АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XIV 1968 Вып. 2

УДК 534.843.242.6

РЕГЕНЕРАТИВНАЯ РЕВЕРБЕРАЦИЯ ПРИ ЗВУКОУСИЛЕНИИ В ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Ю. А. Индлин, В. В. Фурдуев

На основе волновой теории процесса отзвука при наличии системы звукоусиления, работающей с тем или иным запасом устойчивости, дается статистическая оценка времени регенеративной реверберации, не следующей экспоненциальному закону. Показано, что теоретический расчет хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Запас устойчивости системы звукоусиления, необходимый для подавления заметных на слух регенеративных эффектов, определяется продолжительностью и частотной характеристикой регенеративной реверберации, как это было впервые показано Сухаревским [1, 2]. При звукоусилении в закрытых помещениях, где регенеративная реверберация неотделима от присущей самому помещению, количественной мерой влияния регенерации может служить отношение T / T_0, где T — время реверберации при включенном звукоусилении, T_0 — собственная реверберация помещения. Для расчетной оценки этой величины Сухаревским предложена формула

$$\frac{T}{T_0} = \frac{\ln(1-\alpha)}{\ln[1-\alpha(1-\beta^2)]}, \qquad (1)$$

полученная методом, аналогичным методу Эйринга и приводящим к экспоненциальному закону затухания как при наличии, так и в отсутствие регенерации. В формуле (1) α есть средний коэффициент поглощения, β-коэффициент акустической обратной связи, вычисленный в предположении энергетического сложения прямого и всех отраженных сигналов, действующих на микрофон со стороны громкоговорителей.

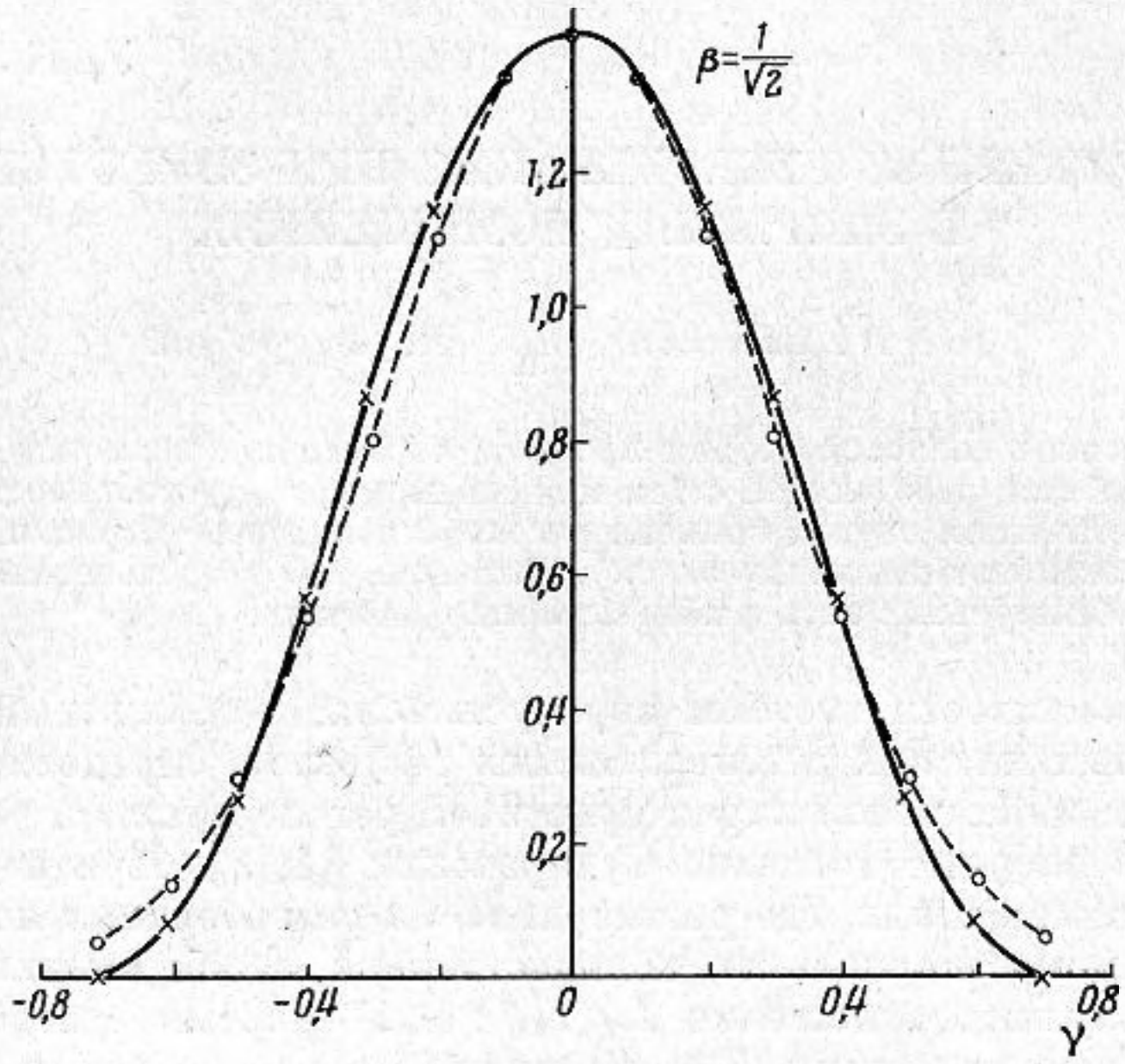
Небезынтересно сопоставить формулу (1) с выводами, которые можно получить путем статистического расчета, выполненного на основе волновой, а не геометрической теории реверберации. Нетрудно показать, что при наличии обратной связи через систему звукоусиления показатель затухания какого-либо одного из одновременно затухающих собственных колебаний воздушного объема помещения есть

$$\delta = \delta_0(1 - \beta\cos\varphi) \qquad (2)$$

(если пренебречь влиянием обратной связи, в общем случае комплексной, на собственную частоту). Здесь β и φ — модуль и фаза связи при соответственной частоте, а δ_0 — значение δ при $\beta = 0$, т. е. при выключении звукоусиления. Переходя к времени реверберации, мы имеем для рассматриваемого собственного колебания $T = \dfrac{6{,}9}{\delta} = \dfrac{T_0}{1-\beta\cos\varphi}$

Нужно иметь в виду, что даже при возбуждении синусоидальным сигналом в процессе затухания участвует целый ряд собственных колебаний,

соответствующих различным модам и занимающих область частот конечной ширины. При измерении реверберации на полосах шума число одновременно затухающих мод очень велико и занимаемая ими область частот примерно соответствует ширине спектра измерительного сигнала. Вместе с тем известно, что коэффициент электроакустической передачи синусоидального сигнала в помещении есть случайная функция частоты. Это относится и к величине $\beta \cos \varphi$, которая определяется действительной частью комплексного коэффициента передачи. Как показал Шредер [3, 4],



Фиг. 1

предположение о том, что действительная и мнимая части этого коэффициента распределены по закону, близкому к нормальному с нулевым средним значением и одной и той же дисперсией, хорошо согласуется с экспериментальными данными. В совокупности одновременно возбужденных и экспоненциально затухающих собственных колебаний показатели затухания будут различаться тем более значительно, чем больше β. Поэтому регенеративная реверберация, вообще говоря, не следует экспоненциальному закону. Конечно, при этом общепринятое определение времени реверберации теряет однозначность; однако в соответствии с действующими рекомендациями можно определить T как удвоенное время снижения уровня реверберирующего звука от —5 до —35 *дб*.

Расчет среднего хода процесса неэкспоненциальной реверберации (без учета флюктуаций, обусловленных интерференционными явлениями) может быть сделан по формуле Куттруфа [5]:

$$\varepsilon(t) = \int_{\delta_1}^{\delta_2} u(\delta)\, e^{-2\delta t}\, d\delta. \qquad (3)$$

Здесь $u(\delta)$ — пормированная функция распределения затуханий, δ_1 и δ_2 — нижняя и верхняя границы значений δ в этом распределении, $\varepsilon(t)$ — плотность звуковой энергии в помещении, причем $\varepsilon(0) = 1$.

Выбирая распределение случайной функции $\gamma = \beta \cos \varphi$, целесообразно принять вместо нормального (допускающего с конечной вероятностью возможность сколь угодно больших по абсолютной величине значений γ), близкое к нему колоколообразное распределение, ограниченное интерва-

лом — $\beta \leqslant \gamma \leqslant \beta$:

$$w(\gamma) = \frac{1}{\beta} \cos^2 \frac{\pi\gamma}{2\beta}. \qquad (4)$$

На фиг. 1 дано сравнение этого распределения (при $\beta = 1/\sqrt{2}$, что соответствует запасу устойчивости в 3 *дб*) с нормальным

$$w_N(\gamma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\gamma^2/2\sigma^2},$$

где $\sigma = \beta/\sqrt{2\pi}$. Как показывает сравнение, оба распределения очень близки друг к другу. То обстоятельство, что $w(\gamma) = 0$ при $\gamma = \beta$, ограничивает рассматриваемые реверберационные процессы такими, при которых система звукоусиления не доводится до самовозбуждения, хотя и приближается к его порогу вплотную, если $\beta = 1$.

Приняв распределение (4), мы получим для показателей затухания (2) распределение

$$u(\delta) = w[\gamma(\delta)] \left|\frac{d\gamma}{d\delta}\right| = \frac{1}{\delta_0\beta} \cos^2 \frac{\pi}{2\beta}\left(1 - \frac{\delta}{\delta_0}\right).$$

в интервале $\delta_0(1-\beta) \leqslant \delta \leqslant \delta_0(1+\beta)$, вне которого $u(\delta) = 0$. Подстановка в формулу (3) приводит к неэкспоненциальному закону убывания энергии в процессе реверберации

$$\varepsilon(t) = \int_{\delta_0(1-\beta)}^{\delta_0(1+\beta)} u(\delta) e^{-2\delta t}\, d\delta = \frac{\pi^2 e^{-2\tau}}{\pi^2 + (2\beta\tau)^2} \cdot \frac{\mathrm{sh}(2\beta\tau)}{2\beta\tau} \qquad (5)$$

где $\tau = \delta_0 t = 6{,}9t/T_0$. Отметим, что случай колоколообразного распределения показателей затухания был рассмотрен Куттруфом [5] в качестве одного из примеров неэкспоненциальной реверберации. Применительно к поставленной здесь задаче параметр β (полуширина распределения $w(\gamma)$) определяет значение коэффициента передачи γ на частоте автоколебаний, возникающих при критическом усилении, т. е. на частоте наибольшего из максимумов частотной характеристики обратной связи, для которого $\cos\varphi = 1$.

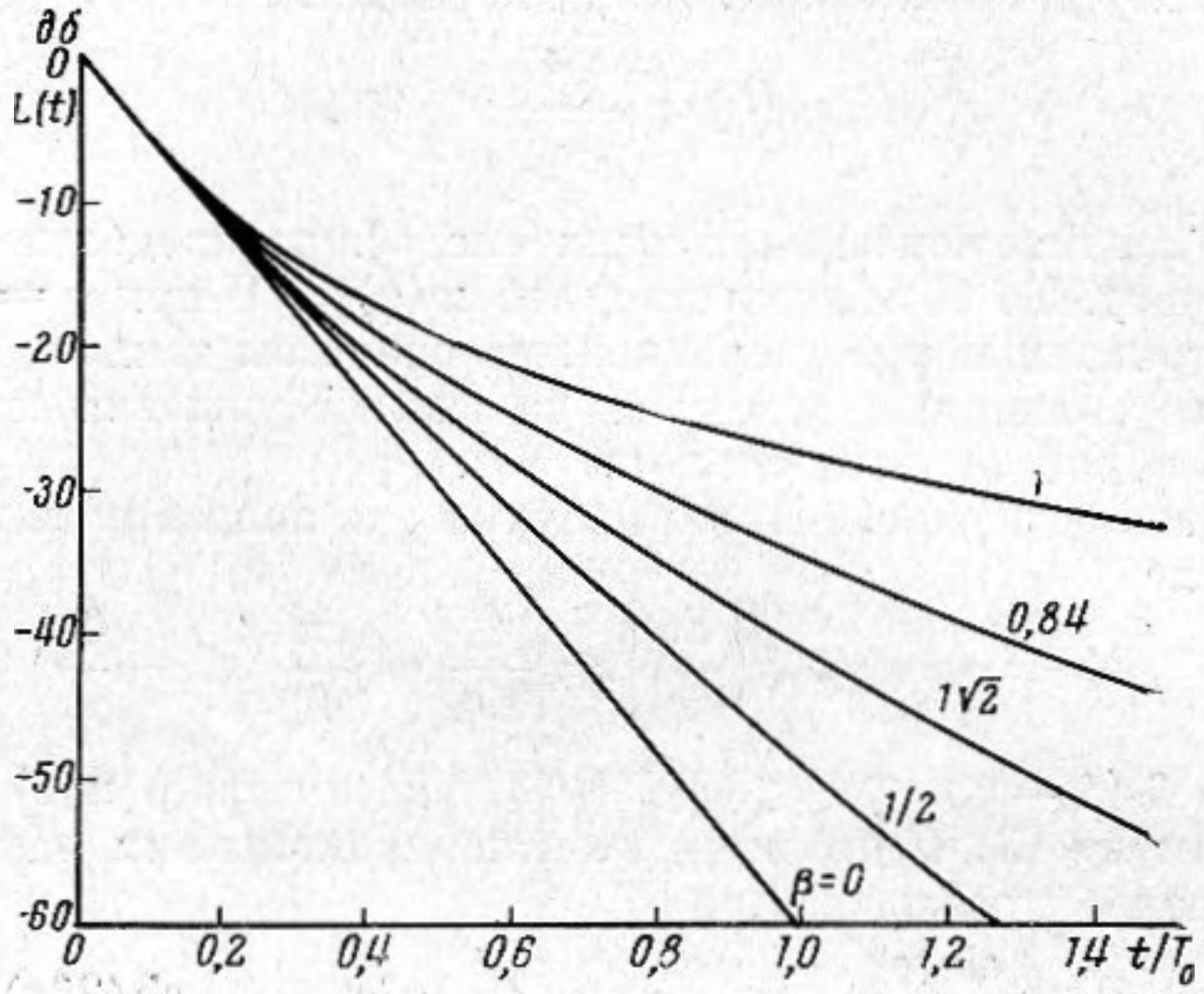
На фиг. 2 изображен вычисленный по формуле (5) ход убывания уровня звуковой энергии при различных значениях β, т. е. при разных запасах устойчивости. Время регенеративной реверберации $T(\beta)$ может быть найдено, согласно определению

$$T = 2(t_2 - t_1), \qquad (6)$$

причем моменты t_1 и t_2 соответствуют условиям $-10\lg\varepsilon(t_1) = 5$ *дб* и $-10\lg\varepsilon(T_2) = 35$ *дб*. Первое из этих условий приближенно эквивалентно простому соотношению $t_1/T_0 = 0{,}09$, независимо от β.

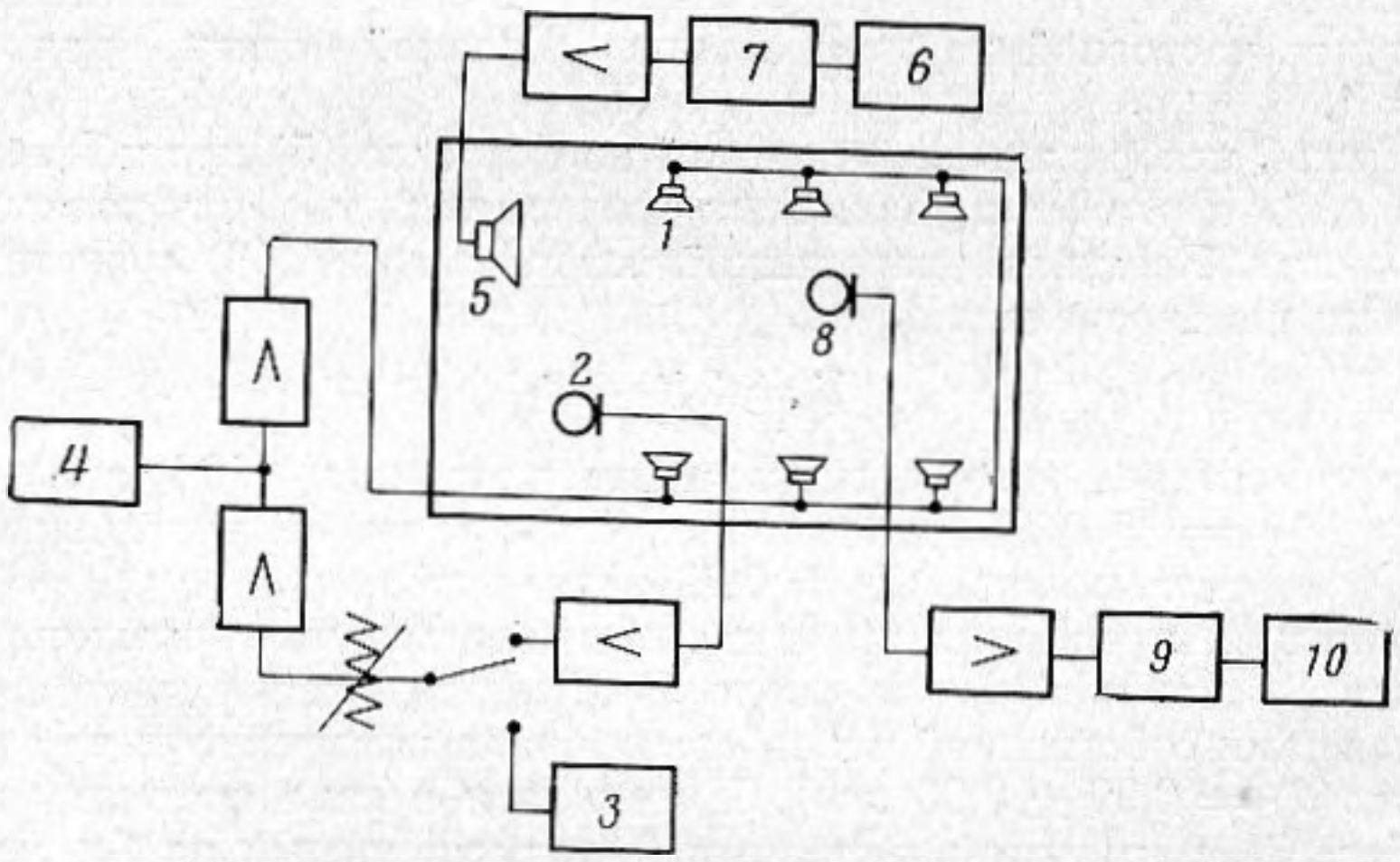
Измерения, предпринятые для сравнения теории с опытом, были выполнены в зале с объемом около 2700 $м^3$; в области частот от 500 до 2000 *гц* время собственной реверберации зала практически не зависело от частоты ($T_0 = 0{,}99 \pm 0{,}05$ *сек*). Имеющаяся в зале система звукоусиления (фиг. 3) с громкоговорителями *1*, размещенными на боковых стенах и на потолке, работала от микрофона *2* с кардиоидной диаграммой направленности, расположенного так, чтобы акустическая обратная связь осуществлялась главным образом через диффузное звуковое поле; выполнение этого условия позволяет считать, что распределение действительной и мнимой частей коэффициента электроакустической передачи приближается к нормальному. Время реверберации измерялось соответственно определению (6) на терц-полосах шума со средними частотами 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600 и 2000 *гц* при 5 положениях измерительного микрофона.

Величина β измерялась путем определения относительного коэффициента усиления напряжения μ в усилительном канале. После включения аппаратуры усиление постепенно увеличивалось до критического значения $\mu_{кр}$, при котором система звукоусиления переходила в режим генерации автоколебаний (при выбранном положении микрофона система воз-



Фиг. 2

буждалась на частоте около 1000 *гц*). Далее вход усилителя системы переключался на звуковой генератор *3* и выходное напряжение *U* при неизменном положении регулятора усиления измерялось ламповым вольтметром *4*. Снижая затем усиление, нужно уменьшить показание вольтметра до некоторой величины βU, после чего снова переключить вход усили-

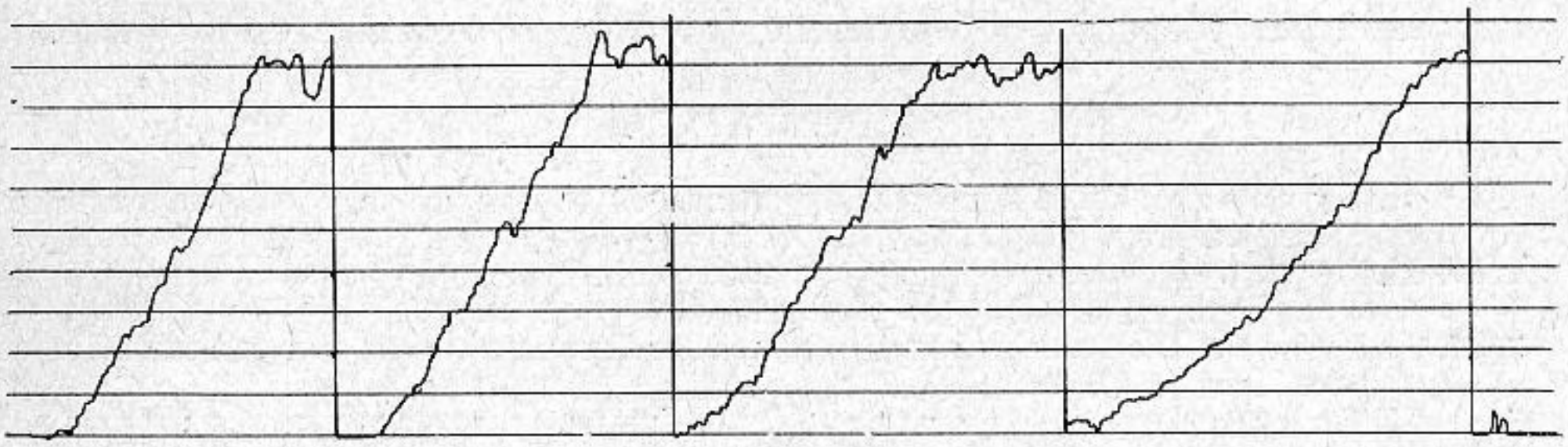


Фиг. 3

теля на микрофон системы звукоусиления. Выбирая те или иные значения $\beta = \mu / \mu_{кр}$, можно установить желаемый запас устойчивости $\Delta = -20 \lg (\mu / \mu_{кр})$.

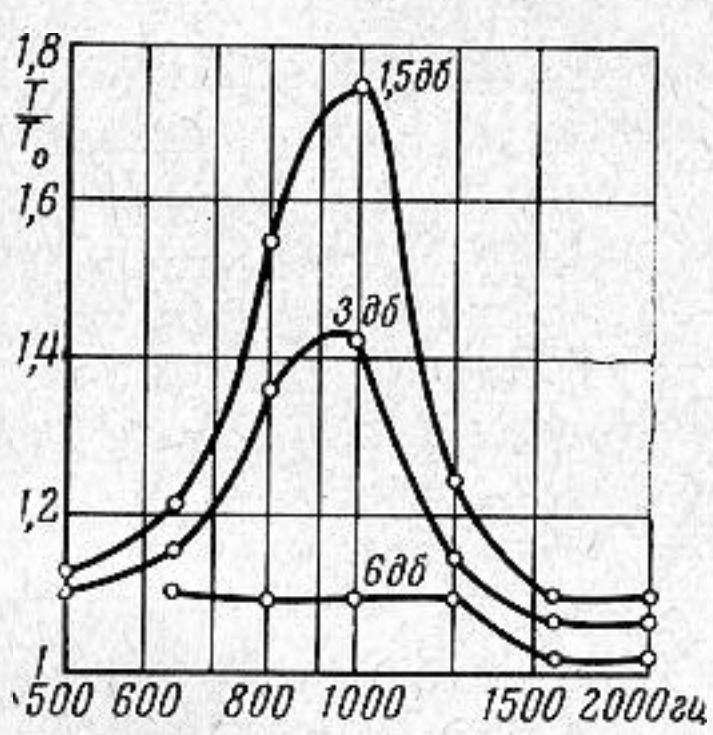
Источником сигнала являлся громкоговоритель, питаемый от генератора белого шума *6* через полосный фильтр *7* и усилитель. Тракт записи реверберации состоял из измерительного микрофона *8*, усилителя, полосного фильтра и логарифмирующего самописца *10*.

На фиг. 4 воспроизведены (слева направо) уровнеграммы процесса реверберации при выключенном звукоусилении ($\beta = 0$) и при запасах устойчивости 6 *дб* ($\beta = 0{,}5$), 3 *дб* ($\beta = 1/\sqrt{2}$) и 1,5 *дб* ($\beta = 0{,}84$). Уровнеграммы записывались через терцфильтр, пропускающий частоту автоколебаний. Как и следовало ожидать, по мере уменьшения запаса устой-

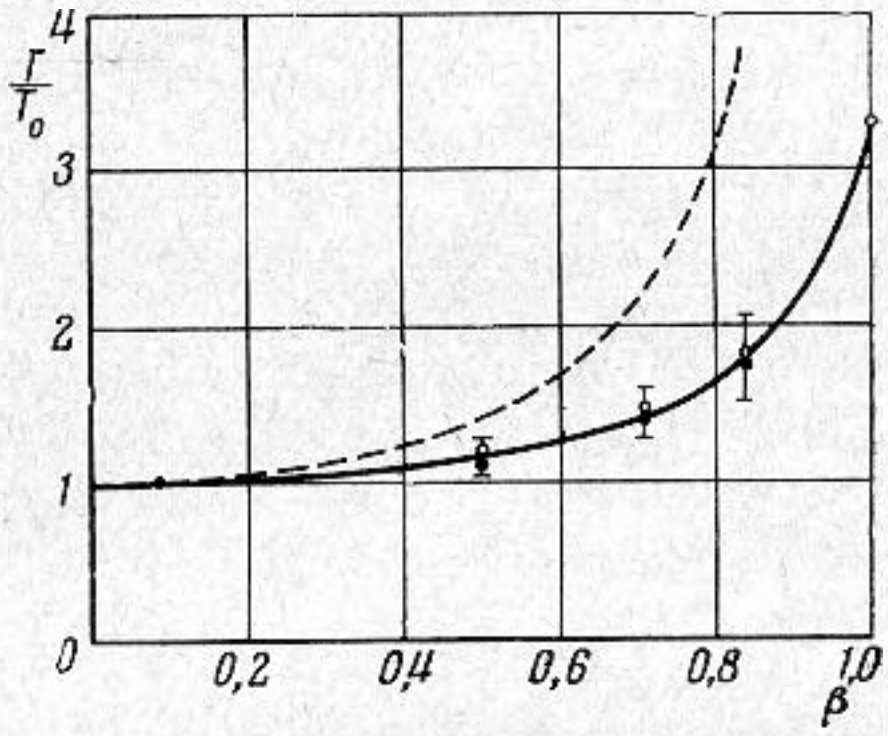


Фиг. 4

чивости, уровнеграммы обнаруживают искривление, свидетельствующее о неэкспоненциальном ходе процесса реверберации. Из частотных характеристик отношения T / T_0, измеренного при трех указанных выше значениях запаса устойчивости (фиг. 5), видно, что регенеративная реверберация имеет более или менее острый максимум в полосе со средней частотой



Фиг. 5



Фиг. 6

1000 *гц*. Именно в этой области и лежат наиболее высокие максимумы коэффициента передачи звука от громкоговорителей к микрофону звукоусилительной системы.

Сравнение максимальных значений T / T_0 (фиг. 5), измеренных в полосе, содержащей частоту автоколебаний, с результатами расчета по формуле (5) дано на фиг. 6. Белые кружки и проведенная через них кривая представляют теоретически найденную зависимость; черные кружки дают среднее из 5 измеренных значений. Отрезки прямых изображают разброс результатов отдельных измерений при том или ином значении β. Как видно из представленных данных, изложенная здесь теория регенеративной реверберации хорошо согласуется с экспериментом.

В целях сопоставления геометрического и волнового подходов к теории регенеративной реверберации на фиг. 6 пунктирной кривой представлена зависимость T / T_0 от β, вычисленная по формуле (1) при $\alpha = 0{,}3$ (средний коэффициент поглощения в зале, где были сделаны измерения). Как показывает сравнение двух кривых, формула (1) приводит к значительно более высокой оценке влияния регенерации, нежели формула (5). Конечно, расхождение становится меньше, если время неэкспоненциальной ре-

верберации определить как время убывания уровня энергии до —60 *дб* относительно начального уровня; однако и при таком определении формула (5) дает существенно меньшие значения T / T_0, чем это следует из формулы (1), в особенности при больших значениях β. Поскольку субъективная оценка длительности реверберации определяется именно начальной частью процесса затухания [6], можно считать, что при неэкспоненциальной реверберации определению (6) следует отдать предпочтение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. М. Сухаревский. К теории акустической обратной связи в звукоусилительных системах. Докл. АН СССР, 1940, 26, 5, 437—442.
2. Ю. М. Сухаревский. О предельно возможном усилении звука в закрытом помещении. Докл. АН СССР, 1940, 26, 9, 889—896.
3. M. Schröder. Die statistischen Parameter der Frequenzkurven von grossen Räumen. Acoustica, 1954, 4, AB-2, 594—600.
4. R. M. Schroeder, K. H. Kuttruff. On frequency response curves in rooms. J. Acoust. Soc. America, 1962, 34, 1, 76—80.
5. H. Kuttruff. Eigenschaften und Auswertung von Nachhallkurven. Acoustica, 1958, 8, AB-I, 273—280.
6. B. S. Atal, M. R. Schroeder, G. M. Sessler. Subjective reverberation time and its relation to sound decay. 5e Congrès Intern. d'Acoustique, Ib, Liège, 1965, G 32.

Всесоюзный н.-и. кинофотоинститут
Москва

Поступила в редакцию
11 августа 1966 г.