

Ю. М. СУХАРЕВСКИЙ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ЗАКРЫТОМ ПОМЕЩЕНИИ

(Представлено академиком С. И. Васильевым 29 XII 1939)

1. В моей предыдущей работе ⁽¹⁾ был дан теоретический анализ акустической обратной связи (а. о. с.) в звукоусилительных системах, работающих на открытом воздухе и в закрытом помещении. Было показано, что звукоусилительная система, состоящая из одного громкоговорителя и одного микрофона и работающая в закрытом помещении, ведет себя аналогично системе с полубесконечной цепочкой громкоговорителей, работающей в открытом пространстве, при условии, что коэффициент обратной связи в цепи n -ного громкоговорителя цепочки определяется выражением $\mu_n = \mu_0 g^{n-1}$ (μ_0 — коэффициент обратной связи в цепи первого громкоговорителя, g — коэффициент, соответствующий коэффициенту отражения в помещении). Были рассмотрены два крайних случая: а) случай полной синфазности у микрофона всех приходящих к нему волн, которому соответствует простая сумма амплитуд давлений отдельных волн, и б) случай равной вероятности любой фазы в каждой приходящей к микрофону волне, которому соответствует сумма энергий всех волн и квадратичное сложение амплитуд давлений. Для обоих случаев были выведены выражения, определяющие увеличение давления $\left(\frac{p}{\mu p_0}\right)$ и времени реверберации $\left(\frac{T_r}{T}\right)$ в системе, обусловленное а. о. с. Приведем эти выражения, поскольку они потребуются в дальнейшем изложении.

Для случая синфазности всех волн

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 - g}, \quad (1)$$

$$\frac{p}{\mu p_0} = \frac{1}{1 - \mu}, \quad (2)$$

$$\frac{T_r}{T} = \frac{\ln g}{\ln [\mu + g(1 - \mu)]}. \quad (3)$$

Для случая равной вероятности всех фаз

$$\mu = \frac{\mu_0}{(1 - g^2)^{1/2}}, \quad (4)$$

$$\frac{p}{\mu p_0} = \frac{1}{(1 - \mu^2)^{1/2}}, \quad (5)$$

$$\frac{T_r}{T} = \frac{\ln(1 - \alpha)}{\ln[1 - \alpha(1 - \mu^2)]}. \quad (6)$$

Здесь (для звукоусилительной системы, работающей в закрытом помещении) ρ —суммарный коэффициент обратной связи системы, ρ_0 —коэффициент обратной связи, учитывающий воздействие на микрофон только прямого звука громкоговорителя, g —средний коэффициент отражения по амплитуде, $\alpha = (1-g^2)$ —средний коэффициент поглощения, p —полное давление (у микрофона) от прямого звука громкоговорителя и от отраженного звука, p_0 —давление (у микрофона) от постороннего источника, T_r —время регенеративной реверберации, обусловленной а. о. с., T —время естественной реверберации помещения.

2. Так как разработанная теория а. о. с. в закрытом помещении рассматривает только крайние из возможных соотношений между фазами входящих к микрофону волн, то весьма интересным представлялось, во-первых, установить насколько упомянутые соотношения соответствуют реальным условиям, а во-вторых, проверить выводы теории а. о. с., базирующейся на этих соотношениях, экспериментальным путем. Так называемая статистическая теория накопления звуковой энергии в помещениях исходит из условия равновероятности любой фазы, которому соответствует принцип суммации энергий. Применение этого принципа при рассмотрении общего запаса энергии в помещении вполне законно, и в этом отношении опыт хорошо подтверждает статистическую теорию. Однако поведение звукоусилительной системы определяется не общим (и, следовательно, средним) состоянием в помещении, а состоянием в одной точке помещения, именно в точке расположения микрофона. Относительно этого состояния известно, что для отдельных точек помещения (или для отдельных частот в данной точке) оно может резко отличаться от среднего. При данной средней величине давления в помещении эффект а. о. с. будет выражен тем сильнее, чем больше величина максимумов давления в точке расположения микрофона. Наибольший из возможных максимумов соответствует условию полной синфазности всех волн в рассматриваемой точке помещения. Можно показать, что отношение определенного при этом условии максимального давления к среднему имеет следующий вид:

$$\frac{p_{\max}}{p_{\text{ср}}} = \left(\frac{1+g}{1-g} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

График фиг. 1 показывает возрастание этого отношения с увеличением g . При условии равновероятности любой фазы, очевидно, $\frac{p_{\max}}{p_{\text{ср}}}$ должно быть равным 1. Экспериментальное определение $\frac{p_{\max}}{p_{\text{ср}}}$, однако, дает результаты, не согласующиеся с результатами вычислений по формуле (7). Полученная опытным путем величина этого отношения оказывается значительно меньшей вычисленной по формуле (7) и она не обнаруживает заметной зависимости от среднего коэффициента поглощения, равно как и от частоты. К такому выводу, например, приводит анализ осциллограмм, имеющихся в работе Фрея (2). Эти осциллограммы представляют запись изменения давления при перемещении измерительного микрофона в различных направлениях по прямоугольному помещению объемом около 300 м³. В табл. 1 приведены величины $\frac{p_{\max}}{p_{\text{ср}}}$, вычисленные по данным Фрея*.

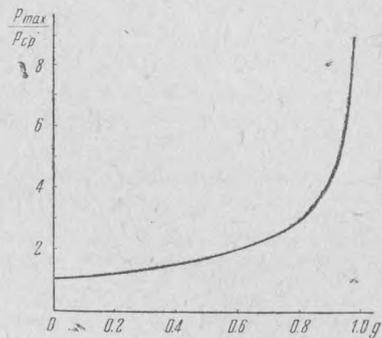
В результате произведенного мною в помещении с объемом в 1 850 м³ исследования звукового поля при различных частотах получены величины

* Величина среднего давления, соответствующего $p_{\text{ср}}$ формулы (7), определялась как средняя квадратичная записанных амплитуд давления.

$\frac{P_{\max}}{P_{\text{ср}}}$ того же порядка, что и приведенные в табл. 1*. Так, например, при частоте 500 Нз и $g=0,91$ получено $\frac{P_{\max}}{P_{\text{ср}}}=2,0$; при частоте 1 000 Нз и примерно том же поглощении получено $\frac{P_{\max}}{P_{\text{ср}}}=2,5$ и т. д. Таким образом и объем помещения (если помещение прямоугольное и с нормальным соотношением сторон) не оказывает заметного влияния на величину $\frac{P_{\max}}{P_{\text{ср}}}$. Из графика фиг. 1 находим для $g=0,91$ величину $\frac{P_{\max}}{P_{\text{ср}}}=4,6$, которая примерно в два раза превышает найденную из опыта. Таким образом как условие полной синфазности всех волн, приходящих в данную точку помещения, так и условие равной вероятности любой фазы в каждой волне являются идеальными условиями, не имеющими места в действительности.

Таблица 1

| Частота | α | $\frac{P_{\max}}{P_{\text{ср}}}$ | Частота | α | $\frac{P_{\max}}{P_{\text{ср}}}$ |
|---------|----------|----------------------------------|---------|----------|----------------------------------|
| 384 | 0,01 | 1,95 | 128 | 0,01 | 1,9 |
| 384 | 0,2 | 2,35 | 384 | 0,01 | 2,55 |
| 384 | 0,44 | 2,2 | 1 280 | 0,02 | 2,05 |



Фиг. 1. Величина максимумов давления в помещении при различных значениях g [кривая подсчитана по формуле (7)].

3. Экспериментальное исследование а. о. с. было проведено в конференц-зале Отделения технических наук Академии Наук СССР (в Москве)**. Размеры этого зала $22 \times 14 \times 6$ м, кубатура $1\ 850$ м³ и площадь внутренних поверхностей 1050 м². Схема измерительной установки приведена на фиг. 2. Здесь M , G_1 и G_2 соответственно микрофон, основной громкоговоритель и вспомогательный громкоговоритель, расположенные в зале. Остальная часть установки, расположенная в аппаратной, состоит из генератора G_n , микрофонного усилителя MU , промежуточных усилителей $ПУ_1$, $ПУ_2$ и $ПУ_3$, регуляторов усиления $РУ_1$ и $РУ_2$, оконечных усилителей $ОУ_1$ и $ОУ_2$, осциллографа $Осц$, балластных сопротивлений $БС_1$ и $БС_2$ и ключей K_1 , K_2 и K_3 . Установка позволяла производить следующие измерения: а) Измерение коэффициента обратной связи. При этом измерении ключи K_1 и K_2 ставились в верхнее положение и усилитель $ПУ_2$ оказывался нагруженным на балластное сопротивление $БС_1$, равное входному сопротивлению усилителя $ПУ_1$, а также на балластное сопротивление $БС_2$, равное входному сопротивлению осциллографа $Осц$. Далее, на генераторе G_n набиралась нужная частота, с помощью регулятора усиления устанавливалось нужное усиление и отмечались

* Методика исследования заключалась в измерении при некоторой постоянной частоте и мощности источника звука амплитуды давления во многих точках помещения. На основании данных этих измерений определялась максимальная и вычислялась средняя квадратичная величина давления.

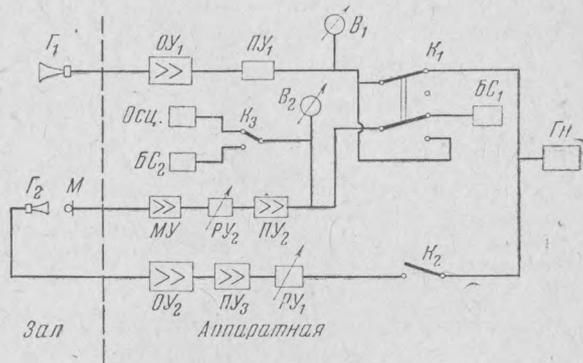
** В том же зале производилось и упомянутое выше исследование звукового поля.

показания v'_1 и v'_2 вольтметров B_1 и B_2 . Из дальнейшего будет понятно, что суммарный коэффициент обратной связи $\mu = \frac{v'_2}{v'_1}$. б) Измерение увеличения давления, обусловленного а. о. с. При этом измерении ключ K_2 ставился в нижнее положение и начинал работать вспомогательный громкоговоритель, расположенный в непосредственной близости от микрофона. Показание v'_2 вольтметра B_2 фиксировалось. Далее ключ K_1 ставился в нижнее положение и установка превращалась в звукоусилительную систему, состоящую из микрофона M , громкоговорителя Γ_1 и связывающей их электрической цепи, причем посторонним источником звука являлся громкоговоритель Γ_2 . Снова фиксировалось показание v''_2 вольтметра B_2 . Отношение $\frac{v''_2}{v'_2} = \frac{P}{P_0}$ определяет увеличение давления, обусловленное а. о. с.

в) Измерение естественной реверберации помещения. При этом измерении схема была такой же, как и при измерении коэффициента обратной связи, только дополнительно с помощью ключа K_2 включался осциллограф $Осц.$. После установления в зале стационарного состояния ключ K_2 ставился в среднее положение и работа громкоговорителя Γ_1 прекращалась, причем процесс затухания звука в зале записывался осциллографом.

г) Измерение регенеративной реверберации, обусловленной а. о. с. При этом измерении схема была такой же, как и при измерении увеличения давления (с дополнительным включением осциллографа). После установления в зале стационарного состояния перестановка ключа K_2 в среднее положение прекращала работу громкоговорителя Γ_2 и в системе микрофон — электрическая цепь — громкоговоритель Γ_1 — объем воздуха в зале, имеющей коэффициент обратной связи $\mu = \frac{v'_2}{v'_1}$, происходил процесс затухания, записывавшийся осциллографом. По осциллограммам определялось время естественной реверберации T и время регенеративной реверберации T_r и вычислялось отношение $\frac{T_r}{T}$.

4. Измерения производились при различных положениях микрофона M и громкоговорителя Γ_1 в зале, однако всегда стремились так ориентировать громкоговоритель относительно микрофона, чтобы с прямым воздействием громкоговорителя на микрофон можно было бы не считаться. Этого удавалось достигнуть, так как использовался рупорный громкоговоритель, обладающий сильно выраженным направленным действием. Исключение воздействия прямого звука и применение рупорного громкоговорителя производились с целью приблизиться к условиям, имеющим место при практическом осуществлении звукоусиления в залах. Микрофон был ненаправленного типа*. Перед измерениями была строго проверена линейность всей системы. При всех измерениях частоты выбирались таким образом, чтобы они (для данного расположения микрофона и громкогово-



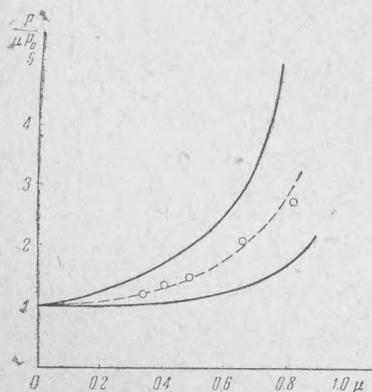
Фиг. 2. Схема измерительной установки.

* Был использован пьезоэлектрический шаровой микрофон.

рителя) соответствовали максимумам коэффициента обратной связи, совпадающим с интерференционными максимумами в помещении, т. е. всегда исследовался случай, более близкий к случаю синфазности всех волн, приходящих к микрофону, чем к случаю, характеризуемому каким-либо другим соотношением между фазами отдельных волн. При этих условиях

Таблица 2

| № наблюд. | Частота | $\mu = \frac{c_2'}{c_1}$ | T (из осциллограмм) | α | g | $\frac{P}{\mu P_0} = \frac{c_2'''}{c_2''}$ | $\left(\frac{P}{\mu P_0}\right)'$ | $\left(\frac{P}{\mu P_0}\right)''$ | $\frac{T_r}{T}$ (из осциллограмм) | $\left(\frac{T_r}{T}\right)'$ | $\left(\frac{T_r}{T}\right)''$ |
|-----------|---------|--------------------------|--------------------------|----------|-------|--|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 290 | 0,57 | 1,8 | 0,145 | 0,925 | — | — | — | 3,6 | 2,0 | 1,5 |
| 2 | 455 | 0,7 | 1,5 | 0,175 | 0,91 | 3,2 | 1,4 | 3,35 | 4,65 | 3,2 | 2,05 |
| 3 | 460 | 0,86 | 1,5 | 0,175 | 0,91 | 5,6 | 2,0 | 7,1 | 7,3 | 4,85 | 4,1 |
| 4 | 620 | 0,89 | 1,2 | 0,21 | 0,89 | 4,65 | 2,2 | 9,0 | 6,25 | 5,15 | 4,9 |
| 5 | 890 | 0,7 | 1,12 | 0,22 | 0,88 | — | — | — | 2,8 | 2,5 | 2,05 |
| 6 | 890 | 0,84 | 1,12 | 0,22 | 0,88 | — | — | — | 5,2 | 4,65 | 3,65 |
| 7 | 920 | 0,7 | 1,12 | 0,22 | 0,88 | — | — | — | 5,45 | 2,2 | 2,05 |
| 8 | 4 500 | 0,7 | 0,7 | 0,33 | 0,82 | — | — | — | 3,3 | 4,7 | 2,15 |
| 9 | 4 500 | 0,79 | 0,7 | 0,33 | 0,82 | 2,35 | 1,45 | 3,6 | 4,4 | 6,3 | 3,0 |



Фиг. 3. Увеличение давления, обусловленное а. о. с., для различных μ при частоте 980 Нз.

Эйринга. Величины $\left(\frac{P}{\mu P_0}\right)'$ и $\left(\frac{T_r}{T}\right)'$ вычислены в предположении равно-

вероятности любой фазы по формулам (2) и (3), а величины $\left(\frac{P}{\mu P_0}\right)''$ и $\left(\frac{T_r}{T}\right)''$ вычислены в предположении синфазности всех волн по формулам (5) и (6).

На графике фиг. 3 кружками показаны величины $\frac{P}{\mu P_0}$, полученные в результате измерений, для различных μ при частоте 980 Нз и $\alpha = 0,235$. Верхняя кривая фиг. 3 вычислена по формуле (2), нижняя кривая — по формуле (5).

6. Данные табл. 2 и график фиг. 3 показывают, что полученные экспериментально величины $\frac{P}{\mu P_0}$ всегда лежат в пределах, определяемых выражениями (2) и (5). Измеренные же величины $\frac{T_r}{T}$ лежат в пределах, определяемых выражениями (3) и (6) только в большинстве случаев, но не всегда. Это объясняется тем, что величина $\frac{P}{\mu P_0}$ при заданном μ целиком определяется

результаты исследования должны представлять наибольший интерес. Действительно, влияние а. о. с. на работу системы, в основном, определяется поведением системы именно при частотах, соответствующих максимумам коэффициента обратной связи, так как воспроизведение этих частот сопровождается наиболее сильно выраженными частотными и реверберационными искажениями, а при достаточном увеличении усиления система начинает генерировать на этих же частотах.

5. Результаты измерений частично представлены в табл. 2 (колонки 3, 4, 7, 10), коэффициенты α и g вычислены на основании измеренного времени реверберации T и геометрических данных зала по формуле

фазовыми соотношениями, крайние случаи которых рассмотрены в теории, величина же $\frac{T_r}{T}$ зависит не только от фазовых соотношений, но и от временной картины отраженных волн. В теории рассмотрен только тот случай, при котором постепенно уменьшающиеся по амплитуде отраженные волны приходят к микрофону через равные промежутки времени. На практике, однако, это условие не всегда имеет место. Если, например, громкоговоритель имеет резко выраженную направленность (как наш рупорный громкоговоритель при частоте 4 500 Hz), то можно его ориентировать относительно микрофона таким образом, что звуковые волны большой интенсивности попадут в микрофон только после нескольких отражений. В этом случае длина среднего акустического пути от громкоговорителя к микрофону будет значительно больше того среднего пути, который соответствует равномерному затуханию амплитуды от громкоговорителя к громкоговорителю в рассмотренной в теории бесконечной цепочке. При этом условии время регенеративной реверберации может превысить величину, определяемую формулой (3). Подобный случай, очевидно, имел место в наблюдениях 8 и 9 (см. табл. 2). Аналогичным образом отражается на времени регенеративной реверберации отсутствие прямого звука, что нужно учитывать при сопоставлении опытных данных с теорией. Наконец, по тем же причинам при одинаковых μ , α и $\frac{p}{p_0}$ можно получить различные $\frac{T_r}{T}$.

7. Интересным представлялось выяснить различимость искажений, обусловленных а. о. с. Соответствующие эксперименты показали, что критическая величина $\frac{T_r}{T}$, при превышении которой появляются заметные искажения и, в частности, «позванивание», сильно зависит от частоты возбуждаемых собственных колебаний, а также от характера передачи. Если эта частота лежит в области частот, на которую падает основная часть энергии в передаваемом звуковом материале, то критическая величина $\frac{T_r}{T}$ относительно мала. В обратном случае она значительно больше. При передаче речи и частоте собственных колебаний, обусловленных а. о. с., равной 1 200 Hz, критическая величина $\frac{T_r}{T}$ для мужского голоса оказалась равной 4,5, а для женского голоса равной 3,0. При частоте собственных колебаний 600 Hz критическая величина $\frac{T_r}{T}$ соответственно оказалась равной 2,1 и 1,7.

Вопросам использования полученных формул и экспериментальных данных для расчетов звукоусилительных установок и, в частности, для определения предельно-возможного (в данных условиях) усиления звука посвящены мои следующие работы, сданные в печать.

Настоящая работа была поставлена Физическим институтом АН СССР совместно с Управлением строительства Дворца Советов, бригаде работников которого в составе М. И. Рабиновича, Н. С. Антонова, А. И. Быковой и С. А. Райзмана я приношу благодарность за помощь в проведении экспериментов.

Физический институт
Академия Наук СССР
Москва

Поступило
21 I 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Ю. М. Сухаревский, ДАН, XXVI, № 5 (1940). ² H. J. Frei, Electroakustische Untersuchungen in Hallräumen (1936).