

А. Л. ГРОХОЛЬСКИЙ, Г. В. САЛОВ, Ю. Ф. ТИХОМИРОВ, Л. Г. ЯКОВЛЕВ
 (Киев)

ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ ВЕЩЕСТВА ПО ЧАСТОТЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОБЪЕКТА

В ранее опубликованной статье [1] рассмотрено использование объекта контроля в качестве первичного измерительного преобразователя для получения информации о значении контролируемого параметра. Использование такой системы позволяет сократить число звеньев измерительной схемы и повысить в конечном итоге точность измерения.

В настоящей статье продолжено рассмотрение свойств такого рода систем по результатам экспериментальных исследований способа измерения массы вещества по частоте собственных колебаний динамической системы резервуар — вещество. Рассмотрены особенности объекта контроля, являющегося одновременно чувствительным элементом датчика, с переменным количеством заполнителя и дана оценка помехозащитных свойств такого измерительного устройства.

В зависимости от способа организации системы съема информации [1] механический чувствительный элемент датчика рассматривается при этом как осциллятор в генераторных схемах или как резонатор в схемах селективных.

Независимо от выбранного пути возбуждения механических колебаний осциллятор (под ним в дальнейшем подразумевается и резонатор) считается высокочастотным и с переменными параметрами: массой, участвующей в колебательном движении, жесткостью конструкции системы резервуар — вещество и сопротивлением, обусловленным силами трения.

Рассматриваемая динамическая система является полнечастотным осциллятором. Использование в системе съема информации [1] вторичного преобразователя с пространственной избирательностью, а также мер электрической селекции позволяет рассматривать измерительную систему в целом как моночастотный осциллятор. Механическую модель такого осциллятора можно приближенно представить в виде гибкого упругого однородного стержня с переменными параметрами, колебания которого описываются уравнением

$$\begin{aligned} (M_1 + \Delta M + \Sigma M_k) \ddot{\xi} + \left(N_1 + \frac{\partial N}{\partial M} \Delta M + \Sigma N_k \right) \dot{\xi} + \\ + \left(K_1 + \frac{\partial K}{\partial M} \Delta M + \Sigma K_k \right) \xi = F, \end{aligned} \quad (1)$$

где ξ — колебательное смещение стенок резервуара; M_1 , N_1 , K_1 — экви-

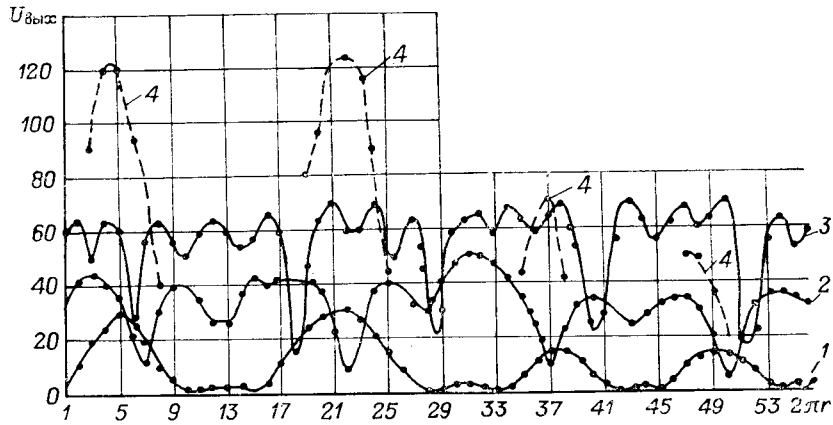


Рис. 1.

валентные масса, сопротивление и жесткость пустого резервуара; ΔM — переменное массовое количество заполнителя; F — возбуждающая механическая сила, приложенная к внешней поверхности резервуара; $\Sigma M_k, \Sigma N_k, \Sigma K_k$ — составляющие, учитывающие действие на внешнюю поверхность резервуара добавочных сил $\Sigma \theta_k(\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi})$ при условии, что в функции θ_k переменные разделяются.

Механические системы резервуар — вещество разнообразны по форме, однако в каждом отдельном случае основные черты поведения измерительной системы сходны и их можно проследить на примере осциллятора, выполненного в виде цилиндра с радиусом основания r , высотой, образующей l , и толщиной стенки δ .

На рис. 1 представлены результаты экспериментальных исследований изгибных колебаний подобной системы при ее возбуждении гармонической силой, приложенной к боковой поверхности цилиндрического резервуара. Здесь обозначено: 1, 2, 3 — формы колебаний (соответственно при 150, 282, 450 Гц); 4 — области авторезонансного возбуждения колебаний по периметру цилиндра по первой форме; $2\pi t$ и $U_{\text{вых}}$ — периметр цилиндра и уровень выходного сигнала в относительных единицах. При этом рассматривались изгибные колебания двух видов: в плоскости, перпендикулярной к образующей цилиндра, и в нормальной плоскости, проведенной через ось цилиндра.

Результаты экспериментального исследования поперечных колебаний с тремя произвольно выбранными собственными частотами показали, что при оговоренных условиях эксперимента: 1) в плоскости сечения, перпендикулярной к образующей цилиндра, наблюдаются поперечные колебания, характерные для колебаний изгиба кольца, которое аналогично поличастотному осциллятору; 2) в плоскости сечения, проведенной через ось цилиндра, независимо от уровня заполнения резервуара присутствует только одна форма поперечных колебаний (характерная для балки с закрепленными концами), пучность которой совпадает с серединой образующей цилиндра, а узлы расположены на ее краях.

Рассмотрим колебания изгиба элемента цилиндра в поперечном сечении как колебания кольца. Колебания в продольной плоскости, а также колебания скручивания для та-

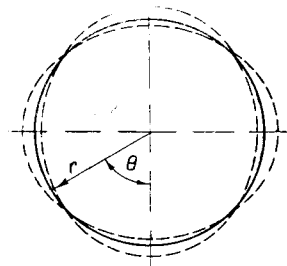


Рис. 2.

кого элемента нехарактерны. Поэтому будем рассматривать только колебания в плоскости кольца (рис. 2) (θ — угол, определяющий положение точки на осевой линии, J — момент инерции поперечного сечения относительно главной оси, под прямым углом к плоскости кольца, $S = \delta l$ — площадь поперечного сечения).

В нашем случае с учетом заполнения резервуара цилиндрической формы на высоту уровня h жидкостью с плотностью $\gamma_{ж}$ колебания при условии малости коэффициента демпфирования будут описываться следующим уравнением:

$$\frac{\pi r}{g} (l\delta\gamma + 2K_0 r \gamma_{ж} h) \left(1 + \frac{1}{i^2}\right) a_i'' + \frac{EJ\pi}{r^3} (1 - i^2)^2 a_i = 0, \quad (2)$$

где a_i — обобщенная координата; γ — плотность материала резервуара; E — модуль упругости; i — коэффициент формы колебаний; h может изменяться от 0 до l ; $k_0 \leq 1$ — безразмерный коэффициент, характеризующий степень участия заполнителя в колебательном движении системы резервуар — вещество.

Уравнение (2) более полно описывает условия колебания по сравнению с формулами, приведенными в [2], где рассмотрено уравнение колебаний ненагруженного идеализированного кольца.

Основная и высшие формы собственной частоты осциллятора определяются при этом формулой

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EgJ}{r^4(l\delta\gamma + 2K_0 r \gamma_{ж} h)} \frac{i^2(1 - i^2)^2}{1 + i^2}}; \quad (3)$$

$i=2$ соответствует основному виду колебаний изгиба, крайние положения которого показаны на рис. 2 штрихами.

С учетом коэффициента демпфирования уравнение (2) имеет вид

$$\frac{\pi r}{g} (l\delta\gamma + 2K_0 r \gamma_{ж} h) \left(1 + \frac{1}{i^2}\right) a_i'' + n_0 \frac{\pi}{r} \frac{1 - i^2}{i} \times \\ \times \sqrt{(l\delta\gamma + 2K_0 r \gamma_{ж} h) EJ (1 + i^2)} a_i' + \frac{EJ\pi}{r^3} (1 - i^2)^2 a_i = 0, \quad (4)$$

где n_0 — безразмерный относительный коэффициент демпфирования ($n_0 \leq 1$).

При анализе рассматриваемой механической системы можно также воспользоваться методом электромеханических аналогий. Вопрос об установлении эквивалентных параметров механических и электрических осцилляторов связан с нахождением достаточно близких аналогий двух несвязанных 3-координатных систем параметров: M , N , K — для механических и L , R , C — для электрических осцилляторов. Эта аналогия (эквивалентность) может рассматриваться с точки зрения одинакового влияния вариаций искомых эквивалентов на динамические свойства тех и других осцилляторов, например, по отношению к формам собственной частоты, добротностям (декрементам затухания), связанным с энергетическими потерями на поддержание колебательного режима и т. п. При этом наиболее трудным является установление аналогии между электрическим и механическим сопротивлениями осцилляторов (параметров, являющихся, можно сказать, опорными в системе координат M , N , K) и главным образом по причине недостаточно отработанных способов измерения последнего. Наиболее удачно этот вопрос решен по отношению к кварцевым пластинам в [3]. Наряду с упомянутой имеются и другие работы в этой области, например [4], но они направлены на решение частных задач и не вполне применимы к рассматриваемому механическому осциллятору. Это обстоятельство не дает возможности в настоя-

шее время в полной мере воспользоваться для решения поставленной задачи имеющимся аппаратом электрического моделирования. Тем не менее в теоретическом плане электрические модели цилиндрического резервуара с переменным количеством вещества представляют определенный интерес и могут быть получены следующим образом.

Из уравнения (2) получаем выражения для эквивалентных электрических параметров механического поличастотного осциллятора цилиндрической формы без учета демпфирования:

$$L'_n = \frac{\beta\pi r}{g} (l\delta\gamma + 2K_0 r \gamma_{ж} h) \left[1 + \frac{1}{(n-1)^2} \right]; \quad (5)$$

$$\frac{1}{C'_n} = \frac{\beta J \pi}{r^3} n^2 (2-n)^2.$$

Отсюда эквивалентная электрическая схема рассматриваемого осциллятора может быть представлена совокупностью последовательно соединенных n идеальных (без потерь) параллельных резонансных контуров (рис. 3) со значениями параметров элементов, составляющих контур, определяемых по формулам (5), где $n = i + 1 = 1, 2, 3, \dots$



Рис. 3.

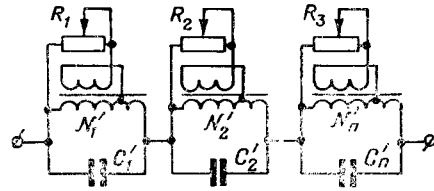


Рис. 4.

Из (4) находим эквивалентное сопротивление механического поличастотного осциллятора цилиндрической формы

$$R'_n = \frac{\beta n_0 \pi n (2-n)}{r (n-1)} \sqrt{(l\delta\gamma - 2K_0 r \gamma_{ж} h) EJ [1 + (n-1)^2]}. \quad (6)$$

В этом более общем случае эквивалентная электрическая схема поличастотного осциллятора отличается от схемы рис. 3 введением в параллельные резонансные контуры активных сопротивлений R'_n .

Однако более удобной для электрического моделирования рассматриваемого осциллятора, на наш взгляд, представляется электрическая схема, приведенная на рис. 4, при условии, что полное активное сопротивление контуров и коэффициенты индукции дросселей N'_n подобраны равными R'_n и L'_n , определяемым по формулам (5) и (6).

При практической реализации измерительных систем исключительно важным является требование высокой помехозащитности [5].

Известно [6], что если на систему с ярко выраженными резонансными свойствами (добротность $Q > 10$) воздействует помеха в виде нормального «белого» шума со спектральной плотностью S_0 , то математическое ожидание средней частоты выходного сигнала совпадает с собственной частотой системы ω_c , а выходная величина пропорциональна добротности системы. Считается, что этот результат приблизительно сохраняется, если спектральная плотность помехи является сравнительно плоской в широкой полосе частот и не имеет резких пиков вблизи резонансных частот системы.

Однако авторами данной статьи экспериментально показано, что при соответствующей организации системы контроля помехозащитные свойства механических осцилляторов также сохраняются и в случае наличия пиков вблизи резонансных частот. Это было проверено на час-

тотном авторезонансном измерительном устройстве, являющемся одной из форм реализации предложенного способа измерения [5].

Авторезонансное измерительное устройство представляет собой слабодемпфированную колебательную механическую систему, замкнутую за счет охвата электромеханической гибкой положительной обратной связью объекта контроля — механического осциллятора. Схема позволяет поддерживать собственные незатухающие механические колебания объекта с ограниченной амплитудой и этим самым осуществлять непрерывный контроль интересующих параметров по частоте.

Оценка влияния помех в виде действующих на объект механических вибраций или электрических наводок в системе на выходную величину измерительного устройства производилась экспериментально с помощью установки, блок-схема которой представлена на рис. 5 (1 — объект контроля; 2 — пьезоэлектрический преобразователь; 3 — предусилитель; 4 — усилитель мощности; 5 — фазокорректирующее звено; 6, 10 — электродинамические возбудители; 7 — частотомер; 8 — анализатор спектра; 9 — осциллограф; 11 — звуковой генератор).

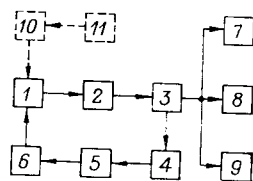


Рис. 5.

Совокупность звеньев 1—7 (см. рис. 5) образует исследуемое частотное авторезонансное измерительное устройство, в котором звенья 1—6 представляют авторезонансную механическую колебательную систему с гибкой положительной обратной связью. Необходимым условием работоспособности последней является нелинейность хотя бы одного из звеньев, ее образующих. В исследуемой системе таким нелинейным звеном (с нелинейностью типа насыщения) можно считать предусилитель (звено 3).

Механические помехи в исследуемом устройстве имитировались с помощью одного из возбудителей (звено 10), жестко закрепленных на внешней поверхности резервуара с переменным количеством жидкого вещества, за счет энергии, подаваемой от генератора электрических колебаний (звено 11). Тракт имитации механических помех показан на рис. 5 штрихами.

Экспериментальная оценка помехозащищенности исследуемого устройства при условии воздействия на объект помех механического характера (вибрации, изменяющиеся по гармоническому закону) производилась по спектрограммам, представленным соответственно на рис. 6, а—в для случаев: а) авторезонансный режим при отсутствии механических помех; б) режим возбуждения объекта вибрациями, изменяющимися по гармоническому закону и совпадающими по частоте с одной из форм собственных колебаний осциллятора; в) совмещение авторезонансного режима с той же по своим параметрам помехой механического характера. Из представленных спектрограмм видно, что в авторезонансном устройстве за счет наличия в его составе звена с нелинейностью типа насыщения происходит подавление помех механического характера, причем даже для наиболее неблагоприятных условий (совпадение частоты вибрации с одной из частот собственных колебаний объекта контроля) помехи уменьшаются на 50—70%.

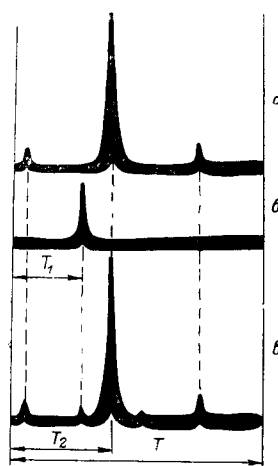


Рис. 6.

Таким же по характеру и величине является подавление авторезонансным частотным измерительным устройством электрических помех в виде наводок гармонического характера.

Это дает основание за счет соответствующего выбора амплитудного порогового ограничения на входе усилителей (звенья 3 и 4 на рис. 5) авторезонансного устройства гарантировать достаточную помехозащищенность выхода последнего от действия помех гармонического характера, составляющих до 50% от уровня возбуждения.

Попутно исследовалась помехоустойчивость частотного авторезонансного измерительного устройства, о которой можно судить по величине и характеру помех, приводящих к срыву колебательного режима в устройстве и тем самым к нарушению контроля интересующего параметра. Исследования показали, что к срыву колебательного измерительного режима в устройстве приводит действие помех гармонического характера, превышающих величину 70%-ного уровня возбуждения и близких по частоте к рабочей частоте устройства. При этом срыв колебаний возможен только на время действия указанной помехи с немедленным восстановлением колебательного измерительного режима по прекращении ее действия при условии наличия «мягкого» возбуждения.

Проведенное экспериментальное исследование помехозащищенности и помехоустойчивости частотных авторезонансных измерительных устройств позволяет сделать вывод о достаточно высоких помехозащитных свойствах, что необходимо для обеспечения высокой точности измерения интересующих параметров при условии действия в момент контроля помех механического и электрического характера.

Более перспективной формой реализации способа измерения массы вещества в резервуаре [5], по сравнению с рассмотренным авторезонансным устройством, является использование механической системы резервуар — вещество в качестве резонатора. При воздействии на резонатор нормального белого шума математическое ожидание средней частоты выходного сигнала совпадает с собственной частотой механической системы. Учитывая высокую добротность механических систем, можно ожидать, что для них указанное свойство сохранится с достаточным приближением и при наличии широкополосных помех, отличающихся от «белого» шума. Это обстоятельство позволяет освободиться от необходимости использования специального возбудителя, так как в месте установки объекта контроля в подавляющем большинстве практических случаев имеются механические шумы от работы силового оборудования в виде вибраций, акустических ударов и иных воздействий. В силу высоких значений добротности механические резонаторы с достаточной точностью обеспечивают выделение из шумового спектра гармоник, отвечающих по частоте и фазе условиям их оптимального возбуждения. При этом значительно повышаются требования к селективности системы съема информации [1].

В итоге рассмотрения предложенного способа измерения [5] можно сделать вывод, что совмещение объекта контроля, рассматриваемого как механические осциллятор или резонатор, с чувствительным элементом (первичным измерительным преобразователем) датчика массы вещества в резервуаре позволяет использовать высокую добротность механических систем для дальнейшего совершенствования самого датчика как измерительного преобразователя. К основным преимуществам датчика, достигаемым за счет указанного совмещения объекта с чувствительным элементом, следует отнести: повышение точности измерения интересующего параметра путем получения частотной формы представления контрольно-измерительной информации непосредственно на выходе чувствительного элемента датчика; высокие помехозащитные свойст-

ва частотных авторезонансных измерительных устройств с указанными датчиками (помехозащищенность и помехоустойчивость); возможность использования такого датчика в качестве фильтра, формирующего полезный сигнал из всего спектра помех.

Приведенные экспериментальные данные подтверждают возможность получения результатов измерения в широком интервале температур с погрешностью порядка 1% и менее в зависимости от конструктивных особенностей объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Грохольский, Г. В. Салов. К вопросу об использовании объекта контроля в качестве чувствительного элемента датчика.— Автометрия, 1970, № 6.
2. С. П. Тимошенко. Теория колебаний в инженерном деле. М.—Л., Госнаучтехиздат, 1932.
3. Б. К. Шембель. Исследование эквивалентного сопротивления кварцевого резонатора.— Труды ВНИИМ, вып. 2 (62). Л., 1948.
4. Р. Л. Зайдельман. Повышение надежности турбинных лопаток демпфированием колебаний. М., «Энергия», 1967.
5. Г. В. Салов, Л. Г. Яковлев. Способ измерения массы вещества в резервуаре. Авторское свидетельство № 271051.— ОИПОТЗ, 1970, № 17.
6. Д. Кэрноп. Основы теории случайных колебаний.— В сб. «Случайные колебания». Под ред. А. А. Первозванского. М., «Мир», 1967.

*Поступила в редакцию
16 марта 1971 г.,
окончательный вариант —
31 августа 1971 г.*