
Московский Физико-Технический Институт
(государственный университет)

Лабораторная работа по радиотехническим сигналам и цепям №
16

Шумы в электронных схемах

Автор:

Баранников Андрей Б01-001

Преподаватель:

Григорьев Иван Александрович



Долгопрудный, 2021

Задание 1.1

1. Исследую модель резистора как источника шумового напряжения. Для этого установлю $\{E_s/ne\}$. Убедимся, что графики шумовых напряжений на выходе и входе равны. С помощью варьирования резистора убедимся, что шум растёт как \sqrt{R} .
2. Подключим график корня из интеграла от спектральной плотности и измерим эффективное напряжение шума σ на выводах резисторов:

R [1k, 16k Log2]		R [1k, 1000k Log10]	
R, кОм	σ , мкВ	R, кОм	σ , мкВ
1	4	1	4
2	5,7	10	13
4	8	100	40
8	11,5	1000	130
16	16,2		

Таблица 1: Зависимость эффективного напряжения σ от R

3. Перейдём к модели источника тока. Варьируя R_1 проверим, что шумовое напряжение растёт как \sqrt{R} , а ток падает как $1/\sqrt{R}$:

R, кОм	1	2	4	8
e , нВ	4,00	5,80	8,00	10,00
I , пА	4,00	2,90	2,00	1,25

Таблица 2: Зависимость шумового напряжения e и тока i от R

Как видим, предположение зависимости подтверждается данными.

Задание 1.2

1. Проверим закон сложения шумовых токов для последовательного соединения варьирова R_1 и R_2 :

$$e_1 = \sqrt{4kTR_2} = 5,8 \text{ нВ} \quad e_2 = \sqrt{4kTR_1} = 4 \text{ нВ} \quad e_{\text{об эксп}} = 7 \text{ нВ}$$

$$e_{\text{об теор}} = \sqrt{4kT(R_1 + R_2)} = \sqrt{5,8^2 + 4^2} \approx 7,05 \text{ нВ} \quad \Rightarrow \quad \boxed{e_{\text{об эксп}} = e_{\text{об теор}}}$$

2. Проверим закон сложения шумовых токов для параллельного соединения:

$$e_3 = \sqrt{4kTR_3} \approx 5,8 \text{ нВ} \quad e_4 = \sqrt{4kTR_4} \approx 4,1 \text{ нВ} \quad e_{\text{об эксп}} = 3,35 \text{ нВ}$$

$$e_{\text{об теор}} = \sqrt{4kT(R_3 || R_4)} = \sqrt{4kT \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}} = \sqrt{\frac{e_3^2 \cdot e_4^2}{e_3^2 + e_4^2}} = \sqrt{\frac{5,8^2 \cdot 4^2}{5,8^2 + 4^2}} = 3,30$$

$$\boxed{e_{\text{об эксп}} = e_{\text{об теор}}}$$

Задание 1.3

1. Изучу зависимость приведённого ко входу напряжения от сопротивления R . Построю графики зависимости от R коэффициента шума K_n делителя и шумовой температуры T_n .

R , кОм	K_n , дБ	T_n , К
2	7,04	1219
4	4,80	606
8	3,02	302
16	1,89	163
32	0,96	74

Таблица 3: Данные о сопротивлении R , коэффициенте шума K_n , и шумовой температуре T_n

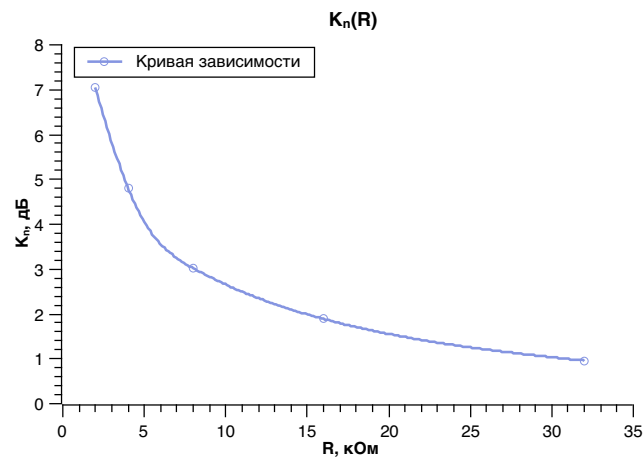


Рис. 1: Зависимость коэффициента шума K_n от сопротивления R

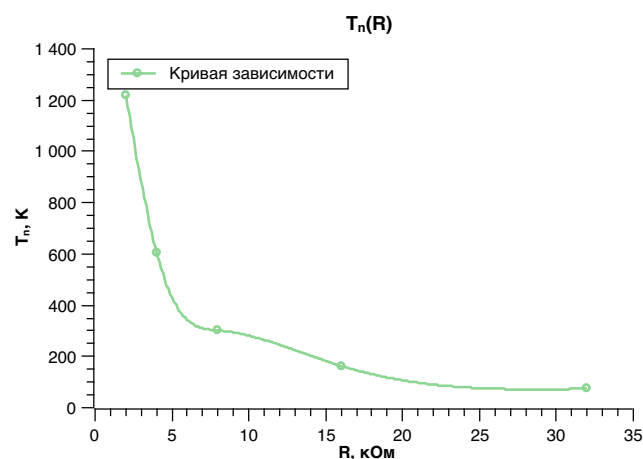


Рис. 2: Зависимость шумовой температуры T_n от сопротивления R

2. При исключении из схемы резистора R и установке вместо него нешумящего резистора Н, отношение сигнал/шум не ухудшается, так как по анализу схемы видно, что $e = e_n$

Задание 2

1. Изучим зависимость дробового тока от I_0 в области микротоков и умеренных токов. Проверим выполнение закона $\sqrt{I_0}$.

I_0 [1μ, 1m Log10]		I_0 [1m, 32m Log2]	
i , пА	I_0 , мкА	i , пА	I_0 , мА
0,606	1	17,6	1
1,817	10	25,2	2
5,700	100	35,0	4
17,811	1000	49,0	8
		67,5	16
		90,5	32

Таблица 4: Измерения дробового тока в зависимости от I_0

Напряжение пробоя диода: $U_{пр} = 100,6 \text{ В}$

2. Измерим значения дифференциального сопротивления диода r_d при варьировании I_1 :

I_1 , мкА	K	r_d , кОм
1000	0,008	0,08
100	0,050	0,53
10	0,341	5,17
1	0,838	51,73

Таблица 5: Измерение дифференциального сопротивления r_d при варьировании I_1

3. Измерим уровни шумового напряжения $e(f)$ для варьирования I_1 . По результатам измерений проверим выполнение равенства $e(f) = i(f)r_d$

r_d , кОм	$e(f)_{\text{эксп}}$, нВ	$e(f)_{\text{теор}}$, нВ
0,08	1,0	1,4
0,53	3,0	3,0
5,17	9,3	9,4
51,73	30,0	31,3

Таблица 6: Проверяем соотносимость теоритического и экспериментального $e(f)$

4. При $I_1 < 100 \text{ нА}$ не получается сохранить полосу шума не хуже 100 кГц. Максимальное напряжение в таком режиме $u = 332 \text{ мкВ}$.

Искомые значения вне диапазона:

$$I = 270 \text{ нА}$$

$$u = 60 \text{ нА}$$

$$\sigma = 19,2$$

Задание 3

1. Интегрирующая цепь

$$f_h = 10 \text{ кГц} \quad n_1 = 13 \text{ нВ} \quad \sigma = 1,6 \text{ мкВ}$$

$$\sigma_{\text{теор}} = 13 \text{ нВ} \sqrt{\frac{\pi \cdot 10 \text{ кГц}}{2}} \approx 1,63 \text{ мкВ}$$

R_1 [2k, 16k 4k]	
R_1 , кОм	n_1 , нВ
2	5,9
6	9,8
10	12,8
14	15,3
16	16,3

Таблица 7: Зависимость шумового напряжения n_1 от R_1

C_1 [0.8n, 2.4n 0.4n]		
C_1 , нФ	n_1 , нВ	σ , мкВ
0,8	2,3	0,28
1,2	1,9	0,23
1,6	1,6	0,20
2,0	1,5	0,18
2,4	1,3	0,16

Таблица 8: Зависимость уровня шума σ от ёмкости C

Уровень шума не зависит от R_1 , потому что выражается формулой $P = \frac{kT}{C}$

2. Полосовой LC-фильтр

$$f_0 = 100 \text{ кГц} \quad \Delta f = 18 \text{ кГц} \quad Q = \frac{f_0}{\Delta f} = 5,5$$

$$n_2 = 10,2 \text{ нВ} \quad \sigma_{\text{эксп}} = 1,8 \text{ мкВ} \quad \sigma_{\text{теор}} = 10,2 \text{ нВ} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot 100 \text{ кГц}}{2 \cdot 5,5}} \approx 1,73 \text{ мкВ}$$

R_2 [2.3k, 10.3k 4k]	
$n_2(f_0)$, нВ	R_2 , кОм
6,3	2,3
10,0	6,3
12,9	10,3

Таблица 9: Зависимость шумового напряжения $n_2(f_0)$ от R_2

C_2 [0.75n, 1.75n 0.5n]	
C_2 , нФ	σ , мкВ
0,75	2,34
1,25	1,8
1,75	1,53

Таблица 10: Зависимость уровня шума σ от C_2

3. LC-фильтр нижних частот

$$f_0 = 100 \text{ кГц} \quad n_3(f_0) = 10,3 \text{ нВ} \quad n_3(f_0/10) = 2 \text{ нВ} \quad \sigma_{\text{вых}} = 1,8 \text{ мкВ}$$

$$F_n \text{ эксп} = \left(\frac{\sigma}{n}\right)^2 \approx 30540 \quad F_n \text{ теор} = \frac{\pi f_0}{2 Q} \approx 31415$$

R_3 [100, 400 150]			
R_3 , Ом	$n_3(f_0)$, нВ	$n_3(f_0/10)$, нВ	σ , мкВ
100	16,2	1,3	1,8
250	10,5	2,0	
400	8,3	2,6	

Таблица 11: Зависимость величин при варьировании R

C_3 [0.75н, 1.75н 0.5н]			
C_3 , нФ	$n_3(f_0)$, нВ	$n_3(f_0/10)$, нВ	σ , мкВ
0,75	13,3	2	2,3
1,25	10,3		1,8
1,75	8,8		1,5

Таблица 12: Зависимость величин при варьировании C

L_3 [1м, 3м 1м]			
L_3 , мГн	$n_3(f_0)$, нВ	$n_3(f_0/10)$, нВ	σ , мкВ
1	7,4	2	1,8
2	10,4		
3	12,6		

Таблица 13: Зависимость величин при варьировании L

4. LC-фильтр верхних частот

$$f_0 = 100 \text{ кГц} \quad n_4(f_0) = 10,3 \text{ нВ} \quad n_4(10f_0) = 2 \text{ нВ} \quad \sigma = 2,7 \text{ мкВ}$$

R_4 [100, 400 150]			
R_4 , Ом	$n_3(f_0)$, нВ	$n_3(10f_0)$, нВ	σ , мкВ
100	16,3	1,3	2,2
250	10,4	2,0	2,7
400	8,3	2,6	3,0

Таблица 14: Зависимость величин при варьировании R

C_4 [0.75н, 1.75н 0.5н]			
C_4 , нФ	$n_3(f_0)$, нВ	$n_3(10f_0)$, нВ	σ , мкВ
0,75	13,3	2	3
1,25	10,3		2,7
1,75	8,8		2,5

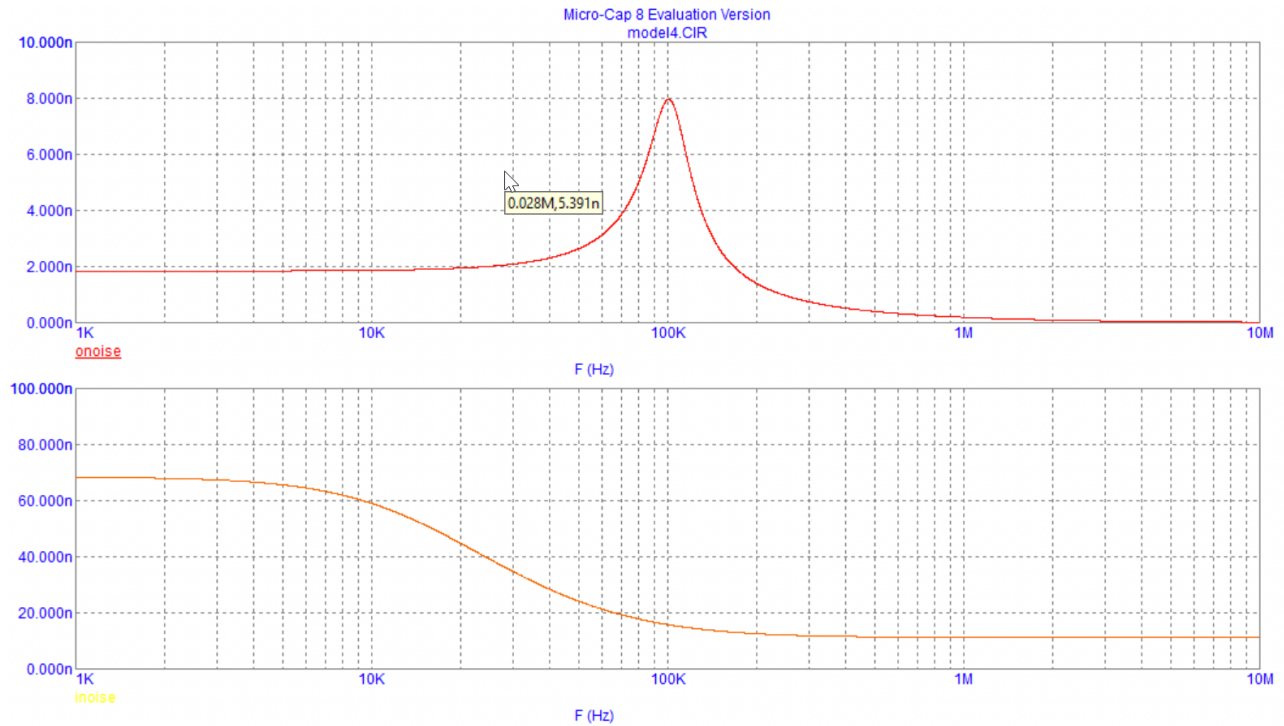
Таблица 15: Зависимость величин при варьировании C

L_4 [1м, 3м 1м]			
L_4 , мГн	$n_3(f_0)$, нВ	$n_3(10f_0)$, нВ	σ , мкВ
1	7,3	2	2,7
2	10,3		
3	12,6		

Таблица 16: Зависимость величин при варьировании L

Задание 4.3

$$f_0 = 100 \text{ кГц} \quad \Delta f = 34 \text{ кГц} \quad K_{\text{рез}} = 0,5 \quad K_0 = 0,029$$

Рис. 3: График шумового напряжения на выходе n_3

На низких частотах шум на выходе создаётся параллельным соединением $r||R$ и отличен от нуля. Малый коэффициент передачи даёт высокий уровень шума. Всё это возможно, так как на низких частотах индуктивный импеданс мал, а ёмкостный велик. Если же увеличить частоту, индуктивный импеданс "отключает" резистор r , это приводит к вырождению цепи в интегрирующую с нулевым коэффициентом шума. В резонансе же наблюдается выброс.

- Уровни шумового напряжения на разных частотах:

$$n(f_0) = 8,0 \text{ нВ} \quad n(f_0/100) = 1,9 \text{ нВ}$$

- Оценим вклады шумов резисторов:

$$n_1(f) - \text{вклад } R_{s3} \quad n_2(f) - \text{вклад } R_3 - \text{ в шумовое напряжение}$$

$$\sigma_1 - \text{вклад } R_{s3} \quad \sigma_2 - \text{вклад } R_3 - \text{ в уровень шума на выходе}$$

$$n_1(f_0) = 5,4 \text{ нВ} \quad n_1(f_0/100) = 0,3 \text{ нВ} \quad n_2(f_0) = 0,340 \text{ нВ} \quad n_2(f_0/100) = 1,0 \text{ нВ}$$

$$\sigma_1 = 1,3 \text{ мкВ} \quad \sigma_2 = 230 \text{ нВ}$$

- Оценим значение коэффициента шума на различных частотах:

$$K_n = 20 \lg \frac{e_n(f)}{\sqrt{4kTR}} \Rightarrow K_n(f_0/100) \approx 16 \quad K_n(f_0) \approx 3 \quad K_n(10f_0) \approx 0$$

Вывод коэффициентов передачи

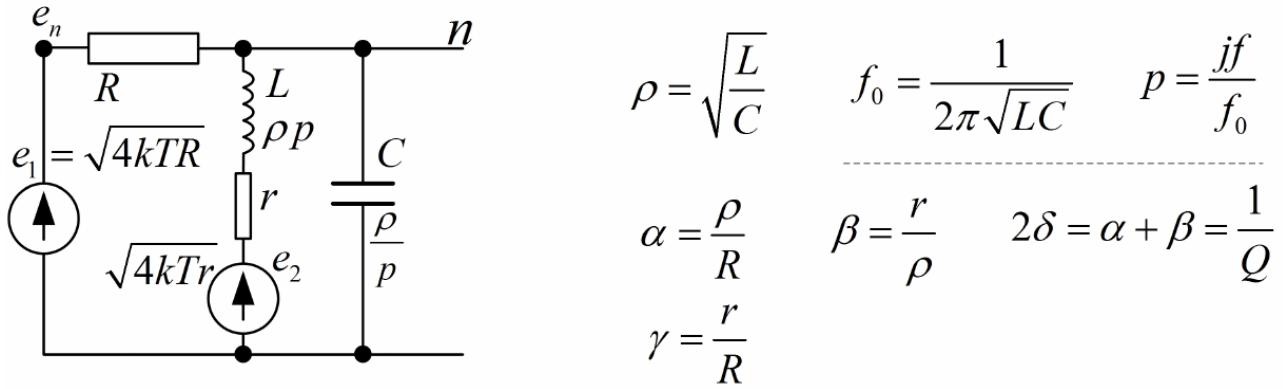


Рис. 4: LC Фильтр нижних частот

$$K_1 = \frac{n}{e_1}$$

$$Z_{o6} = R + Z_{||} \quad Z_{||} = \frac{\rho(\rho p + r)}{p(\rho p + r) + \rho} \Rightarrow I = \frac{e_1}{Z_{o6}}$$

$$e_1 - IR = n \Rightarrow e_1 - e_1 \frac{R}{Z_{o6}} = n \Rightarrow \frac{n}{e_1} = \frac{Z_{||}}{Z_{o6}}$$

$$Z_{o6} = \frac{(\rho p + r)(Rp + \rho) + R\rho}{p(\rho p + r) + \rho}$$

$$K_1 = \frac{n}{e_1} = \frac{\rho^2 p + \rho r}{(\rho p + r)(Rp + \rho) + R\rho} = \frac{\frac{\rho p}{R} + \frac{r}{R}}{p^2 + \rho \frac{p}{R} + r \frac{p}{\rho} + \frac{r}{R} + 1}$$

$$K_1 = \frac{\gamma + \alpha p}{p^2 + 2\delta p + 1 + \gamma}$$

$$K_2 = \frac{n}{e_2}$$

$$Z_{o6} = r + \rho p + Z_{||} \quad Z_{||} = \frac{R\rho}{Rp + \rho} \quad I = \frac{e_2}{Z_{o6}} = \frac{e_2}{r + \rho p + Z_{||}}$$

$$I \cdot Z_{||} = n \Rightarrow e_2 \frac{Z_{||}}{r + \rho p + Z_{||}} = n \Rightarrow \frac{n}{e_2} = \frac{Z_{||}}{r + \rho p + Z_{||}}$$

$$K_2 = \frac{n}{e_2} = \frac{R\rho}{Rp + \rho} \cdot \frac{1}{r + \rho p + \frac{R\rho}{Rp + \rho}} = \frac{R\rho}{Rrp + r\rho + Rp^2\rho + \rho^2 p + R\rho} = \frac{1}{\frac{rp}{\rho} + \frac{r}{R} + p^2 \frac{\rho p}{R} + 1}$$

$$K_2 = \frac{1}{p^2 + 2\delta p + 1\gamma}$$