

Рис. 2. Изменение относительной отстройки  $\delta$  частоты генератора ГК89-ТС от времени при задании нулевых (1) и ненулевых (2) начальных условий

$$\hat{x}_{en}(k+1) = \mathbf{AE}\hat{x}_{en}(k) + \mathbf{HE}(y(k) - \mathbf{C}\hat{x}_{en}(k)),$$

где  $\hat{x}_{en}(k)$  — вектор переменных состояния;  $\mathbf{AE}$  — матрица расширенного ОУ;  $\mathbf{HE}$  — матрица наблюдателя для внешних возмущений;  $\mathbf{C}$  — матрица выхода ОУ.

Функциональная схема разомкнутой системы с наблюдателем Льюинбергера приведена на рис. 1.

Начальные значения переменных состояния наблюдателя  $\hat{x}_{en}(0)$  могут быть заданы нулевыми. По окончании переходного процесса переменные состояния наблюдателя совпадают с переменными состояния расширенного ОУ. Начиная с этого момента, осуществляется переход к замкнутой

САУ по состоянию с наблюдателем внешних возмущений, причем начальные состояния наблюдателя и возмущения выбирают равными  $\hat{x}_{en}(k_0)$ , где  $k_0$  — такт, при котором произошел переход, а составляющие вектора состояния ОУ приравнивают нулю, так как возмущение рассматривают как внешнее. На рис. 2 приведены графики изменения выходного сигнала относительной отстройки  $\delta$  частоты замкнутой системы стабилизации. При задании нулевых начальных условий (кривая 1) наблюдается значительное перерегулирование и колебания выходной переменной. При использовании предложенного метода (кривая 2) качество регулирования значительно улучшается.

Предложенный метод обладает рядом преимуществ по сравнению со статистическими методами оценивания. Во-первых, не требуется дополнительных априорных данных об ОУ и возмущениях. Во-вторых, его использование эффективно при нестационарности статистических и динамических параметров возмущения, которая существует при разогреве кварцевого генератора. В-третьих, реализация данного метода не требует больших вычислительных затрат.

#### Литература

1. Никитин А. В. // Вестник Межрегионального Верхневолжского отделения Академии технологических наук РФ; сер. Высокие технологии в радиоэлектронике, информатике и связи. — 2006. — С. 13.
2. Никитин А. В. // Там же. — С. 21.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления / Пер. с англ. — М.: Мир, 1984.

Дата одобрения 04.12.2006 г.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.532.63

### Эталонные приборы на основе промышленных сенсоров давления

А. В. КРЮКОВ, В. М. ОКЛАДНИКОВ

Научно-производственное предприятие «Элемер», e-mail: elemer@elemer.ru

Создан высокоточный преобразователь давления с приведенной погрешностью 0,03 %. Рассмотрена возможность изготовления эталонного прибора с относительной погрешностью 0,02 %.

**Ключевые слова:** измерительный модуль давления, калибратор давления.

High precision pressure transmitter with error of 0,03 % is described. The possibility of creation of transmitter with relative error of 0,02 % is discussed.

**Key words:** measuring pressure module, pressure calibrator.

Широкое распространение при поверке преобразователей давления получили портативные калибраторы. Уступая по точности классическим грузопоршневым манометрам и

стационарным цифровым приборам, они значительно превосходят их в компактности, мобильности и удобстве в обращении. Кроме того, портативные калибраторы позволяют

проводить поверку (калибровку) рабочих средств измерений (СИ) на месте их эксплуатации.

Составными частями калибратора являются ручной насос (помпа) для создания давления, измерительный модуль давления и электронный блок, принимающий цифровой сигнал от этого модуля, измеряющий выходной сигнал поверяемого преобразователя и вычисляющий погрешность последнего.

Важнейшей частью калибратора является измерительный модуль эталонного назначения. Для большинства модулей погрешность определяется в процентах от диапазона измерений (приведенная погрешность) и для лучших приборов  $\gamma = 0,025 \dots 0,04 \%$  (здесь и далее диапазоном измерений  $p$  называется *максимальный* диапазон измерений модуля, а поддиапазоном  $p_k$  — часть этого диапазона, определяемая в соответствии со стандартным рядом пределов согласно [1]). При работе в более узком поддиапазоне приведенная погрешность увеличивается пропорционально уменьшению поддиапазона

$$\gamma_k = \gamma p / p_k. \quad (1)$$

Например, модуль с диапазоном 0—1 МПа и приведенной погрешностью 0,025 % в поддиапазоне 0—0,6 МПа имеет приведенную погрешность 0,042 %, в поддиапазоне 0—0,4 МПа — 0,063 % и т. д. В большинстве случаев такой точности вполне достаточно. Однако в настоящее время появляется все больше преобразователей классов 0,1 и 0,075. Здесь требование метрологического запаса от 1:2 до 1:3 позволяет проводить поверку с использованием упомянутого выше модуля лишь в двух поддиапазонах для поверяемых приборов класса 0,1 и только в одном — для приборов класса 0,075. В этом случае поверитель должен иметь большой набор модулей достаточно высокой стоимости.

Следует также принимать во внимание, что измерительный модуль можно применять как самостоятельный прибор для прецизионных измерений в автоматизированных системах создания и измерения давления. Такие устройства являются лабораторными и ориентируются на возможно больший охват поверяемых приборов как по диапазону, так и по точности. Не исключена возможность использования модулей и при проведении научных исследований.

Таким образом, можно констатировать, что создание измерительного модуля, точность которого позволяла бы осуществлять поверку преобразователей классов 0,075 и 0,1 в трех-четыре поддиапазонах, значительно упростит задачу поверки современных высокоточных СИ.

В НПП «Элемер» разработан и создан эталонный преобразователь давления ПДЭ-010, имеющий в трех поддиапазонах допускаемую приведенную погрешность 0,03 %. Одна из главных задач при разработке данного устройства состояла в правильном выборе первичных преобразователей (сенсоров). В ПДЭ-010 избыточного давления 0,6—60 МПа были применены поликремниевые тензопреобразователи российского производства с высокими метрологическими характеристиками. В частности, вариации у этих сенсоров составили 0,005—0,01 %. Для верхних пределов измерений менее 600 кПа, а также для измерения абсолютного давления были использованы сенсоры зарубежных фирм. Для улучшения их параметров применяли метод отбора и тренировки, включающий процедуру состаривания сенсоров.

Разработанный модуль имеет габаритные размеры  $\varnothing 33 \times 100$ , а присоединительные — М20  $\times$  1,5.

Т а б л и ц а 1  
Погрешности ПДЭ-010

$k$	$p_k, \%$	$\gamma_k, \%$	$\delta_k, \%$	$\gamma_{\text{п}}, \%$
1	100	0,03	0,015	0,075
2	60	0,03	0,011	0,075
3	40	0,03	0,018	0,075
4	25	0,05	0,019	0,15
5	16	0,075	0,03	0,2
6	10	0,10	0,05	0,25
7	6	0,15	0,075	0,4
8	4	0,20	0,12	0,5

После изготовления и градуировки каждой партии ПДЭ-010 проводили измерения их метрологических характеристик, главная из которых — приведенная основная погрешность  $\delta$ , выражаемая в процентах от диапазона измерений. На рисунке изображен график зависимости  $\delta$  от выходного сигнала  $p$  этого преобразователя, также вы-

раженного в процентах от диапазона, из которого следует, что погрешность не является постоянной величиной, а уменьшается (по модулю) с падением измеряемого давления. Такое поведение  $\delta$  является универсальным для всех моделей ПДЭ-010 с разными диапазонами, и  $\delta$  отличается лишь по знаку и величине.

Потребителю важно знать допускаемую приведенную основную погрешность  $\gamma$  измерительного модуля именно для диапазона поверяемого преобразователя. В табл. 1 даны основные характеристики ПДЭ-010: поддиапазоны  $p_k$  в процентах от его диапазона измерений (являющегося максимальным из поддиапазонов), допускаемая приведенная погрешность  $\gamma_k$  в каждом из поддиапазонов и минимально возможная погрешность  $\gamma_{\text{п}}$  поверяемых преобразователей (с учетом того, что погрешность эталонного средства должна быть в 2—3 раза меньше погрешности поверяемого). Здесь же для сравнения указаны максимальные для каждого из поддиапазонов  $k$  значения *измеренной* приведенной погрешности  $\delta_k$  прибора, характеристика которого изображена на рисунке. В табл. 2 приведен перечень моделей ПДЭ-010.

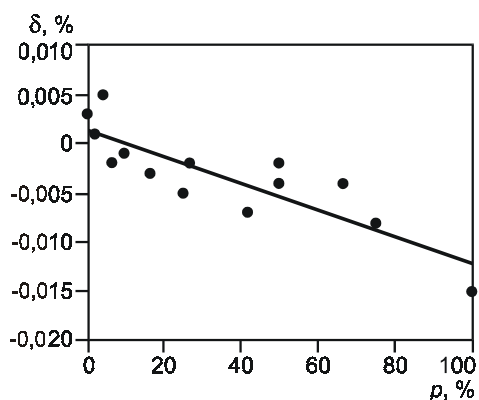
Т а б л и ц а 2

Модели ПДЭ-010

Модель	Вид давления	Диапазон измерений, кПа	Минимальный поддиапазон, кПа
030	Абсолютное	0—120	0—16
050	То же	0—600	0—60
060	»	0—2,5 · 10 <sup>3</sup>	0—250
130	Избыточное	0—100	0—10
150	То же	0—600	0—25
160	»	0—2,5 · 10 <sup>3</sup>	0—100
170	»	0—6 · 10 <sup>3</sup>	0—250
180	»	0—16 · 10 <sup>3</sup>	0—600
190	»	0—60 · 10 <sup>3</sup>	0—2,5 · 10 <sup>3</sup>
350	Давление—разрежение	−100 — +600	−20 — +20

В настоящее время ПДЭ-010 внесен в Госреестр средств измерений и начато его серийное производство.

Разработанный эталонный преобразователь ПДЭ-010 позволяет проводить поверку преобразователей класса 0,075 в трех, а класса 0,5 в восьми поддиапазонах, что создает потребителю большое удобство и заметную экономию средств. Работа в меньших поддиапазонах представляется неоправданной вследствие сильного нарастания погрешности.



Зависимость измеренной погрешности от давления

Из табл. 1 следует, что реальные погрешности в 1,5—2 раза меньше допускаемых, что свидетельствует о достаточном запасе по точности и дает основания надеяться на дальнейшее ее повышение.

Основные составляющие погрешности следующие:

дискретность выходного сигнала, которая при времени измерения 2с составляет порядка 0,003 % диапазона измерений. В третьем поддиапазоне это значение вырастает до 0,008 %, а в восьмом — до 0,08 %. Эта величина связана с разрядностью применяемого АЦП и при необходимости может быть уменьшена в несколько раз;

погрешность используемых при градуировке ПДЭ-010 эталонных средств — грузопоршневых манометров класса 0,01. Результаты измерений показывают, что в каждой группе из восьми одновременно поверяемых ПДЭ-010 наблюдаются одинаковые зависимости приведенной погрешности от давления (см. рисунок), что свидетельствует в пользу решающего влияния на погрешность именно грузопоршневого манометра.

Здесь возможны два выхода: применение рабочих эталонов давления класса 0,005 и правильная их эксплуатация, в частности, тщательное соблюдение климатических условий в помещении;

нестабильность применяемых сенсоров, о максимальном значении которой можно судить по определенному для ПДЭ-010 межповерочному интервалу, составляющему 2 года. Однако истинную нестабильность сенсоров можно получить, лишь сведя к минимуму влияние первых двух факторов.

В заключение отметим следующее. Как известно [2], одно из главных достоинств грузопоршневых манометров состоит в том, что их погрешность является *относительной*, т. е. при снижении измеряемого давления абсолютная погрешность пропорционально уменьшается. Это, в частности, означает, что при градуировке преобразователей с диапазонами измерений до 10 % диапазона грузопоршневого манометра его *приведенная* погрешность остается неизменной, а не возрастает, как в случае измерительных модулей (см. (1)). Линейная зависимость измеренной погрешности ПДЭ-010 (см. рисунок) показывает, что его погрешность также является *относительной*. Если принять во внимание сказанное выше, то становится очевидным, что принципиально возможно создание эталонного электронного прибора с *относительной* погрешностью 0,02—0,03 %.

#### Литература

1. ГОСТ 22520—85. Датчики давления, разрежения и разности давления с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. Общие технические условия.
2. Хансуваров К. И., Цейтлин В. Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. — М.: Изд-во стандартов, 1989.

Дата одобрения 19.03.2007 г.

621.372:531.733

## Использование гибридных колебаний для измерения количества жидкости в баках с подвижными вытеснителями

В. Я. ФАТЕЕВ\*, Б. В. ЛУНКИН\*\*, А. П. ДАЦКО\*\*

\* Ракетно-космический комплекс «Энергия»

\*\* Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, e-mail: lunbv@ipu.rssi.ru

Рассмотрена возможность использования резонансных свойств металлических полостей для измерения их объема и количества содержащихся в них жидкостей. Получены основные расчетные соотношения для системы связанных объемных резонаторов. Предложены алгоритм и функциональная схема обработки резонансных частот при измерении количества жидкости в длинных баках. Представлены результаты экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** объем, гибридные колебания, резонатор, сильфонный вытеснитель.

Possible application of metal cavities' resonant properties for measurement of these cavities' volumes and quantity of liquids contained in them, are considered. Basic relationships describing the system of coupled cavity resonators are received. Algorithm and functional scheme for processing of resonance frequencies under measurement of liquid quantity in elongated tanks are suggested. Results of experimental studies are presented.

**Key words:** volume, hybrid oscillations, resonator, bellow's ejector.

Баки с различными вытеснителями широко используются для транспортировки и хранения жидкостей, например, компонентов топлива в условиях пониженной гравитации.

Эти баки представляют собой металлические сосуды шарообразной или цилиндрической формы, в которых в качестве вытеснителей применяются либо эластичная мембрана