

Изобретение относится к технике акустического контроля и может быть использовано для автоматического измерения скорости звука в жидких средах.

Известно устройство для измерения скорости звука в жидких средах, содержащее последовательно соединенные генератор гармонических колебаний, излучающий и приемный электроакустические преобразователи и фазометр (Северин Г.Н. Измерение скорости звука в океане. - Л.: Гидрометеиздат, 1979. - С.18).

Однако известное устройство для измерения скорости звука не позволяет исключить неоднозначность показаний вследствие того, что фазометр не различает фазовых сдвигов, отличающихся на целое число периодов, что приводит к погрешностям измерения скорости звука и отрицательно сказывается на точности устройства.

Наиболее близким к заявляемому устройству по технической сущности и достигаемому результату является устройство для измерения скорости звука, содержащее последовательно соединенные мультивибратор, пьезоэлектрический преобразователь и отражатель (А.с. СССР №1386853, кл. G01H5/00, 1988).

В устройстве-прототипе мультивибратор выполнен на биполярных транзисторах. Усиление сигнала, отраженного от отражателя, находящегося на фиксированном расстоянии от пьезоэлектрического преобразователя, производится транзистором, который переключается при некотором пороговом напряжении  $U_{пор} > 0$  на базомиттерном переходе и работает в активном режиме при подаче на его базу малого отраженного сигнала, а при подаче на его базу большого сигнала - в ключевом режиме. Следовательно, в мультивибраторе возникает неконтролируемая задержка сигнала, а именно

$$\tau(t) = \theta u(t)/U_{пор}, \quad (1)$$

где  $\tau(t)$  - задержка сигнала в мультивибраторе;  
 $\theta$  - постоянная времени мультивибратора;  
 $u(t)$  - мгновенное напряжение на входе мультивибратора;

$U_{пор}$  - пороговое напряжение переключения транзистора мультивибратора;  
 $t$  - текущее время.

В результате период следования импульсов на выходе мультивибратора зависит от величины задержки сигнала и определяется как

$$T(t) = [2l/C(t)] + \tau(t), \quad (2)$$

где  $T(t)$  - период следования импульсов на выходе мультивибратора;

$l$  - расстояние между пьезоэлектрическим преобразователем и отражателем;

$C(t)$  - скорость звука в исследуемой среде;

$\tau(t)$  - задержка сигнала в мультивибраторе.

Учитывая, что  $\tau(t) \ll T(t)$  из (2) можно получить уравнение для измерения скорости звука

$$C(t) = [2l/T(t)] + 2l \tau(t)/[T(t)]^2. \quad (3)$$

Второе слагаемое в (3), обозначив

$$\Delta C_\tau = 2l \tau(t)/[T(t)]^2, \quad (4)$$

является мультипликативной параметрической погрешностью измерений, наличие которой приводит к появлению дополнительной погрешности измерений, что отрицательно

сказывается на точности измерений скорости звука и ограничивает применение устройства-

прототипа.

В основу настоящего изобретения поставлена задача усовершенствования функциональной электрической схемы устройства для измерения скорости звука путем исключения влияния величины задержки сигнала мультивибратора на результат измерений, в частности на скорость звука, что обеспечивает повышение точности измерений.

Эта задача решается устройством для измерения скорости звука, содержащим последовательно соединенные мультивибратор, пьезоэлектрический преобразователь и находящийся на фиксированном расстоянии от него отражатель, в котором согласно изобретению, оно снабжено процессором параметрической идентификации, входами подключенного, соответственно, ко второму выходу мультивибратора и к его входу, при этом процессор параметрической идентификации выполнен из последовательно соединенных амплитудного селектора, вход которого является вторым входом процессора параметрической идентификации, компаратора и счетчика, информационные выходы которого соединены с информационными входами, последовательно соединенных, сумматора и микроЭВМ, причем вторые информационные входы сумматора соединены с информационными выходами линии задержки, к счетному входу которой подключен выход генератора счетных импульсов, а к ее первому входу, являющемуся первым входом процессора параметрической идентификации подключен счетный вход микроЭВМ, а ко второму входу - второй вход компаратора, соединенный также с выходом сумматора и управляющим входом микроЭВМ.

Совокупность всех существенных признаков предлагаемой конструкции, включая отличительные, в схемах предлагаемого устройства и процессора параметрической идентификации позволяют получить код, который не зависит от величины задержки сигнала в мультивибраторе, и на его основе измеряется скорость звука методом оценки параметрического состояния задержки сигнала в мультивибраторе, суть которого заключается в следующем.

Минимальный временный масштаб изменения скорости звука в жидких средах составляет величину  $T_c > 0,1$ сек, а максимальный период следования импульсов на выходе мультивибратора  $T(t)_{max} \ll T_c$ . Тогда число итераций, за которое может быть идентифицировано значение задержки сигнала в мультивибраторе составит величину

$$n = T_c/T(t)_{max} \gg 1, \quad \text{а следовательно, на интервале времени}$$

$$iT_0 < t < (i+1)T_0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где  $T_0$  - дискретность измерения задержки сигнала в мультивибраторе, всякое изменение периода  $\Delta T(t)$  следования импульсов на выходе мультивибратора можно рассматривать, как неконтролируемое изменение задержки  $\Delta \tau(t)$  сигнала в мультивибраторе. Учитывая, что для каждого  $i$  - го измерения;  $i = \overline{1, n} \quad \Delta \tau(t) \ll T(t)$ , где  $T(t)$  - мгновенное значение периода следования импульсов на выходе мультивибратора, можно считать параметр  $\tau(t)$  квазипостоянным на

интервале квазистационарности (6). Тогда процесс измерения параметра  $\tau(t)$  можно описать передаточной функцией звена чистого запаздывания

$$W(p) = Y(p)/X(p) = \exp(-p \tau), \quad (7)$$

где  $W(p)$  - передаточная функция измерения задержки сигнала в мультивибраторе;

$Y(p)$  - изображение сигнала на выходе мультивибратора;

$X(p)$  - изображение сигнала на входе мультивибратора;

$\tau$  - квазипостоянная задержка сигнала в мультивибраторе, как параметр, что характеризует величину  $\tau(t)$  на интервале квазистационарности (6);

$P$  - оператор Лапласа.

Снимая наложенные ограничения квазистационарности (6) параметр  $\tau$  становится функцией времени  $\tau(t)$ , а передаточная функция (7) будет параметрической:

$$W(p, t) = Y(p, t)/X(p) = \exp[-p \tau(t)], \quad (8)$$

где  $Y(p, t)$  - изображение сигнала на выходе мультивибратора, зависящего не только от периода следования импульсов на его выходе, но и от величины задержки сигнала в нем;

$X(p)$  - изображение сигнала на входе мультивибратора, не зависящее от параметра  $\tau(t)$ , т.е. это отраженный сигнал, который принимается за управляющее воздействие.

Следовательно, решение идентификационной задачи заключается в нахождении оценки  $\hat{\tau}(t)$  параметра  $\tau(t)$  на интервале квазистационарности (6). Рассматривая решение такой задачи, как многошаговый итерационный процесс в процессоре параметрической идентификации с дискретностью  $T_0$  оценки  $f(t)$  параметра  $\tau(t)$  последнее будем искать в классе стационарных дискретных систем. Оно заключается в том, что параметр  $\tau(t)$  оценивается в дискретные моменты времени  $T_0, 2T_0, \dots, (i-1)T_0, iT_0, (i+1)T_0, \dots, (n-1)T_0, nT_0$  таким образом, чтобы минимизировать функционал качества

$$I[\varepsilon(p, t)] = 1/T_c \int_0^{T_c} \varepsilon^2[p, \Delta \tau_m(t)] dt \rightarrow \min, \quad (9)$$

сводящий к  $\min$  ошибку рассогласования  $\varepsilon[p, \Delta \tau_m(t)]$  между выходным сигналом мультивибратора и его модели, зависящую от степени близости параметра модели  $\tau_m(t)$  и параметра  $\tau(t)$ , а именно

$$\varepsilon[p, \Delta \tau_m(t)] = Y(p, t) - Y_m(p, t), \quad (10)$$

где  $\Delta \tau_m(t)$  - изменение параметра модели мультивибратора;

$Y(p, t)$  - реакция мультивибратора на управляющее воздействие  $X(p)$ ;

$$Y_m(p, t) = W_m(p, t)X(p) \quad (11)$$

- реакция модели мультивибратора на управляющее воздействие  $X(p)$ .

С учетом (8) параметрическая передаточная функция модели мультивибратора  $W_m(p, t)$  будет определяться как

$$W_m(p, t) = Y_m(p, t)/X(p) = \exp[-p \tau_m(t)], \quad (12)$$

где  $\tau_m(t)$  - параметр модели мультивибратора.

С учетом (10) - (12) выражение (9) приобретает вид

$$I[p, \Delta \tau_m(t)] = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \{Y(p, t) - X(p) \exp[-p \tau_m(t)]\}^2 dt \rightarrow \min. \quad (13)$$

Минимизация функционала (13) осуществляется в процессоре параметрической идентификации, поэтому для нахождения его структуры и алгоритма функционирования необходимо взять частную производную от минимизируемого функционала по настраиваемому параметру на интервале квазистационарности (6). Тогда получим

$$\left[ \frac{\partial I[p, \Delta \tau_m(t)]}{\partial \tau_m(t)} \right]_{i+1} = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} [Y(p, t) - X(p) \exp[-p \tau_m(t)]] \times [p X(p) \exp[-p \tau_m(t)]] dt. \quad (14)$$

Осуществим переход от дискретно-непрерывной формы представления уравнения 14 к его разностной аппроксимации при условии квазипостоянства параметра  $\Delta \tau(t) = T_0$  на интервале квазистационарности (6), используя следующие преобразования

$$\left. \begin{aligned} Z &= \exp(p T_0); p = 1/T_0 \ln Z; \\ \ln Z &= 2 \frac{Z - 1}{Z + 1}; f(1/T_0 \ln Z) = f(Z); \\ Z^i f(Z) &= [f(t)]_i; \\ [f(t)]_{i+1} &= [f(t)]_i = [\delta(t)]_i; \\ [\delta(t)]_i &= \begin{cases} T_0; [t = iT_0]; \\ 0; [t \neq iT_0]; \end{cases} \\ \text{sign}[\varepsilon(t)]_i &= \begin{cases} 1; [f(t) < f(t - iT_0)]; \\ 0; [f(t) = f(t - iT_0)]; \\ 0; [f(t) < f(t - iT_0)]; \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Заменяя интегрирование в (14) формулой прямоугольной аппроксимации, с учетом (15) для  $(i - 1)$ -ой итерации, получим

$$\left[ \frac{\partial I[p, \Delta \tau_m(t)]}{\partial \tau_m(t)} \right]_{i-1} = \sum_{m=0}^{i-1} [\delta(t)]_m \text{sign}[\varepsilon(t)]_m. \quad (16)$$

Для  $i$ -ой итерации с учетом (16) можно записать

$$\left[ \frac{\partial I[p, \Delta \tau_m(t)]}{\partial \tau_m(t)} \right]_i = \sum_{m=0}^i [\delta(t)]_m \text{sign}[\varepsilon(t)]_m. \quad (17)$$

Путем вычитания выражений (16) и (17) получаем

$$[\Delta \tau_m(t)]_i = T_0 \text{sign}[\varepsilon(t)]_i. \quad (18)$$

Учитывая, что приращение  $\Delta \tau_m(t)$ , полученное на  $(i - 1)$  шаге, суммируется с начальным значением  $\tau_m(0)$  и при  $i$ -ой итерации получаем

оценку  $\hat{\tau}_m(t)$  параметра  $\tau_m(t)$ , тогда для любой  $m$  - ой итерации  $m = \overline{1, n}; i = \overline{0, (n-1)}$ , можно записать следующую систему рекуррентных выражений

$$\text{sign}[\varepsilon(t)]_m = \begin{cases} +1; [y(t) < x(t - \tau_m(t))]_m; \\ 0; [y(t) = x(t - \tau_m(t))]_m; \\ -1; [y(t) > x(t - \tau_m(t))]_m; \end{cases}$$

$$[\Delta \tau_m(t)]_{m+1} = T_0 \text{sign}[\varepsilon(t)]_m;$$

$$[\hat{\tau}_m(t)]_{m+1} = \tau_m(0) + \sum_{i=0}^{n-1} [\Delta \tau_m(t)]_{m+1}. \quad (19)$$

Полученная система разностных уравнений (19) описывает алгоритм функционирования и структуру контура самонастройки процессора параметрической идентификации по параметру  $\tau_m(t)$ . При  $m$  итерациях будет достигнут  $\min$  функционала качества, которому соответствует код,

$$N_{\hat{\tau}}(T) = F_0 \hat{\tau}_m(t), \quad (20)$$

где  $F_0 = 1/T_0$ ;  $T_0$  - дискретность оценки  $\hat{\tau}_m(t)$  параметра  $\tau_m(t)$ .

Принимая коэффициент деления частоты ( $K > 1$ ) повторения импульсов  $F(t) = C(t)/2l$ , где  $C(t)$  - скорость звука в исследуемой среде;  $l$  - расстояние между пьезоэлектрическим преобразователем и отражателем, в микроЭВМ, с частотой синхронизации  $f_0$ , осуществляется преобразование периода  $T(t) = 1/F(t)$  в код

$$N(t) = KT(t)f_0. \quad (21)$$

а затем идентифицируется измерение скорости звука  $C(t)$  путем нахождения оценки  $\hat{C}(t)$  по алгоритму

$$\hat{C}(t) = 2Kl f_0 [N(t) - N_{\hat{\tau}}(t)]^{-1}. \quad (22)$$

Получаемая при этом погрешность измерений определяется по формуле

$$\Delta \hat{C} = 2l T_0 [T(t)]^2. \quad (23)$$

Сравнивая (4) и (23) выигрыш по точности измерений составит величину

$$B \Delta C = \Delta C_{\tau} / \Delta \hat{C} = \tau(t) / T_0. \quad (24)$$

Учитывая, что  $\tau(t) \geq 1 \text{ мкс}$ , тогда при частоте  $F_0 = 1/T_0 = 2 \text{ МГц}$  величина выигрыша по точности измерений  $B \Delta C > 2$ , что свидетельствует о эффективности предлагаемого схематического решения.

На фиг.1 представлена функциональная схема предлагаемого устройства; на фиг.2 - вариант выполнения процессора параметрической идентификации.

Устройство для измерения скорости звука (фиг.1) содержит последовательно соединенные мультивибратор 1, пьезоэлектрический преобразователь 2, находящийся на фиксированном расстоянии от него отражатель 3 и процессор параметрической идентификации 4 входами подключенный, соответственно, ко второму выходу мультивибратора 1 и к его входу.

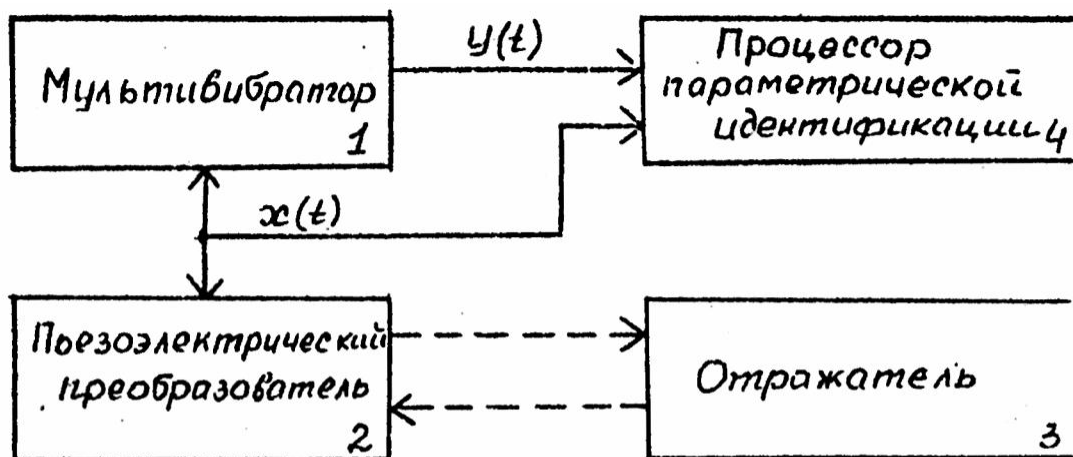
Процессор параметрической идентификации 4 состоит из амплитудного селектора 5, компаратора

6, счетчика 7, сумматора 8, микроЭВМ 9, линии задержки 10 и генератора счетных импульсов 11. Вход амплитудного селектора 5, являющийся вторым входом процессора параметрической идентификации 4, подключен к входу мультивибратора 1. Амплитудный селектор 5 последовательно соединен с компаратором 6 и счетчиком 7, информационные входы которого соединены с информационными входами, последовательно соединенных, сумматора 8 и микроЭВМ 9, причем вторые информационные входы сумматора 8 соединены с информационными выходами линии задержки 10, к счетному входу которой подключен выход генератора счетных импульсов 11. Первый вход линии задержки 10 является первым входом процессора параметрической идентификации 4, и к нему подключен счетный вход микроЭВМ 9, а ко второму входу линии задержки 10 - второй вход компаратора 6, соединенный также с выходом сумматора 8 и управляющим входом микроЭВМ 9.

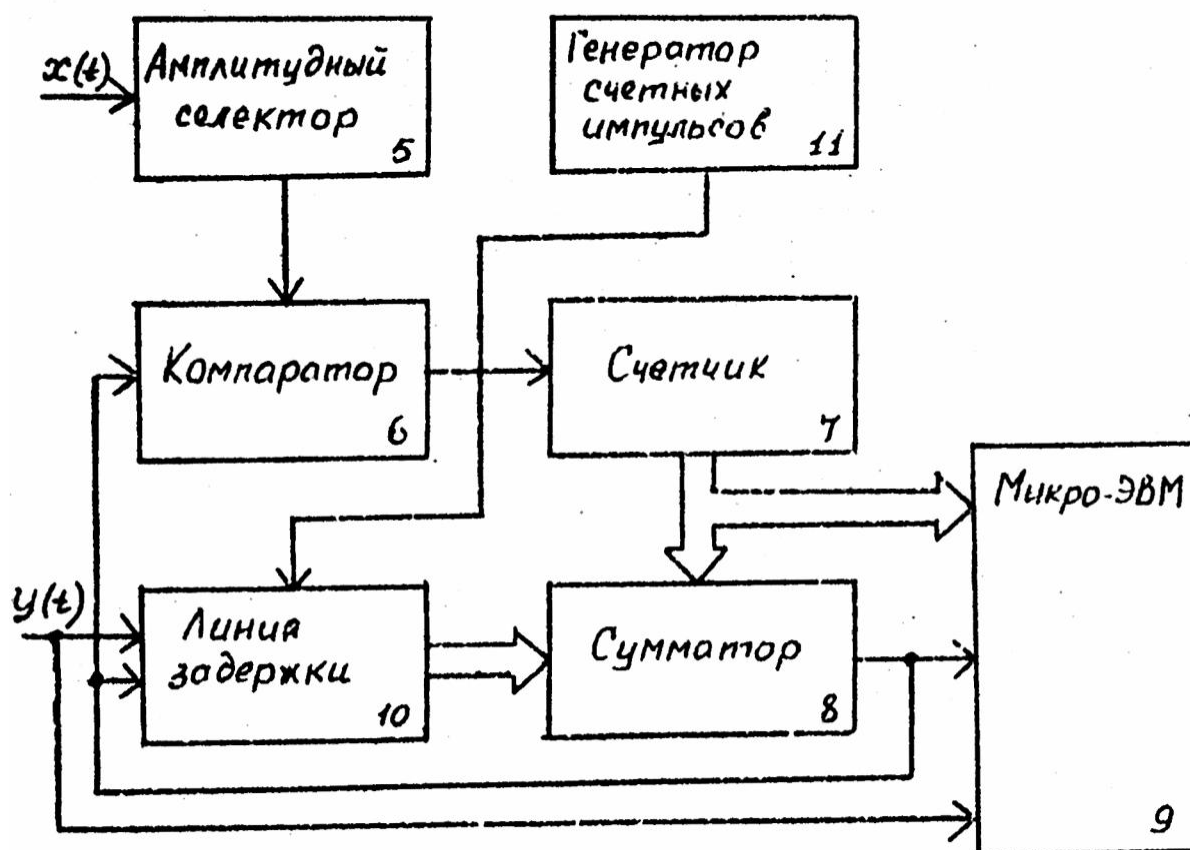
Устройство для измерения скорости звука работает следующим образом.

После включения питания срабатывает мультивибратор 1, в результате чего пьезоэлектрический преобразователь 2 возбуждается и в среду распространяется акустический импульс. Импульсом возбуждения блокируется амплитудный селектор 5 и процессор параметрической идентификации 4 не реагирует на этот импульс. Акустический импульс, отражаясь от отражателя 3, поступает на пьезоэлектрический преобразователь 2 и преобразуется в электрический сигнал  $x(t)$ . Импульсы  $x(t)$  поступают на вход амплитудного селектора 5 и мультивибратора 1. После усиления в мультивибраторе 1 получают импульсы  $y(t)$ , поступающие на первый вход линии задержки 10. В результате линия задержки 10 открывается и разрешает подсчет импульсов с выхода генератора счетных импульсов 11. На информационных выходах линии задержки 10 формируется код. Одновременно с этим импульсы  $y(t)$  со второго выхода мультивибратора 1, прошедшие амплитудный селектор 5 сравниваются в компараторе 6 с импульсами на выходе сумматора 8. В зависимости от временного положения этих импульсов будет сформирован сигнал, изменяющий состояние счетчика 7. Этот процесс продолжается до тех пор, пока коды на информационных выходах счетчика 7 и линии задержки 10 сравниваются. В момент сравнения кодов на выходе сумматора 8 появится импульс, закрывающий линию задержки 10 и компаратор 6, а также разрешающий микроЭВМ 9 принять код с информационных входов счетчика 7. В результате в микроЭВМ будет перезаписан код, соответствующий величине задержки сигнала в мультивибраторе 1. Учитывая, что период следования импульсов с выхода генератора счетных импульсов 11 намного меньше времени изменения скорости звука в исследуемой среде, следовательно, процесс идентификации задержки сигнала в мультивибраторе 1 происходит в реальном масштабе времени. Получив код с информационных выходов счетчика 7 микроЭВМ 9 разрешает прохождение сигнала на свой счетный вход со второго выхода мультивибратора 1. По окончании цикла измерения микроЭВМ 9 вычисляет скорость звука и выдает информацию

на дисплей. Затем процесс повторяется и в результате за счет реализации алгоритма (20) - (22) аппаратными средствами достигается увеличение точности измерений скорости звука путем исключения влияния величины задержки сигнала в мультивибраторе 1 на результат измерений.



Фиг. 1



Фиг. 2