

Так как законы распределения отклонений величин источников погрешностей номинальных практически неизвестны, то при определении мультипликативной составляющей погрешности согласующего усилителя будем считать, что они подчиняются нормальному закону. Суммарную относительную среднеквадратичную погрешность усилителя  $\delta_{\Sigma}$  запишем как

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_k^2 + \delta_{R_4}^2 + \delta_{R_{12}}^2}, \quad (6)$$

где  $\delta_k$  — относительная погрешность из-за нестабильности коэффициента усиления;  $\delta_{R_4}$ ;  $\delta_{R_{12}}$  — относительные погрешности, вносимые резисторами цепи обратной связи.

В каждом каскаде усилителя переменного тока и оконечного УПТ имеется стабилизирующая усиление отрицательная обратная связь. При глубине обратной связи усилителя, равной 100, погрешность из-за нестабильности коэффициента усиления не превышает  $\pm 0,1\%$ . В цепи обратной связи применены резисторы типов С5-5 ( $R_4$ ) и С2-13 ( $R_{12}$ ), ТКС которых соответственно  $\pm 5 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$  и  $\pm 0,25 \cdot 10^{-2} \%/^\circ\text{C}$ .

Мультипликативная составляющая погрешности согласующего усилителя, определенная по формуле (6), в диапазоне рабочих температур не превышает  $\pm 0,15\%$ .

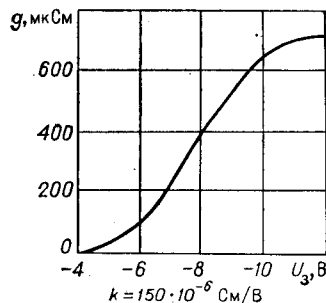


Рис. 3.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. D o s t a l. Analysis of the Capacitance Error of a m. i. s. f. e. t. Chopper Modulator.— Electronic Engineering, 1967, October.
2. C. T. S a h. Characteristics of the m. o. s. Transistors.— IEEE Trans., 1964, ED-11, July.

Поступило в редакцию 29 мая 1972 г.

УДК 681.121.621.3.082.722.55

О. И. ЗОЛотов, А. М. МЕХЛИС  
(Ленинград)

#### ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Одним из методов измерения количества жидкого диэлектрика является электроемкостный метод. Электроемкостные датчики получили распространение в нашей стране и за рубежом в нефтяной и химической промышленности, в судостроении и ряде других отраслей. В авиационной промышленности электроемкостные датчики являются основными для измерения запаса топлива на самолете [1]. Широкое распространение таких датчиков объясняется их простотой, отсутствием подвижных частей и возможностью измерения с достаточной точностью количества жидкого диэлектрика в баках сложной формы.

Информацию о количестве жидкого диэлектрика получают по изменению электрической емкости датчика, измеряемой с помощью вторичных устройств. Электрическая емкость датчика зависит от уровня жидкого диэлектрика и его диэлектрической проницаемости. Этим определяется основной недостаток электроемкостных датчиков, их температурная погрешность.

При измерении объема диэлектрика температурная погрешность вызвана температурным изменением диэлектрической проницаемости. Так, для топлива эта методическая погрешность может достигать до 1,2% на  $10^\circ\text{C}$ . При измерении массы жидкого диэлектрика влияние температур на погрешность, как известно, уменьшается благодаря температурному изменению плотности жидкого диэлектрика, которое, как правило, частично компенсирует влияние температурного изменения его диэлектрической проницаемости. Такая погрешность в ряде случаев также является нежелательной. Например, при измерении массы топливометров погрешность топливометров может достигать

0,5 % на 10° С, поэтому для уменьшения температурной погрешности часто приходится вводить во вторичные устройства компенсаторы и тем самым усложнять измерительную схему и уменьшать надежность приборов [1]. Кроме того, в ряде случаев это связано с дополнительными соединительными линиями, которые уменьшают помехозащищенность измерительных схем.

Статья посвящена рассмотрению принципиальной возможности более полной температурной самокомпенсации в датчике для измерения массы жидкого диэлектрика без применения дополнительных температурных компенсаторов. При рассмотрении приняты следующие допущения, практически выполняемые при измерении: 1) зазор между обкладками датчика постоянный; 2) диэлектрическая проницаемость воздуха равна 1; 3) температурные коэффициенты линейного расширения материалов конструкции датчика и бака пренебрежимо малы.

Для простоты принимаем, что нижний уровень датчика совпадает с уровнем дна бака. При принятых допущениях зависимость приращения электрической емкости датчика от уровня залитого жидкого диэлектрика определяется, как известно, выражением

$$\Delta C_d = k_1 (\epsilon - 1) S_h, \quad (1)$$

где  $\Delta C_d$  — приращение электрической емкости датчика, отсчитанное от ее значения для сухого датчика;  $k_1$  — конструктивная постоянная датчика;  $\epsilon$  — диэлектрическая постоянная жидкого диэлектрика;  $S_h$  — площадь рабочей поверхности датчика, соответствующая уровню  $h$  залитого диэлектрика и выполненная пропорционально объему  $V_h$  залитого диэлектрика. Учитывая, что  $V_h = Q/\rho$ , где  $\rho$  — плотность жидкого диэлектрика, а  $Q$  — его масса, выражение (1) запишем в следующем виде:

$$\Delta C_d = k_2 \frac{\epsilon - 1}{\rho} Q. \quad (2)$$

Сомножитель  $(\epsilon - 1)/\rho$  определяет методическую погрешность измерения массы жидкого диэлектрика электроемкостным методом. Приращения диэлектрической проницаемости и плотности большинства жидких диэлектриков при изменении температуры в достаточно широком диапазоне пропорциональны ее приращению и совпадают по знаку. Однако неравенство относительных изменений плотности  $\rho$  и выражения  $\epsilon - 1$  вызывает температурную погрешность измерения массы. Для исключения указанной методической погрешности измерения нами предложено [2] электроемкостный датчик профилировать по закону

$$S_h = k_3 (V_h)^n. \quad (3)$$

С учетом этого выражение (2) перепишем в виде

$$\Delta C_d = k_3 \frac{\epsilon - 1}{\rho^n} Q^n, \quad (4)$$

где  $k_3$  — некоторая постоянная. При изменении температуры от нормальной на  $\Delta t^\circ\text{C}$  величина диэлектрической проницаемости изменяется от своего значения при нормальной температуре  $\epsilon_0$  на  $\Delta\epsilon$ , а плотность от  $\rho_0$  на  $\Delta\rho$ ; тогда сомножитель в выражении (4), определяющий методическую погрешность, можно представить так:

$$\frac{\epsilon_0 - 1 + \Delta\epsilon}{(\rho_0 + \Delta\rho)^n} = \frac{\epsilon_0 - 1}{\rho_0^n} \frac{1 + \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_0 - 1}}{\left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)^n}. \quad (5)$$

Следовательно, для температурной компенсации должно выполняться условие

$$1 + \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_0 - 1} = \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)^n. \quad (6)$$

Обозначим относительное изменение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и плотности  $\rho$  через  $\gamma_\epsilon$  и  $\gamma_\rho$ . Так как температурные зависимости  $\epsilon$  и  $\rho$  имеют линейный характер в достаточно широком диапазоне температур, то значения  $\gamma_\epsilon$  и  $\gamma_\rho$  для данного топлива можно считать постоянными, и тогда, ограничившись первым членом разложения в биномиальный ряд правой части выражения (6), получим

$$1 + \frac{\gamma_\epsilon}{1 - \frac{1}{\epsilon_0}} = (1 + \gamma_\rho)^n \approx 1 + n\gamma_\rho,$$

откуда выбираем значение

$$n = \frac{\gamma_\epsilon}{\gamma_\rho \left(1 - \frac{1}{\epsilon_0}\right)}. \quad (7)$$

Методическая температурная погрешность в этом случае определяется только отброшенными высшими членами разложения в биномиальный ряд правой части выражения (6). Отброшенные члены разложения в биномиальный ряд обозначим через  $R$ , тогда можно записать

$$(1 + \gamma_p)^n = 1 + n\gamma_p + R. \quad (8)$$

Для топлива в обычно встречающемся диапазоне температур  $\pm 60^\circ\text{C}$  максимальное значение  $\gamma_p$  может достигать 7,0%; при этом значение показателя  $n$  доходит до 1,5. Очевидно, что максимальное значение величины  $R$  соответствует максимальному значению  $\gamma_p$ . Из выражения (8) для  $\gamma_p = 0,07$  и  $n = 1,5$  находим  $R = 0,002$ , для  $\gamma_p = 0,07$  и  $n = 1,2$  —  $R = 0,001$ . Учитывая выражения (4), (7), (8), легко показать что величина  $R$  является методической температурной погрешностью для самокомпенсированного датчика. Как видим, эта погрешность в рассматриваемом диапазоне температур не превышает 0,2%.

Таким образом, путем профилировки датчика по степенному закону удастся получить электроемкостный датчик, приращение емкости которого определяется массой жидкого диэлектрика и практически не зависит от температуры в рассматриваемом диапазоне.

При проектировании электроемкостных датчиков задается функция  $V_h$ . Для самокомпенсированного датчика эту функцию необходимо возвести в степень  $n$  и оперировать новой функцией  $(V_h)^n$  как исходной при расчете профилировки датчика.

Приращение емкости профилированного таким образом датчика, согласно выражению (4), пропорционально  $Q^n$ . Однако этот недостаток легко устранить. Как правило, электроемкостный датчик включается в мостовую измерительную схему с автоматической обработкой. Применение в обработке потенциометра, профилированного по степенному закону с показателем степени  $n$ , в этом случае позволяет получить измерительную схему с линейным выходом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Г. Яковлев. Приборы контроля работы силовых установок. М., «Машиностроение», 1969.
2. О. И. Золотов, А. М. Мехлис, Р. М. Минкович, А. А. Ширинян. Устройство для измерения массы жидкого диэлектрика. Авт. свидетельство № 318828.— ИПОТЗ, 1971, № 32.

*Поступило в редакцию 16 февраля 1971 г.,  
окончательный вариант — 20 декабря 1971 г.,*