

6. Brain T. O. Y. S., Macdonald L. M. Evaluation of the performance of small scale critical flow Venturis using the NEL gravimetric gas flow standard test facility // Fluid Flow Measurement in the Mid — 1970's: Proc. Conf. NEL, Apr. 8—10, 1975. Edinburg, 1977. V. 1. P. 107—129.

7. А. с. 329400 СССР. Весовая испытательная установка для статической градуировки газовых расходомеров / К. К. Бок, Ю. Ф. Мишин, В. С. Симакин // Бюл. изобрет. 1972. № 7.

8. Герасимов А. П. и др. Государственный первичный эталон единицы массового расхода газа в диапазоне $4 \cdot 10^{-2} — 4 \cdot 10^{-1}$ кг/с // Метрология и точные измерения. 1980. № 5.

9. ГОСТ 8.369—79. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений массового расхода газа в диапазоне $4 \cdot 10^{-2} \div 2,5 \cdot 10^2$ кг/с.

10. Герасимов А. П. и др. Государственный первичный эталон единиц объемного и массового расходов газа // Мир измерений. 2006. № 7. С. 10—11.

11. ГОСТ Р 8.618—2006. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений объемного и массового расходов газа.

Дата принятия 18.07.2013 г.

621.3.083.8:551.54

Согласование тонкопленочного емкостного датчика давления с внешней цепью и его частотная характеристика

А. А. КАЗАРЯН

Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский, Россия,
e-mail: wtdiv@tsagi.ru

Указаны условия согласования датчика и усилителя при больших расстояниях между ними. Приведены особенности частотной характеристики тонкопленочных емкостных датчиков пульсаций давлений. Рекомендован способ сглаживания частотной характеристики измерительного канала в диапазоне звуковых частот.

Ключевые слова: датчик давления, амплитудно-частотная характеристика, сглаживание, суммирование сигналов.

The conditions of sensor and amplifier coordination at big distances between them are described. The features of frequency characteristic of thin film capacitive pressure pulsations sensors are presented. A method of smoothing of measuring signal frequency characteristic in audio frequency range is recommended.

Key words: pressure sensor, amplitude-frequency characteristic, smoothing, signals summation.

Тонкопленочный емкостный датчик (ТЕД) предназначен для измерения быстропеременного давления на поверхности испытываемого объекта без ее предварительной механической обработки. Благодаря гибкости и компактности датчик можно произвольно размещать на изделии с большой кривизной в труднодоступных местах, на тонких профилях и т. д. Основу ТЕД составляют пленка из полиимида и мембрана из железоникелевого или никелевого сплава [1—4]. Отметим, что в ТЕД отсутствует явление дрейфа нуля. Конструктивно ТЕД имеют одиночное и матричное исполнение с количеством чувствительных элементов на одной подложке от одного до десяти и больше.

Использование ТЕД для измерения пульсаций давления связано с нормированием его метрологических характеристик после установки на исследуемый объект. Поэтому важны систематические исследования ТЕД на этапах его разработки, освоения технологии производства, испытаний образцов, которые позволили бы с достаточной достоверностью перенести полученные метрологические характеристики на отдельный экземпляр датчика и ограничить количество нормируемых характеристик [1].

Цель данной работы — повышение точности и надежности измерительной аппаратуры, содержащий ТЕД, защита

высокоомной электрической цепи от влияния внешних электромагнитных, синфазных помех и сглаживание неравномерности АЧХ в диапазоне звуковых частот для измерения низких и высоких уровней звукового давления на больших и малых расстояниях.

Согласование существующих традиционных емкостных датчиков и микрофонов с внешней цепью (УЗ). Как правило, емкостные микрофоны, например, фирмы «Брюль и Кьер» (Дания), RION (Япония), RFT (Германия) поляризованы напряжением постоянного тока 200 В или не поляризованы (электретные, пьезопирозлектрические и акселометры). Конструктивно мембрана емкостных микрофонов находится в одном корпусе с УЗ. В этом случае высокоомная цепь между микрофоном и усилителем защищена от влияния внешних электромагнитных и синфазных помех [4, 5].

Условия согласования ТЕД с внешней цепью, т. е. выхода ТЕД со входом УЗ, могут отличаться. Если чувствительный элемент (мембрана) ТЕД размещен вне корпуса УЗ на расстоянии 0,3—20 м и дальше, то защита высокоомной цепи от проникновения внешних электромагнитных и синфазных помех усложняется. Очевидно, синфазные помехи и сетевые частотой 50 Гц являются источниками поляризации ТЕД.

Внешние электромагнитные помехи проникают через открытую поверхность обкладки (мембраны) в месте соединения (пайки) ТЕД и УЗ [1, 3]. Выбор параметров отрицательной обратной связи и АЧХ УЗ в заданном диапазоне звуковой частоты будет определяться емкостью ТЕД и неравномерностью его АЧХ. Последняя зависит от физико-механических свойств материала мембраны, ее формы (круглая или прямоугольная) и размеров; связи ТЕД газообразного диэлектрика с атмосферой; количества отверстий на нижней обкладке ТЕД (верхняя обкладка — мембрана); изменения формы мембраны ТЕД после наклейки на поверхности изделий разной кривизны с учетом того, обеспечена или нет связь газообразного диэлектрика ТЕД с атмосферой; условия согласования ТЕД с УЗ и равномерности АЧХ усилителей; дискретной неоднородности блоков измерительных каналов. Большинство факторов, влияющих на АЧХ ТЕД, рассмотрено в [1—3]. В этой работе для сглаживания АЧХ ТЕД в составе измерительной аппаратуры дополнительно использованы блоки функционального генератора, сумматора, вычислителя, памяти, переключателей.

На рис. 1 приведена структурная схема измерения пульсаций давления с ТЕД 1. Она предназначена для контроля и измерения звукового давления в диапазонах давления 60—180 дБ и частоты 20 Гц — 20 кГц с АЧХ, неравномерность которой находится в пределах 0,3—1,5 дБ. Конструкция ТЕД 1 разработана на базе высокотемпературных диэлектриков и высококачественных сплавов, из которых изготовлена мембрана. Выбранный экранированный кабель 4 марки АВКТ-6 предназначен для эксплуатации при повышенных вибрациях и температуре.

На высоком выходном сопротивлении ТЕД при поляризации, в частности, напряжением постоянного тока выделя-

ется электрический сигнал мощностью 10^{-13} — 10^{-15} Вт. Этот сигнал по кабелю через согласующую цепь можно передать на большие расстояния (50 м и более). Усилитель заряда собран на базе операционного усилителя (ОУ) с глубокой отрицательной обратной связью через резистор $R3$ и конденсатор $C3$. Коэффициент усиления УЗ равен единице (при необходимости его можно увеличить до 20). Сопротивление резистора $R3$ и емкость конденсатора $C3$ равны собственным сопротивлению $\sim 10^7$ и емкости 5—170 пФ ТЕД. Для защиты от шумов и наводок ТЕД тщательно экранируется. Напряжение поляризации от источника 7 подается через резисторы $R1$, $R2$ равного сопротивления на нижнюю обкладку ТЕД. Схема позволяет использовать один кабель как для поляризации датчика, так и для съема полезного сигнала (преобразованного звукового давления в электрический сигнал) через жилу 3 кабеля 4. Конденсатор $C2$ предназначен для защиты от попадания высокого напряжения поляризации на вход УЗ [3].

Резисторы $R1$ — $R3$, конденсаторы $C1$ — $C3$ в устройстве позволяют располагать ТЕД датчика вдали от источника поляризации и УЗ, а цепь $R1$, $R2$, $C1$ обеспечивает изоляцию емкости ТЕД от емкости кабеля и компенсацию последней. Длина кабеля между датчиком и УЗ ограничивается только проводимостью кабеля и частотными свойствами ТЕД.

Рассмотрим принцип работы устройства. При изменении давления p на поверхности мембраны изменяются расстояние между обкладками ТЕД и его начальная емкость C_0 (ΔC — приращение емкости). Напряжение ΔU на выходе УЗ, измеряемое между точками a и b , пропорционально отношению $\Delta C/C_0$ и напряжению поляризации U_n на выходе источника поляризации 7, т. е. $\Delta U = U_n \Delta C/C_0$. Сигнал $\Delta p \sim \Delta U$ с выхода датчика через антивибрационный кабель подается на вход УЗ. При этом изменение заряда датчика $\Delta Q = Q_n \Delta C/C_0$ или с учетом того, что $Q_n = C_0 U_n$ — заряд, обусловленный напряжением поляризации, $\Delta Q = \Delta C U_n$.

Выравнивание АЧХ устройства осуществляют следующим образом. Воспользуемся тем, что неискаженная передача возможна, когда модуль комплексного коэффициента передачи устройства $K(\omega) = K_0 = \text{const}$, а аргумент $\phi(\omega)$ представляет собой линейную функцию частоты или времени, т. е. $\phi(\omega) = t_3 \omega$. Дело в том, что во временной области при условии неискаженной передачи переходная характеристика устройства $A(t)$ формируется в виде единичной функции, умноженной на K_0 и смещенной вправо на время t_3 задержки колебания при прохождении по устройству: $A(t) = K_0 1(t - t_3)$ [4]. Тогда для сигналов длительностью t_n , период повторения которых $T \gg t_n$, условия неискаженных передач являются достаточными при $t_3 \leq t \leq t_3 + t_n$. В звуковом диапазоне частот неискаженная передача сигнала связана с трудностью выполнения условия $t_n \leq t_3$ (где t_3 — удвоенное время прохождения сигнала в устройстве), которое преодолевается благодаря дискретным неоднородностям устройства при передаче сигнала на большое расстояние. Согласно [6] учет конечной длительности импульсов позволяет не только облегчить задачу согласования линий, но и открывает возможности для создания систем с дискретными неоднородностями; именно наличие последних создает желаемый эффект преобразования и в то же время не приводит к искажениям формы сигнала.

Важной задачей является формирование больших перепадов напряжения на выходе устройства. Для этой цели в схему введен функциональный генератор 14 с двумя раз-

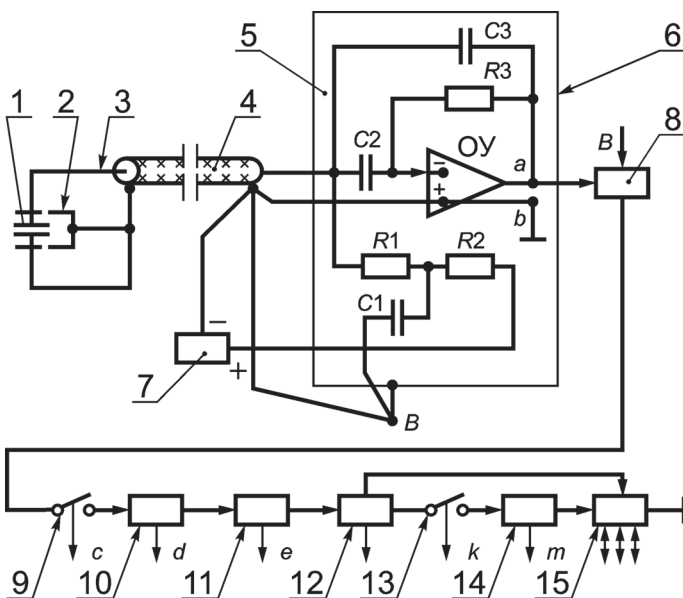


Рис. 1. Структурная схема измерения быстропеременного давления:

1 — емкостный чувствительный элемент; 2, 6 — экраны; 3 — жила коаксиального кабеля 4; 5 — усилитель заряда; 7 — источник поляризации; 8 — нормирующий усилитель напряжения; 9, 13 — переключатели; 10 — блок памяти; 11 — блок вычисления; 12 — сумматор; 14 — функциональный генератор; 15 — блок управления и информации; B — внутренняя общая точка; a, b, ..., m — условное обозначение связи элементов схемы с блоком 15

личными состояниями равновесия. Переход от одного состояния к другому, вызванный внешними (в частности давлением) или внутренними причинами, совершается столь быстро, что в устройстве измерения звукового давления эти колебания можно назвать скачками, а сами колебания — разрывными. В соответствии с [6], чтобы определить длительность такого переключения, необходимо учесть влияние малых параметров схемы функционального генератора — паразитных емкостей, а иногда и индуктивностей, т. е. влияние именно тех элементов, которые не принимает во внимание теория разрывных колебаний.

Для упрощения задачи полагают, что в процессе переключения функциональный генератор представляет собой линейный ОУ, охваченный положительной обратной связью. Учет нелинейных свойств ОУ в процессе переключения не дает качественных результатов. Сигнал функционального генератора является кусочно-линейным, и процесс формирования импульсного колебания можно рассматривать как совокупность линейных преобразований, совершаемых над входным колебанием в отдельных областях фазового пространства (подробности см. в [6]).

В рабочем режиме на ТЕД подается звуковое давление. Оно преобразуется в информативный электрический сигнал U_c , на который накладываются внешние помехи $U_{ш.п.}$. Зашумленный сигнал $U_{с.ш.п.}$ усиленный УЗ и нормирующим усилителем 8, поступает на вход блока вычисления 11, в котором

выделяется полезный сигнал $U_c = \sqrt{U_{с.ш.п.}^2 - U_{ш.п.}^2}$, приходящий на вход сумматора 12. По команде от блока 15, через переключатель 13 сигнал с выхода функционального генератора 14 поступает на сумматор 12. Здесь происходит суммирование двух сигналов разной полярности и благодаря этому АЧХ устройства сглаживается. Функциональный генератор 14 выдает в блок суммирования результаты измерения АЧХ без выравнивания, показанные на рис. 2 (кривая 1). После алгебраического суммирования на выходе устройства имеем равномерную АЧХ (см. на рис. 2 кривую 2).

Для получения АЧХ устройства в относительных единицах, можно построить зависимость U_c/U_{c1000} , где U_c — текущий сигнал; U_{c1000} — сигнал при частоте 1000 Гц. Далее по команде блока 15 после суммирования двух сигналов в блоке 12, с выхода которого имеем информационный сигнал U_c в зависимости от текущей частоты f (при заданном уровне звукового давления $p = \text{const}$), т. е. на выходе блока 15 получаем $U_c/U_{c1000} = 1 \pm \delta$, где δ — неравномерность АЧХ в относительных единицах, например децибелах. Устройство можно выполнять в одноканальном и многоканальном исполнении. В последнем случае сглаживание АЧХ каждого канала проводят индивидуально, настраивая функциональный генератор 14 согласно рис. 2.

В устройстве все блоки разработаны на базе операционных и решающих усилителей в заданной полосе пропускания, которые усиливают как постоянное напряжение положительной и отрицательной полярности, так и переменное. Все основные математические операции осуществляются в аналоговом или цифровом виде. Выравнивание АЧХ происходит на плоском участке частотной характеристики ОУ в выбранном диапазоне частот [7].

Блок памяти 10 устройства обеспечивает запоминание выходного сигнала $U(t_i)$ в заданный момент времени t_i , что дает возможность реализовать большое число логических и программных операций. На вход блока 10 информацию по-

дают в виде импульсов, число которых, а в некоторых случаях и длительность, характеризует значение величины, подлежащей хранению. Принципы выполнения суммирования и вычитания на решающем усилителе на базе ОУ приведены в [7].

Погрешность измерительной аппаратуры в звуковом диапазоне частот, создаваемая неровностью АЧХ, составляет $\pm (0,3—1,0)$ дБ. Коэффициент преобразования S измерительных каналов при условии, что амплитудная характеристика устройства с ТЕД линейна во всем диапазоне заданной зву-

ковой частоты и давления, постоянный: $S = \tilde{U}_c / \tilde{p} = \text{const}$, где

$\tilde{U}_c$, $\tilde{p}$ — текущие значения выходного напряжения сумматора 12 и измеряемого звукового давления. Измерительный канал градуируют, задавая известное значение звукового давления на разных частотах.

Чувствительность устройства с ТЕД звукового давления повышается благодаря изоляции емкостей датчика и кабеля между собой, введение экранов улучшает помехоустойчивость. С увеличением длины кабеля с 0,4 до 20 м помехи и шумы возрастают не более чем на 3 %. Коэффициент усиления аппаратуры составляет 2000 при температуре среды 25 °С. Не наблюдается существенного увеличения теплового шума на выходе измерительной аппаратуры до 50 °С. Звуковое давление практически можно измерять от 40 до 140 дБ (шепот и речь средней громкости, рев на расстоянии 0,3—1 м при температуре 25 °С) и кратковременно от 160 до 180 дБ (реактивные двигатели на расстоянии 2—3 м от выхлопа). Для измерения звукового давления в указанных диапазонах необходимо разработать ТЕД для двух диапазонов: 40—140 и 140—180 дБ. Мембрана ТЕД изготовлена из FeNi-сплава толщиной 20 мкм. Основной и боковые экраны ТЕД выполнены из меди, нанесенной на полиимидную пленку. Уровень измеряемого звукового давления 55—140 дБ; сопротивления резисторов $R_1 = R_2 = R_3 = 750$ МОм; емкости конденсаторов $C_1 = 470$ пФ, $C_2 = 1000$ пФ, $C_3 = 100$ пФ. Напряжение поляризации 100 В. Использованы интегральные микросхемы 544УД1.

Неравномерность АЧХ устройства, полученная в результате экспериментального исследования для одного измерительного канала в диапазоне 1—20 кГц и приведенная на рис. 2 (кривая 2) не превышает 1—3 дБ при заданном уровне давления $p = 120$ дБ. В качестве эталонного был использован микрофон мод. 4136 с погрешностью измерения 0,5—1,0 дБ фирмы «Брюль и Кьер». Например, на частоте 15 кГц суммирование в блоке 12 происходит следующим образом. С выхода блока 11 информационный сигнал U_c , пропорциональный $p = 130,15$ дБ, поступает на один вход блока 12, а на другой его вход с блока 14 — сигнал пропорциональный давлению 10,15 дБ. Суммирование двух ин-

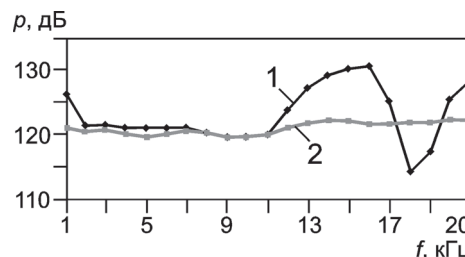


Рис. 2. Неравномерная 1 и равномерная 2 частотные характеристики измерительного канала

формационных сигналов дает действительный сигнал: $p - \Delta p = 130,15 - 10,15 = 120$ дБ. Такое суммирование проводится n раз по определенному алгоритму и по специально составленной программе, заложенной в устройстве.

Из результатов экспериментального исследования (см. рис. 2) следует, что полученный разброс звукового давления по частоте можно аппроксимировать по-разному. Считаем наиболее подходящим сигнал в виде треугольника, выдаваемый функциональным генератором. При этом реализация предлагаемого устройства становится проще и эффективнее. В частности, отметим, что в связи с ростом потребности измерения звукового давления разработаны специальные микросхемы для построения импульсных усилителей звуковых частот. Одна из них — микросхема ТДА8920, которая имеет два одинаковых канала, содержащих входные каскады, широтно-импульсные модуляторы, схему управления, выходные ключи и пр. [8].

В заключение отметим, что неравномерность АЧХ измерительной аппаратуры понижается благодаря ее выравниванию с 6—9 дБ до 1—3 дБ на плоском участке характеристики ОУ в рабочем диапазоне частот. Для этого необходимо повысить помехоустойчивость к внешним электромагнитным и синфазным помехам. Целесообразно усилитель заряда 5 поместить в дополнительный экран 6 и связать его с экраном коаксиального кабеля. Защитные цепи (экраны) датчика следует соединить между собой и подключить к экрану УЗ. Сигнальная и защитные цепи, а также электрическая схема источника поляризации должны быть изолированы от земли и испытываемого объекта (см. точку В на рис. 1). Минимальное измеряемое значение пульсаций давления не превышает 0,1 Па (74 дБ). Инерционность датчика, обуслов-

ленная временем поляризации и постоянной времени датчика, не оказывает заметного влияния на результаты измерения пульсаций давления в широком диапазоне звуковой частоты.

Л и т е р а т у р а

1. Казарян А. А. Пленочные датчики давления. М.: Бумажная галерея, 2006.
2. Пат. 2334964 РФ. Измерительный конденсаторный микрофон звукоаого давления и способ его сборки / А. А. Казарян, Н. А. Езеев, А. Н. Шестопалов // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 27.
3. Пат. 2281470 РФ. Устройство для измерения звукового давления / А. А. Казарян, Л. М. Москалик // Изобретения. Полезные модели. 2006. № 22.
4. Порта М. и др. Пленочные датчики давления и их применение / Пер. с фр. М.: Всесоюз. центр переводов, 1983. № Е-32663.
5. Нурберт Г. П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1970.
6. Моругин Л. А., Глебович Г. В. Наносекундная импульсная техника. М.: Сов. радио, 1964.
7. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. Л.: Энергия, 1974.
8. Петропавловский Ю. Микросхемы для построения импульсных усилителей звуковых частот в современной звуковой и видеоаппаратуре // Современная электроника. 2009. № 7. С. 16.

Дата принятия 08.04.2013 г.

621.9

Применение информационно-измерительной системы для повышения точности обработки тонкостенных деталей на фрезерных станках с ЧПУ

А. В. ИСАЕВ, М. П. КОЗОЧКИН

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия
e-mail: avisz@yandex.ru; astra-mp@yandex.ru

Рассмотрен принцип контроля вибраций, возникающих в процессе обработки тонкостенных заготовок фрезами с режущей частью из твердого сплава и кубического нитрида бора, при помощи информационно-измерительной системы реального времени. Проведено сопоставление уровня вибраций с геометрическими параметрами и шероховатостью участков обработанной поверхности.

Ключевые слова: вибродиагностика, информационно-измерительная система, фрезерование.

This paper contains a description of a principle of monitoring of vibrations (chatter) that affect machining process of thin-walled parts on the CNC milling machine by milling cutter with solid carbide and CNB teeth, using a measuring information system, and comparison of the values of vibration signals with roughness of machined surface.

Key words: vibration diagnostics, measuring information system, milling.

Вопросы контроля процессов механической обработки тонкостенных изделий имеют большое значение в современном машиностроении. Это связано с наметившейся в

последнее время тенденцией к увеличению номенклатуры тонкостенных изделий (детали турбин и насосов, корпусные детали и т. д.), обусловленной объективными причинами, в