

Оценка соответствия. Аккредитация лабораторий

УДК 001.891.53

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПРИ КАЛИБРОВКЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОЙ СИЛЫ

© М. Ю. Прилепко¹

Статья поступила 2 марта 2015 г.

Рассмотрены различные процессы калибровки преобразователей переменной силы (ППС). Представлена кинематическая модель преобразователя переменной силы в режиме гармонических колебаний. Предложен способ калибровки ППС с использованием метода лазерной интерферометрии. Описанный способ и устройство на его основе позволяют проводить калибровку, соответствующую реальным условиям эксплуатации ППС, и определять их амплитудно- и фазочастотные характеристики в диапазоне 10 Гц – 20 кГц.

Ключевые слова: переменные силы; коэффициент преобразования; демпфирование; синусоидальное возбуждение; пьезоактуатор; преобразователь силы; тестовая масса; упругое тело; лазерный интерферометр; калибровочное устройство.

При разработке и создании сложных конструкций и отдельных конструктивных элементов в ряде случаев наряду с прочностным расчетом целесообразно измерять переменные силы, возникающие при работе того или иного механизма. В настоящее время средства измерений переменных сил широко используют в следующих областях:

автомобильной промышленности (датчики силы электрических усилителей рулевого управления, датчики силы прижатия тормозных колодок);

аэрокосмической отрасли (измерение инерционных сил при ориентации космических и летательных аппаратов);

энергетической отрасли (измерение распределения динамических сил фундаментов гидроагрегатов и силовых установок);

строительстве при возведении высотных зданий (активные антисейсмические системы);

машиностроении (создание и контроль прессовых посадок, контактная сварка);

охране труда (определение вредного воздействия на человека вибрации при управлении машинами и механизмами);

медицине (определение податливости биологических тканей).

Методы калибровки преобразователей переменных сил (ППС), используемые в настоящее время, не позволяют получить метрологические характеристики, адекватные таковым при работе преобразователей в реальных условиях эксплуатации. Причиной

является тот факт, что амплитудно- и фазочастотные характеристики преобразователей не совпадают с полученными при испытаниях в лабораторных условиях. Указанные расхождения не позволяют создать полноценную систему метрологического обеспечения в области измерений переменных сил. В связи с этим актуальной задачей является создание способа, позволяющего проводить калибровку и поверку ППС как при синусоидальном возбуждении, так и при возбуждении сигналами сложной формы в широком диапазоне частот, что соответствовало бы условиям, максимально приближенным к условиям эксплуатации преобразователей, установленных на объекте измерений.

Калибровку ППС можно проводить несколькими способами: 1) квазистатическим; 2) ударного возбуждения; 3) гармонического возбуждения.

Рассмотрим реализацию указанных способов более подробно.

Квазистатический способ калибровки ППС (способ скачкообразного изменения силы) заключается в приложении к калибруемому преобразователю статической силы фиксированной величины с последующим быстрым ее снятием, при этом ряд значений выходного сигнала до установившегося значения регистрируют при помощи аналого-цифрового преобразователя, подключенного к компьютеру. Способ позволяет проводить калибровку в широком диапазоне сил, однако определение частотных характеристик преобразователя этим способом ограничено.

При *способе ударной калибровки* ППС ускорение подвешенной эталонной ударной массы под воздействием ударного импульса измеряют установленным

¹ ФГУП «ВНИИМС», Москва, Россия;
e-mail: prilepko@vniims.ru

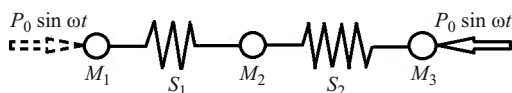


Рис. 1. Схема калибровки ППС в автоколебательном режиме: M_1 и M_2 — большая и меньшая инерционные массы; S_1 — упругий элемент калибруемого преобразователя силы; S_2 — резонирующий элемент; M_3 — приведенная масса соединительных элементов

на ней акселерометром. Калибровку преобразователя осуществляют путем удара по образцовой массе и синхронного измерения электрических сигналов калибруемого ППС и акселерометра, что позволяет определить частотную характеристику и эффективную массу преобразователя. Недостатками способа являются недостаточно широкий диапазон сил и ограничения в определении амплитудно- и фазочастотных характеристик.

Способ гармонического возбуждения использует взаимодействие нагрузочной тестовой массы известной величины с поверяемым преобразователем силы при сообщении ему гармонических колебаний. Отдаваемый преобразователем силы электрический заряд измеряют при фиксированном значении ускорения сначала при отсутствии, а затем в присутствии нагрузочной массы.

Опорный коэффициент преобразования ППС (определяемый на опорной частоте при пренебрежимо малой статической нагрузке) вычисляют по формуле

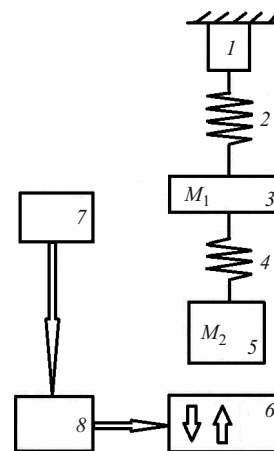
$$S = \frac{q_1 - q_2}{Ma}, \quad (1)$$

где q_1 , q_2 — значения отдаваемого ППС электрического заряда в присутствии и при отсутствии нагрузочной массы соответственно; M — нагрузочная масса; a — ускорение преобразователя переменной силы.

Для измерения амплитудно-частотной характеристики ППС используют нагружение силой, изменяющейся по синусоидальному закону. Одним из способов подобной калибровки ППС является применение двухмассовой инерционной системы нагружения. В этом случае для приложения к калибруемому преобразователю сил, изменяющихся по гармоническому закону, нагружение осуществляют инерционными силами, возникающими при колебании упругой системы в автоколебательном режиме.

Примером установки, основанной на использовании автоколебательной системы, включающей упругий элемент калибруемого преобразователя силы, может служить электродинамическая колебательная система, работающая в режиме автоколебаний, которые поддерживаются подведением энергии к возбудителю колебаний от усилителя мощности. Последний связан с преобразователем вибрации, установленным на одной из инерционных масс и замыкающим таким образом цепь положительной обратной связи. Заданную частоту колебаний устанавливают путем использова-

Рис. 2. Блок-схема калибровочной установки: 1 — калибруемый преобразователь силы; 2 — первый упругий элемент; 3 — первая масса; 4 — второй упругий элемент; 5 — вторая масса; 6 — возбудитель колебаний; 7 — задающий генератор; 8 — усилитель мощности



ния резонирующего элемента необходимых жесткости и массы. Амплитуду его колебаний измеряют интерференционным методом. Описанный способ измерения частоты колебаний принципиально характерен для всех устройств, использующих режим автоколебаний, и существенно затрудняет определение параметров ППС в широком диапазоне частот. С целью повышения добротности колебательной системы целесообразно сократить до минимума число нежестких соединений и пластически деформируемых элементов. Описываемая схема изображена на рис. 1.

Блок-схема калибровочной установки, реализующей вышеописанный метод, изображена на рис. 2.

Описанный способ позволяет проводить калибровку в частотном диапазоне до нескольких сотен Гц с неопределенностью калибровки 0,2 – 0,3 %. Однако недостаточно широкий частотный диапазон и трудности, связанные с необходимостью замены конструктивных элементов автоколебательной системы для перестройки частоты колебаний, являются существенными ограничениями для установок такого типа.

Совершенствование методов и средств калибровки ППС и их перевод на новый качественный уровень продиктованы, во-первых, появлением пьезоэлектрических преобразователей силы, способных измерять малые переменные силы (в десятые и сотые доли Н) при значительных статических нагрузках (до десятков и сотен кН), обладающих большой внутренней жесткостью и работающих в широком диапазоне частот (от долей Гц до десятков кГц), во-вторых, разработкой и введением в практику высокоточных средств воспроизведения и измерения параметров вибрации. С целью построения средств калибровки ППС высшей точности целесообразно использовать государственный и рабочий эталоны единиц длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела, а также электродинамические вибростенды, обеспечивающие качественное воспроизведение линейных гармонических колебаний в широком диапазоне частот. При этом для измерения параметров механических колебаний следует применять методы и средства лазерной

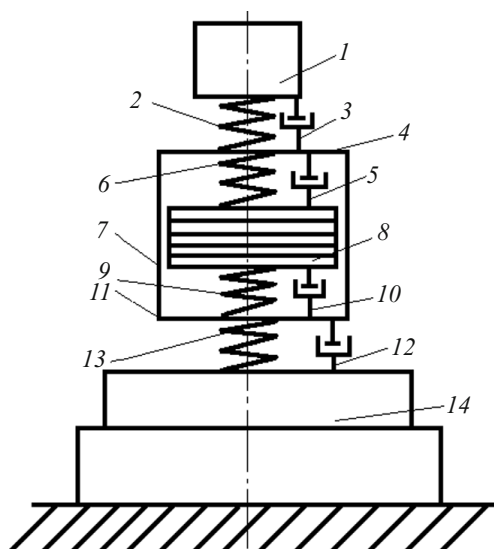


Рис. 3. Модель кинематического взаимодействия элементов преобразователя переменной силы в режиме гармонических колебаний: 1 — тестовая масса m_t ; 2 — упругость соединения тестовой массы с внутренней верхней массой преобразователя k_c ; 3 — демпфирование упругого соединения тестовой массы с внутренней массой преобразователя b_c ; 4 — верхняя крышка ППС; 5 — демпфирование упругого соединения чувствительного элемента преобразователя с верхней крышкой преобразователя b_f ; 6 — упругость соединения чувствительного элемента преобразователя с верхней крышкой преобразователя k_f ; 7 — корпус ППС; 8 — масса чувствительного элемента ППС; 9 — упругость соединения чувствительного элемента преобразователя с основанием корпуса преобразователя s_r ; 10 — демпфирование упругого соединения чувствительного элемента преобразователя с основанием корпуса преобразователя b_r ; 11 — основание корпуса преобразователя; 12 — демпфирование упругого соединения основания корпуса ППС с вибростолом b_s ; 13 — упругость соединения основания корпуса ППС с вибростолом s_s ; 14 — вибростол

интерферометрии, обеспечивающие на сегодняшний день наивысшую точность.

Рассмотрим кинематическое взаимодействие конструктивных элементов ППС, совершающего гармонические колебания. Этот процесс можно представить в виде модели взаимодействия связанных между собой массы – упругости – демпфирования элементов, образующих конструкцию преобразователя. На рис. 3 схематически изображена кинематическая модель ППС с установленной тестовой массой.

Динамическая чувствительность преобразователя, являющаяся отношением измеренного калибруемым преобразователем значения переменной силы к ее действующему значению, описывается следующим выражением:

$$\left| \frac{x_i - x_b}{x_t} \right| = \frac{m_t + m_i}{k_f} \sqrt{\frac{1 - 2\omega^2 \frac{\mu}{k_c} \left(1 - \frac{b_c^2}{2\mu k_c} \right) + \omega^2 \frac{\mu}{k_c}}{\left[1 + \left(\omega \frac{b_f}{k_f} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\omega \frac{b_c}{k_c} \right)^2 \right]^2}}. \quad (2)$$

После ряда допущений и преобразований получаем динамическую чувствительность калибруемого преобразователя (S_f):

$$S_f = \frac{U_f}{(m_t - m_i) \ddot{x}_t K_{\text{corr}}} \approx S_{f_0} (1 - \rho \omega^2), \quad (3)$$

где U_f — измеренное значение сигнала калибруемого ППС; m_t и m_i — присоединенная и внутренняя массы калибруемого ППС; $\ddot{x}_t$ — ускорение присоединенной массы; K_{corr} — поправочный коэффициент, учитывающий вертикальный градиент ускорения вдоль внутренней и присоединенной масс преобразователя.

Используя вышеописанную модель кинематического взаимодействия элементов ППС в режиме гармонических колебаний и уравнения для определения коэффициента преобразования, можно проводить калибровку ППС методами лазерной интерферометрии, обеспечивающими на сегодняшний день наивысшую точность. Ввиду довольно высокой трудоемкости вышеописанного способа калибровки (точная юстировка лазерного интерферометра, повторение процедуры калибровки для различных частот и амплитуд, перенастройка интерферометра при смене преобразователя и т.д.) данный способ целесообразно применять при калибровке эталонных ППС, а передачу единицы величины к поверяемым средствам измерений осуществлять при помощи эталонного преобразователя, откалиброванного методом лазерной интерферометрии.

Однако проводить калибровку ППС можно в один этап, исключив предварительную калибровку инерционным методом (методом тестовой массы). Как известно, при калибровке ППС жесткость калибровочной установки в направлении приложения силы должна быть максимально возможной с целью исключения деформации и относительного удлинения конструкции калибровочной установки, приводящих к искажению результатов измерений. Представляется возможным ввести в силовую цепь калибровочной установки элемент с заданной (калиброванной) упругостью, предназначенный для преобразования силы в относительное удлинение, которое можно измерить методом лазерной интерферометрии. Рассмотрим более подробно основные соотношения, определяющие вышеописанный принцип. В соответствии с законом Гука в области упругих деформаций возникающая в упругом теле деформация линейна и пропорциональна приложенной к этому телу силе. При превышении предела пропорциональности связь между напряжениями и деформациями становится нелинейной.

Для тонкого растяжимого стержня закон Гука имеет вид:

$$F = k \Delta l, \quad (4)$$

где F — сила растяжения (сжатия), приложенная к упругому телу; Δl — абсолютное удлинение (сжатие) упругого тела; k — коэффициент упругости, который зависит как от свойств материала, так и от геометрии

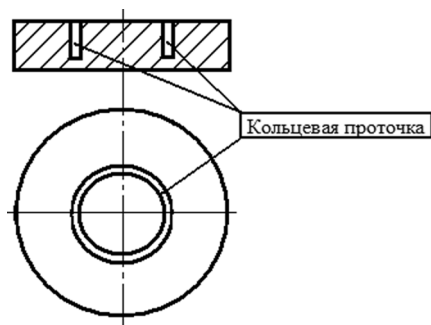


Рис. 4. Схема конструкции упругого элемента калибровочной установки

ческих размеров упругого тела. Зависимость k от соотношения размеров упругого тела (площади поперечного сечения S и длины l) можно выразить следующим соотношением:

$$k = ES/l, \quad (5)$$

где E — модуль упругости, являющийся механической характеристикой материала упругого тела.

Если обозначить относительное удлинение как

$$\varepsilon = \Delta l/L, \quad (6)$$

а механическое напряжение в поперечном сечении как

$$\sigma = F/S, \quad (7)$$

где F — сила, приложенная к упругому телу; S — площадь поперечного сечения упругого тела, то закон Гука в относительной форме запишется следующим образом:

$$\Delta l = \frac{Fl}{ES}. \quad (8)$$

Следовательно, представляется возможным изготовить упругий элемент калибровочной установки таким образом, чтобы его относительное удлинение ε заданным образом зависело от приложенной силы F (в диапазоне упругих деформаций), осуществляя таким образом функцию эталонного первичного преобразователя «сила — удлинение». Конструктивно упругий элемент можно совместить с верхней крышкой калибровочной установки, выполнив в последней концентрическую кольцевую проточку на определенную глубину, тем самым контролируемо «ослабив» конструкцию крышки.

Схематически такой упругий элемент изображен на рис. 4.

Калибровочное устройство, реализующее способ калибровки ППС с использованием метода лазерной интерферометрии, изображено на рис. 5.

Калибруемый преобразователь переменной силы помещают в корпус 5 калибровочного устройства непосредственно на пьезоактуатор 8 и прижимают крышкой 4. На пьезоактуатор 8 подается переменное напряжение от генератора 9 в необходимом для калиб-

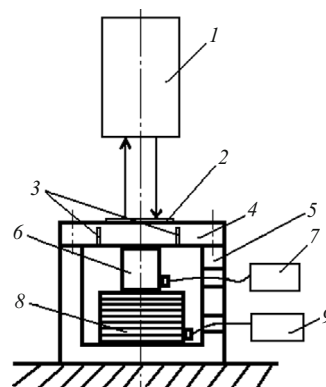


Рис. 5. Устройство для калибровки преобразователей переменной силы методом лазерной интерферометрии: 1 — лазерный интерферометр перемещений; 2 — зеркало или зеркальное покрытие; 3 — кольцевая проточка; 4 — крышка корпуса; 5 — корпус; 6 — калибруемый преобразователь переменной силы; 7 — усилитель заряда; 8 — пьезоактуатор; 9 — генератор

ровки диапазоне частот. Регулировкой амплитуды напряжения генератора устанавливается необходимый диапазон калибровки по силе. Калибровку производят путем сравнения значения измеренного сигнала от калибруемого ППС с эталонным значением силы. Это значение задают при помощи пьезоактуатора 8 и измеряют при помощи лазерного интерферометра 1 перемещения, который адекватно определяет приложенную силу в соответствии с полученной ранее калибровочной характеристикой упругого элемента, образованного крышкой корпуса 4 и выполненной в ней кольцевой проточкой 3.

Предлагаемый способ позволяет использовать возбуждающие силы с различной формой импульса, что обеспечивает калибровку не только по синусоидальным, но и другим импульсам (прямоугольным, треугольным, случайным и их комбинациям, а также по серии последовательных импульсов). Кроме того, способ позволяет проводить калибровку, соответствующую реальным условиям эксплуатации ППС, т.е. в предварительно сжатом состоянии, и определять амплитудно- и фазочастотные характеристики преобразователей в требуемом частотном диапазоне (от 10 Гц до 20 кГц).

Предложенный способ и устройство на его основе обеспечивают калибровку и поверку преобразователей переменной силы в условиях, приближенных к условиям реальной эксплуатации, т.е. смонтированными между двумя поверхностями, с возможностью предварительного нагружения в широком диапазоне сил и частот. Динамические характеристики ППС (коэффициент преобразования на опорной частоте, АЧХ, ФЧХ, частота собственного резонанса) при этом могут быть определены во всем рабочем диапазоне частот преобразователя (от 10 Гц до 20 кГц) с минимальной методической неопределенностью измерений. Низкая трудоемкость и малые затраты времени на процесс калибровки описанным способом позволя-

ют использовать его при калибровке и поверке партий преобразователей силы (мелкосерийное производство, калибровочные центры, цеховые измерительные лаборатории и т.д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бараш В. Я., Соловейчик В. Р., Пресняков Г. С. Лазерная интерференционная установка для калибровки пьезоэлектрических датчиков переменной силы. — М.: МДНТП, 1991. С. 43 – 46.
2. Голубев Э. А., Исаев Л. К. Измерения. Контроль. Качество. ГОСТ Р ИСО 5725. Основные положения. Вопросы освоения и внедрения. — М.: Стандартинформ, 2005.
3. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Общие требования.
4. ГОСТ Р ИСО 16063-11-2009. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть «Первичная вибрационная калибровка методами лазерной интерферометрии».
5. Кононогов С. А. Метрология и фундаментальные константы физики / Измерительная техника. 2006. № 2. С. 3 – 7.
6. Кононогов С. А., Краснополин И. Я., Семенчинский С. Г. Метрологические основы электротехнических измерений / Метрология. 2006. № 5. С. 5 – 51.
7. Link A., Gerhardt J., von Martens H.-J. / Amplitude and phase calibration of accelerometers in the nanometer range / SPIE. Vol. 2868. P. 37 – 48.
8. Schlegel C., Kiekenap G., Glöckner B., Kumme R. Sinusoidal calibration of force transducers using electrodynamic Shaker

Systems / Sensors and Transducers. 2012. Vol. 14. N 1. P. 95 – 111.

REFERENCES

1. Barash V. Ya., Soloveichik V. R., Presnyakov G. S. Lazernaya interferentsionnaya ustanovka dlya kalibrovki p'ezoélektricheskikh datchikov peremennoi sily. — Moscow: Izd. MDNTP, 1991. P. 43 – 46 [in Russian].
2. Golubev É. A., Isaev L. K. Izmereniya. Kontrol'. Kachestvo. GOST R ISO 5725. Osnovnye polozheniya. Voprosy osvoeniya i vnedreniya. — Moscow: Standartinform, 2005 [in Russian].
3. GOST ISO 10816-1-97. Vibratsiya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmerenii vibratsii na nevrashchayushchikhsya chastyakh. Obshchie trebovaniya [in Russian].
4. GOST R ISO 16063-11-2009. Metody kalibrovki datchikov vibratsii i udara. Chast' «Pervichnaya vibratsionnaya kalibrovka metodami lazernoi interferometrii» [in Russian].
5. Kononogov S. A. Metrologiya i fundamental'nye konstanty fiziki / Izmerit. Tekh. 2006. N 2. P. 3 – 7.
6. Kononogov S. A., Krasnopolin I. Ya., Semenchinskii S. G. Metrologicheskie osnovy élektrotekhnicheskikh izmerenii / Metrologiya. 2006. N 5. P. 5 – 51.
7. Link A., Gerhardt J., von Martens H.-J. / Amplitude and phase calibration of accelerometers in the nanometer range / SPIE. Vol. 2868. P. 37 – 48.
8. Schlegel C., Kiekenap G., Glöckner B., Kumme R. Sinusoidal calibration of force transducers using electrodynamic Shaker Systems / Sensors and Transducers. 2012. Vol. 14. N 1. P. 95 – 111.