

Э.А. ДАСТАКЯН, Р.С. ОВСЕПЯН, Д.Р. ОВСЕПЯН,
А.М. МЕЛИКДЖАНИЯН

АКТИВНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ОДНОМЕРНОЙ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В ДВИЖУЩЕЙСЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

Рассматривается одномерная задача активной компенсации шума в трубе при поступательно движущейся однородной воздушной среде. Выявлено, что при скоростях потока, больших скорости звука, как в длинных трубах, так и в трубах конечной длины не возникает акустическая обратная связь.

Ключевые слова: активная компенсация шума, акустическая обратная связь, плоская волна, монополь, диполь, волновод, труба, громкоговоритель, микрофон.

При активной компенсации шума (АКШ) акустическая обратная связь (АОС) между компенсирующими излучателями и управляющими их работой приемниками при определенных условиях приводит к генерации системы контроля и срыву процесса гашения. Устранения или ослабления АОС можно добиться сведением к минимуму воздействия излучателя на приемник, выделением компенсирующего шума из суммарного сигнала (формируемого источником шума и компенсирующим излучателем) и соответствующими схемными решениями электрического тракта системы гашения.

В реальных системах ослабления АОС можно добиться увеличением количества дискретно распределенных однонаправленных излучателей, формирующих поверхности Гюйгенса [1-5]. Однако увеличение количества компенсаторов приводит к усложнению системы контроля.

Ослабление АОС проще осуществить в длинных одномодовых волноводах с применением однонаправленных излучателей и приемников [3,6,7]. В работе [6] в качестве однонаправленного приемника (излучателя) использованы два идентичных приемных (излучающих) монополя, расположенных в разных сечениях волновода. При этом для каждого монополя введены определенные сдвиги фаз. Однонаправленность приемника (излучателя) можно также формировать расположением монополя и диполя в одном сечении волновода [7].

АОС можно ослабить также установлением микрофона между двумя громкоговорителями, которые располагаются вдоль трубы на расстоянии половины длины подавляемой волны [8]. При этом микрофон воспринимает лишь уровень звукового давления гасимого звука.

Для более эффективной компенсации звука предлагается использовать две подобные схемы формирования гасящего звукового колебания, в которых электроакустические преобразователи расположены один за другим вдоль оси канала [9].

Указанными путями с применением однонаправленных излучателей и приемников гашение звука без АОС можно производить в открытом пространстве или в длинных трубах. При наличии отражающих поверхностей возможна связь между

приемником и излучателем. В частности, в трубе конечной длины отражения от ее концов могут привести к неустойчивости системы гашения. В этом случае ослабления АОС можно добиться соответствующим расположением приемника (микрофона) относительно компенсатора (громкоговорителя) [10]. Микрофон располагается в точке, где наблюдается минимальный уровень звукового давления поперечных мод, возбуждаемых громкоговорителем. При этом критерий устойчивости Найквиста соблюдается лишь в определенном диапазоне частот.

В трубе конечной длины отражения от ее концов при применении даже однонаправленных излучателей и приемников приводят к возникновению АОС. Кроме этого, изменения в окружающей среде (отражения от различных поверхностей в среде) через концы трубы влияют на стабильность работы системы гашения. Устранения этих недостатков можно добиться выделением первичной волны источника шума при помощи двух микрофонов, воспринимающих суммарное звуковое давление от излучателя и источника шума [11]. При этом минимальная длина трубы ограничивается необходимостью формирования компенсатором плоской волны. Однако данным способом невозможно произвести компенсацию в широких трубах, помещениях, в открытом пространстве при наличии отражающих поверхностей. Кроме того, изменение отражательной способности входа трубы может привести к неустойчивости системы.

Устранения АОС можно добиться (помимо указанных акустических мер) также соответствующими схемными решениями электрического тракта системы гашения. В системе АКШ приемник (микрофон) воспринимает сигналы от компенсатора (громкоговорителя) и источника шума. Из суммарного сигнала микрофона в электрической цепи системы вычитается вклад громкоговорителя, и на его вход подается лишь сигнал источника шума, чем и достигается вышеуказанная цель [12-14]. Однако изменение характера шума или изменения в среде гашения (изменения температуры, характера отражений и т.п.) приводят к возникновению АОС.

Вышеуказанные меры по устранению АОС имеют ограничения, которые не во всех случаях позволяют добиться положительного результата.

В движущихся средах при определенных скоростях АОС не возникает, что можно использовать для упрощения процесса гашения.

Рассмотрим одномерную задачу гашения звуковых колебаний, распространяющихся в однородной поступательно движущейся воздушной среде в трубе бесконечной длины.

Пусть в трубе бесконечной длины с жесткими стенками воздушный поток движется со скоростью V (рис.). Предположим, что под действием внешней силы (источник силы неподвижен относительно стенок трубы) частицы среды в сечении $z = 0$ колеблются с одинаковой скоростью

$$v = v_0 e^{i\omega t}. \quad (1)$$

Тогда в положительном и отрицательном направлениях оси Z от точки 0 распространяются одномерные гармонические плоские волны [15, с.332]. При этом внешние силы не препятствуют прохождению волн через сечение $z = 0$.

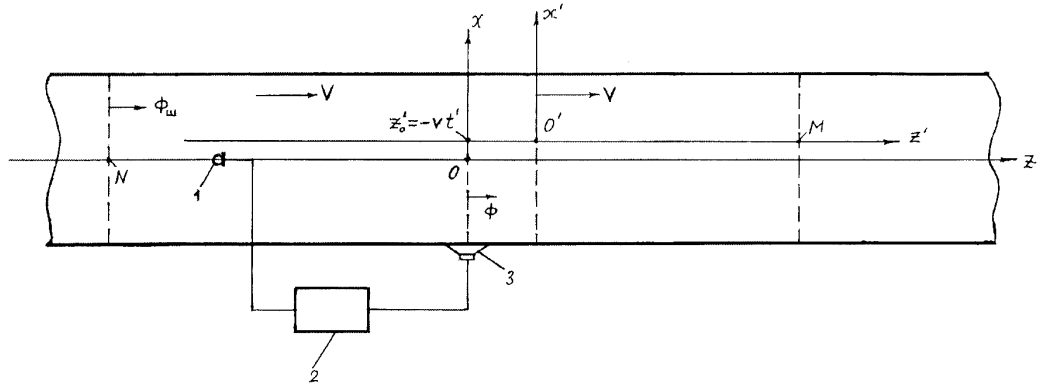


Рис. Компенсация волны в одномерной трубе

В системе координат $O'Z'$, движущейся со скоростью V вместе с потоком ($O'Z'$ неподвижна относительно движущейся среды), звуковое поле в трубе, согласно [15-17], описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z'^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где Φ – потенциал скорости.

Источник (1), формирующий данное звуковое поле, движется в отрицательном направлении оси $O'Z'$ со скоростью V и в моменты времени t' с точек сечения $z'_0 = -Vt'$ излучает звуковые волны, которые достигают сечения $z = z'_M$ в моменты времени t . Поэтому для волн, распространяющихся в положительном направлении оси Z' , граничное условие для уравнения (2), согласно (1), представляется в виде

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z'} \right|_{z' = -Vt'} = -v_0 e^{i\omega t'}.$$

Тогда решение уравнения (2) будет

$$\Phi = \frac{v_0}{ik} e^{i(\omega' t - k' z)}, \quad (3)$$

$$\text{где } \omega' = \frac{\omega}{1 + \frac{V}{c}}, \quad k' = \frac{\omega'}{c}, \quad k = \frac{\omega}{c}.$$

Если перейти к неподвижной системе координат OZ , используя связь между системами $z = z' + Vt$, то выражение (3) принимает следующий вид:

$$\Phi = \frac{v_0}{ik} e^{i\left(\omega t - \frac{\omega}{c+V} z\right)} \quad (z \geq 0). \quad (4)$$

Следовательно, колебания, возбуждаемые сторонними силами в сечении $z = 0$, передаются в точку наблюдения z со скоростью $c + V$ (при волне, распространяющейся в положительном направлении оси z) без изменения частоты колебания ω в неподвижной системе координат. Отметим, что выражение (4) можно было получить, используя запаздывающие потенциалы [18].

Для волны, распространяющейся в отрицательном направлении оси OZ вышеизложенным путем при граничном условии

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{z' = -Vt'} = v_0 e^{i\omega t'},$$

выражение для потенциала скорости можно представить в виде

$$\Phi = \frac{v_0}{ik} e^{i\left(\omega t + \frac{\omega}{c+V}z\right)} \quad (z \leq 0). \quad (5)$$

При $V < c$ в трубе устанавливаются две волны (4) и (5), распространяющиеся от точки 0 (см. рис.) в противоположных направлениях. При $V \ll c$ эти выражения описывают звуковые поля в неподвижной среде.

При $V = c$ время передачи колебания (5) в точку наблюдения z (отрицательные значения z) будет бесконечно большой величиной ($\tau = \frac{z}{c-V} = \infty$).

Поэтому колебания не будут достигать данной точки. В этом случае существует одна волна (4), распространяющаяся от точки $z = 0$ в положительном направлении оси z .

При $V > c$ знак перед вторым членом в скобке выражения (5) меняется на противоположный. В этом случае выражение (5) описывает колебание, распространяющееся со скоростью $V - c$, только в положительном направлении оси z . Колебания, излучаемые из точек сечения $z = 0$ в отрицательном направлении оси z , при $V > c$ как бы сносятся потоком воздуха и распространяются в положительном направлении.

Тогда при $z > 0$ будет распространяться следующая волна:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{v_0}{ik} \left[e^{i\omega\left(t - \frac{z}{c+V}\right)} + e^{i\omega\left(t - \frac{z}{V-c}\right)} \right] = \\ &= \frac{2v_0}{ik} \cos \frac{\omega z}{c\left(\frac{V^2}{c^2} - 1\right)} e^{i\omega\left[t - \frac{z}{V(1-c^2/V^2)}\right]}. \end{aligned} \quad (6)$$

Следовательно, возбуждая в сечении трубы $z = 0$ звуковые колебания, справа от этого сечения можно сформировать звуковые поля (4) и (6) соответственно при $V = c$ и

$V > c$, а слева – звуковую тень. При $V < c$ звуковая тень не образуется. Иначе, в трубе при $V \geq c$ возможно лишь одностороннее излучение звуковых колебаний.

Такое формирование звукового поля при $V \geq c$ можно использовать для устранения АОС в системах АКШ.

Колебания, возбуждаемые источниками шума в трубе при $V \geq c$, могут быть как вида (4), так и (6). Рассмотрим случай плоской волны, распространяющейся от сечения $Z = Z_N$ в положительном направлении оси Z трубы (см. рис.). Согласно (4), его можно представить в виде

$$\Phi_N = A_N e^{i\omega\left(t - \frac{z + |z_N|}{c + V}\right)},$$

где

$$A_N = \frac{v_0}{ik}, \quad z \geq -z_N. \quad (7)$$

Выявим возможность компенсации волны (7) колебаниями (4), (6), возбуждаемыми вышеуказанными внешними сигналами, при различных значениях скорости потока V .

1. При $V = c$, согласно (4), можно сформировать плоскую волну

$$\Phi = A e^{i\left[\omega\left(t - \frac{z}{2c}\right)\right]}, \quad z > 0, \quad A = \frac{v_0}{ik}. \quad (8)$$

При наложении звуковых полей (7) и (8) в области $z > 0$ наблюдается их полная компенсация, когда соблюдаются условия

$$A_N = A, \quad \varphi = \omega|z_N|/2c + \pi(2n+1), \quad n = 0, 1, 2... \quad (9)$$

2. При $V > c$ поле источника шума (7) компенсируется полем (6) в области $z > 0$ при соблюдении следующих условий:

$$A_N = K \cdot A, \quad \text{где} \quad A = \frac{2V_0}{ik} \cos \frac{kz}{\frac{V^2}{c^2} - 1}, \quad K = \frac{1}{2 \cos \frac{kz}{\frac{V^2}{c^2} - 1}}, \quad (10)$$

$$\varphi = \pi(2n+1) + \omega|z_N|/V + c - \omega z c / V^2 - c^2, \quad n = 0, 1, 2...$$

Из (10) видно, что фаза φ и коэффициент усиления компенсирующего сигнала K зависят от Z . Поэтому подавление колебания с заданной степенью компенсации возможно в отдельных областях по длине трубы. В частности, возможна компенсация колебаний, излучаемых с выхода трубы. Условия компенсации определяются выражениями (10) при подстановке в них координаты конца трубы ($Z = l$). Отметим, что не наблюдается обратная волна, отраженная от конца трубы, так как она выносится наружу потоком воздуха.

Как отмечено выше, источники шума могут формировать в трубе при $V > c$ также волну типа (6). Допустим, волна распространяется от сечения $Z = Z_N$ в положительном направлении оси Z . Тогда поле источника шума определяется выражением (6), где к переменной Z прибавляется величина $|Z_N|$. Несложно показать, что сумма звукового поля источника шума и компенсирующего поля (6) равна нулю (т.е. происходит их полная взаимная компенсация) в области $Z > 0$ при соблюдении условий

$$\frac{\omega |Z_N| c}{V^2 - c^2} = 2\pi n, \quad \varphi = \frac{|Z_N| \omega V}{V^2 - c^2} + \pi(2n+1), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

где Φ – фаза компенсирующей волны.

Из (11) вытекает, что компенсация не зависит от длины трубы в отличие от компенсации в неподвижных средах, где на ее эффективность воздействуют отражения от концов трубы. В данном случае, как показано выше, при $V \geq c$ отражения от концов трубы отсутствуют, что облегчает задачу компенсации.

Следует отметить, что если источник шума возбуждает волну типа (7), то ее можно, при необходимости, превратить в волну вида (6) и потом компенсировать ее по всей длине трубы, а также излучение с ее выхода. Такое превращение можно осуществить, формируя соответствующие ответвления трубы.

Во всех перечисленных случаях, помещая приемник звуковых колебаний (микрофон) 1 (см. рис.) в области $Z < 0$, где потенциал скорости компенсатора $\Phi = 0$, можно избежать генерации гасящей системы, так как в этом случае излучение компенсатора не попадает в микрофон, т.е. отсутствует АОС. При этом колебания источника шума воспринимаются микрофоном 1 и после соответствующей амплитудно-фазовой регулировки (соблюдение условий (9)-(11)) в блоке 2 подаются на компенсатор 3 (громкоговоритель), формирующий соответствующие колебания в сечении трубы $Z = 0$.

Необходимо отметить, что изменения в окружающей среде (температурные изменения, изменения уровня отражений от различных предметов и т.д.) не влияют на уровень компенсации, так как микрофон воспринимает лишь уровень первичного подавляемого шума. При аналогичной компенсации в неподвижной среде [6-11] указанные факторы влияют на компенсацию, так как микрофон воспринимает как первичный шум, так и отражения от концов трубы, отражения от различных предметов вне среды (при коротких трубах) и излучение от компенсатора.

Расположив микрофон вблизи громкоговорителя, можно производить АКШ простым инвертированием. Тогда система компенсации будет состоять из микрофона, инвертора и громкоговорителя в отличие от известных устройств [6-12], где требуются дополнительно громкоговорители, микрофоны, линии задержки, фильтры, блоки формирования передаточной функции электрической цепи контроля и т.п.

При скоростях потока $V < c$ между микрофоном и громкоговорителем возникает АОС. АОС можно устранить повышением скорости потока воздуха до сверхзвуковых соответствующим сужением сечения трубы или расположением в ней по ее сечению необходимого количества трубочек меньшего диаметра.

Таким образом, при сверхзвуковых скоростях потока воздуха ($V \geq c$) в трубе можно полностью устранить АОС соответствующим расположением приемника и компенсатора гасящей системы, что значительно облегчает техническую реализацию АКШ. При этом возможна полная компенсация звукового поля как в длинных трубах, так и в трубах конечной длины и излучений с их выходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Swinbanks M.A.** The active control of sound propagation in long ducts // Sound and Vibration. – 1973.- V.27, № 3.-P. 411-436.
2. **Урусовский И.А.** Об активной звукоизоляции в волноводе // Акуст. журн. – 1977.- Т. 23, № 2.- С. 304-312.
3. **Завадская М.Б., Попов А.В., Эгельский Б.Л.** Вопросы аппроксимации и устойчивости систем активного гашения с конечным числом связей // Акуст. журн. – 1977.- Т. 23, № 3.- С. 480-482.
4. **Коротаев Е.В., Тютюкин В.В.** Экспериментальное исследование активной гасящей системы плоской формы // Акуст. журн. – 2000.- Т. 46, № 1.- С. 84-88.
5. **Бойко А.И., Тютюкин В.В.** Плоская активная система гашения звука, основанная на применении двумерных пространственных гармоник // Акуст. журн. – 2004.- Т. 50, № 1.- С. 5-13.
6. **Мазанников А.А., Тютюкин В.В.** Об эффективности и устойчивости автономных активных систем гашения звука // Акуст. журн. – 1978.- Т. 24, № 5.- С. 788-790.
7. **Урусовский И.А.** О самовозбуждении системы активной звукоизоляции в волноводе // Акуст. журн. – 1977.- Т. 23, №3.- С. 437-442.
8. **Eghesadi Kh., Leventhall H.G.** Active attenuation of noise: the Chelsea dipole // Sound and Vib. – 1983.- V. 75, №1.- P. 127-134.
9. **Hong W.K.W., Eghesadi Kh., Leventhall H.G.** The tandem tight-coupled active noise attenuator in a duct // Acoust. Lett. – 1982.- V. 6, № 2.- P. 19-24.
10. **Trinder M.C.J., Nelson P.A.** Active noise control in finite length ducts // Sound and Vib. – 1983.- V. 89, № 1.- P. 95-105.
11. **Liu S., Juan J., Fung K.-Y.** Robust active control of broadband noise in finite ducts // Acoust. Soc. Am. – 2002.-V. 111, № 6.- P. 2727-2734.
12. **Nelson P.A., Elliott S.J.** Active control of Sound.-London: Academic Press Ltd., 1992.
13. **Leboucher E., Micheau P., Berry A., L'Esprance A.A.** Stability analysis of a decentralized adaptive feedback active control system of sinusoidal sound in free space // Acoust. Soc. Am. – 2002.- V. 111, № 1.- P. 189-199.
14. А.с. 590807 СССР. МКИ G10K 11/00. Устройство для подавления шума / **Р.С. Овсепян, Э.А. Дастакян, Т.Г. Гаспарян, Э.А. Нагапетян.** - Оpubл. 30.01.78.- Бюл. № 4.
15. **Лепендин Л.Ф.** Акустика.- М.: Высшая школа, 1978.- 448 с.
16. **Докучаев В.П.** Энергия и сопротивление излучения движущегося акустического монополя // Акуст. журн. – 1996.- Т. 12, № 1.- С. 112-114.

17. **Блохинцев Д.И.** Акустика неоднородной движущейся среды .- М.: Наука, 1981.- 208 с.
18. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теория поля.- М.: Наука, 1973.- 504 с.

“Канакер-Зейтун” МЦ ЗАО НИИ гигиены и профзаболеваний. Материал поступил в редакцию 10.03.2008.

**Է.Ա.ԴԱՍՏԱԿՅԱՆ, Ռ.Ս.ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, Դ.Ռ.ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ,
Ա.Մ.ՄԵԼԻՔՉԱՆՅԱՆ**

**ՄԻԱՉԱՓ ՉԱՅՆԱՅԻՆ ԱԼԻՔԻ ԱԿՏԻՎ ԿՈՄՊԵՆՍԱՑՈՒՄԸ ՇԱՐԺՎՈՂ ՕՂԱՅԻՆ
ՄԻՋԱՎԱՅՐՈՒՄ**

Դիտարկվում է խողովակում համասեռ օդային հոսքի դեպքում ԱԱԿ-ի միաչափ խնդիրը: Սահմանված է, որ հոսքի գերձայնային արագությունների դեպքում ՁՀԿ-ը չի առաջանում ինչպես երկար, այնպես էլ վերջավոր երկարության խողովակներում:

Առանցքային բառեր. աղմուկի ակտիվ կոմպենսացիա, ձայնական հետադարձ կապ, հարթ ալիք, մոնոպոլ, դիպոլ, ալիքատար, խողովակ, բարձրախոս, միկրոֆոն:

**E.A. DASTAKYAN, R.S. HOVSEPYAN, D.R. HOVSEPYAN,
A.M. MELIQJANYAN**

**ACTIVE CONTROL OF ONE-DIMENSIONAL SOUND WAVE IN MOVING
ENVIRONMENT**

One-dimensional problem of active control of sinusoidal sound oscillations in progressively moving homogeneous air environment of duct is considered. It is shown that AF doesn't appear both in long and in finite ducts at velocities of air stream greater than sound velocity.

Keywords: active noise control, acoustic feedback, plane wave, monopole, dipole, waveguide, duct, loudspeaker, microphone.