

каналах. Все это приводит к возникновению фазовых искажений и дисперсии в волноводах. Уменьшение полосы пропускания конвольвера связано с недостаточно полным учетом всех паразитных емкостей и индуктивностей.

На рис. 3. приведена зависимость выходной мощности опорного $P_{вых}$ от входной $P_{вх}$ при фиксированном значении мощности опорного сигнала $P_{оп} = 16$ дБм.

Результаты проведенных работ показывают перспективность разработки и изготовления подобных устройств для обработки радиосигналов в системах связи с ШПС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нелинейные акустоэлектронные устройства и их применение/Под ред. В. С. Бондаренко.—М.: Радио и связь, 1985.—160 с.
2. Grasse H. P. SAW Convolver for Matched Filtering Microwave Signals.—1985 July.—V. 28, № 7.—P. 169—177.
3. Brown J. Kaytheon readies production SAWs Microwave and R F.—1985 July.—V. 24, 7.—P. 139—144.
4. Adler E. L. Broadband Matching for Multiply Tapped SAW Convolver//Proc. of 1981 IEEE Ultrason. Symp.—New York IEEE, 1981.—P. 232—205.
5. Дефрануэль Ф., Марфеллод Ш. Планарный пьезоэлектрический конвольвер на ПАВ/ТНИИЭР—1976.—Т. 64, № 5.—С. 218—221.

Г. фил. Моск. НИИ радиосвязи

24 VII 1989

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLIV, № 5—6, 1991, с. 272—277.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 531.751.3.082.22.088.4

С. Г. КЮРЕГЯН

КОСВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРАХ

Рассмотрены косвенные методы измерения массы жидкости в резервуарах произвольной формы и получены соотношения, которые можно принять за основу при метрологическом анализе и построении информационно-вычислительных систем учета массы.

Библиогр.: 4 назв.

Գրություններ են հերոսի գանդգար անուղղակի չափումների մեթոդները ցանկացած ձևի պահանջներով և ստացված են հարաբերակցություններ, որոնք կարելի է բնականորեն արդեն հիմնական չափաբանական գերազանցության և տեղեկատվական հաշվարկի համակարգերի կառուցման համարել:

В настоящее время у нас и за рубежом разрабатываются информационно-вычислительные системы распределения и учета жидких продуктов, хранящихся в резервуарах, позволяющие организовать про-

целуру косвенного измерения массы жидкости при учетно-коммерческих операциях. В существующей практике косвенных измерений массы жидкости (1) не учитывается влияние ряда факторов (форма резервуара, уровень начального заполнения и др.) на погрешность измерения, что снижает точность учета и приводит к потерям ресурсов.

Целью настоящей работы является попытка обобщить косвенные методы измерения массы жидкости, проанализировать и обобщить составляющие возникающих погрешностей и определить диапазон измерения массы жидкости в резервуарах произвольной формы, необходимых для алгоритмического обеспечения информационно-вычислительной системы.

В основу косвенных методов измерения массы положено теоретическое определение массы M вещества в объеме V : $M = \int_V \rho dV$,

где ρ —плотность вещества в точке объема, зависящая от координат трехмерного пространства.

Будем полагать, что жидкость в резервуаре находится в состоянии абсолютного покоя, а плотность изменяется в вертикальном направлении. Реальное распределение значения плотности жидкости в резервуаре практически получить невозможно. Принимая в качестве исходного состояния резервуар, наполненный жидкостью с плотностью на дне и на поверхности соответственно ρ_0 и ρ_1 , будем аппроксимировать значение плотности вдоль вертикальной оси резервуара в виде степенного ряда, учитывая, что при сливе на дне оказываются верхние слои жидкости:

$$\rho(z, h) = \rho_0 \left[1 - \delta_0 \frac{\sum_{i=1}^n a_i z_h^i}{\sum_{i=1}^n a_i} - \delta_1 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n a_i z_h^i}{\sum_{i=1}^n a_i} \right) \frac{\sum_{i=1}^n a_i (z/h)^i}{\sum_{i=1}^n a_i} \right], \quad (1)$$

$$0 \leq z \leq h, \quad 0 \leq h \leq 1,$$

где z и h —относительные значения вертикальной координаты и уровня жидкости, $h = H/H_m$; $\delta_0 = (\rho_0 - \rho_1)/\rho_0$ —максимальное относительное отклонение плотности жидкости; $z_h = f^{-1}[1 - f(h)]$ —относительный уровень верхнего слоя жидкости в полном резервуаре, оказавшийся на дне после слива; H, H_m —текущее и максимальное значение уровня жидкости; $v = f(h)$ —объем жидкости в резервуаре на уровне h , отнесенный к полному объему (градуировочная характеристика резервуара в относительных единицах); f^{-1} —функция, обратная $f(h)$ ($h = f^{-1}(v)$), для резервуаров, симметричных относительно центральной плоскости поперечного сечения (сферических, цилиндрических и др.); $z_h = 1 - h$.

Принимая во внимание, что

$$V = H_m \int_0^h S(z) dz, \quad P = H_m \int_0^h g \rho(z, h) dz, \quad (2)$$

где V , S , P —соответственно объем, площадь поперечного сечения и давление жидкости на уровне h , g —ускорение свободного падения, получаем две разновидности теоретического определения значения массы жидкости

$$M = \int_0^{V(h)} \rho(z, h) dV = \frac{1}{g} \int_0^{P(h)} S(z) dP = H_m \int_0^h \rho(z, h) S(z) dz. \quad (3)$$

На практике с помощью средств измерения определяют состояние измеряемого объекта и, используя градуировочную характеристику резервуара, определяют массу жидкости (1):

$$M = \rho_{cp} V = (\rho_{cp} S_{cp}) h, \quad (4)$$

где ρ_{cp} , S_{cp} —средние значения плотности жидкости и площади поперечного сечения резервуара на уровне h .

Сравним (4) с (3), заметим, что на практике массу жидкости определяют по средним значениям плотности жидкости или сечения резервуара

$$\rho_{cp}(h) = \frac{1}{V} \int_0^V \rho(z, h) dV, \quad S_{cp}(h) = \frac{1}{h} \int_0^h S(z) dz = V/H, \quad (5)$$

из-за чего и полученная масса может содержать методическую погрешность $\Delta M_{мет} = M_1 - M$. Определим ее, принимая в качестве расчетного выражения третий интеграл в (3) и учитывая (2) и (5):

$$\Delta M_{мет} = H_m \int_0^h \rho(z, h) [S(z) - S_{cp}(h)] dz = H_m \int_0^h S(z) [\rho(z, h) - \rho_{cp}(h)] dz. \quad (6)$$

При проведении товарных операций массу жидкости в резервуаре измеряют дважды—до и после операции, а массу отпускаемой или принимаемой жидкости определяют как абсолютную разность масс двух измерений. Поэтому методическая погрешность измерения массы жидкости в этом случае будет зависеть как от количества товарной массы, так и от начального уровня жидкости в резервуаре. Например, измерение массы жидкости с относительным значением $m = M/M_{\text{полн}} = 0,2$, где $M_{\text{полн}}$ —масса жидкости полного резервуара, для тех же резервуаров и при тех же условиях совершается с максимальной методической погрешностью соответственно 0,26 и 0,16%, которая достигается при полном резервуаре. Для значения массы $m = 0,5$ эти погрешности равны 0,08 и 0,05% соответственно на уровне $h = 0,65$ при

оттуске и $h = 0,15$ при приеме жидкости. Анализ указывает на необходимость учета методической составляющей погрешности косвенных измерений массы жидкости.

Рассмотрим инструментальную погрешность косвенных измерений д. резервуарах произвольной формы. Предварительно обобщим формулы косвенных методов (4), представив их одним матричным выражением

$$M \equiv y^T G v, \quad (7)$$

где $y^T = [P, H, \rho]$, $v^T = [S, V]$ — векторы, компоненты которых представляют измеренные параметры жидкости и параметры градуировки резервуара соответственно, $G = \|g_{ij}\|$ — матрица результатов метода измерений.

Вектор состояния объекта измерения можно выразить через вектор y : $x = Cy$, где $C = \|c_{ij}\|$ — матрица преобразования. В матрицах G и C элементы $g_{11} = 1/g$, $c_{11} = c_{21} = 1$ или $c_{11} = 1$, $c_{12} = c_{22} = 1$ при реализации соответственно гидростатического и объемно-массового методов, а остальные элементы нулевые.

Определим погрешность косвенных измерений при известных погрешностях средств измерения и градуировки резервуара

$$\Delta M = \Delta y^T G v + y^T G \Delta v + y^T G (\partial y / \partial H) \Delta H, \quad (8)$$

где Δy , Δv — векторы абсолютной погрешности соответственно средств измерения и градуировки резервуара, ΔH — абсолютная погрешность измерения уровня жидкости.

Оценим относительно погрешность δM измерения массы жидкости, используя среднеквадратические отклонения относительных погрешностей средств измерения и градуировки резервуара с учетом их статистической независимости при контрольных и товарных операциях соответственно [2]:

$$\delta M = k_p (\delta x^2 + \delta v^2 + \delta A^2)^{1/2}, \quad (9)$$

$$\delta M = k_p \left(\frac{m_0 (\delta x_0^2 + \delta v_0^2) + m_1 (\delta x_1^2 + \delta v_1^2)}{m^2} + \delta A^2 \right)^{1/2},$$

где $\delta x^2 = \| \delta x \|^2 = \delta x^T Q \delta x$, $\delta v^2 = \| \delta v \|^2$, $\| \cdot \|^2$ — норма вектора; $Q = \| \partial x / \partial y \|^2$ — матрица чувствительности; $q_i = y^T G \frac{\partial y}{\partial H} \frac{H}{M}$; $q_i = (y^T G v) M = 1$, $\delta x = C \delta y$, $\delta y^T = [\delta P, \delta H, \delta \rho]$, $\delta v = \delta V, \delta H, \delta R, \delta S, \delta V, \delta N = c, k, a$ — относительные погрешности соответственно измерения уровня, давления, средней плотности жидкости градуировки резервуара и вычислительной системы; m — относительная масса жидкости; k_p — эмпирический коэффициент; «0», «1» — индексы, обозначающие параметры до и после товарной операции.

Для объемно-массового и гидростатического методов измерения получим соответственно

$$\delta x^1 = (S/S_{cp})^2 \delta V^1 + \delta \varphi_{cp}^1, \quad \delta x^2 = (S/S_{cp} - 1)^2 \delta V^2 + \delta V^2. \quad (10)$$

Для резервуаров с постоянной площадью поперечного сечения (например, вертикальные цилиндрические резервуары) $S = S_{cp}$ и выражения погрешностей (9) с учетом (10) совпадают с моделями [1]. Это обстоятельство позволяет сделать важный вывод о том, что ГОСТ [1] регламентирует модели погрешностей косвенных измерений массы жидкости только в частном случае, когда $S = \text{const}$.

ГОСТ [1] регламентирует модели погрешностей косвенных измерений зависит от способа нормирования погрешностей средств измерения [3, 4]. Обычно нормируются относительные погрешности градуирования резервуара и измерения плотности жидкости

$$\delta V_c = \delta V_s = \delta V, \quad \delta \varphi_{cp, c} = \delta \varphi_{cp, s} = \delta \varphi_{cp},$$

Для средств измерения давления и уровня жидкости в общем случае рассмотрим нормирование двухчленного выражения погрешности

$$\delta H = (c_n - d_n) + d_n/h, \quad \delta P = (c_p - d_p) + d_p/h^2(h),$$

где c и d — нормируемые параметры, определяющие класс точности средства измерения, $\psi(h) = \rho_{cp}(h)/\rho_{cp, n}$, $\rho_{cp, n}$ — среднее значение плотности жидкости полного резервуара. В частности, при нормировании относительной погрешности средств измерения $d = 0$, а в случае нормирования приведенной погрешности — $c = d$.

Из первого выражения (9) следует, что для резервуара заданного класса точности допустимые погрешности измерения массы δM_x и средств измерения δx_x взаимосвязаны: $\delta x_x = ((\delta M_x/\delta x_x)^2 - \delta V^2 - \delta A^2)^{1/2}$. Обозначая через $\varepsilon_x(h) = \delta x/\delta x_x$, запишем условие определения минимального уровня жидкости в резервуаре, массу которой измеряем с погрешностью δM_x

$$\varepsilon_x(h) = 1. \quad (11)$$

Для объемно-массового и гидростатического методов получим соответственно

$$\varepsilon_x(h) = (\varphi^2(h) \varepsilon_p^2(h) + \varepsilon_v^2)^{1/2}, \quad \varepsilon_x(h) = ((\varphi(h)^2 - 1)^2 \varepsilon_v^2(h) + \varepsilon_p^2(h))^{1/2}, \quad (12)$$

где $\varphi(h) = S(h)/S_{cp}(h)$, $\varepsilon_v(h) = \varepsilon_{v, n} - \varepsilon_{d, n}/h$, $\varepsilon_p(h) = \varepsilon_{p, n} - \varepsilon_{d, p} - \varepsilon_{d, p}/h\psi(h)$, $\varepsilon_v = \delta x_v$, $\varepsilon_d = d/\delta x_x$, $\varepsilon_f = \delta \varphi_{cp}/\delta x_x$.

Применяя условие (11) к (12), определим минимальный уровень, который можно пересчитать на минимальную массу по формуле $m = f(h)$, где $F(h) = f(h)\psi(h)$. Из второго выражения (9) найдем условие проведения товарных операций с допустимой погрешностью δM_x

$$m^2(1 + \varepsilon_v^2) - m_0^2(\varepsilon_p^2(h_0) + \varepsilon_v^2) - m_x^2(\varepsilon_p^2(h_x) + \varepsilon_v^2) = 0, \quad (13)$$

