

# Радиотехническая работа 24

## Безынерционные линейные цепи

### Выполнил Жданов Елисей Б01-205

## 1 Оборудование:

Программное обеспечение MicroCap 10.0.7.0

## 2 model 1 (Тепловой шум Джонсона)

### model 1\_1 (Первое знакомство)

- (a) Исследуем модель резистора как источника шумового напряжения, изучим зависимость шумового напряжения от  $R$ , получим что шум растет как  $\sqrt{R}$ .

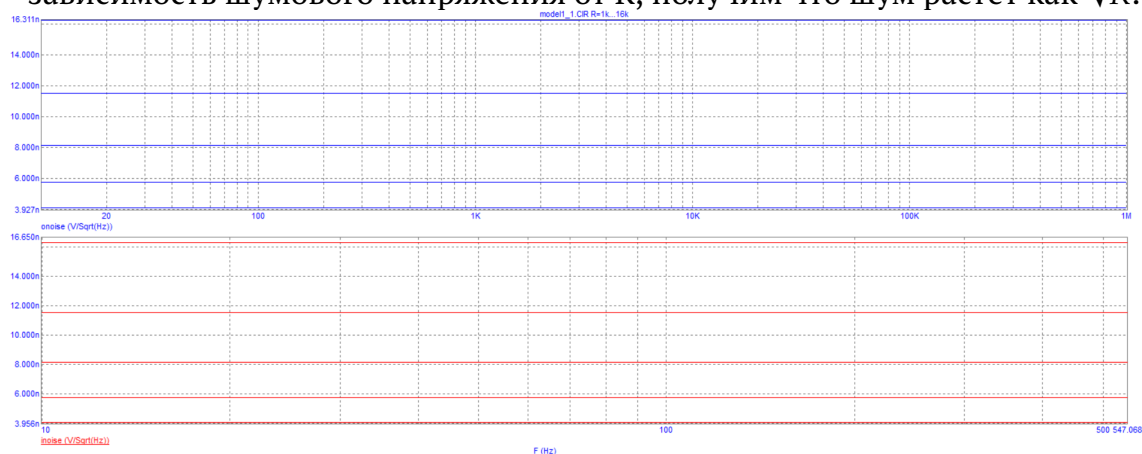


Рис. 1: Зависимость шумового напряжения от  $R$

- (b) Измерим уровень шума  $\sigma$  на выводе резистора в полосе  $F = 1$  МГц.

R	1k	2k	4k	8k	16k	10k	100k	1000k
$\sigma$	4u	5,7u	8u	11,4u	16u	12,7u	40u	128u

Таблица 1: Зависимость уровня шума  $\sigma$  от  $R$

- (c) Перейдем к модели источника тока, получаем, что с увеличением  $R1$  ток падает как  $1/\sqrt{R}$  (необходимо увеличить масштаб), а напряжение растет как  $\sqrt{R}$ .

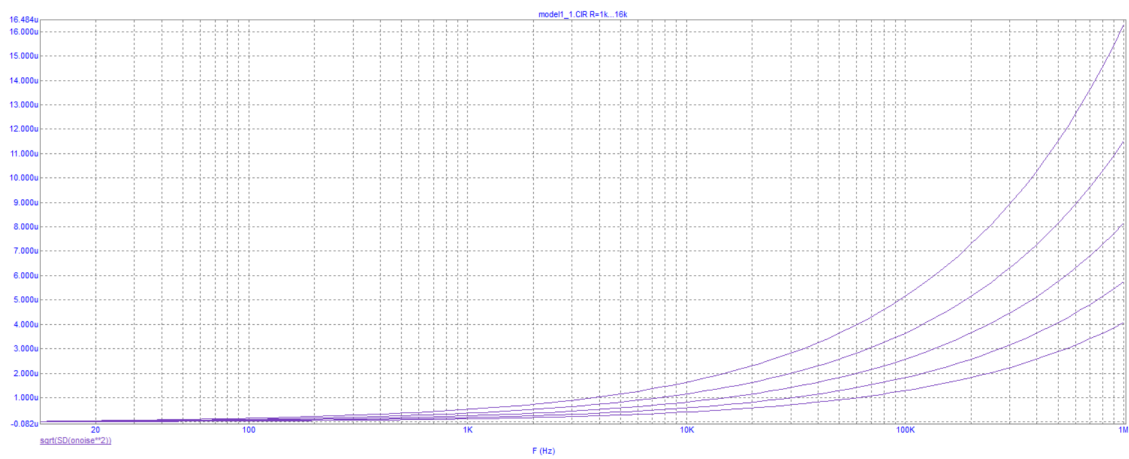


Рис. 2:  $R = [1k, 16k | \text{Log2}]$

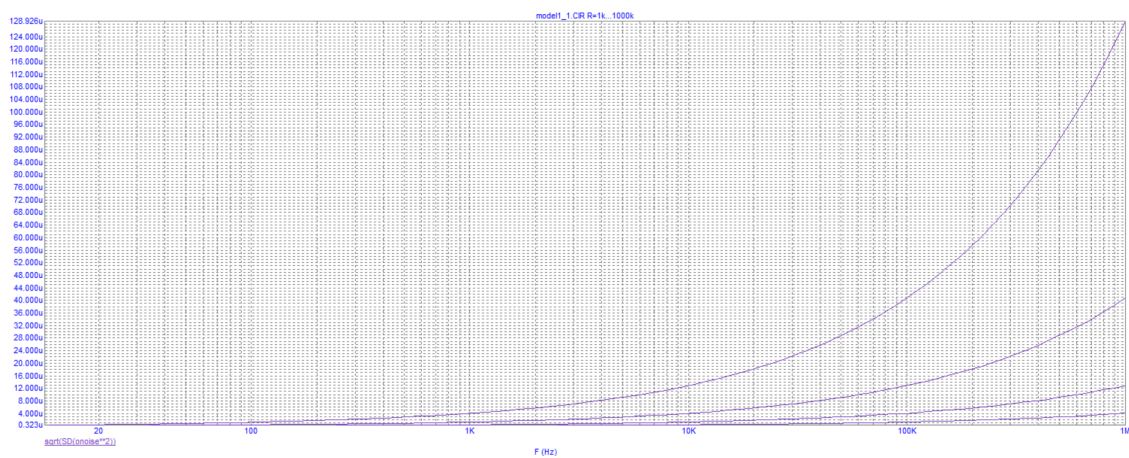


Рис. 3:  $R = [1k, 1000k | \text{Log10}]$

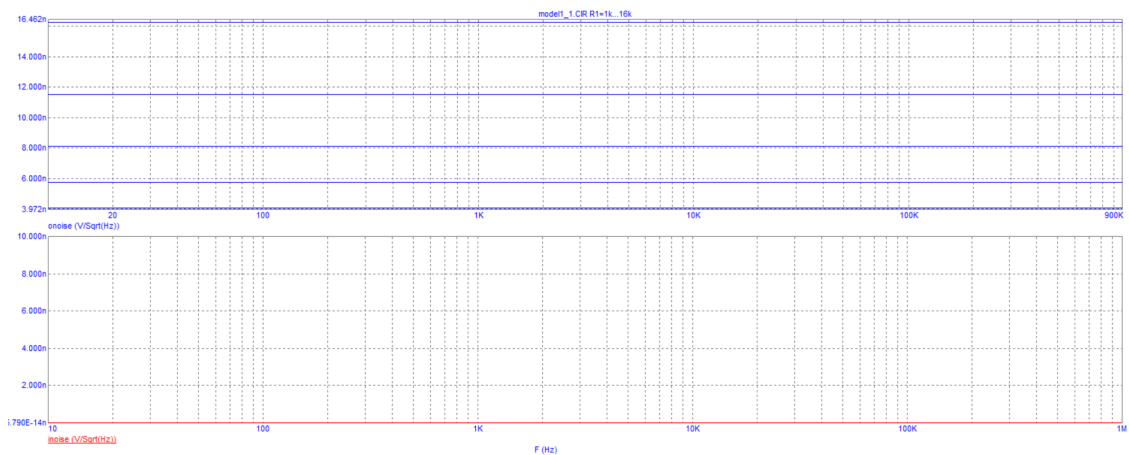


Рис. 4: Шумовые напряжение и ток в модели с источником тока

## model 1\_2 (Сложение шумов)

- (a) Изучим шумы в схеме с последовательным соединением, проверим закон сложения шумовых напряжений.

Закон сложения шумовых напряжений выполняется.

- (b) Перейдем к схеме с параллельным соединением (рис. 6). Закон сложения

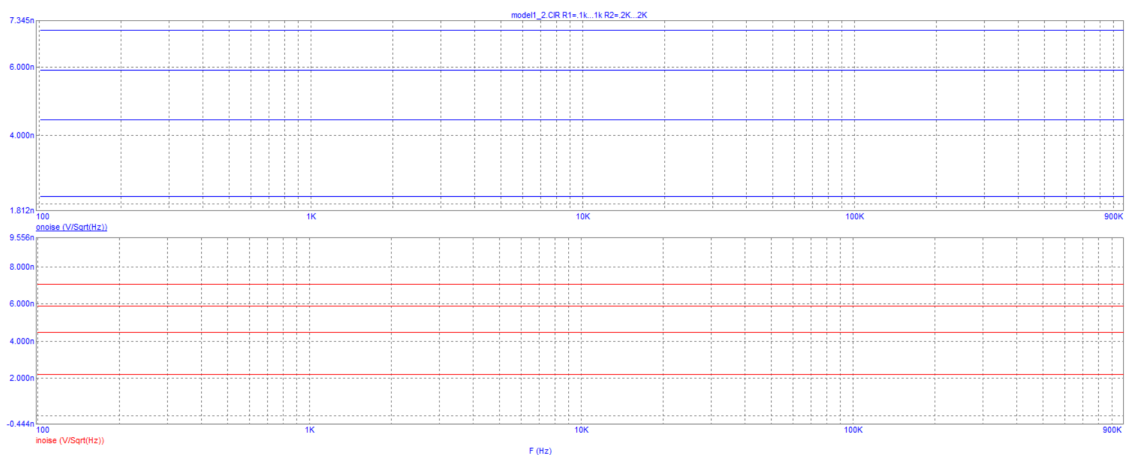


Рис. 5: Варьирование  $R = [0,1k, 1k| 1k]$ ,  $R = [0,2k, 2k| 2k]$

шумовых токов выполняется.

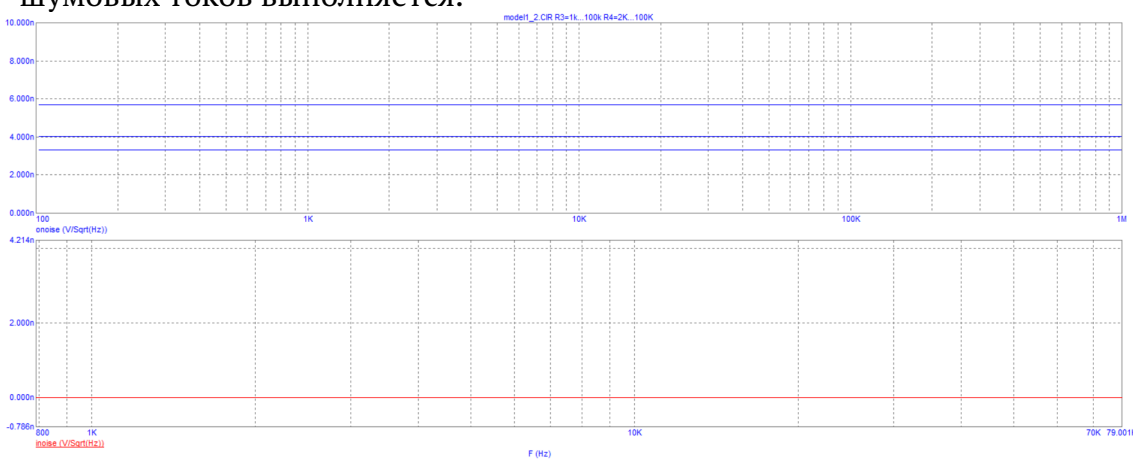


Рис. 6: Варьирование  $R = [1k, 100k| 99k]$ ,  $R = [2k, 100k| 98k]$

## model 1\_3 (Шум в делителе напряжения)

(а) Измерим шумовое напряжение в узле  $n(f) = 5,2 \text{ нВ}\sqrt{\text{Гц}}$ .

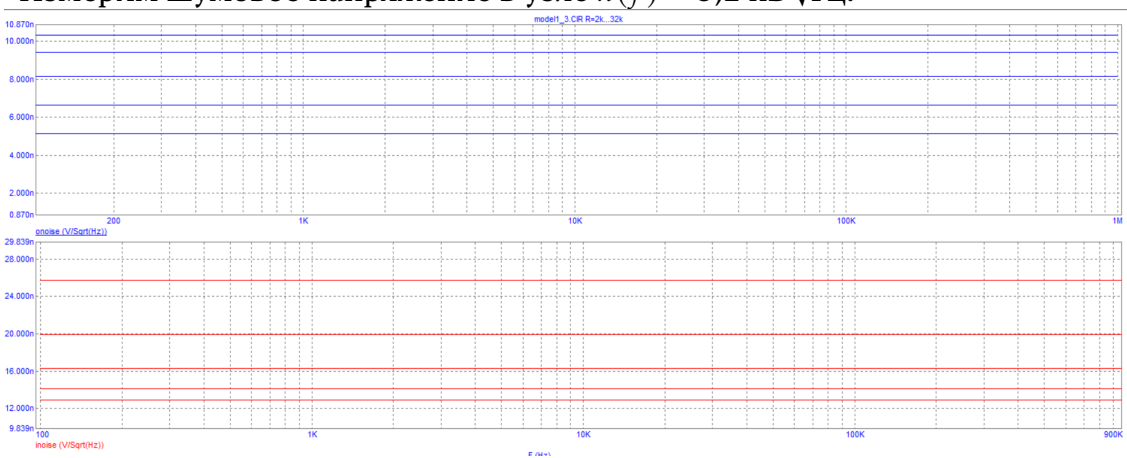
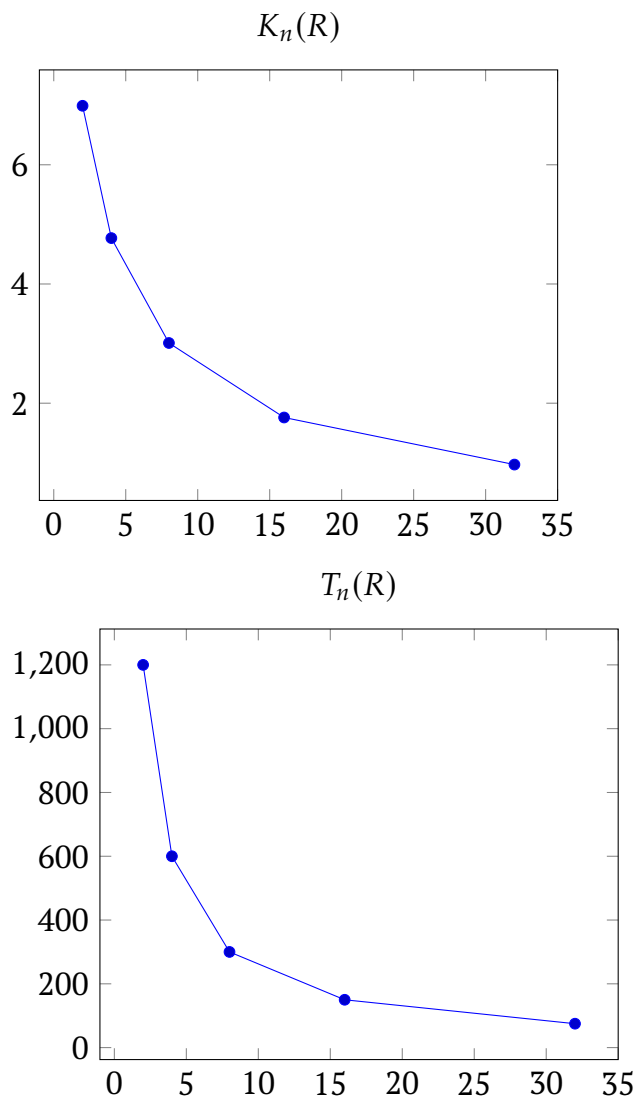


Рис. 7: Приведенное ко входу напряжение  $e_n$  от  $R$



(b) Исключим резистор R и поставим вместо него нешумящий резистор H.

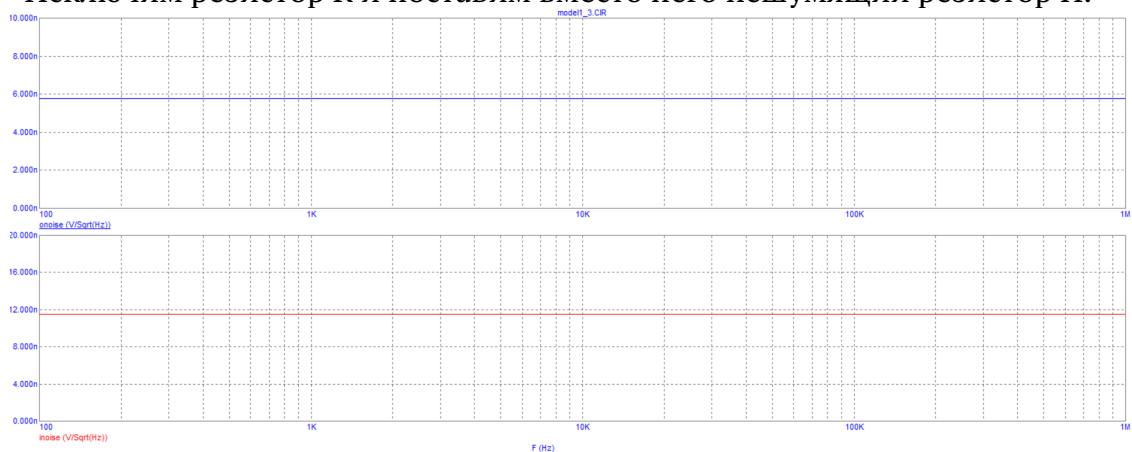


Рис. 8: Нешумящий резистор

При подстановке в формулы  $R_s = 8$  кОм и  $e_n = 11.515$  нВ, действительно получим  $K_n == T_n == 0$ .

### 3 model 2 (Дробовой шум диода Шоттки)

(a) Проверим выполнение закона  $\sqrt{I_0}$ :

- $I_{01} = 1\mu \Rightarrow e_{01} = 566f$ ;
- $I_{02} = 10\mu \Rightarrow e_{02} = 1.79p \approx \sqrt{10}e_{01}$ ;
- $I_{03} = 100\mu \Rightarrow e_{03} = 5.659p \approx \sqrt{100}e_{01}$ ;
- $I_{04} = 1000\mu \Rightarrow e_{04} = 17.832p \approx \sqrt{1000}e_{01}$ ;

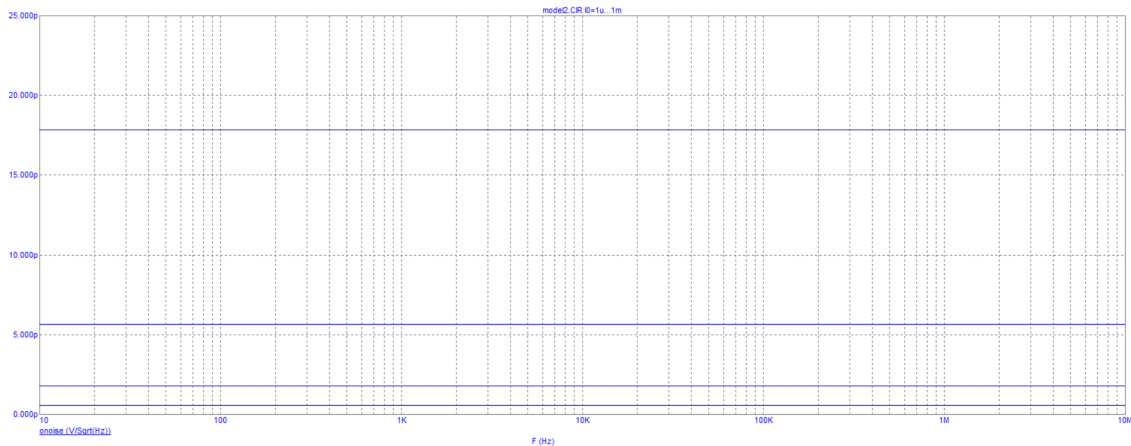


Рис. 9: Микротоки(2 1 1)

Проверим выполнение закона  $\sqrt{I_0}$ :

- $I_{01} = 1\mu \Rightarrow e_{01} = 17.83p$ ;
- $I_{02} = 2\mu \Rightarrow e_{02} = 25.12p \approx \sqrt{2}e_{01}$ ;
- $I_{03} = 4\mu \Rightarrow e_{03} = 35.26p \approx \sqrt{4}e_{01}$ ;
- $I_{04} = 8\mu \Rightarrow e_{04} = 49.13p \approx \sqrt{8}e_{01}$ ;
- $I_{05} = 16\mu \Rightarrow e_{05} = 67.55p \approx \sqrt{16}e_{01}$ ;
- $I_{06} = 32\mu \Rightarrow e_{06} = 90.66p \approx \sqrt{32}e_{01}$ ;

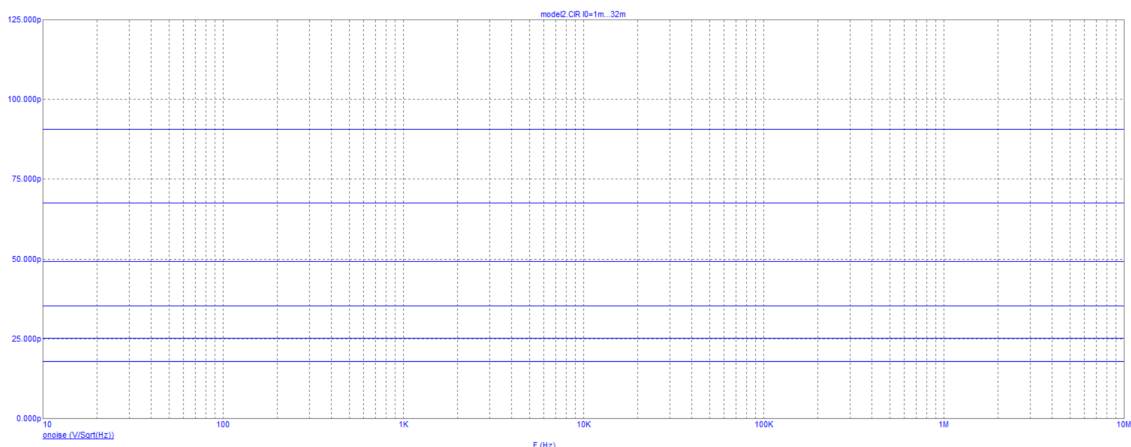


Рис. 10: Умеренные токи

Для перевернутого диода поведение при низких токах будет идентично с точностью до значений(дробовой шум от направления не зависит). Напряжение пробоя диода измерим, пустив по нему большой ток(см рис, варьирование [1m, 32, log 2]). Пробой происходит при порядка 200 пА <-> 200 пВ.

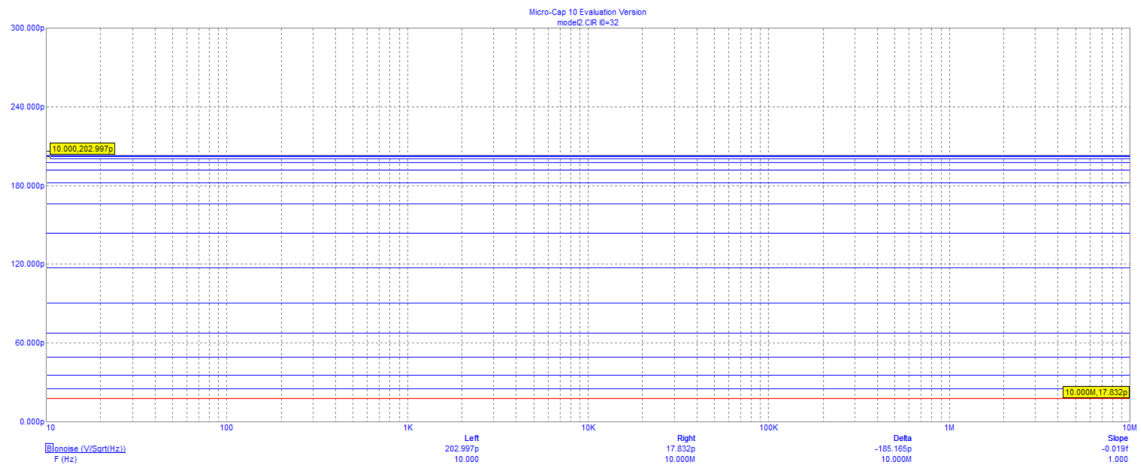


Рис. 11: Напряжение пробоя

(b) Найдем  $r_d$  как  $r_d \approx KR_1$ ,  $R_1 = 10k$ :

- $I_{01} = 1m \Rightarrow K_1 = 5.16m \Rightarrow r_d = 51.6 \text{ Ом};$
- $I_{02} = 100\mu \Rightarrow K_2 = 49.24m \Rightarrow r_d = 492.4 \text{ Ом};$
- $I_{03} = 10\mu \Rightarrow K_3 = 341.56m \Rightarrow r_d \approx 3415.6 \text{ Ом};$
- $I_{04} = 1\mu \Rightarrow K_4 = 841.71m \Rightarrow r_d \approx 8417.1 \text{ Ом};$

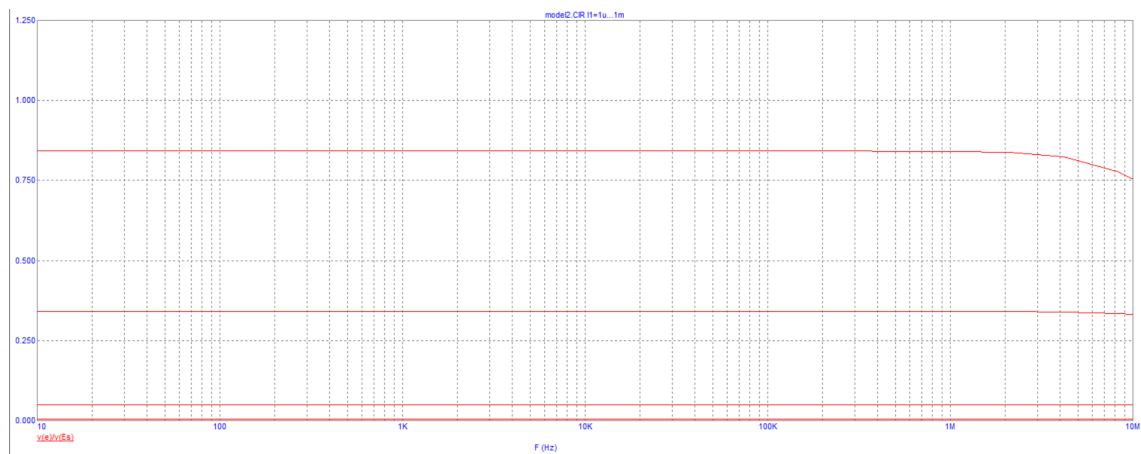


Рис. 12:  $K = r_d/(R_1 + r_d)$

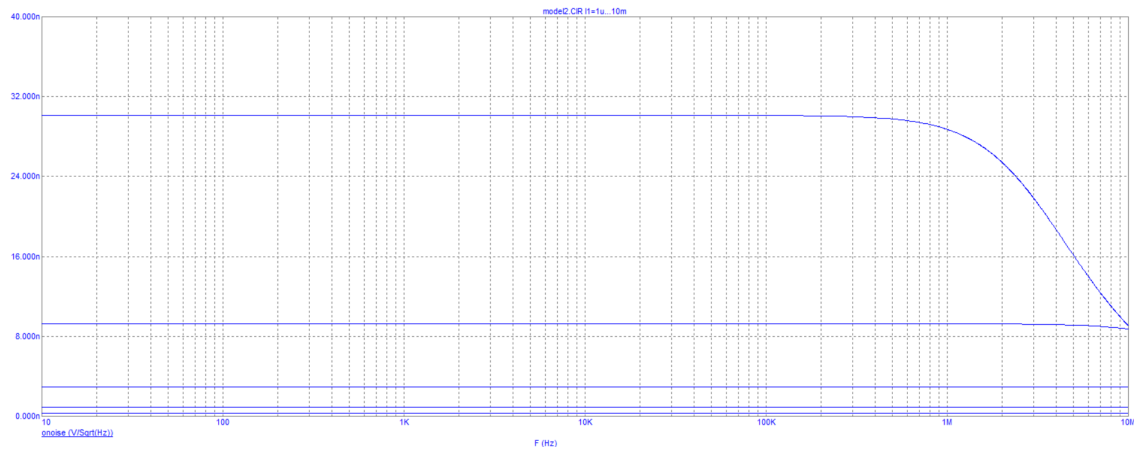


Рис. 13:  $e(f)$  для  $I = [1\mu, 10m|Log10]$

(с) Проверим формулу  $e(f) = i(f)r_d$ , возьмем  $i(f) = \sqrt{2 * e * I_{0i}}$ :

- $I_{01} = 1\mu \Rightarrow e(f)_{\text{теор}} = 29.2n, e(f)_{\text{прак}} = 30.1n;$
- $I_{02} = 10\mu \Rightarrow e(f)_{\text{теор}} = 8.8n, e(f)_{\text{прак}} = 9.3n;$
- $I_{03} = 100\mu \Rightarrow e(f)_{\text{теор}} = 2.7n, e(f)_{\text{прак}} = 2.9n;$
- $I_{04} = 1m \Rightarrow e(f)_{\text{теор}} = 1005p, e(f)_{\text{прак}} = 928p;$
- $I_{05} = 10m \Rightarrow e(f)_{\text{теор}} = 410p, e(f)_{\text{прак}} = 304p;$

(д) Установим диод в режим пробоя и измерим максимальное шумовое напряжение на невысоких частотах. Оно составит 163 нВ. Ток  $I_1$  составит 7.4 нА.

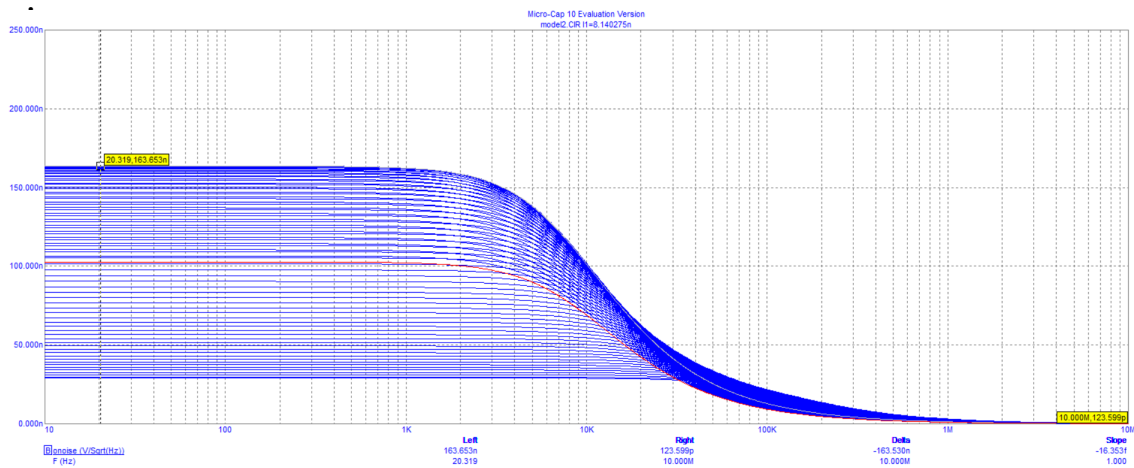


Рис. 14:  $e(f)$  для  $I = [1n, 1u|Log1.1]$

уровень же шума  $\sigma$  примет следующую зависимость от частоты

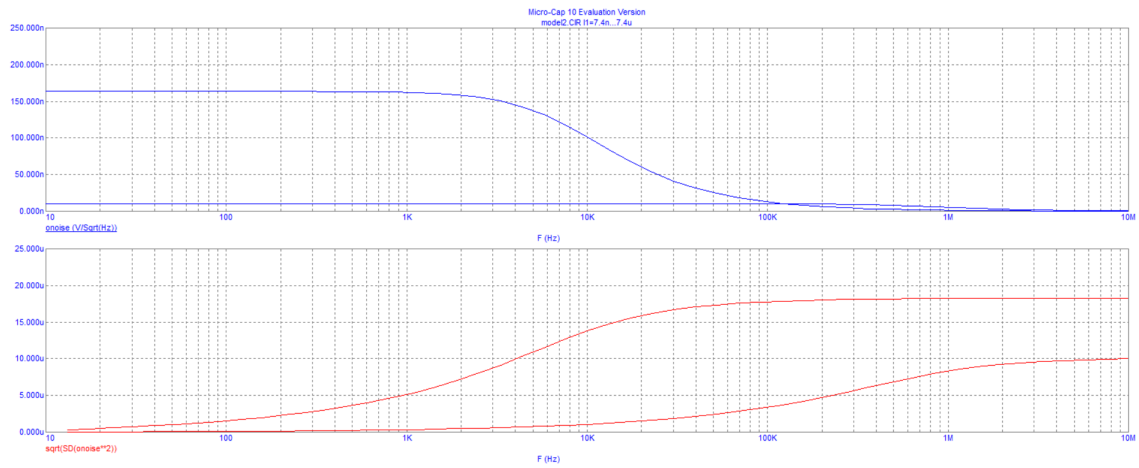


Рис. 15:  $\sigma(f)$  для  $I_1 = 7.4$

## 4 model 3 (Фильтрация шумов)

### Интегрирующая цепь

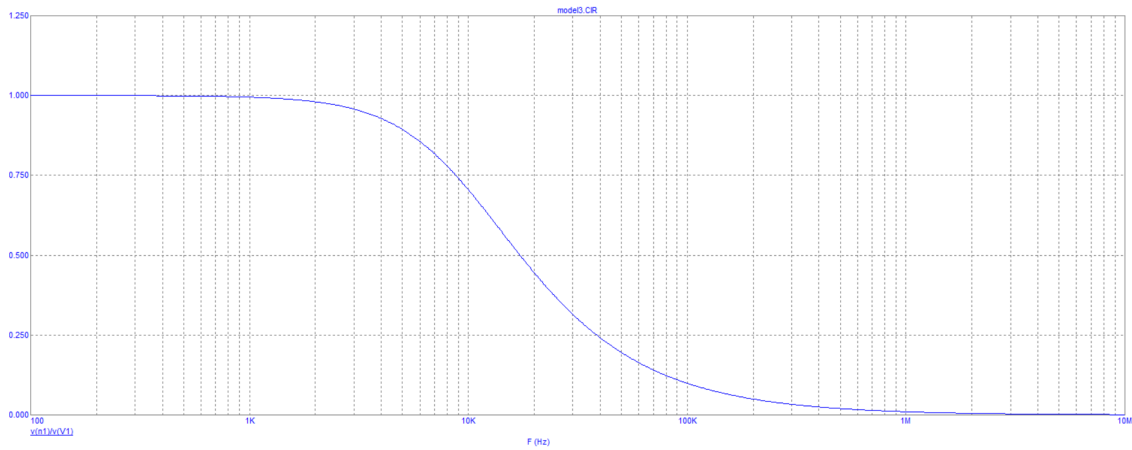


Рис. 16: Граничная частота составляет  $f_h = 10$  кГц

(а)  $\sigma_{\text{теор1}} = n_1 \sqrt{F n} = 12.8 n \sqrt{\pi/2 \cdot 10000} = 1.63 \mu \approx \sigma_{\text{теор2}} = \sqrt{\frac{kT}{C}} = 1.61 \mu$

$\sigma_{\text{прак}} = 1.60 \mu$

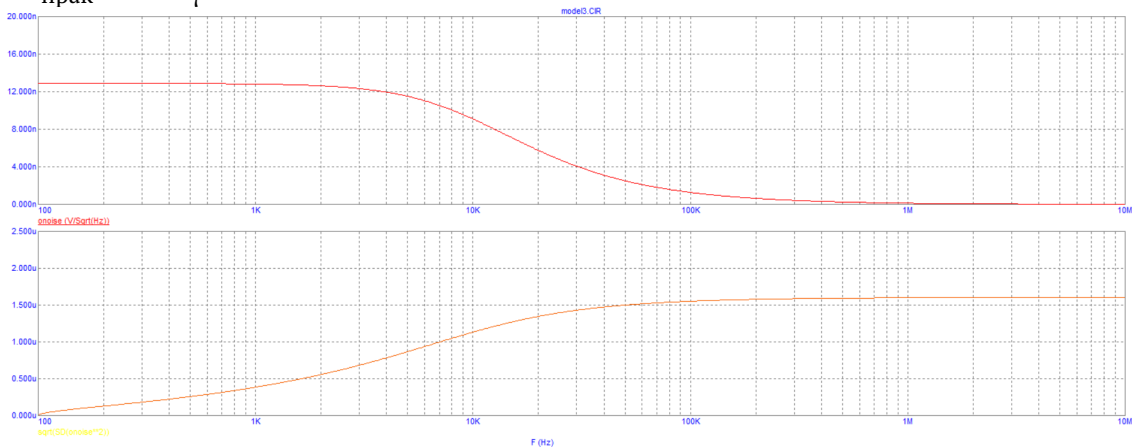


Рис. 17: Уровень шума



Снимем зависимость шумового напряжения от  $R_1$ :

- $R_1 = 2k \Rightarrow n_1(f) = 5.8n$ ;
- $R_1 = 6k \Rightarrow n_1(f) = 10n$ ;
- $R_1 = 10k \Rightarrow n_1(f) = 12.8n$ ;
- $R_1 = 14k \Rightarrow n_1(f) = 15.6n$ ;
- $R_1 = 16k \Rightarrow n_1(f) = 16.3n$ ;

Уровень шума на выходе не зависит от  $R_1$ , поскольку шум создает резистор, а значит  $\sigma = \sqrt{P} = \sqrt{\frac{kT}{C}}$  от R не зависит

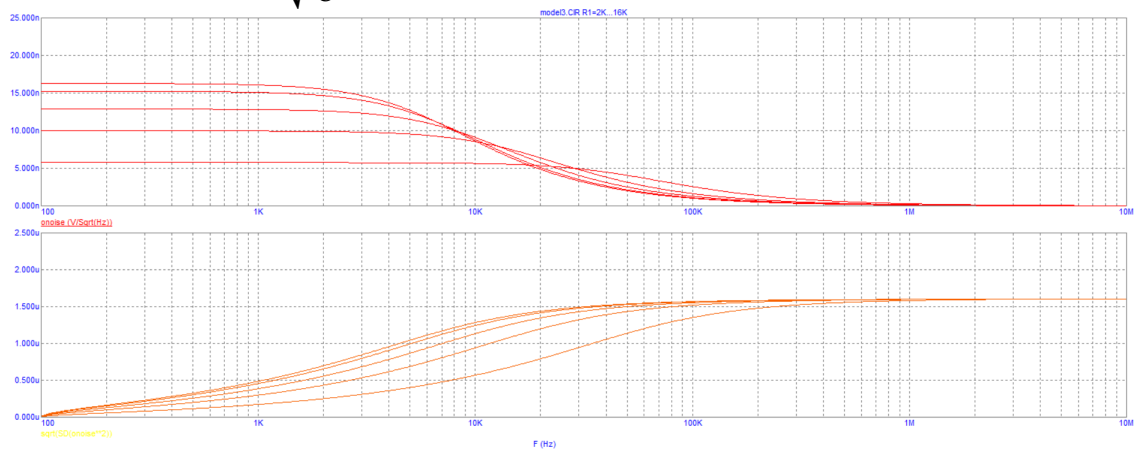


Рис. 18: Варьирование  $R_1 = [2k, 16k|4k]$

Снимем зависимость уровня шума от  $C_1$ :

- $C_1 = 0.8k \Rightarrow n_1(f) = 2.27\mu$ ;
- $C_1 = 1.2k \Rightarrow n_1(f) = 1.85\mu$ ;
- $C_1 = 1.6k \Rightarrow n_1(f) = 1.60\mu$ ;
- $C_1 = 2.0k \Rightarrow n_1(f) = 1.44\mu$ ;
- $C_1 = 2.4k \Rightarrow n_1(f) = 1.31\mu$ ;

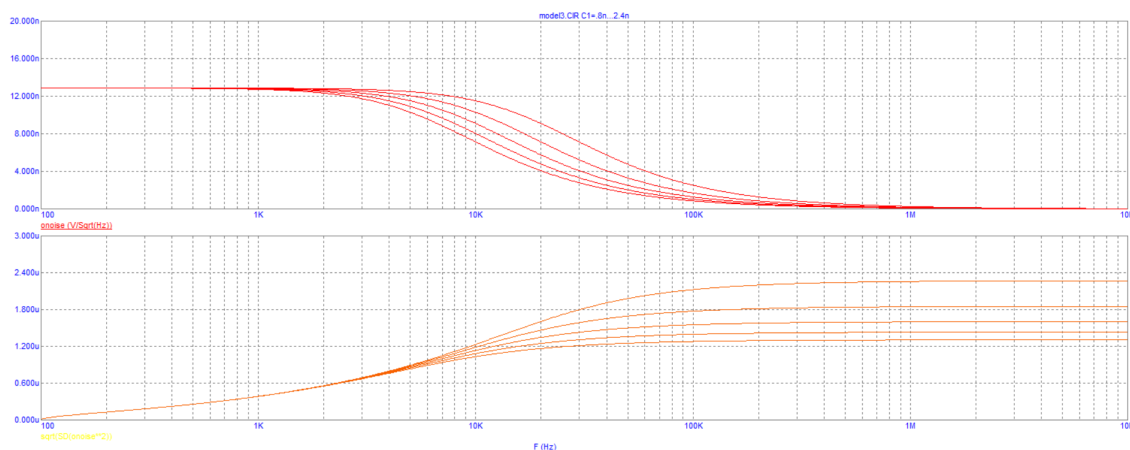


Рис. 19: Варьирование  $C_1 = [0.8n, 2.4n|0.4n]$

## Полосовой LC-фильтр

(a) .

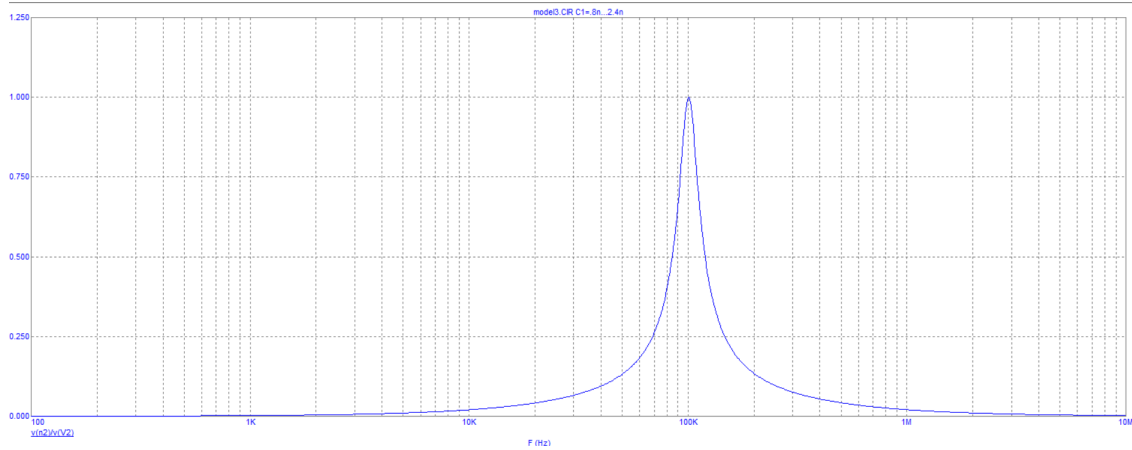


Рис. 20:  $f_0 = 100k$ ,  $\Delta f = 20k$ ,  $Q = 5$

(b) .

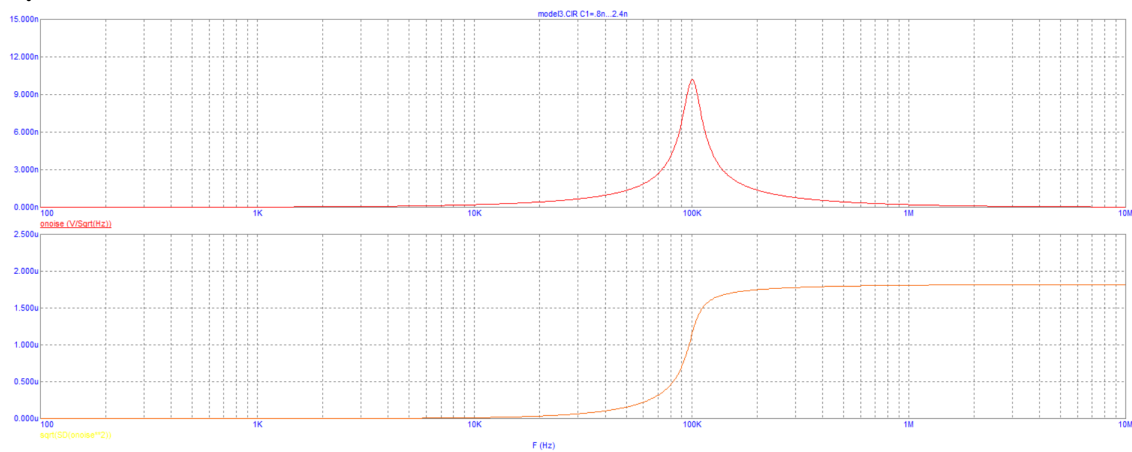


Рис. 21:  $n_2(f_0) = 10n$ ,  $\sigma = 1.82\mu$

Проверим формулу  $\sigma = n_2 \sqrt{F_n} = \sqrt{\frac{kT}{C}} = 1.80$ , формула работает.

(c) .

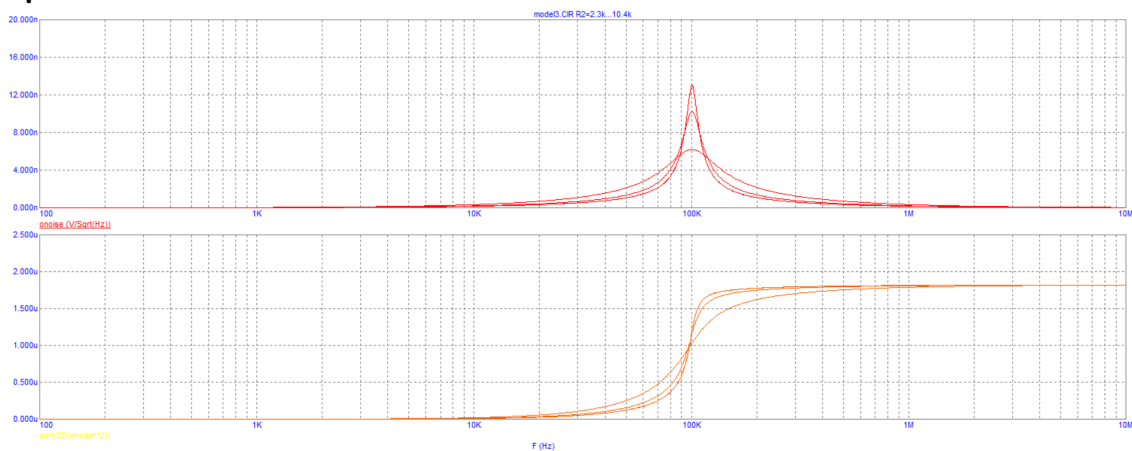


Рис. 22: Варьирование  $R_2 = [2.3k, 10.3k|4k]$

Зависимость  $n_2(f_0)$  от  $R_2$ :

- $R_2 = 2.3k \Rightarrow n_2 = 6.08n$ ;

- $R_2 = 6.3k \Rightarrow n_2 = 10.08;$
- $R_2 = 10.3k \Rightarrow n_2 = 13.04;$

Уровень шума на выходе не зависит по той-же самой причине, формула для  $\sigma = \sqrt{\frac{kT}{C}}$

(d) .

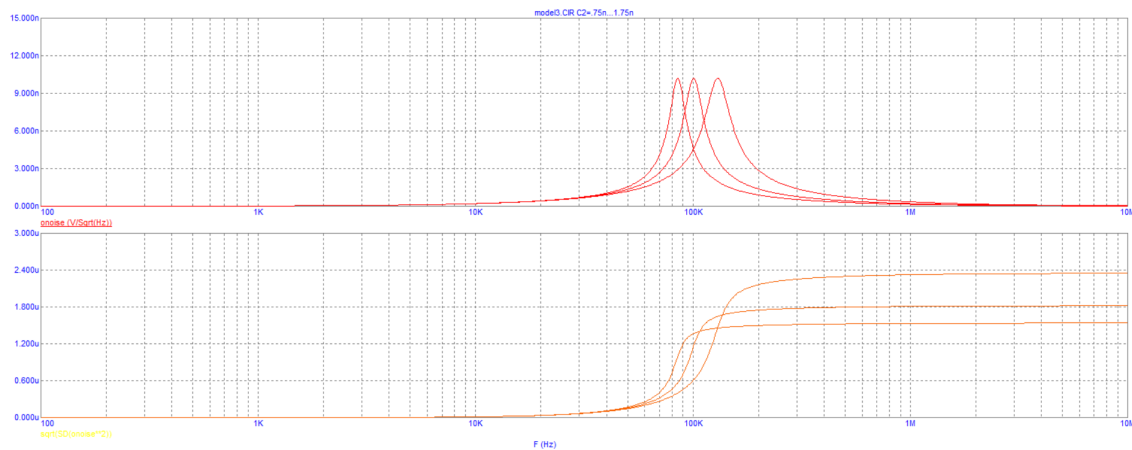


Рис. 23: Варьирование  $C_2 = [0.75n, 1.75n|0.5n]$

Зависимость  $\sigma$  от  $C_2$ :

- $C_2 = 0.75n \Rightarrow \sigma = 2.34\mu;$
- $C_2 = 1.25n \Rightarrow \sigma = 1.82\mu;$
- $C_2 = 1.75n \Rightarrow \sigma = 1.52\mu;$

(e) .

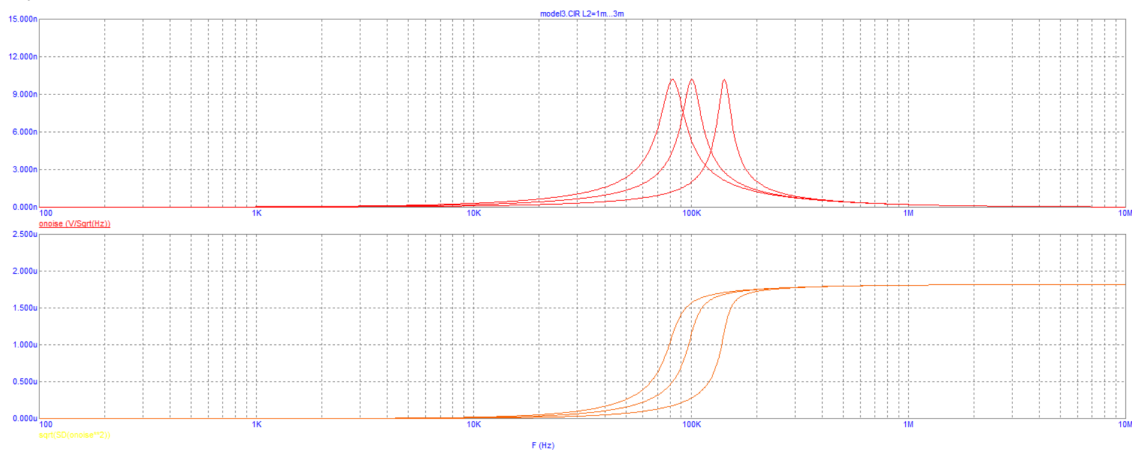


Рис. 24: Варьирование  $L_2 = [1m, 3m|1m]$

Уровень шума на выходе не зависит от индуктивности по формуле для  $\sigma = \sqrt{\frac{kT}{C}}$ .

## LC-фильтр нижних частот

- (a) Характеристики:  $K(p) = \frac{1}{p^2 + 2\delta p + 1}$ ,  $p = \frac{jf}{f_0}$ ,  $f_0 = 100k$ ,  $\rho = 1260$ ,  $Q = \frac{1}{2\delta} = 5$

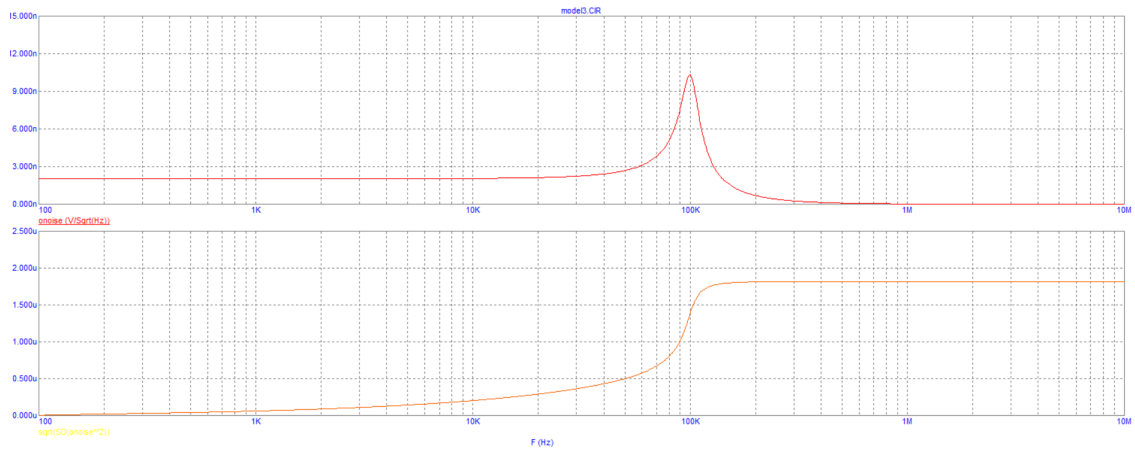


Рис. 25:  $n_3(f_0) = 10.2n$ ,  $n_3(f_0/10) = 2.05n$ ,  $\sigma = 1.82\mu$

Разумеется значение  $n_3$  будет совпадать с шумовым напряжением резистора, поскольку при низких частотах фильтр себя не проявляет (конденсатор - обрыв, катушка - провод) и весь шум идет от резистора на узел  $n_3$ .

Оценим шумовую полосу  $F_{н\text{теор}} = \frac{\pi}{2} \frac{f_0}{Q} = 31k$ ,  $F_{н\text{прак}} = 30.9k$

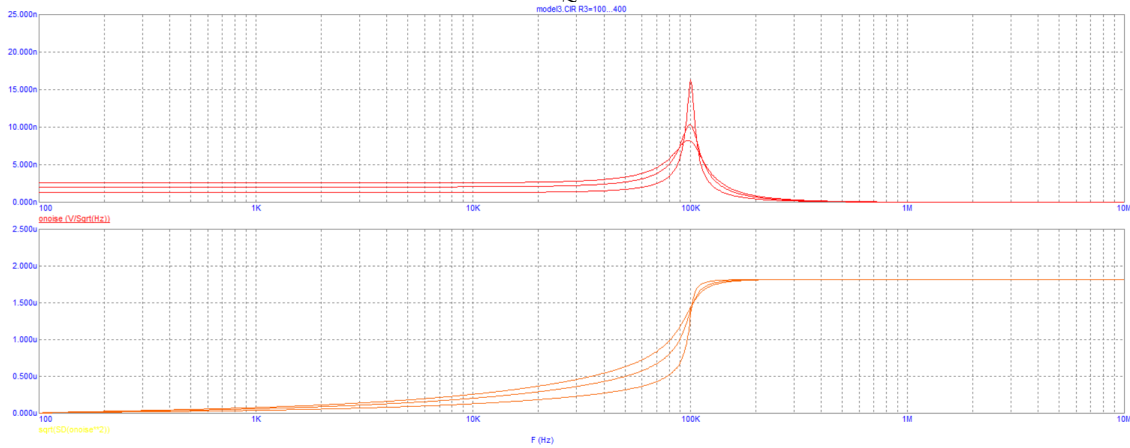


Рис. 26: Варьирование  $R_3 = [100, 400 | 150]$

$R_3$	400	250	100
$n_3(f_0)$	8.1n	10.3n	15.9n
$n_3(f_0/10)$	1.1n	2n	2.6n
$\sigma$	$1.8\mu$	$1.8\mu$	$1.8\mu$

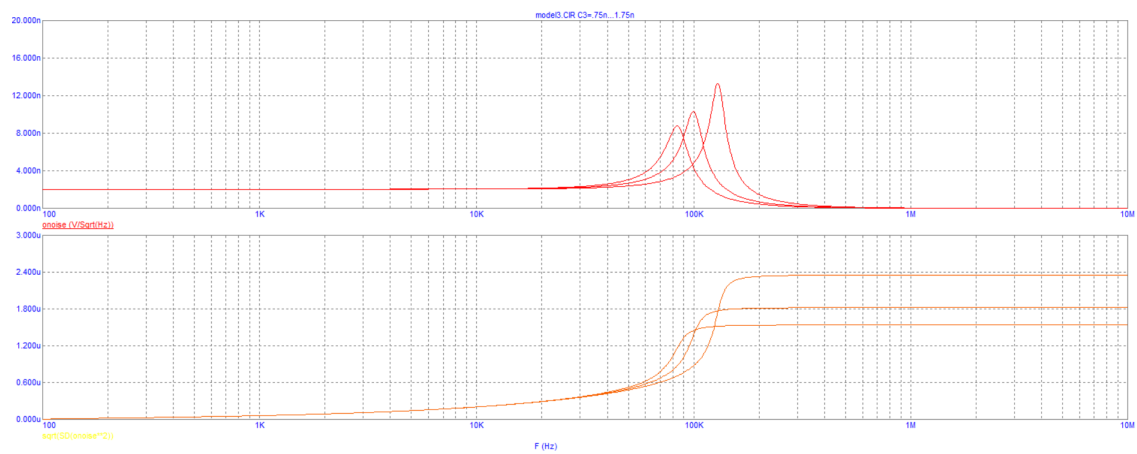


Рис. 27: Варьирование  $C3 = [0.75n, 1.75n | 0.5n]$

$C3$	0.75n	1.25n	1.75n
$n_3(f_0)$	13.2n	10.2n	8.8n
$n_3(f_0/10)$	2.1n	2.1n	2.1n
$\sigma$	$2.4\mu$	$1.8\mu$	$1.5\mu$

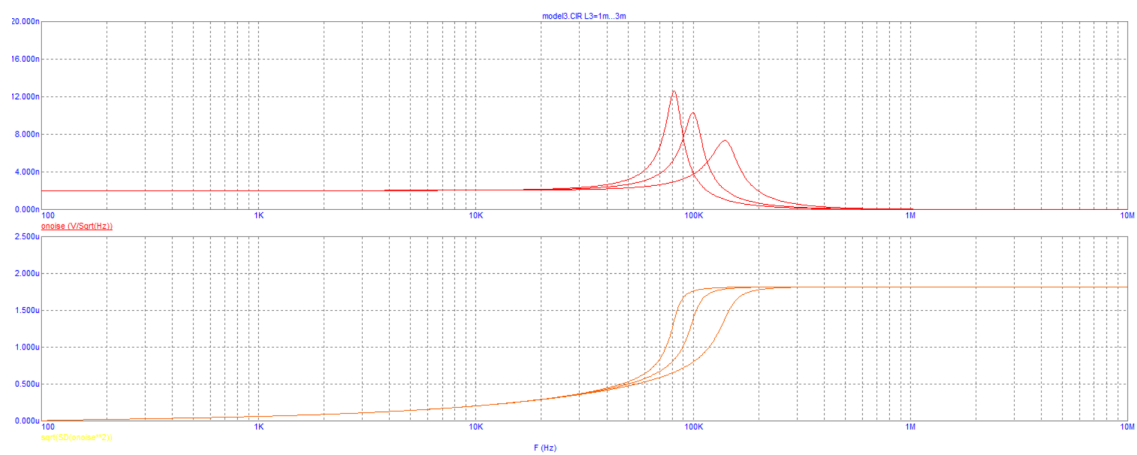


Рис. 28: Варьирование  $L3 = [1m, 3m | 1m]$

$L3$	1m	2m	3m
$n_3(f_0)$	7.4n	10.2n	12.6n
$n_3(f_0/10)$	2.1n	2.1n	2.1n
$\sigma$	$1.8\mu$	$1.8\mu$	$1.8\mu$

## LC-фильтр верхних частот

(a) .

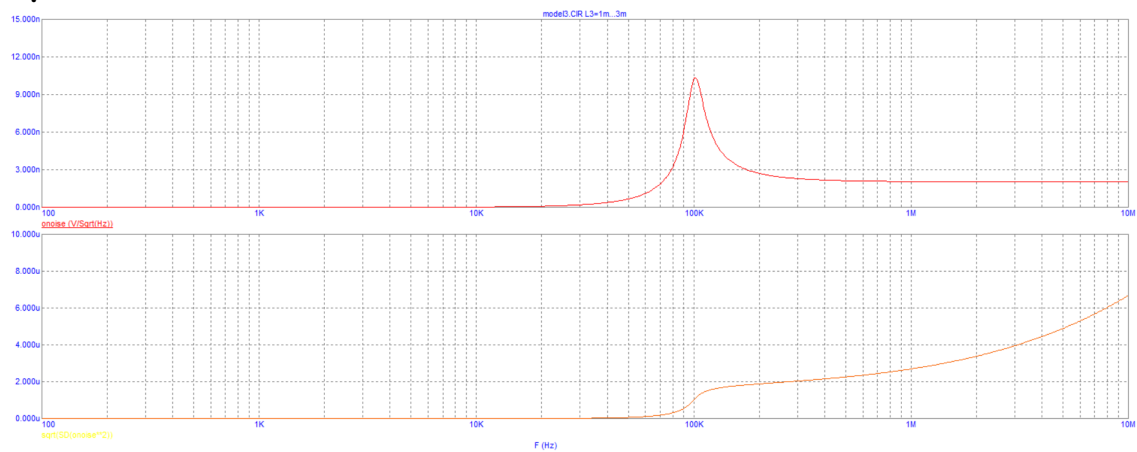


Рис. 29:  $n_4(f_0) = 10.3n$ ,  $n_4(10f_0) = 2.0n$ ,  $\sigma = 2.7\mu$

Разумеется значение  $n_4(10f_0)$  будет совпадать с шумовым напряжением резистора, поскольку при высоких частотах фильтр себя не проявляет (конденсатор - провод, катушка - обрыв) и весь шум идет от резистора на узел n3.

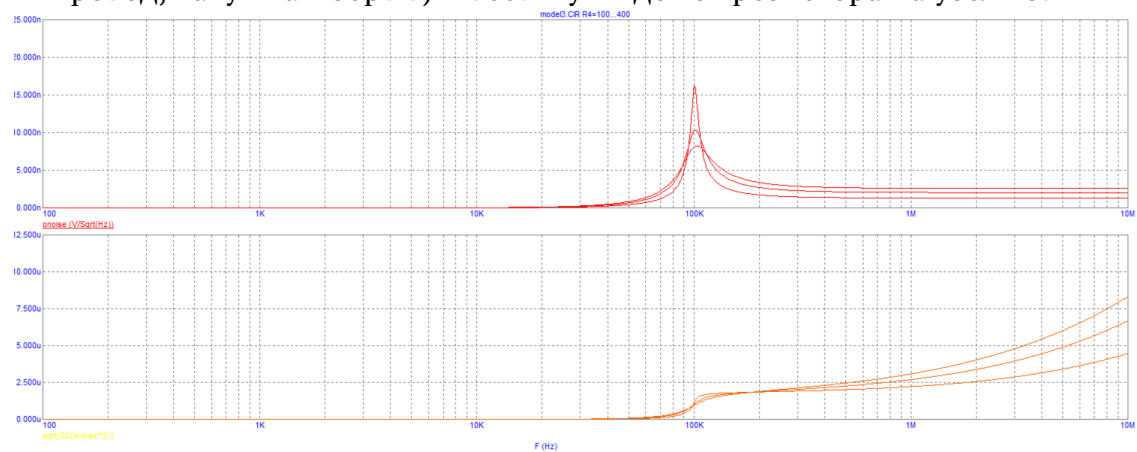


Рис. 30: Варьирование  $R_4 = [100, 400 | 150]$

R3	400	250	100
$n_4(f_0)$	8.2n	10.2n	15.9n
$n_4(10f_0)$	1.1n	2n	2.6n
$\sigma(10f_0)$	3.0 $\mu$	2.7 $\mu$	2.2 $\mu$

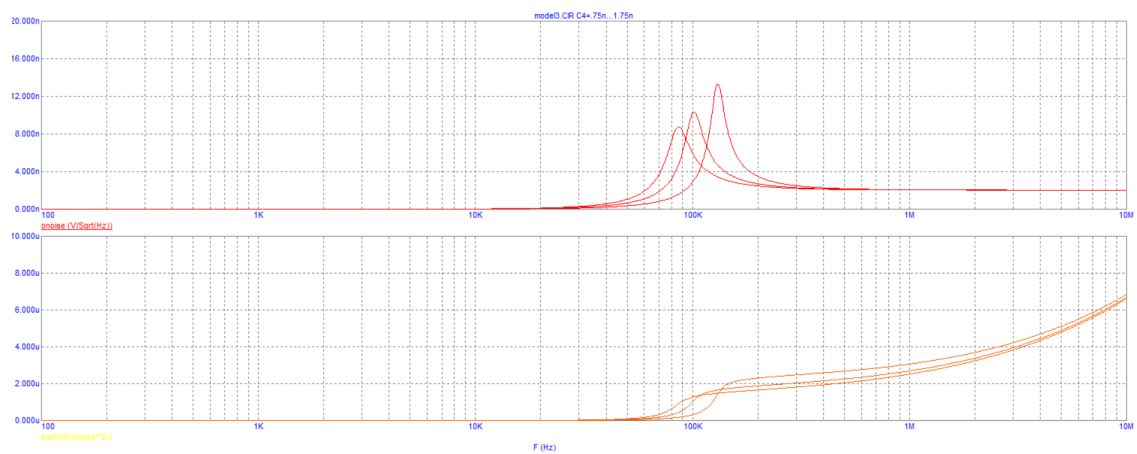


Рис. 31: Варьирование  $C4 = [0.75n, 1.75n | 0.5n]$

C4	0.75n	1.25n	1.75n
$n_4(f_0)$	13.4n	10.2n	8.6n
$n_4(10f_0)$	1.9n	1.9n	1.9n
$\sigma(10f_0)$	3.1 $\mu$	2.7 $\mu$	2.5 $\mu$

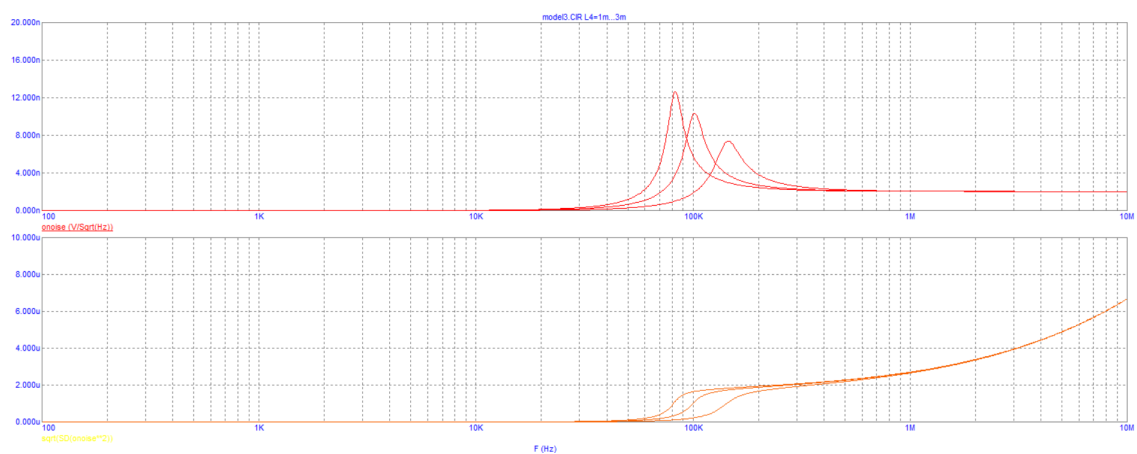


Рис. 32: Варьирование  $L4 = [1m, 3m | 1m]$

L3	1m	2m	3m
$n_4(f_0)$	7.4n	10.4n	12.6n
$n_4(10f_0)$	2.0n	2.0n	2.0n
$\sigma(10f_0)$	2.6 $\mu$	2.6 $\mu$	2.6 $\mu$

## 5 model 4 (Шумящие фильтры)

### Полосовой LC-фильтр

(а) Параметры первого фильтра:  $f_0 = 100kHz$ ,  $\rho = 1260$ ,  $Q = 3$

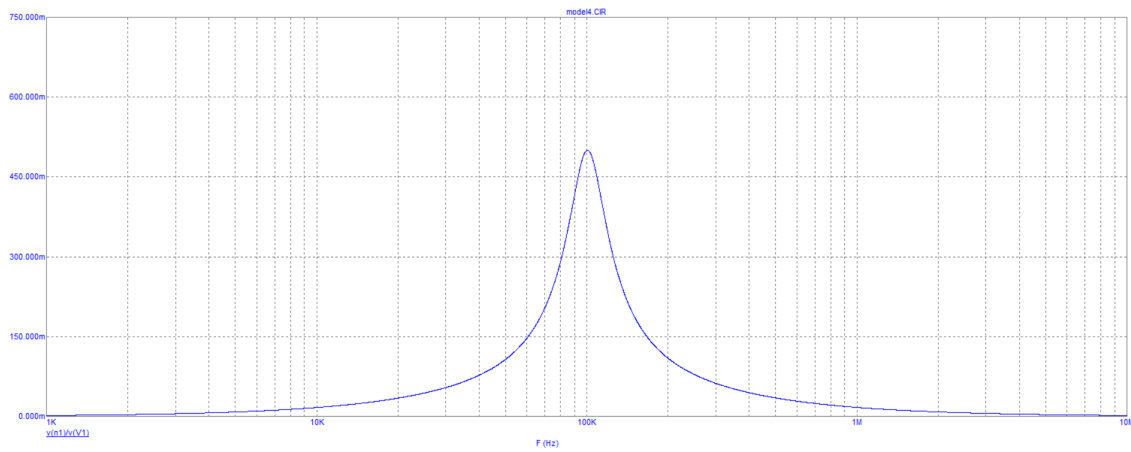


Рис. 33:  $f_0 = 100K$ ,  $\Delta f = 32K$ ,  $K = 0.5$ , с теорией соотносится

(b) .

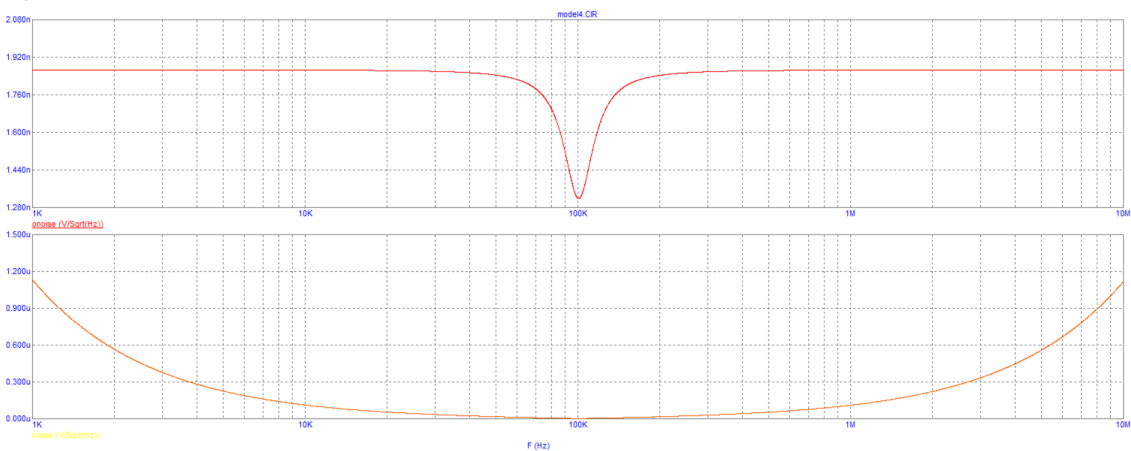


Рис. 34:  $n(f_0) = 1.32n$ ,  $n(f_0/10) = 1.89n$ ,  $\sigma = 1.82\mu$ , оба резистора шумящие

На частоте резонанса сопротивление последовательной LC-цепи становится нулевым. Тогда шум на выходе определяется параллельным соединением двух резисторов R. Вдали от резонанса высокий импеданс LC-цепи изолирует второй резистор от первого. Шум на выходе при этом увеличивается до шума  $e^2$  одного резистора R. Коэффициент же передачи максимален на резонансной частоте и быстро падает при уходе от нее. Поэтому коэффициент шума минимален в точке резонанса, оказываясь равным здесь коэффициенту шума делителя напряжения, и быстро растет при удалении от резонанса.



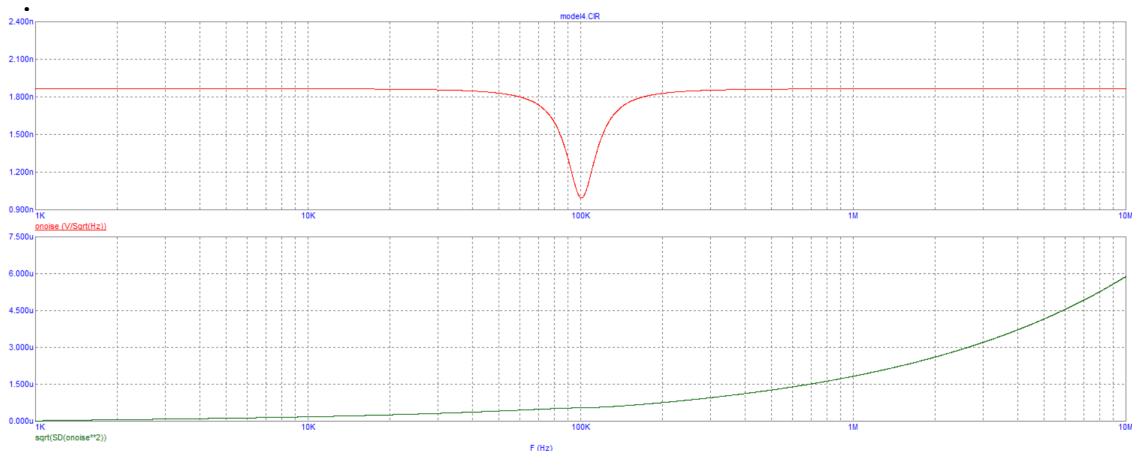


Рис. 35:  $n(f_0) = 1.01n$ ,  $n(f_0/10) = 1.86n$ ,  $\sigma = 5.9\mu$ ,  $R_{s1}$  - не шумящий

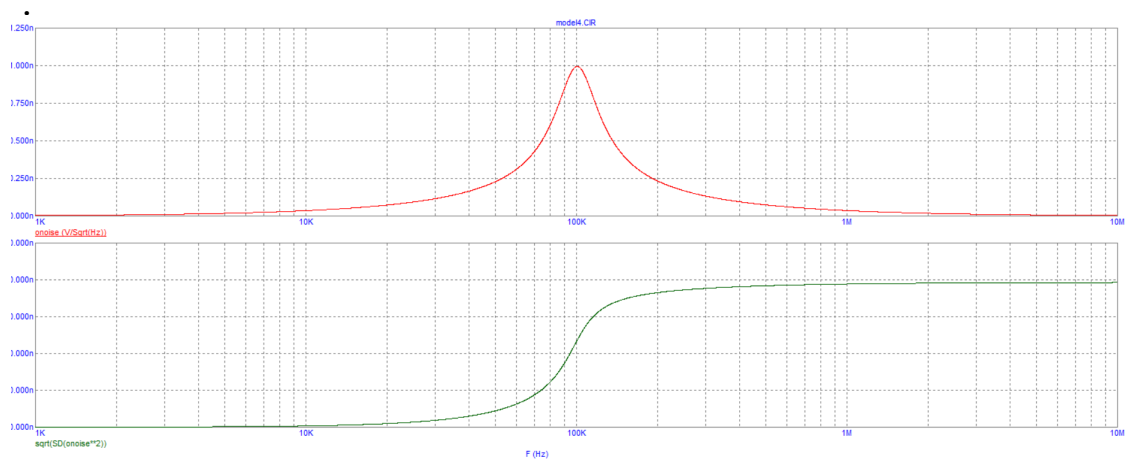


Рис. 36:  $n(f_0) = 1.01n$ ,  $n(f_0/10) = 30p$ ,  $\sigma = 240n$ ,  $R_1$  - не шумящий

Для частоты  $f_0/10$  закон очевидно выполнен. Для частоты  $f_0$ , учитывая формулу параллельного соединения резисторов, получим требуемое соответствие.

(с) .

Формула коэффициента шума  $K = 20lg \left( \frac{e_n(f)}{\sqrt{4kTR}} \right)$

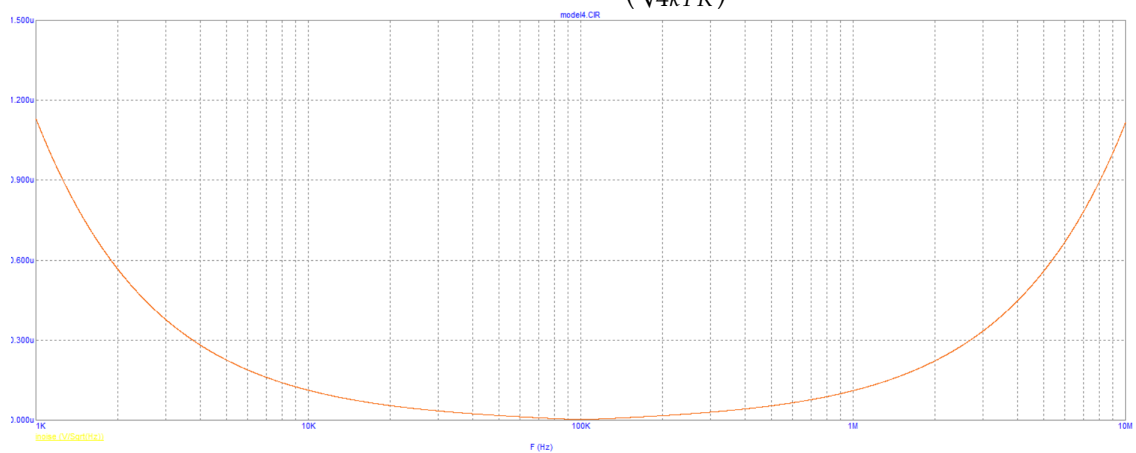


Рис. 37:  $e(f_0) = 2.6n$ ,  $e(f_0/10) = 110.1n \Rightarrow K_n(f_0/10) \approx 36$ ,  $K_n(f_0) \approx 3$