

**Московский Физико-Технический Институт
(государственный университет)**

Работа 20

Сибгатуллин Булат, ФРКТ

1

1.1 model1_1

1.1.1

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

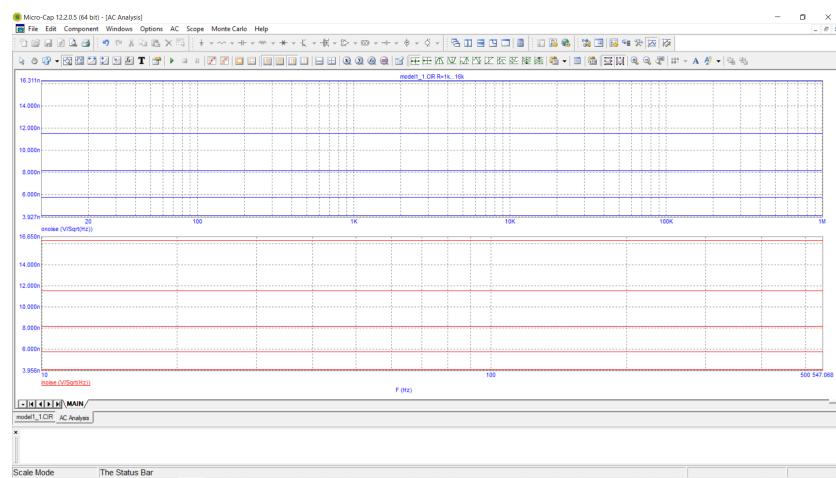


Рис. 1: Зависимость шумового напряжения от R

1.1.2

Измерим уровень шума σ на выводе резистора в полосе $F = 1$ МГц.

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

Таблица 1: Зависимость уровня шума σ от R

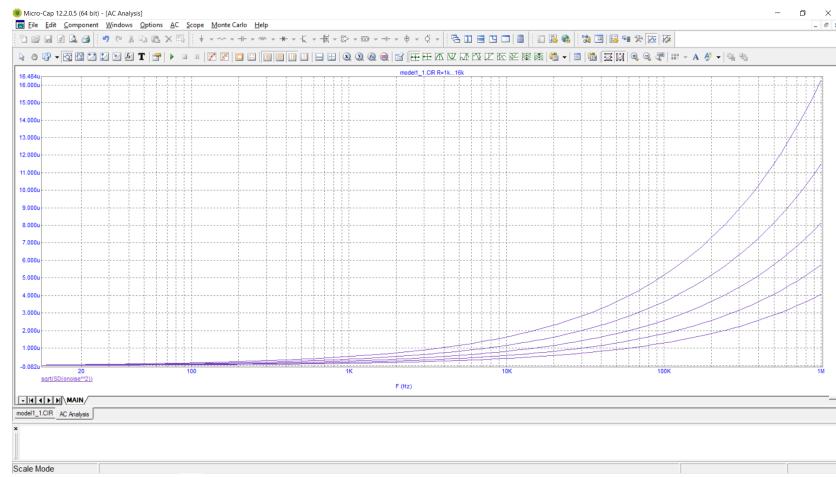


Рис. 2: Варьирование $R = [1k, 16k] \text{ Log}2$

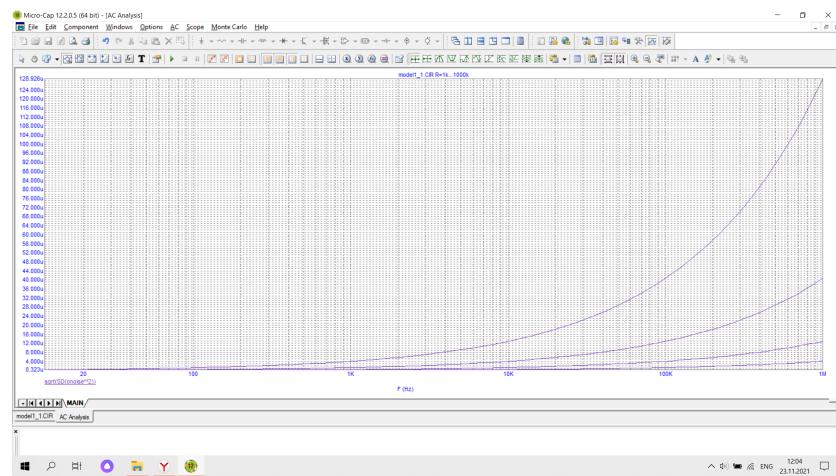


Рис. 3: Варьирование $R = [1k, 1000k] \text{ Log}10$

1.1.3

Перейдем к модели источника тока, получаем, что с увеличением R_1 ток остается нулевым, а напряжение растет как \sqrt{R} .

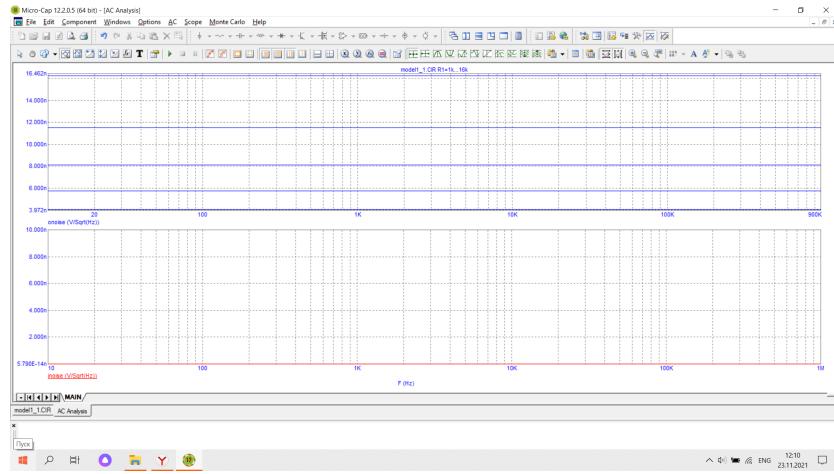


Рис. 4: Шумовые напряжение и ток в модели с источником тока

1.2 model1_2

1.2.1

Изучим шумы в схеме с последовательным соединением, проверим закон сложения шумовых напряжений.

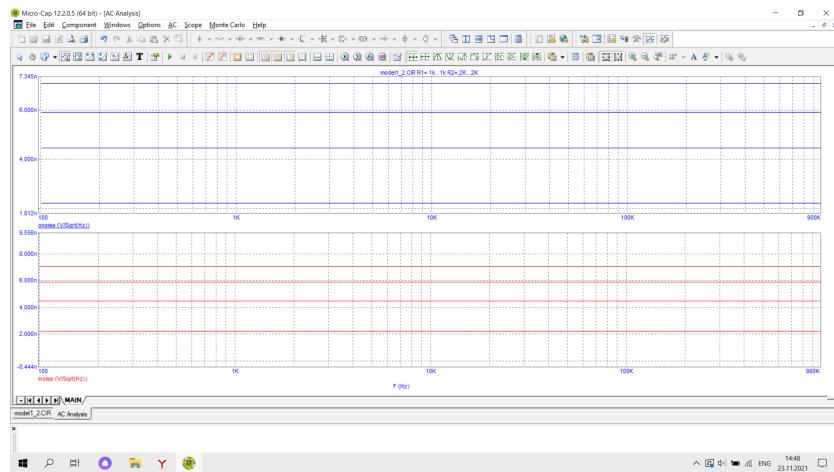


Рис. 5: Варьирование $R = [0,1k, 1k| 1k]$, $R = [0,2k, 2k| 2k]$

Закон сложения шумовых напряжений выполняется.

1.2.2

Перейдем к схеме с параллельным соединением.

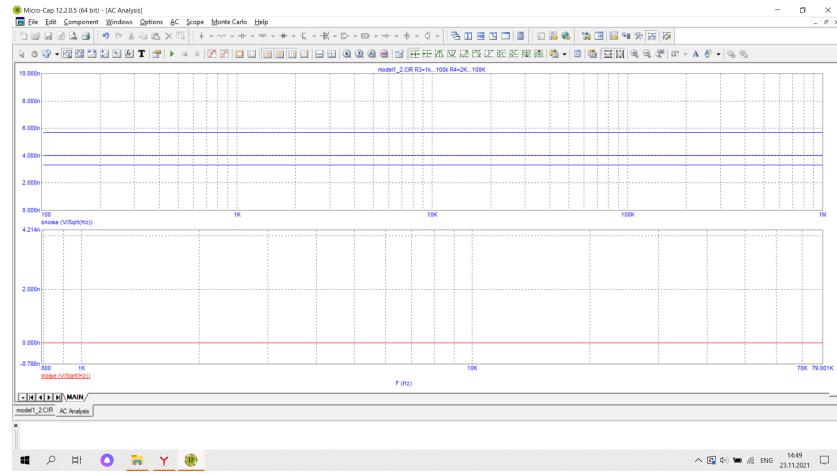


Рис. 6: Варьирование $R = [1k, 100k]$, $R = [2k, 100k]$

1.3 model1_3

1.3.1

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

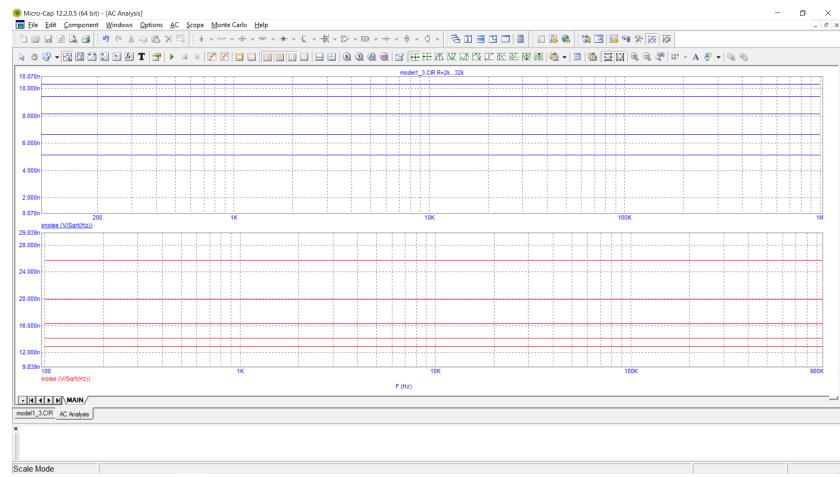
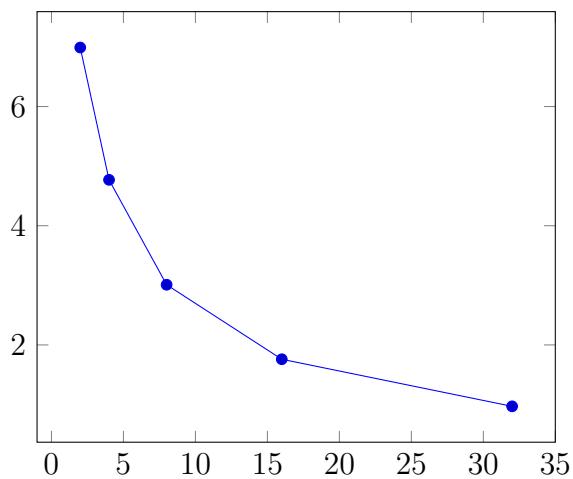
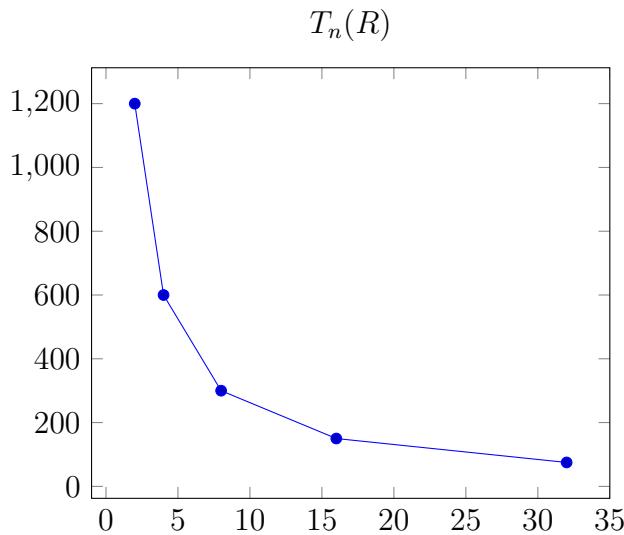


Рис. 7: Приведенное ко входу напряжение e_n от R

$$K_n(R)$$





1.3.2

Исключим резистор R и поставим вместо него нешумящий резистор H .

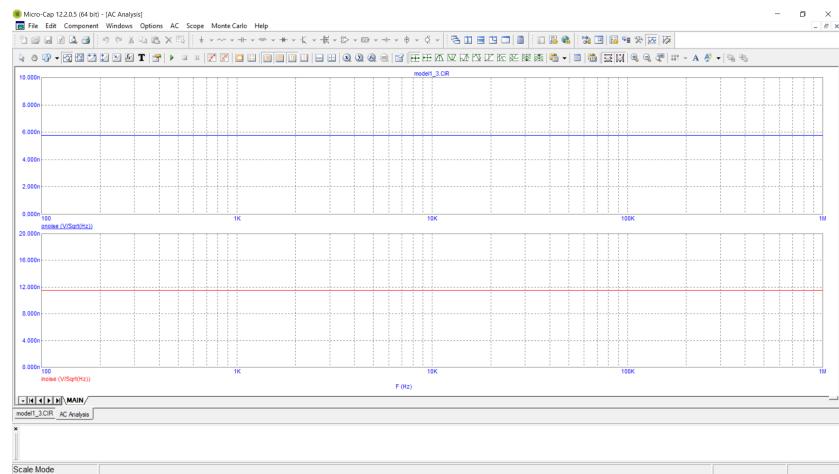


Рис. 8: Нешумящий резистор

2 model2

2.1

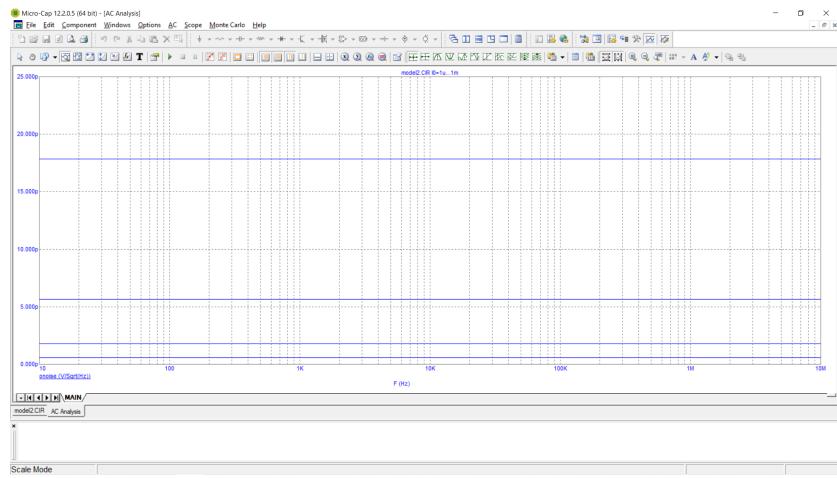


Рис. 9: Микротоки

Проверим выполнение закона $\sqrt{I_0}$:

- $I_{01} = 1\mu \Rightarrow e_{01} = 564f;$
- $I_{02} = 10\mu \Rightarrow e_{02} = 1.69p \approx \sqrt{10}e_{01};$
- $I_{03} = 100\mu \Rightarrow e_{03} = 5.603p \approx \sqrt{100}e_{01};$
- $I_{04} = 1000\mu \Rightarrow e_{04} = 17.79p \approx \sqrt{1000}e_{01};$

Проверим выполнение закона $\sqrt{I_0}$:

- $I_{01} = 1\mu \Rightarrow e_{01} = 17.89p;$
- $I_{02} = 2\mu \Rightarrow e_{02} = 25.18p \approx \sqrt{2}e_{01};$
- $I_{03} = 4\mu \Rightarrow e_{03} = 35.31p \approx \sqrt{4}e_{01};$
- $I_{04} = 8\mu \Rightarrow e_{04} = 49.20p \approx \sqrt{8}e_{01};$
- $I_{05} = 16\mu \Rightarrow e_{05} = 67.56p \approx \sqrt{16}e_{01};$

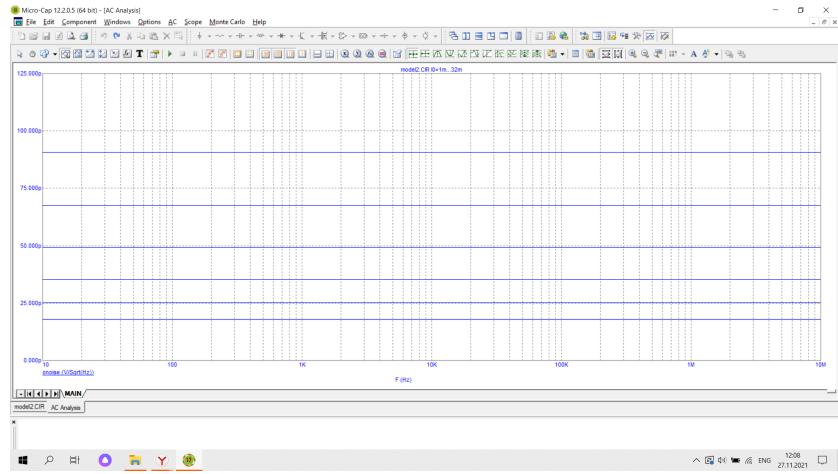


Рис. 10: Умеренные токи

- $I_{06} = 32\mu \Rightarrow e_{06} = 92.61p \approx \sqrt{32}e_{01};$

Напряжение пробоя диода???

2.2

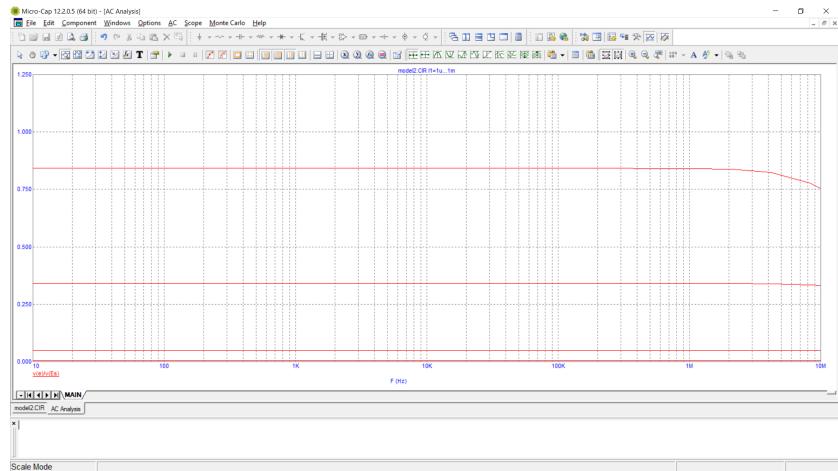


Рис. 11: $K = r_d/(R_1 + r_d)$

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

- $I_{01} = 1\mu \Rightarrow K_1 = 5.16m \Rightarrow r_d = 51.6 \text{ Ом};$

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

2.3

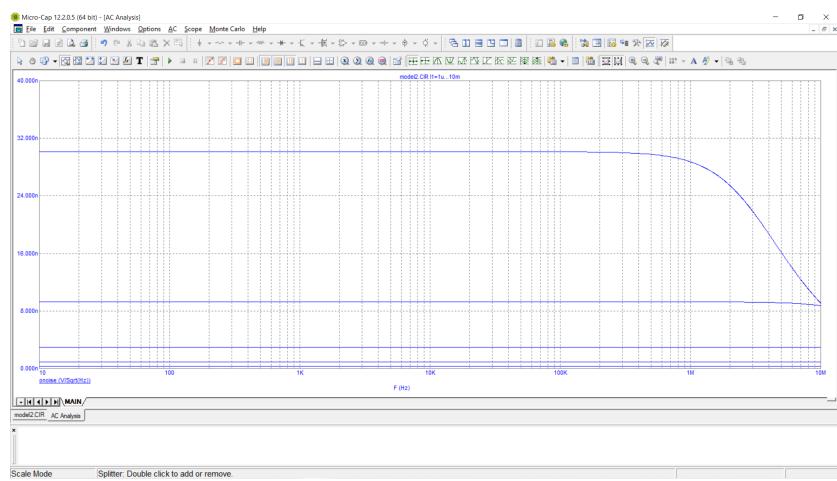


Рис. 12: $e(f)$ для $I = [1\mu, 10m] \text{Log10}$

Проверим формулу $e(f) = i(f)r_d$, возьмем $i(f) = \sqrt{2 * e * I_1}$:

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

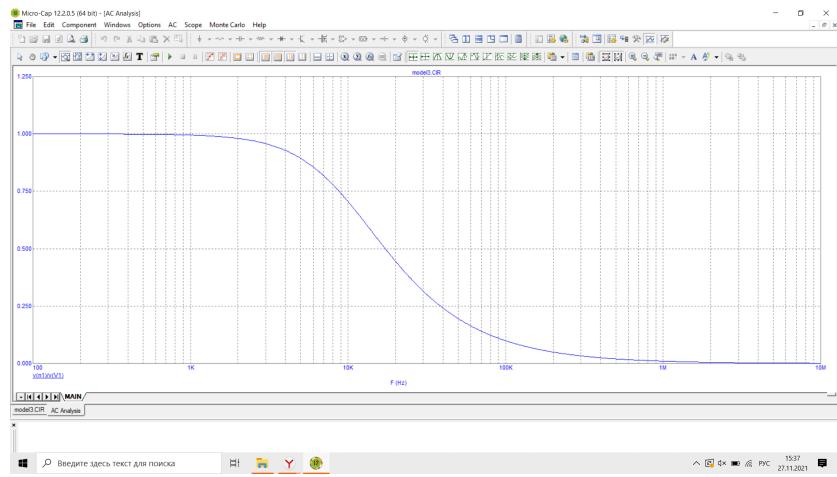


Рис. 13: Границчная частота $f_h = 10$

3 model3

3.1 Интегрирующая цепь

$$\sigma_{\text{теор1}} = n\sqrt{Fn} = 12.8n\sqrt{\pi/2 \cdot 10000} = 1.63\mu \quad \sigma_{\text{теор2}} = \sqrt{\frac{kT}{C}} = 1.61\mu$$

$$\sigma_{\text{прак}} = 1.60\mu$$

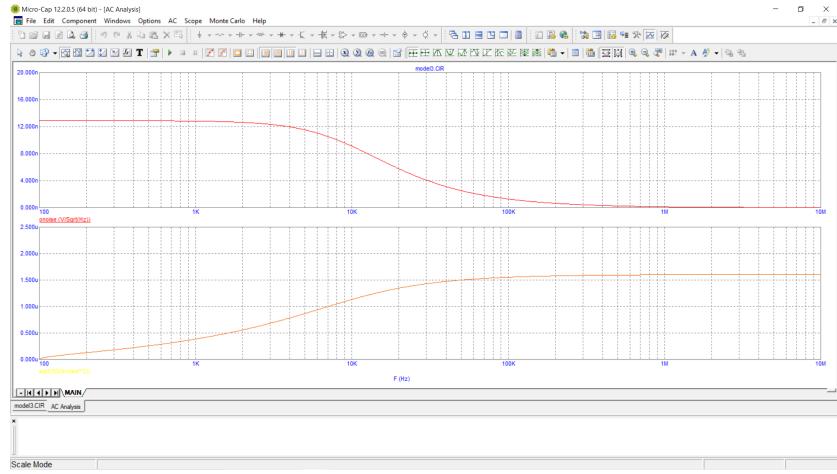


Рис. 14: Уровень шума

Снимем зависимость шумового напряжения от R_1 :

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

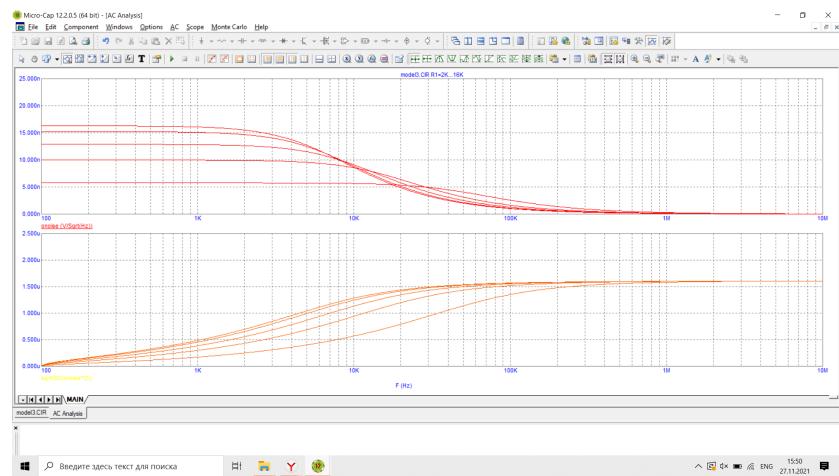


Рис. 15: Варьирование $R_1 = [2k, 16k|4k]$

Снимем зависимость уровня шума от C_1 :

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

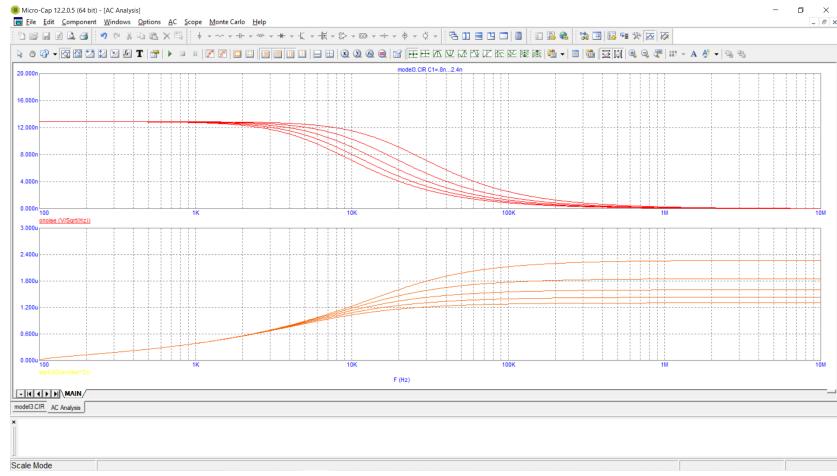


Рис. 16: Варьирование $C_1 = [0.8n, 2.4n|0.4n]$

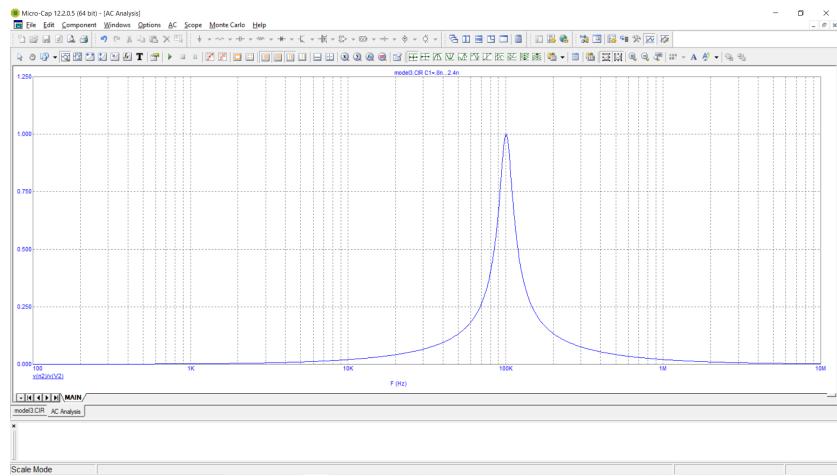


Рис. 17: $f_0 = 100k, \Delta f = 20k, Q = 5$

3.2 Полосовой LC-фильтр

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

Зависимость $n_2(f_0)$ от R_2 :

- $R_2 = 2.3k \Rightarrow n_2 = 6.08n$;
- $R_2 = 6.3k \Rightarrow n_2 = 10.08$;

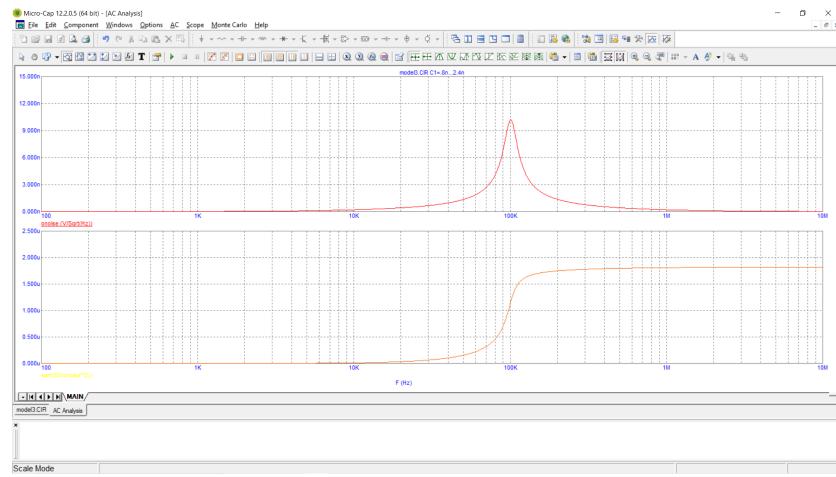


Рис. 18: $n_2(f_0) = 10n, \sigma = 1.82\mu$

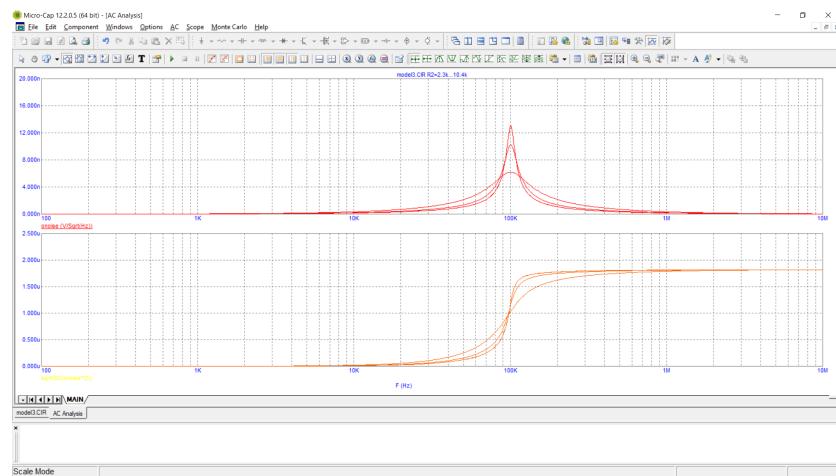


Рис. 19: Варьирование $R_2 = [2.3k, 10.3k|4k]$

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

Зависимость σ от C_2 :

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

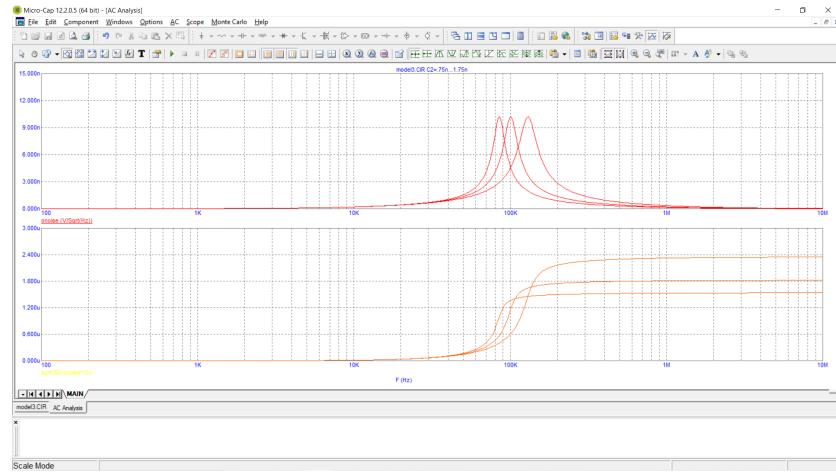


Рис. 20: Варьирование $C_2 = [0.75\text{n}, 1.75\text{n}|0.5\text{n}]$

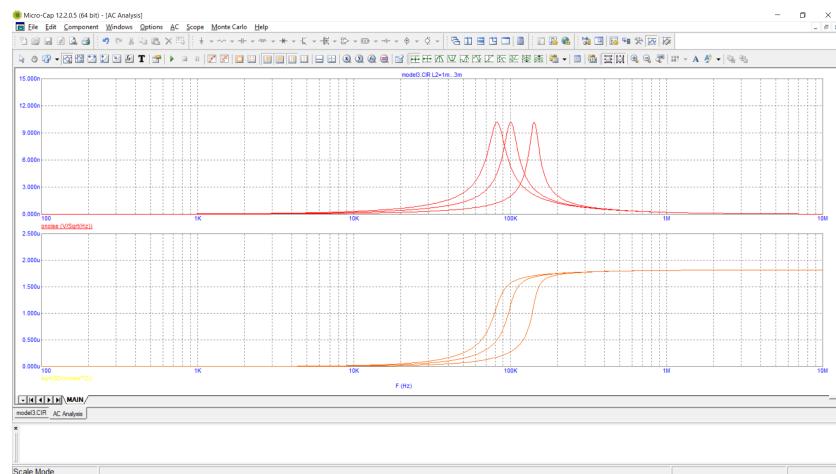


Рис. 21: Варьирование $L_2 = [1\text{m}, 3\text{m}|1\text{m}]$

3.3 LC-фильтр низких частот

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

R3	400	250	100
$n_3(f_0)$	8.1n	10.3n	15.9n
$n_3(f_0/10)$	1.1n	2n	2.6n
σ	1.8μ		

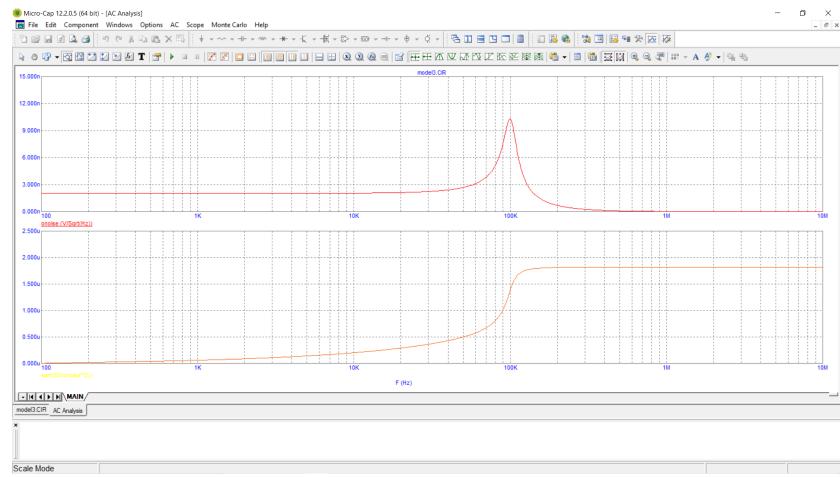


Рис. 22: $n_3(f_0) = 10.2n$, $n_3(f_0/10) = 1.9n$, $\sigma = 1.82\mu$

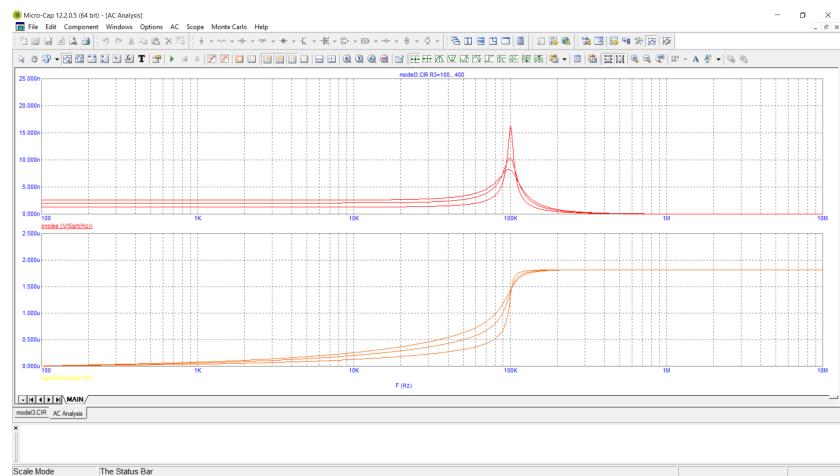


Рис. 23: Варьирование $R3 = [100,400|150]$

C3	0.75n	1.25n	1.75n
$n_3(f_0)$	13.2n	10.2n	8.8n
$n_3(f_0/10)$	2.1n		
σ	2.4μ	1.8μ	1.5μ

L3	1m	2m	3m
$n_3(f_0)$	7.4n	10.2n	12.6n
$n_3(f_0/10)$	2.1n		
σ	1.8μ		

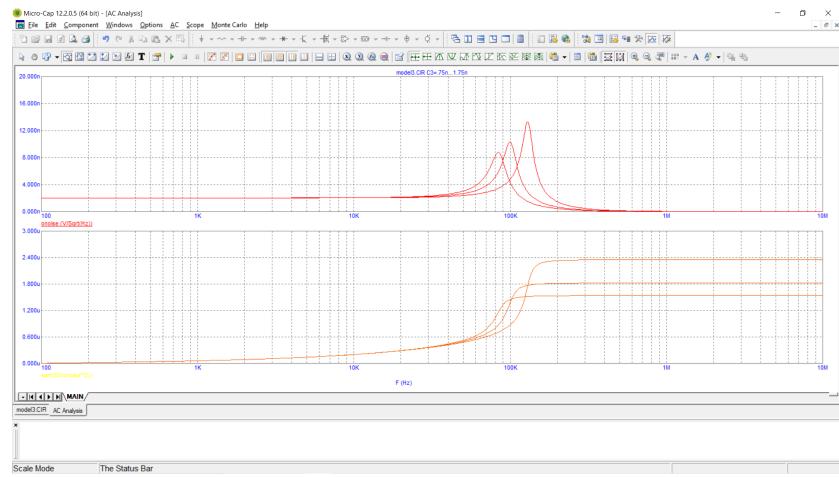


Рис. 24: Варьирование $C_3 = [0.75n, 1.75n | 0.5n]$

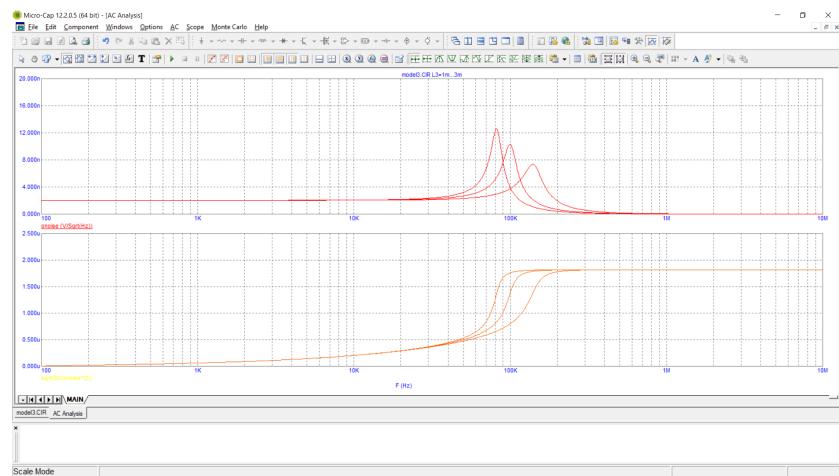


Рис. 25: Варьирование $L_3 = [1m, 3m | 1m]$

3.4 LC-фильтр верхних частот

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

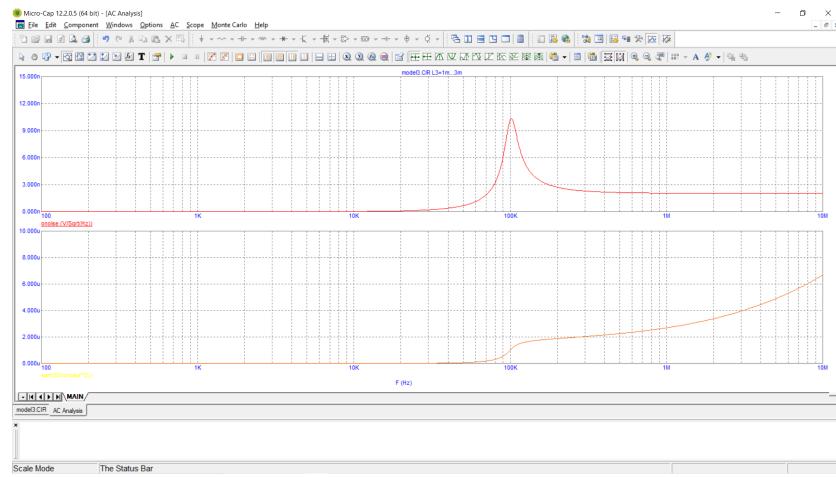


Рис. 26: $n_4(f_0) = 10.3n$, $n_4(10f_0) = 2.0n$, $\sigma = 2.7\mu$

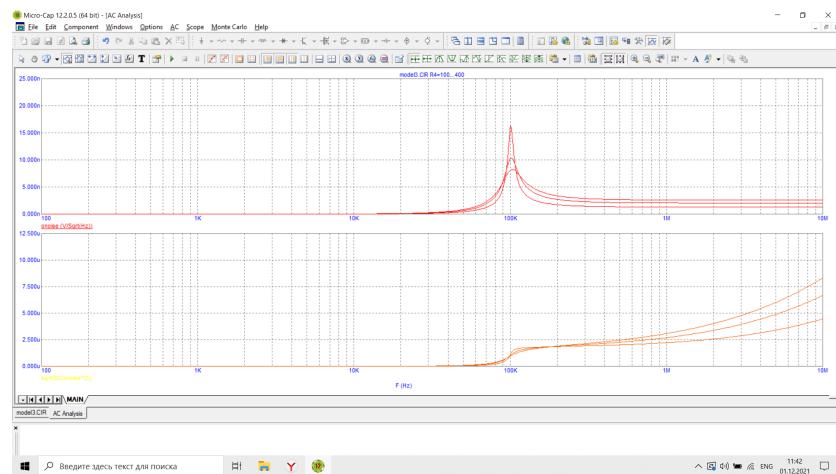


Рис. 27: Варьирование $R4 = [100, 400 | 150]$

C4	0.75n	1.25n	1.75n
$n_4(f_0)$	13.4n	10.2n	8.6n
$n_4(10f_0)$	1.9n		
σ	3.1μ	2.7μ	2.5μ

L3	1m	2m	3m
$n_4(f_0)$	7.4n	10.4n	12.6n
$n_4(10f_0)$	2.0n		
σ	2.6μ		

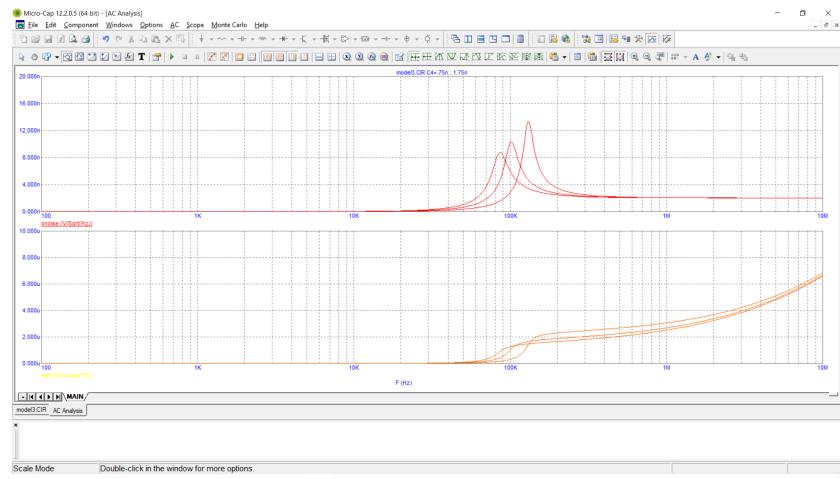


Рис. 28: Варьирование $C4 = [0.75n, 1.75n | 0.5n]$

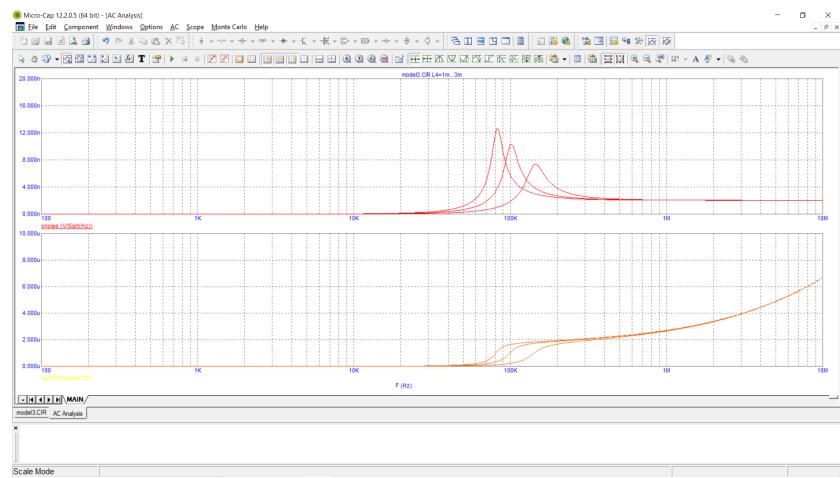


Рис. 29: Варьирование $L4 = [1m, 3m | 1m]$

4 model4

4.1 Полосовой LC-фильтр

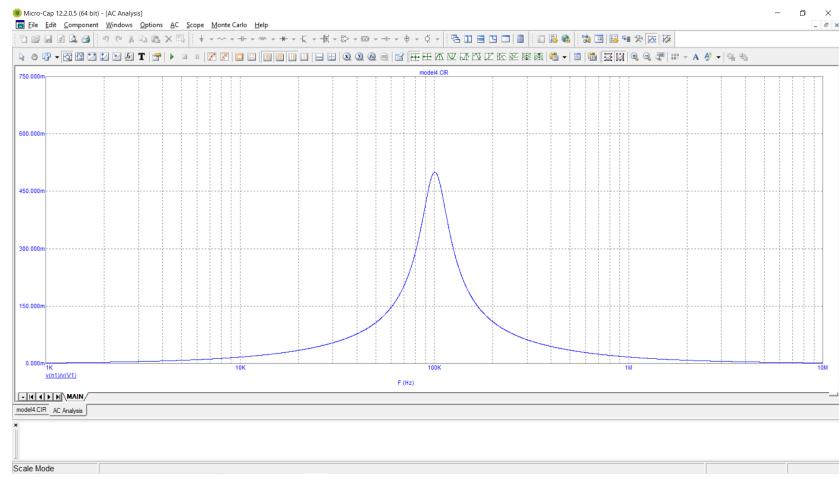


Рис. 30: $f_0 = 100K$, $F = 32K$, $K = 0.5$, с теорией соотносится

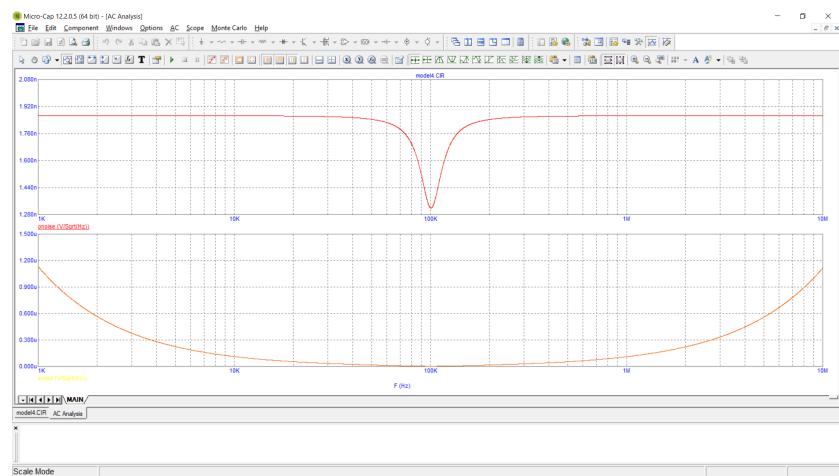


Рис. 31: $n(f_0) = 1.32n$, $n(f_0/10) = 1.89n$, $\sigma = 1.82\mu$, оба резистора шумящие

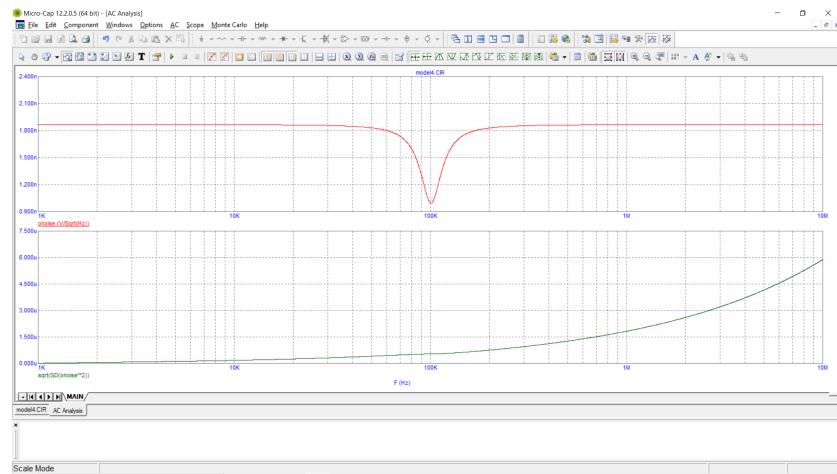


Рис. 32: $n(f_0) = 1.01n, n(f_0/10) = 1.86n, \sigma = 5.9\mu, R_s 1$ - не шумящий

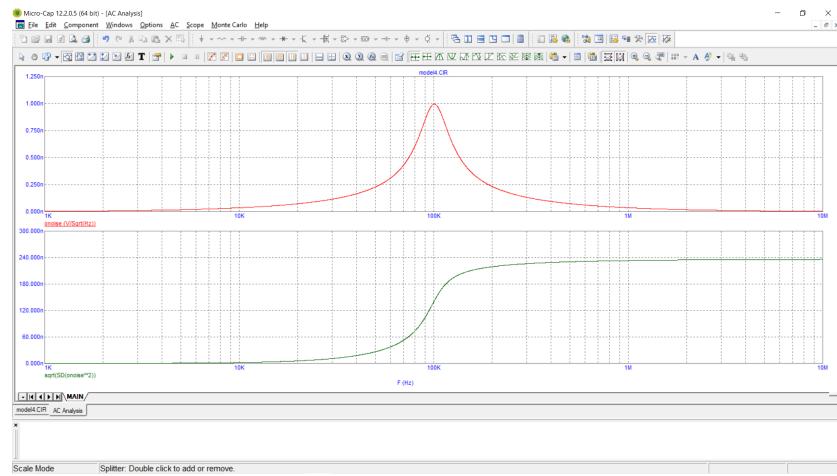


Рис. 33: $n(f_0) = 1.01n, n(f_0/10) = 30p, \sigma = 240n, R_s 1$ - не шумящий

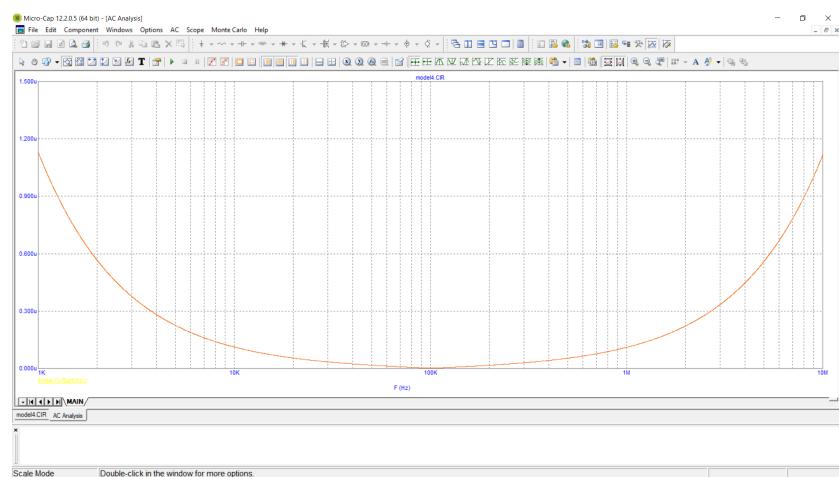


Рис. 34: $e(f_0) = 2.6n$, $e(f_0/10) = 110.1n \Rightarrow K_n(f_0) \approx 36$, $K_n(f_0/10) \approx 3$

4.2 Полосовой RC-фильтр

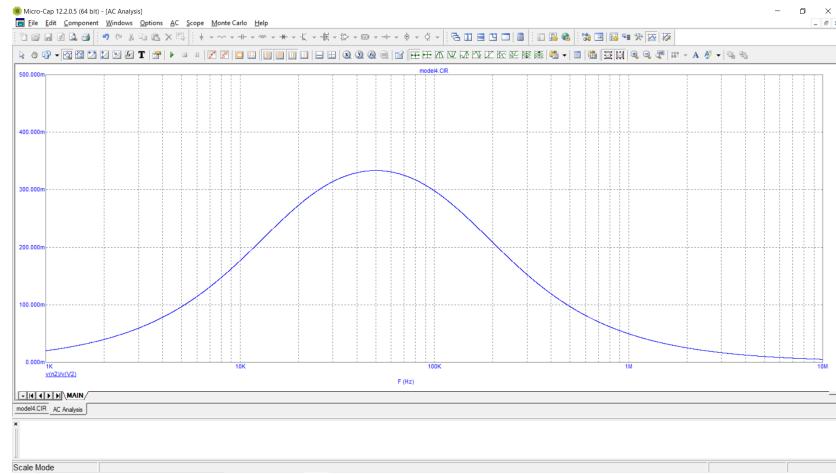


Рис. 35: $f_0 = 50k$, $F = 152k$, $K = 0.33$, с теорией сходится

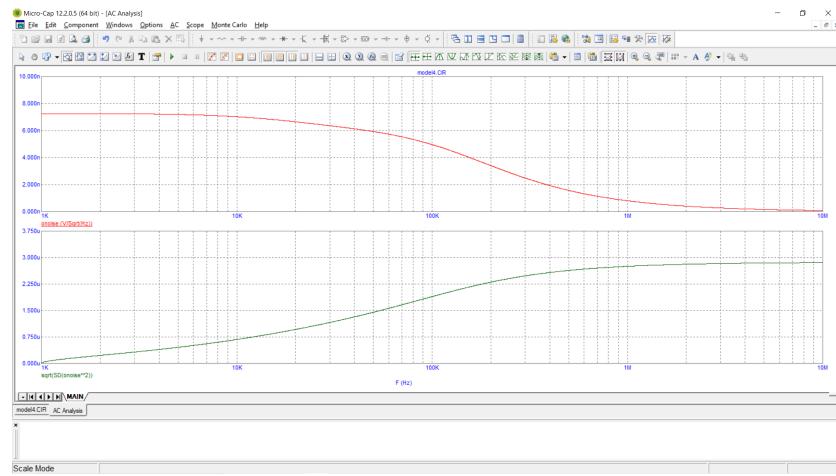


Рис. 36: $n(f_0) = 5.88n$, $n(10f_0) = 1.56n$, $\sigma = 2.86\mu$, оба резистора шумящие

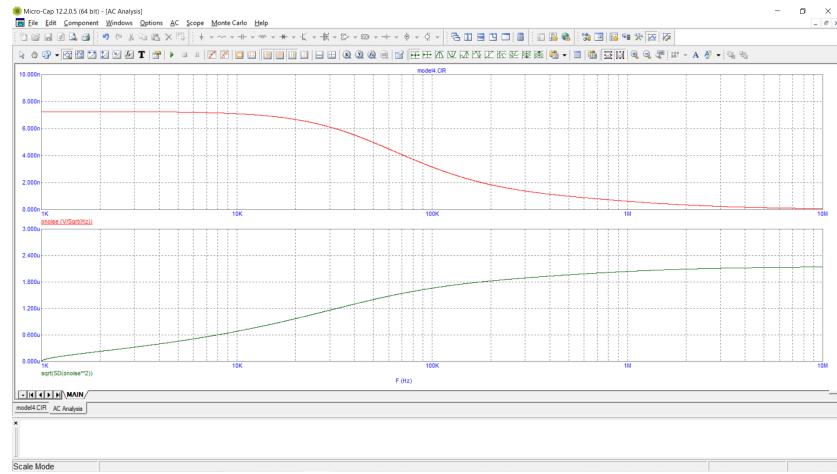


Рис. 37: $n(f_0) = 4.96n$, $n(10f_0) = 960p$, $\sigma = 2.15\mu$, R_{s2} не шумящий

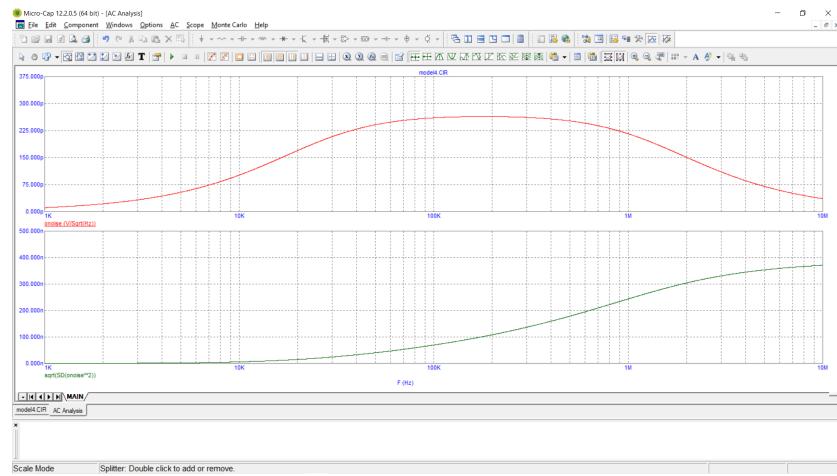


Рис. 38: $n(f_0) = 240p$, $n(10f_0) = 250p$, $\sigma = 370nR_2$ нешумящий

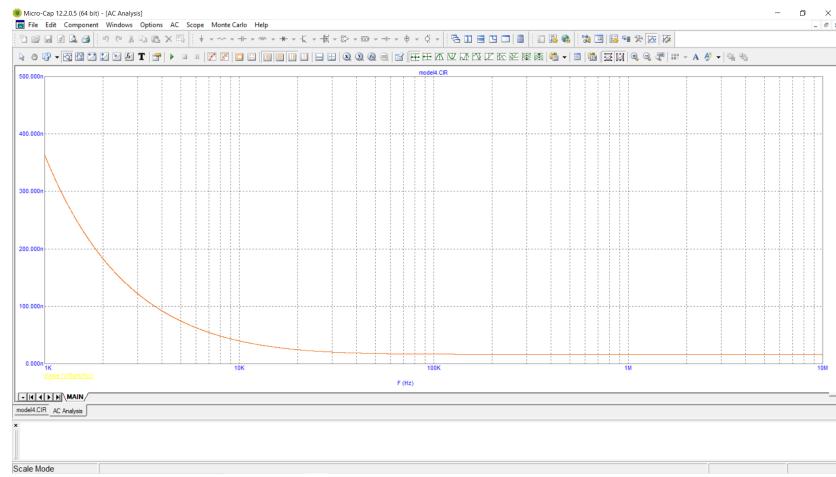


Рис. 39: $e(f_0) = 17.7n, e(f_0/10) = 73.45n, e(f_0/100) = 728.6n \Rightarrow K(f_0) = 7.9, K(f_0/10) = 20.4, K(f_0/100) = 41$

4.3 Полосовой LC-фильтр нижних частот

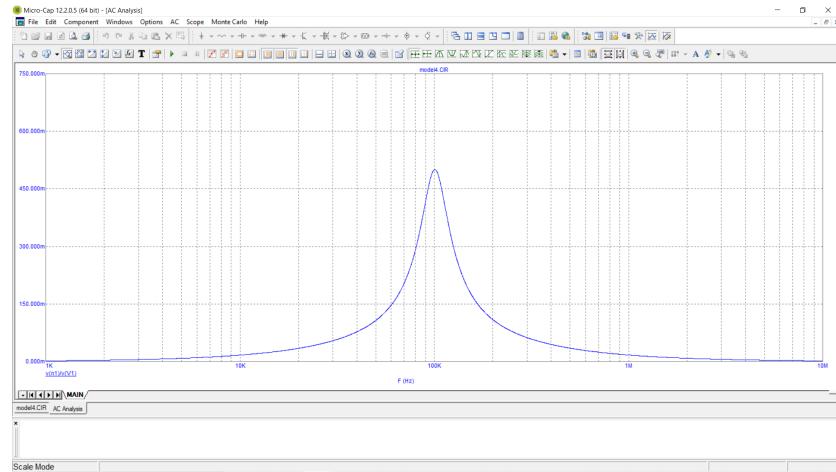


Рис. 40: $f_0 = 102k, F = 36k, K(f_0) = 0.5, K(0) = 0.02$, с теорией сходится

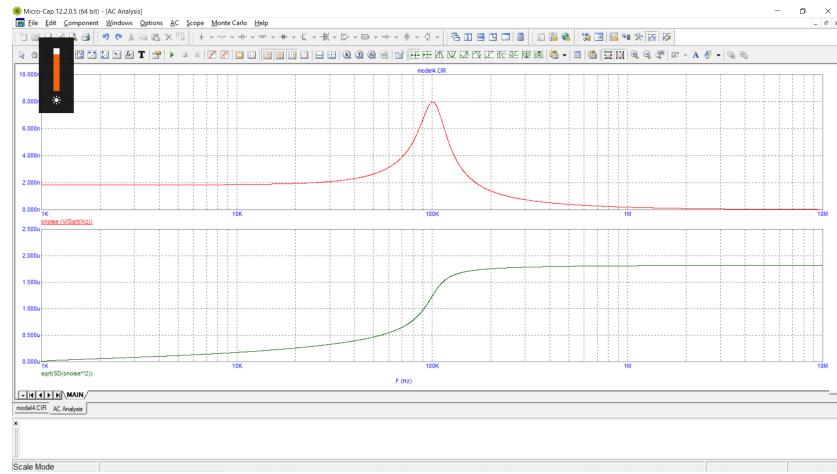


Рис. 41: $n(f_0) = 7.9n$, $n(f_0/100) = 1.8n$, $\sigma = 1.8\mu$, оба шумящие

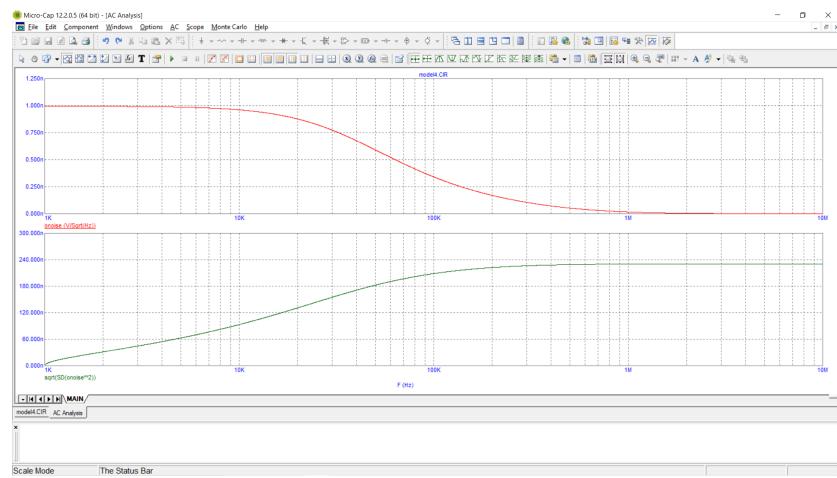


Рис. 42: $n(f_0) = 355p$, $n(f_0/100) = 1.0n$, $\sigma = 228.9n$, R_3 шумящий

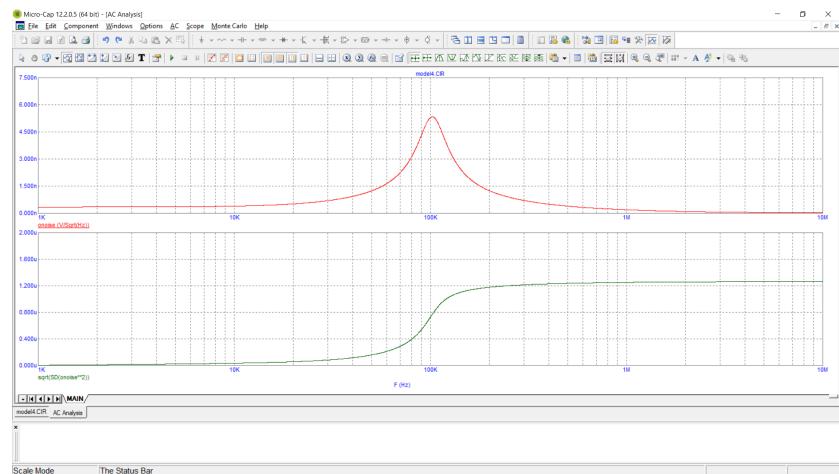


Рис. 43: $n(f_0) = 1.8n, n(f_0/100) = 11.2n, \sigma = 1.7\mu, R_{s3}$ шумящий

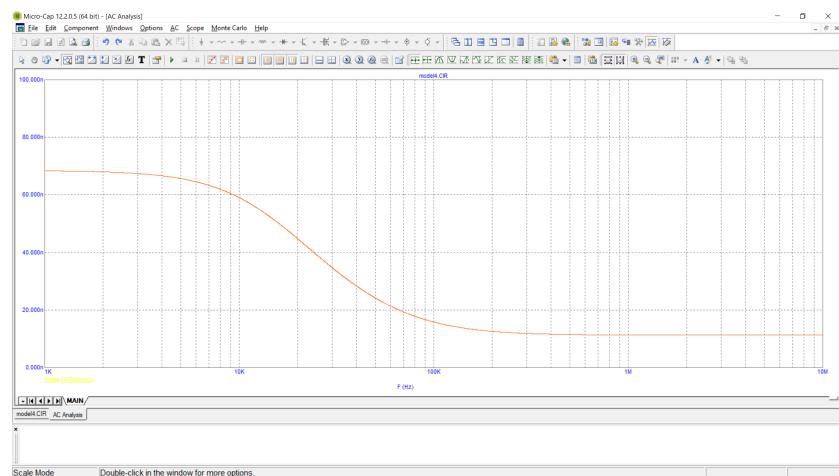


Рис. 44: $e(f_0) = 15.4n, e(f_0/100) = 68.3n, e(10f_0) = 10.9n \Rightarrow K(f_0) = 31.5, K(f_0/100) = 18.9, K(10f_0) = 15.8$

5 model5

$$I_c = 125\mu, r_b = 112.5 \text{ Ом}$$

5.1 Измерение шумового коллекторного тока

5.1.1

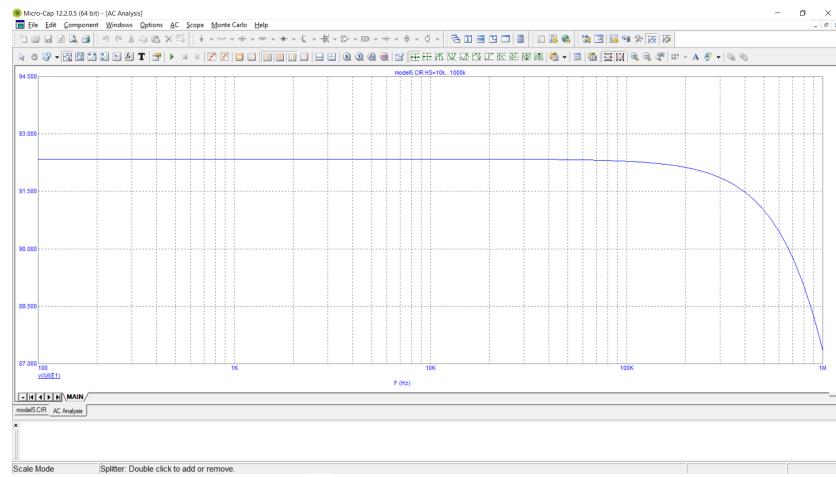


Рис. 45: $h_{21} = 84.9$

5.1.2

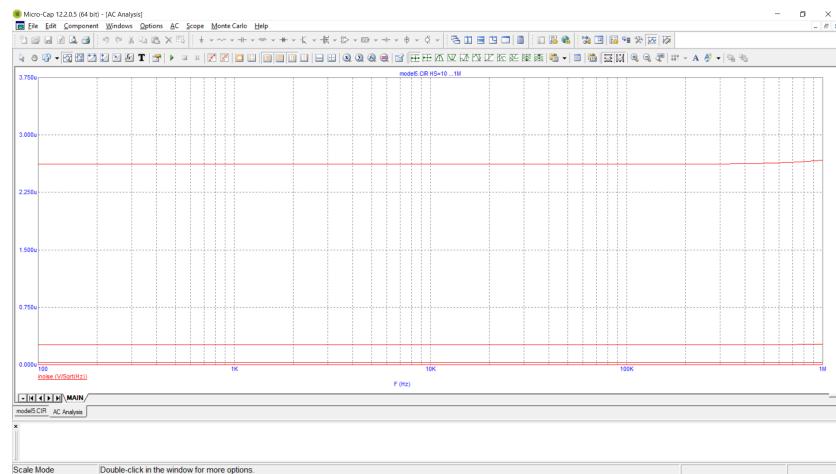


Рис. 46: Варьирование $H_s = [10, 1000k | Log10]$

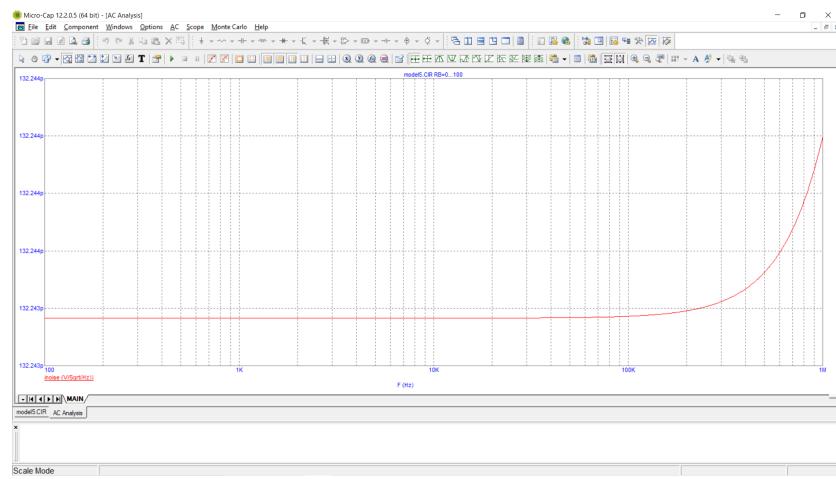


Рис. 47: Варьирование $RB = [0, 100|25]$

5.1.3

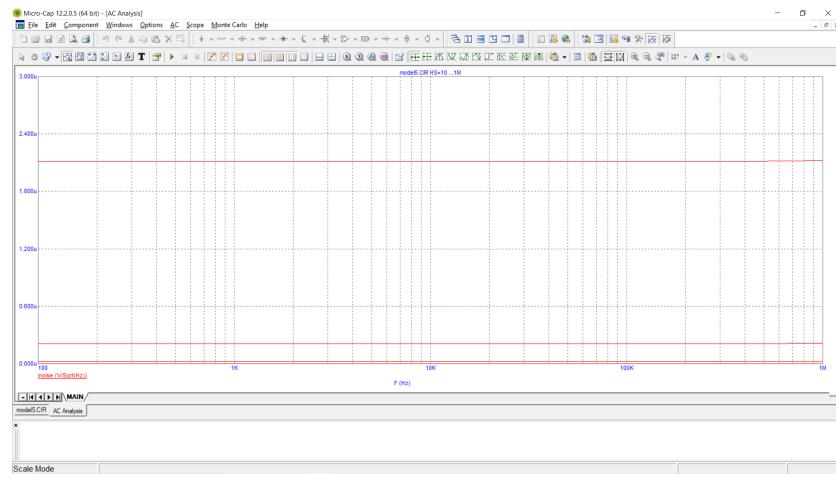


Рис. 48: Варьирование $H_s = [10, 1000|Log10]$ для $I_c = 0.1m, I_1 = 1.83\mu$

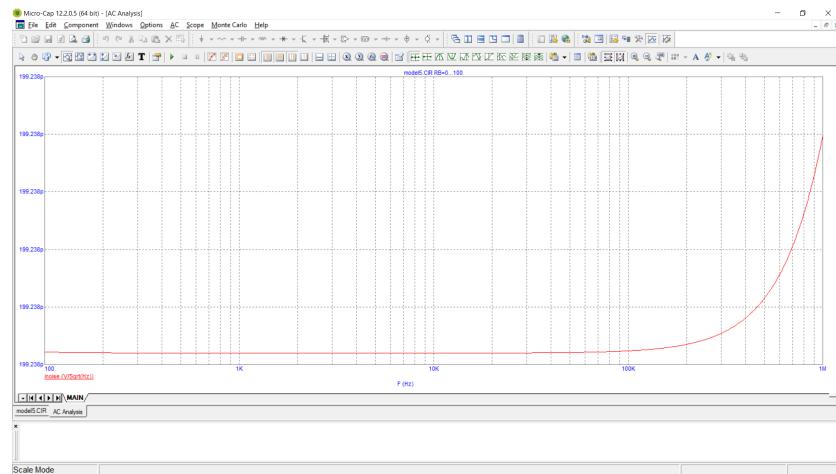


Рис. 49: Варьирование $RB = [0, 100|25]$ для $I_c = 0.1m, I_1 = 1.83\mu$

5.2 Измерение коэффициента шума

$R_s = 40k$.

6 model6

$U_p = 1.1$ B, $R_g = 25$ Ом, $I_d = 1m$?

6.1 Исследование шумового тока

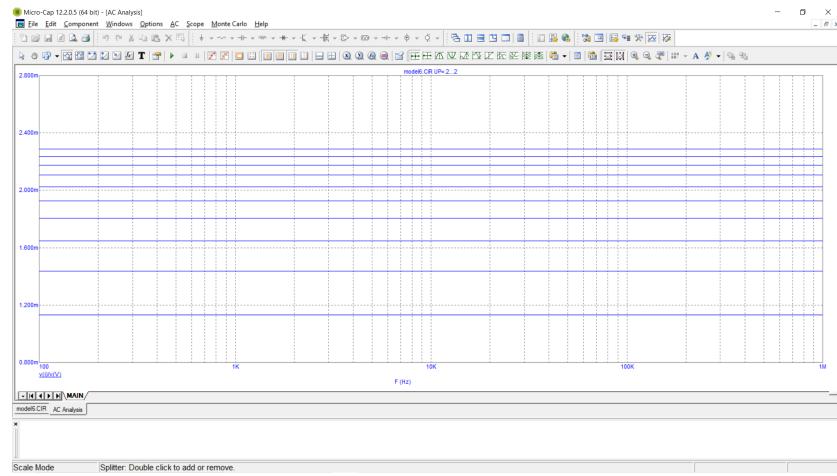


Рис. 50: Крутизна транзистора

U_p	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2
S	1.13	1.44	1.65	1.80	1.92	2.02	2.11	2.18	2.24	2.29

Таблица 2: Для $U_p = 1.1V \frac{1}{S} \approx 0.5$

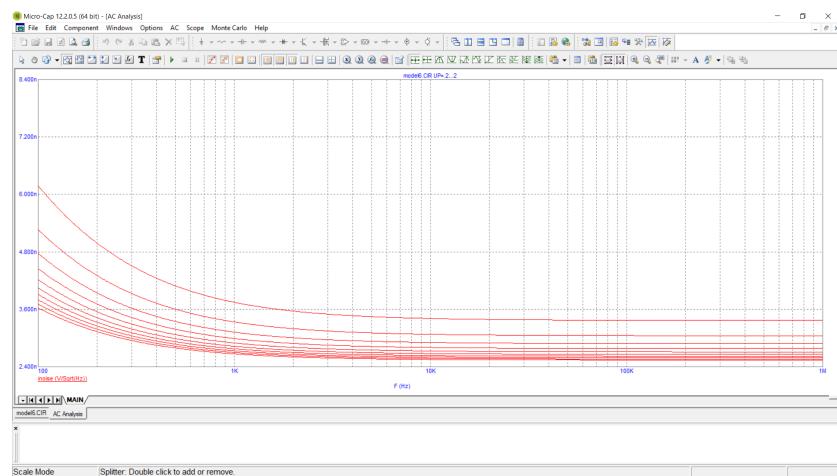


Рис. 51: Шумовой ток, варьирование U_p

U_p	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2
$i_d, \text{ p}$	3.37	3.05	2.88	2.78	2.71	2.66	2.62	2.59	2.56	2.54

Таблица 3: Для $U_p = 1.1V$ $\gamma = \frac{i_d^2}{4kTS} \approx 0.65$

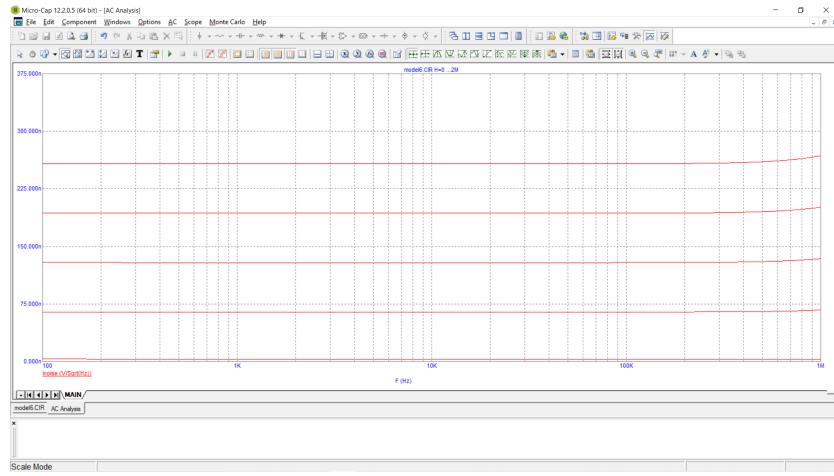


Рис. 52: Шумовой ток, варьирование H

$H, \text{ Meg}$	0	0.5	1	1.5	2
$i_d, \text{ n}$	2.83	64.26	129.34	192.09	257.77

6.2 Исследование коэффициента шума

$R, \text{ k}$	50	80	110	140	170	200
K_n						
hline T_n						

Таблица 4:

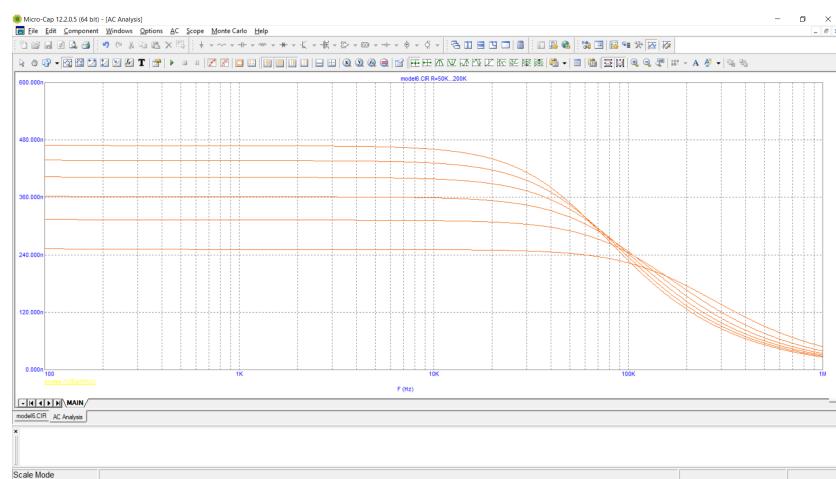


Рис. 53: Напряжение на выходе, варьирование R