

ФЛИККЕР-ШУМ НЕПРОВОЛОЧНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 1—300 гц

Т. Д. Разина

Приведены результаты измерения спектральной плотности фликкер-шума сопротивлений типа ВС и МЛТ. Исследованы спектры шума в диапазоне частот $1 \div 300$ гц. Найдена зависимость спектральной плотности фликкер-шума от силы тока и величины сопротивления. Получена эмпирическая формула, позволяющая оценивать величину спектральной плотности фликкер-шума сопротивлений с номинальными значениями $1 \div 100$ ком.

ВВЕДЕНИЕ

В некоторых низкочастотных радиотехнических устройствах оказывается существенным фликкер-шум непроволочных сопротивлений (часто называемый также токовым шумом, контактным, дополнительным и т. п.). Фликкер-шум возникает, как известно, вследствие флюктуаций величины непроволочного сопротивления и может рассматриваться как действие шумовой ЭДС $E = IdR$, где I —сила тока, протекающего через сопротивление, dR —изменение величины сопротивления R . Величина E представляет собой, очевидно, изменение падения напряжения на сопротивлении с изменением R на dR при условии, что внутреннее сопротивление источника тока можно считать бесконечно большим. Фликкер-шум обычно характеризуется спектральной плотностью среднего квадрата напряжения шумовой ЭДС. Ниже эта величина будет называться ради краткости просто спектральной плотностью фликкер-шума и обозначаться E_f . Величина E_f связана со спектральной плотностью среднего квадрата флюктуаций сопротивления R , очевидным соотношением $E_f = I^2 R_f$. Численное значение R_f на фиксированной частоте f зависит, вообще говоря, как от величины сопротивления, так и от материала, из которого оно изготовлено, а также от силы тока, протекающего через сопротивление.

Экспериментальному исследованию фликкер-шума непроволочных сопротивлений посвящен целый ряд работ (см., например, [1—8]). Было показано, что спектральная плотность фликкер-шума как функция частоты f , сопротивления R и силы тока I может быть записана в виде:

$$E_f = Af^{-\alpha} I^\beta R^\gamma, \quad (1)$$

где показатель степени α близок к единице в частотном интервале от долей гц и приблизительно до нескольких мгц, показатель степени $\beta \approx 2$ при токах не более нескольких ма (т. е. при слабых токах R_f практически не зависит от I), γ обычно несколько больше 2 (согласно [3], $\gamma \approx 3$).

Величина A в формуле (1) — коэффициент пропорциональности, численное значение которого определяется экспериментально. Как показывают измерения, величина A зависит от индивидуальных особенностей сопротивления: материала, из которого изготовлено непроволочное сопротивление, технологии его изготовления, мощности, на которую оно рассчитано, и т. п. Уместно напомнить, что в проволоч-

ных сопротивлениях фликкер-шум не возникает, т. е. для них $A=0$. Разброс значений A в зависимости от типа сопротивлений оказывается весьма большим (2–3 порядка). Это делает невозможным непосредственное перенесение данных о фликкер-шуме непроволочных сопротивлений одного типа на шумы сопротивлений другого типа. Поэтому, хотя в зарубежной литературе и имеются довольно подробные данные о фликкер-шуме непроволочных сопротивлений, представляют интерес исследования фликкер-шума отечественных непроволочных сопротивлений.

В статье описаны измерения спектральной плотности фликкер-шума сопротивлений типа ВС и МЛТ с номинальными значениями от 1 до 91 к Ω и мощностями от 0,25 до 2 вт и некоторых переменных сопротивлений типа СП и СПО в диапазоне частот 1–300 гц. Полученные экспериментальные данные позволяют записать формулу (1) в виде, удобном для оценок напряжения фликкер-шума сопротивлений типа ВС и МЛТ.

1. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для исследования низкочастотного спектра фликкер-шума непроволочных сопротивлений использовался анализатор спектров, блок-схема которого представлена на рис. 1*. Чувствительность анализатора определялась в основном уровне собственных шумов первого каскада входного усилителя и была равна 10^{-15} в 2 гц $^{-1}$ на частоте 1 гц. Калибровка анализатора производилась перед каждой серией измерений стандартным синусоидальным сигналом частоты 50 гц, который подавался на вход анализатора от сети через специальный аттенюатор. Точность измерений на анализаторе $\pm 20\%$.

Схема измерения напряжения фликкер-шума сопротивлений также показана на рис. 1. Исследуемое напряжение V подавалось на вход

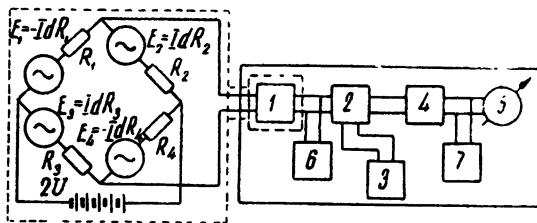


Рис. 1. Блок-схема анализатора спектров и схема включения исследуемых сопротивлений: 1—усилитель низкой частоты с коэффициентом усиления $5 \cdot 10^4$ на резонансной частоте $f = 50$ гц и полосой пропускания от 0,5 до 400 гц на уровне 0,1 по мощности; 2—балансный смеситель; 3—гетеродин (частота от 440 гц до 870 гц); 4—усилитель промежуточной частоты 440 гц с коэффициентом усиления 10^3 и полосой пропускания 0,5 гц; 5—выходной прибор; 6—осциллограф для визуального наблюдения исследуемого шума в полосе входного усилителя; 7—осциллограф для наблюдения шума в полосе УПЧ.

анализатора с диагонали сбалансированного моста, образованного сопротивлениями одной и той же величины, мощности и типа ($R_1=R_2=R_3=R_4=R$). В другую диагональ моста включалась батарея акку-

* Этот анализатор аналогичен описанному в работе [9].

муляторов с напряжением $2U$. Поскольку внутреннее сопротивление источника постоянного напряжения (несколько ом) много меньше сопротивлений, образующих мост ($1 \div 91 \text{ ком}$), измеряемое напряжение

$$V = (E_1 + E_2)/2 - (E_3 + E_4)/2.$$

В силу статистической независимости флюктуаций dR_1 , dR_2 , dR_3 и dR_4 средний квадрат напряжения V

$$\bar{V}^2 = (\bar{E}_1^2 + \bar{E}_2^2 + \bar{E}_3^2 + \bar{E}_4^2) / 4.$$

Спектральная плотность фликкер-шума E_f дается выражением:

$$E_f = \bar{V}^2 / \Delta f,$$

где Δf — полоса пропускания анализатора. Таким образом, использование мостовой схемы приводит к тому, что измеряется спектральная плотность фликкер-шума, усредненная по четырем сопротивлениям.

Для измерения спектральной плотности фликкер-шума одного сопротивления мост составлялся из трех проволочных сопротивлений и одного непроволочного. В этом случае, очевидно,

$$E_f = \bar{V}^2 / 4\Delta f.$$

Следует отметить, что применение мостовой схемы устраниет влияние на результаты измерений шумов источника постоянного напряжения. С целью же устранения различного рода помех исследуемые сопротивления, источник постоянного напряжения и входной усилитель анализатора тщательно экранировались. Кроме того, были приняты меры для уменьшения микрофонного эффекта.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Наиболее полно был исследован фликкер-шум сопротивлений типа ВС и МЛТ. Для этих сопротивлений были определены величины A , σ , β и γ , входящие в формулу (1).

На рис. 2 приведены результаты измерений спектральной плотности фликкер-шума на фиксированной частоте $f = 5 \text{ гц}$ в зависимости от силы тока, протекающего через сопротивление. По координатным осям в логарифмическом масштабе отложены значения E_f и I . Из графика видно, что экспериментальные точки как для сопротивлений ВС, так и для сопротивлений МЛТ располагаются вдоль прямой линии, тангенс угла наклона которой равен 2. Следовательно, спектральная плотность фликкер-шума пропорциональна квадрату силы тока, протекающего через сопротивление, т. е. $\beta = 2$ в формуле (1). Необходимо отметить, однако, что при токе более 10 ма наблюдаются характерные всплески напряжения фликкер-шума, связанные, вероятно, с изменением структуры проводящего слоя сопротивлений [10]. Измерения показали, что при $I > 10 \text{ ма}$ зависимость спектральной плотности фликкер-шума от силы тока отличается от квадратичной.

Выяснить зависимость спектральной плотности фликкер-шума от величины сопротивления при фиксированных частоте и силе тока сложнее. Дело в том, что напряжение фликкер-шума может сильно меняться от сопротивления к сопротивлению при одной и той же номинальной величине сопротивлений и одинаковой их мощности. Сказанное иллюстрирует рис. 3, на котором приведены, в частности, результаты измерений спектральной плотности фликкер-шума сопротивлений ВС (точки) и МЛТ (крестики) для нескольких десятков сопротивлений одной и той же номинальной величины и мощности. Не-

трудно видеть из приведённых рисунков, что спектральная плотность фликкер-шума может меняться от экземпляра сопротивления к экземпляру в $10 \div 100$ раз. Поэтому следует ожидать большого разброса точек на графике (E_f , R). На рис. 4 представлена зависимость E_f от R , снятая на частоте $f = 5\text{гц}$, при постоянной силе тока $I = 1\text{ мА}$ и 5 мА , протекающего через сопротивления. Разброс точек на этом графике велик; тем не менее, из рис. 4 можно заключить, что при $I = \text{const}$ и $f = \text{const}$ спектральная плотность фликкер-шума E_f пропорциональна $R^{2,5}$. Разброс же точек на рис. 4 целесообразно отнести за счет изменения коэффициента A от экземпляра сопротивления к экземпляру.

С целью дополнительной проверки этого вывода были измерены фликкер-шумы различных по величине сопротивлений на частоте 5 гц при постоянном падении напряжения на них. Результаты измерений даны на рис. 3. Как видно из этого рисунка, экспериментальные точки хаотически располагаются вдоль прямой линии $E_f/U^2\sqrt{R} = 8,6 \cdot 10^{-17}$ для сопротивлений типа ВС (рис. 3а) и вдоль прямой линии $E_f/U^2\sqrt{R} = -1,4 \cdot 10^{-17}$ для сопротивлений типа МЛТ (рис. 3б), за исключением точек, относящихся к $R < 2\text{ ком}$, о которых будет сказано ниже.

Для определения показателя

степени α в формуле (1) было снято 50 спектров фликкер-шума различных сопротивлений. Сравнение значений α для сопротивлений различных типов, величины и мощности показывает, что не существует какой-либо закономерности в изменениях α от сопротивления к сопротивлению. Гистограмма значений α приведена на рис. 5. Значения α тесно группируются около средней величины $\bar{\alpha} = 1,05$, дисперсия α равна 0,01. Учитывая малость дисперсии величины α и большие изменения величины A от сопротивления к сопротивлению, при оценках спектральной плотности фликкер-шума сопротивлений в диапазоне частот $1 \div 300\text{ гц}$ в формуле (1) можно положить $\alpha = 1$. Рис. 5 позволяет заключить, что закон распределения величины α близок к нормальному.

Чтобы получить формулы, пригодные для оценок спектральной плотности фликкер-шума сопротивлений, необходимо еще определить \bar{A} и дисперсию $D(A) = (A - \bar{A})^2$. Вычисленные на основании данных рис. 3 среднее значение \bar{A} и дисперсия $D(A)$ оказываются равными соответственно $4,3 \cdot 10^{-16} (\text{ко.и.})^{-0,5}$ и $3,4 \cdot 10^{-31} (\text{ком})^{-1}$ для сопротивлений типа ВС при $R \geq 2\text{ ком}$ и $7 \cdot 10^{-17} (\text{ком})^{-0,5}$, $2,2 \cdot 10^{-33} (\text{ком})^{-1}$ для сопротивлений типа МЛТ при $R \geq 2\text{ ком}$.

При вычислении \bar{A} и $D(A)$ данные о фликкер-шуме сопротивлений с $R < 2\text{ ком}$ были исключены, так как они дают аномально большие значения величины \bar{A} по сравнению со всеми остальными данными, особенно в случае сопротивлений МЛТ. Это связано, вероятно, с тем,

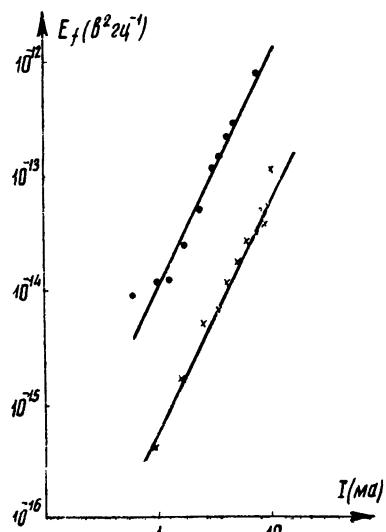


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности фликкер-шума E_f от силы тока I : — для сопротивления ВС-2 ($R = 16\text{ ком}$); $\times \times$ — для сопротивления МЛТ-2 ($R = 11\text{ ком}$).

что измерения фликкер-шума в случае $R \sim 1$ ком проводились при больших токах (~ 20 ма), когда зависимость спектральной плотности фликкер-шума от силы тока отличается от квадратичной. При малых токах измерения фликкер-шума сопротивлений с $R \sim 1$ ком провести было невозможно из-за недостаточной чувствительности анализатора спектров. Результаты измерения фликкер-шумов сопротивлений с номинальными значениями порядка 1 ком дают для \bar{A} величину $1 \cdot 10^{-15}$ (ком) $^{-0.5}$ в случае сопротивлений ВС и величину $1,7 \cdot 10^{-14}$ (ком) $^{-0.5}$ в случае сопротивлений МЛТ.

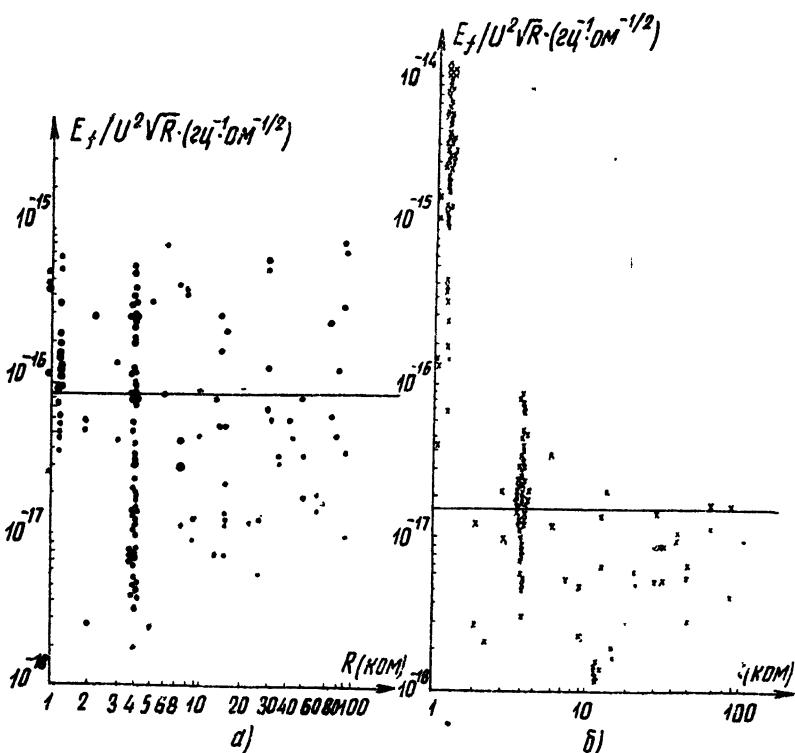


Рис. 3. Зависимость величины $E_f/U^2\sqrt{R}$ от величины сопротивления R : а) — для сопротивлений типа ВС, б) — для сопротивлений типа МЛТ.

Таким образом, спектральная плотность среднего квадрата напряжения фликкер-шума сопротивлений в диапазоне частот 1—300 гц может быть оценена по формуле:

$$E_f = \bar{A} I^2 R^{2.5} f^{-1} = 4.3 \cdot 10^{-16} U^2 \sqrt{R} f^{-1} (\text{в}^2 \text{ гц}^{-1}) \quad (2)$$

(где U измеряется в в, R — в ком, f — в гц), для сопротивлений типа ВС и по формуле

$$E_f = 7 \cdot 10^{-17} U^2 \sqrt{R} f^{-1} (\text{в}^2 \text{ гц}^{-1}) \quad (3)$$

для сопротивлений типа МЛТ.

Пределы допуска величины A нетрудно определить по данным рис. 3. В случае сопротивлений ВС 90% значений A из общего числа $N=120$ заключены между $A_1 = 2.2 \cdot 10^{-15}$ и $A_2 = 2.7 \cdot 10^{-17}$. Для сопротивлений МЛТ по 85 измеренным значениям $A_1 = 1.7 \cdot 10^{-16}$ и $A_2 = -8.5 \cdot 10^{-18}$.

Как видно из формул (2) и (3), фликкер-шум сопротивлений МЛТ с $R \geq 2 \text{ к}ом$ в среднем на порядок меньше, чем фликкер-шум сопротивлений ВС.

По поводу формул (2) и (3) заметим следующее.

1) Естественно предположить, что с помощью этих формул можно оценивать спектральную плотность фликкер-шума сопротивлений с $R \sim 1 \text{ к}ом$, если сила тока не превышает 10 ma .

2) Измерения спектральной плотности фликкер-шума сопротивлений различной мощности обнаруживают некоторую тенденцию к увеличению фликкер-шума с уменьшением мощности, на которую рассчитано сопротивление. Однако, поскольку изменения фликкер-шума сопротивлений от экземпляра к экземпляру велики, формулы (2) и (3) можно использовать для оценок спектральной плотности фликкер-шума сопротивлений любой мощности от 0,25 $вт$ до 2 $вт$.

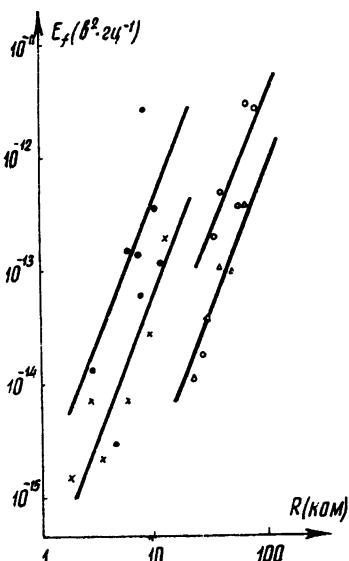


Рис. 4.

Рис. 4 Зависимость спектральной плотности фликкер-шума E_f от сопротивления R : — для ВС-0,5 ($I=5 \text{ ma}$), \circ — для ВС-0,5 ($I=1 \text{ ma}$), \times — для МЛТ-0,5 ($I=5 \text{ ma}$), Δ — для МЛТ-0,5 ($I=1 \text{ ma}$).

Рис. 5. Гистограмма значений α для сопротивлений типов ВС и МЛТ.

3) При избранном в данной статье способе описания фликкер-шума зависимость $E_f \propto R^{2,5}$ может не отражать истинной зависимости R_f от R , так как различные сопротивления изготавливаются, вообще говоря, из различных проводящих слоев.

Наряду с измерениями фликкер-шумов сопротивлений ВС и МЛТ были проведены сравнительно немногочисленные измерения спектральной плотности фликкер-шумов переменных сопротивлений типа СП и СПО. Измерения показали, что шумы переменных сопротивлений, имеющих тот же номинал и мощность, на один-два порядка больше шумов постоянных сопротивлений.

Автор благодарна А. Н. Малахову за внимание к настоящей работе и просмотр рукописи.

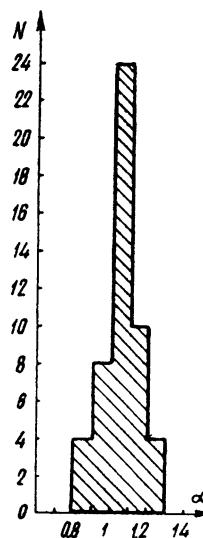


Рис. 5.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 R. H. Campbell, R. A. Chipman, Proc. IRE, **37**, 938 (1949).
- 2 I. M. Templeton, DKC Mac Donald, Proc. Phys. Soc., **66B**, 680 (1953).
- 3 K. E. Doering, Funk und Ton, **8**, 378, 422 (1954).
- 4 E. Koch Milton, Electronics, **27**, 181 (1954).
- 5 D. A. Bell, K. I. Chong, Wireless Engr., **31**, 142 (1954).
- 6 K. Vliet, C. Leeuwen, J. Blok, C. Ris, Physica, **20**, 481 (1954).
- 7 G. T. Conrad, Trans. IRE, cp-4, № 5, 61, 79 (1955).
- 8 G. T. Conrad, Trans. IRE, **3**, 14, 34 (1956).
- 9 А. Н. Малахов, Приборы и техника эксперимента, **1**, 79 (1958).
- 10 Б. С. Гальперин, Непроволочные сопротивления, Госэнергоиздат, М.-Л., 1958.

Научно-исследовательский радиофизический институт
при Горьковском университете

Поступила в редакцию
22 октября 1959 г.