парка испытательного оборудования при общей тенденции непрерывно ужесточающихся требований к точности определения метрологических характеристик ППС, находящихся всё более широкое применение в науке и промышленности. Также важной причиной является дефицит российских и международных нормативных документов, в том числе терминологических, касающихся описания и номенклатуры метрологических характеристик ППС, подлежащих определению при калибровке и нормированию в зависимости от конкретных задач.

Используемые в настоящее время методики испытаний не всегда позволяют корректно определять метрологические характеристики калибруемого ППС. Различия метрологических характеристик обусловлены различным действием сил в разных условиях. В частности, при калибровке ППС одним из основных методов (методом нагрузочной массы), возбуждение возможно только по синусоидальному закону на одной определённой частоте [3], в то время как в условиях реальной эксплуатации на ППС действуют силы, изменяющиеся по более сложным законам с широким частотным спектром.

Существующая на сегодняшний день методология и технические средства в области измерений переменных сил ограничивают возможности определения истинных метрологических характеристик ППС, учитывающих его динамические характеристики (амплитудно- и фазочастотные, монтажный резонанс). При этом риск получения недостоверной информации может превышать риск метрологического отказа, трактуемого в [4] как «выход метрологической характеристики средства измерений за установленные пределы» [5]. Таким образом, актуальной является разработка методик калибровки или поверки, максимально учитывающих условия реальной работы ППС, установленных на объекте измерений. Такие методики позволяют производить калибровку (поверку) ППС не только при синусоидальном возбуждении, но и при возбуждении гармоническими сигналами сложной формы в широком диапазоне частот с предварительной нагрузкой сжатием или растяжением.

Пьезоэлектрические преобразователи переменных сил работают в жёстких условиях эксплуатации: высокие и низкие температуры, высокие статические и динамические нагрузки, линейные ускорения, акустические шумы, механические и гидравлические удары, агрессивные и криогенные среды. При этом ППС как средство измерений (СИ) должен обладать неизменными метрологическими характеристиками при воздействии всех дестабилизирующих факторов во время всего срока службы. Всё это необходимо для опре-

деления параметров нештатной ситуации, предшествующей аварии, и выработки мер предупреждения. Поэтому требования к достоверности метрологических характеристик ППС, находящегося в условиях реальной эксплуатации, исключительно высоки. Для правильного выбора ППС, отвечающих заданным требованиям, необходимо совершенствовать методы анализа характеристик на стадии проектирования измерительной системы [6].

Общие и специальные термины и определения (калибровка, верификация, поверка, валидация), помогающие понять смысл определения метрологических характеристик СИ, приведены в [7]. Согласно [8], валидация определена как подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены. В русскоязычной литературе чаще встречается термин «аттестация», являющийся смысловым эквивалентом и частным случаем понятия «валидация». Другими словами, в процессе валидации устанавливают (в условиях одной лаборатории или в межлабораторном эксперименте) ряд характеристик, включая показатели точности, и сопоставляют их с имеющимися требованиями [9].

При использовании ППС, не прошедшего процедуру валидации, может сложиться ситуация, когда формальные критерии выбора выполнены, а изделие не работает или даёт недостоверную информацию. Это приводит к необходимости выбора нового ППС, более полно удовлетворяющего требованиям поставленной задачи. Однако нередко приходится выбирать вслепую, руководствуясь лишь характеристиками, заявленными производителем, причём без указаний способа их получения. Поэтому процедура валидации является всеобъемлющей и конкретизированной, чем верификация.

В качестве примера, иллюстрирующего ограниченный набор представленных характеристик, приведена таблица технических и метрологических характеристики ППС серии 9000 фирмы Kistler, Швейцария (табл. 1).

Метрологические характеристики представлены лишь диапазоном измерений и коэффициентом преобразования. Косвенно полезным может быть параметр жёсткости, так как по нему можно приблизительно оценить частоту собственного резонанса преобразователя.

В табл. 2 указаны характеристики ППС серии 93. Здесь, кроме характеристик, перечисленных в табл. 1, указана ещё частота собственного резонанса. Однако не указаны частотный диапазон, неравномерность амплитудно-частотной характеристики в диапазоне рабочих частот, нелинейность амплитудной характеристики, фазочастотная характеристика.

Все метрологические характеристики рассматриваемых ППС необходимы для определения возможной области их применения. Например, если такие характеристики, как диапазон измерений и коэффициент преобразования, удовлетворяют критериям поставленной задачи, то частотные свойства остаются неизвестными. Ограниченный набор характеристик неизбежно приведёт к грубым ошибкам выбора ППС применительно к поставленной задаче. Валидация ППС в подобных случаях должна быть неотъемлемой процедурой на начальных этапах проектирования измерительной системы. При этом валидацию необходимо выполнять по методикам, наиболее полно воспроизводящим реальные условия работы ППС.

Т а б л и ц а 1

Технические и метрологические характеристики пьезоэлектрических преобразователей переменной силы серии 9000 фирмы Kistler (Швейцария)

Характеристика	Единица измерения	Модель преобразователя		
		9001A	9011A	9021A
Диапазон измерений	кН	0–7,5	0–15	0–35
Калиброванный диапазон измерений	кН	0–6	0–12	0–28
Чувствительность	пКл/Н	–4,0	–4,3	–4,3
Жёсткость	кН/мкм	1,1	1,6	3,4
Размеры (диаметр наружный × диаметр внутренний × высота)	мм	10,3×4,1×6,5	14,5×6,5×8	22,5×10,5×10
Масса	г	3	7	20
Рабочий диапазон температур	°С	–196...+200	–196...+200	–196...+200
Степень защиты по IEC/EN 60529: с разъёмным кабелем с неразъёмным кабелем	IP65 IP67	IP65 IP67	IP65 IP67	IP65 IP67

Квазистатическая калибровка при относительно медленном линейном нарастании (спаде) силы и калибровка методом нагрузочной массы при синусоидальном возбуждении не позволяют получить амплитудно- и фазочастотные характеристики калибруемого ППС с приемлемой точностью в требуемом диапазоне частот. При калибровке методом нагрузочной массы происходит взаимодействие объекта заданной массы с поверяемым ППС при известном ускорении. Отдаваемый ППС электрический заряд измеряется при фиксированном ускорении сначала без нагрузочной массы, затем с ней. Тогда динамические силы, действующие на ППС в данных условиях, выражаются как

$$F_1 = (m_l + m_i) a = q_1 / S; \quad (1)$$

$$F_2 = m_i a = q_2 / S, \quad (2)$$

Т а б л и ц а 2

Технические и метрологические характеристики пьезоэлектрических преобразователей переменной силы серии 93 фирмы Kistler (Швейцария)

Характеристика	Единица измерения	Модель преобразователя	
		9301B	9311B
Диапазон измерений	кН	–2,5...+2,5	–5...+5
Калиброванный диапазон измерений	кН	0–2,5	0–5
Чувствительность	пКл/Н	–3,2	–4,0
Жёсткость	кН/мкм	0,44	0,73
Частота собственного резонанса	кГц	≈90	≈70
Размеры (диаметр наружный × диаметр внутренний × высота)	мм	11×М5×25	15×М6×30
Масса	г	14	28
Рабочий диапазон температур	°С	–40...+120	–40...+120
Степень защиты по IEC/EN 60529: с разъёмным кабелем с неразъёмным кабелем	AIP65 IP67	IP65 IP67	IP65 IP67

где m_l – нагрузочная масса; m_i – эффективная масса конструктивных элементов ППС, расположенных выше чувствительного элемента; a – ускорение ППС; q_1 , q_2 – электрические заряды; S – коэффициент преобразования ППС.

Опорный коэффициент преобразования ППС (определяемый на опорной частоте при пренебрежимо малой статической нагрузке) определяется с учётом (1), (2):

$$S = (q_1 - q_2) / (m_l m_i).$$

Динамическую модель взаимодействия конструктивных элементов ППС, совершающего гармонические колебания, можно представить в виде связанных параметров масса–упругость–демпфирование. Схема модели ППС

с установленной нагрузочной массой представлена в [10]. Модель можно описать системой линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами [2]:

$$\left. \begin{aligned} m_l \ddot{\mathbf{x}}_l &= -s_l (\mathbf{x}_l - \mathbf{x}_i) - d_l (\dot{\mathbf{x}}_l - \dot{\mathbf{x}}_i); \\ m_i \ddot{\mathbf{x}}_i &= s_l (\mathbf{x}_l - \mathbf{x}_i) + d_l (\dot{\mathbf{x}}_l - \dot{\mathbf{x}}_i) - s_s (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_b) - d_s (\dot{\mathbf{x}}_i - \dot{\mathbf{x}}_b); \\ m_b \ddot{\mathbf{x}}_b &= s_s (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_b) + d_s (\dot{\mathbf{x}}_i - \dot{\mathbf{x}}_b) + F, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где m_l , m_i , m_b – значения нагрузочной, внутренней верхней и внутренней нижней масс ППС; $\mathbf{x}_l$, $\mathbf{x}_i$, $\mathbf{x}_b$ – векторы направления движения нагрузочной, внутренней верхней и внутренней нижней масс ППС, соответственно; s_l – упругость соединения нагрузочной массы с внутренней верхней массой ППС; d_l – фактор демпфирования упругого соединения нагрузочной массы с внутренней массой ППС; s_i – упругость соединения чувствительного элемента ППС с верхней крышкой ППС; d_i – фактор демпфирования упругого соединения чувствительного элемента ППС с верхней крышкой ППС; s_s – упругость соединения чувствительного элемента ППС с основанием корпуса; d_s – фактор демпфирования упругого соединения чувствительного элемента ППС с основанием корпуса; s_b – упругость соединения чувствительного элемента ППС с основанием корпуса; d_b – фактор демпфирования упругого соединения чувствительного элемента ППС с основанием корпуса; F – сила вибровозбудителя.

Механическую колебательную систему из [10] можно представить в виде эквивалентной электрической схемы (рисунок), приняв электрическую ёмкость за массу, индуктивность за упругость, электрическое сопротивление потерь за демпфирование.

Таким образом, при калибровке ППС методом нагрузочной массы необходимо рассматривать систему «вибровозбудитель – преобразователь переменной силы – нагрузочная масса» не как одно жёсткое целое, а как три отдельных элемента, соединения между которыми описываются связанными параметрами

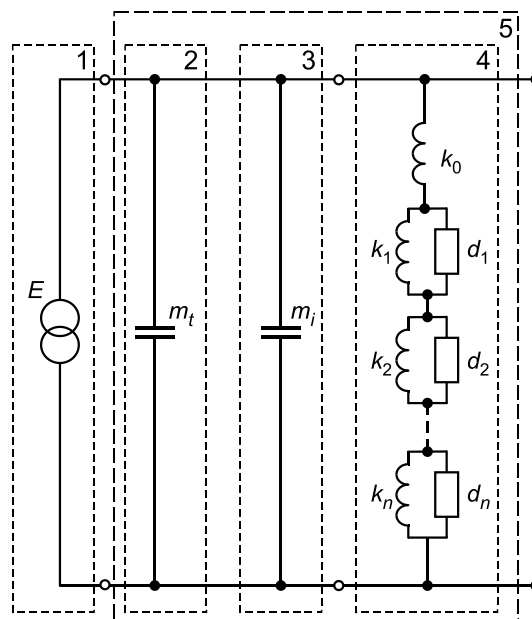


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема динамической модели взаимодействия «масса–упругость–демпфирование»:
1 – источник силы; 2 – присоединённая нагрузочная масса;
3 – внутренняя масса преобразователя переменной силы;
4 – упругие элементы с демпфированием; 5 – система колебательных процессов

масса–упругость–демпфирование с существованием градиента ускорения вдоль оси возбуждения колебаний. Как следует из уравнений (3), описывающих движение ППС при гармоническом возбуждении, и математической модели ППС, в его конструкцию входят нагрузочная (присоединённая) масса m_p , внутренняя масса преобразователя m_p , факторы упругости соединения этих масс s_p , s_p , s_b , s_s , которые обуславливают колебательный (резонансный) характер взаимодействия указанных масс при внешнем возбуждении.

Для реализации методик измерений, максимально полно воспроизводящих реальные условия эксплуатации ППС и наиболее подходящих для валидации ППС, целесообразно применять метод непосредственного воспроизведения силы с помощью пьезоактюатора, а действующие переменные силы измерять либо эталонным преобразователем, либо лазерным интерферометром. Одна из возможных установок такого типа схематически представлена в [11].

Описанный в [11] способ лишён недостатков и ограничений, присущих способу нагрузочной массы, имеет большой функциональный потенциал, позволяет определять метрологические характеристики ППС в условиях, имитирующих условия его предполагаемого применения при определённом способе крепления ППС, заданной предварительной нагрузке, заданной форме возбуждающих сигналов, диапазоне частот, характере изменения нагрузки.

Закключение. Метрологические характеристики ППС общего применения указываются производителем в каталогах без учёта специфики конкретных условий применения. Валидация ППС необходима уже на начальных этапах проектирования измерительной системы для определения её возможной области применения и более полного и точного раскрытия потенциальных возможностей ППС. Использование калибровочных установок с непосредственным возбуждением силы с помощью пьезоэлектрического актюатора в широком диапазоне частот и регулировкой предварительного нагружения представляется наиболее целесообразным в целях валидации ППС.

Л и т е р а т у р а

1. Янчик В. В., Панич А. Е. Перспективы применения интегрированных многофункциональных преобразователей в пьезоэлектрических датчиках механических величин // Инженерный вестник Дона. 2010. № 3. С. 172–174.
2. Sommer K. D., Chappell S. E., Kochsiek M. Калибровка и поверка. Две процедуры с сопоставимыми целями // Главный метролог. 2015. № 5. С. 9–19.
3. Schlegel C., Kiekenap G., Glöckner B., Kümme R. Dynamic Calibration of Force Transducers Using Sinusoidal Excitations // Sensors and Transducers Journal. 2012. V. 14. No. 1. P. 95–111.
4. РМГ 29-2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
5. Пронин А. Н., Сапожникова К. В., Тайманов Р. Е. Достоверность измерительной информации в системах управления. Проблемы и решения // T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт. 2015. № 3. С. 32–37.
6. Богуш М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков с использованием конечно-элементных математических моделей // Приборы. 2007. № 12. С. 30–38.
7. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины / Пер. с англ. и фр. ВНИИМ. СПб.: НПО «Профессионал», 2010.
8. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
9. Кадис Р. Л. Метрологический и статистический смысл понятия «точность» в химическом анализе. ИСО 5725, показатели точности и неопределённость измерений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. № 2. С. 53–60.
10. Прилепко М. Ю. Использование метода лазерной интерферометрии при калибровке преобразователей переменной силы // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. № 10. С. 66–69.
11. Прилепко М. Ю. Способ динамической калибровки преобразователей переменной силы // Приборы. 2015. № 4. С. 31–35.

Дата принятия: 03.10.2016.