Доклады Академии Наук СССР
1951. Том LXXX, № 4

ФИЗИКА

В. С. ТРОИЦКИЙ, А. Г. ЛЮБИНА и А. В. ЗОЛОТОВ

СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ШУМОВ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ НУЛЕВЫМ МЕТОДОМ

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 12 VII 1951)

1. Экспериментальная проверка применимости к тепловому шуму того или иного вещества формулы Найквиста

$$w = 4kRT \qquad (1)$$

(w — спектральная плотность шума, k — постоянная Больцмана, R — сопротивление образца, T — его температура) проводилась до сих пор тем или иным вариантом метода, при котором эксперимент состоит из следующих двух частей: 1) шум подводится к квадратичному измерительному устройству через линейный усилитель с большим усилением (что необходимо ввиду малости w), и отсчитывается показание α выходного измерительного прибора; 2) на вход усилителя подается «эталонное» (т. е. с известной эффективной величиной) синусоидальное напряжение, и, меняя частоту f этого напряжения, снимают энергетическую частотную характеристику устройства $\Phi(f)$. Затем по формуле

$$w = \alpha \left[\int_0^\infty \Phi(f)\, df \right]^{-1} \qquad (2)$$

вычисляется w. Такому методу измерения w (назовем его «обычным») присущи следующие существенные источники ошибок: 1) Систематическая ошибка δ_1 из-за неточности эталона (стандарт-генератора) на входе. Ее можно представить в виде двух составляющих: δ_1' из-за неточности стандарта при некотором фиксированном положении ручек регулировки частоты и амплитуды и δ_1'' из-за относительной погрешности его шкал (частотной и амплитудной); ошибка δ_1'' проявляется при определении формы частотной характеристики, т. е. вида функции $\Phi(f)/\Phi(f_1)$ (f_1 — фиксированная частота). 2) Систематическая ошибка δ_2 из-за относительной погрешности шкалы выходного прибора. 3) Случайная ошибка из-за нестабильности усилителя (как известно, $\Phi(f)$ всегда подвержена беспорядочным изменениям во времени). Она может быть представлена в виде двух ошибок: δ_3 из-за изменения $\Phi(f)$ во время снятия частотной характеристики и δ_4 из-за изменения $\Phi(f)$ за время, протекающее между первой и второй частью эксперимента, т. е. между измерением первого и второго множителя в правой части (2); каждая из этих ошибок может в свою очередь быть разложена на ошибки (δ_3' δ_4') из-за изменения усиления $\Phi(f_1)$ и ошибки (δ_3'', δ_4'') из-за изменения формы характеристики (ширины полосы пропускания). Обычный метод дает, как правило, точность единичного отсчета порядка 10%; наиболее существенными являются, обычно, ошибки δ_1', δ_2 и δ_4'.

2. Работы Е. Я. Пумпера (1) обратили наше внимание на интерес возможно более точной проверки того, подчиняется ли тот или иной

образец соотношению (1): обнаружение любого отклонения от него означает обнаружение отклонения состояния образца от термодинамически равновесного. Нами разработан и применен для этой цели нулевой метод измерения w. Идею нулевого метода поясняет рис. 1 *. Вход усилителя периодически (с частотой F_0) переключается с исследуемого образца на источник «эталонного» синусоидального напряжения $U\sqrt{2}\cos 2\pi f_0 t$ (в принципе можно пользоваться также вспомогательным источником шумового напряжения). На выходе квадратичного детектора возникает, наряду с шумами, периодическое напряжение прямоугольной формы частоты F_0, чередующиеся значения которого пропорциональны, соответственно, $w\int\limits_0^\infty \Phi(f)\,df$ и $U^2\Phi(f_0)$. Напряжение с выхода детектора подается вместе с синусоидальным напряжением частоты F_0, приводящим в действие переключатель, на смеситель, что

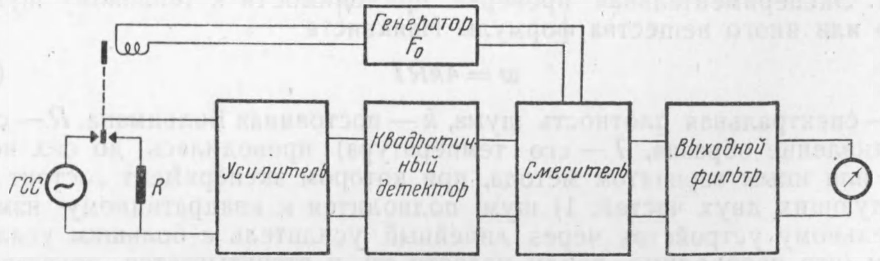

Рис. 1

дает на выходе последнего, наряду с шумами, постоянный ток I, пропорциональный разности $w\int\limits_0^\infty \Phi(f)\,df - U^2\Phi(f_0)$. Выходной фильтр очищает этот ток от шумов и подает его на выходной измерительный прибор. Регулируя с помощью выходного аттенюатора стандарт-генератора снимаемое с него напряжение U, добиваемся равенства $I=0$. При этом

$$\frac{w}{U^2} = \Phi(f_0)\left[\int\limits_0^\infty \Phi(f)\,df\right]^{-1}. \tag{3}$$

Определив из дополнительных измерений правую часть равенства (3) и зная U, можно вычислить w. Здесь, очевидно, исключаются ошибки типа δ_2 и δ_4. Если снятие частотной характеристики проводится нулевым методом (что легко осуществимо), исключается также ошибка типа δ_3.

Пусть нулевой метод применяется последовательно к двум образцам 1, 2. Имеем на основании (3)

$$\frac{w_1}{w_2} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2. \tag{4}$$

Здесь вдобавок к исключенным ранее ошибкам исключается полностью ошибка типа δ_1' и δ_3. Остаются, таким образом, только ошибка δ_4'' (из-за изменения формы частотной характеристики при переходе от одного образца к другому) и ошибка типа δ_1'', связанная с неточностью определения отношения U_1/U_2. Однако при U_1, U_2 одного порядка, что позволяет отсчитывать эти значения по одной и той же шкале

* Некоторые элементы схемы напоминают модуляционный радиометр Дайка ([2]).

стандарт-генератора, эта ошибка практически отсутствует. Разумеется, имеется еще небольшая ошибка из-за случайных изменений амплитуды стандарт-генератора и флуктуационная ошибка вследствие неидеальности фильтра, очищающего ток I от шумов. Последняя ошибка может быть снижена (в принципе до сколь угодно малой величины) выбором достаточно большой постоянной времени фильтра (в наших опытах она была равна 100 сек.). Мы приходим к выводу, что сравнение близких по величине шумов может быть проведено нулевым методом с точностью, существенно превышающей точность измерения шумов обычным методом. Анализ результатов сравнения шумов достаточно большого числа образцов приводит к весьма определенным выводам о том, выполняется ли для них или нет соотношение (1).

3. Наибольшее число измерений проводилось на частоте $f_1 = 52$ кгц при полосе усилителя около 20 кгц. Источником вспомогательного напряжения служил стандарт-генератор ГСС-6. Мы брали $f_0 = 100$ кгц (минимальная частота ГСС-6). Для устранения помех опыты производились в экранной будке. Для исключения ошибок из-за неквадратичности детектирования и входной емкости усилителя брались достаточно малые сопротивления. Проведение измерений с различными образцами было организовано так, чтобы исключить возможность психологических ошибок.

Было проведено сравнение шумов 12 образцов: проволочных сопротивлений из меди, нихрома, вольфрама, железа, константана, манганина, никелина и молибдена; пленочных сопротивлений из графита и серебра; электролита (1% раствор KCl в дестиллированной воде в стеклянной трубке с платиновыми электродами); проволочного образца нихрома, обработанного путем быстрого (время нагревания 16 мин.) отжига до температуры 550°.

Размеры и форма проволочных образцов были выбраны так, чтобы их емкости и индуктивности не оказывали заметного влияния на результат измерения шумов, а также, чтобы скин-эффект не влиял заметно на величину R. При измерении сопротивления электролита было проверено, что в интервале 30—100 кгц оно не зависит от частоты и при напряжениях меньших 1 мв не зависит от амплитуды. При измерении как шумов, так и сопротивления электролита последний находился в масляной ванне с постоянной температурой. Для всех образцов измерялось по шкале стандарт-генератора значение U, соответствующее установке на нуль выходного прибора. Сопротивления образцов отличались не больше, чем на 30%. Вследствие этого значения U отсчитывались для всех образцов на небольшом участке одной и той же шкалы стандарт-генератора.

Был проведен ряд предварительных опытов с нихромом, установивших линейность зависимости U^2/R от T, а также линейность зависимости U^2 от R при постоянной T. Последний результат означает отсутствие существенной реакции анода входной лампы (она дала бы параболическую зависимость U^2 от R).

В табл. 1 приводится результат одной из серий измерений для 12 образцов. Результаты единичных измерений величины $x = U^2/RT$ и их средние значения $\bar{x}$ для отдельных образцов приводятся в условных единицах. Для характеристики точности измерений указаны в процентах относительная средняя квадратичная ошибка единичного измерения $\sigma_x/\bar{x}$ и относительная средняя квадратичная ошибка среднего $\sigma_{\bar{x}}/\bar{x}$, равные, соответственно,

$$\frac{\sigma_x}{\bar{x}} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}, \quad \frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}},$$

Таблица 1

Материал	R в омах	x			$\bar{x}$	$\frac{\sigma_x}{\bar{x}}$, %	$\frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}}$, %	$\frac{\varepsilon}{\bar{x}}$, %
Нихром	411	9,82; 9,85;	9,72; 9,76;	9,85 9,85	9,81	0,6	0,3	0,5
Электролит	438	9,90; 9,70;	9,75; 9,82;	9,93 9,88	9,83	0,9	0,4	0,8
Медь	524	9,97; 9,90;	9,63; 9,99;	9,97 9,90	9,89	1,4	0,6	1,1
Манганин	460	9,97; 9,75;	10,12; 9,62;	9,92 9,76	9,86	1,8	0,7	1,5
Константан	509	9,84; 10,02;	9,79; 9,66;	9,78 9,66	9,79	1,4	0,6	1,1
Вольфрам	469	10,16; 10,00;	9,70; 9,90;	9,96 9,70	9,90	1,8	0,7	1,5
Серебро	561	9,79; 9,72;	10,04; 9,68;	9,98 10,08	9,88	1,3	0,5	1,0
Никелин	488	9,69; 9,77;	9,91; 9,79;	9,90 9,85	9,82	0,7	0,3	0,6
Молибден	513	9,81; 9,68;	9,80; 9,67;	9,78 9,68	9,74	0,7	0,3	0,6
Железо	522	9,85; 9,67;	9,70; 9,73;	9,65 10,22	9,80	2,2	0,9	1,8
Графит	489	9,67; 9,79;	10,22; 9,79;	10,20 9,94	9,93	2,4	1	1,9
Нихром отожженный	457	9,90; 9,78;	9,78; 9,90;	9,80 9,90	9,83	0,6	0,3	0,5

а также величина $\varepsilon/\bar{x}$ такая, что с вероятностью 0,9 измеряемая величина x находится в интервале $\bar{x}-\varepsilon < x < \bar{x}+\varepsilon$.

Из табл. 1 видно, что с указанной в ней точностью* величина x одинакова для всех исследованных материалов.

Аналогичные измерения проводились на частотах $f_2 = 200$ кгц и $f_3 = 3$ Мгц. Они дали такой же результат.

4. На основании результатов измерений x и соотношения (4) мы можем утверждать, что с точностью не меньшей, чем указанная в табл. 1,

$$\frac{w}{4RT} = k', \tag{5}$$

где k' может быть функцией частоты, но не зависит при данной частоте от материала и обработки образца, его сопротивления и температуры.

Этот результат находится в противоречии с результатами некоторых работ Е. Я. Пумпера ([1,3]).

Из (5) следует, что либо а) $k' = k = 1{,}38 \cdot 10^{-16}$ эрг/град (постоянная Больцмана), т. е. для всех образцов выполняется формула Найквиста, либо б) $k' = k\varphi(f)$; $\varphi(f) \neq 1$, причем каждая из величин $\varphi(f_1)$, $\varphi(f_2)$, $\varphi(f_3)$ одинакова для всех 12 испытанных образцов. Второе утверждение представляется нам весьма неправдоподобным.

Авторы выражают благодарность Г. С. Горелику за постоянное внимание к работе и тщательное обсуждение ее результатов.

Физико-технический институт при
Горьковском государственном университете

Поступило
10 VII 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Е. Я. Пумпер, ДАН, 57, № 8 (1947); 59, № 8 (1948); ЖЭТФ, 18, № 12, 1112 (1948). [2] R. H. Dicke, Rev. Sc. Instr., 17, 7, 268 (1946). [3] Е. Я. Пумпер, ДАН, 66, № 1 (1949); Изв. АН СССР, сер. физ., 13, № 5, 596 (1949).

* Разброс обусловлен, главным образом, флуктуациями на выходе (около 0,5%) и нестабильностью амплитуды стандарта (около 0,5%).