

УДК 550.34

А.В. Троценко, доцент, канд. техн. наук,**В.В. Троценко, доцент, канд. техн. наук***Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***АНАЛИЗ МОДЕЛИ ПОГРЕШНОСТИ ЖИДКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

Проведен анализ модели погрешности жидкостного сейсмоакустического преобразователя диффузионного и электрокинетического принципа действия, функций влияния температуры, внешнего давления, линейных и угловых вибраций и параметров электромагнитного поля на основные технические характеристики.

Ключевые слова: жидкостной преобразователь, модель погрешности, сейсмоакустический сигнал, техническая характеристика, влияющая величина, нелинейность градуировочной характеристики, функция преобразования.

Значительные преимущества при сейсмоакустических исследованиях имеют жидкостные преобразователи, реализующие эффекты переноса заряда в жидких средах и на границе твердых и жидких фаз [1,2].

Определение точностных требований к элементам конструкции и оптимизация конструкции жидкостного сейсмоакустического преобразователя (САП) [3] должны основываться на анализе его динамической модели, модели погрешности и обосновании номенклатуры технических характеристик (ТХ).

Целью исследований является анализ модели жидкостного САП при воздействии сейсмических и акустических сигналов, систематической и некоррелированной случайной составляющих погрешности, характеризующих статические и динамические свойства САП.

Основными величинами, влияющими на ТХ жидкостных САП, являются: температура, её абсолютное значение и градиент; внешнее давление, атмосферное при работе на воздухе и гидростатическое под водой; линейные и угловые вибрации в направлении и перпендикулярно измерительной оси; ускорение свободного падения – ориентация системы электродов и упругих элементов относительно вектора гравитационного поля Земли; параметры электромагнитного поля; для диффузионного преобразователя (ДП) – параметры электропитания.

Влияние температуры и давления на ТХ жидкостных САП наиболее выражено. Это обусловлено зависимостью физических свойств и характеристик рабочей жидкости и газа, параметров гидромеханического и молекулярно – электронного преобразователей от этих величин. Изменение температуры и давления приводит к изменению объема газовых включений, механических свойств упругих элементов, вязкости, диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности рабочей жидкости, коэффициента диффузии, электрокинетического потенциала и, соответственно, статических и динамических свойств САП. Функциональные зависимости параметров САП от влияющих величин в большинстве случаев сложны и недостаточно изучены.

Для установления комплекса ТХ, функции влияния на которые подлежат определению, необходим анализ модели погрешности жидкостного САП.

Погрешность модели САП по выходу ΔI – это разность между действительной функцией преобразования (ФП) $f(x)$ и номинальной $f(x)_n$ – ФП с номинальными коэффициентами для САП без газовых включений

$$\Delta I = \Delta I_0 + f(x) - f(x)_n, \quad (1)$$

где ΔI_0 – “погрешность нуля” САП.

Представим (1) в виде

$$\Delta I = \Delta I_0 + (K - K_n) X, \quad (2)$$

где $K = \frac{f(x)}{x}$ – действительный коэффициент преобразования; $K_n = \frac{f(x)_n}{x}$ – номинальный коэффициент преобразования.

После подстановки в (2) выражения для $f(x)$ при воздействии на САП вдоль измерительной оси линейных ускорений

$$\Delta I_a = \Delta I_0 + \left[\frac{C_5 + C_6}{2} \frac{\rho L K_0}{R_\Gamma} S(\omega) - \frac{\rho_H L_H K_{0H}}{R_{\Gamma H}} S(\omega)_H \right] a; \quad (3)$$

акустического давления

$$\Delta I_p = \Delta I_0 + \left\{ \left[\frac{v_C}{L\omega} (C_5 - C_6) + C_6 \right] \frac{LK_0}{R_{\Gamma} v_C} S(\omega) - \frac{L_H K_{0H}}{R_{\Gamma H} v_{CH}} S(\omega)_H \right\} \omega \rho, \quad (4)$$

где ρ_n , L_H , K_{0H} , $R_{\Gamma H}$, v_{CH} , $S(\omega)_H$ – номинальные значения соответствующих параметров и модуля передаточной функции.

На основании анализа результатов предварительных экспериментальных исследований жидкостных САП, а также с учетом упрощений и их обоснования, аддитивную составляющую погрешности представим в виде:

$$\Delta I_0 = \Delta_S + \dot{\Delta}_{IC} + \dot{\Delta}_{If}(t) + \Delta_{a(p)} + \Delta_{a\perp} + \Delta_{вв}.$$

Систематическая составляющая погрешности Δ_S обусловлена погрешностью компенсации последующей измерительной схемой выходного сигнала I_0 и медленными временными изменениями (типа старения) свойств составных элементов САП. Интенсивность изменения Δ_S определяется как режимом работы: напряжением питания (для ДП), температурой и давлением окружающей среды в реальных условиях применения, так и исходным составом материалов.

Центрированная некоррелированная случайная величина $\dot{\Delta}_{IC}$ – шум выходного сигнала. Шум электрокинетического преобразователя (ЭКП) характеризует среднеквадратическое значение электрического тока Найквиста на внутреннем сопротивлении R_B

$$I_{ш} = \left(\frac{2RT\Delta\omega}{\pi R_B} \right)^{1/2},$$

где R – постоянная Больцмана; T – температура; $\Delta\omega$ – диапазон частот.

Природа шумового сигнала ДП изучена недостаточно, что обусловлено его зависимостью от многих не всегда контролируемых факторов: химического состава рабочей жидкости, площади и расстояния между электродами, их конфигурации и ориентации в пространстве, изменений температуры и давления. Проведенные исследования позволяют предположить, что шум периодического характера в иод – иодидной системе с платиновыми электродами обусловлен флуктуациями рабочей поверхности анода, при этом тепловой шум Найквиста и дробовый шум не превышают 1 % от измеренных шумов ДП.

Низкочастотные случайные изменения свойств САП $\dot{\Delta}_{ef}(t)$ – дрейф выходного сигнала, характерен в основном для ДП. Эта составляющая существенно зависит от градиента температуры и ориентации в пространстве системы электродов, последнее за счет конвективной составляющей движения рабочей жидкости в гравитационном поле Земли, обусловленной градиентом концентрации компонентов жидкости между электродами.

Реакция САП на неизмеряемую величину (функция влияния неизмеряемой величины) $\Delta_{a(p)}$: для сейсмических Δ_p – влияние изменения абсолютного значения и градиента внешнего давления; для акустических Δ_a – линейного ускорения (вибрации).

$$\Delta_p = A_p K_0 S(\omega); \quad \Delta_a = A_a K_0 S(\omega).$$

В зависимости от того, для измерения каких механических сигналов (сейсмических или акустических) предназначен САП, влияние неизмеряемой величины стремятся уменьшить, в частности, для акустических – экранированием упругих элементов от внешней среды.

$\Delta_{a\perp}$ – реакция САП на движение в направлении перпендикулярном его оси, обусловленное наличием газовых включений в камерах и неодинаковой жесткостью упругих элементов, кроме того, для ДП – за счет градиента концентрации компонентов рабочей жидкости; $\Delta_{вв}$ – реакция САП на воздействия величин, не указанных выше.

Каждая из составляющих погрешности зависит от температуры и давления окружающей среды.

Погрешность, приведенная ко входу, равна

$$\Delta I_0 I_n = \frac{\Delta I_0}{K_H S(\omega)_H}. \quad (5)$$

Нижний предел измерений ограничен значением, в N раз превышающим аддитивную погрешность

$$X_{\min} = N \Delta I_0 I_H.$$

Значение N определено требованиями по точности, предъявляемыми к САП на нижнем пределе измерений, шумом и дрейфом последующей измерительной схемы. Нижний предел, как следует из (5), является функцией обратной модулю передаточной функции САП.

Для жидкостных САП отдельно нормировать статистическую и динамическую составляющие погрешности невозможно. Однако на стадии исследовательских испытаний для анализа составляющих погрешности, оценки их соотношения, причин возникновения и возможных путей снижения целесообразно разделить погрешность преобразования на две составляющие: зависящую и независящую от спектрального состава входного сигнала и характеризующие соответственно статические и динамические свойства САП.

Представим каждый коэффициент ФП суммой его номинального значения ϵ_n и погрешности $\Delta\epsilon$:

$$\epsilon = \epsilon_n + \Delta\epsilon. \quad (6)$$

Для анализа статических свойств погрешности преобразования, независящей от спектрального состава входного сигнала, примем $S(\omega) = S(\omega)_n$.

Подставим (6) в (3), (4) и преобразуем к виду

$$\Delta_{st} = [\delta_\Gamma + (\delta_\Gamma + 1) \delta_n] S_n,$$

где δ_Γ – относительная погрешность, обусловленная наличием газовых включений; δ_n – относительная погрешность параметров САП.

Для сейсмического ИП

$$\Delta_{га} = \frac{C_5 + C_6}{2} - 1; \quad S_{на} = \frac{\rho_H L_H K_{OH}}{R_{ГН}} S(\omega)_H;$$

$$\Delta_{на} = \frac{\Delta L}{L_H} + \frac{\Delta \rho}{\rho_H} + \frac{\Delta K_0}{K_{OH}} - \frac{\Delta R_\Gamma}{R_{ГН}};$$

для акустического ИП

$$\delta_{ГР} = \frac{v_C}{L\omega} (C_5 - C_6) + C_6 - 1; \quad S_{нр} = \frac{L_H K_{OH}}{R_{ГН} v_{CH}};$$

$$\delta_{нр} = \frac{\Delta L}{L_H} + \frac{\Delta K_0}{K_{OH}} - \frac{\Delta R_\Gamma}{R_{ГН}} - \frac{\Delta v_C}{v_{CH}}.$$

Поскольку $\delta_\Gamma \ll 1$, то

$$\Delta_{st} = (\delta_\Gamma + \delta_n) X S_n.$$

Погрешность, обусловленная изменением параметров САП (δ_n), может быть представлена суммой составляющих

$$\delta_{нр} = \delta_s + \delta_{IC}^0 + \delta_{ef}^0(t) + \delta_T + \delta_P + \delta_{BB},$$

где δ_s – систематическая составляющая, обусловленная нелинейностью амплитудной градуировочной характеристики (АГХ), отклонением действительных значений коэффициентов ФП от номинальных или погрешностью индивидуальной градуировки САП и медленные временные изменения параметров; δ_{IC}^0 , $\delta_{ef}^0(t)$ – соответственно шум и дрейф коэффициентов ФП; δ_T , δ_P , δ_{BB} – погрешности, характеризующие зависимость коэффициентов ФП от температуры, давления и других влияющих величин.

Опыт исследовательских испытаний жидкостных САП показывает, что доминирующей из первых трех слагаемых является δ_s , а составляющими δ_{IC}^0 и $\delta_{ef}^0(t)$ можно пренебречь, тогда основная погрешность статических свойств САП определится как

$$\Delta_{st0} = (\delta_\Gamma + \delta_s) X S_n.$$

Для анализа составляющей погрешности от нелинейности АГХ рассмотрим конструкцию ДП с системой четырех плоских электродов, установленных параллельно друг другу, соосно оси, и выполненных из мелкоячеистой металлической сетки. Зазор между электродами обеспечивают перфорированные изоляционные перегородки. Электроды подключены по дифференциальной схеме к источнику стабилизированного напряжения. При включении источника в цепи электродов устанавливается предельный диффузионный ток I_d

$$I_d = F S D \frac{C_0}{d},$$

где D – коэффициент диффузии; S – площадь электродов; d – толщина диффузионного слоя, в установившемся режиме равная расстоянию между анодом и катодом.

Из-за несимметрии электродов (разные S и d), токи в цепи электродов 1, 3 – $I_d(1-3)_0$ и 2, 4 – $I_d(2-4)_0$ не равны друг другу. Их разность $I_0 = I_d(1-3)_0 - I_d(2-4)_0$ определяет выходной сигнал ДП при отсутствии входного сигнала.

Переток рабочей жидкости приводит за счет конвективной составляющей, обусловленной увлечением реагирующего компонента движущейся жидкостью, к повышению тока в цепи электродов 1, 3 на $I_{д\ 1-3}$ и понижению в цепи электродов 2, 4 на $I_{д\ 2-4}$. Ток, определяющий входной сигнал ДП, равен сумме этих токов

$$I = I_0 + I_{д\ 1-3} + I_{д\ 2-4}.$$

Составляющая относительной погрешности ДП от нелинейности АГХ за счет ограничения выходного сигнала значением предельного диффузионного тока определяется выражением

$$\Delta I_{д} = \frac{f(x) - I_{дм}}{2f(x)},$$

где $I_{дм}$ – меньшее значение предельного диффузионного тока системы электродов.

При $f(x) < I_{дм}$ погрешность отсутствует.

Задавшись допустимым значением погрешности $\{\delta I_{д}\}_{д}$, можно определить верхний предел измерений из неравенства

$$A_{\max} \leq \frac{2I_{дм}}{(1 - 2\{\delta I_{д}\}_{д})K_0^{ДП} S(\omega)}.$$

Таким образом, верхний предел измерений ДП, как и нижний, является функцией, обратной модулю его передаточной функции.

Составляющая погрешности от нелинейности $\delta_{пр}$, обусловленная проскоком реагирующего компонента измерительного электрода, представляет собой удвоенное отношение непрореагировавшего на первом по потоку катоду 3 реагента ко всему, прошедшему через поперечное сечение ДП:

$$\delta_{пр} = \frac{2[AK_0^{ДП} S_{Г}(\omega) - I_{ПР}]}{AK_0^{ДП} S_{Г}(\omega)}.$$

Здесь $I_{ПР}$ – сила тока измерительного электрода, обусловленная прореагировавшим компонентом.

Эта составляющая погрешности также является функцией модуля передаточной функции ДП.

Как правило, для разных конструктивных исполнений ДП определяющей является одна из двух составляющих погрешности от нелинейности.

Для анализа динамических свойств САП примем в $AK_0 = A_H K_{0H}$, тогда мультипликативная погрешность оценивается как

$$\Delta_{дин} = \left[\frac{S(\omega)}{S(\omega)_H} - 1 \right] X A_H K_{0H} S(\omega)_H.$$

Отклонение действительной ФП от номинальной обусловлено двумя причинами: несоответствием априорно приписываемой САП ФП ее действительному виду и отклонением параметров от их номинальных значений.

Для предварительного анализа рассмотрим погрешность, обусловленную только отклонением параметров ФП гидромеханического и молекулярно-электронного преобразователей от номинальных значений, т.е. при ее $L(\omega) = 1$, а граничные частоты ω_H и ω_B представим по аналогии (3) суммой номинальных значений ω_{HH} , ω_{BH} и соответственно погрешностей $\Delta\omega_H$ и $\Delta\omega_B$. Тогда получаем

$$\Delta_{дин} = \left[\left\{ \frac{(\omega_{BH}^2 + \omega^2)(\omega_{HH}^2 + \omega^2)}{[(\omega_{BH} + \Delta\omega_B)^2 + \omega^2][(\omega_{HH} + \Delta\omega_H)^2 + \omega^2]} \right\}^{1/2} \frac{\omega_{BH} + \Delta\omega_B}{\omega_{BH}} - 1 \right] X A_H K_{0H}.$$

Пренебрегая величинами второго порядка малости, после преобразования получим

$$\Delta_{дин} \approx [S^2(\omega)_{MH} \delta\omega_B + S^2(\omega)_{GH} \delta\omega_H] X A_H K_{0H} S(\omega)_H,$$

где $\delta\omega_B = \frac{\Delta\omega_B}{\omega_{BH}}$ – относительная погрешность верхней граничной частоты; $\delta\omega_H = \frac{\omega_H}{\omega_{HH}}$ – относительная погрешность нижней граничной частоты.

Поскольку $\delta\omega_B$ и $\delta\omega_H$ определены неидеальностью параметров САП, собственными флуктуациями и зависимостью их от влияющих величин аналогичными изложенным выше относительно составляющих ΔI_0 и $\Delta_{ст}$, для них применима та же модель погрешности.

Дальнейшие исследования предполагают разработку методики экспериментального определения составляющих погрешности измерения и диапазонов изменения основных ТХ жидкостных САП.

Библиографический список использованной литературы

1. Введение в молекулярную электронику / Н.С. Лидоренко [и др.]; под ред. Н.С. Лидоренко. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 320 с.
2. Абрамович И.А. Разработка сейсмодатчиков на новых технологических принципах (молекулярная электроника) / И.А. Абрамович, В.М. Агафонов, С.К. Дараган // Сейсмические приборы. — 1999. — Вып.31. — С. 56–71.
3. 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 17.11.2010 г.

Троценко О.В., Троценко В.В. Аналіз моделі похибок рідинного сейсмоакустичного перетворювача для сейсмічних та акустичних вимірювань

Проведено аналіз моделі похибки рідинного сейсмоакустичного перетворювача дифузійного та електрокінетичного принципу дії, функцій впливу температури, зовнішнього тиску, лінійних та кутових вібрацій та параметрів електромагнітного поля на основні технічні характеристики.

Ключові слова: рідинний перетворювач, модель похибки, сейсмоакустичний сигнал, технічна характеристика, величина, що впливає, нелінійність градувальної характеристики, функція перетворення.

Trotsenko A.V., Trotsenko V.V. Analysis of an error model for a liquid transformer of seismic and acoustic signals

The analysis of an error model for a liquid seismic and acoustic transformer of diffusive and electro kinetic principle of operation, functions of influence of the temperature, external pressure, linear and angular vibrations, and parameters of the electromagnetic field on the basic technical characteristics is conducted.

Keywords: liquid transmitter, model error, seismo-acoustic signal, the technical parameters that affect the value of the nonlinearity of the calibration characteristics, the conversion function.