

УДК 534.86

СТАБИЛИЗАЦИЯ ФАЗЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ  
ПРИ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Потехин Ю. Г.

Для импульсного режима работы показано наличие точки стабильной фазы излучаемой датчиком акустической волны в случае неустойчивости либо собственной частоты датчика, либо частоты возбуждающего сигнала. Стабилизация достигается взаимной компенсацией ухода фаз собственных и вынужденных колебаний.

Точность и разрешающая способность фазовых измерений акустическими методами зависит от стабильности временных соотношений между электрическим возбуждающим сигналом и излучаемой акустической волной.

Существующие ультразвуковые преобразователи имеют значительную температурную неустойчивость собственной частоты, что вызывает температурный дрейф фазы излучаемой акустической волны. Традиционным способом уменьшения дрейфа является значительная расстройка частоты измерительного сигнала относительно собственной частоты ультразвукового излучателя. В этом случае изменение собственной частоты излучателя мало сказывается на фазе акустической волны. Однако использование ультразвуковых преобразователей на нерезонансной частоте требует больших энергетических затрат для получения измерительного сигнала необходимого уровня. Это же обстоятельство приводит к уменьшению помехозащищенности измерительной системы.

В ряде случаев расстройка частоты измерительного сигнала относительно резонансной частоты преобразователя не может быть использована из-за указанных недостатков. Это относится, в частности, к измерению концентрации свободного газа в жидкости акустическим двухчастотным методом [1, 2], где необходимо обеспечивать хорошую помехозащищенность по низкочастотному каналу, который больше подвержен действию помехи. Чтобы исключить влияние реверберации в акустическом канале и длительное воздействие акустического поля на пузырьки газа в жидкости, работа анализатора концентрации осуществляется в импульсном режиме. Ультразвуковые преобразователи в пределах возбуждающего импульса работают в переходном режиме, когда следует учитывать неустойчивость фазы как вынужденных, так и свободных колебаний. Как удалось установить, при определенных условиях свободная и вынужденная составляющие колебаний излучателя оказывают противоположное воздействие на фазу результирующего колебания, что способствует стабилизации фазы излучаемого сигнала. Изучению этого вопроса и посвящена статья.

Выражение, описывающее колебания ультразвукового излучателя при возбуждении его импульсно-синусоидальным сигналом, записывается следующим образом:

$$P(t) = K \left\{ \frac{(\omega^2 - \nu^2) \cos \nu t + 2a\nu \sin \nu t}{(\omega^2 - \nu^2)^2 + 4a^2\nu^2} + e^{-at} \left[ -(\omega^2 - \nu^2) \cos (\omega^2 - a^2)^{1/2} t - a(\omega^2 + \nu^2) \sin (\omega^2 - a^2)^{1/2} t / (\omega^2 - a^2)^{1/2} \right] / [(\omega^2 - \nu^2)^2 + 4a^2\nu^2] \right\}, \quad (1)$$

где  $K = U_0 \nu R_a / L$ ,  $a = (R_a + R_m) / 2L$ ,  $P$  — давление на поверхности излучателя,  $\omega$  — собственная частота излучателя,  $\nu$  — частота возбуждающего электрического сигнала,  $a$  — показатель затухания,  $U_0$  — амплитуда возбуждающего электрического сигнала,  $R_a$ ,  $R_m$ ,  $L$  — элементы эквивалентной электрической схемы, характеризующие потери и массу преобразователя.

Выражение (1) получено с учетом эквивалентной электрической схемы преобразователя, заимствованной из работы [3].

Решение (1) состоит из двух частей, первая из которых описывает вынужденные колебания, вторая — свободные. Фаза колебаний (1) описывается сложным выражением, анализ которого затруднен. Поэтому будем искать фазы составляющих в расчете оценить изменение фазы результирующего сигнала при изменении фаз составляющих. Фаза  $\varphi_b(\omega)$  и амплитуда  $B(\omega)$  вынужденных колебаний даются следующими выражениями:

$$\varphi_b(\omega) = \arctg [ (\omega^2 - v^2) / 2av ] + vt, \quad (2)$$

$$B(\omega) = K / [ (\omega^2 - v^2)^2 + 4a^2v^2 ]^{1/2}. \quad (3)$$

Фаза  $\varphi_c(\omega)$  и амплитуда  $A(\omega)$  свободных колебаний находятся как:

$$\varphi_c(\omega) = -\pi/2 - \arctg \{ a(\omega^2 + v^2) / [ (\omega^2 - v^2) \times (\omega^2 - a^2)^{1/2} ] \} + (\omega^2 - a^2)^{1/2}t, \quad (4)$$

$$A(\omega) = K\omega e^{-at} / (\omega^2 - a^2)^{1/2} [ (\omega^2 - v^2)^2 + 4a^2v^2 ]^{1/2}. \quad (5)$$

При расстройке  $d\omega$  собственной частоты излучателя функции (2) и (4) получают приращение, оценим его. Для этого найдем производные указанных функций по параметру  $\omega$ :

$$d\varphi_b(\omega) / d\omega = 4av\omega / [ 4a^2v^2 + (\omega^2 - v^2)^2 ], \quad (6)$$

$$d\varphi_c(\omega) / d\omega = a [ 2\omega^2(\omega^2 + v^2) - (\omega^2 - v^2)^2 + 4a^2v^2 ] / \{ \omega(\omega^2 - a^2)^{1/2} [ (\omega^2 - v^2)^2 + 4a^2v^2 ] \} + \omega t / (\omega^2 - a^2)^{1/2}. \quad (7)$$

Анализ выражений (6) и (7) показывает, что знаки функций одинаковы, следовательно как фаза вынужденных колебаний, так и фаза свободных колебаний при расстройке частоты  $d\omega$  изменяются в одну сторону. При  $t=0$ ,  $\omega=v$  величины (6) и (7) одинаковы и составляют  $1/a$ . Отличие состоит в том, что (7) зависит от времени. При больших  $t$  производная (7) принимает большое значение, следовательно изменение фазы свободных колебаний может сильно сказаться на фазе результирующего сигнала, несмотря на затухающий характер свободных колебаний.

Найдем теперь выражение для фазы  $\varphi$  результирующего сигнала (1) с учетом амплитуд и фаз (2—5) его составляющих:

$$\varphi = \arctg [ (A \cdot \sin \varphi_c + B \sin \varphi_b) / (A \cos \varphi_c + B \cos \varphi_b) ]. \quad (8)$$

Производные функции (8) по параметрам  $\varphi_c$  и  $\varphi_b$  находятся как

$$d\varphi / d\varphi_c = (A^2 + ABN) / [ (1 + M^2) \cdot S ], \quad (9)$$

$$d\varphi / d\varphi_b = (B^2 + ABN) / [ (1 + M^2) \cdot S ], \quad (10)$$

где

$$N = \cos \varphi_c \cos \varphi_b + \sin \varphi_c \sin \varphi_b, \quad (11)$$

$$M = (A \cdot \sin \varphi_c + B \sin \varphi_b) / (A \cos \varphi_c + B \cos \varphi_b), \quad S = (A \cdot \cos \varphi_c + B \cos \varphi_b)^2.$$

Поскольку фаза  $\varphi$  сигнала складывается из фаз составляющих, то для неизменности фазы  $\varphi$  необходимо добиваться разных знаков функций (9) и (10) и одинаковых их величин. Найдем необходимые для этого условия. Для этого решим (9) и (10) относительно  $d\varphi$  и приравняем их с разными знаками:

$$(A^2 + ABN) d\varphi_c = - (B^2 + ABN) d\varphi_b. \quad (12)$$

Преобразуем (12), приняв  $d\varphi_c / d\varphi_b = k$ :

$$kA^2 / B^2 + N(k+1)A/B + 1 = 0. \quad (13)$$

Решение квадратного уравнения (13) дает

$$A/B = \{ -N(k+1) \pm [ N^2(k+1)^2 - 4k ]^{1/2} \} / 2k. \quad (14)$$

Решение (14) можно рассматривать как уравнение, если подставить в него величины  $A, B, k, N$ , согласно найденным выражениям (3), (5), (6), (7). Анализ (14) показывает, что решение может существовать только при  $N < 0$ , так как  $|N(k+1)| > |[N^2(k+1)^2 - 4k]^{1/2}|$  для всех значений  $N, k$ , а левая часть (14) не может быть отрицательной. Уточним это условие. Для этого преобразуем (11), введя величину  $\Delta\varphi = \varphi_b - \varphi_c$  — разность фаз вынужденных и свободных колебаний. Выражение (11) принимает вид

$$N = \cos \Delta\varphi \quad (15)$$

Следовательно, решение (14) может существовать только в интервале значений разности фаз  $\pi/2 < \Delta\varphi < 3\pi/2$ . Для колебаний (1) это вполне реальный случай, так как разность фаз  $\Delta\varphi$  подчиняется закону  $\Delta\varphi \approx (\nu - \omega)t + \pi$  и при некоторых значениях  $t$  попадает в указанный интервал.

Кроме того, предварительный анализ (14) показывает, что решение для  $t > 0$  может существовать только при отрицательном знаке радикала.

Функции  $A/B$  и  $k(a, t)$  находятся с использованием выражений (3), (5), (6), (7) в виде:

$$A/B = \omega e^{-at} / (\omega^2 - a^2)^{1/2}, \quad (16)$$

$$k \approx 1 + [4a^2 k_2^2 + \omega^2 (1 - k_2^2)^2] t / 4ak_2, \quad (17)$$

где  $k_2 = \nu/\omega$ .

Функция  $N(t)$  находится подстановкой в соотношение (15) значения разности фаз  $\Delta\varphi$ , найденного с учетом выражений (2) и (4).

После подстановки функций (16), (17) и  $N(t)$ , соответствующих реальному процессу (1), в равенство (14), получаем уравнение, которое можно решать относительно времени  $t$ , задаваясь значениями  $a, k_2, N$ . Наиболее простой вид уравнение (14) имеет при  $N = -1$ , когда правая часть принимает значение  $1/k$ :

$$\omega e^{-at} / (\omega^2 - a^2)^{1/2} = 4ak_2 / \{4ak_2 [4a^2 k_2^2 + \omega^2 (1 - k_2^2)^2] t\}. \quad (18)$$

Функции  $F_1(a, t)$  в левой части и  $F_2(a, t)$  в правой, как показывают расчеты, пересекаются, следовательно уравнение (18) имеет решение. Из этого следует, что при некотором значении времени  $t$ , соответствующем определенным значениям параметров  $a, k_2, N$  ультразвукового преобразователя и возбуждающего сигнала, расстройка  $d\omega$  собственной частоты преобразователя не приводит к изменению фазы ультразвуковых колебаний (1).

На практике наибольший интерес представляет стабилизация фазы в точках нулевой фазы сигнала, т. е. в точках, где фаза результирующего сигнала принимает нулевое значение. Эти точки соответствуют моментам времени  $t \approx nT_v$ , где  $n$  — целое число,  $T_v = 2\pi/\nu$ . Более точно указанные значения времени находятся с учетом фаз вынужденной и свободной составляющих колебаний.

Поэтому полезно решить уравнение (18) относительно показателя затухания  $a$ , задавшись предварительно значениями  $t, N, k_2$ . Уравнение (18) решается методом приближений.

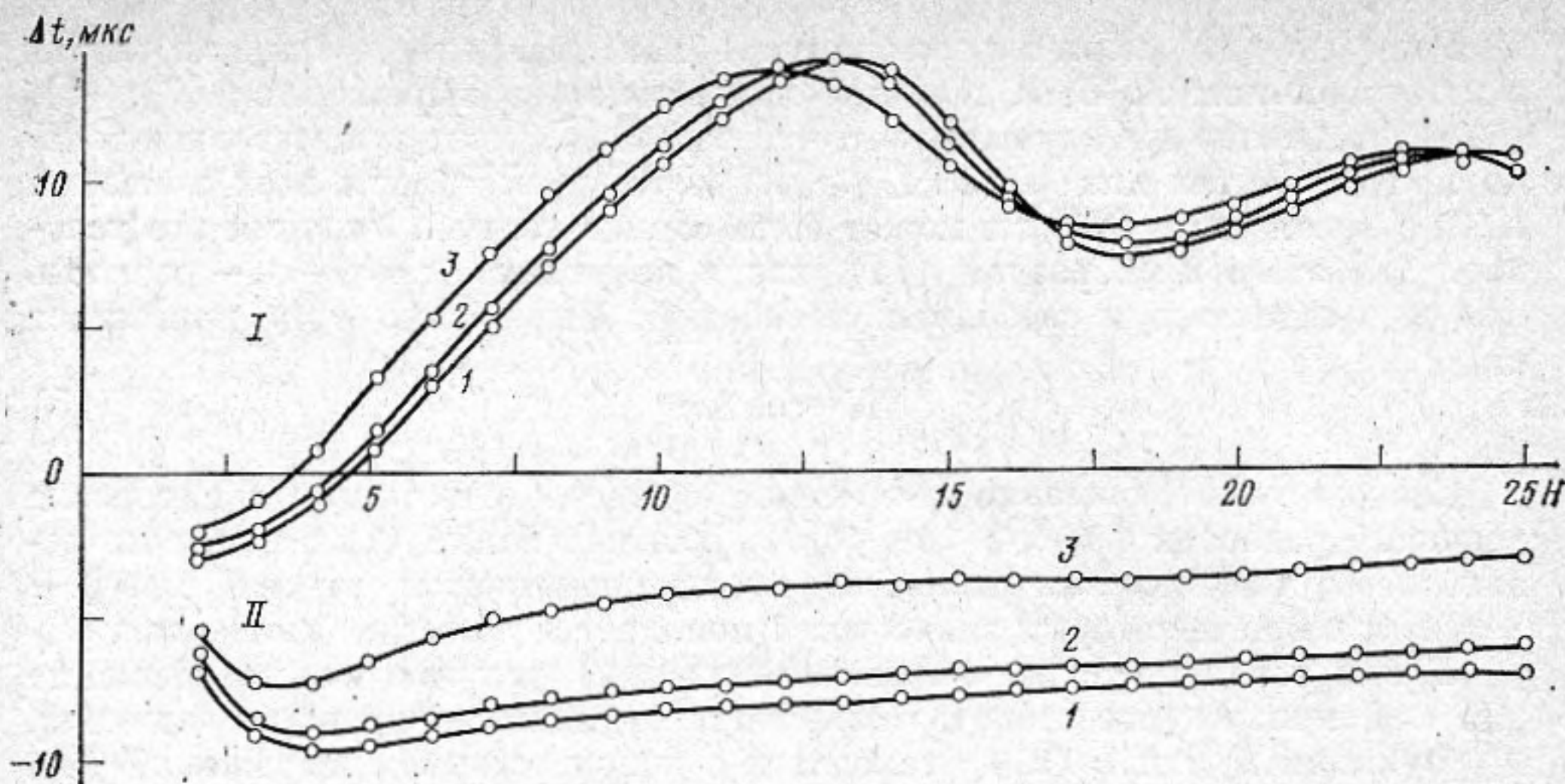
Оценим диапазон расстройки собственной частоты излучателя, в котором еще сохраняется повышенная стабильность фазы излучаемого сигнала. Выражение для приращения фазы сигнала  $d\varphi$  можно записать в следующем виде:

$$d\varphi = (\partial\varphi/\partial\varphi_c) d\varphi_c + (\partial\varphi/\partial\varphi_b) d\varphi_b. \quad (19)$$

После преобразований с учетом (9), (10), (16) выражение (19) принимает вид

$$d\varphi = B^2(\omega) (1 + M^2) [\omega^2 k \cdot e^{-2at} / (\omega^2 - a^2) + \omega (k+1) N e^{-at} / (\omega^2 - a^2)^{1/2} + 1] d\varphi_b / S. \quad (20)$$

Будем считать, что при некотором значении параметров возбуждающего сигнала и ультразвукового излучателя наблюдается полная компенсация ухода фазы сигнала при расстройке собственной частоты излучателя  $d\omega$ .



В этом случае выражение в квадратных скобках правой части равенства (20) равно нулю. При значительном изменении расстройки нарушается условие компенсации в основном за счет изменения величины  $N$ . Найдем условие, при котором в (20)  $d\varphi < d\varphi_0$ . Оно записывается следующим образом:

$$-1 < N < \{ [S / (B^2(\omega)(1+M^2))] - ke^{-2at} - 1 \} / (k+1)e^{-at}. \quad (21)$$

Численный расчет показывает, что  $N$  должно лежать в пределах  $-1 < N < -0,843$ . Соответственно разность фаз  $\Delta\varphi$  вынужденных и свободных колебаний должна лежать в пределах  $147,5^\circ < \Delta\varphi < 182,5^\circ$ . Это соответствует расстройке собственной частоты в пределах  $\pm 0,56\%$  относительно значения, при котором наблюдается идеальная стабильность фазы сигнала.

Теоретические расчеты, изложенные в статье, подтверждаются экспериментом. На фигуре показаны зависимости фазы излучаемой акустической волны от времени  $t$  с начала возбуждения для разных значений температур ультразвукового излучателя. Измерения производились с помощью пары ультразвуковых преобразователей совмещенного типа, содержащих низко- и высокочастотные пьезоэлементы.

Один преобразователь выполнял функции излучателя, с его помощью излучались ультразвуковые импульсы двух частот — 17 кГц и 1700 кГц. Вторым преобразователем выполнял функции гидрофона, он принимал ультразвуковые импульсы. Преобразователи устанавливались в баке с водой, температура их регулировалась нагревом и охлаждением воды. Высокочастотный импульс излучался в точке нулевой фазы низкочастотного электрического возбуждающего сигнала, была предусмотрена регулировка задержки  $nT_v$  запуска ВЧ-канала, где  $n$  — целое число,  $T_v$  — период низкочастотного возбуждающего сигнала.

На фигуре по оси ординат отложена разность  $\Delta t$  времен пробега низко- и высокочастотным ультразвуковыми импульсами расстояния от излучателя до гидрофона, по оси абсцисс — количество  $n$  периодов низкочастотного возбуждающего сигнала, на которое осуществлялась задержка излучения ВЧ-импульса. Поскольку фазовый сдвиг высокочастотного импульса на излучателе и гидрофоне мал, а расстояние, пробегаемое импульсами, одинаково, то разность  $\Delta t$  характеризует только фазовый сдвиг низкочастотного сигнала при преобразовании его на излучателе и гидрофоне.

На фигуре приведены две серии кривых: I соответствует периоду возбуждающего сигнала  $T_v = 55$  мкс, II — периоду  $T_v = 59$  мкс. Цифрами 1, 2, 3 обозначены кривые, снятые при температурах соответственно  $22^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$  С. Первая серия кривых имеет общую точку в районе  $n = 16$ , в этой точке параметр  $\Delta t$  не зависит от температуры. Вторая серия кривых не имеет общей точки. Это соответствует возбуждению излучателя сигналом

частоты очень близкой к собственной частоте излучателя. В этом случае уравнения (14), (18) не имеют решений.

Приведенные результаты показывают наличие стабильной фазы акустической волны, излучаемой ультразвуковым преобразователем в импульсном режиме, которая обеспечивает постоянство нуля прибора при фазовых измерениях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Потехин Ю. Г., Чистяков Е. С. Акустический метод экспресс-анализа концентрации свободного газа в жидкостях.— Акуст. ж., 1978, т. 24, № 2, с. 243—248.
2. Потехин Ю. Г., Чистяков Е. С. Ультразвуковой анализатор концентрации свободного газа в жидкости.— В кн.: Вопросы газотермодинамики энергоустановок. Харьков: Изд-во Вища школа, 1978, вып. 5, с. 85—89.
3. Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи. М.: Мир, 1972, с. 39.

Харьковский авиационный  
институт им. Н. Е. Жуковского

Поступила в редакцию  
27.I.1982