

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ДВУХМЕМБРАННЫХ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

А. В. Пирогов, В. М. Стучебников

Экспериментально определены динамические характеристики механоэлектрического преобразователя тензорезисторного датчика давления МИДА — модуля преобразователя давления.

Одним из важных параметров, характеризующих любой измерительный преобразователь, является его динамическая характеристика. Измерение динамических характеристик преобразователей давления представляет довольно сложную задачу, так как они зависят от свойств самого преобразователя, измеряемой среды (плотности, вязкости, наличия газовых включений в жидких средах), конструкции узла отбора давления (образования резонансных объемов). Кроме того, при достаточно больших перепадах давления во время переходного про-

цесса возможно образование турбулентных течений, что приводит к нелинейному характеру переходного процесса. Однако основным узлом при измерении давления остается собственно преобразователь давления, и система в целом не может иметь динамические характеристики лучше, чем у самого преобразователя.

В данной работе экспериментально определены динамические характеристики механоэлектрического преобразователя тензорезисторного датчика давления МИДА [1] — модуля преобразователя давления (МПД).

МПД общепромышленных датчиков давления, выпускаемых промышленной группой МИДА, конструктивно имеют либо одну, либо две металлические мембраны, на одной из которых закреплен тензочувствительный элемент на основе структуры КНС [2] (рис. 1). Как правило, двухмембранная конструкция используется при измерении давления не выше 600 кПа, а одномембранная — для измерения давления свыше 1 МПа.

Частотные характеристики МПД, в первую очередь, определяются механическими свойствами колеблющихся частей, в

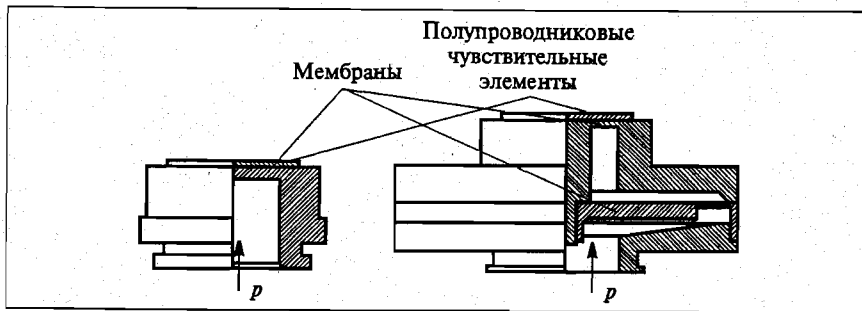


Рис 1. Схематическое изображение одно- и двухмембранного МПД

частности мембран. Мембраны МПД являются довольно высокочастотными колебательными системами, так как рассеяние механической энергии колебаний в материале мембран мало (в противном случае наблюдались бы значительные нелинейности статической характеристики и гистерезисные явления). С точки зрения линейных систем преобразование переменного измеряемого давления в электрический сигнал можно рассматривать как прохождение сигнала через фильтр низких частот, полоса пропускания которого определяется собственными частотами МПД. Собственные частоты можно зафиксировать экспериментально после ударного возбуждения колебательной системы. При этом важно, чтобы в спектре удара присутствовали частоты, соответствующие собственным частотам системы.

Рассмотрим, как по выходному сигналу модуля можно оценить некоторые частотные характеристики передаточной функции МПД. Теория линейных систем [3] описывает временной отклик $y(t)$ на входное воздействие $x(t)$ как свертку этого воздействия и импульсной характеристики системы $h(t)$:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau)h(t - \tau)d\tau.$$

С другой стороны, если использовать интегральное преобразование Фурье, то это выражение упростится:

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega), \quad (1)$$

где $Y(\omega)$, $X(\omega)$, $H(\omega)$ — Фурье-образы функций $y(t)$, $x(t)$, $h(t)$, соответственно. В общем случае функции $Y(\omega)$, $X(\omega)$, $H(\omega)$ являются комплексными и модули этих функций обычно называют спектрами. Из выражения (1) следует, что по известным $Y(\omega)$, $X(\omega)$ легко найти передаточную характеристику $H(\omega)$ самой колебательной системы и при необходимости путем обратного преобразования Фурье определить ее во временной области.

При таком подходе к определению передаточной характеристики системы основными источниками погрешности будут неточность определения функции входного воздействия и наличие сторонних шумов (наводок), неизбежно проникающих в измерительный тракт. Поскольку измерение формы импульса входного воздействия представляет отдельную и сложную задачу, то в дальнейшем будем эту форму аппроксимировать какой-либо простой функцией: дельта-функцией Дирака, прямоугольным импульсом, ступенькой и т. п. Влияние шумов

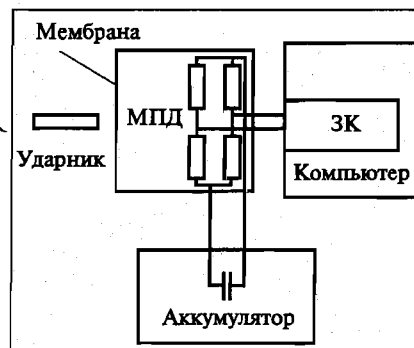


Рис. 2. Схема стенда для измерения собственных частот МПД

можно уменьшить многократными измерениями с последующим усреднением полученных спектров.

Экспериментальные значения временных зависимостей выходных сигналов МПД (после возбуждения колебаний), были получены на стенде, структурная схема которого приведена на рис. 2.

Механические колебания мембран МПД возбуждались ударником. В качестве ударников использовались стальные стержни двух различных длин: $l_1 = 50$ мм, $l_2 = 140$ мм и диаметром $d = 2,5$ мм (для удобства в дальнейшем будем именовать их как короткий и длинный ударники). Колебания мембраны, порожденные ударом, преобразовывались в электрический сигнал тензочувствительной схемой МПД. С целью снижения влияния электрических наводок для питания моста использовался аккумулятор ($U = 12$ В). Сигнал с тензомоста подавался на звуковую карту — ЗК (SoundMax Integrated Digital Audio (Gigabyte)), где он дискретизировался с частотой 96 кГц и записывался в файл для последующей обработки. Фурье-преобразование выполнялось по алгоритму быстрого преобразования Фурье (БПФ) с разложением на простые множители [4], что в отличие от классического алгоритма Кули-Тьюки снимает ограничение на кратность степени 2 числа отсчетов.

Для определения искажений, вносимых электрическим трактом преобразования аналогового сигнала в цифровой, была проверена амплитудно-частотная характеристика ЗК. При проверке записывались сигналы, создаваемые генератором звуковой частоты Г3-113. В результате было получено, что неравномерность АЧХ ЗК в диапазоне 15...20 000 Гц составляла не более 0,1 дБ, выше 20 кГц начался спад частотной характеристики. Чувствительность по входу определялась при подаче

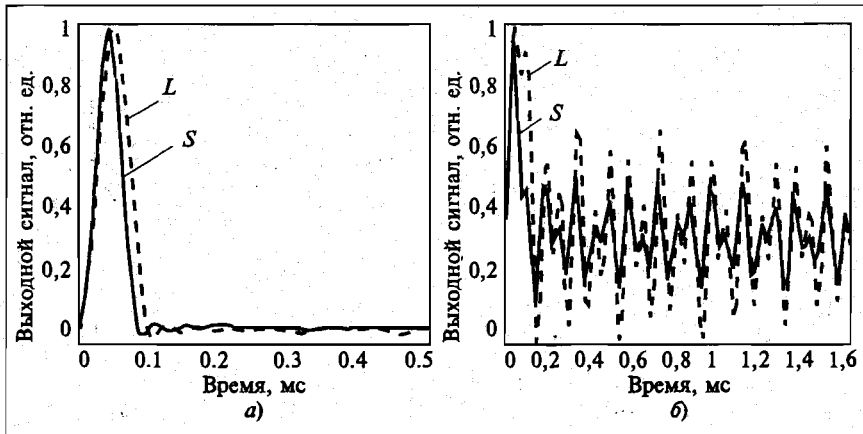


Рис. 3. Выходные сигналы одномембранного (1 МПа) (а) и двумембранного (100 кПа) (б) МПД при возбуждении коротким (S) и длинным (L) ударником

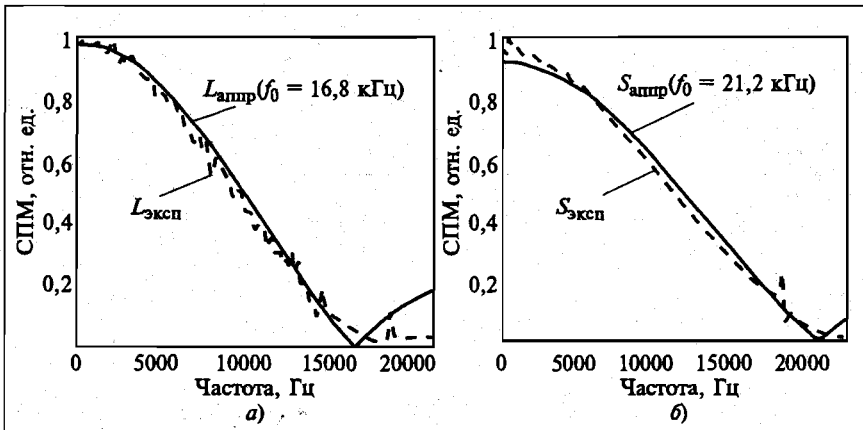


Рис. 4. Спектр сигнала, полученного после механического удара длинным (а) и коротким (б) ударниками одномембранного МПД (1 МПа) и аппроксимация его функцией (3)

на вход ЗК синусоидального сигнала 0,3 В (амплитуда 0,42 В), 1 кГц; зафиксированное максимальное значение в дискретах составляло 16 000, т. е. чувствительность по входу ЗК составляла 26 мкВ/дискрету.

Типичные записи выходных сигналов МПД после удара приведены на рис. 3. Как видно из рис. 3, а, у одномембранных МПД только однократные однополярные импульсы превышают уровень шумов. Это позволяет сделать вывод об отсутствии резонансных пиков в наблюдаемой полосе частот, что также подтверждается оценкой частоты первой моды для идеальной круглой пластинки, заземленной по контуру [5]

$$f_1 = \frac{10,21}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\nu^2)}}, \quad (2)$$

где a — радиус пластинки, E — модуль Юнга, h — толщина пластинки, ρ — плотность, ν — коэффициент Пуассона.

Подстановка в выражение (2) конструктивных параметров одномембранного МПД на диапазон измерения 1 МПа дает значение частоты первой моды $f_1 = 41,8$ кГц, что лежит за пределами полосы пропускания используемой аппаратуры (~20 кГц). Экспериментально наблюдаемые быстро затухающие колебания малой амплитуды после окончания импульса связаны, скорее всего, с явлением Гиббса — искажением фронта импульса при прохождении через фильтр с ограниченной полосой пропускания [3].

Предположение о прямоугольной форме импульса позволяет получить оценку модуля

функции спектральной плотности мощности (СПМ) механического удара. Частотный спектр прямоугольного импульса длительностью T определяется как [3]:

$$|Y(f)|_{\text{пр им}} = \left| \frac{\sin(\pi T f)}{\pi T f} \right|. \quad (3)$$

В идеальном случае при соударении стержня с абсолютно недеформируемой преградой время контакта равно удвоенному времени распространения звука вдоль оси стержня: $T = 2l/c$, где l — длина стержня, c — скорость звуковой волны.

Из формулы (3) следует, что функция равна 0 при $f_n = 1/(nT)$ ($n = 1, 2, \dots, \infty$), при этом по экспериментальным результатам значений частоты, при которых СПМ близка к нулю, можно оценить время соударения.

Для используемых в опытах длинного и короткого стальных ударников ($c \approx 5$ км/с) время контакта в идеальном случае составляет 56 и 20 мкс соответственно. При соударении в реальном случае время контакта увеличится тем больше, чем меньше жесткость преграды. Теоретическое определение формы и длительности реального импульса представляет сложную задачу эластокинетики, не решаемую в аналитическом виде. Однако предположение о близости возбуждающего импульса к прямоугольной форме подтверждается спектром (спектральной плотностью мощности), полученным по экспериментальным данным (рис. 4). Длительность механического импульса, найденная по минимальному значению спектра, составляет ~60 мкс для длинного ударника. Для короткого ударника первый ноль экспериментальной СПМ и ее аппроксимирующей функции находятся за пределами полосы пропускания ЗК, что приводит к искажению полученной формы импульса и, как следствие, к завышенному значению его длительности (47 мкс). Пик в области 19 кГц на спектрах

обусловлен наводками, что было проверено вычислением спектра сигнала, полученного при отсутствии механического возбуждения.

Связь между длиной ударника и спектральной характеристикой возбуждающего импульса находит отражение и в экспериментах с двухмембранными МПД (рис. 5). Из приведенных данных видно, что спад СПМ в области до 3,5 кГц для длинного ударника *L* происходит быстрее, что можно интерпретировать, как воздействие импульса с большей длительностью. Сравнительно небольшой спад СПМ в указанном диапазоне частот позволяет допустить, что форму импульса механических напряжений при рассмотренных ударных воздействиях на двухмембранные МПД можно описать дельта-функцией Дирака. В этом случае можно считать спектр выходного сигнала эквивалентным амплитудно-частотной характеристике передаточной функции МПД.

Из рис. 5 видно также, что воспроизводимость экспериментальных спектральных характеристик достаточно высока. Точность определения положения экстремумов, соответствующих собственным частотам МПД, в проведенных опытах составляет 1–2 частотных отсчета (60–200 Гц). Увеличение разрешения по частоте (при сохранении частоты дискретизации) возможно только с увеличением времени наблюдения, но в этом случае повышается энергетический вклад шума в частотную характеристику, что затрудняет интерпретацию результатов. С целью снижения влияния шумов в проведенных опытах все приведенные ниже спектры получены усреднением результатов, полученных по 10–15 измерениям.

Усредненные спектральные характеристики двухмембранных МПД, полученные при воздействии коротким ударником *S* (это воздействие ближе к дельта-функции Дирака, чем длинного) приведены на рис. 6, 7 и в

Рис. 5. Воспроизводимость выходного сигнала при многократных ударах по мембране МПД на диапазон 250 кПа; *L* – длинный, *S* – короткий ударники

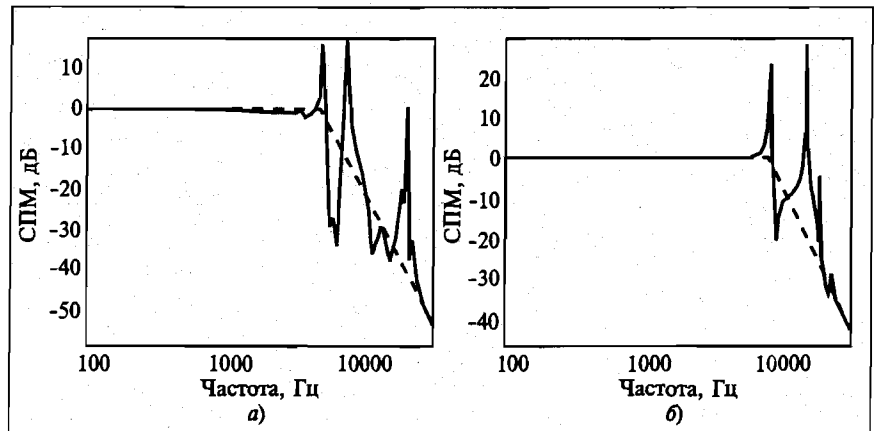
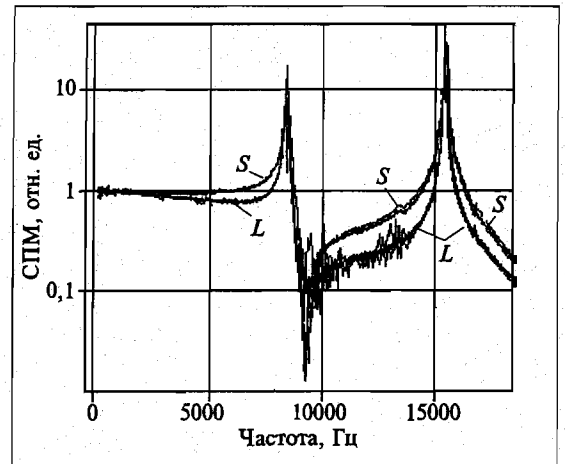


Рис. 6. АЧХ двухмембранных МПД на 40 кПа (а) и 250 кПа (б) и их линейно-кусочная аппроксимация при использовании короткого ударника

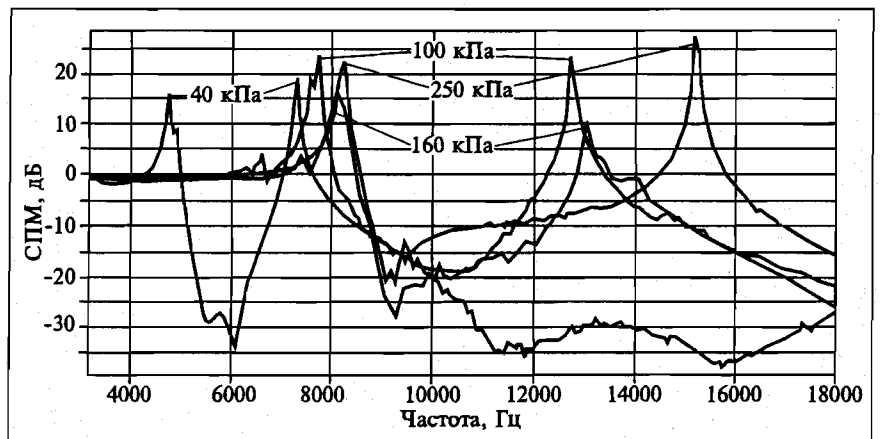


Рис. 7. Область собственных частот двухмембранных МПД с различными диапазонами измерения давления

таблице. На рис. 6 показаны общие АЧХ проверенных МПД в двойном логарифмическом масштабе; видно, что характеристики соответствуют фильтру низких частот с неравномерностью в области полосы пропускания, не превышающей 3 дБ.

Значения собственных частот и частоты среза фильтров приведены в таблице. На рис. 7 показана область частотной характеристики, где сосредоточены две наиболее низкие собственные моды колебаний, полученные на исследованных МПД.

Собственные частоты двухмембранных МПД

Диапазон измерения МПД, кПа	Первая мода, кГц	Вторая мода, кГц	Частота среза, кГц, приблизительно
40	4,8	7,3	3,5
100	7,7	12,7	6
160	8,0	13,0	6
250	8,2	15,2	6

При измерении давления жидкостей должно происходить снижение собственных частот МПД в силу образования механической связи, и, как следствие, сужение полосы пропускания. Теоретически это снижение можно оценить для одномембранных МПД. Частота первой моды относительно значения, найденного по выражению (2), уменьшается в k раз [5]:

$$k = 1/\sqrt{1 + \beta};$$

$$\beta = 0,67(\rho_c/\rho_m)(a/h), \quad (4)$$

где ρ_c , ρ_m — плотности среды и материала мембраны; a — радиус мембраны; h — толщина мембраны.

Как следует из выражения (4), сужение полосы пропус-

кания будет более выражено у высокопределных МПД, так как с ростом предела измерения уменьшается отношение a/h . Для двухмембранных МПД также должно наблюдаться сужение полосы пропускания, но количественную оценку для этого случая можно получить только численными методами.

При эксплуатации в реальных условиях возможно искажение частотных характеристик. Эти искажения могут быть вызваны влиянием замкнутых (резервуары) и полузамкнутых (трубопроводы) объемов. Эти объемы могут проявлять себя как волноводы, резонаторы, либо как локальные реактивные и активные сопротивления, в за-

висимости от отношения геометрических размеров объемов к длине волны, распространяющейся в среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бушев Е. Е., Николайчук О. Л., Стучебников В. М. Серия общепромышленных датчиков давления МИДА-ДИ-13П // Датчики и системы. — 2004. — № 6. — С. 48–51.
2. Стучебников В. М. Структуры “кремний на сапфире” как материал для тензопреобразователей механических величин // Радиотехника и электроника. — 2005. — Т. 50. — № 6. — С. 1–16.
3. Сиберт У. М. Цепи, сигналы, системы: В 2-х ч.: Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. — 360 с.
4. Гольденберг Л. М. и др. Цифровая обработка сигналов: Справочник. — М.: Радио и связь, 1985. — 312 с.
5. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. — М: Наука, 1967. — 444 с.

Статья представлена ГП Ульяновский центр микроэлектроники, ПГ МИДА.

Александр Васильевич Пирогов — канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник;
Владимир Михайлович Стучебников — д-р техн. наук, профессор, зам. генерального директора по научной работе.

☎/ф(8422) 32-61-22

E-mail: mida@mv.ru

