

УДК 534.75

СЛУХОВАЯ ОЦЕНКА ЧЕЛОВЕКОМ ЧАСТОТЫ МОДУЛЯЦИИ  
АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО ТОНА

С. М. Ищенко

Исследована способность человека оценивать на слух частоту модуляции амплитудно-модулированного тона с частотой 1000 гц. Показано, что абсолютная величина ошибки определения частоты модуляции существенно зависит от модулирующей частоты, а именно при увеличении частоты модуляции от 1 до 10, от 10 до 20 и от 30 до 60 гц ошибка возрастает почти линейно от 0,1 до 0,4, от 0,4 до 6,2 и от 6,2 до 21,8 гц для указанных диапазонов модулирующих частот. На частотах модуляций 20—30 и 60—100 гц абсолютная величина ошибки практически постоянна и равна 6,2 и 20—21,8 гц. Зависимость ошибки определения частоты модуляции от модулирующей частоты можно объяснить влиянием интегрирующих свойств слуховой системы и хрипlosti звука на точность определения человеком частоты модуляции.

При медленных изменениях амплитуды звуковых сигналов, когда частота модуляции не превышает 10 гц, слуховая система человека может проследивать непосредственно изменения амплитуды сигнала [1—3]. При увеличении частоты модуляции слух сглаживает быстрые изменения амплитуды сигнала, проявляя, таким образом, интегрирующие свойства [1]. На частотах модуляции 20—30 гц происходит переход от ощущения изменения амплитуды к ощущению хрипlosti [3]. При увеличении частоты модуляции от 30 до 70 гц степень хрипlosti звука усиливается и при частоте модуляции 70 гц наблюдается максимум хрипlosti [4]. Степень хрипlosti звука зависит от частоты несущей. Верхняя граница диапазона модулирующих частот, в котором ощущается хриплость, монотонно увеличивается от 20 до 200 гц при увеличении частоты несущей от 0,2 до 4 кгц [3].

При различении звуков, спектр которых сосредоточен внутри критической полосы слуха человек не способен разделять спектральные компоненты сигнала [2, 5]. Если различаются амплитудно-модулированные сигналы с одинаковыми длительностями и спектрами несущих и моделирующими частотами до 10 гц, то слух человека может использовать в качестве признака различения, по-видимому, лишь различия в зависимостях амплитуды сигналов от времени. Поэтому можно предположить, что слух в этом случае проявляет свойства временного анализатора. Основываясь на этом предположении, было решено оценить ошибку, с которой человек определяет на слух частоту модуляции в диапазоне от 1 до 10 гц. Интересно было узнать, как повлияют интегрирующие свойства слуховой системы и хриплость звука на точность определения частоты модуляции при увеличении модулирующей частоты от 10 до 100 гц. Поэтому модулирующие частоты были выбраны в диапазоне от 1 до 100 гц. Учитывая то, что результаты эксперимента по различению амплитудно-модулированных сигналов с тональной и шумовой несущей практически не различаются между

собой для одних и тех же модулирующих сигналов [6], было решено провести опыт лишь с тональной несущей.

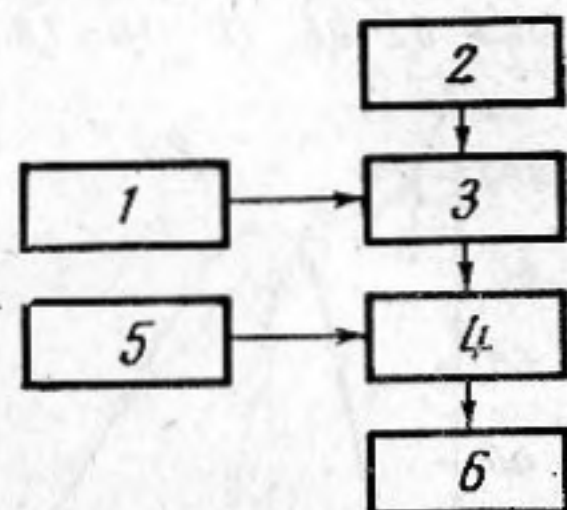
В опытах участвовало от двух до четырех испытуемых мужчин в возрасте от 19 до 26 лет. Сигналы длительностью по 5 сек со временем нарастания и спада по 80 мсек предъявлялись испытуемым при помощи головных динамических телефонов ТД-6; испытуемые находились в заглушенной камере. Несущей для всех сигналов служил тон с частотой 1000 гц, глубина модуляции для всех сигналов была одинаковой и составляла ~40%. Интервал времени между сравниваемыми сигналами составлял ~4 сек; сигналы предъявлялись испытуемым парами при уровне громкости 60—80 фон. Опытные серии включали от 46 до 52 пар сигналов. Первый сигнал в каждой паре был на протяжении серии одним и тем же; частота модуляции выбиралась равной: 1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 15; 20; 30; 40; 60; 80 или 100 гц. Частота модуляции второго сигнала выбиралась случайным образом в некотором интервале, средняя частота которого приблизительно равнялась частоте модуляции первого сигнала в парах. Как правило, в диапазоне изменения частоты модуляции второго сигнала выбиралось 12 дискретных значений частоты. Полное число предъявлений сигнала с некоторой частотой модуляции в пределах всех серий изменялось от 36 до 84 со средним значением около 60.

Испытуемых просили оценить частоту модуляции первого сигнала и сравнить ее с частотой модуляции второго сигнала. Обучение проводилось путем предъявления звуковых сигналов с низкой частотой модуляции, равной 1 или 2 гц. Такая частота модуляции может быть легко воспроизведена путем постукивания. При совпадении частот модуляций обоих сигналов испытуемый ставил на бланке знак «—», а в случае несовпадения — знак «+». Число совпадений делилось на число предъявлений сигнала с данной частотой модуляции и выражалось в процентах. Последнюю величину мы называем в дальнейшем процентом идентификации.

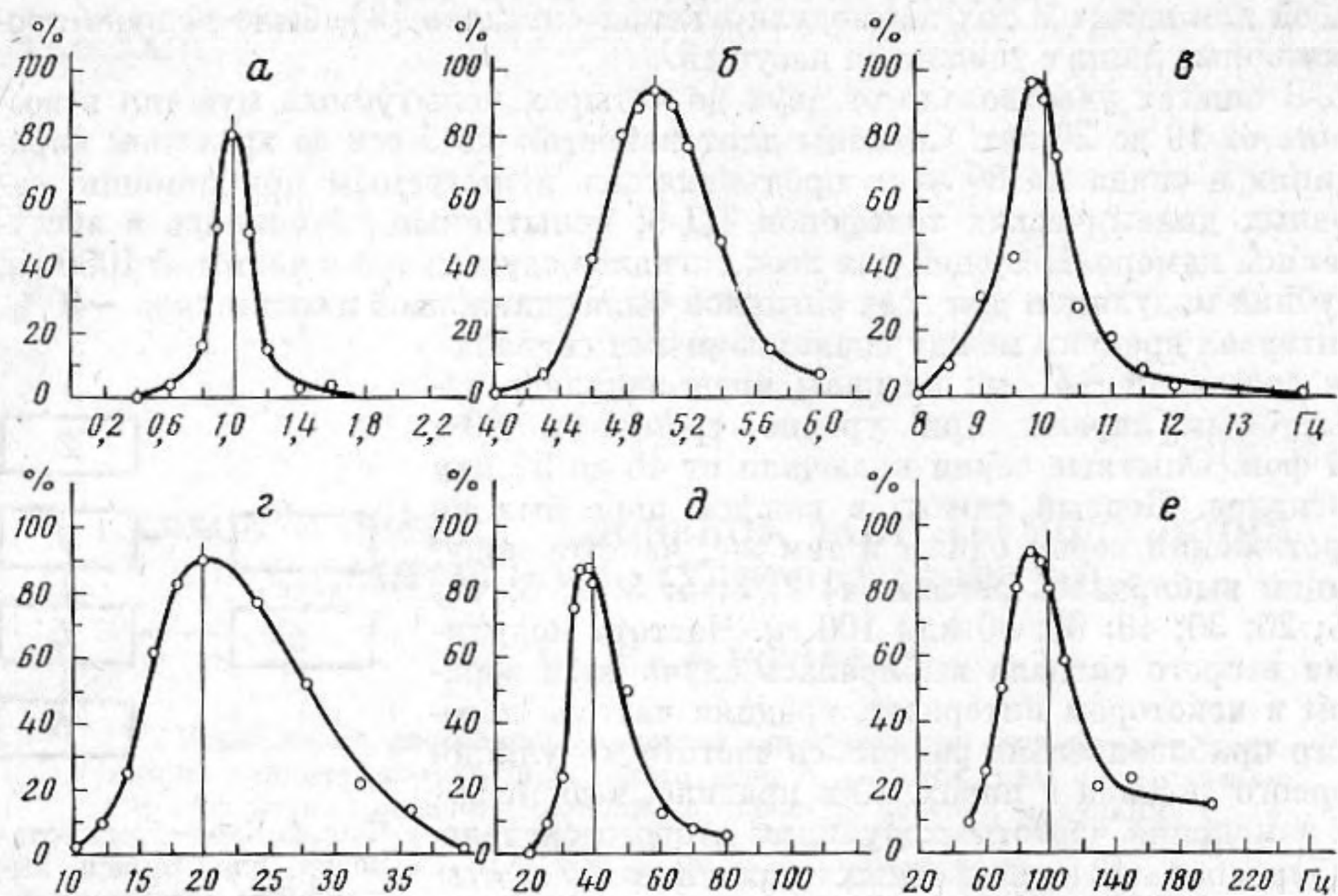
На фиг. 1 представлена блок-схема установки для записи амплитудно-модулированных сигналов на магнитофон. Тон с частотой 1000 гц и модулирующий сигнал поступали на модулятор 3 с генераторов 1 и 2. С выхода модулятора амплитудно-модулированные сигналы поступали на электронный ключ 4. Все сигналы формировались при помощи электронного ключа 4. При записи первых сигналов в парах он использовался в автоматическом режиме, выдавая сигналы длительностью по 5 сек через интервалы времени, равные 17 сек. В ждущем режиме электронный ключ использовался при записи вторых сигналов в промежутки между первыми. В последнем случае он запускался импульсами с генератора 5. Далее сигналы записывались на магнитофон «Звук» 6. При проведении опытов сигналы воспроизводились на магнитофоне и подавались на головные телефоны.

На фиг. 2 представлены зависимости процента идентификации для нескольких испытуемых от частоты модуляции второго сигнала. Частоты модуляции первого сигнала в парах были равны 1; 5; 10; 20; 40 и 100 гц. Эти частоты отмечены на фигуре вертикальными прямыми. Результаты опытов для других частот модуляции первого сигнала в парах, равных 2; 3; 4; 6; 8; 15; 30; 60 и 80 гц, представлены в таблице.

Все кривые фиг. 2 имеют одинаковую формулу; процент идентификации максимален на частоте модуляции первого сигнала в парах или в непосредственной близости от нее. При отклонении частоты модуляции второго сигнала от этого значения во всех случаях происходит почти монотонное уменьшение процента идентификации.



Фиг. 1. Блок-схема установки для записи амплитудно-модулированных сигналов



Фиг. 2. Зависимость среднего процента идентификации от частоты модуляции для частот модуляции первого сигнала в парах равных 1; 5; 10; 20; 40 и 100 гц

На фиг. 3 сплошной линией изображена зависимость полуширины кривых идентификации ( $\Delta f/2$ ) на уровне 50% от частоты модуляции первого сигнала; эта полуширина принята за ошибку, с которой слуховая система оценивает модулирующую частоту. Зависимость величины  $\Delta f/2$  от частоты модуляции имеет три участка (1-10, 10-20 и 40-60 гц), в пределах которых значение величины  $\Delta f/2$  возрастает почти линейно с частотой модуляции (от 0,1 до 0,4, от 0,4 до 6,2 и от 6,2 до 21,8 гц для указанных диапазонов модулирующих частот). На участках 20-40 и 60-

Частота модуляции первого сигнала	Частота модуляции второго сигнала ( $f_M$ , гц) и соответствующий ей средний процент идентификации (%)												
	$f_M$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,4	2,6	2,8
2	%	4,8	7,1	12,7	13,1	41,7	87,3	76,2	73,0	46,5	6,0	4,8	4,8
3	$f_M$	2,2	2,4	2,6	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
	%	3,7	5,0	7,5	41,3	55,0	85,0	87,5	81,3	36,0	6,2	2,5	2,5
4	$f_M$	2,5	3,0	3,3	3,6	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,4	4,7	5,0
	%	2,8	5,6	14,8	47,3	63,9	72,3	83,4	75,0	86,2	41,7	11,1	2,8
6	$f_M$	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	8,0
	%	3,9	13,2	19,1	26,5	75,0	80,9	76,5	54,5	41,2	20,6	11,8	4,4
8	$f_M$	6,0	7,0	7,3	7,6	7,8	8,0	8,2	8,4	8,7	9,0	10	11
	%	3,1	1,6	8,3	50,0	70,3	82,9	87,5	53,2	31,3	4,7	3,1	3,1
15	$f_M$	10	11	12	13	14	15	16	18,8	20	22	24	26
	%	0	11,7	43,4	80,0	88,4	93,4	98,3	75,0	31,8	18,3	3,3	3,3
30	$f_M$	15	20	22	24	26	28	30	35	40	50	60	80
	%	4,5	6,8	27,3	50,0	63,7	93,2	97,8	75,0	13,6	4,5	0	4,5
60	$f_M$	30	35	40	45	50	55	60	70	90	110	130	150
	%	3,6	7,1	29,8	62,0	72,7	88,2	94,0	78,6	47,7	19,1	4,8	8,3
80	$f_M$	40	50	60	65	70	75	80	90	100	120	150	200
	%	3,6	12,5	62,6	69,7	94,8	92,9	91,2	78,7	50,0	16,1	12,5	1,8

100 гц значение величины  $\Delta f/2$  практически не зависит от частоты модуляции и составляет 6–8 и 20–21,8 гц.

На этой фигуре пунктирной линией изображена зависимость ширины критической модуляционной полосы ( $\Delta F_{кр}$ ) из работы [6]. Авторы последней отмечают, что область слышимости биений двух модулирующих частот может служить оценкой разрешающей способности слуха по частоте модуляции. Из сопоставления зависимостей величин  $\Delta f/2$  и  $\Delta F_{кр}$  от частоты модуляции видно, что в области модулирующих частот 5–10 гц величина  $\Delta f/2$  (0,37–0,43 гц) приблизительно в 5–7 раз меньше величины  $\Delta F_{кр}$  (1,6–3,0 гц). В области модулирующих частот 15–40 гц указанные величины практически совпадают, а на частотах модуляции 60–100 гц величина  $\Delta f/2$  (20–21,8 гц) почти в три раза превышает величину  $\Delta F_{кр}$  (6,5–8 гц). Вертикальные прямолинейные отрезки на фиг. 3 дают среднюю квадратичную ошибку величины  $\Delta f/2$  с доверительной вероятностью 0,8.

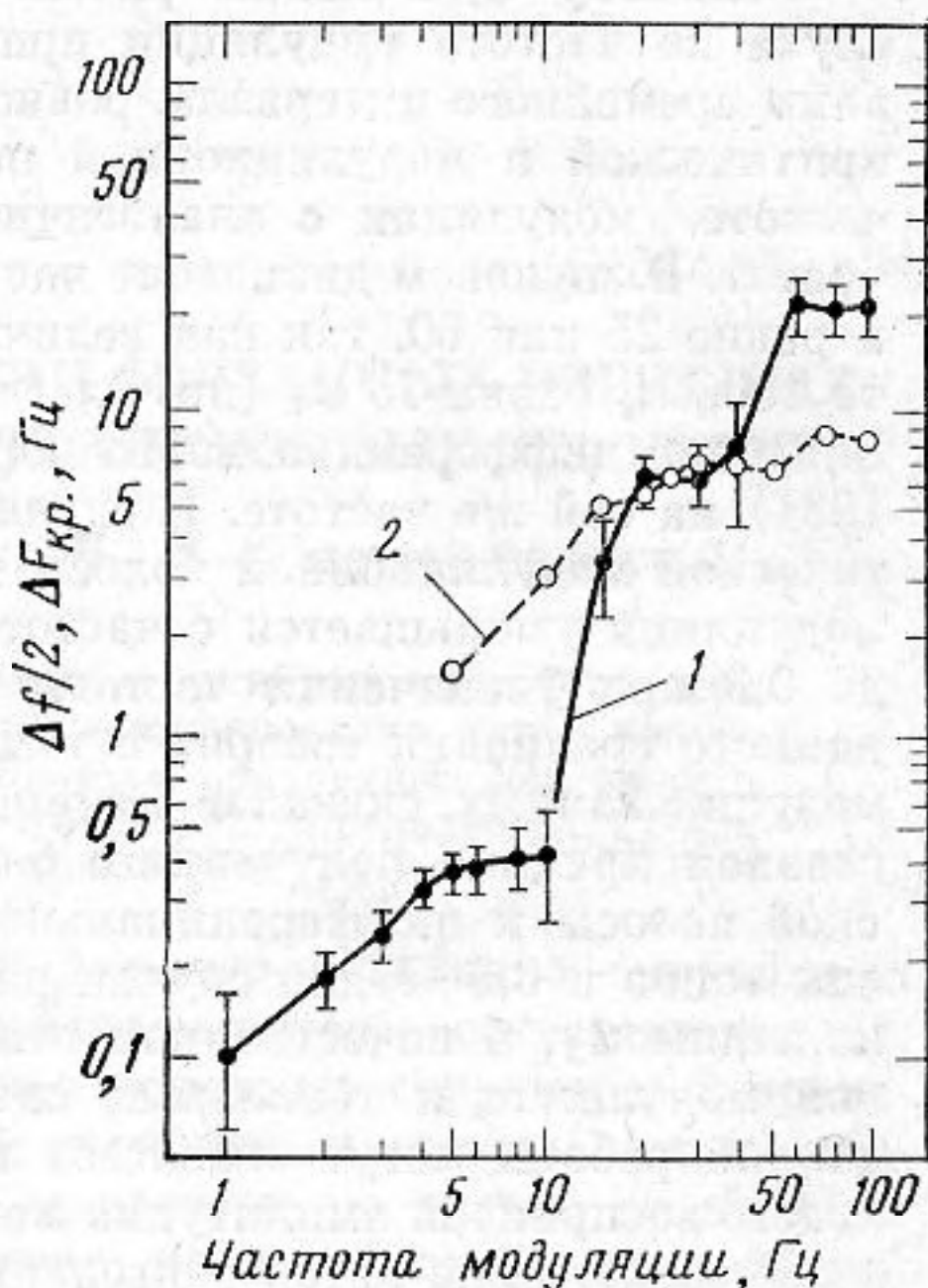
На основе полученных результатов можно вычислить ошибку определения слуховой системой периода амплитудно-модулированного тона, если предположить, что период сигналов \* был тем физическим параметром, по которому испытуемый осуществлял различение.

Временной интервал ( $T$ ), соответствующий ошибке определения частоты модуляции ( $\Delta f/2$ ), был принят за ошибку определения периода амплитудно-модулированного тона и вычислялся по формуле

$$\Delta T = \{ [T - 1/(f_0 + 0,5\Delta f)] + [1/f_0 - 0,5\Delta f] - T \} / 2,$$

где  $T$  — период первого сигнала в парах, соответствующий частоте его модуляции  $f_0$ . Ошибка определения периода амплитудно-модулированного тона в диапазоне модулирующих частот от 1 до 10 гц, где, как предполагалось, в более или менее чистом виде проявляются свойства слуха как временного анализатора, почти линейно уменьшается от 100 до 6,7 мсек при увеличении частоты модуляции от нижней границы указанного диапазона до его верхней границы.

Увеличение ошибки определения частоты модуляции на участке модулирующих частот от 10 до 20 гц можно объяснить влиянием интегрирующих свойств слуховой системы на точность определения частоты модуляции. Действительно, выше частоты модуляции 10 гц, как уже указывалось, слух сглаживает быстрые изменения амплитуды сигнала, причем степень сглаживания увеличивается с частотой модуляции. Участки со слабой зависимостью величины  $\Delta f/2$  от частоты модуляции соответствуют: первый (20–30 гц) — границе хрипlosti звука, второй (60–100 гц) — области максимальной хрипlosti. Нарастание величины  $\Delta f/2$



Фиг. 3. Зависимости величины ошибки определения частоты модуляции  $\Delta f/2$  (1) и критической модуляционной полосы  $\Delta F_{кр}$  (2) по Н. А. Дубровскому и Л. Н. Тумаркиной [6], от частоты модуляции

\* Термин «период сигнала» употреблен по традиции, хотя его использование в данном случае является не совсем строгим.

на участке модулирующих частот от 30 до 60 *гц* можно объяснить увеличивающимся с частотой модуляции влиянием хрипlosti на точность определения частоты модуляции, так как степень хрипlosti на этом участке возрастает.

Величину  $\Delta f/2$  можно рассматривать как дифференциальный порог слуха по частоте модуляции при наличии между сравниваемыми сигналами временного интервала, равного 4 *сек*. Интересно сравнить отношение критической и модуляционной полосы к дифференциальному порогу по частоте модуляции с аналогичным отношением в звуковом диапазоне частот. В звуковом диапазоне частот это отношение не зависит от частоты и равно 25 или 60, так как величина критической полосы слуха на частоте 1000 *гц* равна 75 *гц* (по Флетчеру, 1940) или 180 *гц* (по Цвикеру, 1957). Значение дифференциального порога по частоте равно 3 *гц* (по Бидалфу, 1931) на той же частоте. В случае модулирующих частот отношение критической модуляционной полосы к дифференциальному порогу по частоте модуляции уменьшается с частотой модуляции, как указывалось, от 5—7 до 0,3 при увеличении частоты модуляции от 1 до 100 *гц*. Результаты данного сравнения говорят о том, что механизм различения амплитудно-модулированных сигналов изменяется с изменением частоты модуляции; главная причина полученного большого различия в отношении критической полосы к дифференциальному порогу (25—60 для случая различения тонов и 0,3—7 для случая различения частот модуляции) заключена, по-видимому, в качественном отличии механизмов восприятия амплитудной модуляции и тональных сигналов звукового диапазона. Результаты данной работы могут оказаться полезными при построении моделей слухового восприятия амплитудно-модулированных сигналов.

В заключение автор благодарит Н. А. Дубровского за критические замечания по существу работы и А. В. Коробчевскую за наладку установки для записи амплитудно-модулированных сигналов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Дубровский, Л. Н. Тумаркина. Исследование восприятия человеком амплитудно-модулированных шумов. *Акуст. ж.*, 1967, 13, 1, 51—59.
2. Э. Цвикер, Р. Фельдткеллер. Ухо как приемник информации. М., «Связь», 1971.
3. E. Terhardt. Über die durch amplitudenmodulierte Sinustöne hervorgerufene Hörempfindung. *Acustica*, 1968, 20, 4, 210—214.
4. E. Terhardt. Über akustische Rauigkeit und Schwankungstärke. *Acustica*, 1968, 20, 4, 215—224.
5. R. Plomp. Experiments on tone perception. *Proc. Gorcum-Prakke*, Assen, 1966.
6. Н. А. Дубровский, Л. Н. Тумаркина. О нелинейных явлениях при слуховом восприятии сигналов со сложными модуляциями. В сб. *Морское приборостроение*. Сер. Акустика, М., Акуст. ин-т, 1972.

Акустический институт  
Академии наук СССР

Поступила  
26 января 1976 г.