

## МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ ШИРОПОЛОСНАЯ САМОДИАГНОСТИРУЮЩАЯСЯ СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ

Колешко В.М., Сунка В.Я.

*Белорусский национальный технический университет, Минск*

*Wide – range ultrasonic system for measurement of the level of liquids is described. Resonant frequency range of transducer was optimized with respect acoustic properties of media under location*

Требования к сенсорным системам возрастают с каждым годом, причем к хорошо известным требованиям повышения точности, уменьшению габаритов, ужесточению эксплуатационных режимов работы добавляются специфические требования при работе интеллектуальных сенсоров в составе единой централизованной микропроцессорной системы автоматического управления и контроля (МСАУК). Интеллектуальные сенсоры конструируют таким образом, чтобы МСАУК могла легко обращаться с ними через соответствующие цифровые интерфейсы, которые введены на выходе информационных каналов каждого сенсора. В настоящее время для межпунктовой связи сенсоров с МСАУК должны использоваться как традиционные каналы связи типа RS-232 и токовая петля, так и новые каналы связи по стандартам IEEE-488, Fiedbus, IEEE-1451. Исходя из этих стандартов наблюдается современная эволюция виртуальных измерительных сред. В каждом конкретном случае использования нового канала связи необходимо создавать соответствующую инфраструктуру доступа. При использовании новых сенсорных систем связи существенно возрастают требования к точности и надежности сенсоров, его восприимчивости к неправильной эксплуатации, надежности и безопасности канала связи, сохранности в кодировании измерительной информации. Особенно большие требования по информативности предъявляются к уровнемерам-сенсорам, т. к. за этим кроются большие количества неучтенной товарной продукции, которая составляет основу воровства и коррупции.

Для улучшения совокупности метрологических параметров широко используемых ультразвуковых (УЗ) уровнемеров жидких сред, основанных на УЗ локации воздушного пространства над контролируемой средой в резервуаре, необходимо дальнейшее углубленное решения следующих технических проблем: уменьшение величины неизмеряемого уровня при полностью заполненном резервуаре («мертвая зона»), оптимальный выбор резонансной частоты пьезокерамического преобразователя (ПП) в зависимости от акустических параметров среды локации и конструктивных особенностей ПП, уменьшение резонансной нестабильности параметров ПП, разработка методов и устройств компенсации изменения скорости распространения УЗ волн в среде локации, микроконтроллерная обработка результатов измерения и самодиагностика уровнемера, формирование выходной информации для передачи по существующим каналам связи.

Решение указанных проблем будем рассматривать на базе нами разработанного УЗ уровнемера типа ДУ-02 (рис. 1) [1].

Уровнемер состоит из следующих основных частей: устройство излучения и приема УЗ импульсов 1, цифровой блок управления, формирующий импульсы управления различной частоты и временной длительности 2, формирователь и

усилитель напряжения возбуждения ПП в режиме излучения 3, усилитель приема и формирования отраженных сигналов 4, блок времяимпульсного измерения времени распространения УЗ колебаний по базе локации 5, устройство самодиагностики 6, схема термокомпенсации 7 и выходной микроконтроллерный интерфейс формирования и передачи аналоговой и цифровой измерительной информации 8. Уровнемер располагают в незаполненной верхней части резервуара, и его ПП работает поочередно в режиме излучателя и приемника УЗ лучей. В основе работы УЗ уровнемеров положено измерение времени  $\tau$  распространения УЗ (а) в среде локации (воздухе) [2]

$$\tau = 2b/c. \quad (1)$$

где  $b$  и  $c$  – расстояние от ПП до границы раздела воздух-жидкость и скорость распространения УЗ в воздухе.

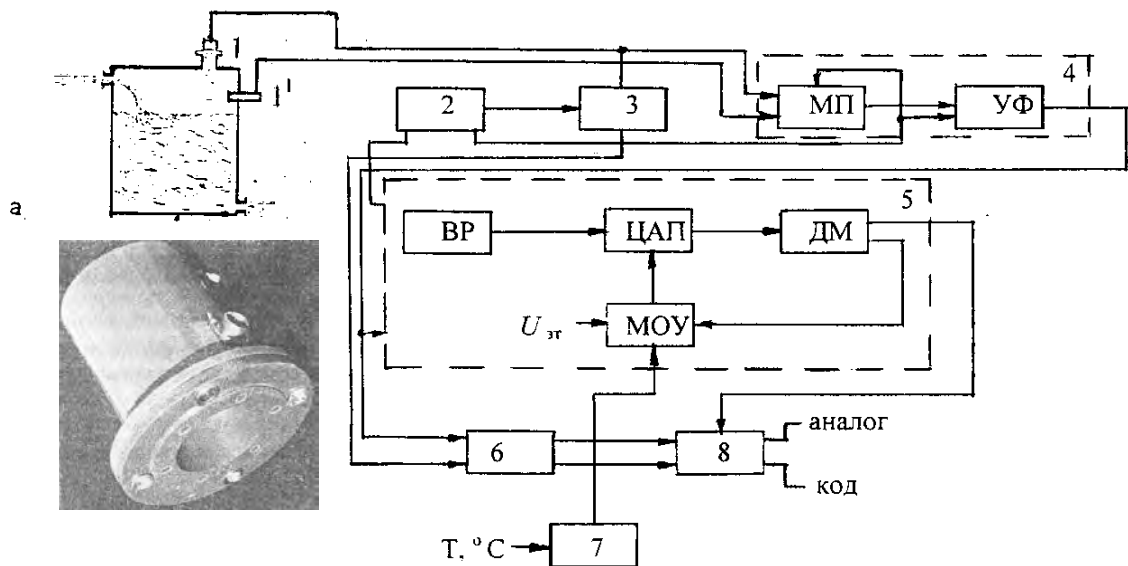


Рис. 1. Внешний вид (а) и структурная схема уровнемера

**Уменьшение величины неизмеряемого уровня («мертвой зоны»).** Физическая суть УЗ метода локации через воздух изображена на рис. 2, для которого один из важнейших факторов - отношение величины принятого эхо-сигнала  $U_i$  к уровню помех (уровню шумов)  $U_n$ , которое определяет величину расстояния, где не может быть принят сигнал ввиду большой длительности послезвучания высокочастотного ПП. На рис. 2 величина  $0 - t_1$  – длительность импульса зондирования. Величина времени послезвучания излучателя  $t = t_2 - t_1$ , когда он одновременно является и приемником, будет тем продолжительнее, чем выше его добротность  $Q_m$ . Диапазон измерений по времени (и соответственно по уровню) определяется значениями величин  $\Delta t = t_3 - t_2$ . При этом, он может быть расширен от  $t_2$  влево при уменьшении времени послезвучания и от  $t_3$  вправо при увеличении уровня передаваемого сигнала  $U_o$  и снижении уровня по-мех  $U_n$ . Расчет времени послезвучания  $t = t_2 - t_1$  в функции резонансной частоты ПП  $f_o$ , добротности  $Q_m$  и напряжения  $U_o$ , подаваемого на ПП, ведется по выражению [2]:

$$t = t_2 - t_1 = (2 Q_m / 2\pi f)(\ln U_o - \ln U_i), \quad (2)$$

Принимаем, что величина эхо-сигнала  $U_i = 3$  мВ, а уровень шумов  $U_n = 0,5—1,5$  мВ. На рис. 3 приведены, рассчитанные по формуле (2), величины

послезвучания  $t = t_2 - t_1$ . При величине добротности излучателя  $Q_m = 100$  для частоты  $f_0 = 20$  кГц время послезвучания равно  $t = 12$  мс. В этом случае “мертвая зона” составляет величину 500 см, что, например, при базе измерения  $b = 1,5$  м, совершенно неприемлемо. Увеличение частоты  $f_0$  излучения уменьшает величину времени послезвучания, однако как будет показано ниже при этом растет поглощение УЗ луча.

Наиболее приемлимым вариантом существенного уменьшения времени послезвучания является уменьшение величины добротности  $Q_m$  излучателя-приемника. Расширение полосы пропускания можно получить механически путем введением  $\lambda/2$ -волновых и  $\lambda/4$ -волновых накладок на ПП [3], однако получить хорошую равномерность амплитуды механических колебаний в полосе пропускания конструктивным подбором материалов накладки и пьезоэлемента весьма сложно. Удобнее использовать электрическое расширение полосы путем

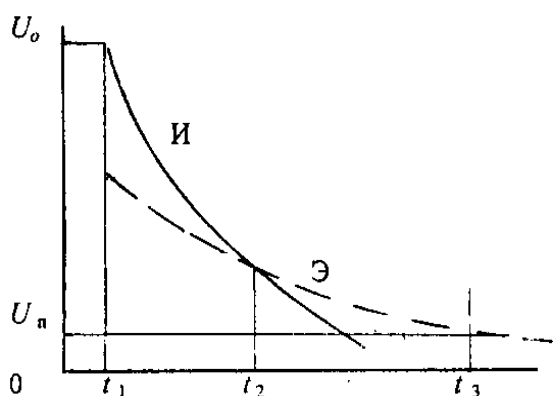


Рис. 2. Временные характеристики уровней излучающего (И) и приемного эхо-сигнала (Э)

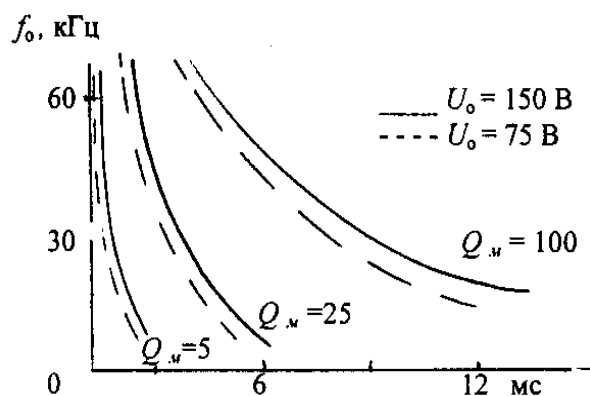


Рис. 3. Зависимость времени послезвучания узкополосных и широкополосных ПП

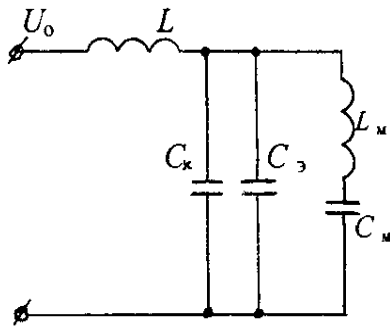
образования системы электромеханически связанных контуров (ЭМСК) [4], которые получают подключением индуктивности  $L$  и емкости  $C_x$  к ПП, запитанному от генератора напряжения (рис. 4,а). Величину индуктивности  $L$ , выбирают из условия равенства резонансных частот механического  $f_m$  и электрического  $f_э$  контуров системы ЭМСК, определяемых по выражениям [4,5]:

$$L = [f_m^2 (C_э + C_x)]^{-1}, \quad f_э = [L (C_x + C_э)]^{-0,5} \quad \text{и} \quad f_m = (L_m C_m)^{-0,5} \quad (3)$$

Механическая добротность излучателя в системе ЭМСК [4] запишется в виде

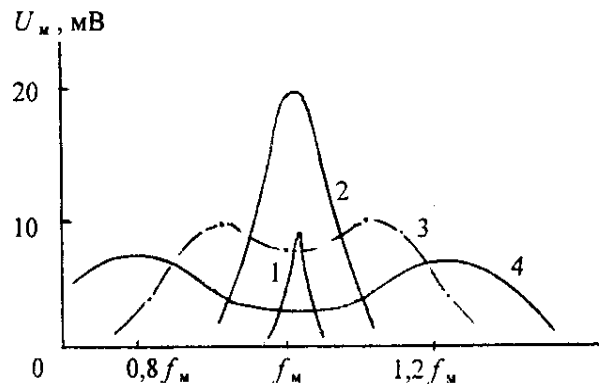
$$Q_m = f_m / \Delta f = \{ [1 + K_э / (1 + K_э^2)]^{-0,5} \}^{0,5} - [1 - K_э / (1 + K_э^2)]^{-0,5} \}^{0,5} - 1, \quad (4)$$

где  $K_э = [C_m / (C_m + C_э + C_x)]^{0,5}$  - коэффициент электромеханической связи системы (рис.4 ,а).



Эквивалентная схема ЭМСК, где:  
 $L$  - индуктивность излучателя;  
 $C_з$  - электрическая емкость пьезопластины,  
 $C_x$  - дополнительная емкость;  
 $L_m, C_m$  - индуктивность и емкость механического контура излучателя

а)



АЧХ зависимости механических колебаний,  
 1,2,3,4 -  $L=0, C_x=0; L=0.135$  мкГн,  
 $C_x=0.042$  мкФ;  $L=2$  мГн,  $C_x=0.0011$  мкФ;  $L=$   
 $3.5$  мГн,  $C_x=100$  пФ;

Рис. 4

б)

На рис. 4,б приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) механических колебаний широкополосных ПП. На частотах связи  $f_i$  коэффициент передачи имеет максимальные значения при двугорбой АЧХ. При учете механических  $\chi_1=0,001-0,1$  и электрических  $\chi_2=0,02-0,1$  потерь величина максимумов на частотах связи  $f_i$  уменьшается, при этом условием возникновения двугорбой АЧХ является соотношение

$$K_э > [0,5 (\chi_1^2 + \chi_2^2)]^{0,5} \quad (5).$$

Изменяя величины – коэффициента связи  $K_э$ , механических  $\chi_1$  и электрических  $\chi_2$  потерь можно регулировать равномерность АЧХ в полосе ее пропускания и величину коэффициента передачи. Максимум полосы будет при минимальной величине параллельно подключаемой емкости  $C_x$ . Изменяют величину коэффициента  $K_э$  путем дополнительного подключения емкости  $C_x$  параллельно ПП. При этом, для сохранения условия  $f_m = f_э$  необходимо корректировать и величину индуктивности  $L$  по выражению (3). Из анализа использования широкополосных ПП (рис. 3) уменьшение времени послезвучания до  $t = 0,2 - 0,5$  мс обеспечивает величину неизмеряемого уровня до 40-60 мм.

**Уменьшение резонансной нестабильности.** Использование методов и устройств расширения полосы пропускания ПП практически полностью решает и задачу повышения резонансной стабильности параметров ПП [6].

**Оптимальный выбор частотного диапазона.** Для возбуждения УЗ волны в уровнемерах используют  $\lambda/2$ -волновую круглую пластинку из пьезокерамики или же многослойные (чаще двухслойные)  $\lambda/2$ -волновые преобразователи изгибных колебаний, резонансная частота которых рассчитывается по формуле

$$f_0 = (0,164 / d_n) \{E / [3\rho (1-\nu^2)]\}^{0,5}, \quad (6)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – модуль Пуассона,  $d_n$  – диаметр пьезоизлучателя. Как правило, металлические (нержавеющая сталь или дюралюминий) накладки служат для снижения частоты, понижения величины электрического возбуждающего напряжения

$U_o$ , подаваемого на пьезопластину и защиты пьезопластины от влияния агрессивной контролируемой среды.

Важнейшие параметры уравнивателей - коэффициент передачи  $K_U = U_o / U_t$  и динамический диапазон чувствительности  $D_n = U_o / U_n$ . Учитывая все факторы ослабления сигнала запишем выражение для  $D_n$  в следующем виде

$$D_n = U_o / U_n = (U_t / U_n) K_U = (U_t / U_n) K_a K_o K_{cp}, \quad (7)$$

где коэффициенты ослабления сигнала, обусловленные соответственно: акустическими характеристиками тракта излучатель-приемник -  $K_a$ , отражательными свойствами границы раздела воздух-жидкость -  $K_o$  и затухания УЗ волны в среде локации -  $K_{cp}$ . Рассмотрим эти коэффициенты подробно.

Обычно величина напряжения, подаваемого на УЗ излучатель, составляет величину  $U_o = 150-300$  В, а величина помехи(шума) равна  $U_n = 0,5-1,5$  мВ. Таким образом, суммарное ослабление УЗ сигнала во всем электроакустическом тракте не должно превышать величину  $D_n < (0,1-0,6) 10^6$ .

В хорошо сконструированных и взаимно согласованных по величине электрических сопротивлений тракта генератор-излучатель-среда локации-приемник величина  $K_a = 0,75-0,85$  при обязательном условии, что  $k r_o > 50$ , где  $k = 2 \pi f / c$  - волновое число,  $r_o$  - радиус излучающей пьезопластины.

Для ровной поверхности уровня жидкости происходит полное отражение и коэффициент  $K_o = 0,98-1,0$ . Коэффициент  $K_o$  заметно уменьшается при волнениях поверхности жидкости в связи с кипением, наличием пены на поверхности, разбрызгиванием, вибрациями и т. д.

Наиболее существенным является коэффициент ослабления  $K_{cp}$ , представляющий собой произведение коэффициентов ослабления из-за геометрического расхождения УЗ пучка  $n_i$  и коэффициента ослабления  $n_\alpha$  из-за поглощения УЗ волны в воздухе. Величину ослабления из-за расхождения определяют по выражению:

$$n_i = [(b - l_\phi) \tan \Theta_{эф} + r_o]^2 / r_o^2, \quad (8)$$

где  $l_\phi = r_o^2 / \lambda$  - протяженность зоны Френеля, в которой нет расхождения луча;  $\lambda = c / f_o$  - длина УЗ волны;  $\Theta_{эф} = \arcsin(0,7 / (k r_o))$  - угол расхождения луча в основном лепестке диаграммы направленности.

Из анализа выражения (8) очевидно, что ослабление сигнала с увеличением базы  $b$  растет по закону близкому к квадратичному, при этом, чем ниже частота  $f_o$  УЗ волны, тем выше ослабление сигнала.

В воздухе при распространении УЗ волны происходит и потеря энергии из-за теплопроводности и сдвиговой вязкости газов. Вклад объемной вязкости и релаксационных процессов значителен только для многоатомных газов, тогда как в одноатомных газах релаксационные процессы отсутствуют. Для плоской волны амплитуда колебаний с удалением от ПП уравнивателя изменяется по закону  $A_x = A_o e^{-2 \alpha b}$ , где  $A_o$  - амплитуда колебаний на излучателе,  $\alpha$  - амплитудный коэффициент затухания. Величина  $\alpha / f^2 = \text{const}$  для всех частот и носит название коэффициента поглощения. Для воздуха  $\alpha / f^2 = 4 \cdot 10^{-13} \text{ с}^2/\text{см}$ , а величину ослабления в среде локации в зависимости от частоты  $f_o$  и величины базы - диапазона измерения уровня жидкости (воздуха) определяют по выражению

$$n_\alpha = e^{-2 \alpha b} \quad (9)$$

Суммарное ослабление УЗ сигнала  $\Sigma_{\text{осл.}} = n_{\alpha} n_i$  в воздухе (газе) в зависимости от частоты при различных величинах уровня локации (базы), рассчитанное по выражениям (8) и (9) приведено на рис. 5.

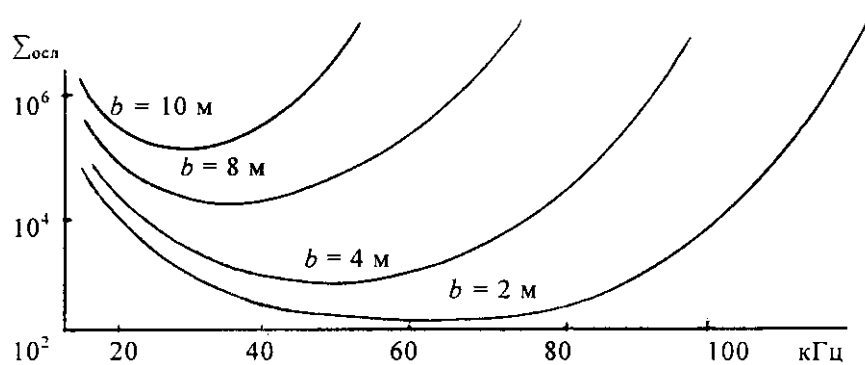


Рис. 5. Частотные зависимости суммарного ослабления  $\Sigma_{\text{осл}}$  УЗ сигнала

При низких частотах преобладает ослабление сигнала из-за геометрического расхождения УЗ луча, а при высоких частотах повышение ослабления обусловлено поглощением УЗ волны. Между этими двумя областями частот находится оптимальная зона рабочих частот с минимальным ослаблением УЗ волны. Для диапазона измерения уровня  $b = 5 \div 10$  м и конструктивно приемлемых диаметров излучателей  $2r_0 = 20 \div 40$  мм оптимальная частота колебаний находится в пределах  $f_0 = 15 \div 70$  кГц.

#### Компенсации изменения скорости распространения УЗ волн в среде локации.

Основным фактором, определяющим точность УЗ уровнемеров, - зависимость скорости распространения УЗ от температуры, давления, состава и влажности среды локации (воздуха). Температурный градиент жидкостей колеблется в пределах 2—6 м/с на  $1^\circ\text{C}$ , а для газовых сред эти величины меньше, например, для воздуха  $\Delta c/\Delta t = 0,59$  (м/с)/град. Учет изменения скорости распространения ультразвука в УЗ уровнемерах является актуальнейшей технической проблемой повышения точности измерения.

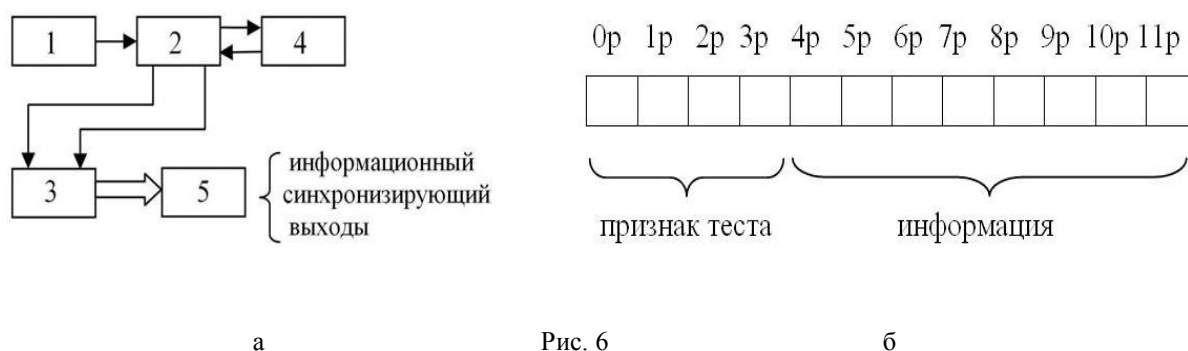
В состав разработанного уровнемера (рис. 1) введен термокомпенсатор типа ТСМ 100 ( $R_0 = 100$  Ом) для компенсации температурной погрешности от изменения скорости звука в воздухе при  $dc/c = 0,171\% / \text{град}$  и схема термокомпенсации 8. С выхода регистра (ВР) блока времяимпульсного измерения времени  $\tau$  5 (рис. 1) двоичное число, обратно пропорциональное скорости звука, поступает на вход перемножающего цифроаналогового преобразователя (ЦАП), на второй вход которого поступает аналоговое напряжение с блока температурной компенсации 7. На выходе ЦАП формируется сигнал постоянного напряжения с учетом изменения скорости распространения УЗ. Затем это постоянное напряжение масштабируется и преобразуется в постоянное напряжения  $U_{\text{вых}} = 0 \div 5$  В, пропорциональное величине измеряемого уровня жидкости. Опыт практического применения УЗ уровнемеров показывает, что температурной компенсации изменения скорости звука в среде локации недостаточно.

Разработан модернизированный вариант уровнемера ДУ-02М, в котором происходит автоматическая коррекция изменения реальной скорости распространения звука в воздухе. Для этого вводится дополнительный УЗ приемник  $1^1$  (рис. 1), расположенный на фиксированном расстоянии ( $b_1 = 650$  мм) от основного ПП,

работающего в режиме излучение-прием. К базовому электронному измерительному блоку дополнительно вводится ряд необходимых устройств.

Алгоритм функционирования модернизированного уровнемера следующий. Поочередно по выбранным временным тактам блока управления 2 через входной мультиплексор МП блока 4 к времяимпульсному измерительному блоку 5 уровнемера подключается основной или вспомогательный УЗ приемники. Выходное постоянное напряжение уровнемера по выбранным временным тактам будет пропорционально либо величине измеряемого уровня контролируемой жидкости или же величине фиксированного расстояния между основным и вспомогательным УЗ приемниками. Это выходное напряжение через демультиплексор (ДМ) блока 5 подается на выходной микроконтроллерный интерфейс 8 (измеряемый уровень жидкости) или через масштабирующий операционный усилитель напряжения (МОУ) корректирующее напряжение, пропорциональное изменению скорости распространения звука в воздухе, подается на один из входов перемножающего ЦАП для управления величиной эталонного напряжения ( $U_{эт}$ ). Работа всех устройств и блоков уровнемера строго синхронизирована. Использование данного метода корректировки результатов измерения по реальной скорости распространения звука в среде локации позволяет уменьшить в несколько раз дополнительную погрешность уровнемера.

**Микроконтроллерная система обработки измерительной информации.** Для повышения метрологических параметров, цифровой обработки измерительной информации и формирования выходной аналоговой и цифровой информации для передачи по реальным каналам связи уровнемер снабжен микроконтроллерной системой (рис. 6,а). С ее помощью выполняется усреднение (по шести точкам) результатов измерения, рассчитывается объемный расход жидкости при известной геометрии резервуара, скорость истечения жидкости.



а

Рис. 6

б

Аналоговая информация подается на вход интерфейса, состоящего из модуля преобразования и модуля измерения и обработки. Входное напряжение преобразуется интегрирующим АЦП (преобразователь напряжение – частота) 1 в частоту  $f = (2,5-12,5)$  кГц. Модуль измерения и обработки включает микроконтроллер 2, буферный регистр 3, постоянное перепрограммируемое запоминающее устройство 4 и 4-х канальный согласователь (токовая петля) 5 выхода интерфейса со входом машины МСАУК. Выходная цифровая информация уровнемера для повышения надежности ее передачи при межпунктовой связи поступает по двум каналам - информационному и синхронизирующему. Цифровой информационный канал 12-и разрядный, при этом четыре старших разряда тестовые, а восемь младших информационные (рис. 6,б). При передаче по 4-х канальной цепи информационные и синхронизирующие сигналы во времени строго фиксированы, что повышает надежность их передачи по каналам связи.

**Устройство самодиагностики.** При правильном функционировании уровнемера с выходов его ключевых блоков через устройство самодиагностики 6 (рис. 1) на входы

интерфейса микроконтроллерной системы подаются два тестовых сигнала постоянного напряжения величиной 3-5 В. Первый тестовый сигнал информирует о работоспособности зондирующего генератора, а второй - о наличии принятого эхосигнала. Эти два тестовых сигнала через микроконтроллер вводятся в 1-й и 4-й разряды информационного слова, во втором и третьем разрядах которого формируются величины предельного значения диапазона измерения уровня (рис. 6,б). Анализ тестовых разрядов выполняется МСАУК. Измерительная информация с уровнемера может передаваться и по телеметрическим каналам измерения [7], при этом необходимо вводить кодирующие и согласующие устройства.

Конструктивно ДУ-02 и ДУ-02М выполнены в виде колпака (рис. 1,а), в нижней части которого расположен конический рупор для излучения и приема УЗ колебаний. Блок электроники состоит из шести микропроцессорных плат.

Основные параметры сенсоров уровня: диапазон измерения ДУ-02  $b=0-6$  м, основная приведенная погрешность  $\gamma_0 = 0,3$ , «мертвая зона» не более 80 мм, зона нечувствительности не более  $0,3\gamma_0$ , дополнительная температурная погрешность не превышает  $0,1 \gamma_0$ , па каждые  $10^\circ\text{C}$ , дополнительная погрешность от изменения напряжений питания на  $+10\%$  не более  $0,2 \gamma_0$ , питания сенсоров  $\pm 15$  В и 50 В; мощность потребления 1,5 Вт, габариты 200x200x240 мм и вес 2,5 кг.

### Литература

1. Колешко В.М, Сунка В.Я. Реанимация нефтегазовых сважин. Минск: БИТА, 1996. - 60 с.
2. Колешко В.М., Сунка В.Я. и др. Отчет по НИОКР «Разработка комплекса измерительных преобразователей для систем автоматики и управления мобильного комплекса глубоководно-никающего гидроразрыва пласта». Мн-М., 1990. Гос. рег. №25569842014, 312с.
3. Колешко В.М., Сунка В.Я. Авт. свид. СССР №612715, 620283, 622509, 633616, 638388, 639617, 647015, 766667.
4. Колешко В.М., Сунка В.Я. Авт. свид. СССР №763004, 725846, 721285, 793662.
5. Колешко В.М., Сунка В.Я. Исследование электронных схем расширения полосы частот ультразвуковых систем // Известия АН БССР, сер. ФМН – 1980. - №1. –С.89-95.
6. Степаненко А.В., Сунка В.Я., Колешко Л.В. Стабильность параметров широкополосных ультразвуковых колебательных систем // Известия АН БССР, сер. ФМН –1984. - №4. –С. 59-63.
7. Колешко В.М., Карякин В.Д. Цифровые телефонные и телеметрические системы. Минск: БИТА, 2002. –65 с.