

Исследование фликкер-шума толстопленочных резисторов

П. Мерки¹

УДК 621.316.8 | ВАК 05.27.01

Фликкер-шум (также называемый $1/f$ -шумом) толстопленочных резисторов может достигать достаточно высоких значений. В 2013 году автор данной статьи столкнулся с проблемой непредвиденного шума в конструкции маломощного усилителя. До того как в результате занявшего несколько часов поиска источник шума был выявлен, было сложно даже предположить, что такое сильное влияние на работу схемы может оказать всего один толстопленочный резистор. В статье приводится описание нескольких измерений, выполненных для оценки фликкер-шума резистора, оказавшегося причиной данных проблем, а также ряда дополнительных исследований фликкер-шума резисторов большого номинала, проведенных в 2016 году.

ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Тестовый образец представляет собой мостовую схему (рис. 1). Ее питание осуществляется от батареи. Для регулировки смещения нуля служит подстроечный резистор 3250W-1-503 компании Bourne. Напряжение мостовой схемы подается на маломощный дифференциальный усилитель на основе интегральных схем (ИС) AD8676 и INA103 или только одной ИС INA103.

Макетная плата для подключения тестовых образцов и испытательная установка представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

Были изготовлены тестовые образцы 17 типов, отличающихся применяемыми резисторами (табл. 1, рис. 4), при этом четыре типа образцов (K, L, N и R) были выполнены

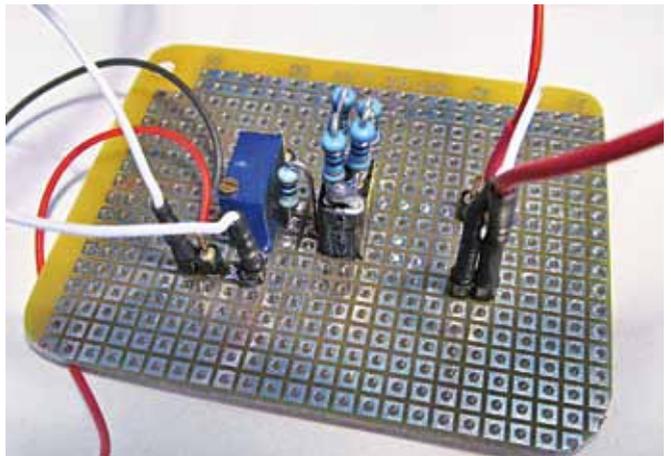


Рис. 2. Внешний вид платы с тестовым образцом

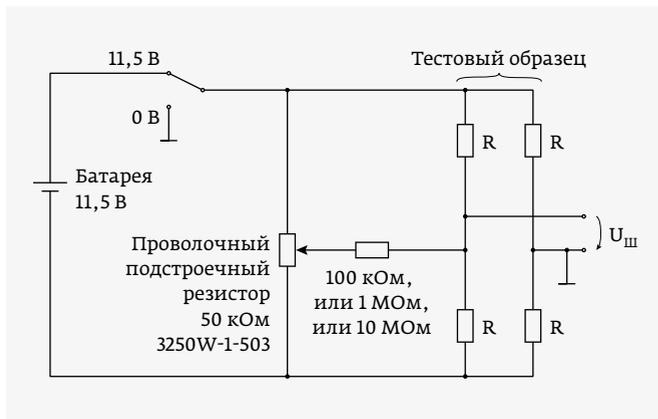


Рис. 1. Принципиальная схема платы с тестовым образцом

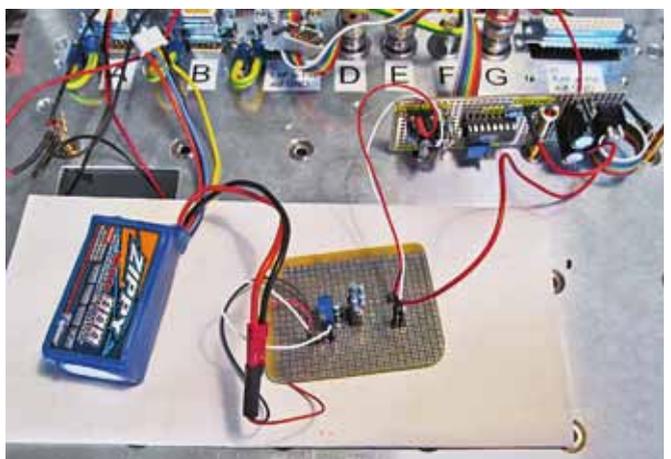


Рис. 3. Внешний вид испытательной установки

¹ Лаборатория физики твердого тела Швейцарской высшей технической школы Цюриха.

Таблица 1. Типы тестовых образцов

Обозначение типа образца	Описание
A	Резисторы 0805 10 кОм из набора Constructiva AG SMD-RCS x
B	Тонкопленочные резисторы 10 кОм Panasonic ERA-6AED103V
C	Резисторы 0805 100 кОм из набора Constructiva AG SMD-RCS x
D	Тонкопленочные резисторы 100 кОм Panasonic ERA-6AED104V
E	Резисторы 10 кОм, имевшиеся в запасах
F	Резисторы 10 кОм, тип неизвестен; вероятно, тонкопленочные 0207
G	Резисторы 100 кОм, тип неизвестен; вероятно, тонкопленочные 0207
K	Металлокерамические подстроечные резисторы 50 кОм 44WR50KLFT7 VI Tech (в позиции 25 кОм/25 кОм)
L	Проволочные переменные резисторы 20 кОм Spectrol Model 534 (в позиции 10 кОм/10 кОм)
M	Проволочные резисторы 10 кОм Vishay RS01A10K00FE12
N	Металлокерамические подстроечные резисторы 200 кОм Contelec 183W
O	Проволочные резисторы 470 Ом Vishay RS01A470R0FE12
P	Тонкопленочные резисторы 470 Ом Panasonic ERA-6AED471V
Q	Резисторы 0805 470 Ом из набора Constructiva AG SMD-RCS x
R	Металлокерамические подстроечные резисторы 1 кОм Suntan TSR-3296
S	Резисторы 470 Ом, тип неизвестен; вероятно, тонкопленочные 0207
T	Резисторы 0805 10 кОм из набора Constructiva AG SMD-RCS x (16 резисторов)

с использованием подстроечных (переменных) резисторов (рис. 5а), а тип Т был построен на 16 резисторах (рис. 5б).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измеренный шум включает в себя следующие составляющие:

- шум напряжения усилителя (на рис. 6–8 показан темно-синим цветом);
- шум тока усилителя, помноженный на сопротивление;
- тепловой шум резистора (теоретическое значение показано на рис. 6–8 красным цветом);
- фликкер-шум, возникающий при протекании тока через резистор.

Оранжевым цветом на рис. 6–8 показан шум при отсутствии напряжения, который должен представлять

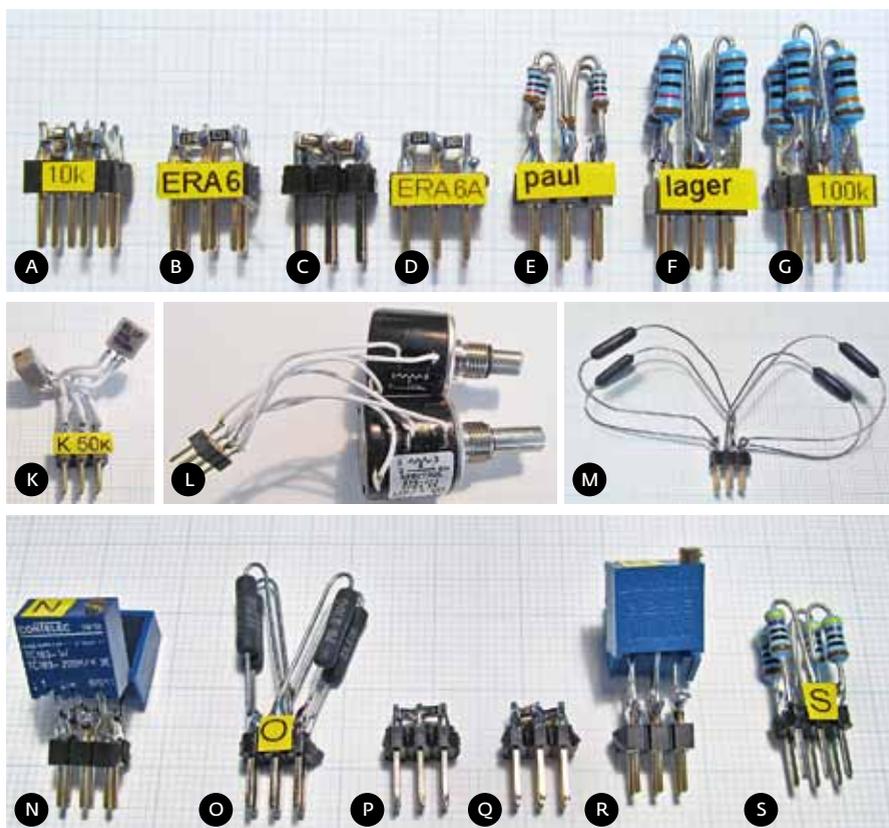


Рис. 4. Тестовые образцы

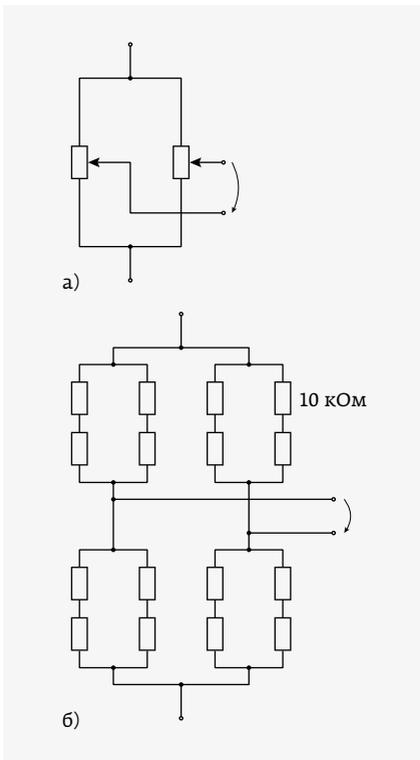


Рис. 5. Схемы образцов, состоящих из подстроечных (переменных) резисторов (а) и из 16 постоянных резисторов (б)

собой сумму шума напряжения усилителя, шума тока усилителя, помноженного на сопротивление, и теплового шума.

Для тонкопленочных резисторов практически отсутствует разница между шумом при наличии и отсутствии напряжения, что говорит о том, что фликкер-шум таких резисторов очень низок.

На низких частотах фликкер-шум толстопленочных резисторов может превышать шум тонкопленочных резисторов примерно в 100 раз, металлокерамических подстроечных резисторов – примерно в 1000 раз. При повышении напряжения ситуация еще более ухудшается, поскольку фликкер-шум пропорционален приложенному напряжению.

Для расчета фликкер-шума отдельного резистора следует умножить измеренное значение на

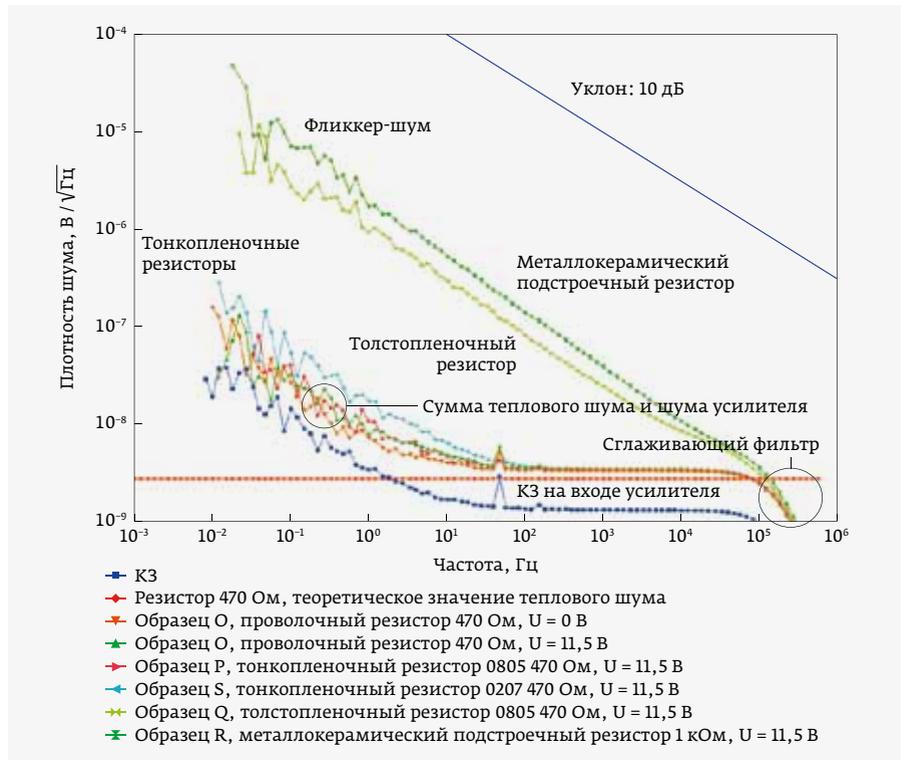


Рис. 6. Результаты измерений образцов с резисторами 470 Ом

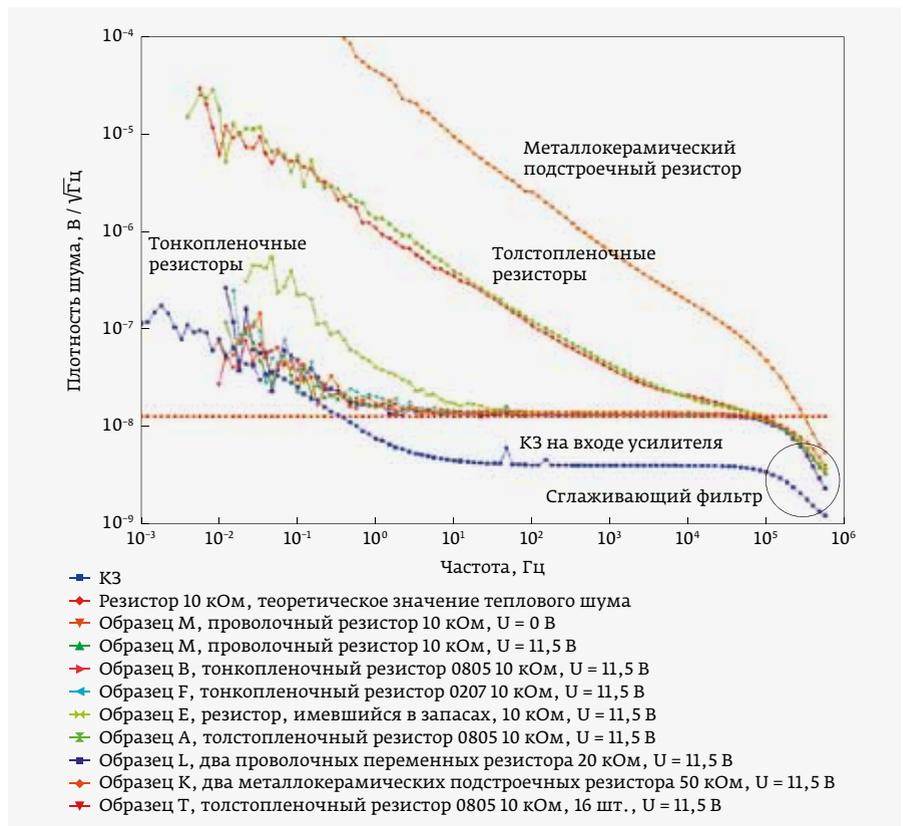


Рис. 7. Результаты измерений образцов с резисторами 10 кОм

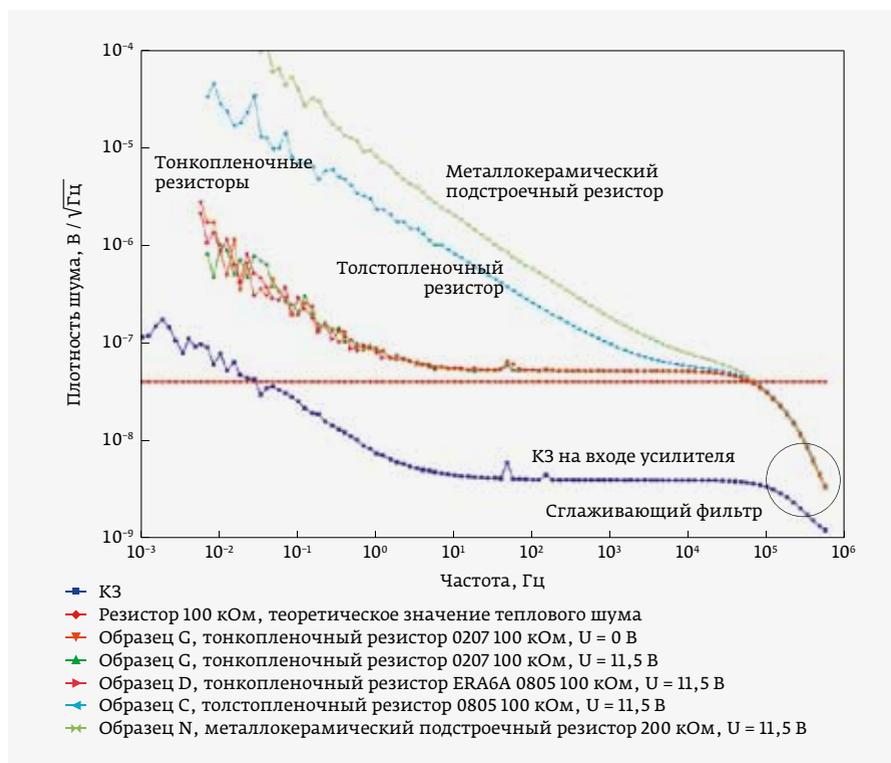


Рис. 8. Результаты измерений образцов с резисторами 100 кОм

1. Подключить подстроечный резистор.
2. Выполнить регулировку.
3. Отключить подстроечный резистор и измерить его сопротивление в данной позиции.
4. Выбрать постоянный резистор из ряда с ближайшим номиналом, превышающим измеренное сопротивление.
5. Подключить подстроечный резистор параллельно постоянному.
6. Повторить процедуру необходимое количество раз.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ФЛИККЕР-ШУМА РЕЗИСТОРОВ БОЛЬШОГО НОМИНАЛА

Для измерения фликкер-шума резисторов большого номинала была использована оптимизированная установка (рис. 9–11). Измерялся только шум напряжения полумоста. Шумы усилителя, как напряжения,

графике на величину $2U / (11,5 \text{ В})$, где U – приложенное напряжение.

Если четыре резистора составляют один комбинированный резистор, фликкер-шум следует разделить на 2.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Если шум является важным параметром устройства, следует использовать тонкопленочные резисторы. По возможности следует избегать применения подстроечных (металлокерамических) резисторов. Также не рекомендуется использовать проволочные переменные резисторы, поскольку у них существует минимальный шаг сопротивления и значение сопротивления может случайным образом меняться между соседними шагами.

При необходимости выполнения операции регулировки прибора следует использовать несколько постоянных резисторов, соединенных параллельно. При этом можно действовать следующим образом:

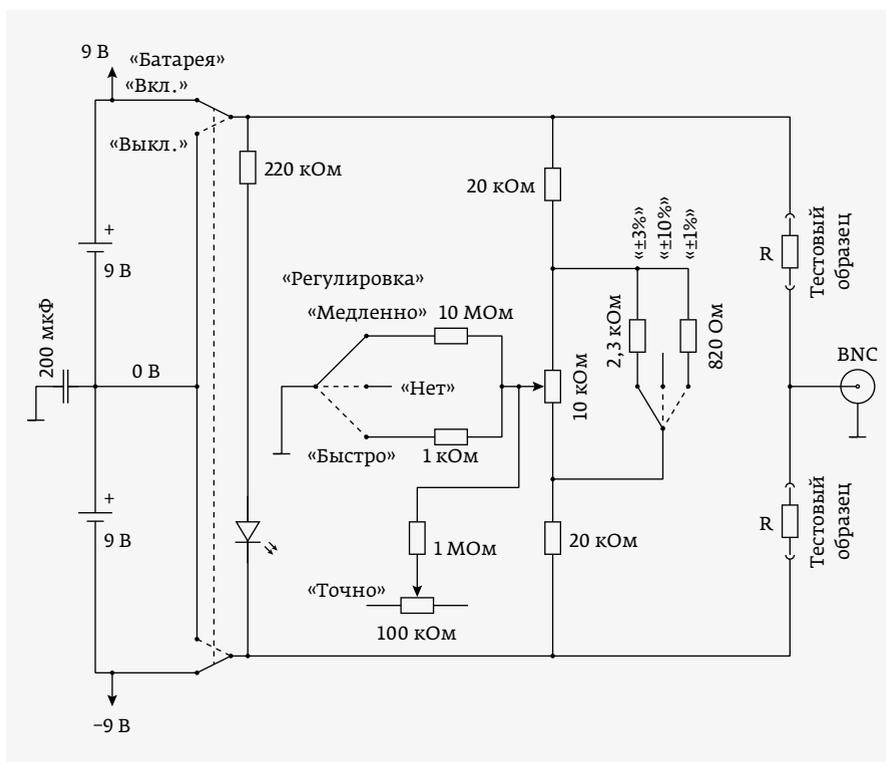


Рис. 9. Принципиальная схема подключения тестового образца для исследования резисторов большого номинала

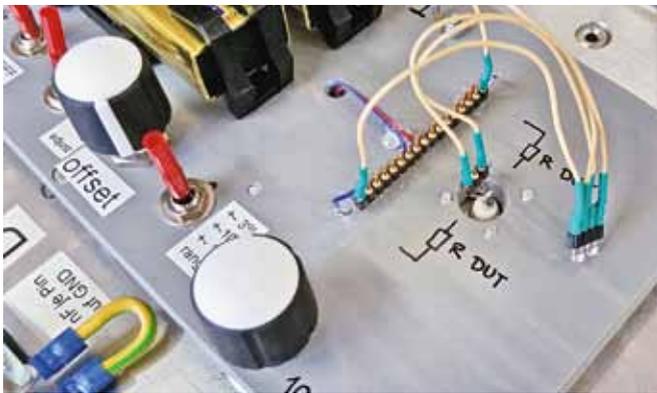


Рис. 10. Подключение тестового образца для исследования резисторов большого номинала

Рис. 11. Внешний вид установки для исследования резисторов большого номинала

так и тока, были ниже, чем у усилителя, применявшегося в первой установке.

Был измерен шум при отключенной батарее (сумма теплового шума и шумов усилителя), а затем шум при подключенной батарее. Затем была выбрана декада частоты, в которой сигнал был наиболее подходящим для расчетов, и в этой декаде была рассчитана разность шумов. После этого был получен коэффициент шума для отдельного резистора $F = U_{ш\text{СКЗ}} / U_{пост.}$, где $U_{ш\text{СКЗ}}$ – среднеквадратичное напряжение шума, $U_{пост.}$ – постоянная составляющая напряжения, по следующей формуле:

$$F = U_{доп.ш.} / U_{п.} \cdot 2\sqrt{2},$$

где $U_{доп.ш.}$ – дополнительное напряжение шума (разность напряжений шумов при подключенной и отключенной батарее) в пределах декады, $U_{п.}$ – напряжение батареи (18 В).

В примере, показанном на рис. 12, в диапазоне частот от 1 до 100 Гц наблюдаются пики, которые вызваны вибрацией испытательной установки, поскольку она очень чувствительна к вибрации при работе с резисторами с большим номиналом. При частоте выше 0,1 Гц шум снижается, что происходит из-за емкостной нагрузки, образуемой проводами и усилителем.

В диапазоне от 10 до 100 мГц кривая шума при отсутствии постоянного тока в резисторе (синяя линия) плоская и расположена несколько выше ожидаемого теплового шума. Большая величина шума вызвана

входным шумом тока усилителя. Для расчетов был выбран диапазон 10...100 мГц.

В этом диапазоне напряжение шума при отключенной батарее составляет $1,76 \cdot 10^{-5}$ В СКЗ, при подключенной – $3,55 \cdot 10^{-4}$ В СКЗ, разность $U_{доп.ш.} = 3,4 \cdot 10^{-4}$ В СКЗ. Коэффициент шума $F = 5,3 \cdot 10^{-5}$. Иногда коэффициент шума представляется в децибелах: $F_{дб} = 20 \lg(U_{ш\text{СКЗ}} \cdot 10^6 / U_{пост.})$.

В табл. 2 приведены значения коэффициента шума для различных образцов.

На рис. 13 отмечены значения коэффициента шума F для различных типов резисторов и их номинальных сопротивлений. Из графика видно, что характер

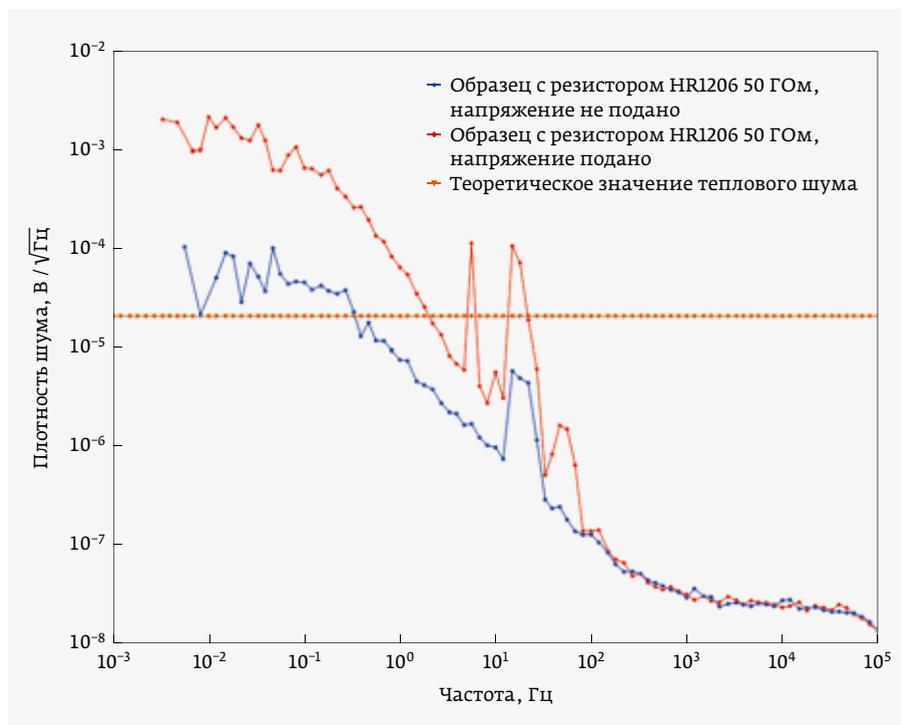


Рис. 12. Пример результатов измерений шума напряжения – резисторы 50 ГОм

Таблица 2. Параметры различных образцов

№ образца	Тип резистора	Сопротивление образца, Ом	Коэффициент шума F	Коэффициент шума F _{дБ} , дБ
1	MCT0603	1,0 · 10 ⁷	3,1 · 10 ⁻⁶	9,83
2	P2010	4,3 · 10 ⁷	4,5 · 10 ⁻⁷	-6,94
3	SMM0204	1,0 · 10 ⁷	4,3 · 10 ⁻⁷	-7,33
4	MMB0207	1,0 · 10 ⁷	3,4 · 10 ⁻⁷	-9,37
5	RK1	2,2 · 10 ⁷	2,0 · 10 ⁻⁵	26,02
6	RGP0207	1,0 · 10 ⁸	4,0 · 10 ⁻⁷	-7,96
7	HR1206	5,0 · 10 ¹⁰	5,2 · 10 ⁻⁵	34,32
8	ERA8A	1,0 · 10 ⁶	2,9 · 10 ⁻⁸	-30,75
9	RG3216	1,0 · 10 ⁶	2,4 · 10 ⁻⁸	-32,4
10	MCU0805	1,0 · 10 ⁷	2,2 · 10 ⁻⁶	6,85
11	CRHV1206	1,0 · 10 ⁸	1,8 · 10 ⁻⁶	5,11
12	CRHV1206	1,0 · 10 ⁹	3,7 · 10 ⁻⁶	11,36
13	HVR1206	1,0 · 10 ¹⁰	2,0 · 10 ⁻⁵	26,02
14	ERA6A	1,0 · 10 ⁶	2,0 · 10 ⁻⁸	-33,98
15	ERA6A	1,0 · 10 ⁵	2,5 · 10 ⁻⁸	-32,04
16	ERA6A	1,0 · 10 ⁴	1,9 · 10 ⁻⁸	-34,42
17	ERA6A 10 шт. последовательно	1,0 · 10 ⁷	2,5 · 10 ⁻⁸	-32,04

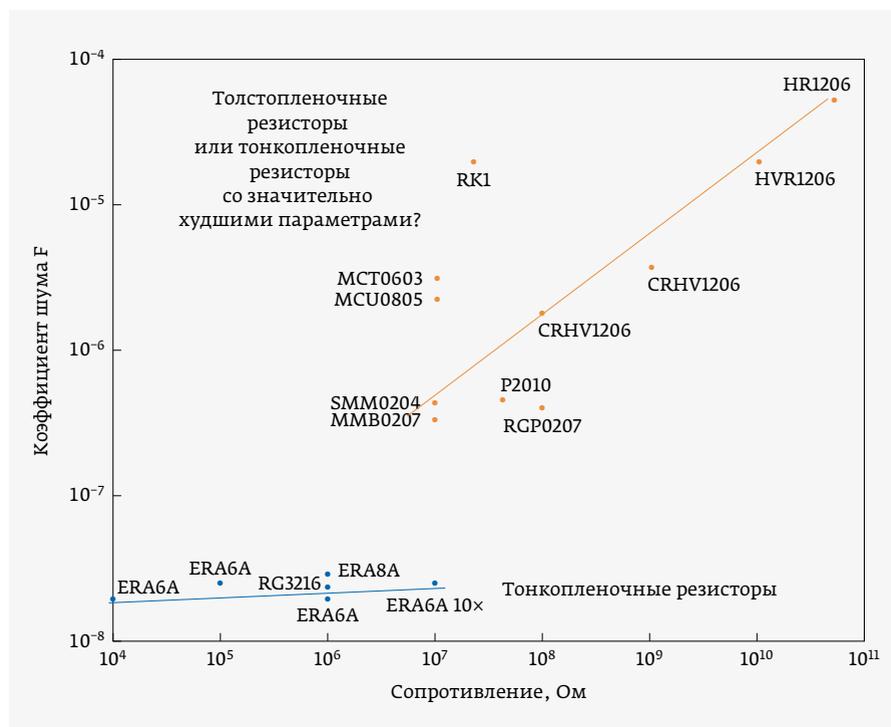


Рис. 13. Коэффициент шума F

расположения точек ниже и выше значения $F=1 \cdot 10^{-7}$ различен, при этом ниже данного значения располагаются точки, соответствующие только тонкопленочным резисторам, а выше – как толстопленочным резисторам, так и резисторам, заявленным как тонкопленочные.

Это наводит на мысль о том, что некоторые резисторы, обозначенные в описаниях как тонкопленочные, на самом деле не являются таковыми, по крайней мере при больших номиналах, а тонкопленочные резисторы в корпусе 0805 с сопротивлением более 1 МОм не выпускаются. Тонкопленочным резистором с большим сопротивлением может являться CNS020-10MP от Vishay Sfernice, однако он имеет достаточно большие размеры. Измерения его фликкер-шума в рамках данной работы не проводилось.