

Московский физико-технический университет  
Физтех-школа радиотехники и компьютерных  
технологий

Лабораторная работа № 16

## Шумы в электронных схемах

Работу выполнили:  
Тяжкороб Ульяна  
Шурыгин Антон  
Широкова Ксения  
Б01-909

г. Долгопрудный  
2020

# 1 Тепловой шум

## 1.1 задание

### Пункт 1

Модель резистора как источник шумового напряжения. Из графиков видно, что напряжения на входе/выходе равны  $e = 4.0n$ , поскольку коэффициент передачи равен 1. Варьируем:  $R[1k, 16k | \log 2]$

- 1)  $R = 1k \Rightarrow e_1 = 4n$
- 2)  $R = 2k \Rightarrow e_2 = 5.75n$
- 3)  $R = 4k \Rightarrow e_4 = 8.15$

Тогда получим:  $\frac{e_2}{e_1} \approx 1,43 \approx \sqrt{\frac{2k}{1k}} \approx \sqrt{2} \approx 1.41$

$$\frac{e_4}{e_2} \approx 1,42 \approx \sqrt{\frac{4k}{2k}} \approx \sqrt{2} \approx 1.41$$

Значит, шум растет как  $\sqrt{R}$ .

### Пункт 2

Подключим график из корня из интеграла от спектральной плотности, поставив номер в поле З, и измерив эффективное напряжение (уровень) шума  $\sigma$  на выводах резисторов  $R[1k, 16k | \log 2]$ ,  $R[1k, 1000k | \log 10]$  в полосе  $F = 1MHz$ .

$$\sigma = \sqrt{\int_0^F n_e^2(f) df}$$

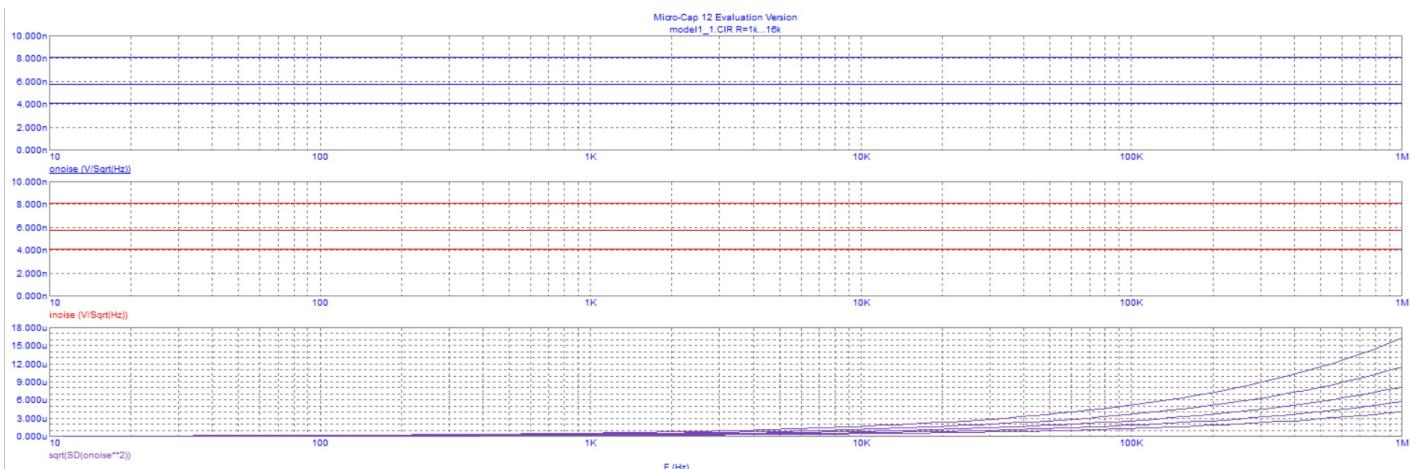


Рис. 1: Задание 1.1, пункт 2, Варьирование 1

Первое варьирование:  $R[1k, 16k | \log 2]$

- 1)  $R = 16k \Rightarrow \sigma = 16.138u$
- 2)  $R = 8k \Rightarrow \sigma = 11.638u$
- 3)  $R = 4k \Rightarrow \sigma = 8.224u$

- 4)  $R = 2k \Rightarrow \sigma = 5.741u$   
 5)  $R = 1k \Rightarrow \sigma = 4.198u$

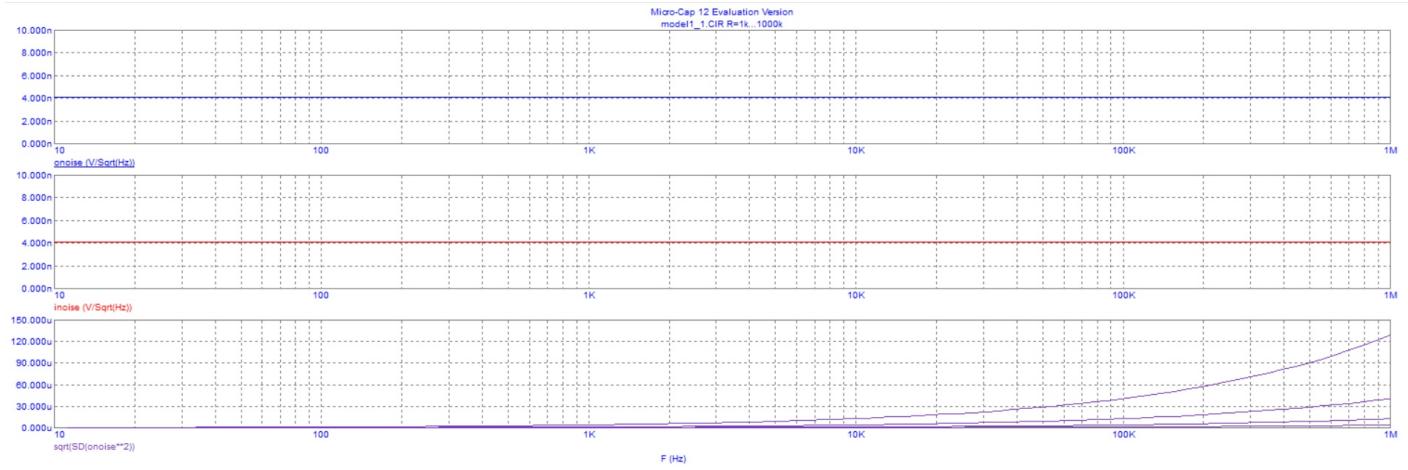


Рис. 2: Задание 1.1, пункт 2, Варьирование 2

Второе варьирование:  $R[1k, 1000k | \log 10]$

- 1)  $R = 1k \Rightarrow \sigma = 4.138u$
- 2)  $R = 10k \Rightarrow \sigma = 12.931u$
- 3)  $R = 100k \Rightarrow \sigma = 40.086u$
- 4)  $R = 1000k \Rightarrow \sigma = 128.017u$

### Пункт 3

Затем переходим к модели источника точка:  $\{Is/ni\}$

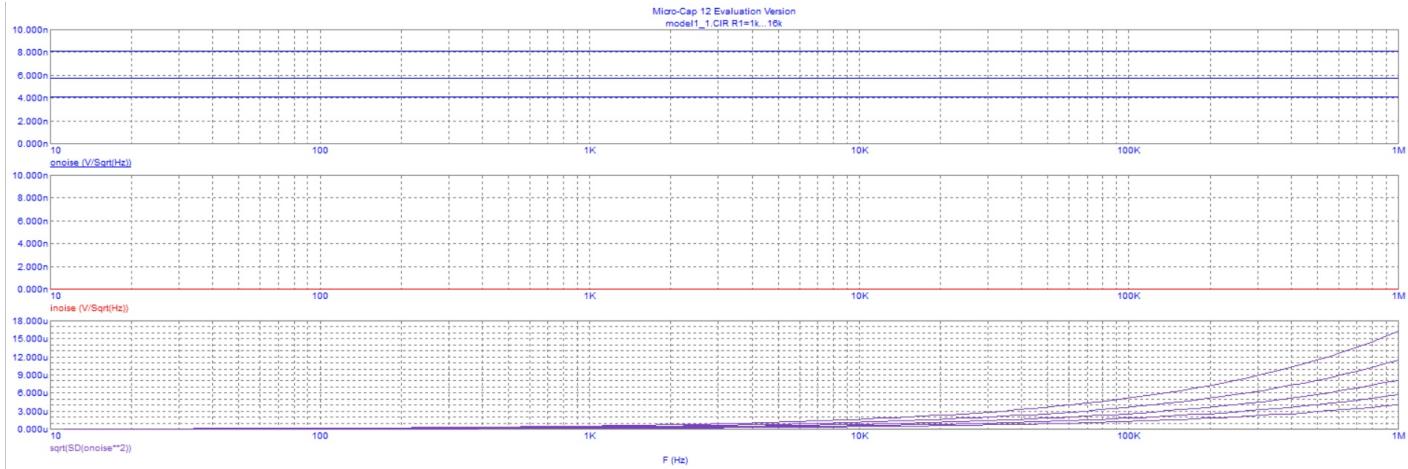


Рис. 3: Задание 1.1, пункт 3, Варьирование 1 для модели  $\{Is/ni\}$

Первое варьирование:  $R[1k, 16k | \log 2]$

- 1)  $R = 1k \Rightarrow \sigma = 4.034u$
- 2)  $R = 2k \Rightarrow \sigma = 5.741u$

- 3)  $R = 4k \Rightarrow \sigma = 8.224u$
- 4)  $R = 8k \Rightarrow \sigma = 11.328u$
- 5)  $R = 16k \Rightarrow \sigma = 16.293u$

Замечаем, что напряжение растет как  $\sqrt{R}$ :

- 1) При  $R_1 = 1k \Rightarrow V_1 = 4.0n$
- 2) При  $R_2 = 2k \Rightarrow V_2 = 6.0n$
- 3) При  $R_3 = 4k \Rightarrow V_3 = 8.0n$
- 4) При  $R_4 = 8k \Rightarrow V_4 = 11.311n$
- 5) При  $R_5 = 16k \Rightarrow V_5 = 16.0n$
- 1) При  $R_1 = 1k \Rightarrow I_1 = 4.072p$
- 2) При  $R_2 = 2k \Rightarrow I_2 = 2.835p$
- 3) При  $R_3 = 4k \Rightarrow I_3 = 1.960p$
- 4) При  $R_4 = 8k \Rightarrow I_3 = 1,392p$
- 5) При  $R_5 = 16k \Rightarrow I_4 = 1.031p$

Замечаем, что напряжение растет как  $\sqrt{R}$ . Например,  $\frac{V_5}{V_4} \approx 1,41 \approx \sqrt{\frac{16k}{8k}} \approx \sqrt{2} \approx 1.41$ . Аналогично проверяем для остальных значений.

Заметим, что ток падает как  $\frac{1}{\sqrt{R}}$ . Например,  $\frac{I_2}{I_1} \approx 0.7$ , при этом  $\frac{R_1}{R_2} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,72$ . Аналогично проверяем для остальных значений.

## 1.2 Задание

**Пункт 1** Р-транзистор модель с последовательным соединением  $R_1, R_2$ . Проверим закон сложения шумовых напряжений.

$$e(f) = \sqrt{4kT(R_1 + R_2)}$$

- 1) **Первое варьирование:**  $R_1[0k, 1k|1k]$ , причем  $R_2 = 2k$ .  
При  $R_1 = 0k, \Rightarrow e = 5.8n$ . Теоретическое значение  $e \approx 5.75n$   
При  $R_1 = 1k, \Rightarrow e = 7.00$  Теоретическое значение  $e \approx 7.05n$
- 2) **Второе варьирование:**  $R_2[0, 2k|2k]$ , причем  $R_1 = 1k$ .  
При  $R_2 = 0k, \Rightarrow e = 4.00n$  Теоретическое значение  $e \approx 4.07n$   
При  $R_2 = 2k, \Rightarrow e = 7,05n$  Теоретическое значение  $e \approx 7,00n$   
Теоретические значения хорошо совпали с экспериментальными.

**Пункт 2** Р-транзистор модель с параллельным соединением  $R_3, R_4$  {Is/ni}

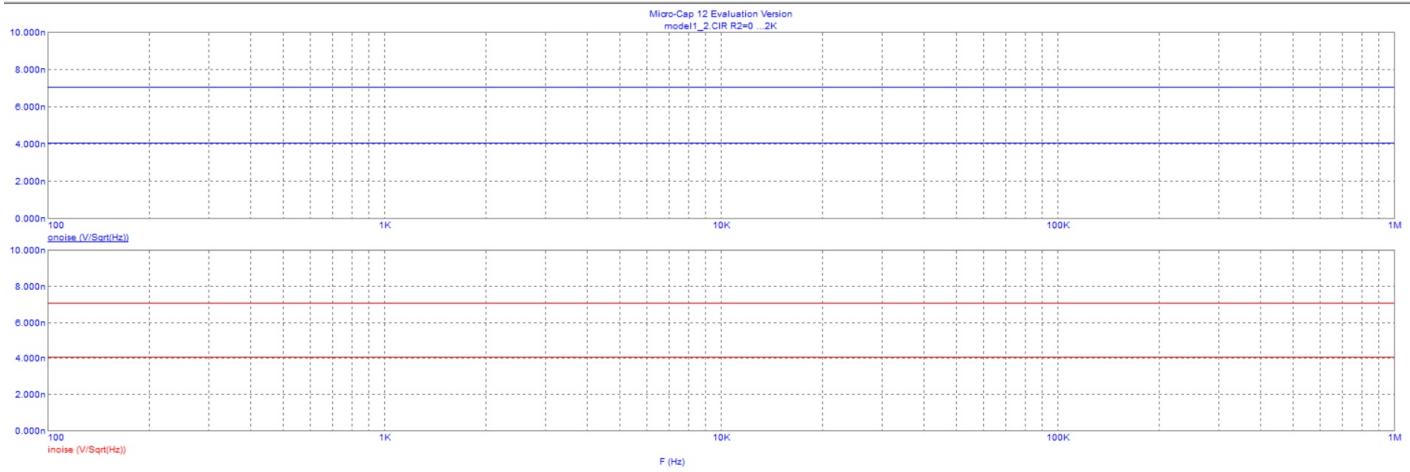


Рис. 4: Задание 1.2, пункт 1, Варьирование 1 для модели {Es/se}

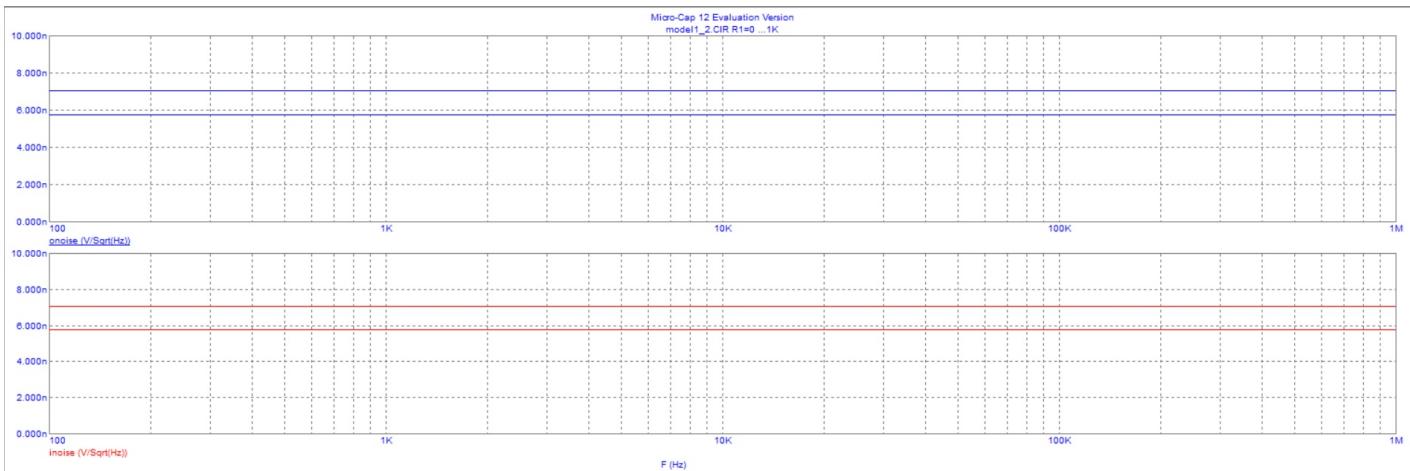


Рис. 5: Задание 1.2, пункт 1, Варьирование 2 для модели {Es/se}

Проверим закон сложения шумовых токов:

$$i(f) = \sqrt{\frac{4kT}{R_1||R_2}}$$

1) **Первое варьирование:**  $R_3[1k, 100k|99k]$ , причем  $R_4 = 2k$ .

При  $R_3 = 1k, \Rightarrow i = 4.98p$ . Теоретическое значение  $e \approx i = 5p$ .

При  $R_3 = 1k, \Rightarrow i = 2.91p$ . Теоретическое значение  $e \approx i = 2.94p$ .

2) **Второе варьирование:**  $R_4[2k, 100k|98k]$ , причем  $R_3 = 1k$ .

При  $R_4 = 2k, \Rightarrow i = 4.98p$ . Теоретическое значение  $e \approx i = 5.00p$ .

При  $R_4 = 100k, \Rightarrow i = 4.07p$ . Теоретическое значение  $e \approx i = 4.09p$ .

Теоретические значения хорошо совпали с экспериментальными.

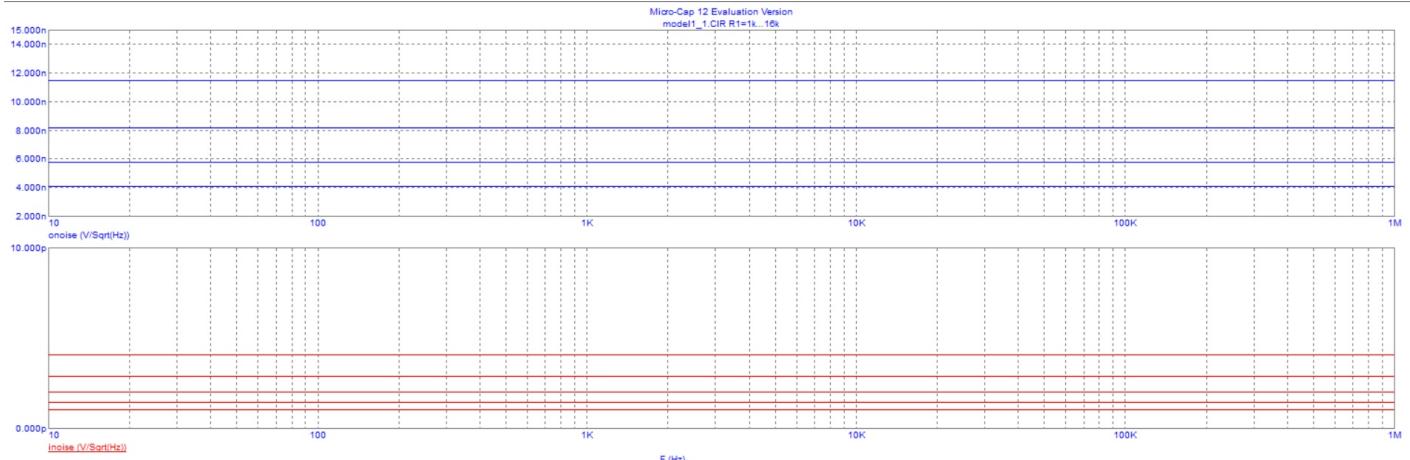


Рис. 6: Задание 1.2, пункт 2, Варьирование 1 для модели  $\{I_s/n_i\}$

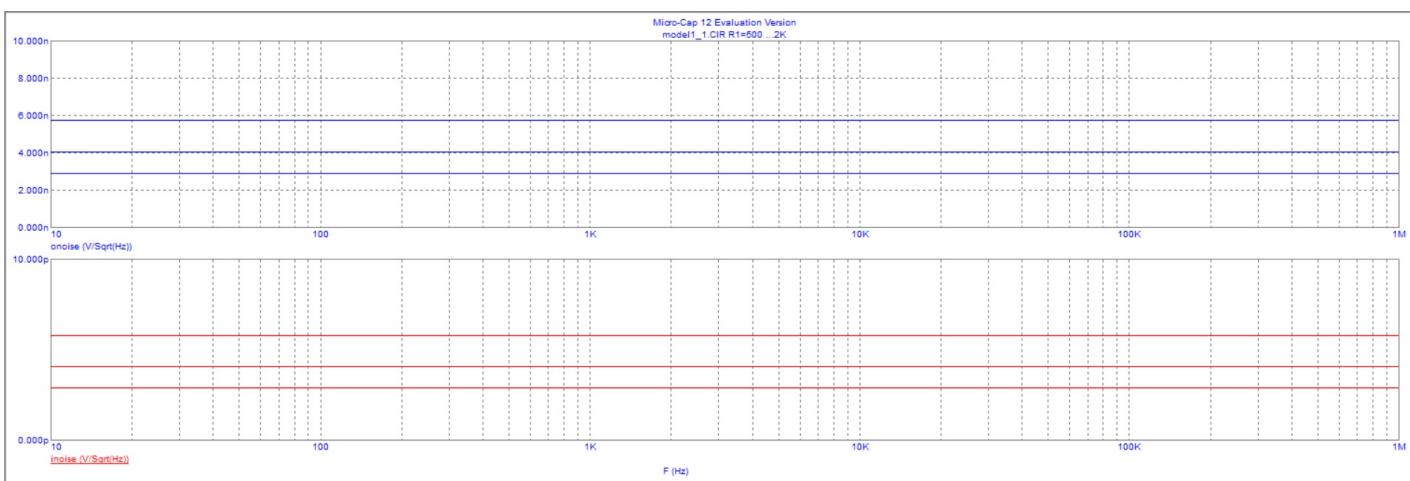


Рис. 7: Задание 1.2, пункт 2, Варьирование 2 для модели  $\{I_s/n_i\}$

## 1.3 Задание

### Пункт 1

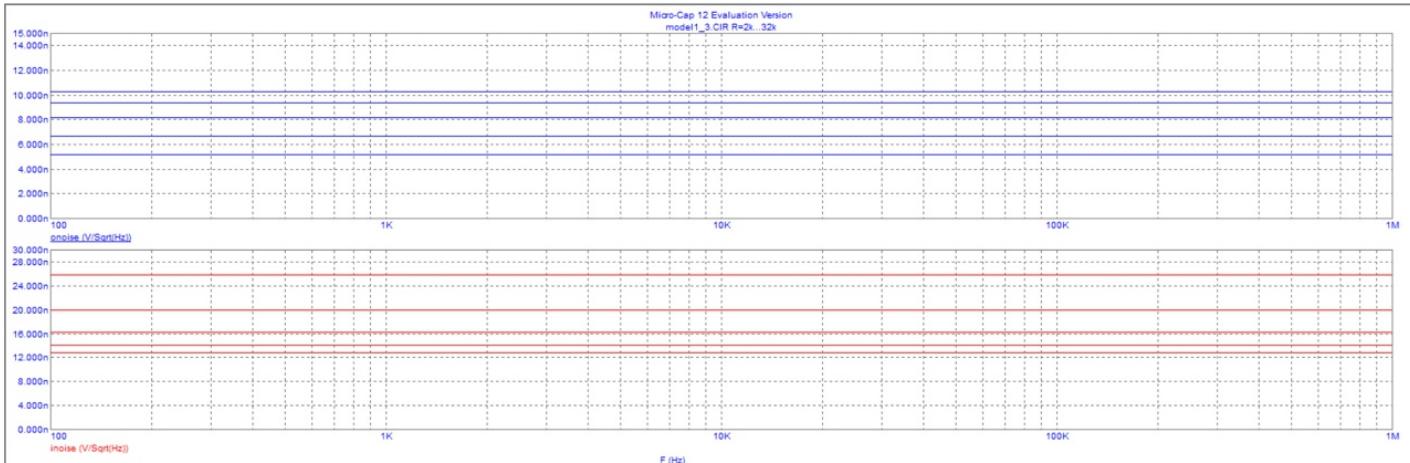


Рис. 8: Задание 1.3, пункт 1, данные для таблицы

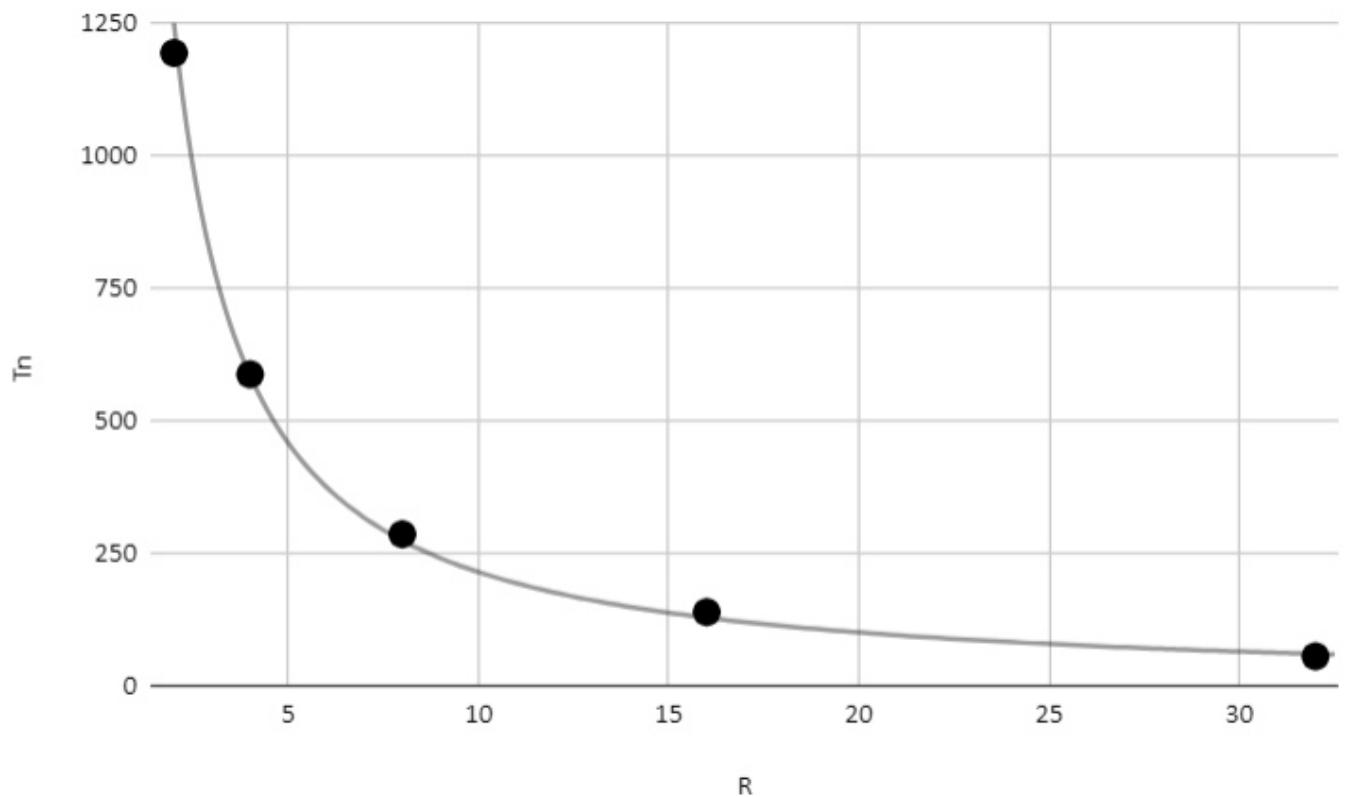


Рис. 9: Задание 1.3, пункт 1, График 1,  $T_n(R)$

Таблица 1: Таблица для построения

$R_s, kOm$	$e_n, nV$	$K_n$	$T_n, K$
8	25.680		1193.34
8	19.794		587.23
8	16.082		285.66
8	13.918		138.65
8	12.526		55.30

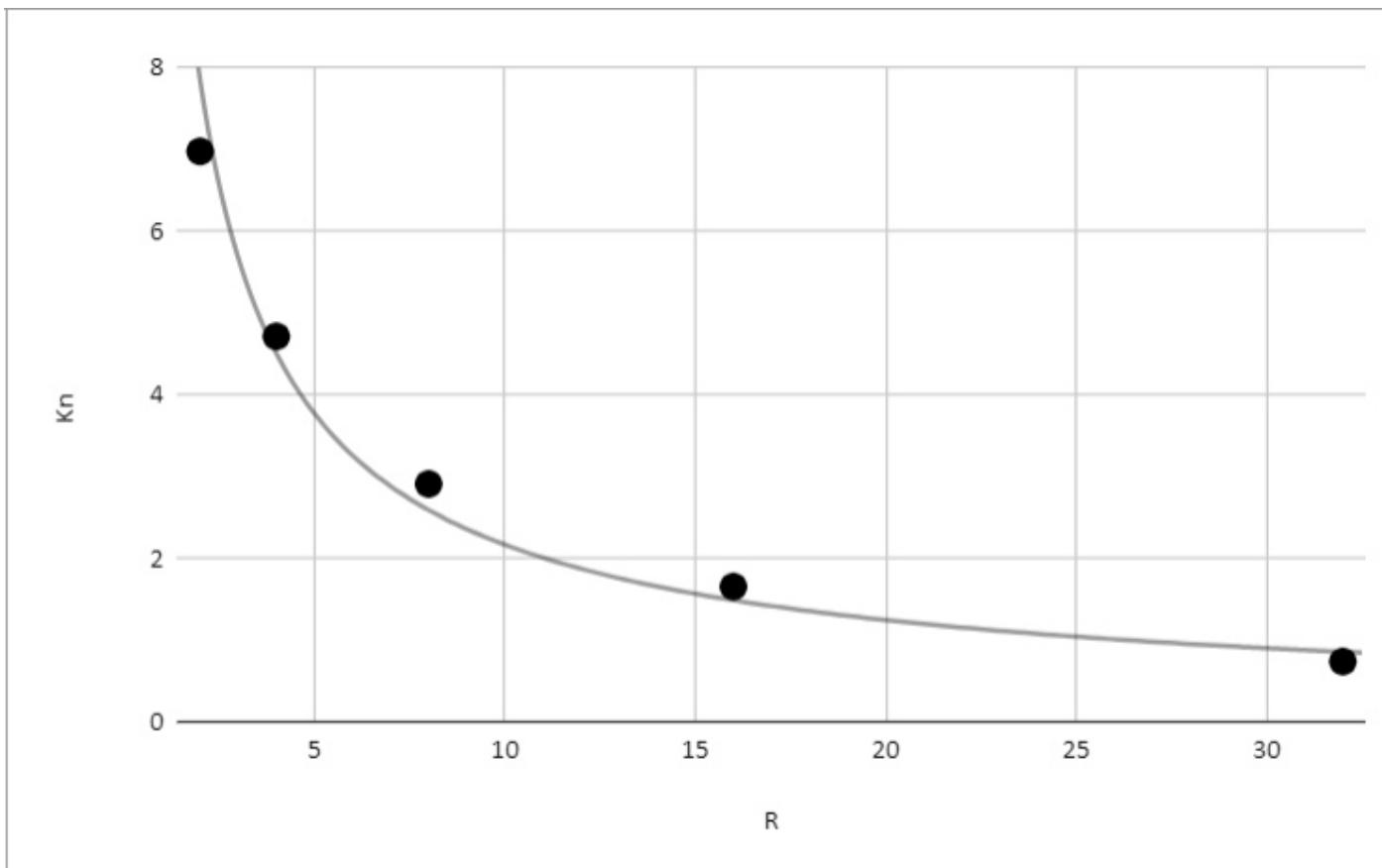


Рис. 10: Задание 1.3, пункт 1, График 2,  $K_n(R)$

## 2 Дробовой шум

### Пункт 1

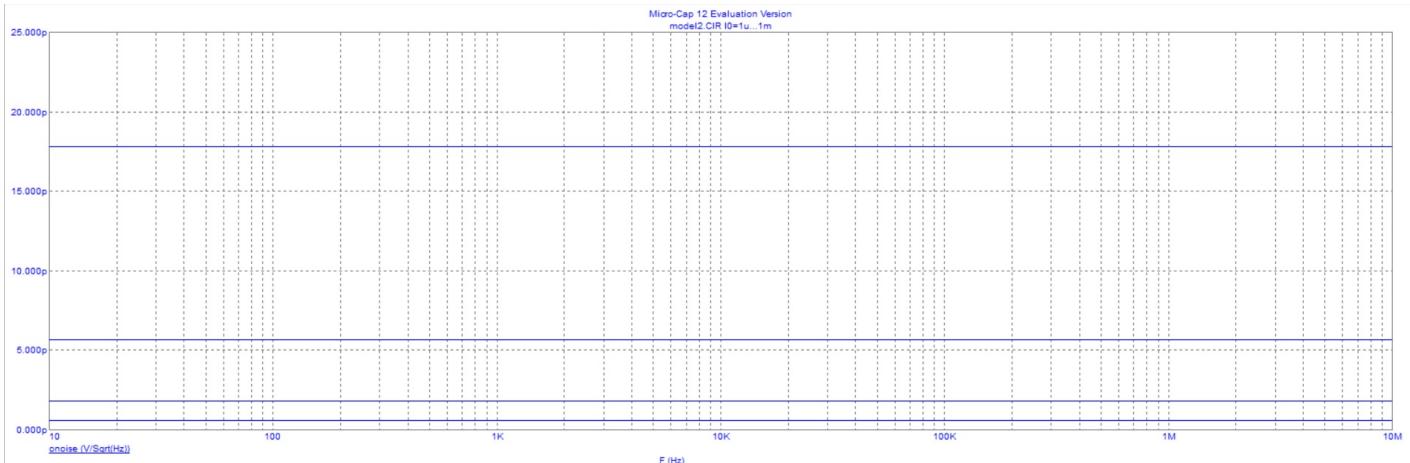


Рис. 11: Задание 2.1, пункт 1

- 1)  $I_{01} = 1m \Rightarrow e_1 = 17.8p$
- 2)  $I_{02} = 100u \Rightarrow e_2 = 5.7p$
- 3)  $I_{03} = 10u \Rightarrow e_3 = 1.8p$

$$4) I_{04} = 1u \Rightarrow e_4 = 0.5p$$

Проверим, что  $\frac{e_1}{e_2} = \frac{\sqrt{I_{02}}}{\sqrt{I_{01}}}$

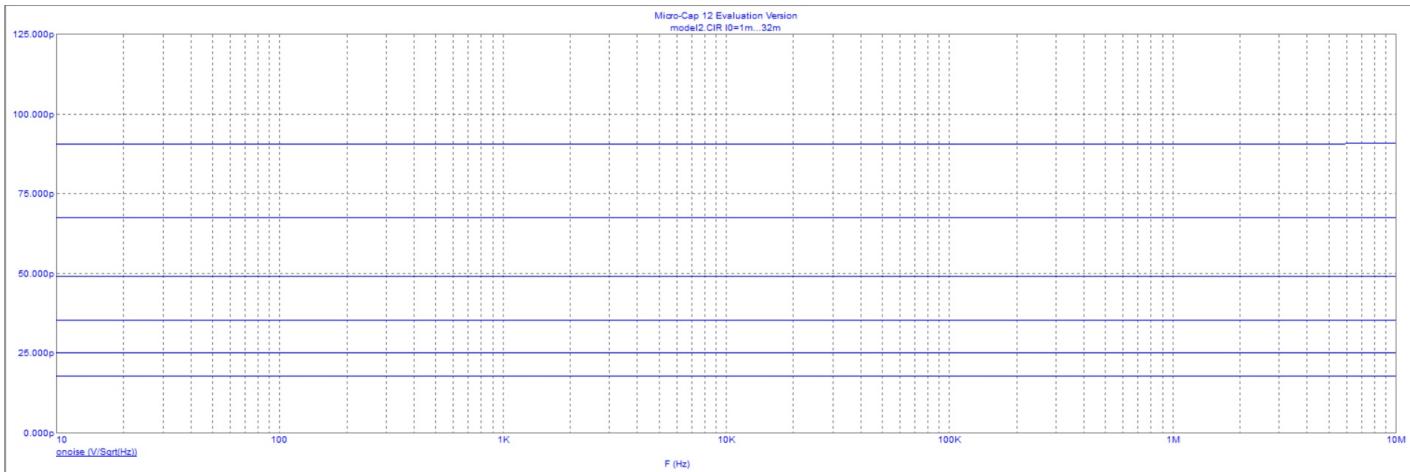


Рис. 12: Задание 2.1, пункт 2

- 1)  $I_{01} = 32m \Rightarrow e_1 = 98.5p$
- 2)  $I_{02} = 16m \Rightarrow e_2 = 67.5p$
- 3)  $I_{03} = 8m \Rightarrow e_3 = 48.8p$
- 4)  $I_{04} = 4m \Rightarrow e_4 = 35.0p$
- 5)  $I_{05} = 2m \Rightarrow e_5 = 24.8p$
- 6)  $I_{06} = 1m \Rightarrow e_6 = 17.5p$

Проверим, что  $\frac{e_1}{e_2} = \frac{\sqrt{I_{02}}}{\sqrt{I_{01}}}$

**Пункт 2** Учтем, что  $r_D \approx K \cdot R_1$ , причем  $R_1 = 10K$

- 1)  $I_{01} = 1u, K = 838.2m \Rightarrow r_{D_{01}} = 8.38K$
- 2)  $I_{02} = 10u, K = 338.8m \Rightarrow r_{D_{02}} = 3.38K$
- 3)  $I_{03} = 100u, K = 46.7m \Rightarrow r_{D_{03}} = 460$
- 4)  $I_{04} = 1m, K = 2.9m \Rightarrow r_{D_{04}} = 29$

### Пункт 3

- 1)  $I_1 = 1u, \Rightarrow e = 14.6n$
- 2)  $I_1 = 10u, \Rightarrow e = 4.6n$
- 3)  $I_1 = 100u, \Rightarrow e = 1.4n$
- 4)  $I_1 = 1m, \Rightarrow e = 420.6p$
- 5)  $I_1 = 10m, \Rightarrow e = 93.5p$

Проверяем формулу  $e(f) = i(f) \cdot r_d$ , при варьировании  $I_1[1u, 10m | Log10]$ .

Причем  $i(f) = \sqrt{2qI_0}$ .

- 1)  $i_1(f) = 5.65 \cdot 10^{-13} \Rightarrow e = R_{D_{01}} \cdot i_1(f) = 4.7n$
- 1)  $i_1(f) = 1.78 \cdot 10^{-12} \Rightarrow e = R_{D_{02}} \cdot i_1(f) = 6n$

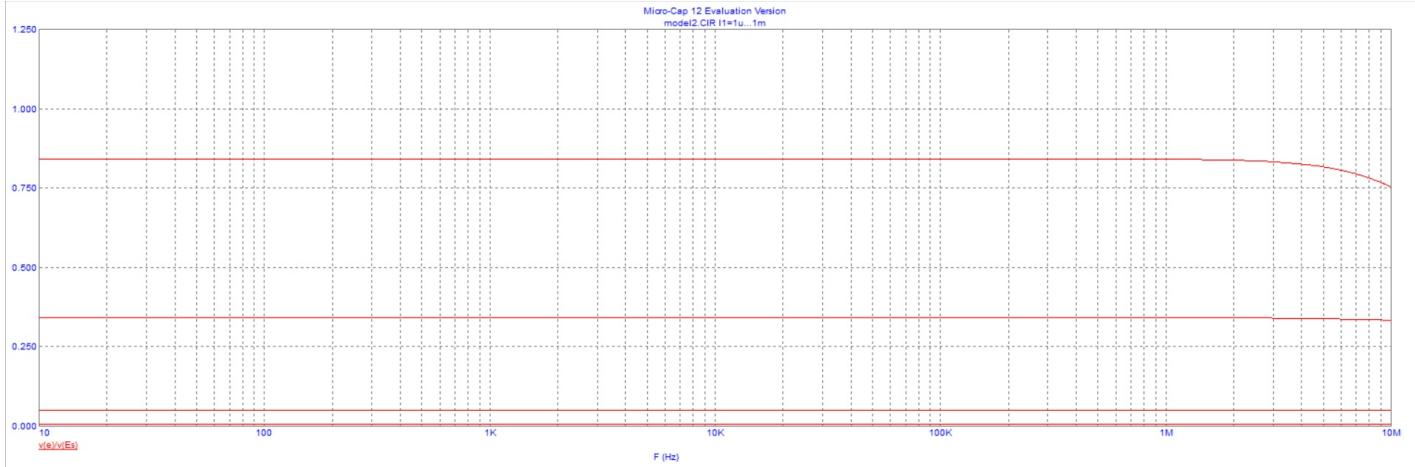


Рис. 13: Задание 2.1, пункт 2

### 3 Фильтрация шумов

#### 3.1 задание

##### Пункт 1

Открываем файл model3. Устанавливаем интегрирующую цепь. По графику рис.14 определяем граничную частоту  $f_h$ . Получаем  $f_h = 10148\text{Hz}$ .

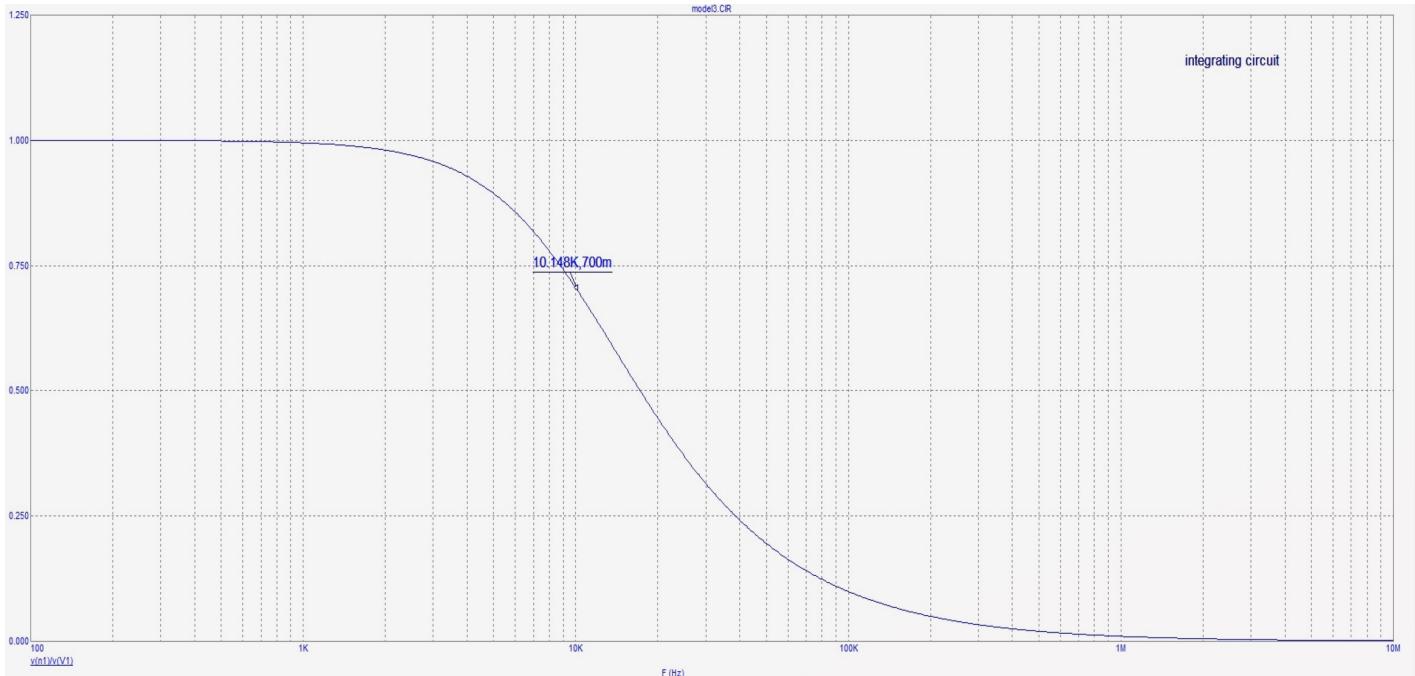


Рис. 14: Задание 3.1, пункт 1

##### Пункт 2

Переключимся на шумовые графики. Измерим шумовое напряжение  $n_1$  в полосе пропускания, уровень шума на выходе  $\sigma$ .

Проверим, что  $\sigma = n_1 \cdot \sqrt{F_n} = \sqrt{\frac{kT}{C}}$ , причем  $F_n = \frac{\pi}{2} \cdot f_n$ .

Измерения, вычисления так же приведены на скриншоте.

$$n_1 = 12.874n$$

$$\sigma_{pract} = 1.604, \sigma_{theor} = 1.627.$$

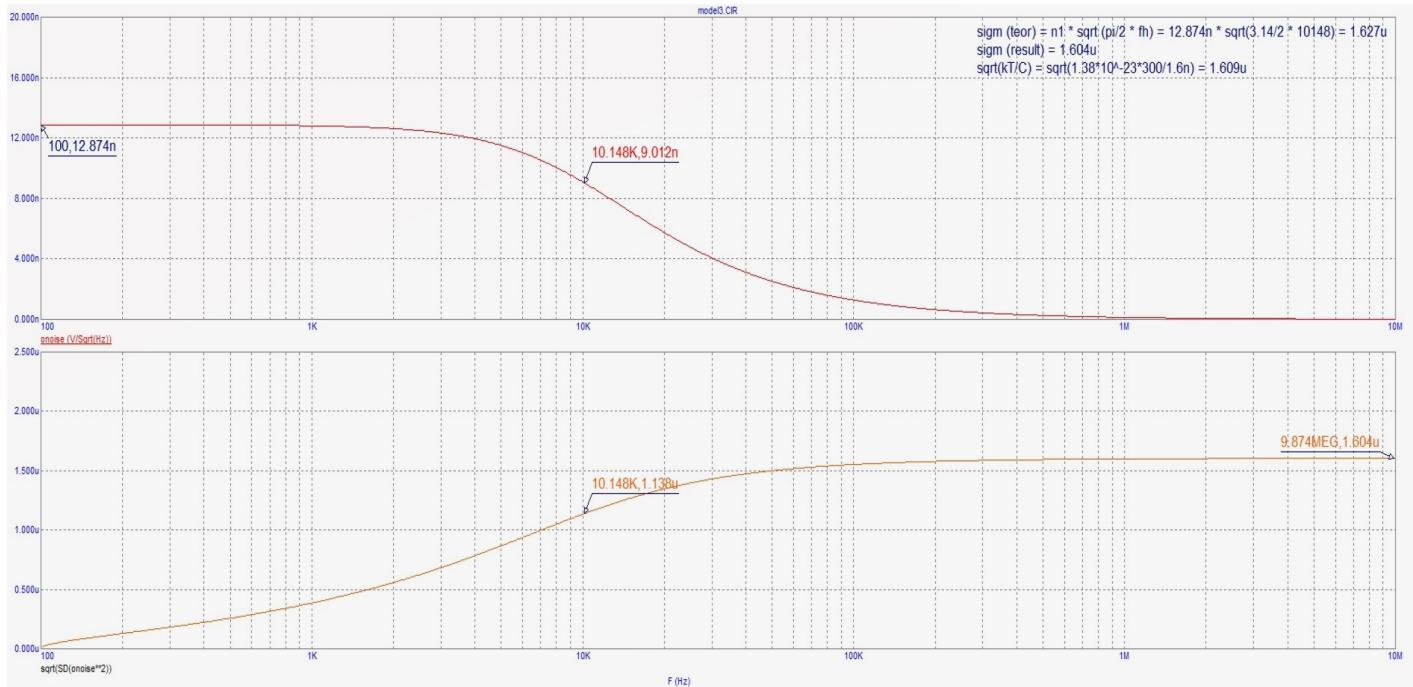


Рис. 15: Задание 3.1, пункт 2

### Пункт 3

Варьирование  $R_1[2k, 16k|4k]$ . Снимаем зависимость шумового напряжения от  $R_1$ .

### Пункт 4

Варьирование  $C_1[0.8n, 2.4n|0.4k]$ . Снимаем зависимость уровня шума от емкости.

## 3.2 задание

Теперь рассмотрим полосовой LC-фильтр.

### Пункт 1

По графику оцениваем резонансную частоту и полосу пропускания по уровню 0,7. Оцениваем добротность. Получаем:

$$f_0 = 100694 \text{ Hz}, \Delta f = 20626 \text{ Hz}, Q = \frac{f_0}{\Delta f} \approx 4.8.$$

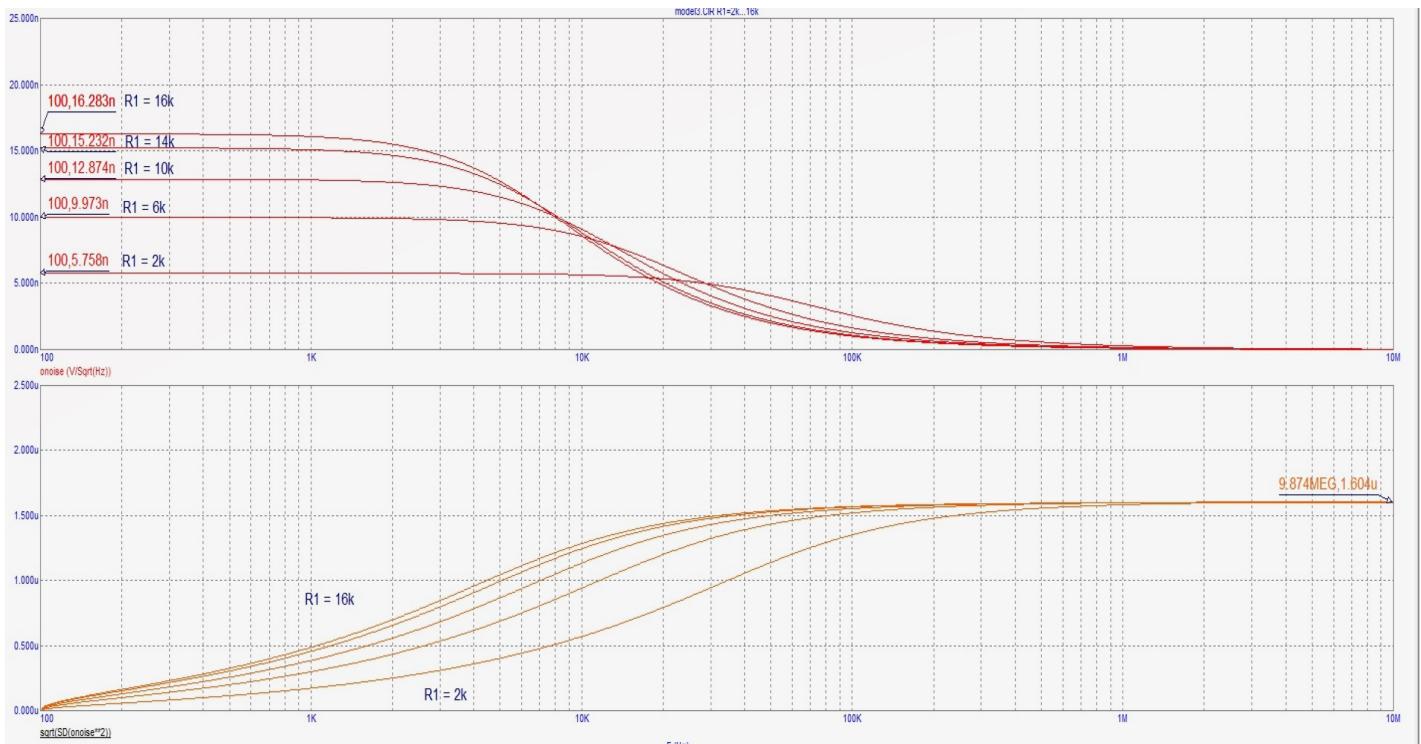


Рис. 16: Задание 3.1, пункт 3

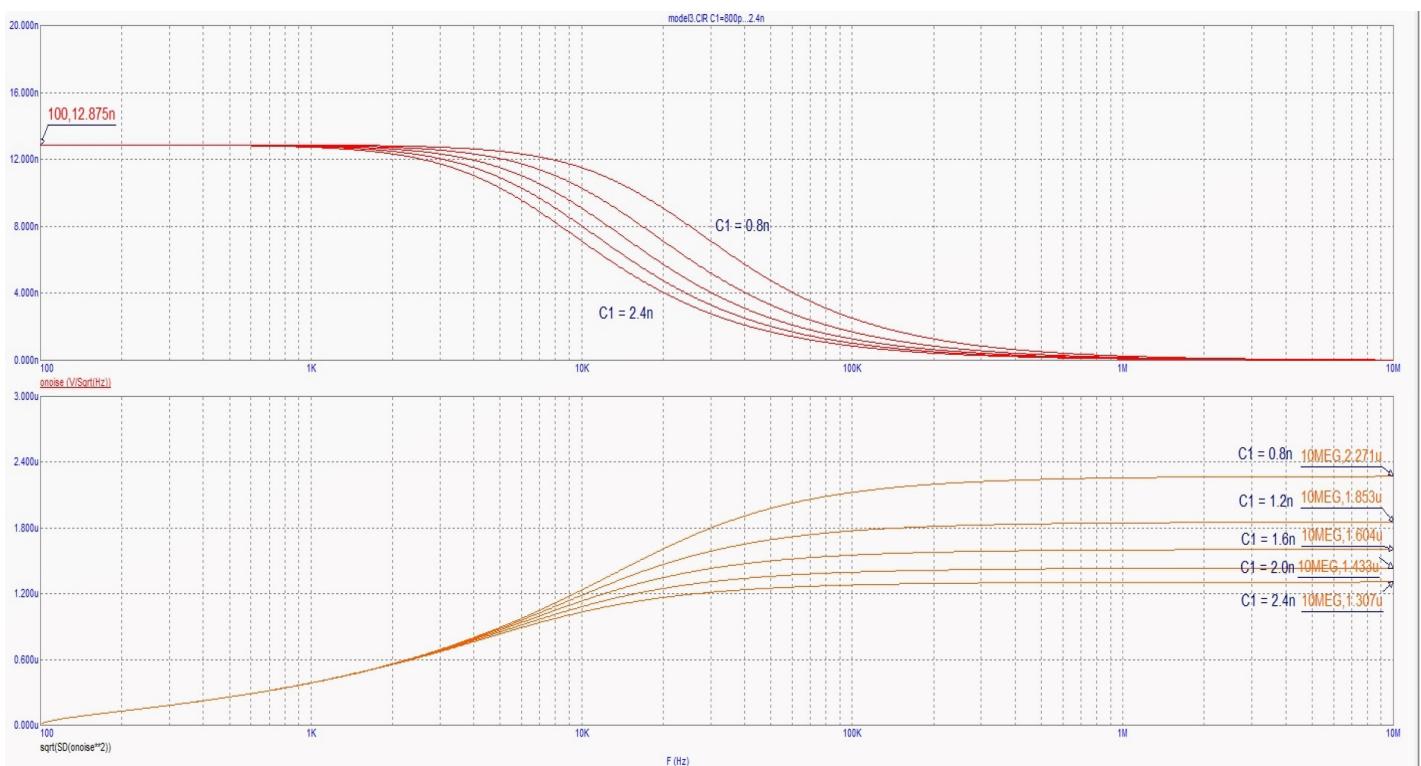


Рис. 17: Задание 3.1, пункт 4

## Пункт 2

Переключимся на шумовые графики. Измеряем шумовое напряжение  $n_2$

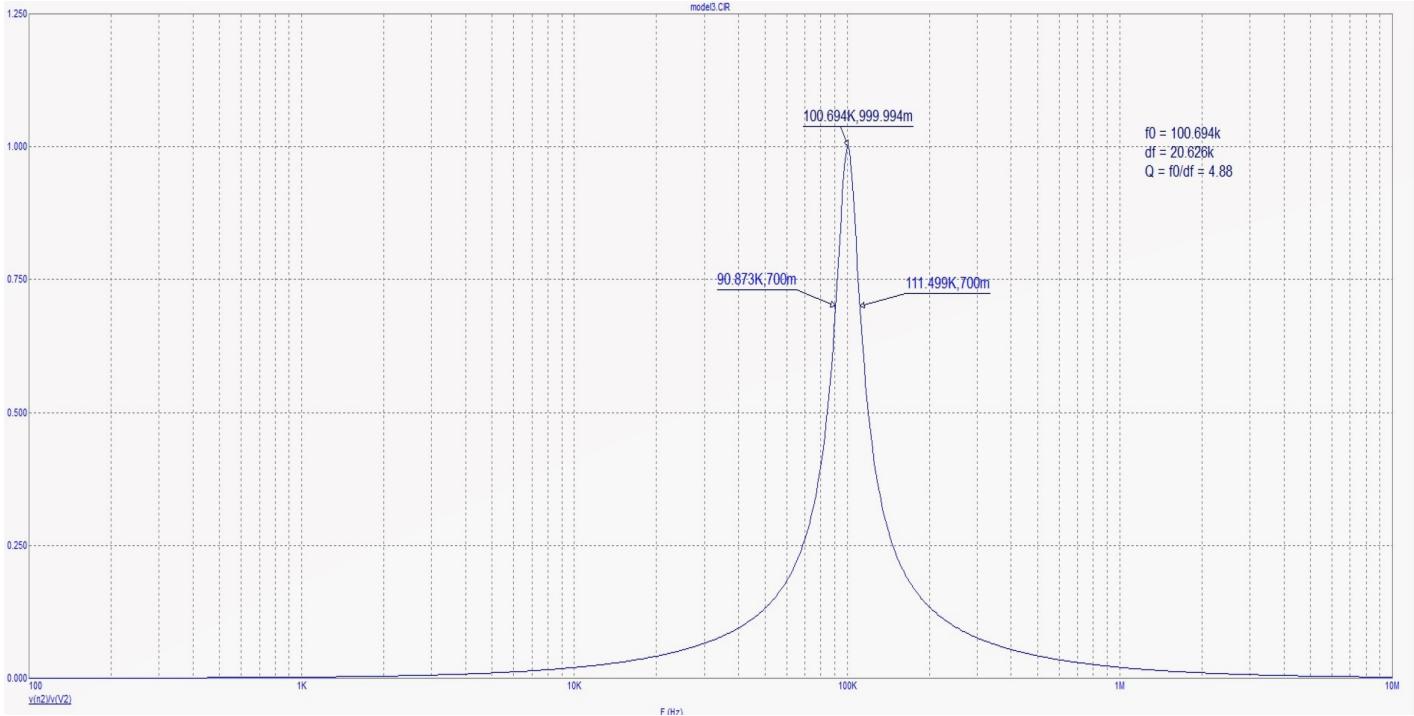


Рис. 18: Задание 3.2, пункт 1

в точке  $f_0$ , уровень шума на выходе. Проверяем аналогичные условия как в 3.1 пункт 1.

Измерения:

$$n_2 = 10.219n$$

$$\sigma = 1.82u.$$

Проверка формулы дала такое же значение шума.

### Пункт 3

Варьирование  $R_2[2.3k, 10.3k|4k]$ . Снимаем зависимость шумового напряжения от  $R_2$ . Соответственные кривые подписаны на графике.

### Пункт 4

Варьирование  $C_2[0.75n, 1.75n|0.5n]$ .

Замечаем, что при изменении емкости меняется частота резонанса, но шумовое напряжение  $n_2$  на этой частоте остается прежним. Снимаем зависимость уровня шума на выходе  $\sigma$  от емкости. Значение емкости указано для каждой кривой на скриншоте.

### Пункт 5

Варьирование  $L_2[1m, 3m|1m]$ . Убеждаемся, что при изменении индуктивности сохраняются шумовое напряжение на частоте резонанса, уровень шума  $\sigma$  на выходе. Для каждой кривой подписано соответственное значение индук-

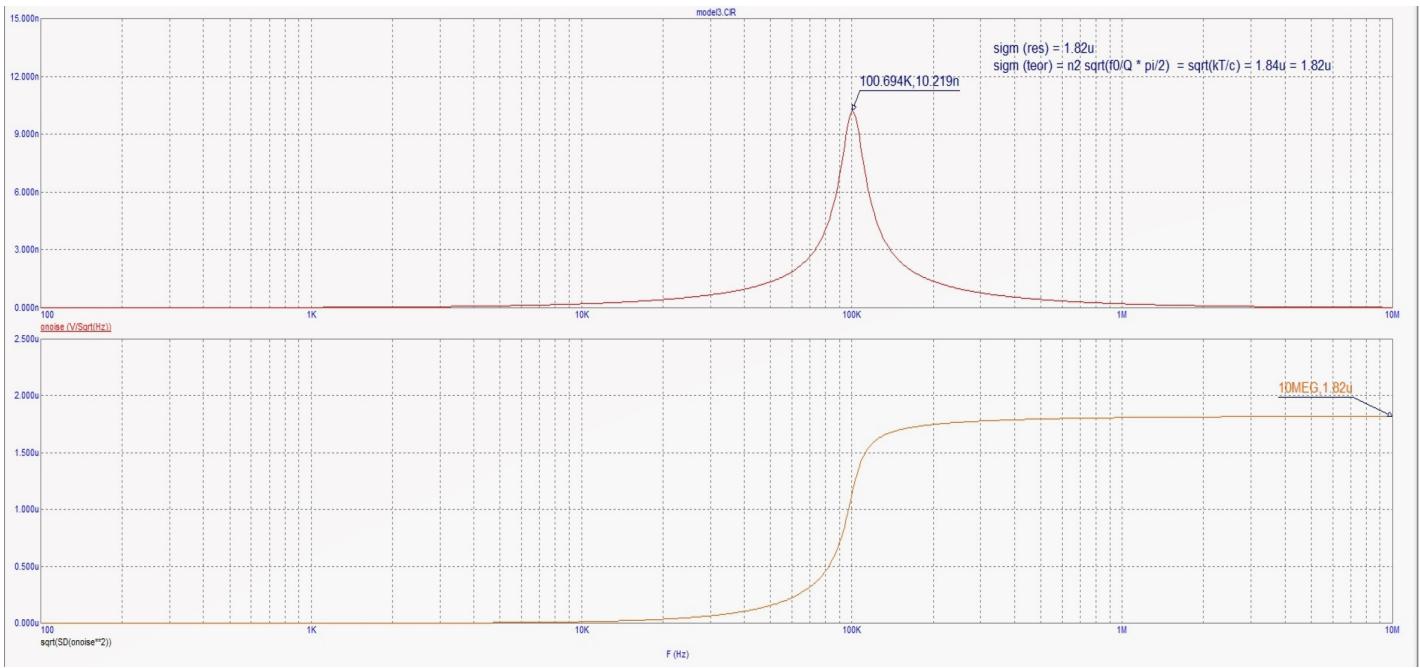


Рис. 19: Задание 3.2, пункт 2

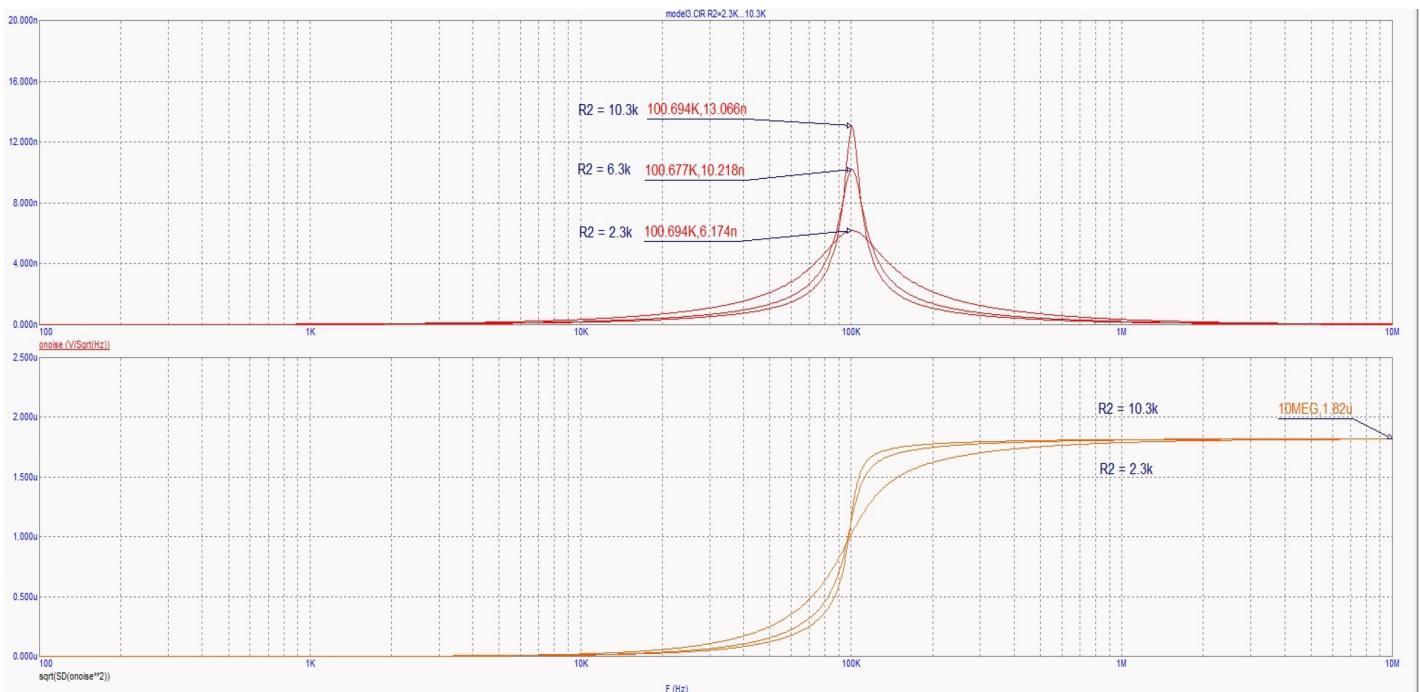


Рис. 20: Задание 3.2, пункт 3

тивности.

### 3.3 задание

Рассматриваем LC - фильтр нижних частот.  
 $p = \frac{if}{f_o}$ ,  $f_0 = 100k$ ,  $\rho = 1260$ ,  $Q = \frac{1}{2\sigma} = 5$

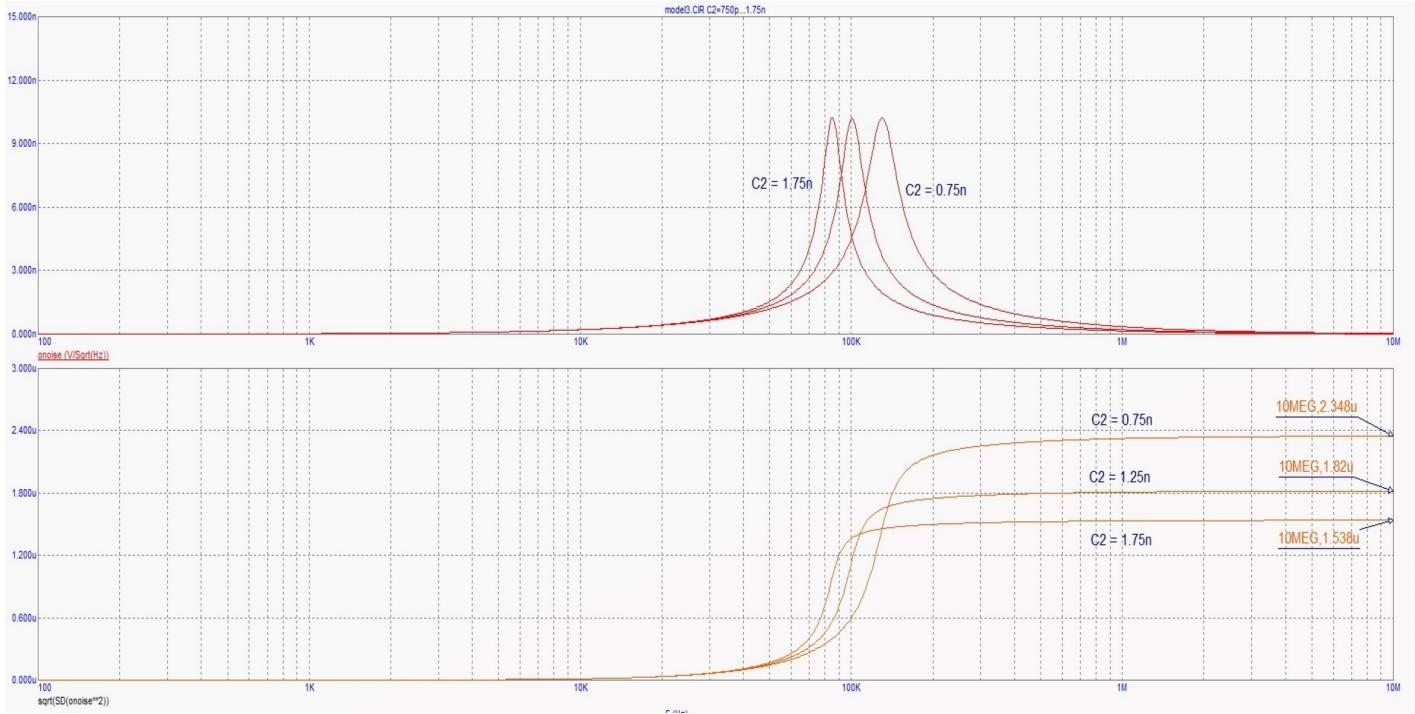


Рис. 21: Задание 3.2, пункт 4

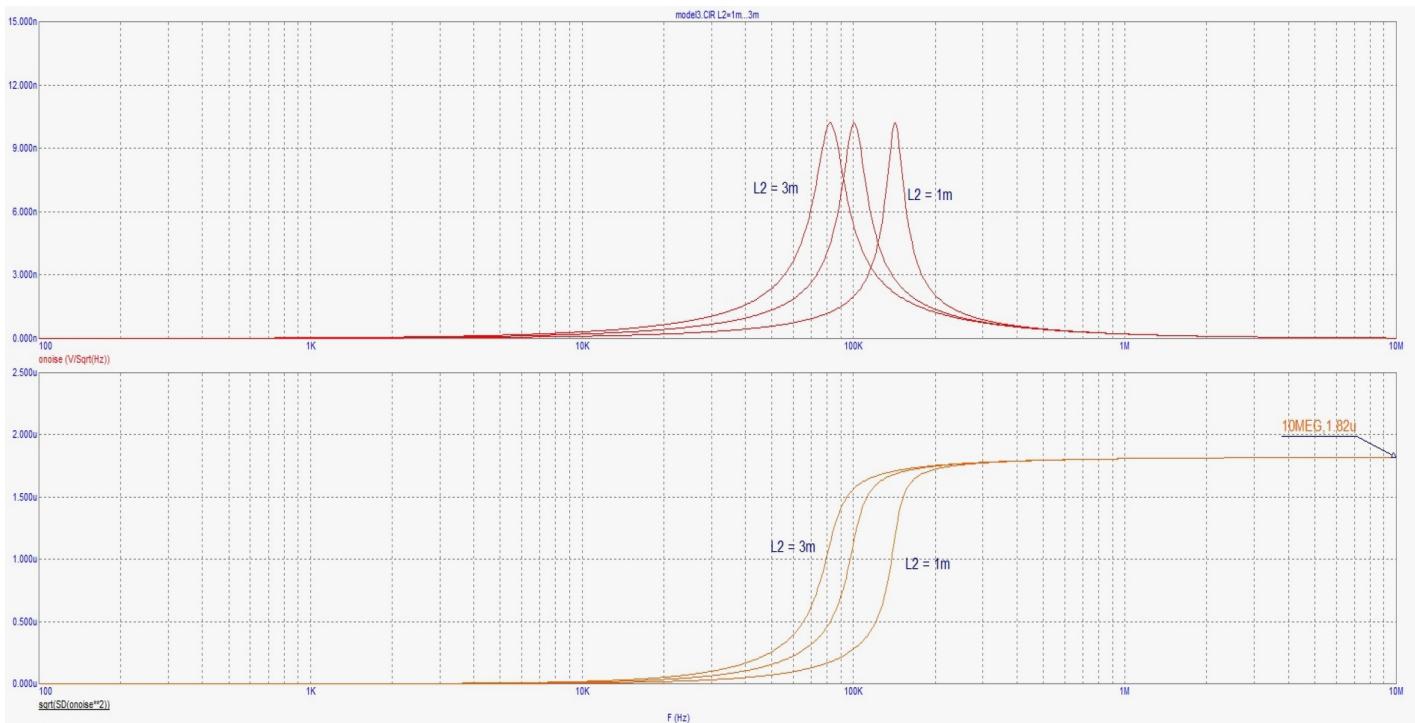


Рис. 22: Задание 3.2, пункт 5

## Пункт 1

Измеряем шумовое напряжение  $n_3$  в максимуме  $f_0$ , на частоте  $f_0/10$ , а

так же уровень шума на выходе  $\sigma$ . Проверим формулу  $F_n = \frac{\pi \cdot f_0}{2 \cdot Q}$ .

Показания:

- 1)  $f_0 = 99.54K \Rightarrow n_3 = 10.35n$
- 2)  $f_0/10 = 9.95 \Rightarrow n_3 = 2.055n$

Напряжение шума на выходе:

$$\sigma = 1.82u.$$

Оценка шумовой полосы  $F_n$  и проверка формулы:

- 3)  $F_{n_{theor}} = 31.3k$
- 4)  $F_{n_{pract}} = (\frac{\sigma}{n_3})^2 = 30.9k$

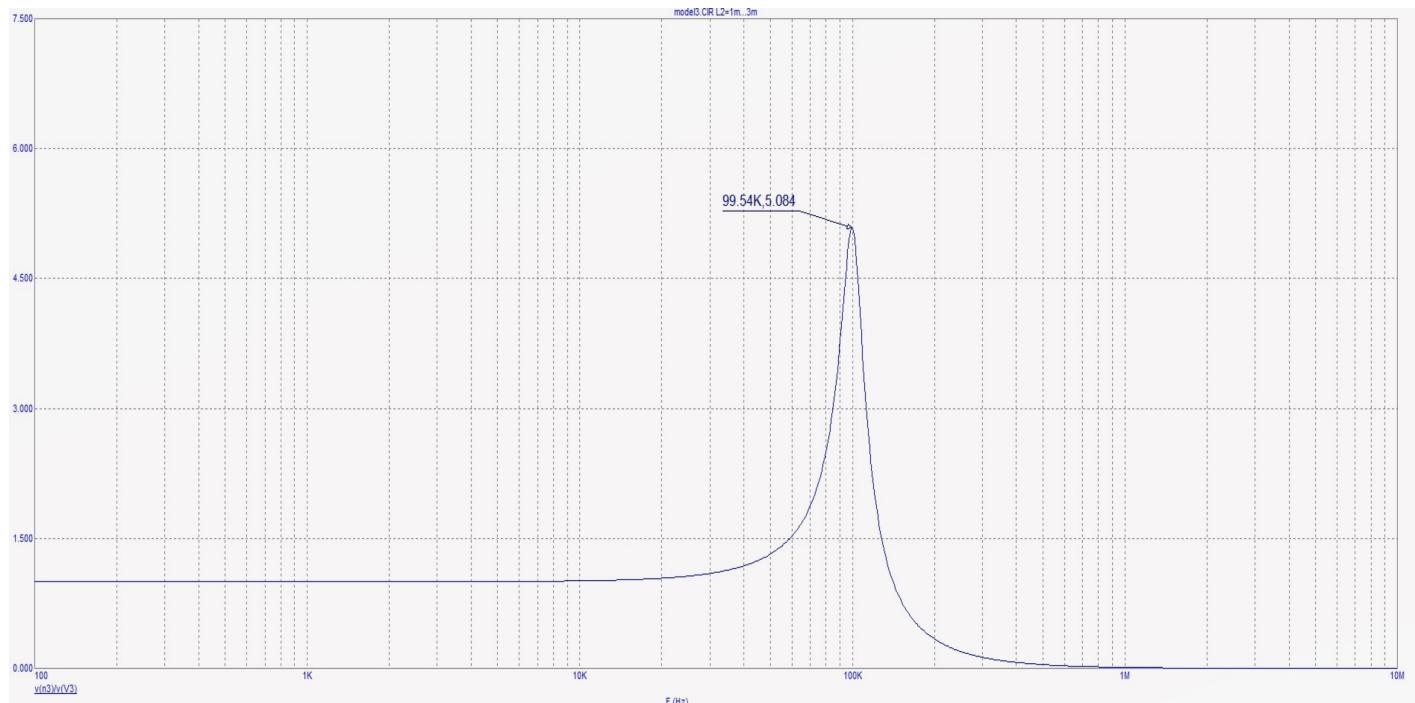


Рис. 23: Задание 3.3, пункт 1

## Пункт 2

Варьирование  $R_3[100, 400|150]$ .

Варьирование  $C_3[0.75n, 1.75n|0.5n]$ .

Варьирование  $L_3[1m, 3m|1m]$ .

Фиксируем зависимости  $n_3(f_0)$ ,  $n_3(f_0/10)$ ,  $\sigma$  от изменяемых параметров.

## 3.4 задание

Рассмотрим LC - фильтр верхних частот с параметрами секции 3.3.

### Пункт 1

Измерим шумовое напряжение  $n_4$  в максимуме при  $f_0$  и на частоте  $10f_0$ , уровень шума  $\sigma$  на выходе в полосе  $1MHz$ .

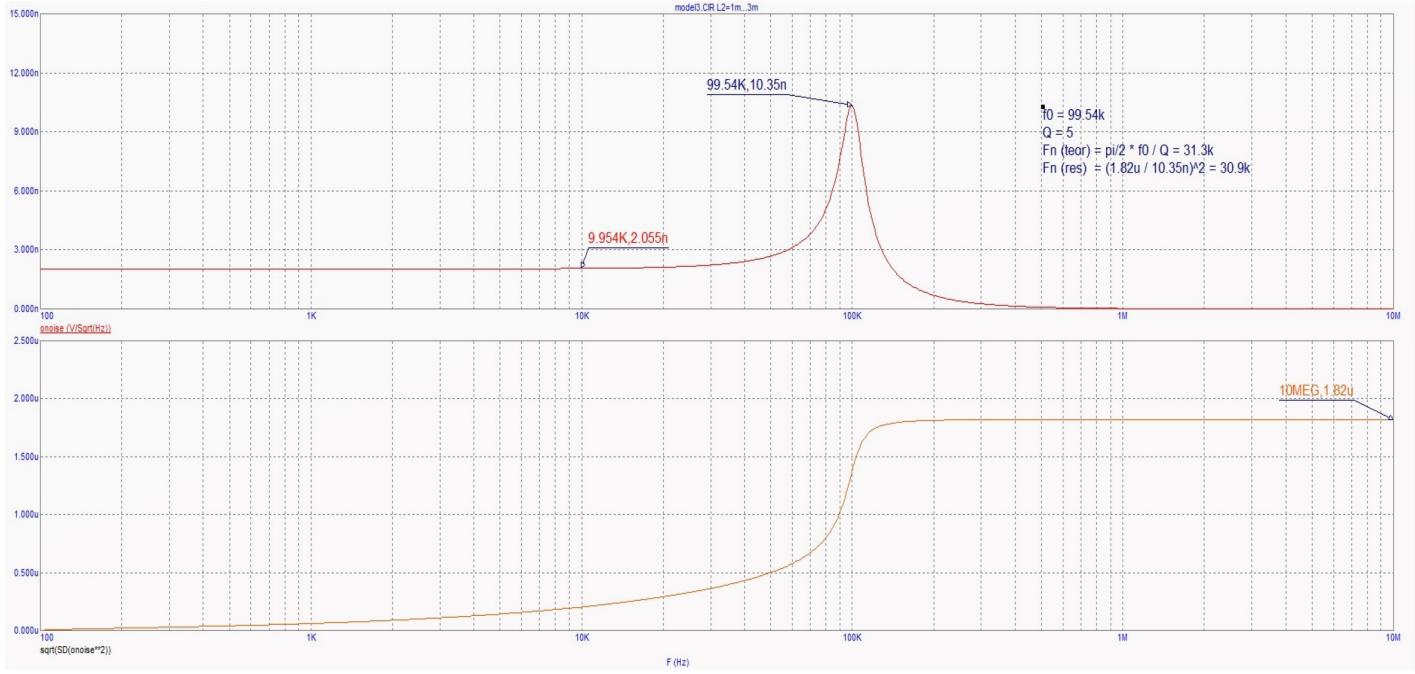


Рис. 24: Задание 3.3, пункт 1

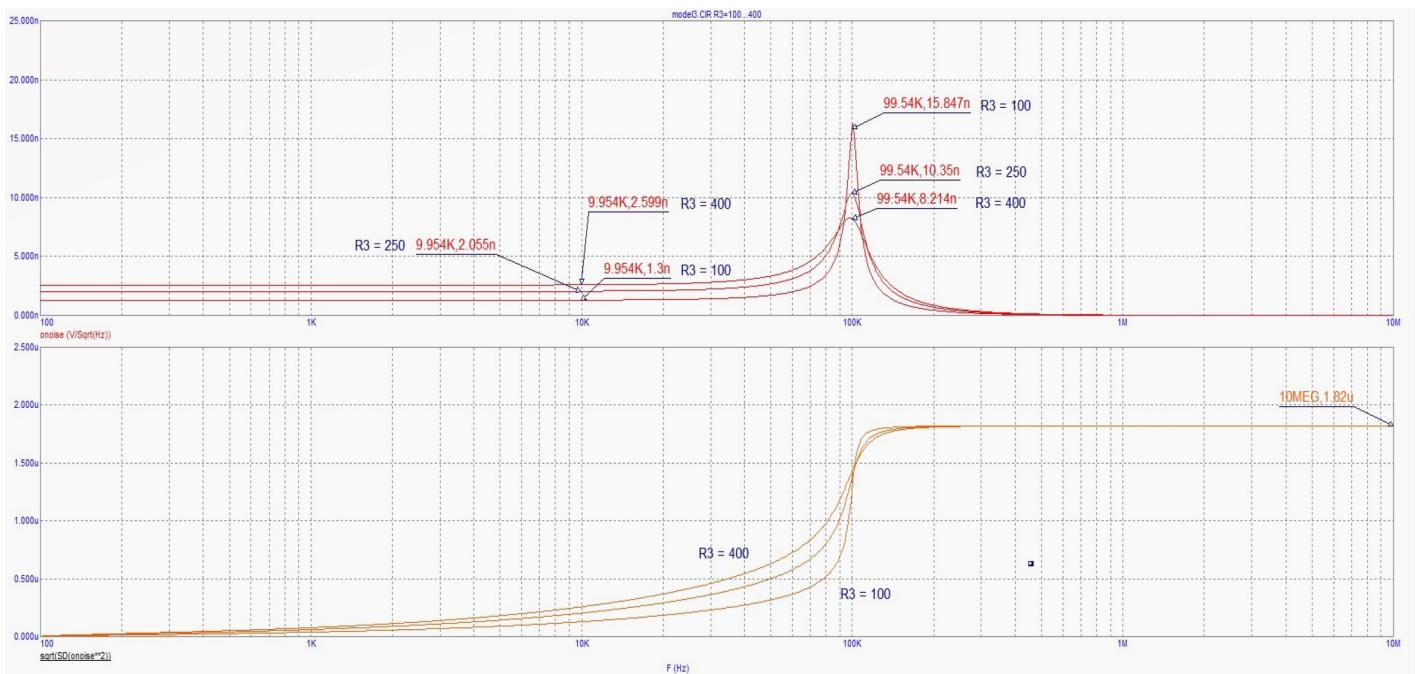


Рис. 25: Задание 3.3, пункт 2, варьирование R

- 1)  $f_0 = 99.54K \Rightarrow n_4 = 10.35n$
- 2)  $10f_0 = 990.54k \Rightarrow n_4 = 2.056n$
- 3)  $\sigma = 2.692u$

## Пункт 2

Варьирование  $R_4[100, 400|150]$ .

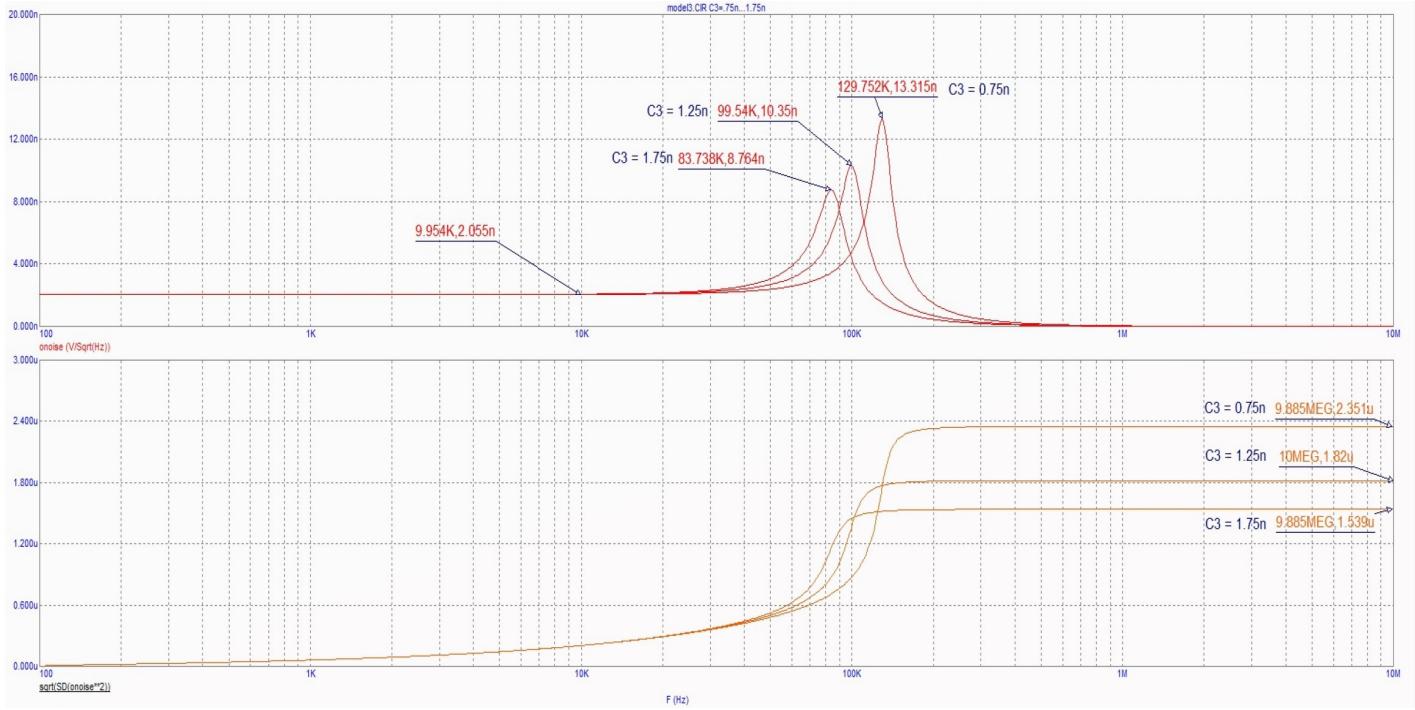


Рис. 26: Задание 3.3, пункт 2, варьирование С

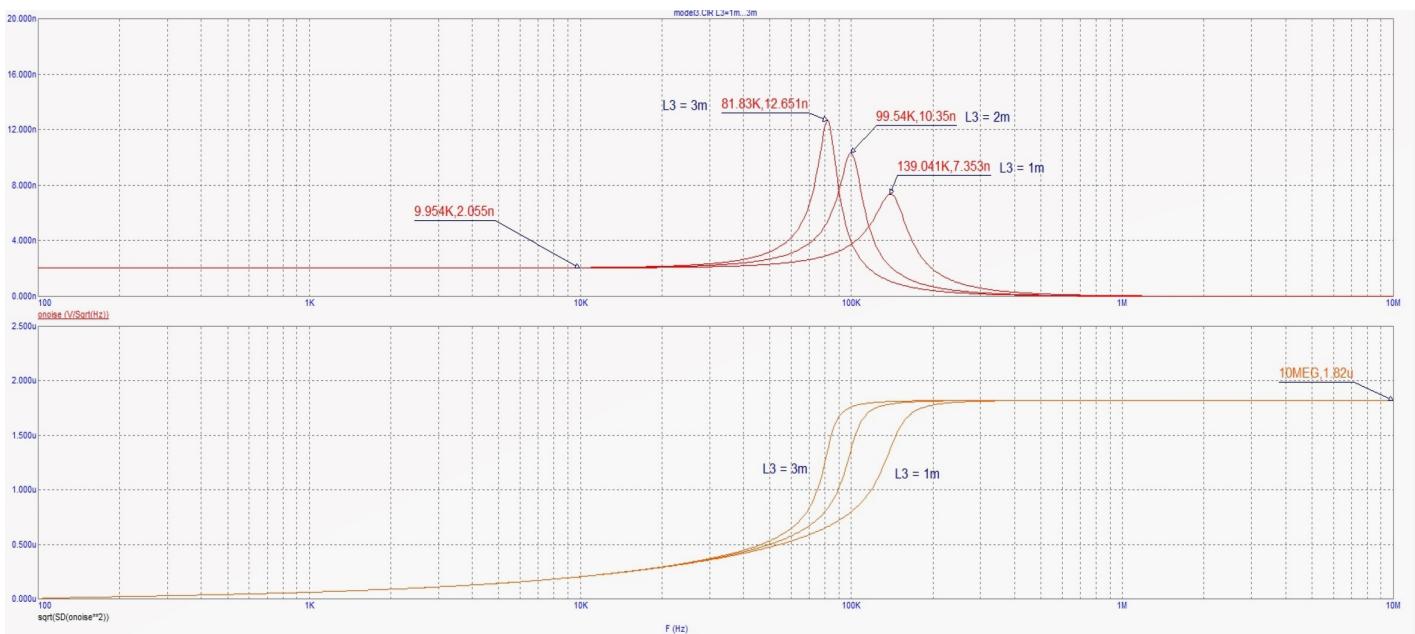


Рис. 27: Задание 3.3, пункт 2, варьирование L

Варьирование  $C_4[0.75n, 1.75n|0.5n]$ .

Варьирование  $L_4[1m, 3m|1m]$ .

Фиксируем зависимости  $n_4(f_0)$ ,  $n_4(10f_0)$ ,  $\sigma$  от изменяемых параметров.

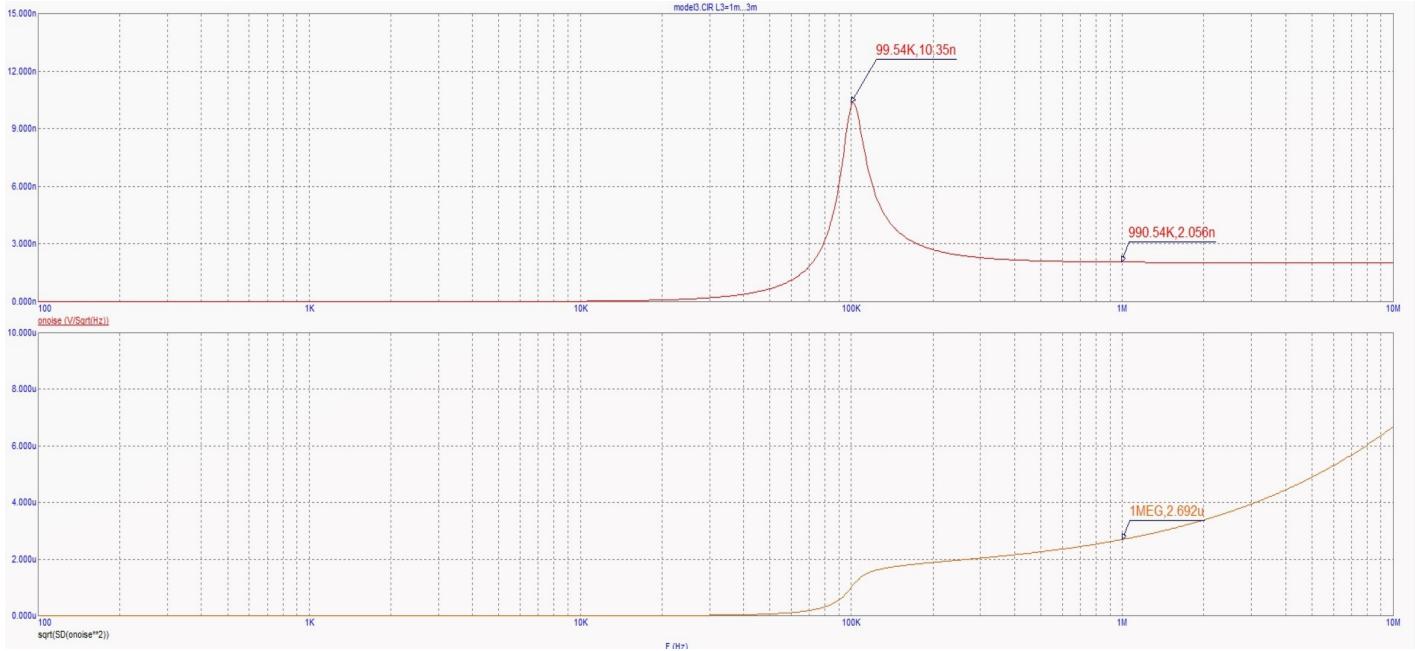


Рис. 28: Задание 3.4, пункт 1

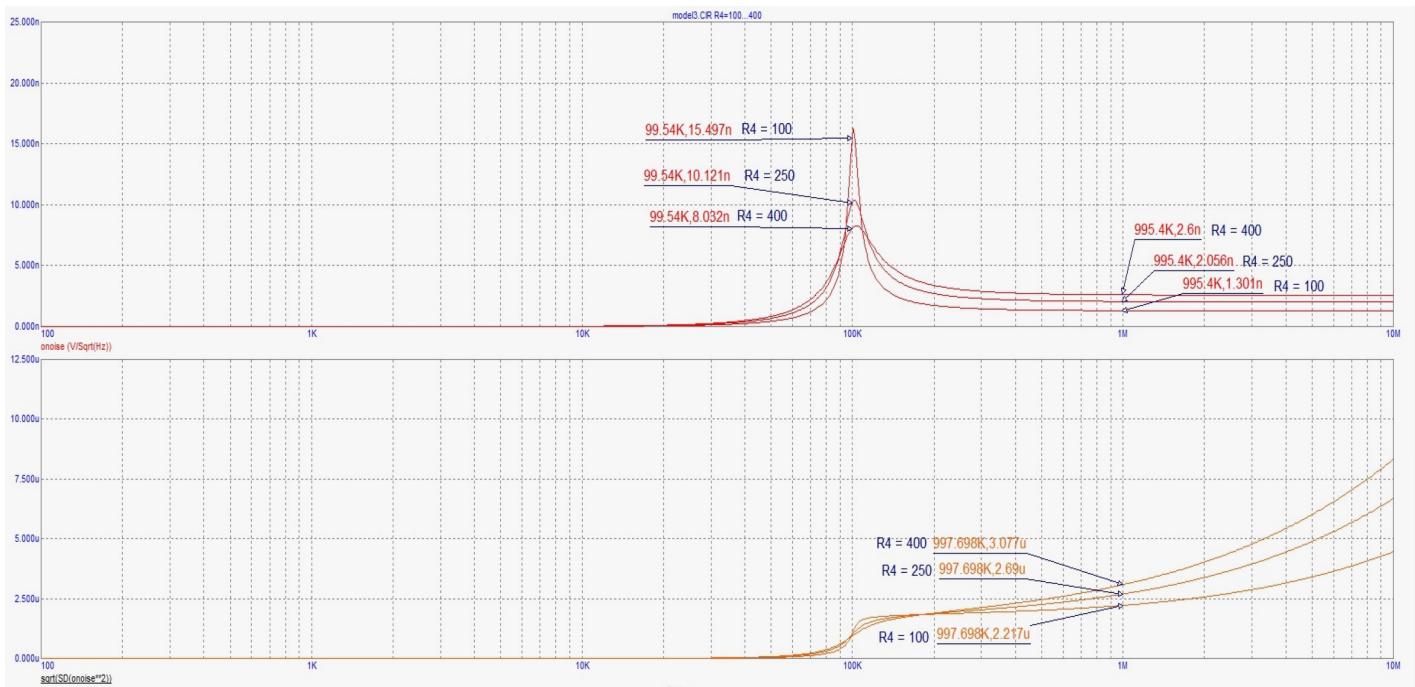


Рис. 29: Задание 3.4, пункт 2, варьирование  $R$

## 4 Шумящие фильтры

### 4.1 задание

#### Пункт 1

Открываем файл model4. Установим  $\{n1/V1\}$  : фильтр 1 с параметрами:

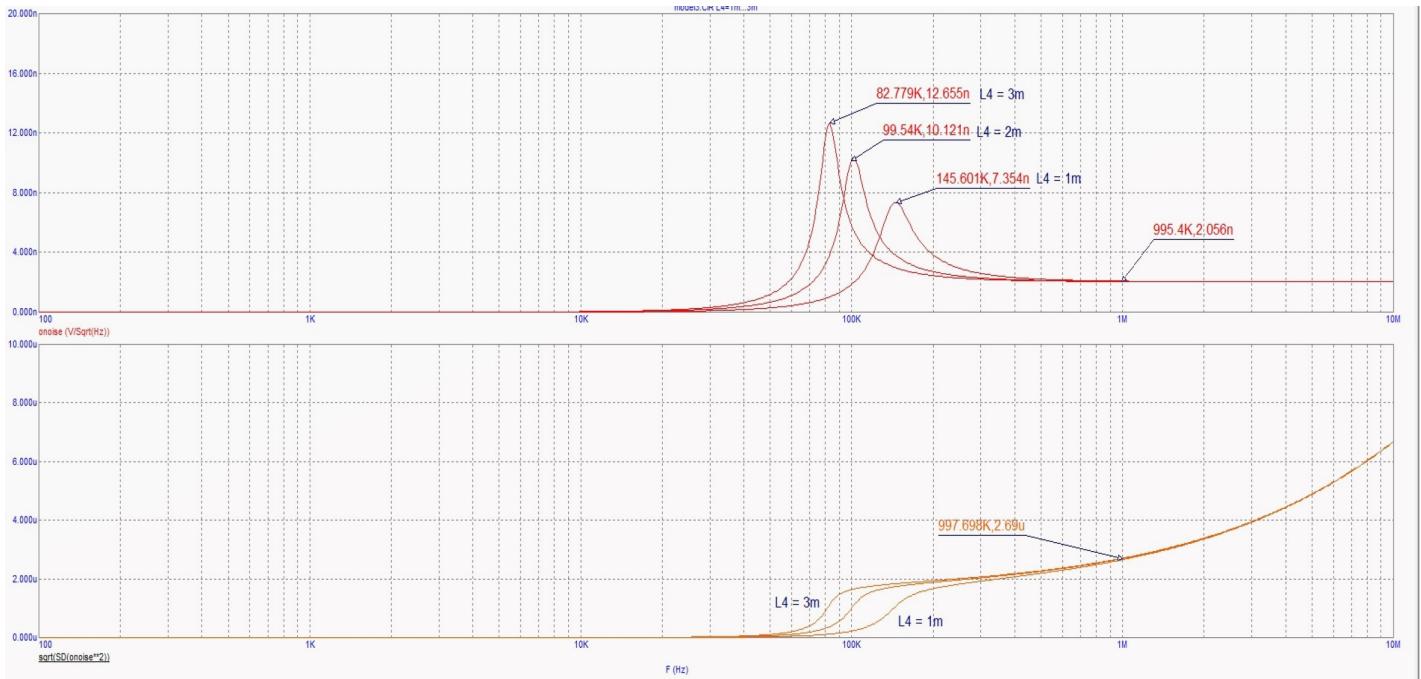


Рис. 30: Задание 3.4, пункт 2, варьирование С

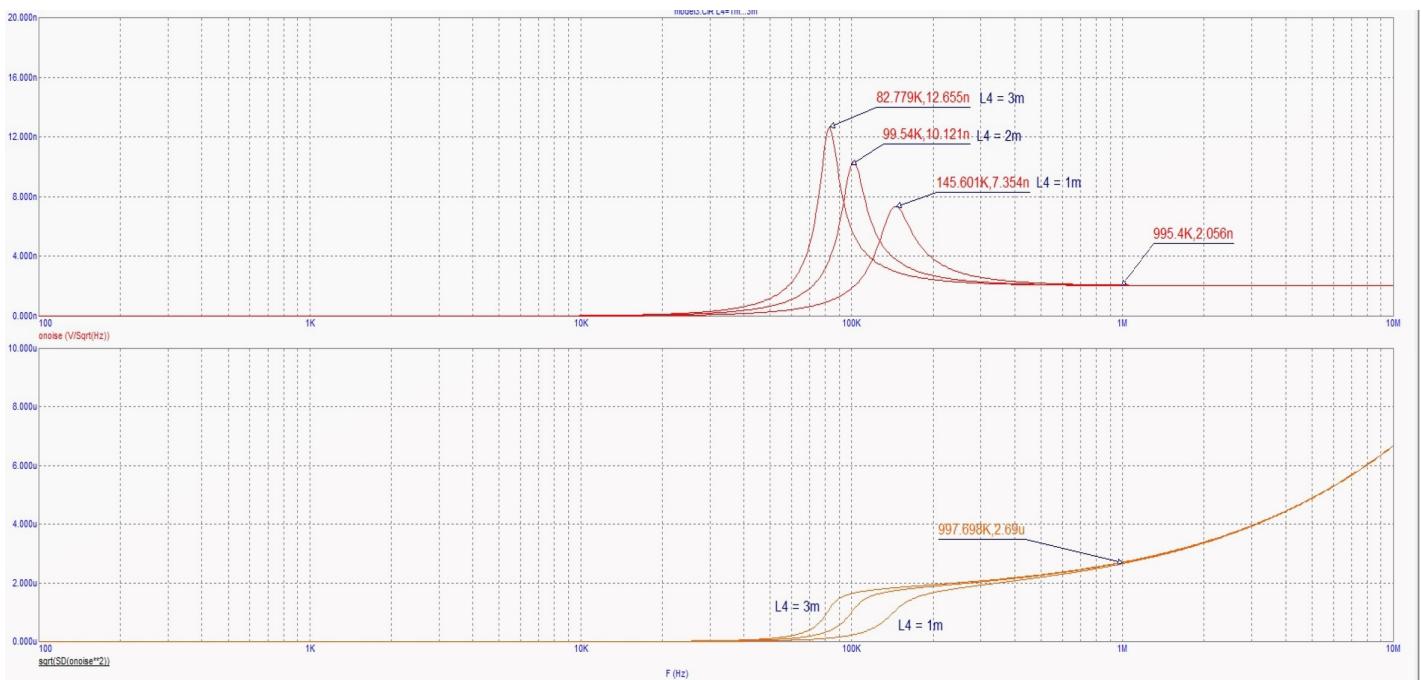


Рис. 31: Задание 3.4, пункт 2, варьирование L

$$f_0 = 100 \text{ kHz}, \rho = 1260, Q = 3$$

Подключив  $v(n_1)/(v(V1)$  снимем АЧХ фильтра. Измерим резонансную частоту  $f_0$ , полосу по уровню 0.7, коэффициент передачи на резонансной и

нулоевой частотах.

Сравним с теорией.

- 1)  $f_0 = 100k, \Delta f = 35k$ .
- 2) По графику:  $Kf_0 \approx 0.5$ .
- 3) Теоретический расчет по формуле:

$$K = \frac{0.5}{1 + jQ \cdot \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)}$$

Получаем, что  $K_1 = 0.5$ .

С теорией совпало.

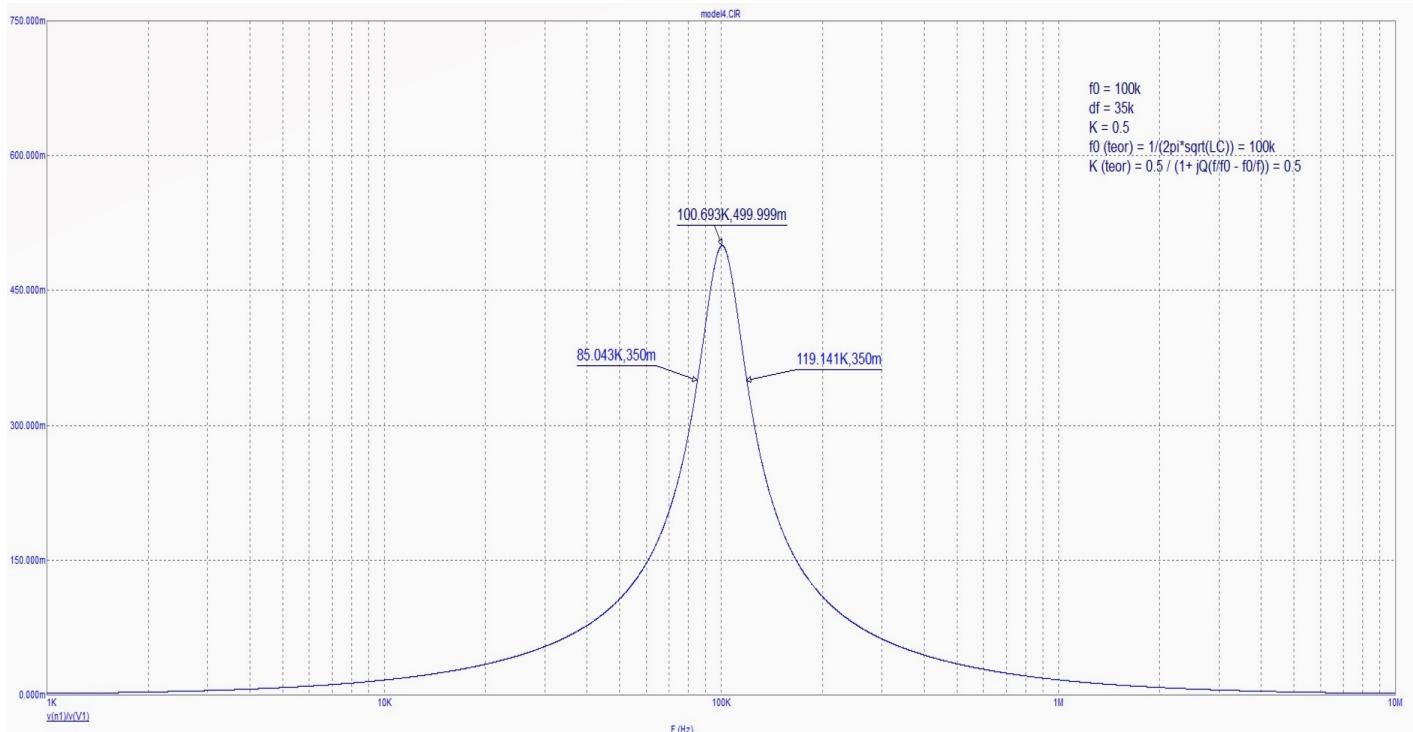


Рис. 32: Задание 4.1, пункт 1

## Пункт 2

Измерим уровни шумового напряжения на частотах  $f_0, f_0/10$ . Так же заменим поочередно первый и второй резисторы нешумящим сопротивлением  $H_1$ , оценим вклад шумов  $R_{s1}, R_1$  в шумовое напряжение и в уровень шума на выходе:

- 1)  $n_{f_0} = 1.32n, n_{\frac{f_0}{10}} = 1.865n, \sigma = 1.819u$
- 2)  $n_{f_0} = 994p, n_{\frac{f_0}{10}} = 1.865p, \sigma = 5.88u$
- 3)  $n_{f_0} = 994.8p, n_{\frac{f_0}{10}} = 35p, \sigma = 235n$

## Пункт 3

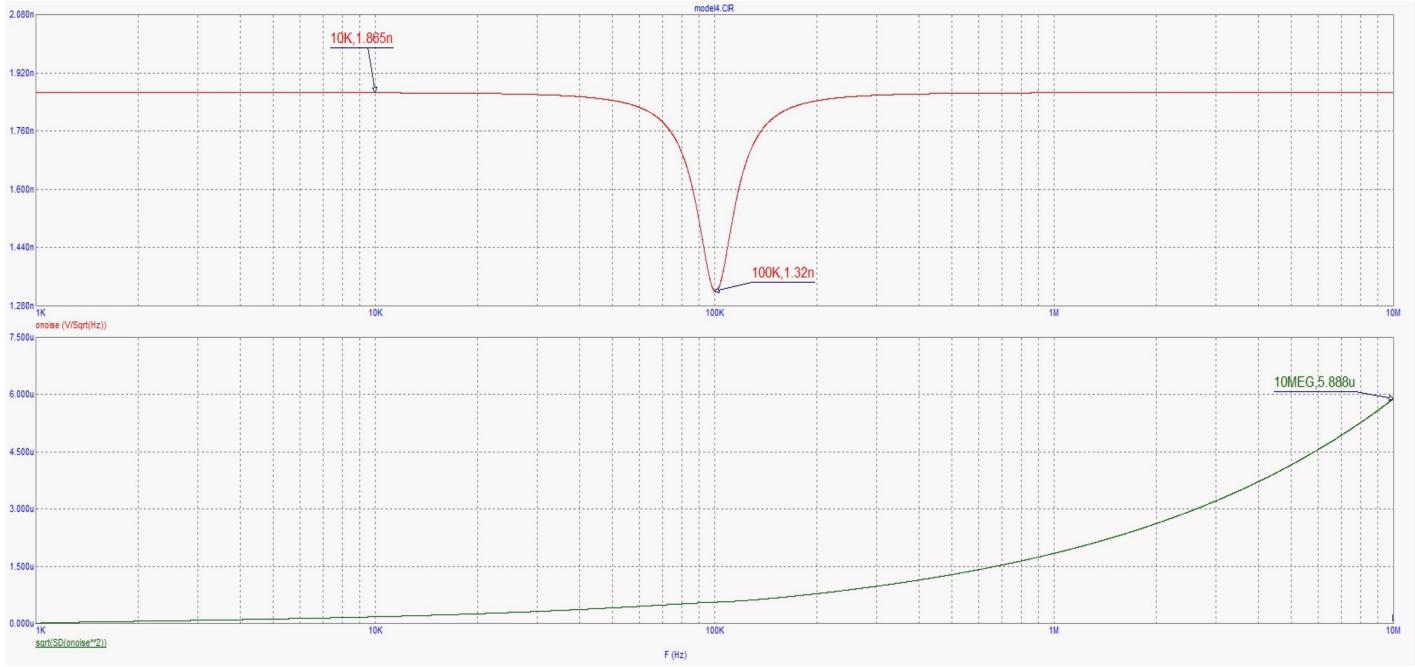


Рис. 33: Задание 4.1, пункт 2

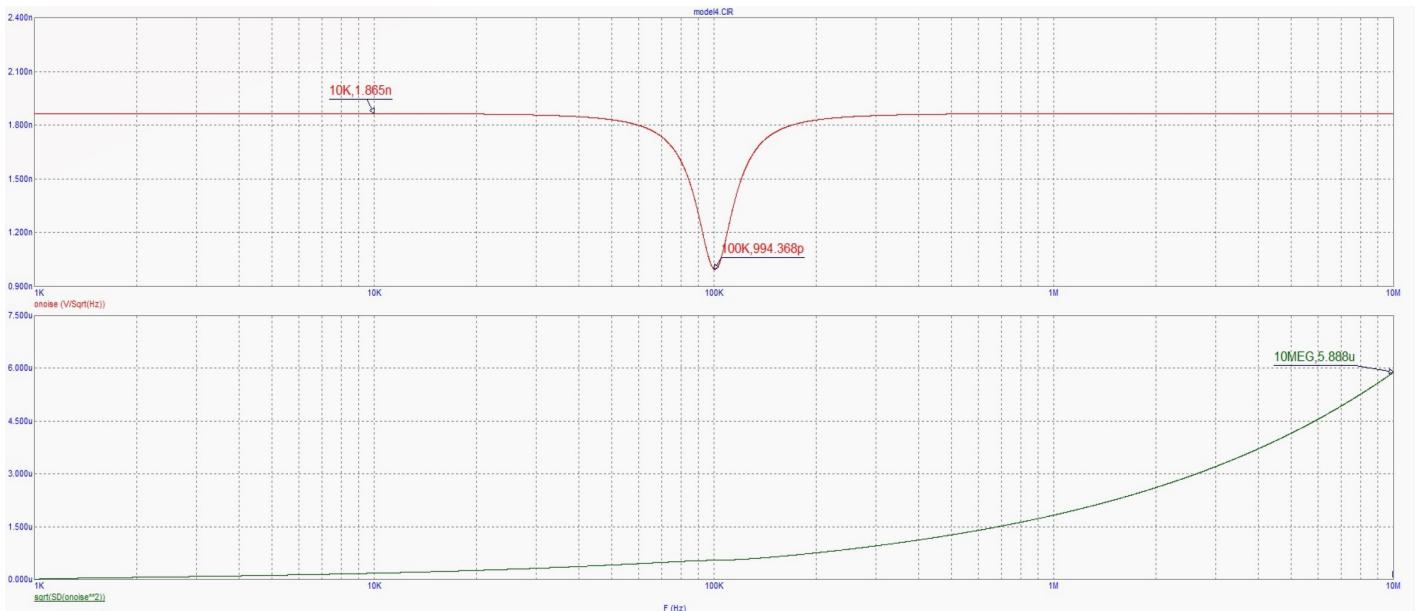


Рис. 34: Задание 4.1, пункт 2

По графику рис.36 оцениваем значение коэффициента шума на частотах  $f_0$ , ,  $f_0/10$  по формуле

$$K_n = 20 \lg\left(\frac{e_n(f)}{\sqrt{4kTR}}\right)$$

- 1)  $e_{f_0} = 112n \Rightarrow K_n(f_0) = 3$
- 2)  $e_{f_0/10} = 2.643n \Rightarrow K_n(f_0/10) = 35.6$

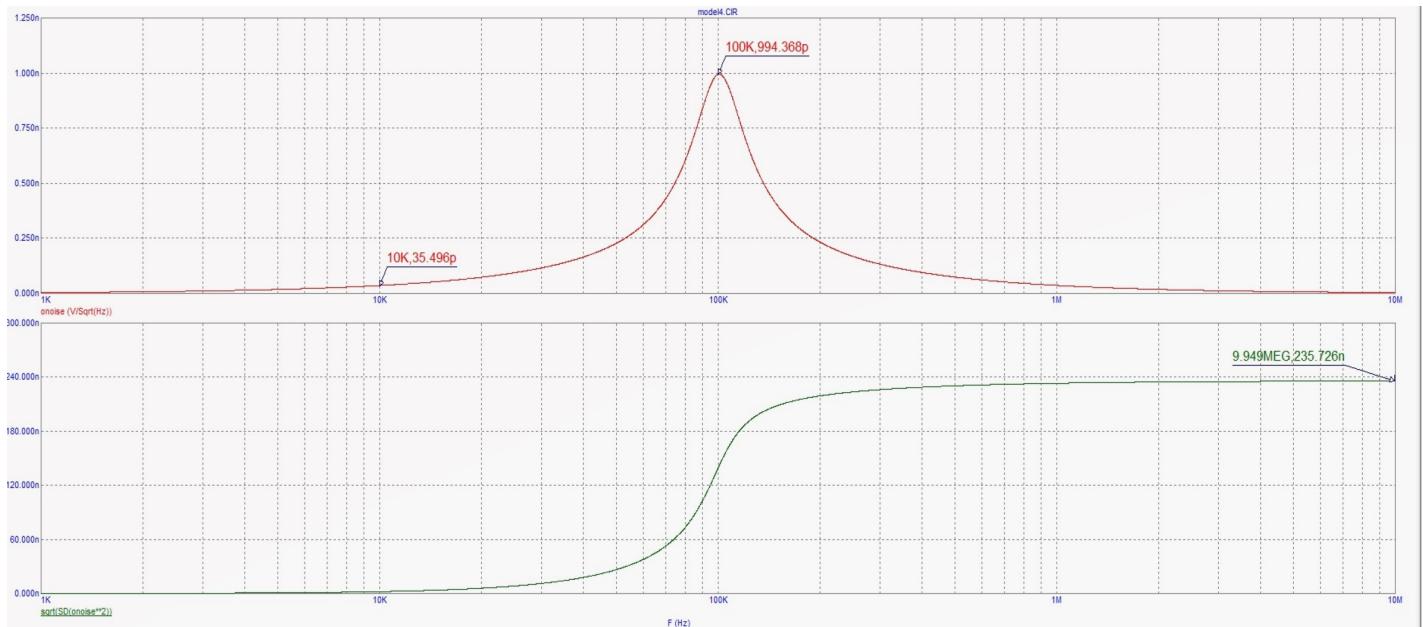


Рис. 35: Задание 4.1, пункт 2

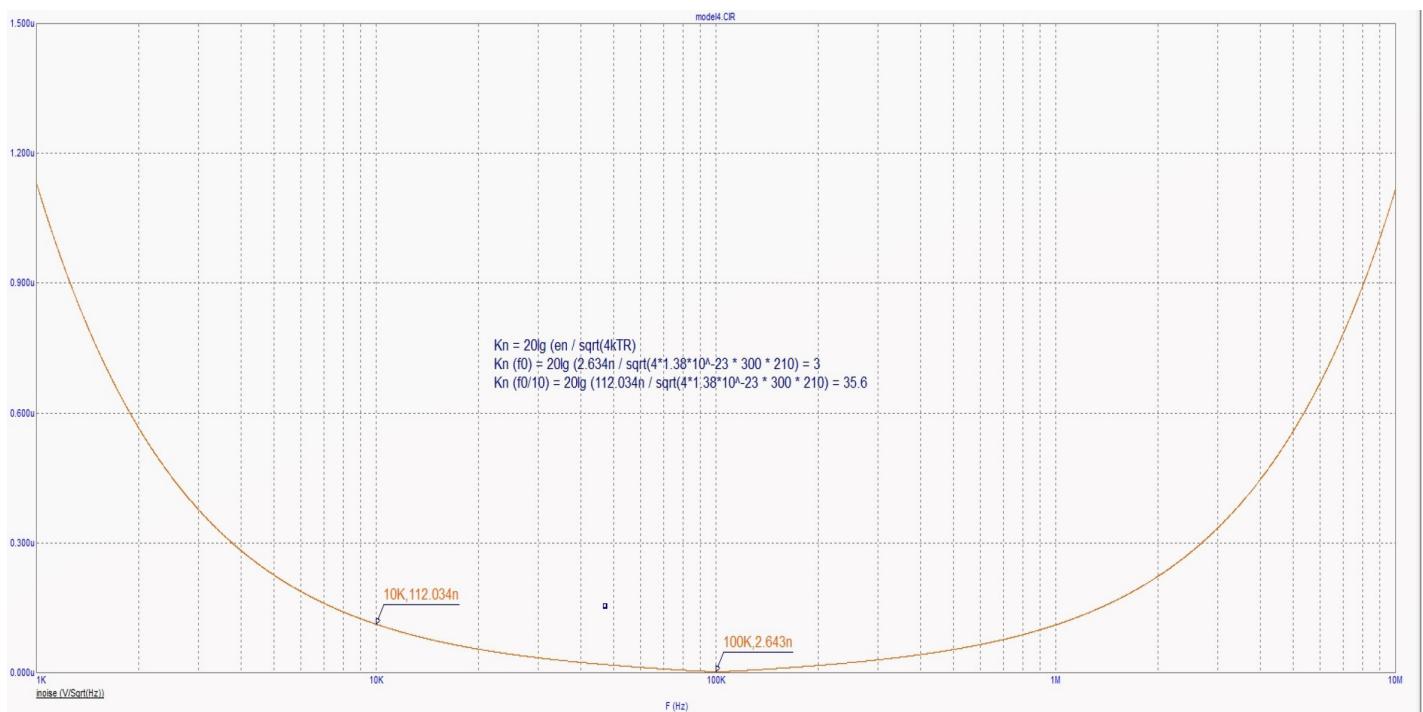


Рис. 36: Задание 4.1, пункт 3

## 4.2 задание

### Пункт 1

Установим  $\{n1/V1\}$  : фильтр 2 с  $f_0 = 50kHz$ .

Подключив  $v(n_2)/(v(V_2))$  снимем АЧХ фильтра. Измерим резонансную частоту  $f_0$ , полосу по уровню 0.7, коэффициент передачи на резонансной и нулюевой частотах.

Сравним с теорией.

- 1)  $f_0 = 50k, \Delta f = 153k$ .
- 2) По графику:  $K_{f_0} \approx 1/3$ .
- 3) Теоретический расчет по формуле:

$$K = \frac{0.5}{1 + jQ \cdot \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)}$$

Получаем, что  $K = 0.34$ .

С теорией совпало.

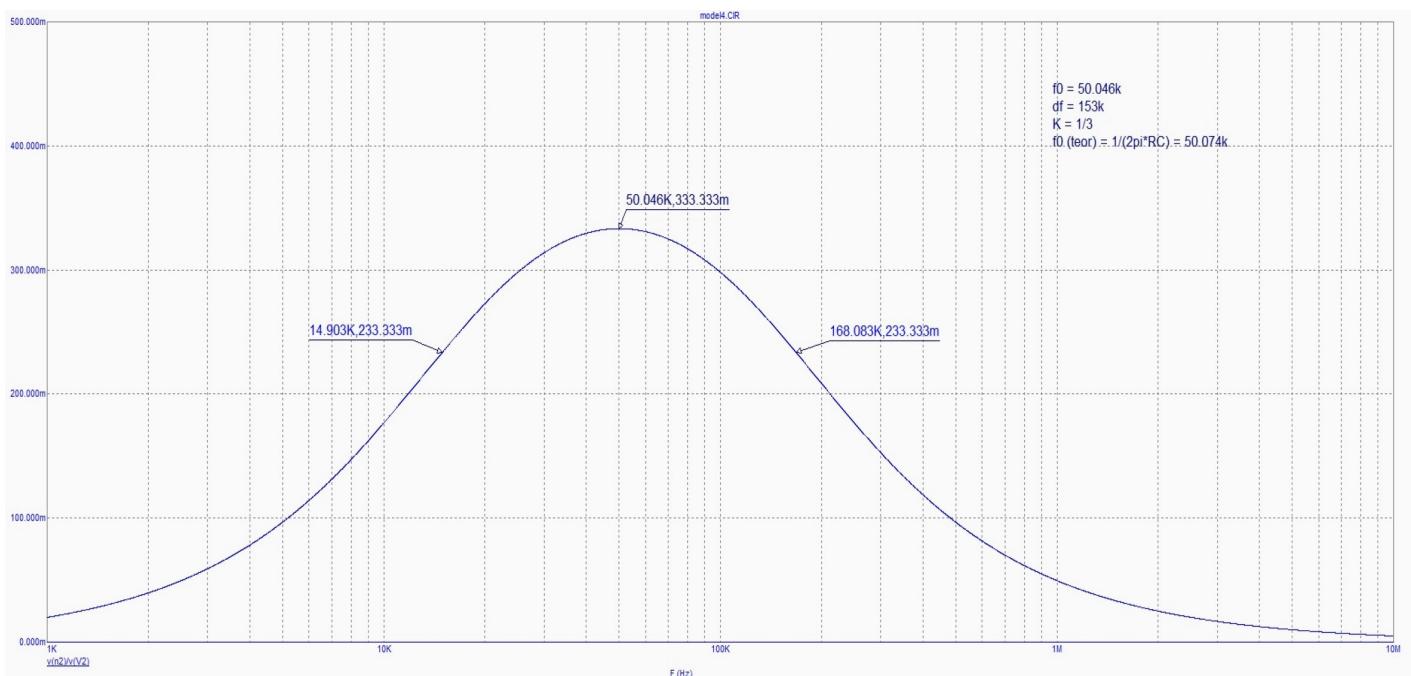


Рис. 37: Задание 4.2, пункт 1

## Пункт 2

Измерим уровни шумового напряжения на частотах  $f_0, 10f_0$ . Так же заменим поочередно первый и второй резисторы нешумящим сопротивлением  $H_1$ , оценим вклад шумов  $R_{s2}, R_2$  в шумовое напряжение и в уровень шума на выходе:

- 1)  $n_{f_0} = 5.929n, n_{10f_0} = 1.572n, \sigma = 2.858u$
- 2)  $n_{f_0} = 4.976n, n_{10f_0} = 993pp, \sigma = 2.141u$
- 3)  $n_{f_0} = 241p, n_{10f_0} = 251p, \sigma = 370n$

## Пункт 3

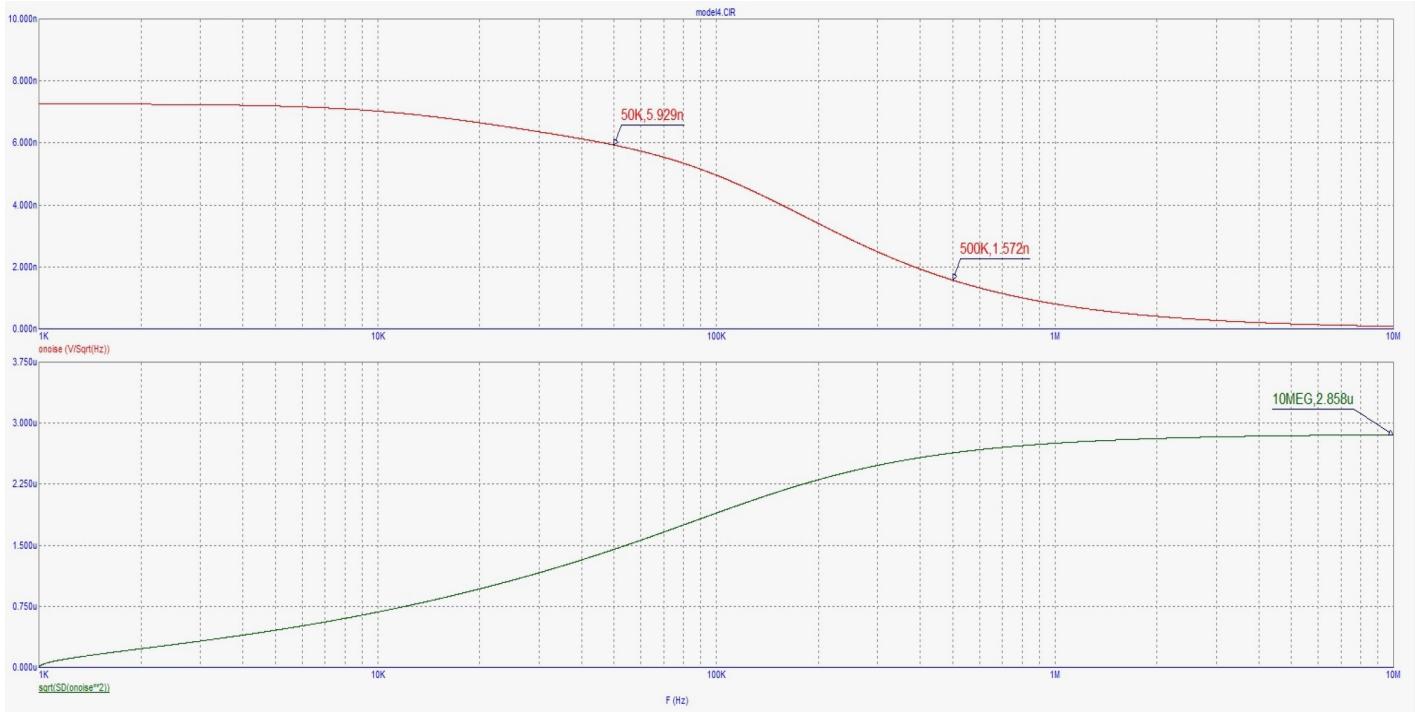


Рис. 38: Задание 4.2, пункт 2

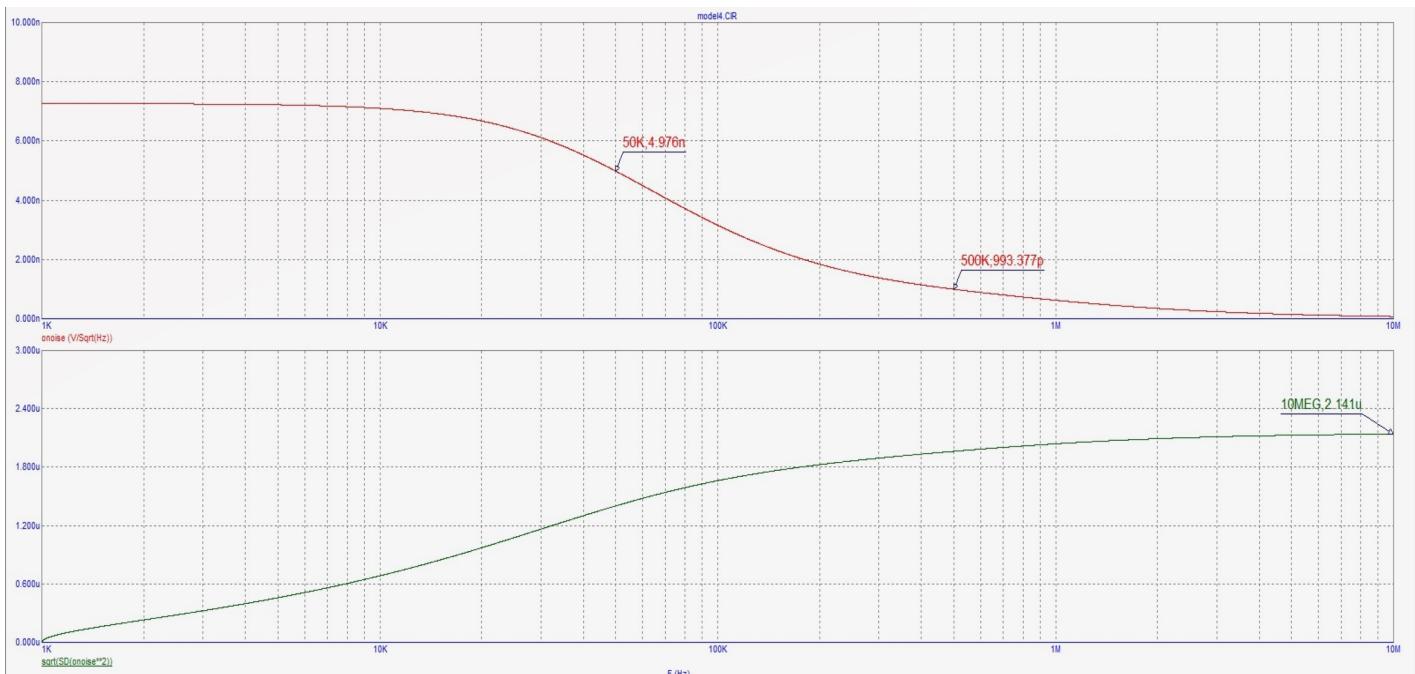


Рис. 39: Задание 4.2, пункт 2

По графику рис.41 оцениваем значение коэффициента шума на частотах  $f_0$ ,  $10f_0$ ,  $f_0/100$  по формуле

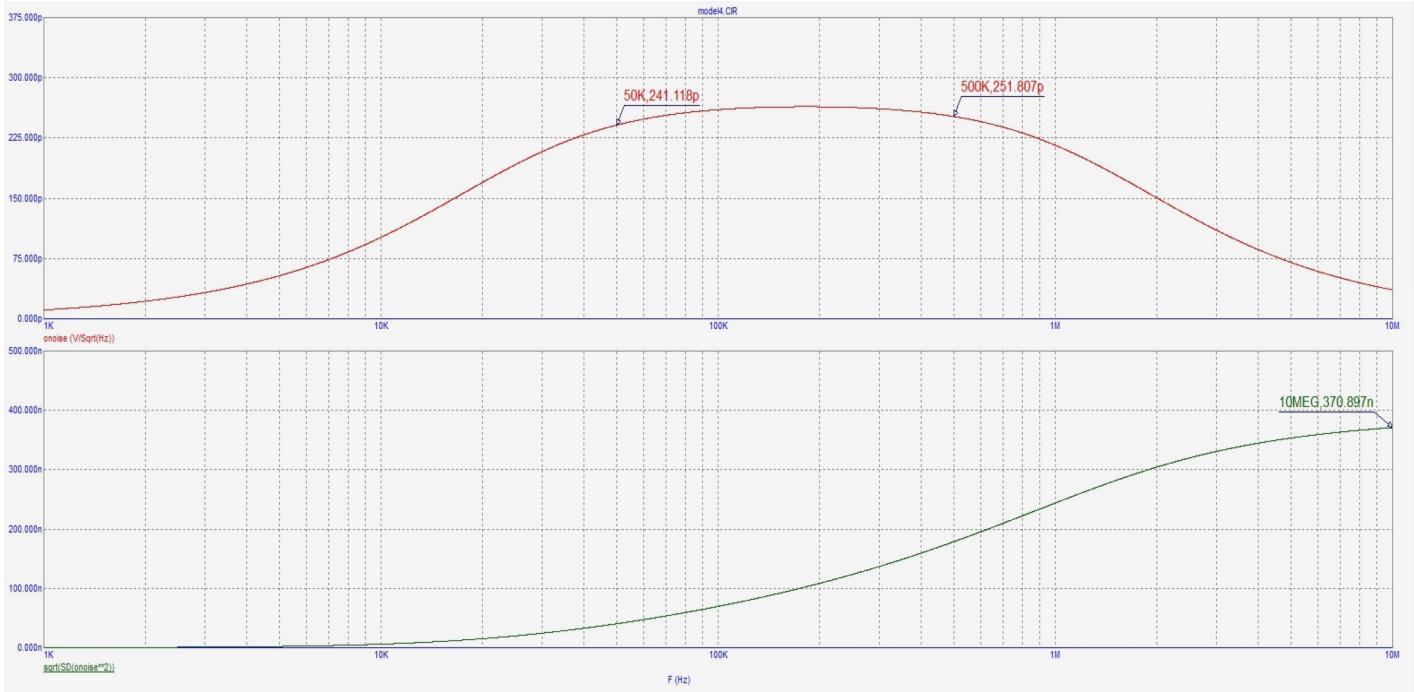


Рис. 40: Задание 4.2, пункт 2

$$K_n = 20 \lg \frac{e_n(f)}{\sqrt{4kTR}}$$

- 1)  $e_{f_0} = 17.787n \Rightarrow K_n(f_0) = 7.8$
- 2)  $e_{f_0/100} = 726n \Rightarrow K_n(f_0/100) = 40$
- 3)  $e_{f_0/10} = 74.46n \Rightarrow K_n(f_0/10) = 20.2$

### 4.3 задание

#### Пункт 1

Подключив  $v(n_3)/(v(V3))$  снимем АЧХ фильтра. Измерим резонансную частоту  $f_0$ , полосу по уровню 0.7, коэффициент передачи на резонансной и нулоевой частотах.

Сравним с теорией.

- 1)  $f_0 = 102k$ ,  $\Delta f = 34k$ .
- 2) По графику:  $K_{f_0} \approx 0.5$ .
- 3) Теоретический расчет по формуле:

$$K = \frac{0.5}{1 + jQ \cdot \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)}$$

Получаем, что  $K_1 = 0.5$ .

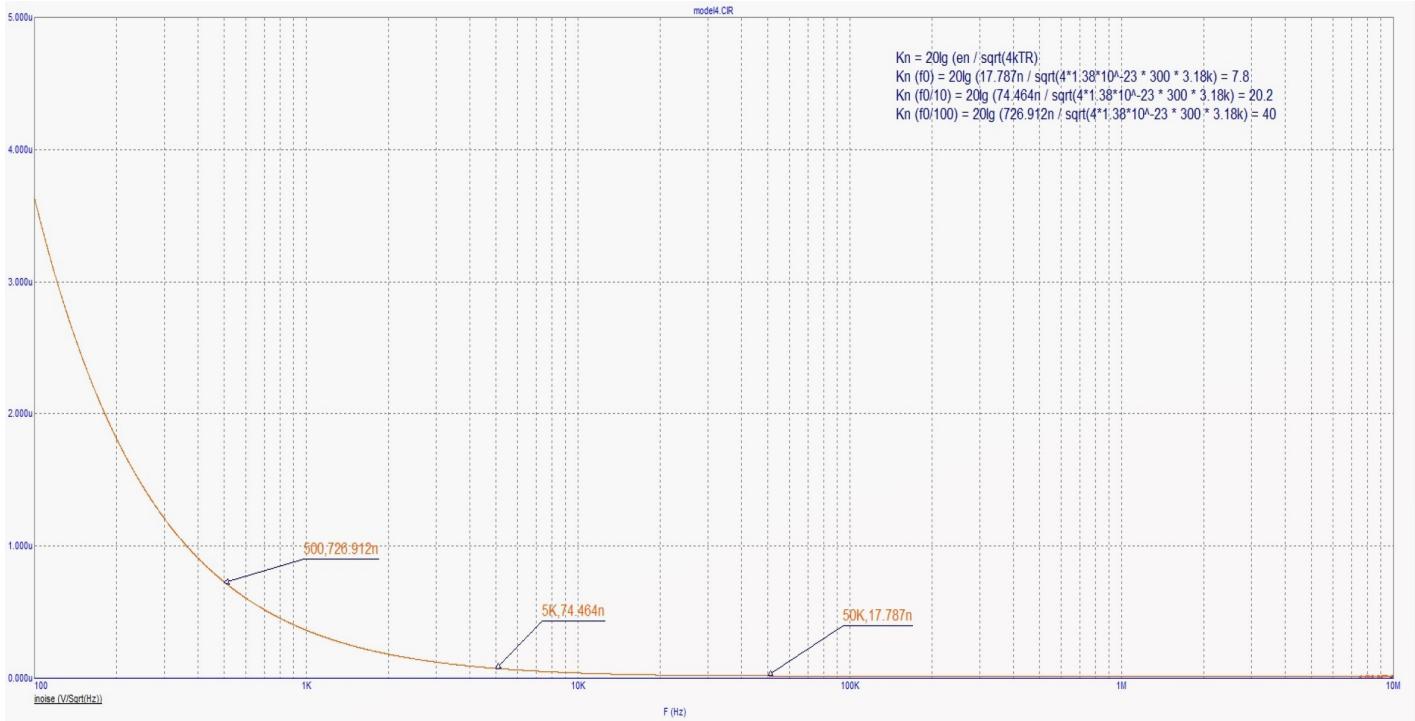


Рис. 41: Задание 4.2, пункт 3

С теорией совпало.

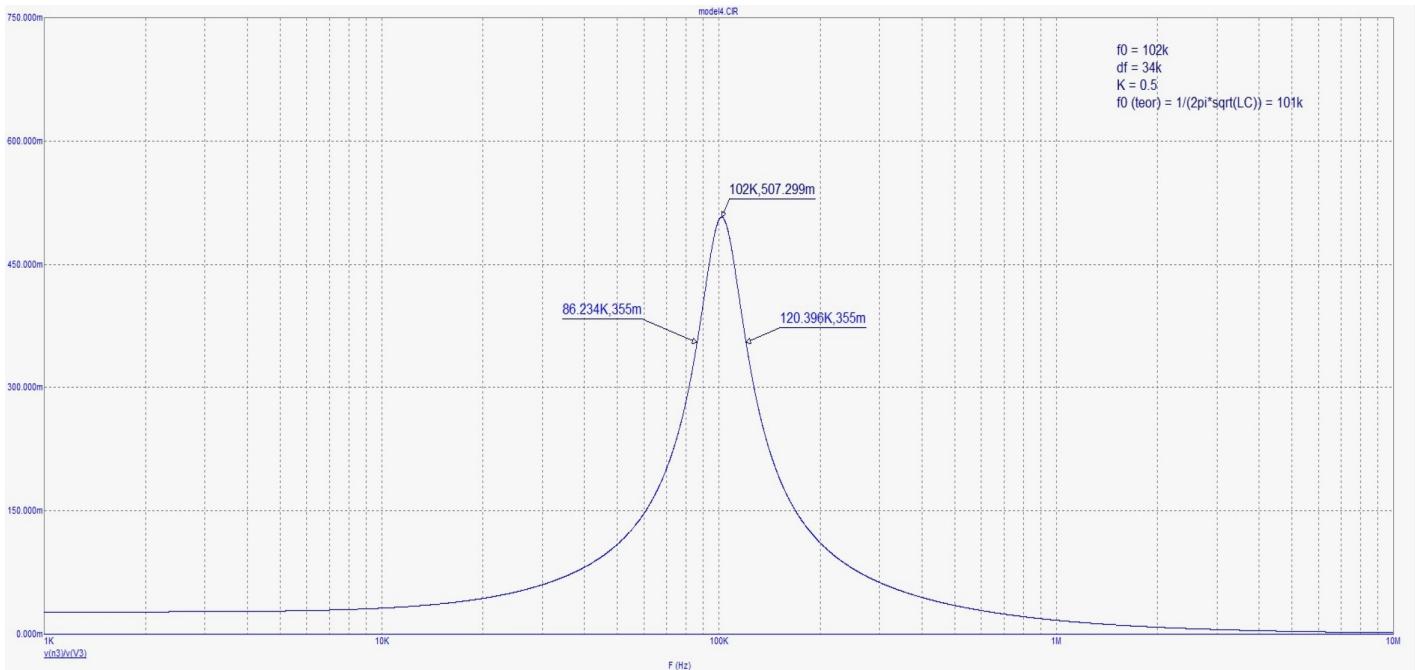


Рис. 42: Задание 4.3, пункт 1

## Пункт 2

Измерим уровни шумового напряжения на частотах  $f_0$ ,  $f_0/100$ . Так же заменим поочередно первый и второй резисторы нешумящим сопротивлением

$H_1$ , оценим вклад шумов  $R_{s3}, R_3$  в шумовое напряжение и в уровень шума на выходе:

- 1)  $n_{f_0} = 7.963n, n_{\frac{f_0}{10}} = 1.841n, \sigma = 1.819u$
- 2)  $n_{f_0} = 5.335n, n_{\frac{f_0}{10}} = 344p, \sigma = 1.265u$
- 3)  $n_{f_0} = 344.8p, n_{\frac{f_0}{10}} = 944p, \sigma = 230n$

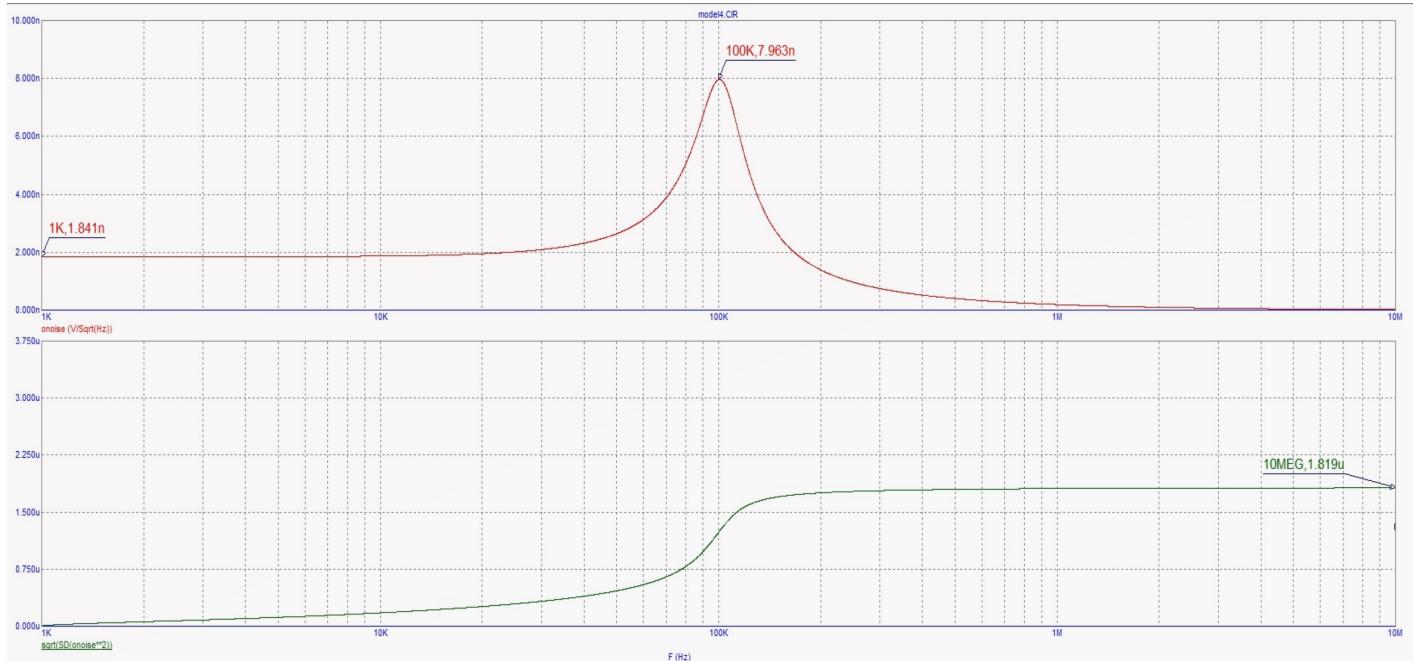


Рис. 43: Задание 4.3, пункт 2

### Пункт 3

По графику рис.46 оцениваем значение коэффициента шума на частотах  $f_0, 10f_0, f_0/100$  по формуле

$$K_n = 20 \lg \left( \frac{e_n(f)}{\sqrt{4kT R}} \right)$$

- 1)  $e_{f_0} = 68.329n \Rightarrow K_n(f_0) = 18.6$
- 2)  $e_{f_0/100} = 15.806n \Rightarrow K_n(f_0/100) = 31.3$
- 3)  $e_{10f_0} = 11.28n \Rightarrow K_n(10f_0) = 15.6$

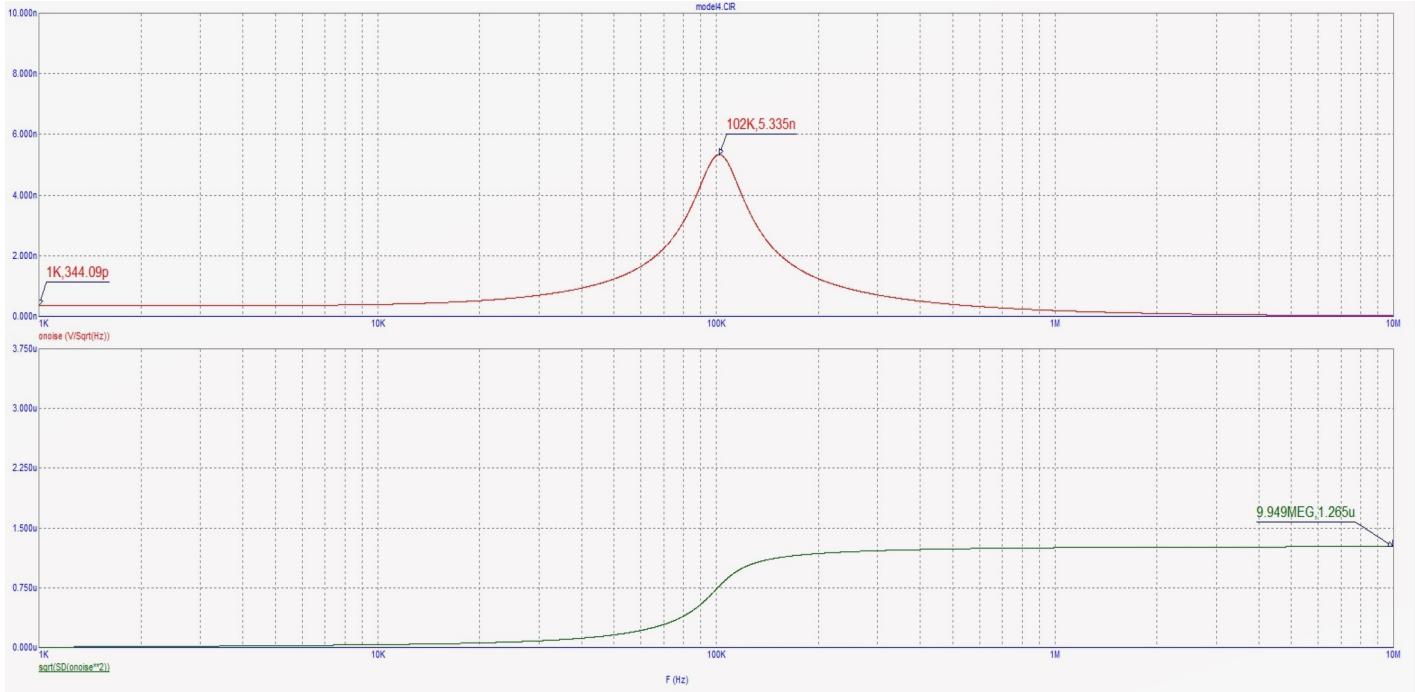


Рис. 44: Задание 4.3, пункт 2

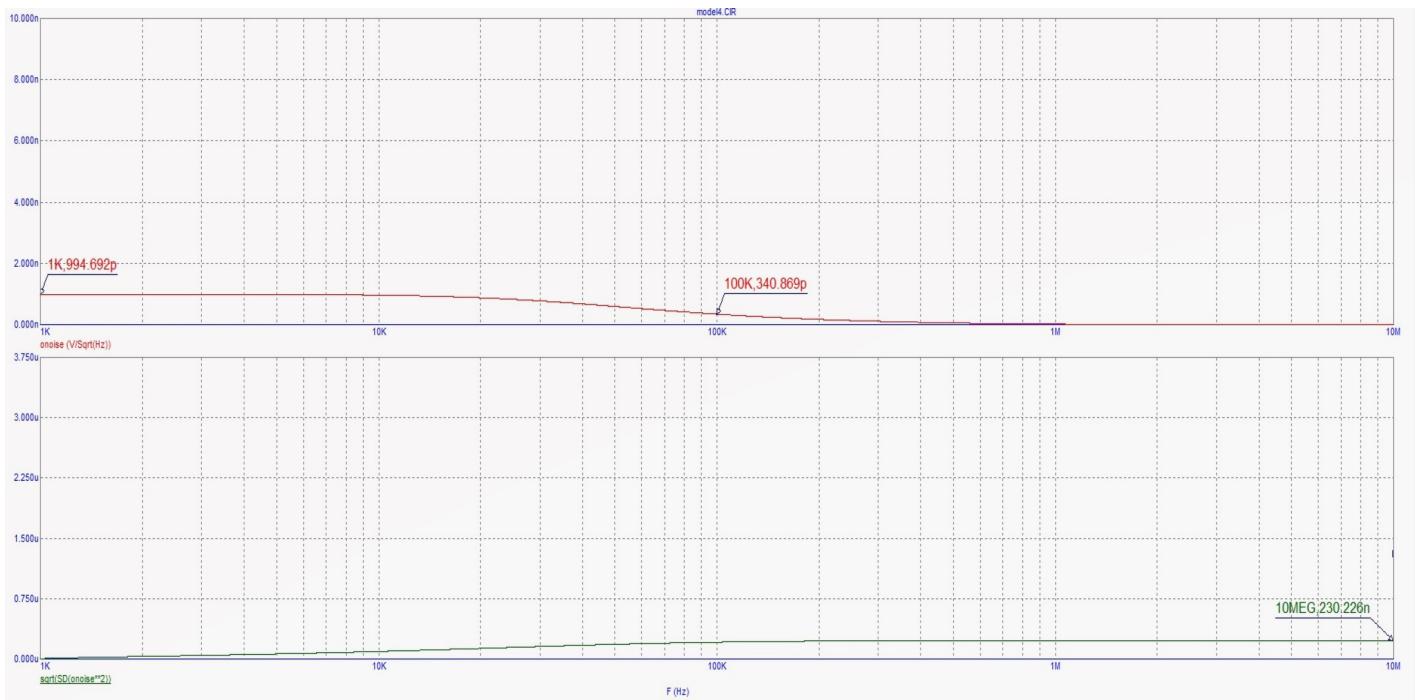


Рис. 45: Задание 4.3, пункт 2

## 5 Шумы в усилителе на биполярном транзисторе

### 5.1 Задание 5.1

#### Пункт 1

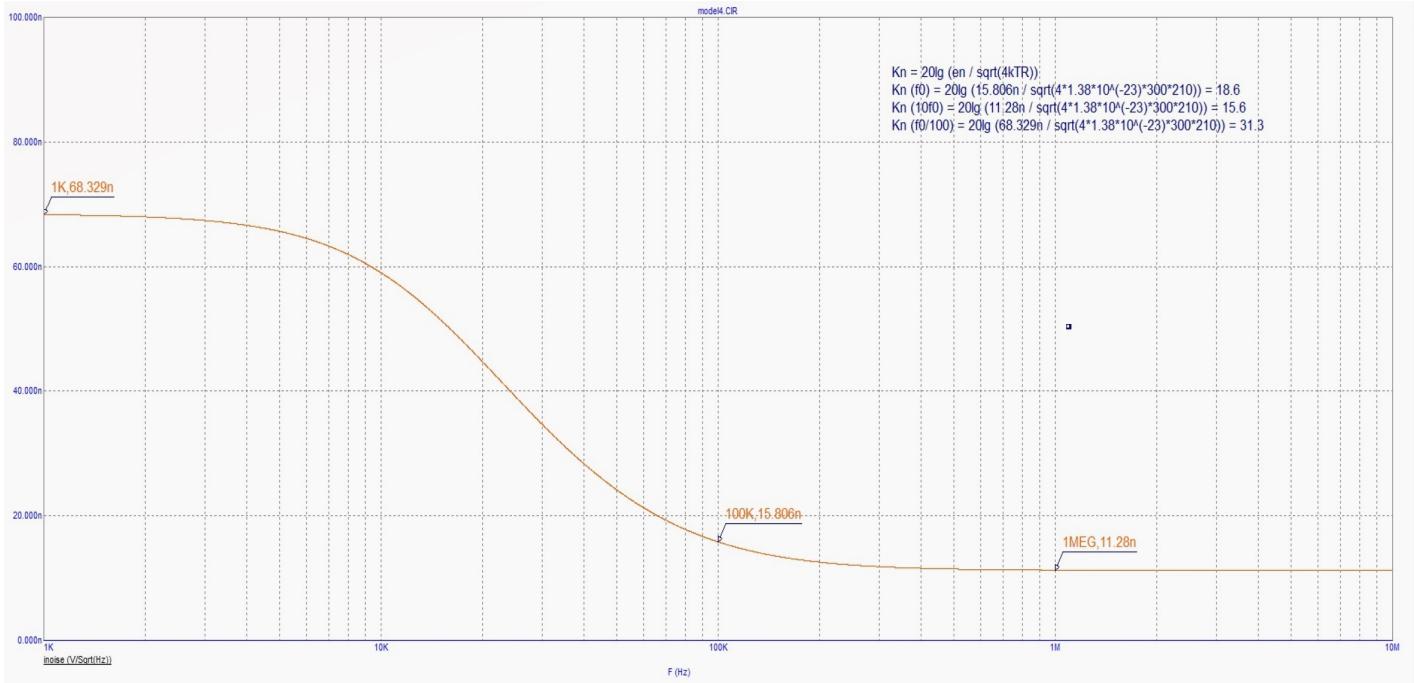


Рис. 46: Задание 4.3, пункт 3

Установим  $E1/i$

$$I_c = 300\mu A, B = 200\Omega m, I1 = 13.5\mu A.$$

По графику оценим значение  $h21 =$

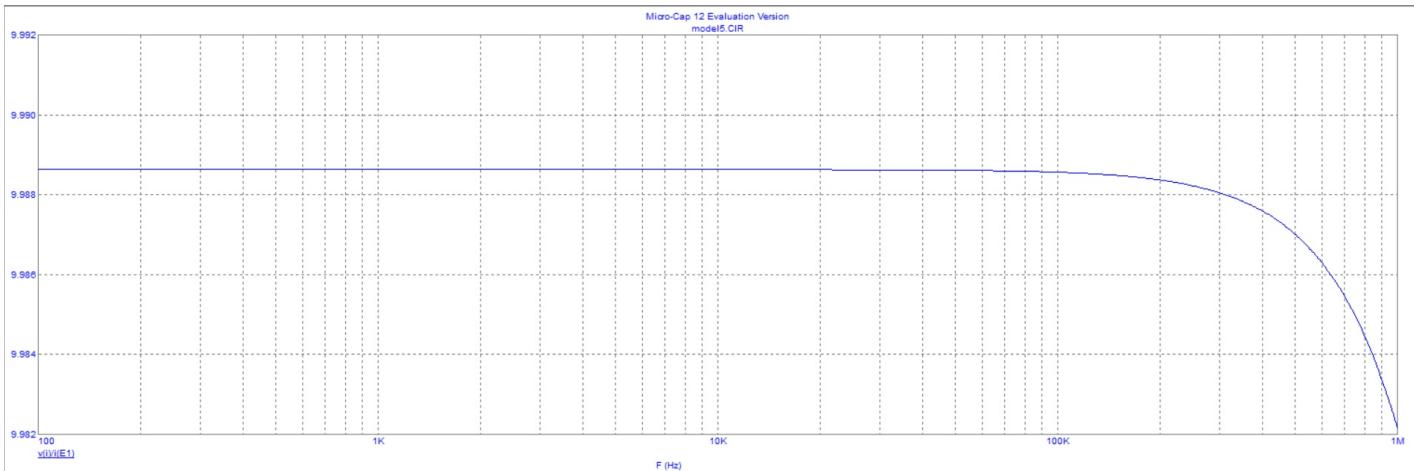


Рис. 47: Задание 5.1, пункт 1

## Пункт 2

Снимем зависимость  $i(f)$  от  $H_s$ , варьируя  $H_s[10, 1000k|\log 10|]$ ,  $RB = 0$

$$H_s = 1M, i = 2.3\mu$$

$$H_s = 100k, i = 224.3n$$

$$H_s = 10k, i = 27.7n$$

$$H_s = 1k, i = 8.8n$$

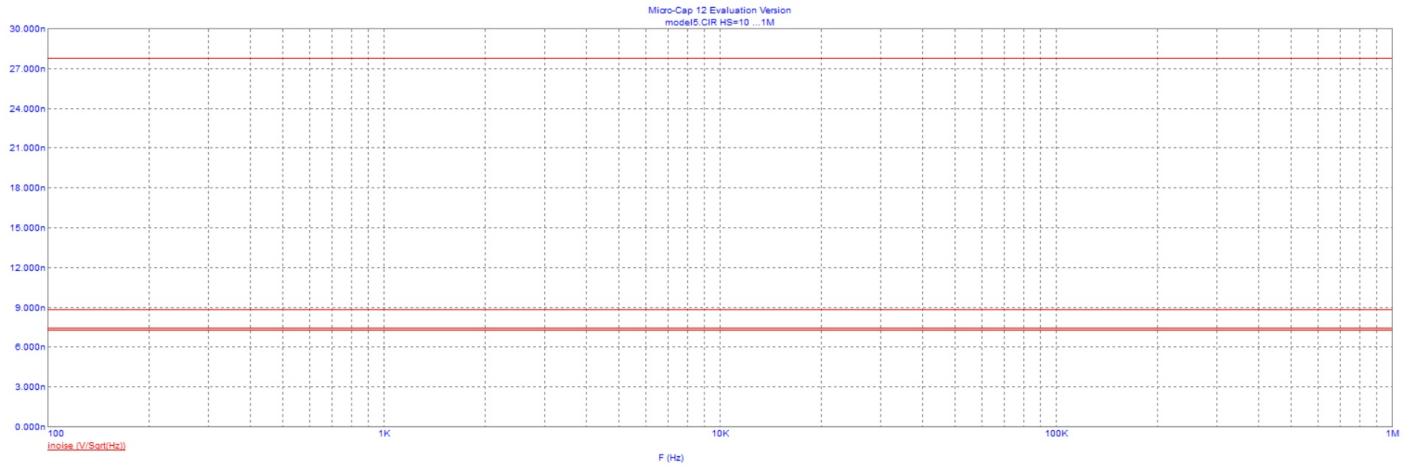


Рис. 48: Задание 5.1, пункт 2

$$H_s = 100, i = 7.4n$$

$$H_s = 10, i = 7.3n$$

Снимем зависимость  $i(f)$  от  $H_s$ , варьируя  $RB[0, 100|25]$ ,  $H_s = 0$

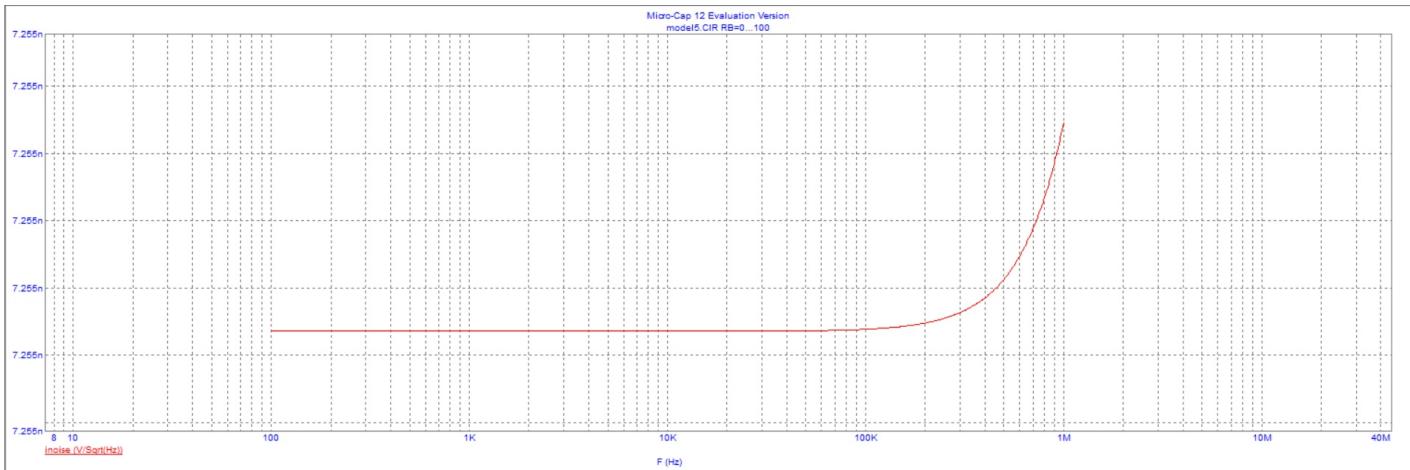


Рис. 49: Задание 5.1, пункт 2

### Пункт 3

Повторим измерения для  $I_c = 0.1mA$

## 5.2 Задание 5.2

### Пункт 1

Установим  $r_b = 200\Omega$  транзистора Q2, установим  $I_c = 300\mu A$ , выбрав  $R_b = R_c = (I_c * R_c = 5V)$

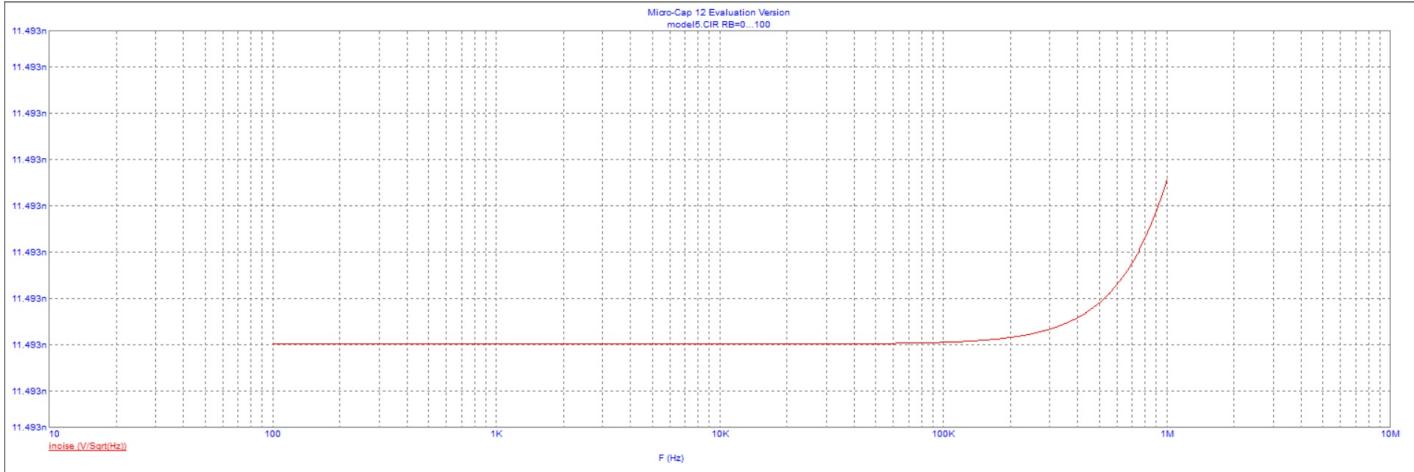


Рис. 50: Задание 5.1, пункт 3

## 6 Шумы в усилителе на полевом транзисторе

### 6.1 Задание 6.1

#### Пункт 1

Установим  $V/i$ ,  $U_p = 0.8$ . Начальное значение  $I_d =$   
Варьируя  $U_p[0.2, 2|0.2]$ , исследуем зависимость крутизны транзистора S от  $U_p$

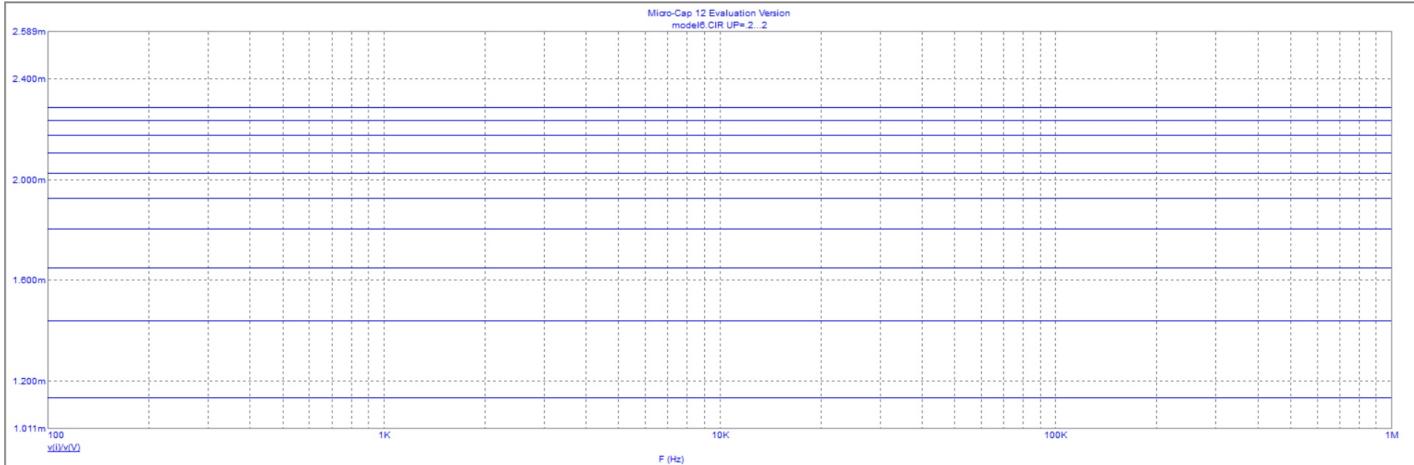


Рис. 51: Задание 6.1, пункт 1

$$U_p = 0.21/S = 437.4$$

$$U_p = 0.41/S = 447.4$$

$$U_p = 0.61/S = 458.7$$

$$U_p = 0.81/S = 474.8$$

$$U_p = 11/S = 493.1$$

$$U_p = 1.21/S = 519.5$$

$$U_p = 1.41/S = 555.6$$

$$U_p = 1.61/S = 607.9$$

$$U_p = 1.81/S = 695.0$$

$$U_p = 21/S = 888.1$$