

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Ю. М. СУХАРЕВСКИЙ

О ПРЕДЕЛЬНО ВОЗМОЖНОМ УСИЛЕНИИ ЗВУКА НА ОТКРЫТОМ ВОЗДУХЕ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 2 II 1940)

1. В моих предыдущих работах был дан теоретический анализ акустической обратной связи (а. о. с.) в звукоусилительных системах⁽¹⁾ и приведены результаты экспериментального исследования а. о. с. в закрытом помещении⁽²⁾. Использование этих работ позволяет разрешить вопрос о предельно возможном усилении звука. Будем характеризовать усиление звука «степенью усиления», которую определим как разность между средним для обслуживаемой аудитории уровнем силы звука, создаваемого громкоговорителем, и уровнем силы звука у микрофона от источника звука, подлежащего усилению. Если первую силу звука обозначить I_a , а вторую — I_0 , то степень усиления звука

$$K = 10 \lg \frac{I_a}{I_0}. \quad (1)$$

Обязательное условие отсутствия самовозбуждения системы, т. е. условие $\mu < 1$ (μ — коэффициент обратной связи), определяет идеальный предел степени усиления звука, однако реальный предел лежит значительно ниже, так как и при $\mu < 1$, но близком к 1, практическое использование системы невозможно из-за сильных частотных и реверберационных искажений, обусловленных а. о. с. Если экспериментально установлена максимально допустимая величина искажений, то, пользуясь выведенными формулами⁽¹⁾, можно определить соответствующий максимально допустимый коэффициент обратной связи. Дальнейшая задача сводится к исследованию факторов, определяющих при данном коэффициенте обратной связи и данных акустических условиях, в которых работает система, величину предельно возможной степени усиления звука. Так как акустические условия при работе звукоусилительной системы на открытом воздухе и в закрытом помещении сильно различаются, то целесообразно рассматривать эти два случая отдельно. Первый из них рассматривается в настоящей работе.

2. Определим предельно возможную степень усиления звука в простейшей звукоусилительной системе*, работающей на открытом воздухе. Такая система схематически изображена на фиг. 1, где G — громкоговоритель, ось которого образует угол ϑ с вертикалью подвеса, U — усилитель, PU — регулятор усиления, M — микрофон, I — источник звука, подлежащего усилению. Введем понятие «коэффициент усиления» (δ),

* Здесь, как и далее, рассматриваются только линейные системы.

под которым будем понимать отношение давления, развиваемого громкоговорителем в некоторой точке пространства, к давлению у микрофона от источника звука, подлежащего усилению, при малом μ , т. е. при практическом отсутствии а. о. с. *. Предположим сначала, что имеют место условия, при которых δ не зависит от частоты и, кроме того, постоянен для всех точек расположения слушателей и микрофона. Предположим, далее, что при этом μ зависит от частоты (хотя бы за счет зависимости от частоты направленного действия микрофона) и что $\mu_{\max} = \delta$. Тогда искажения, обусловленные а. о. с., характеризуются временем регенеративной реверберации T_r , связанным с μ_{\max} соотношением (1)

$$T_r = \frac{-6,9 h}{c \cos \varphi \ln \mu_{\max}}, \quad (2)$$

а частотные искажения с достаточной точностью** можно характеризовать увеличением давления (за счет а. о. с.), которое определяется выражением (1)

$$\frac{p}{\mu_{\max} p_0} = \frac{1}{1 - \mu_{\max}}, \quad (3)$$

где φ —угол, образуемый отрезком, соединяющим громкоговоритель с микрофоном и вертикалью, проходящей через громкоговоритель (на фиг. 1 угол $\varphi = 0$), $\frac{h}{\cos \varphi}$ —расстояние между громкоговорителем и микрофоном, c —скорость звука, p —полное давление у микрофона от громкоговорителя G при частоте, для которой μ максимален, p_0 —давление у микрофона от источника I , μ_{\max} —максимальный (в пределах воспроизводимой полосы частот) коэффициент обратной связи.

3. Если максимально допустимые значения T_r и $\frac{p}{\mu_{\max} p_0}$ установлены, то, определив по формулам (2) и (3) μ_{\max} и взяв меньшее из полученных значений, можно найти предельно возможную степень усиления из выражения:

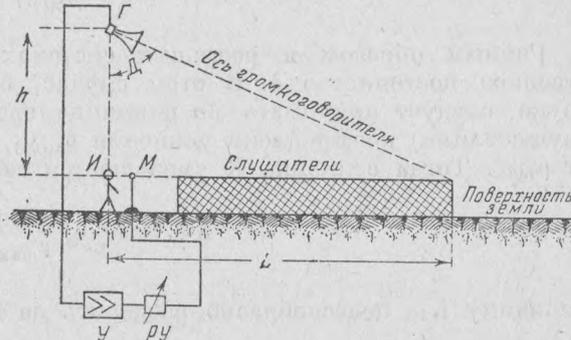
$$K_{\mu} = 20 \lg \delta = 20 \lg \mu_{\max}. \quad (4)$$

Условие независимости δ от частоты, вследствие непостоянства чувствительности аппаратуры, в реальных системах не выполняется. В этом случае силой звука I_a , характеризующей уровень у слушателей, является средняя в некотором диапазоне частот*** сила звука, которой соответствует некоторый $\delta_{\text{ср}}(f)$. Если $\delta_{\text{ср}}(f) = \mu_{\max}$, то предельно возможная

* Очевидно, что в точке расположения микрофона $\delta = \mu$, если, конечно, микрофон не имеет направленности. Следует отметить, что в одной из моих предыдущих работ [ДАН, XXVI, № 5 (1940)] в нескольких случаях ошибочно написано «коэффициент усиления μ », тогда как там речь идет не о коэффициенте усиления, а о коэффициенте обратной связи.

** При этом предполагается, что для частот, отличающихся от той, при которой $\mu = \mu_{\max}$, коэффициент обратной связи очень мал.

*** Этот диапазон охватывает ту часть воспроизводимого системой диапазона частот, на которую падает основная доля энергии усиливаемых сигналов.



Фиг. 1. Схема звукоусилительной установки, работающей на открытом воздухе.

степень усиления, определенная выражением (4), уменьшается на величину*

$$K_f = 20 \lg \frac{\delta_{\max}(f)}{\delta_{\text{ср}}(f)}. \quad (5)$$

Равным образом в реальных системах не имеет места пространственное постоянство δ . В этом случае, определяя степень усиления звука, следует принимать во внимание средний (по площади, занятой слушателями) коэффициент усиления $\delta_{\text{ср}}(a)$, который может отличаться от δ_{\max} . Тогда величина K уменьшается еще на

$$K_{\delta M} = 20 \lg \frac{\delta_{\text{ср}}(a)}{\delta_{\max}}. \quad (6)$$

Величину $K_{\delta M}$ целесообразно разделить на две части: первую часть

$$K_{\delta} = 20 \lg \frac{\delta_{\text{ср}}(a)}{\delta_M}, \quad (7)$$

обязанную направленности громкоговорителя и взаиморасположению громкоговорителя, микрофона и аудитории (т. е. углам ϑ и φ), и вторую часть

$$K_M = 20 \lg \frac{1}{R_{M(90^\circ - \varphi)}}, \quad (8)$$

обязанную направленности микрофона. Здесь δ_M —коэффициент усиления для точки расположения микрофона, $R_{M(90^\circ - \varphi)}$ —коэффициент направленности микрофона** для угла $(90^\circ - \varphi)$, т. е. в направлении на громкоговоритель (предполагается, что ось микрофона направлена горизонтально).

Наконец, следует учесть влияние отражений от поверхности земли. Если коэффициент поглощения земли равен α_z , то, принимая волну плоской, имеем для точки расположения микрофона в худшем случае (когда в этой точке получается пучность стоячей волны) повышенный коэффициент усиления $\delta_{\text{МС}}$, приводящий к соответствующему уменьшению предельно возможной степени усиления на величину

$$K_z = 20 \lg \frac{\delta_{\text{МС}}}{\delta_M} = 20 \lg (1 + \sqrt{1 - \alpha_z}). \quad (9)$$

Теперь можно определить действительную величину предельно возможной степени усиления. Выражение для этой величины имеет вид:

$$K = K_{\mu} - K_f + K_{\delta} + K_M - K_z. \quad (10)$$

4. Интересно установить численные значения предельно возможной степени усиления звука на открытом воздухе при обычных условиях, т. е., в частности, при типовых характеристиках направленности громкоговорителя и микрофона. Обычно применяемый громкоговоритель с экспоненциальным рупором, как было показано⁽³⁾, имеет в сравни-

* Эта величина определяет частотные искажения, обусловленные характеристиками аппаратуры (а не а. о. с.) и зависящие от ее качества.

** Коэффициент направленности микрофона представляет отношение чувствительности микрофона для звука, приходящего в некотором направлении, к чувствительности для звука, приходящего в осевом направлении.

тельно широком диапазоне частот примерно постоянную направленность и эллипсоидальную форму характеристики направленности.

При такой характеристике направленности было найдено наиболее выгодным для получения равномерного звукового поля направление оси рупора на последний ряд слушателей (как показано на фиг. 1). Если коэффициент усиления для точки пересечения оси с плоскостью, занятой слушателями, обозначить $\delta_0(a)$, то коэффициент усиления в точке расположения микрофона (4)

$$\delta_m = \frac{\cos \varphi}{\cos \vartheta} R_{\Gamma(\vartheta-\varphi)} \delta_0(a), \quad (11)$$

где $R_{\Gamma(\vartheta-\varphi)}$ —коэффициент направленности громкоговорителя*. Для эллипсоидальной характеристики направленности

$$R_{\Gamma(\vartheta-\varphi)} = \frac{(1-e^2) \cos(\vartheta-\varphi)}{1-e^2 \cos^2(\vartheta-\varphi)}, \quad (12)$$

где e —эксцентриситет эллипса, эквивалентного характеристике направленности**. Максимальный коэффициент усиления для площади, обслуживаемой громкоговорителем (4):

$$\delta_{\max}(a) = \frac{1}{2} [1 + \sqrt{1 + (1-e^2) \operatorname{tg}^2 \vartheta}] \delta_0(a). \quad (13)$$

Приближенно можно полагать

$$\delta_{\text{ср}}(a) = \left[\delta_0^2(a) + \frac{1}{3} (\delta_{\max}^2(a) - \delta_0^2(a)) \right]^{\frac{1}{2}} = \delta_0(a) \left[\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \left(\frac{\delta_{\max}(a)}{\delta_0(a)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (14)$$

тогда

$$K_s = 20 \lg \frac{\delta_{\text{ср}}(a)}{\delta_m} = 20 \lg \left\{ \frac{\left[2 + \frac{1}{4} (1 + \sqrt{1 + (1-e^2) \operatorname{tg}^2 \vartheta})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cos \vartheta}{\sqrt{3} R_{\Gamma(\vartheta-\varphi)} \cos \varphi} \right\}. \quad (15)$$

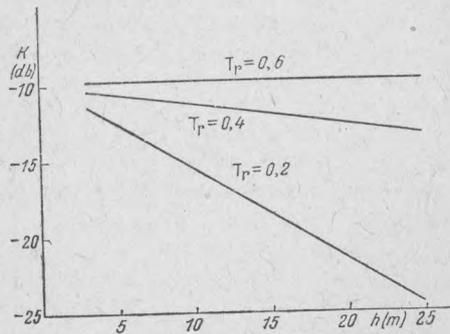
5. На графике фиг. 2 приведены кривые, показывающие зависимость предельно возможной степени усиления от высоты подвеса громкоговорителя для трех значений предельно допустимого T_r при следующих условиях: 1) громкоговоритель рупорный, с характеристикой направленности, близкой к эллипсоиду вращения; 2) ось рупора направлена на последний ряд слушателей; 3) эксцентриситет эллипса, эквивалентного характеристике направленности, $e=0,9$ (это имеет место при условии, что $\frac{\lambda_{\text{кр}}}{d_2}$ близко к 3, для частот от $4 f_{\text{кр}}$ до $24 f_{\text{кр}}$, где $\lambda_{\text{кр}}$ —критическая длина волны рупора, d_2 —диаметр его устья, $f_{\text{кр}}$ —критическая частота рупора); 4) микрофон расположен под громкоговорителем, т. е. $\varphi=0$; 5) расстояние (по горизонтали) от вертикали подвеса громкоговорителя до последнего ряда слушателей $L=100$ м; 6) слушатели и микрофон расположены в одной горизонтальной плоскости, от которой и отсчитывается высота подвеса громкоговорителя h ; 7) коэффициент поглощения земли $\alpha_3=0$; 8) величина K_f принята равной 5 дБ.

Значения K на графике фиг. 2, полученные для случая ненаправленного микрофона, легко привести к случаям односторонне направленного

* Коэффициент направленности громкоговорителя представляет отношение чувствительности громкоговорителя в некотором направлении к его осевой чувствительности.

** Для $\vartheta-\varphi > 70^\circ$ между эквивалентным эллипсом и действительной характеристикой направленности рупора получаются значительные расхождения.

ного микрофона (с кардиодной характеристикой) и двусторонне направленного микрофона (с косинусоидальной характеристикой). В первом случае $R_{M(90^\circ)} = 1$ и $K_M = 0$, во втором — $R_{M(90^\circ)} = 0,5$ и $K_M = 6$ дБ, в третьем, принимая косинусоидальную характеристику, следовало бы полагать $R_{M(90^\circ)} = 0$ и $K_M = \infty$, однако для



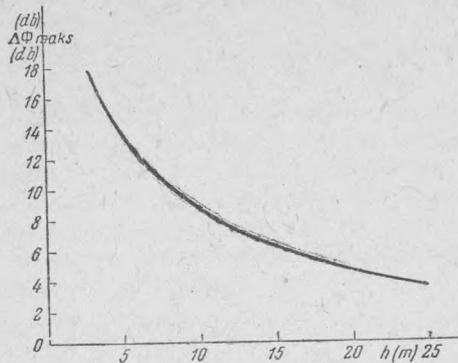
Фиг. 2. Предельно возможное усиление звука на открытом воздухе при различных высотах подвеса громкоговорителя (громкоговоритель—рупорный, микрофон—ненаправленный).

реальных двусторонне направленных микрофонов надо полагать $R_{M(90^\circ)} = 0,1$ и $K_M = 20$ дБ.

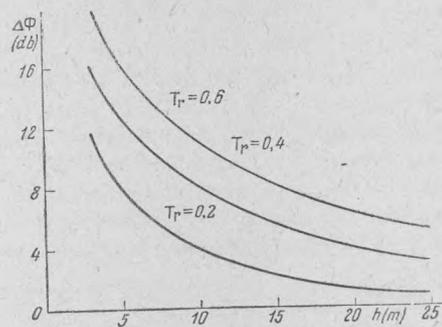
Таким образом применение направленных микрофонов значительно увеличивает предельно возможное усиление звука. Так как для всех значений h угол ϑ остается большим 70° , то коэффициент направленности рупора $R_{r(\vartheta-\varphi)}$ не мог быть вычислен по формуле (12) и был взят, в соответствии с экспериментальными данными⁽⁴⁾, равным $0,1^*$. График фиг. 3 показывает зависимость от h неравномерности звукового поля $\Delta\Phi_{\max}$, которая вычислена по формуле

$$\Delta\Phi_{\max} = 20 \lg \frac{\delta_{\max}(a)}{\delta_0(a)} = 20 \lg \frac{1}{2} [1 + \sqrt{1 + (1 - e^2) \operatorname{tg}^2 \vartheta}]. \quad (16)$$

6. График фиг. 4 дает представление о величине частотных искажений, обусловленных а. о. с., при различных h для трех значений T_r , которым



Фиг. 3. Неравномерность звукового поля рупорного громкоговорителя при различных высотах подвеса.



Фиг. 4. Частотные искажения, обусловленные а. о. с. при различных высотах подвеса громкоговорителя.

соответствуют кривые фиг. 2. На оси ординат фиг. 4 отложено увеличение давления, вычисленное по формуле (3) и выраженное в децибелах ($\Delta\Phi = 20 \lg \frac{p}{p_0}$). Экспериментальных данных, на основании которых можно было бы установить максимально допустимые значения T_r и $\frac{p}{p_0}$, до сих пор не получено, однако надо полагать, что при $T_r > 0,3-0,5$

* Этой величины коэффициент направленности рупора не превышает для углов от 70° до 110° при частотах от $4 f_{\text{нр}}$ и выше.

и $\Delta\Phi > 3-4$ дБ искажения, обусловленные а. о. с., должны быть уже заметными*.

До сих пор мы принимали характеристику направленности рупора такой, какую рупор имеет при частотах от $4 f_{кр}$ до $24 f_{кр}$. При более высоких частотах направленность излучения увеличивается и на этих частотах не приходится ожидать более сильной а. о. с., чем на средних частотах. Следует обратить внимание на частоты ниже $4f_{кр}$, при которых направленность излучения уменьшается. Можно, однако, показать, что и на этих частотах в реальных условиях не может иметь места значительное увеличение а. о. с. (по сравнению со средними частотами). Действительно, хотя коэффициент направленности рупора для углов $> 70^\circ$ при частоте $2 f_{кр}$ возрастает примерно в 3 раза (по сравнению с частотой $4 f_{кр}$), но осевое излучение при этом уменьшается** на 6—7 дБ⁽⁴⁾. Кроме того нужно принять во внимание некоторое уменьшение на нижних частотах к. п. д. рупорного громкоговорителя, а также отсутствие на этих частотах резких пиков в частотной характеристике, учтенных выражением (5). Таким образом поправки, необходимость в которых могла бы быть вызвана малой направленностью рупора на нижних частотах, можно не делать.

При использовании вместо одного громкоговорителя нескольких громкоговорителей равной мощности, расположенных веером с целью обслужить широко расположенную аудиторию, уровень силы звука у слушателей остается примерно таким же, как и в случае одного громкоговорителя, но воздействие на микрофон увеличивается. Если предположить у микрофона синфазность волн от всех громкоговорителей, то степень предельно возможного усиления звука в этом случае уменьшается по сравнению с ранее вычисленными значениями на величину

$$K_n = 20 \lg n, \quad (17)$$

где n —число громкоговорителей. Равным образом, если применяется несколько микрофонов и если при этом в каждый отдельный момент источник звука, подлежащего усилению, воздействует только на один микрофон, а остальные работают вхолостую, то степень предельно возможного усиления звука соответственно уменьшается.

7. В заключение можно предложить простой способ практической оценки полученных значений степени предельно возможного усиления звука на открытом воздухе. Если, например, предполагается усиливать речь оратора и установлено, что $K = -20$ дБ, то, полагая расстояние между микрофоном и оратором равным 1 м, можно сделать заключение, что уровень силы звука у среднего слушателя при работе звукоусилительной установки будет таким, как если бы этот слушатель (при отсутствии усиления звука) находился на расстоянии 10 м от оратора (так как сила звука обратно пропорциональна квадрату расстояния). При заданном коэффициенте усиления δ уменьшение расстояния между оратором и микрофоном в 2 раза как бы вдвое приближает слушателей к оратору**. Если оратор обладает нормальным голосом и уровень

* Такое предположение можно сделать на основании имеющихся в литературе общих данных по различимости искажений звука.

** Предполагается, что рупорный громкоговоритель работает в режиме постоянной излучаемой мощности, а не в режиме постоянного осевого давления.

*** Положительная роль приближения микрофона к оратору в отношении уменьшения эффекта а. о. с. хорошо известна из опыта. Следует отметить преимущества, получаемые с этой точки зрения при применении так называемых нагрудных или петличных микрофонов (укрепляемых на самом ораторе). Эти микрофоны распола-

шума не очень велик, то степень усиления порядка 15 дБ обеспечивает хорошую слышимость: часто, однако, требуется располагать степенью усиления порядка —5 дБ и даже 0 дБ. Приведенные выше результаты вычислений показывают, что и при таких неблагоприятных обстоятельствах применение рупорного громкоговорителя и двусторонне направленного микрофона с косинусоидальной характеристикой направленности обеспечивает в условиях открытого воздуха возможность получения достаточного усиления звука.

Физический институт
Академия Наук СССР
Москва

Поступило
2 II 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Ю. М. Сухаревский, ДАН, XXVI, № 5 (1940). ² Ю. М. Сухаревский, ДАН, XXVI, № 7 (1940). ³ Ю. М. Сухаревский, Электросвязь, № 4 (1939). ⁴ Ю. М. Сухаревский, Известия ОТН АН СССР, № 7 (1939).

гаются от рта говорящего на расстоянии, в 2—3 раза меньшем обычного микрофона, и, следовательно, обеспечивают повышение предельно возможного усиления звука на величину порядка 8 дБ.