ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРИБОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ ТЕПЛИЦ

Н.П. Воробьев, Р.Н. Воробьев

Произведена оценка нестабильности момента привязки к переднему фронту принятого импульса с учетом вероятностного характера воздействия шумов исследуемой среды и шумов от аппаратуры. Разработан способ и устройство, обеспечивающие защиту от помех рассмотренного метода измерения скорости ультразвука, реализованных в ультразвуковом приборе для контроля углекислого газа в атмосфере теплиц.

The valuation of the instability of the moment of affixment to the leading edge front of accepted burst the with allowance for probabilistic character of the action of the bedlams of investigated media and bedlams from equipment is performed. Method and device providing blocking from the bugs of the considered method of gauging of the rate of ultrasound actualized in infrasonic appliance for the verification of carbon dioxide in the environment of glass-houses is developed.

ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРИБОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ ТЕПЛИЦ

Частотно-импульсный метод измерения скорости ультразвука реализуется на практике замкнутой системой автоциркуляции электрических и акустических импульсов. В общем случае такая система включает в себя (рисунок 1) синхронизируемый генератор 1 импульсов, импульсный усилитель 2 мощности, излучатель 3 ультразвука, защитную мембрану 4 излучателя, исследуемую газообразную среду 5, защитную мембрану 6 приемника, приемник 7 ультразвука, усилитель 8, амплитудный детектор 9 и формирователь 10 импульсов. Выход сигнала для дальнейшего счета, преобразования и индикации в синхрокольцевой схеме обычно проще всего осуществить в формирователе импульсов.

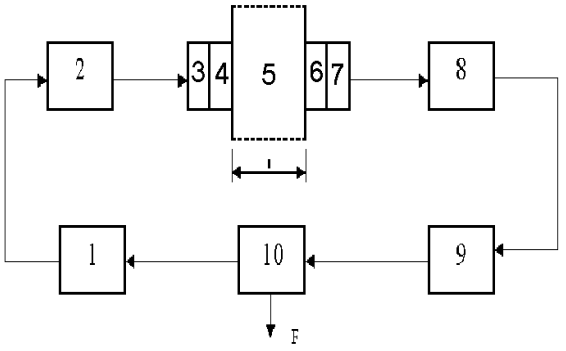

Рисунок 1 – Система автоциркуляции электроакустических импульсов

Поскольку основным фактором, подлежащим определению при данном способе, является скорость ультразвука в исследуемой среде, запишем выражение для скорости ультразвука в виде

$$C = \frac{l}{\frac{1}{F} - 2\tau_м + \tau_{эл}}, \qquad (1)$$

где $\frac{1}{F} = T + \Delta,\ \Delta = 2\tau_м + \tau_{эл}$ – паразитное время задержки сигнала в мембранах и в электронной схеме, T – время распространения ультразвукового импульса в исследуемой среде, F – частота автоциркуляции импульсов в синхрокольцевой схеме.

Паразитное время задержки сигнала не ограничивается временем распространения в мембранах и в электронной схеме. Необходимо принимать во внимание смещение фронта принятого импульса во времени под действием шумовой помехи, которая, в свою очередь, обусловлена шумовыми эффектами в акустическом тракте (т.е. непосредственно тепловым шумом исследуемого газа), шумом приемного пьезоэлемента и шумами усилителя. Паразитное время задержки зависит также от уровня реверберационной помехи при приеме акустических сигналов.

Сказанное выше относится к случаю фиксации временного положения импульса по положению одного из фронтов [1], а в данном случае – по отношению к наиболее распространенному на практике простому пороговому методу [2], при котором в качестве оценки временного положения импульса ис-

пользуют момент первого пересечения входным воздействием некоторого заданного уровня. Оптимальные методы определения временного положения сигнала, основанные на критерии максимального правдоподобия, приводят к алгоритмам, техническая реализация которых достаточно сложна даже в случае априорно известной формы сигнала и не приводит к сколько-нибудь существенному выигрышу в точности по отношению к методу пороговой фиксации [3].

Для количественной оценки степени отклонения фронта импульса от его положения при отсутствии помехи обычно указывают среднеквадратичную величину отклонения $\Delta\tau_{ср.кв.}$, которая зависит от амплитуды и формы импульса и относительного уровня шумов. Для случая аппроксимации синусоидального импульса треугольным, обозначив отношение амплитуды импульса к длительности переднего фронта как S – крутизну фронта импульса, имеем

$$S = \frac{U}{\Delta\tau}, \qquad (2)$$

где U – амплитуда принятого импульса, $\Delta\tau$ – длительность переднего фронта принятого импульса.

Среднеквадратичное значение временного сдвига для данного случая определится как

$$\Delta\tau_{ср.кв.} = \frac{U_{эфф.ш.}}{S}, \qquad (3)$$

где $U_{эфф.ш.}$ – эффективное напряжение шумов.

Однако данная оценка не учитывает влияние амплитуды сигнала на нестабильность переднего фронта принятого импульса. Поэтому анализ порогового метода целесообразней вести по методике, предложенной в работе [3]. При этом момент пересечения входным воздействием y(t) некоторого заданного уровня U_0 имеет место при выполнении следующего равенства

$$y(t) = U_0. \qquad (4)$$

Обозначая функцию воздействия как сумму произведения амплитуды A входного сигнала на функцию $S(\tau-\tau_0)$ (где τ_0 – соответствует пороговому значению U_0) и функции шумовой помехи – $n(\tau)$, имеем

$$AS(\tau - \tau_0 + n(\tau) = U_0. \qquad (5)$$

Полагая погрешность $(\tau-\tau_0)$ измерения временного положения импульса малой, разлагаем сигнал в ряд Тэйлора и ограничиваемся двумя первыми членами, получая выражение для определения момента привязки к переднему фронту принятого импульса

$$\Delta\tau = \tau - \tau_0 = \frac{U_0 - AS(\tau_0) - n(\tau)}{AS'(\tau_0)}, \qquad (6)$$

где $S'(\tau_0)$ – производная функции формы сигнала по времени в момент τ_0 времени.

Для численной оценки влияния амплитуды сигнала на точность порогового метода при различном уровне шумов примем, как в работе /3/, равномерное распределение амплитуды сигнала в интервале ($a - \frac{\Delta'}{2}$; $a + \frac{\Delta'}{2}$), где A – среднее значение амплитуды, а Δ – величина интервала. При этом выражение для дисперсии временного положения импульса имеет вид

$$\sigma^2 = \frac{U_0^2}{[AS'(\tau_0)]^2}\left[\frac{1}{1-\gamma^2} - \frac{\ln^2\left(\frac{1+\gamma}{1-\gamma}\right)}{4\gamma^2}\right] + \frac{\sigma_ш^2}{[AS(\tau_0)]^2}, \qquad (7)$$

где $\gamma = \frac{\Delta'}{2}$ – относительная величина интервала флуктуации амплитуды сигнала, $\sigma_ш$ – дисперсия шума.

Анализ, проведенный в работе [3], показал, что при пороге, в 10 раз превышающем среднеквадратичное напряжение шума, дисперсия временного положения сигнала увеличивается в среднем на 30 % уже при флуктуациях амплитуды ±10 %, а флуктуации амплитуды в ±30 % увеличивают дисперсию в 4,5 раза. Снижение величины порога приводит к существенному снижению влияния амплитуды сигнала на точность измерений: 30-ти процентное увеличение дисперсии соответствует 25%-му изменению амплитуды флуктуации, а 4,5-кратному – 62%-ое изменение флуктуации амплитуды.

Таким образом, обеспечение высокой точности акустических измерений обуславливает необходимость снижения величины порога до значений, соизмеримых с уровнем шумов. В связи с чем возникает проблема обеспечения помехозащищенности акустического синхрокольца, а также более тщательной оценки влияния шумовых эффектов на точность изменений.

Согласно упомянутой классификации шумов произведем оценку амплитуды теплового шума анализируемой среды (например, воздуха) с помощью теоремы о равномерном распределении энергии по степеням свободы [4]. Для этого подсчитаем число степеней свободы в определенном интервале частот с учетом ее энергии kT согласно термодинамической статистике Больцмана, по которой число степеней свободы равно числу собственных колебаний системы. Число собственных колебаний замкнутого объема газообразной среды в полосе частот дается асимптотической формулой

$$\Delta n = \frac{4\pi f^2 \Delta f}{C^3}, \qquad (8)$$

где C – скорость звука, V – объем газа, f – частота колебаний, возбуждающих данный объем газа, Δf – интервал частот колебаний, распространяющихся в газе.

При этих условиях спектр $W_c(\omega)$ мощности шума исследуемой среды определится выражением

$$2W_c(\omega) = \frac{\Delta n}{\Delta f} kT = \frac{4\pi V f^2 kT}{C^3}. \qquad (9)$$

Для воздуха при оптимальной температуре измерений (51 °C) имеем

$$\varpi(\omega) = \frac{2W_c(\omega)}{V} = 1{,}52 \cdot 10^{-27} f^2. \qquad (10)$$

где $\varpi(\omega)$ – плотность энергии, Вт*с/Гц*м^3.

Выражение (9) может быть использовано при оценке шумовых свойств среды в условиях акустических газоаналитических измерений. При этом частота f в формуле (9) является частотой излучения акустического преобразователя.

Вторым фактором, ограничивающим точность акустических газоаналитических измерений являются тепловые шумы на выходе пьезоприемника. В работах [5-7] показано, что тепловые шумы в пьезоприемниках описываются формулой Найквиста:

$$U_ш^2 = 4kTR_Э \Delta f, \qquad (11)$$

где k – постоянная Больцмана, $U_ш^2$ – действующее (среднеквадратичное) напряжение шумов, $R_Э$ – эквивалентное сопротивление шумов, определяемое формулой

$$R_Э = \frac{\int_{f_1}^{f_2} R_{вых}(f)df}{\Delta f}, \qquad (12)$$

где $R_{вых}(f)$ – активная составляющая выходного сопротивления пьезоприемника, f – текущая частота, Δf – эффективная полоса пропускании приемной аппаратуры.

Однако, как показано в работе [5], непосредственный расчет напряжения шумов по формуле (11) затруднителен, так как $R_{вых}(f)$ является сложной функцией частоты, а потому расчеты целесообразней производить по методике, предложенной в работах [8-9]. При этом формула для среднеквадратичного напряжения шумов принимает вид

$$U_ш^2 = 4kTR_{вых_0} \gamma \Delta f, \qquad (13)$$

где поправочный множитель γ определяется по графику на рисунке 2, [5]. Параметр Δx определяется формулой:

$$\Delta x = x_2 - x_1;\ x_1 = f_1/f_0;\ x_2 = f_2/f_0, \qquad (14)$$

гд: f_0 – антирезонансная частота пьезоприемника, а f_1 и f_2 – нижняя и верхняя граница полосы пропускания приемной аппаратуры.

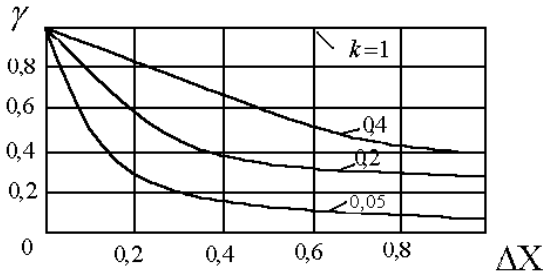

Рисунок 2 – Значение поправочного множителя γ для вычисления напряжения шумов на выходе пьезоприемника

Следовательно, для определения действующего значения напряжения шумов необходимо знать величину активного входного сопротивления пьезоприемника на антирезонансной частоте, определяемого формулой

$$R_{вых_0} = \frac{4e^2}{\omega_0^2 \varepsilon^2 z_0 A_0 (k_1 + k_2)}, \qquad (15)$$

где e – пьезоэлектрическая постоянная, ω_0 – антирезонансная угловая частота пьезопреобразователя, ε – диэлектрическая постоянная пьезоэлектрической пластинки, z_0 – волновое акустическое сопротивление пластинки, A_0 – площадь пьезоэлектрической пластинки, k_1 – нормированное волновое акустическое сопротивление демпфера, а k_2 – рабочей среды.

Энергетический спектр ϖ_n шумов на выходе пьезопреобразователя /5/

$$\varpi_n(\omega) = 4kTR_{вых_0} F(x), \qquad (16)$$

где

$$F(x) = \frac{k_1 + k_2{}^2}{4x^2\left[\ a_{21}k_2 + a_{22}{}^2 + \ b_{21}k_{21} + b_{22}{}^2\right]}, \qquad (17)$$

где x – обобщенная частота, a_{21}, a_{22} – действительные компоненты обобщенных коэффициентов механической части эквивалентного четырехполюсника преобразователя, b_{21}, b_{22} – соответственно мнимые коэффициенты.

Функция F(x) является нормированной частотной характеристикой выходного активного сопротивления $R_{вых}(f)$, поэтому

$$R_{вых}(f) = R_{вых_0} F(x). \qquad (18)$$

Семейство кривых функции F(x) при значениях параметров k_2=0,05, k_1=(0,05÷1) согласно работе [5] приведено на рисунке 3.

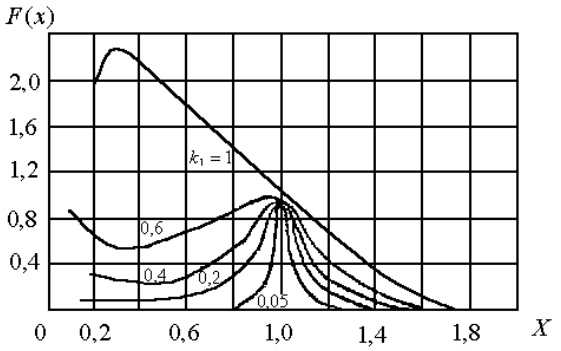

Рисунок 3 – Значения функции F(x) для определения энергетического спектра шумов на выходе пьезоприемника

Среднеквадратичное напряжение шумов $U^2_{шу}$ собственно усилителя обусловлено наличием эквивалентного сопротивления шумов усилителя и может быть количественно соотнесено с шумами преобразователя с помощью коэффициента шума $F_ш$ по формуле

$$F_ш = 1 + \frac{U^2_{шу}}{U^2_ш} = 1 + \frac{R_л}{R_ш}. \qquad (19)$$

Численно среднеквадратичное напряжение шумов усилителя может быть определено по формуле (11) подстановкой вместо $R_Э$ соответственно $R_Л$. При этом в качестве Δf должна приниматься во внимание шумовая полоса пропускания /10/

$$\Delta f = \frac{1}{K_0^2}\int_0^\infty K^2(f)df, \qquad (20)$$

где K(f) – относительный коэффициент усиления напряжения, K_0 – максимальная величина коэффициента усиления в полосе пропускания.

Шумовая полоса пропускания всегда шире полосы пропускания усилителя на уровне 0,7 и зависит от формы кривой избирательности усилителя по формуле

$$\Delta f = m\Delta f_{0,7}, \qquad (21)$$

где m=(1÷1,4) в зависимости от схемы усилителя и числа его каскадов n. При увеличении n m→1.

Связь между шумовой полосой пропускания и полосой пропускания на уровне 0,7 представлена на рисунке 4 согласно работе [10].

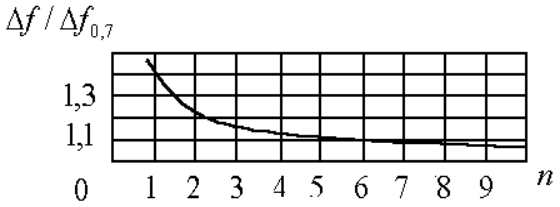

Рисунок 4 – Связь между шумовой полосой пропускании и полосой пропускания для n каскадного усилителя

Приведенные аналитические и графические зависимости позволяют адекватно оценить шумовые свойства ультраакустических синхрокольцевых схем, рационально выбрать пороговый уровень детектирующих и формирующих цепей и оценить величину погрешности фиксации момента прихода первого ультразвукового импульса на приемный усилитель.

Содержание данного раздела свидетельствует о необходимости разработки эффективных методов повышения помехозащищенности частотно-импульсного метода измерения скорости ультразвука.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА

Известно, что помехозащищенность широкополосных измерений скорости ультразвука по методу синхрокольца в средах со значительным затуханием колебаний ультразвуковых колебаний (газы) резко снижается вследствие того, что увеличивается интервал времени, в течение которого возможно появление импульсных помех от влияния сильных электрических полей, случайных динамических ударов и просто от шумовой помехи, поскольку отдельные броски напряжения для

нормального шума в три раза превышают среднеквадратичное напряжение шумовой помехи [2]. Кроме того, при возникновении флуктуационных явлений в среде возможно самопроизвольное скачкообразное изменение отсчитываемой величины, вызванное переходом импульса с фронта на фронт, что снижает точность измерений [11].

Недостатком устройства [12] является то, что падает точность измерений в условиях, когда длительность принятого импульса во много раз меньше длительности периода автоциркуляции в синхрокольце.

Недостаток устройства [11] в том, что при возникновении флуктуационных явлений в среде неизбежны самопроизвольные скачкообразные изменения отсчитываемой величины, вызванные переходом импульса с фронта на фронт, что снижает точность измерений.

Кроме того, в условиях широкодиапазонных измерений скорости ультразвука помехозащищенность измерений резко снижается вследствие того, что увеличивается интервал времени, в течение которого возможно появление импульсных помех от влияния сильных электрических полей и случайных динамических ударов.

Недостатками устройства [11] являются его малая точность измерений вследствие того, что в нем обеспечивается нечувствительность по отношению к любым видам возмущающих помех только в интервале действия интегрирующего видеодетектора. Однако вне зоны действия интегрирующего видеодетектора помехоустойчивость и точность устройства резко снижается, особенно в широком диапазоне частот автоциркуляций, так как приходится неоправданно завышать потенциальный уровень привязки к первому ультразвуковому импульсу, прошедшему через среду. Это справедливо даже в случае наличия только шумовых помех, так как при этом отдельные броски напряжения для нормального шума в несколько раз превышают среднеквадратичное напряжение шумовой помехи, что также способствует чрезмерному завышению потенциального уровня привязки к переднему фронту принятого импульса, увеличивает дисперсию измерения временного положения импульса и уменьшает точность измерений.

Недостатком устройства [12] является то, что падает точность измерений в условиях, когда длительность принятого импульса во много раз меньше периода автоциркуляции в синхрокольце.

С целью преодоления упомянутых недостатков нами разработано устройство для измерения скорости ультразвука [13], реализованное в ультразвуковом приборе для контроля углекислого газа в атмосфере теплиц.

На рисунке 5 изображена структурная схема устройства для измерения скорости ультразвука, на рисунке 6 – форма сигнала автоциркуляции в зависимости от параметров цепи детектирования и длительности $t_и$ цуга принятого и сформированного импульса, на рисунке 7 – временные диаграммы, иллюстрирующие работу устройства.

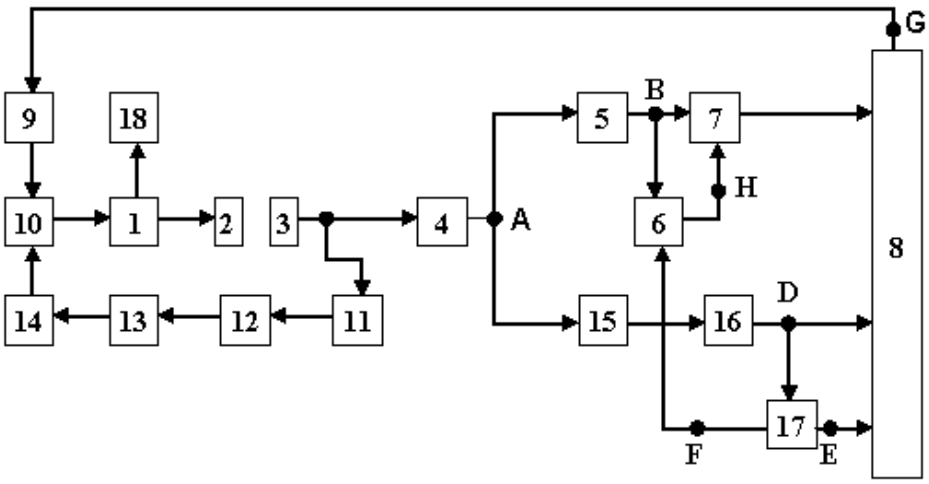

Рисунок 5 – Структурная схема устройства для измерения скорости ультразвука

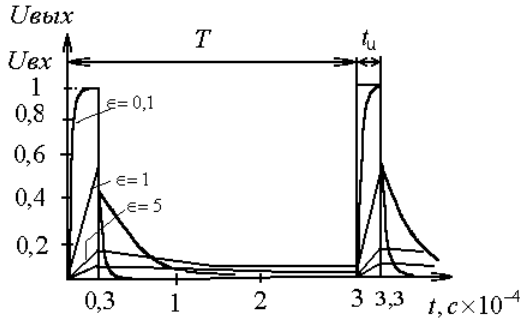

Рисунок 6 – Форма сигнала автоциркуляции

При включении устройства синхронизируемый генератор 9 вырабатывает электрический импульс, который, пройдя регулируемый усилитель 10 и генератор 1, усиливается и поступает на излучающий преобразователь 2, вызывая генерацию и излучение в среду акустического импульса.

Акустический импульс после прохождения исследуемой среды принимается приемным преобразователем 3, преобразуется в нем в электрический импульс, усиливается приемным усилителем 4, затем преобразуется детектором 5 положительных полуволн, в результате чего на выходах детекторов 5 и 15 получается сигнал, состоящий соответственно из положительных и отрицательных полуволн. Затем сигнал с выхода детектора 5 поступает на первый вход схемы ИЛИ 6 и на второй вход регулируемого фильтра 7. При появлении первой положительной полуволны схема ИЛИ 6 выключает регулируемый фильтр 7 и полуволна импульса проходит на первый вход триггера 8 с раздельным запуском, вызывая его срабатывание.

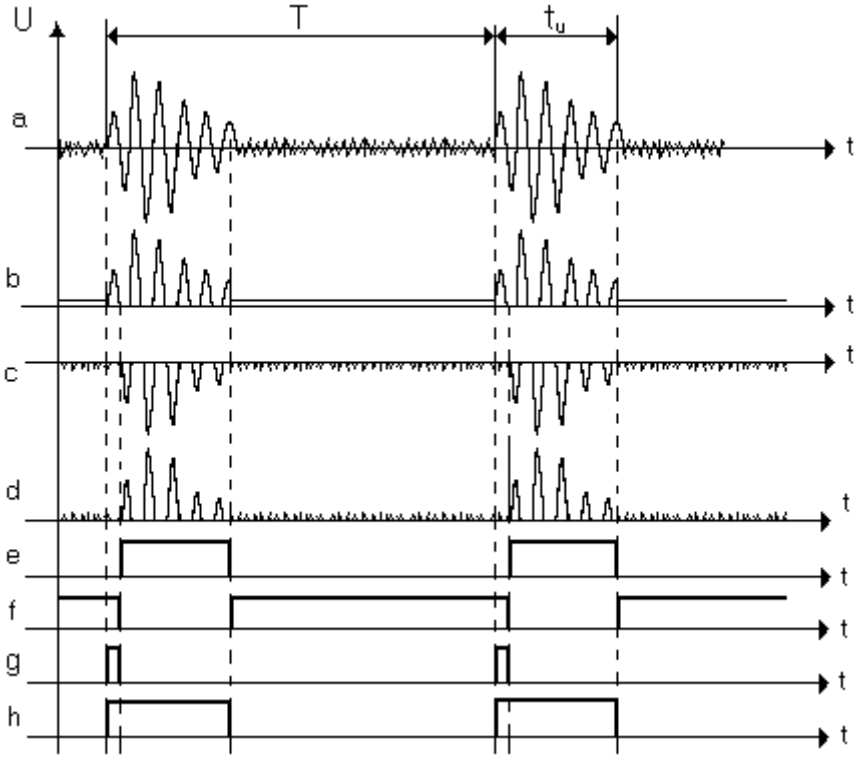

Рисунок 7 – Временные диаграммы работы устройства для измерения скорости ультразвука

Одновременно сигнал с выхода детектора 15 отрицательных полуволн поступает на вход инвертора 16, инвертируется им и подается на второй вход триггера 8, вызывая его вторичное срабатывание, этот же сигнал подается также на вход формирователя 17, который вырабатывает длительный импульс прямоугольной формы, по длительности превышающий принятый цуг импульсов, блокируя тем самым триггер 8 от срабатывания от последующих полуволн цуга, то есть триггер 8 становится нечувствительным к входным сигналам на первом и втором входах.

С инверсного (второго) выхода формирователя 17 сигнал поступает на второй вход схемы ИЛИ 6, которая при появлении данного сигнала включает в работу регулируе-

мый фильтр 7. Импульс с выхода триггера 8 поступает на вход синхронизируемого генератора 9 и запускает его. В дальнейшем цикл автоциркуляции сигнала повторяется.

В процессе работы синхроимпульсы с выхода приемного преобразователя 3 поступают также на вход линейного усилителя 11, усиливаются им без ограничения и поступают на вход блока 12 привязки уровня, отрегулированного так, что сигнал управления на его выходе появляется только в случае превышения заданного отношения сигнал / шум на выходах усилителей 4 и 11. С выхода блока 12 сигнал поступает на вход детектора 13, детектируется в нем и далее усиливается усилителем 14 постоянного тока, с выхода которого сигнал поступает на второй вход регулируемого усилителя 10, усиление которого максимально при отсутствии сигнала на выходе усилителя 14 постоянного тока. В результате напряжение на выходе генератора 1, а следовательно, и мощность, подводимая к излучающему преобразователю 2, оказывается функционально зависимой от заданного оптимального уровня полезного сигнала на выходе приемного преобразователя 3, то есть отношение сигнал / шум на выходе поддерживается стабильным. На рисунке 6 показана форма сигнала автоциркуляции в зависимости от параметров цепи детектирования и длительности t_u цуга принятого и сформированного сигнала.

Параметры цепи выражены через

$$\varepsilon = RCt_u^{-1}, \qquad (22)$$

где R – сопротивление цепи детектирования сигнала, C – емкость цепи детектирования сигнала, $U_{ВЫХ}$ и $U_{ВХ}$ – напряжения соответственно на выходе и входе цепи детектирования сигнала.

На рисунке 7 представлены временные диаграммы сигналов автоциркуляции в соответствующих точках a, b, c, d, e, f, g, h структурной схемы устройства, изображенного на рисунке 7, где T – период автоциркуляции сигналов, t_u – длительность цуга принятых импульсов, t – текущее время, U – напряжение.

Детектор 5 положительных полуволн может быть выполнен на основе известных схемных решений (например, диода марки Д223, анодом подключенного к точке A, а катодом – к точке B).

Управляемый фильтр 7 представляет собой последовательно соединенную цепочку из резистора, конденсатора и электронного ключа, причем второй вход резистора подключен к точке B, средняя точка между резистором и конденсатором подключена к первому входу блока 8, электронный ключ заземлен, а вход ключа подключен к точке H. В качестве электронного ключа может быть использован, например, транзистор по схеме включения с общим эмиттером. Постоянная времени интегрирующей RC цепочки выбирается с учетом необходимости подавления шумовой помехи в промежутках между импульсами автоциркуляции.

Детектор 15 отрицательных полуволн аналогичен детектору 5 с той лишь разницей, что анод диода подключен к точке C, а катод – к точке A.

Формирователь 17 длинных импульсов представляет собой одновибратор, на выходе которого формируются импульсы, по длительности превышающие длительность цуга принятых импульсов (диаграммы E и F на рисунке 7) и имеющие прямой (диаграмма E на рисунке 7 и точка E на рисунке 2.6) и инверсный (диаграмма F на рисунке 7 и точка F на рисунке 7) выходы.

Счетчик 18 импульсов выполнен без кодо-аналогового преобразователя.

В результате обеспечивается эффективное подавление шумовой помехи и минимизируется уровень привязки к переднему фронту принятого сигнала в широком диапазоне частот автоциркуляции, что обеспечивает повышение точности измерений и расширение диапазона измерений скорости ультразвука.

ВЫВОДЫ

В результате исследования шумовых свойств электроакустического канала синхрокольцевых измерителей скорости ультразвука произведена оценка нестабильности момента привязки к переднему фронту принятого импульса с учетом вероятностного характера воздействия шумов исследуемой среды, аппаратурных шумов и флуктуационных явлений.

Приведенные аналитические и графические зависимости позволяют адекватно оценить шумовые свойства ультраакустических синхрокольцевых схем, рационально выбрать пороговый уровень детектирующих и формирующих цепей и оценить величину погрешности фиксации момента прихода первого ультразвукового импульса на приемный усилитель.

Разработан способ и устройство, обеспечивающие помехозащищенность частотно-

импульсного метода измерения скорости ультразвука, реализованных в ультразвуковом приборе для контроля углекислого газа в атмосфере теплиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Митяшев, Б. Н. Определение временного положения импульсов при наличии помех / Б.Н. Митяшев. – М.: Советское радио, 1962. – 187 с.

2. Каневский, З. М. Флуктуационная помеха и обнаружение импульсных радиосигналов / З.М. Каневский, М.И. Финкельштейн. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 216 с.

3. Чернявский, А. Ф. Статистические методы анализа случайных сигналов в ядерно-физическом эксперименте / А.Ф. Чернявский, С.В. Бекетов, А.В. Потапов. – М.: Атомиздат, 1974. – 137 с.

4. Скучик, Е. Основы акустики. – В 2 т. Т. 1. – М.: Мир, 1976. – 452 с.

5. Домаркас, В.И. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи / В.И. Домаркас, Р.-И.С. Кажис – Вильнюс: Минтис, 1975. – 256 с.

6. Гончаров, К. В. Тепловые механические колебания (флуктуации) пьезоэлектрических кристаллов / К.В. Гончаров, В.А. Красильников // Изв. АН СССР, Сер. физ. – 1956, –№ 20. – С. 231-236.

7. Ван-дер-Зил, А. Флуктуации в радиотехнике и физике. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 159 с.

8. Кажис Р.-И.Ю. Анализ тепловых шумов пьезоэлектрических приемников / Р.-И.Ю. Кажис, В.И. Домаркас // Тр. Всесоюз. межвуз. конф. по вопросам ультразвуковой спектроскопии. – Каунас, 1969. – С. 56, 57.

9. Домаркас, В. И. Тепловые шумы на выходе пьезоэлектрических приемников звука / В.И. Домаркас // Акустический журнал. – 1971. – 17, 1. – С. 43-49.

10. Шор, К. Г. Малошумящие транзисторные усилители / К.Г. Шор. – М.: Энергия, 1971. – С. 12.

11. Носов, В. А. Проектирование ультразвуковой измерительной аппаратуры / В.А. Носов. – М.: Машиностроение, 1972. – 288 с.

12. Кикучи, Е. Ультразвуковые преобразователи /Е. Кикучи. – М.: Мир, 1972. – 424 с.

13. А.с. 1610309 СССР МКИ^5 G 01 H 5/00. Устройство для измерения скорости ультразвука / Воробьев Н.П., Дерешев В.Н., Гребенюк В.В.; заявитель и патентообладатель Алт. политехн. ин-т. – № 4612786/25-28; заявл. 06.12.88; опубл. 30.11.90, Бюл. № 44. – 5 с.: ил.