

УДК 550.34

А.В. Троценко, доцент, канд. техн. наук*Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu/sebastopol.ua***ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЖИДКОСТНОГО СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Проведено исследование динамической модели жидкостных преобразователей диффузионного и электрокинетического принципов действия при воздействии сейсмических и акустических сигналов в низкочастотной области, установлены требования к нормированию номенклатуры основных технических характеристик.

Ключевые слова: *сейсмоакустический преобразователь, динамическая модель, техническая характеристика, влияющая величина, измерительная ось, расход рабочей жидкости, функция преобразования, амплитудная градуировочная характеристика.*

На стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию сейсмоакустических преобразователей (САП) составной частью процесса выбора оптимальных инженерных решений, отработки конструкции и разработки технологического процесса изготовления является построение адекватной математической модели САП и оценка ее параметров.

Технические характеристики жидкостных САП, приводимые в литературе [1-3], не в полной мере отражают их специфику, не учитывают ряд влияющих величин, характерных при сейсмологических подводных исследованиях, не позволяют произвести оптимальный выбор САП для реальных условий применения.

Целью исследований является анализ динамической модели жидкостного САП, учитывающей особенности конструктивного исполнения промежуточных преобразователей, наличие газовых включений в рабочей жидкости, одновременное воздействие сейсмических и акустических сигналов и гидростатического давления.

Жидкостный САП [1], как правило, содержит (рисунок 1) герметичный полый корпус, ограниченный упругими элементами 2, заполненный рабочей жидкостью 3 и разделенный на две камеры промежуточным преобразователем 4 объемного расхода жидкости в электрический сигнал. Движение корпуса 1 с ускорением или наличие перепада давления между упругими элементами 2 вызывает переток жидкости 3 через преобразователь 4 и появление на его электродах 5 соответствующего электрического сигнала.

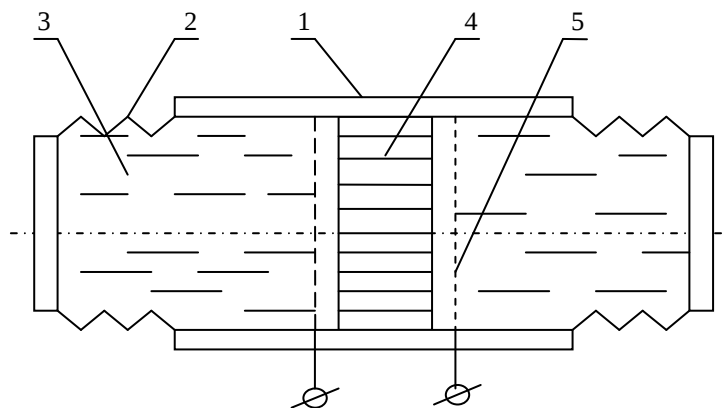


Рисунок 1 – Конструктивная схема САП

Жидкостный САП может быть представлен системой двух последовательно соединённых преобразователей: гидромеханического, преобразующего внешний механический сигнал в объемный расход рабочей жидкости, и молекулярно-электронного, преобразующего расход жидкости в электрический сигнал. Гидромеханический преобразователь представим линейной колебательной системой с тремя степенями свободы и сосредоточенными параметрами. При составлении динамической модели приняты следующие допущения [1]: 1) деформация корпуса отсутствует; 2) рабочая жидкость несжимаема; 3) коэффициенты жесткости упругих элементов и их эффективные площади постоянны; 4) поперечный и продольный размеры САП малы по сравнению с длиной акустической волны в жидкости.

Система уравнений, описывающих динамику преобразователя при воздействии сейсмических и акустических сигналов с учетом газовых включений в камерах, имеет вид

$$\begin{cases} \rho \cdot l_1 \cdot a + P = C_1 \cdot V_1 + C_3 \cdot (V_1 - V) + \frac{\rho \cdot l_1}{S_g} \cdot \ddot{V}_1, \\ C_3 \cdot (V_1 - V) = C_4 \cdot (V - V_2) + R_f \cdot \dot{V}, \\ \rho \cdot l_2 \cdot a - P_1 + C_4 \cdot (V - V_2) = C_2 \cdot V_2 + \frac{\rho \cdot l_2}{S_g} \cdot \ddot{V}_2, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – эффективная плотность рабочей жидкости и упругих элементов; l_1, l_2 – длина камер САП в направлении измерительной оси; a – проекция линейного ускорения корпуса на измерительную ось; P, P_1 – давления, действующие на упругие элементы; C_1, C_2 – коэффициенты объемной жесткости упругих элементов по давлению; C_3, C_4 – коэффициенты объемной жидкости газовых включений; V_1, V_2 – изменение объема камер; V – объем жидкости, перетекающий через молекулярно-электронный преобразователь; S_g – эффективная площадь упругих элементов; R_f – гидродинамическое сопротивление молекулярно-электронного преобразователя.

В низкочастотной области до 100 Гц инерционным сопротивлением жидкости и упругих элементов можно пренебречь [2]. Тогда система уравнений (1) примет вид:

$$\begin{cases} (C_1 + C_3) \cdot C_3 \cdot V = \rho \cdot l_1 \cdot a + P, \\ R_f \cdot \dot{V} + (C_3 + C_4) \cdot V = C_3 \cdot V_1 + C_4 \cdot V_2, \\ (C_2 l + C_4) \cdot V_2 - C_4 \cdot V = \rho \cdot l_2 \cdot a - P_1. \end{cases} \quad (2)$$

Из (2) находим

$$R_f \dot{V} + CV = \rho a \left(\frac{C_3 l_1}{C_1 C_3} + \frac{C_4 l_2}{C_2 C_4} \right) + \frac{C_3}{C_1 C_3} P - \frac{C_4}{C_2 C_4} P_1, \quad (3)$$

$$\text{где } C = \frac{C_1 C_3 (C_2 + C_4) + C_2 C_4 (l_1 + C_3)}{(C_1 + C_3)(l_2 + C_4)}.$$

Примем $l_1 = l_2 = L/2$, направление акустической волны – вдоль измерительной оси САП, изменение ускорения a и акустического давления P по гармоническому закону на одной круговой частоте ω и сдвигом фаз на $\pi/2$ рад; $A = a_a \sin \omega t$; $P = P_a \cos \omega t$, где a_a, P_a – амплитуды ускорения и акустического давления соответственно.

Проведённые исследования показали, что принятые допущения не влияют на общность полученных результатов.

Так как $P - P_1 = PL\omega / v_c$, где v_c – скорость распространения звука в среде, окружающей САП, уравнение (3) принимает вид:

$$\dot{V} + C / R_f V = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

$$\text{где } A = \frac{1}{R_f} \left\{ P_a^2 \left[C_5 + C_6 \left(\frac{L\omega}{v_c} - 1 \right) \right]^2 + \frac{\rho^2 L^2 a_a^2}{4} (C_5 + C_6)^2 \right\}^{1/2} \quad \text{при воздействии сейсмических и}$$

акустических сигналов; $A = A_a = \frac{\rho L a_a}{2 R_f} (C_5 + C_6)$ при воздействии только сейсмических сигналов;

$$A = A_p = \frac{P_a}{R_f} \left[C_5 + C_6 \left(\frac{L\omega}{v_c} - 1 \right) \right] \quad \text{при воздействии только акустических сигналов.}$$

$$\text{В выражении (4) } C_5 = \frac{C_3}{C_1 + C_3}; C_6 = \frac{C_4}{C_2 + C_4}; \varphi = \arctg \frac{2 P_a \left[C_5 + C_6 \left(\frac{L\omega}{v_c} - 1 \right) \right]}{\rho L a_a (C_5 + C_6)}.$$

При наличии начальных условий $t = 0$; $V = 0$ решением уравнения (4) будет

$$V = A \left(\frac{C^2}{R_F^2} + \omega^2 \right)^{-1/2} \sin \omega t.$$

Объёмный расход $\dot{V}$ жидкости через молекулярно-электронный преобразователь

$$\dot{V} = A S_F(\omega) \cos \omega t$$

где $S_F(\omega)$ – модуль передаточной функции гидромеханической системы

$$S_F(\omega) = \left(1 + \frac{\omega_n^2}{\omega^2} \right)^{-1/2};$$

$\omega_H = \frac{C}{R_F}$ – нижняя граничная частота системы на уровне 0,707.

Из существующего многообразия молекулярно-электронных преобразователей [1] наибольшее распространение получили преобразователи двух типов: диффузионный и электрокинетический. Диффузионный преобразователь (ДП) содержит систему электродов, образующих с рабочей жидкостью (раствором электролита) обратимую окислительно-восстановительную систему. Принцип действия ДП основан на конвективном переносе ионов при движении электролита, изменяющем скорость доставки реагирующих компонентов к измерительным электродам и соответственно силу тока в их цепи.

Электрокинетический преобразователь (ЭКП) содержит капиллярно-пористую перегородку из диэлектрического материала и два электрода, расположенные по обе стороны перегородки. Принцип действия ЭКП состоит в возникновении разности потенциалов по обе стороны перегородки и, соответственно, тока в цепи электродов при перетоке через перегородку полярной жидкости.

В рабочем диапазоне значений объёмного расхода жидкости ДП и ЭКП могут быть представлены как линейные динамические звенья.

Связь силы тока I в цепи электродов с расходом рабочей жидкости $\dot{V}$ представляется зависимостью

$$I = I_o + K_o S_m(\omega) \dot{V},$$

где I_o – сила тока в цепи электродов при отсутствии входного сигнала; для ДП $K_o = K_o^{LG} = F C_o$, F – число фарадея; C_o – концентрация реагирующей компоненты; для ЭКП в токовом режиме работы цепи

измерительных электродов $K_o = K_o^{ЭКП} = \frac{\epsilon_0 \epsilon \xi B R_F}{\mu}$; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость воздуха; ϵ –

относительная диэлектрическая проницаемость рабочей жидкости; ξ – электрокинетический потенциал;

$B = \frac{A_n \sigma_n}{\chi h}$ – конструктивный параметр перегородки; A_n , ϵ_n , h – площадь, пористость и толщина перегородки; χ – извилистость пор; μ – вязкость рабочей жидкости; $S_m(\omega)$ – модуль передаточной функции молекулярно-электронного преобразователя.

На основании опыта исследовательских испытаний жидкостных САП модуль $S_m(\omega)$ может быть представлен в виде

$$S_m(\omega) = L(\omega) \left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_B^2} \right)^{-1/2},$$

где $L(\omega)$ – функция, характеризующая отклонение действительной передаточной функции от функции апериодического звена; ω_B – верхняя граничная частота молекулярно-электронного преобразователя на уровне 0,707.

Тогда

$$I = I_o + f(x), \quad (5)$$

где $f(x) = A K_o S(\omega)$; $S(\omega) = S_F(\omega) S_m(\omega)$; x – входная величина.

Характеристикой, позволяющей определить значения измеряемых величин, является функция преобразования (ФП). Влияние на ФП жидкостного САП значительного числа параметров гидромеханической и молекулярно-электронной систем и значительное число источников изменения этих параметров от образца к образцу и во времени предполагает определение и контроль индивидуальной ФП для каждого экземпляра САП.

Анализ (5) показывает, что жидкостный САП не реагирует на постоянную во времени измеряемую величину; при $\omega = 0$; $f(x) = 0$. Для этих САП принято определять амплитудную градуировочную характеристику (АГХ) [3, 4] как зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды входного в диапазоне частот, в котором динамическая погрешность не превышает 20...30% предела допускаемого значения основной погрешности. В то же время для значительной части жидкостных САП, особенно ДП, отсутствует априорная информация о диапазоне частот, удовлетворяющем указанному выше требованию. Кроме того, стремление разработчика при проектировании жидкостного САП повысить коэффициент преобразования за счет снижения гидродинамического сопротивления молекулярно-электронного преобразователя R_{Γ} приводит к повышению нижней граничной частоты ω_H и её приближению к верхней ω_B . В этом случае ФП имеет куполообразную форму. На стадии исследовательских испытаний необходимо предварительно расчётным путем определить диапазоны параметров входных сигналов, в которых отклонение АГХ от линейности не превышает заданного значения, и в этих диапазонах проводить экспериментальное исследование индивидуальной ФП.

Отклонение АГХ от линейности, как правило, происходит в области нижнего и верхнего пределов измерения ИП. Для жидкостных САП нижний предел ограничен зоной нечувствительности и гистерезисом упругих элементов, шумом и дрейфом молекулярно-электронного преобразователя, т.е. высоко- и низкочастотными флуктуациями выходного сигнала I_o . Совокупность этих ограничений непосредственно связана с составляющей инструментальной погрешности, не зависящей от входного сигнала (аддитивная погрешность).

Нелинейность на верхнем пределе измерений ЭКП обусловлена либо смещением с увеличением $\dot{V}$ плоскости скольжения жидкости относительно образующей капилляра пористой перегородки в граничную область с измененными реологическими свойствами, либо конечным временем релаксации двойного электрического слоя. Последнее условие позволяет определить максимально допустимый объемный расход жидкости

$$\dot{V}_{\max} = \frac{B(\chi h)^2 \lambda}{2\pi \epsilon_0 \epsilon},$$

где λ – удельная электрическая проводимость жидкости.

Кроме того, верхний предел измерений жидкостного САП ограничен давлением объемной прочности жидкости или ее отрыва от стенок камер САП и может колебаться в значительных пределах, обусловленных чистотой стенок камер и капилляров перегородки, а также степенью обезгаженности и чистотой жидкости.

Нелинейность на верхнем пределе измерений ДП обусловлена действием двух факторов: ограничением выходного сигнала значением предельного диффузионного тока и проскоком реагирующей компоненты измерительного электрода.

Погрешность от нелинейности на верхнем пределе измерений обуславливает составляющую инструментальной погрешности, пропорциональную входному сигналу (составляющая мультипликативной погрешности).

Проведенный анализ динамической модели и функции преобразования жидкостного САП позволяет сформулировать комплекс их основных технических характеристик, требования к методам и средствам исследовательских испытаний.

Дальнейшие исследования предполагают анализ модели погрешности жидкостных САП различного конструктивного исполнения, установление допустимых пределов изменения параметров основных технических характеристик.

Библиографический список

1. Лидоренко Н.С. Введение в молекулярную электронику / Н.С. Лидоренко — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 320 с.
2. Ильин Б.И. Применение метода взаимности для повышения точности измерений механических величин с помощью электрокинетических преобразователей / Б.И. Ильин // Метрология. — 1885. — № 6. — С. 45 – 51.
3. Брунштейн Ю.Г. Особенности испытаний жидкостных измерительных преобразователей / Ю.Г. Брунштейн, А.В. Троценко // Измерительная техника. — 1984. — № 6. — С. 34 – 36.
4. Троценко А.В. Установление точностных требований к элементам конструкции жидкостного сейсмоприемника / А.В. Троценко, И.А. Полянцев // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. — Севастополь, 2003. — Вып. 6. — С. 129 – 134.

Поступила в редакцию 20.03.2009 г.