

УДК 53.082.13

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ ИМПУЛЬСНЫХ ДАВЛЕНИЙ

А.А. Недбайло

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», Снежинск, Россия,
omit@vniitf.ru*

Аннотация. Приведён анализ метрологических характеристик датчиков импульсного динамического давления и их влияния на точность измерений. Изложены методы их исследования, представлены применяемые для этих целей установки, приводятся их конструктивные особенности.

Ключевые слова: динамическое давление, оценка погрешности установки, характеристики.

TOPICAL ISSUES IN THE METROLOGY OF IMPULSIVE PRESSURES

A.A. Nedbaylo

*FSUE "RFNC-VNIITF", Snezhinsk, Russia,
omit@vniitf.ru*

Annotation. The analysis of the metrological characteristics of the impulsive dynamic pressure transducers and their influence on the measurement accuracy is given. The methods of their studies are stated, the installations used for these purposes are presented, their design features are given.

Key words: dynamic pressure, estimation of the installation error, characteristics.

Хотелось бы начать статью с понятия «импульсное давление». За рубежом практически не используется термин «impulse pressure», зато широко применяется «dynamic pressure» — динамическое давление, т.е. давление, изменяющееся во времени *случайным* образом. В нашей стране исторически произошло деление на «переменное давление», т.е. изменение давления во времени по гармоническому или квазигармоническому закону, и «импульсное давление», форма изменения которого носит случайный характер или же аппроксимируется простой геометрической фигурой: полусинусом, «колоколом», трапецией, затухающей экспонентой и т.д. При этом, если в первом случае, как правило, измеряется среднеквадратичное значение, то во втором — амплитудное, что с метрологической точки зрения гораздо сложнее. За границей, особенно в США, метрология динамического давления активно развивалась в середине прошлого столетия благодаря работам специалистов национальных лабораторий, которые впоследствии основали

такие известные фирмы, как Kistler Instrumente AG, PCB Piezotronics — J.F. Lally, B. Granath, P.L. Walter, R. Walker и др. В нашей стране широкие исследования в данной области проводились в 70–80-х гг. Е.М. Федяковым, В.К. Колтаковым, Е.Е. Богдатыевым, В.П. Шумилиным и др. Стоит отметить, что в СССР, благодаря работе специалистов ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, был создан ГЭТ 131-81 (1 МПа), за рубежом официальной эталонной базы в области динамических давлений не существует, как представляется, в силу принципиальных сложностей теоретического обоснования параметров передаваемой единицы физической величины нестационарного процесса.

Поскольку во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» проводят исследования в области газодинамики, задача оценки погрешности измерений именно импульсных давлений довольно актуальна. Данная задача сводится к поэлементной оценке составляющих погрешностей измерительного канала, состоящего, как правило, из первичного измерительного преобразователя (датчика), усилительно-согласующей аппаратуры и цифрового регистратора. И если исследования характеристик последних двух можно провести общеизвестными методами, применяемыми для радиоэлектронной аппаратуры, то для датчиков необходимо физическое воздействие, максимально приближённое к реальным условиям эксплуатации. При этом на сегодняшний день автору известен лишь один североамериканский документ, в полной мере описывающий методологию исследований датчиков динамического давления: стандарт ISA-37.16.01-2002 «A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers», разработанный коллективом авторов из фирм-производителей подобного оборудования. Рассмотрим методы исследования основных характеристик датчиков согласно данному стандарту.

Коэффициент преобразования

Характеристика, которая по современным представлениям является основополагающей и ради которой разрабатывались и разрабатываются различные эталонные установки, призванные обеспечить калибровку датчика в условиях, максимально приближённых к реальным. В области давлений до 5–10 МПа и длительностей фронта нарастания 5–10 мкс используются ударные трубы, как правило пневматические, в которых давление рассчитывается в соответствии с общепринятой теорией ударных труб по измеряемой скорости ударной волны. Помимо инструментальных (приборных) погрешностей метода, возникают такие трудноустраняемые методические вопросы, как погрешности измерений числа Маха и показателя адиабаты, неоднородности в геометрии ударной трубы и, как следствие, бифуркации движущегося газа в пограничном слое, возбуждение собственных частот элементов конструкции трубы, влияние продуктов разрыва диафрагмы. В итоге — погрешность градуировки не менее 3–7 %. Поэтому на сегодняшний день

наиболее распространены установки на так называемом «быстром клапане», когда полость с избыточным давлением, измеренным прецизионным статическим манометром, благодаря открытию клапана, приводимого в движение различными способами, соединяется с полостью, где находится чувствительная диафрагма датчика, таким образом формируя положительную ступень давления. Аналогично и более просто технически реализуется отрицательная ступень давления. Для нивелирования погрешности из-за присоединённых объёмов их соотношение стараются выполнить не менее 1000/1. На данный момент существуют установки как за рубежом, так и у нас (РФЯЦ-ВНИИТФ, ВНИИФТРИ), позволяющие реализовать положительную ступень давления с фронтом нарастания 30–60 мкс уровнем до 15 МПа и 1–3 мс — до 1000 МПа (ФГУП «ВНИИФТРИ» — только отрицательная ступень).

Различные известные конструкции периодических калибраторов — газовые с ротором и отверстием, жидкостные с использованием вибростендов, жидкостные с мембраной и пьезоактюатором — не актуальны, т.к. практически всегда используют образцовый датчик, отградуированный на аперiodической установке. То же относится и к установкам копрового класса, в которых реализуется метод удара по неуплотнённому поршню в цилиндре с жидкостью. Попытки использовать абсолютный метод измерения в данных установках пока имеют чисто исследовательский характер и по точностным показателям существенно уступают установкам с быстрым клапаном.

На данный момент во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» разработана установка РС 2230 (рис. 1), реализующая метод «быстрого клапана» и предназначенная для воспроизведения в газовой среде перепада давления прямоугольной формы амплитудой 0,1–15 МПа и длительностью фронта 30–60 мкс. Установка создавалась для градуировки датчиков в лабораторных условиях, приближаясь при этом по характеристикам реализуемого импульса к пневматическим ударным трубам.

На рис. 1 представлена установка РС2230, предназначенная для определения коэффициента преобразования датчиков импульсного (динамического) давления в лабораторных условиях. Характеристики реализуемого импульса давления приближаются к характеристикам пневматических ударных труб.

Прототипом данной установки является установка K9907C, созданная П.М. Аронсоном, правообладателем которой является американская фирма РСВ Piezotronics. Благодаря определённым техническим решениям, особенно в части герметизации, по сравнению с прототипом, в установке РС2230 более чем в 2 раза увеличен верхний предел реализуемых давлений.



Рис. 1. Установка PC2230

Динамические характеристики

По мнению автора, исследование данных характеристик по своей важности сопоставимо с прецизионным определением коэффициента преобразования и, следовательно, нелинейности функции преобразования датчика. При упоминании о динамических характеристиках в первую очередь вспоминают об амплитудно-частотной характеристике (АЧХ), но она напрямую применима только для периодических сигналов, т.е. при измерении *переменного* давления. При измерении кратковременных импульсных сигналов со сложными спектрами по АЧХ датчика можно лишь косвенно, в некотором приближении оценить погрешность искажения формы зарегистрированного импульса, проведя исследования, моделирующие влияние АЧХ на конкретные формы сигналов. При этом набор технических решений прямого определения АЧХ при периодическом сигнале довольно ограничен, и на данный момент, по мнению автора, наилучшим оборудованием для подобных исследований является установка «Фонотрон-12», разработанная В.П. Шумилиным, из состава ГЭТ 131-81 с верхней граничной частотой 10 кГц при уровне давления 1 МПа. Установка использует абсолютный метод измерения, основанный на зависимости коэффициента преломления среды от давления, чем превосходит остальные подобные установки, использующие образцовый датчик, откалиброванный, как и сказано выше, в апериодическом режиме. Но на сегодняшний момент развития технологии датчиков, как будет показано ниже, частотный диапазон в 10 кГц уже не актуален.

Определение резонансной частоты и времени нарастания

На сегодняшний день значение собственной резонансной частоты датчика является основополагающей динамической характеристикой с практической точки зрения. Основным методом её исследования является возбуждение собственных резонансных частот датчика в ударной трубе при его расположении в торцевой части, что с математической точки зрения является воздействием на передаточную функцию датчика функцией Хевисайда. Упрощённая альтернатива — удар стальным шариком по диафрагме (дельта-функция) — работает далеко не для всех конструкций датчиков. Стоит упомянуть реализованный в нескольких советских установках довольно оригинальный способ воздействия дельта-функцией — взрыв проволоки в жидкости — так называемый электрогидравлический эффект Л.А. Юткина.

На рис. 2 показан отклик датчика 113B21 PCB Piezotronics, полученный в пневматической ударной трубе (отражённая ударная волна).

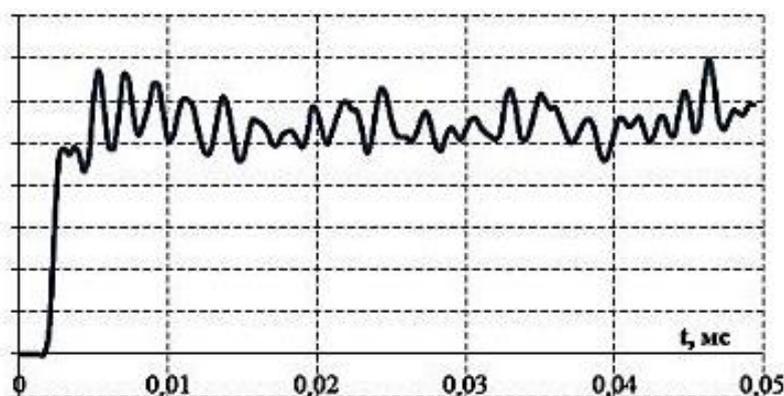


Рис. 2. Резонансная частота датчика 113B21 (500 кГц)

Этим же методом, при котором теоретическое значение времени нарастания фронта давления в ударной трубе составляет несколько наносекунд, определяют минимально регистрируемую датчиком длительность фронта τ_Φ по уровню 0,1–0,9.

Для оценки значения «рабочей» верхней граничной частоты f_B на практике применяется общепринятое вычисление неравномерности АЧХ, предложенное фирмой Brüel&Kjær (Дания), которое исходит из описания математической модели пьезоэлектрического датчика линейным дифференциальным уравнением второго порядка. Неравномерность АЧХ в относительных единицах:

$$\frac{1}{1 - \left(\frac{f_B}{f_P}\right)^2}$$

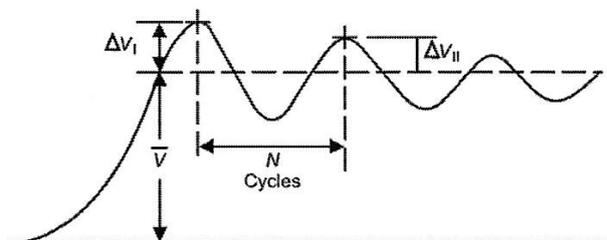
То есть для обеспечения 5%-ой погрешности из-за неравномерности АЧХ необходимо выполнение соотношения $f_B \approx f_p/5$. Но это актуально только для периодических сигналов; для импульсных, со сложным спектром, остаётся открытым вопрос о требуемом значении резонансной частоты.

Так, по материалам PCB Piezotronics, для «корректного» измерения импульсных давлений должно применяться эмпирическое правило: $\tau_\Phi \cdot f_p \geq 2,5$. То есть, например, для полусинусоидального сигнала, при допущении $\tau_\Phi = 1 / (4 \cdot f_B)$, если перейти из временной области в частотную, для не превышения 5%-ой погрешности необходимо уже соотношение $f_B \approx f_p / 10$.

На основании вышесказанного можно заявить, что генераторы переменного (периодического) давления, в том числе и «Фонотрон-12», с верхней граничной частотой 10 кГц уже не обеспечивают исследование прямым, классическим методом АЧХ современных, как правило, иностранных датчиков с резонансными частотами 200 кГц и более, у которых расчётное значение $f_B \geq 40$ кГц.

Коэффициент демпфирования и выброс (перерегулирование)

Согласно ISA-37.16.01-2002, данные характеристики также определяются при ступенчатом воздействии и характеризуют колебательные свойства датчика, рассматриваемого как линейная система второго порядка (рис. 3). Коэффициент демпфирования ξ — степень затухания собственных колебаний, а выброс («overshoot») — степень перерегулирования (по сути — отклонение первого пика от установившегося значения в относительных единицах).



$$\zeta = \left[1 + \left\{ \frac{2\pi N}{2.303 \log_{10} \left(\frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} \right)} \right\}^2 \right]^{-1/2} \quad \text{Overshoot} = \left(\frac{V_p - \bar{V}}{\bar{V}} \right) 100 \text{ in percent}$$

Рис. 3. Коэффициент демпфирования и выброс

Стоит отметить, что в отечественной литературе данные параметры вычисляются по иным формулам.

На практике в большинстве случаев данные характеристики не приводятся производителями датчиков, поскольку нет чётких соотношений между данными характеристиками и параметрами регистрируемых сигналов. Но указанные характеристики могли бы помочь провести качественную оценку динамических свойств датчиков при их выборе под конкретные условия опыта. Так, оптимальным является значение $\xi = (0,4-0,5)$. В качестве примера можно рассмотреть отклики разных датчиков, находящихся в одном сечении ударной трубы, при воздействии на них проходящей ударной волны (рис. 4).

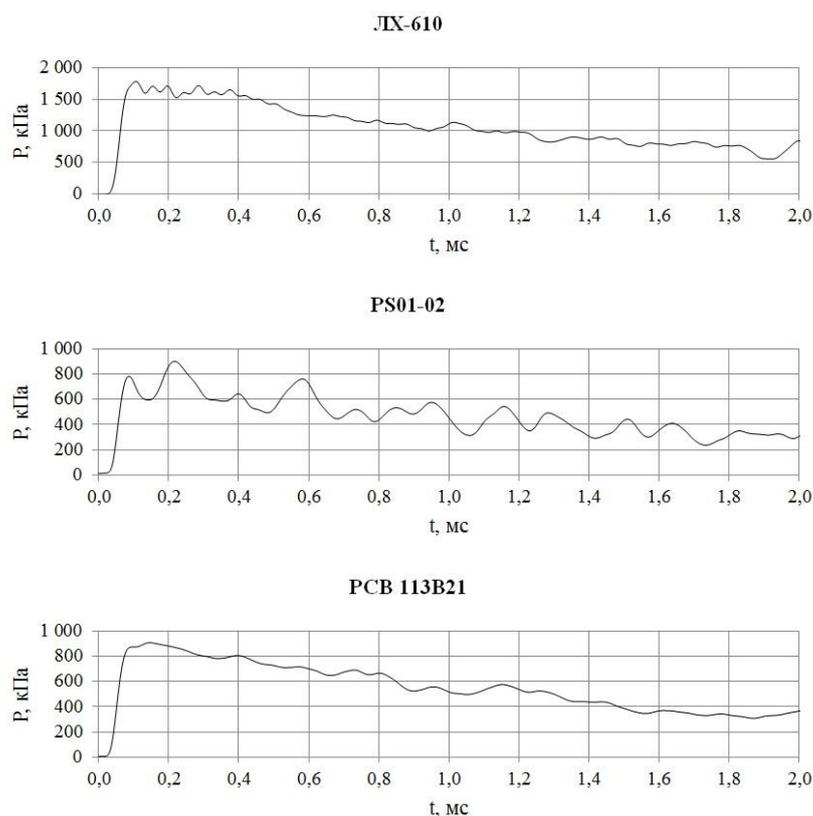


Рис. 4. Реакция датчиков

Как можно увидеть, вследствие различных частотных свойств реакция датчиков сильно различается, и определить искомый уровень давления по первым двум ($f_p \approx 30$ кГц) довольно затруднительно. При этом коэффициент преобразования всех был определён единым способом на установке РС2230 ($\delta = 1\%$) с длительностью фронта 60 мкс, приближённой к реальным условиям. То есть одно только прецизионное определение коэффициента преобразования датчика не гарантирует корректного измерения амплитуды импульсного давления.

Выводы

За пределами статьи остались такие вопросы, как:

- исследование влияния температуры на коэффициент преобразования;
- исследование и учёт низкочастотной постоянной времени (DTC) пьезоэлектрического датчика;
- исследование влияния ударного и вибрационного ускорений на чувствительность датчика и способы его снижения;
- пространственное разрешение, т.е. быстродействие датчика в зависимости от геометрических размеров чувствительного элемента;
- влияние на результат измерения присоединяемых объёмов при различных способах установки и неправильный момент затяжки;
- метрология импульсных давлений уровнем более 1 ГПа.

Хотелось порекомендовать не пытаться приводить общую погрешность (неопределённость) измерения датчиком единицы физической величины, так как в большинстве случаев это не отдельное средство измерения, а лишь составная часть измерительного канала. То же самое относится и к оценке нелинейности функции преобразования первичного измерительного преобразователя: необходимо приводить среднеквадратичное отклонение, а не приведённую погрешность.

В качестве итога можно сказать, что на сегодняшний день, как видится, не имеется существенной проблемы в достаточно точной градуировке датчиков динамического давления импульсным давлением уровнем до 750 МПа с длительностью фронта до 10 мс. Так как для пьезоэлектрических датчиков сейчас существует достаточное количество аппаратуры с низкочастотной постоянной времени, обеспечивающей соответствующую погрешность менее 0,5 %, а для всё более развивающейся индустрии датчиков динамического давления, выполненных по MEMS-технологии и работающих от 0 Гц, например фирмы Kulite Semiconductor, такой проблемы нет вообще.

Представляется более важным определение динамических свойств датчиков, поэтому ниже предлагается перечень характеристик, к выполнению которого необходимо стремиться как при разработке и производстве датчиков импульсного давления, так и при утверждении типа для датчиков иностранного производства.

1. Максимальный рабочий диапазон измеряемой величины.
2. Перегрузочная способность по диапазону.
3. Нелинейность функции преобразования в рабочем диапазоне.
4. Собственная резонансная частота датчика, а не чувствительного элемента.
5. Минимально измеряемое время нарастания входного сигнала.
6. Коэффициент демпфирования.
7. Выброс.
8. Рабочий температурный диапазон.
9. Температурный коэффициент.

10. Низкочастотная постоянная времени для пьезодатчиков.
11. Максимально допустимая амплитуда ударного ускорения в осевом и радиальном направлениях с указанием длительности импульса.
12. Чувствительность к ударному ускорению.

Для реализации подобных исследований в РФЯЦ-ВНИИТФ сейчас изготавливается пневматическая ударная труба «метрологического» класса. Также разрабатывается совместно с ООО «Альфаскаль» установка на «быстром клапане» с уровнем давления до 750 МПа и, как реальная цель импортозамещения, — пьезоэлектрические датчики с высокими динамическими характеристиками.

Список литературы

1. ISA-37.16.01-2002. A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers.
2. Серридж М., Торбен Р.Л. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и предусилителям. Глоструп: Ларсен и сын, 1987.
3. Patrick L.W. Shock and Blast Measurement — Rise Time Capability of Measurement Systems? USA. PCB-TN-11-0904.

Статья поступила в редакцию: 26.10.2020 г.

Статья прошла рецензирование: 27.11.2020 г.

Статья принята в работу: 02.12.2020 г.