

Радиотехническая работа 19

Безынерционные линейные цепи

Выполнил Жданов Елисей Б01-205

1 [Оборудование:]

Макетная плата

Набор резисторов и конденсаторов различных номиналов

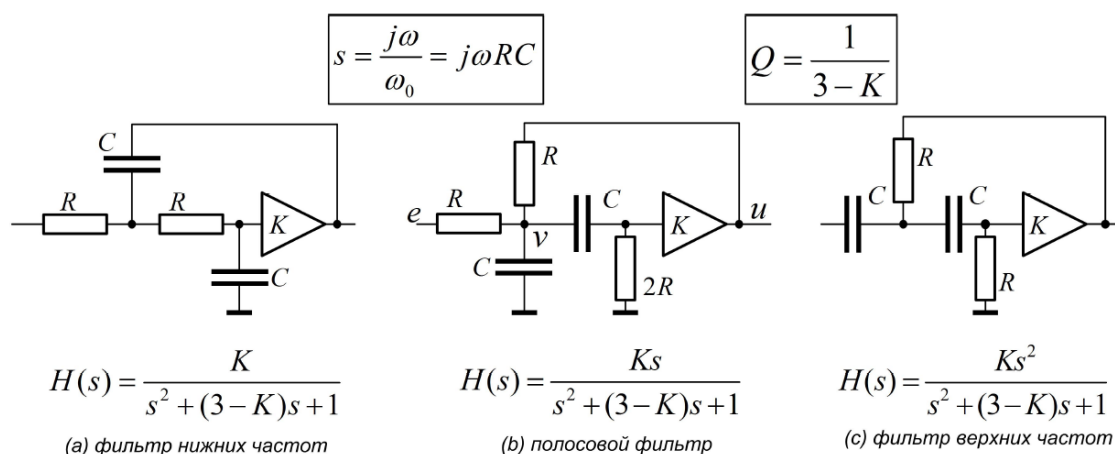
Электронный осциллограф на печатной плате

Электронный генератор сигналов на печатной плате

ПО MicroCap 10.0.8.0

2 Задание

2.1 Звенья Саллена-Ки



2.1.1 Теория

Звенья Саллена-Ки, рис. 10, используют неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления $K < 3$. Они просты как схемотехнически, так и в плане расчета. Резонансная частот звена задается выбором постоянной времени RC : $\omega_0 = 1/RC$, а добротность $Q = 1/(3 - K)$ зависит только от усиления. Попытка достижения

этим звеньями высоких значений добротности наталкивается на проблему точности задания коэффициента усиления. Скажем, чтобы получить добротность $Q = 100$, нужно иметь $K = 2.99$, и это при том, что при $K > 3$ звено теряет устойчивость.

2.1.2 Выполнение

1) Откроем модель *skey.cir* звеньев Саллена-Ки с частотой $f_0 = 10k$ и добротностью $Q = 1$. Изучим частотные характеристики звеньев. Измерим значение коэффициентов передачи:

$$\Phi_{НЧ}: K = 2$$

$$\Phi_{ВЧ}: K = 2$$

$$ПФ: K = 2$$

Проанализируем изменение частотных характеристик фильтров при варьировании резисторов $R_L, R_H, R_P = [11k, 19k|2k]$.

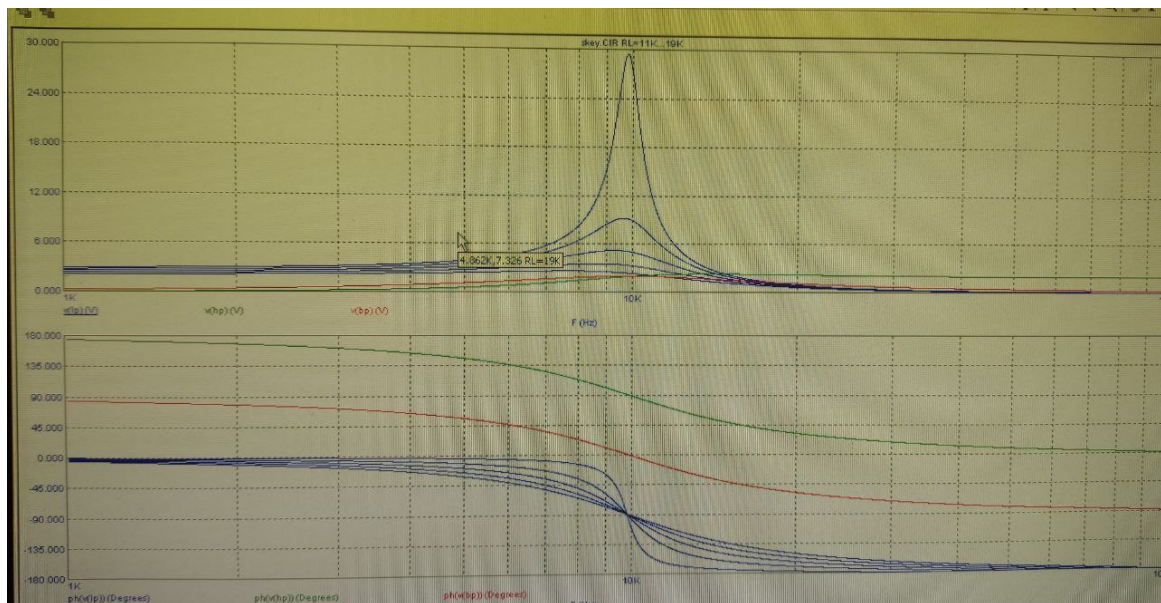


Рис. 1: График с варьированием для ФНЧ

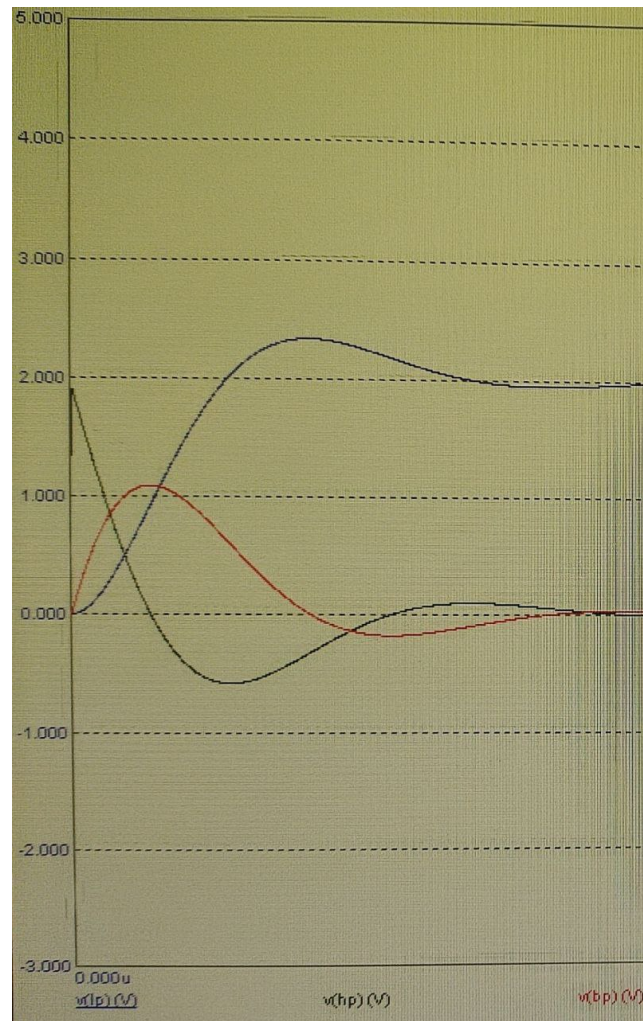
Измерим пиковые значения усиления при $R_{L,H,P} = 19k$:

$$\Phi_{НЧ}: U = 29,4 \text{ В}$$

$$\Phi_{ВЧ}: U = 28,4 \text{ В}$$

$$ПФ: U = 28,8 \text{ В}$$

2) Исследуем переходные характеристики фильтров и их поведение при варьировании $R_L, R_H, R_P = [11k, 19k|2k]$.



Как видно по графикам:

Для ФНЧ: $h_{\text{ФНЧ}} \rightarrow 0 (t \rightarrow 0)$, $h_{\text{ФНЧ}} \rightarrow 2 (t \rightarrow \infty)$

Для ФВЧ: $h_{\text{ФВЧ}} \rightarrow 2 (t \rightarrow 0)$, $h_{\text{ФВЧ}} \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$

Для ПФ: $h_{\text{ПФ}} \rightarrow 0 (t \rightarrow 0)$, $h_{\text{ПФ}} \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$

Что согласуется с теорией и определением этих фильтров.

3) Откроем модель *sk3pole.cir* с фильтрами Баттерворта верхних и нижних частот порядка $n = 3$ на частоту среза $f_0 = 10k$. Проанализируем частотные характеристики фильтров.

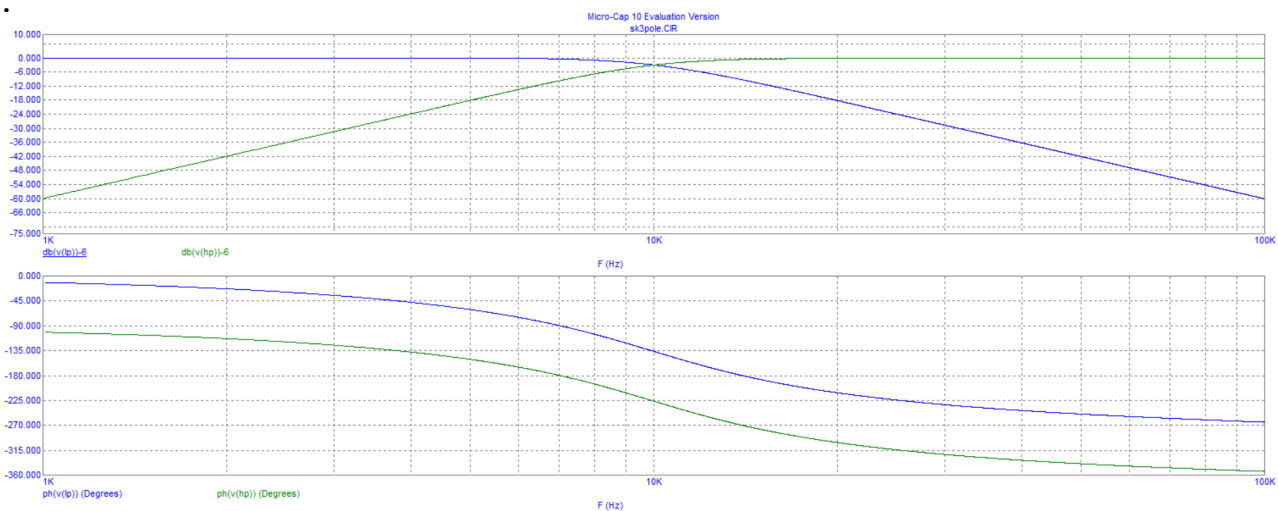


Рис. 2: АЧХ и ФЧХ Баттерворта

Измерим скорость спада в dB на декаду и затухания на частотах $f_0/2, 2f_0$ (на октаву будет в 2 раза больше):

$$\Phi ВЧ: f_0/2 \rightarrow 57dB$$

$$\Phi ВЧ: 2f_0 \rightarrow 21dB$$

$$\Phi НЧ: f_0/2 \rightarrow -21dB$$

$$\Phi НЧ: 2f_0 \rightarrow -57dB$$

Преобразуем их в фильтры Чебышева с $\varepsilon = 1$. Параметры полюсов ФНЧ можно получить в *MatLab* командой `highpass(cheb(3,1))`.

Измерим уровни затухания на частотах $f_0/2, 2f_0$ и $f_0/10, 10f_0$:

$$\Phi ВЧ: f_0/2 \rightarrow 68.8dB$$

$$\Phi ВЧ: 2f_0 \rightarrow 0.373dB$$

$$\Phi НЧ: f_0/2 \rightarrow -0.373dB$$

$$\Phi НЧ: 2f_0 \rightarrow -68.8dB$$

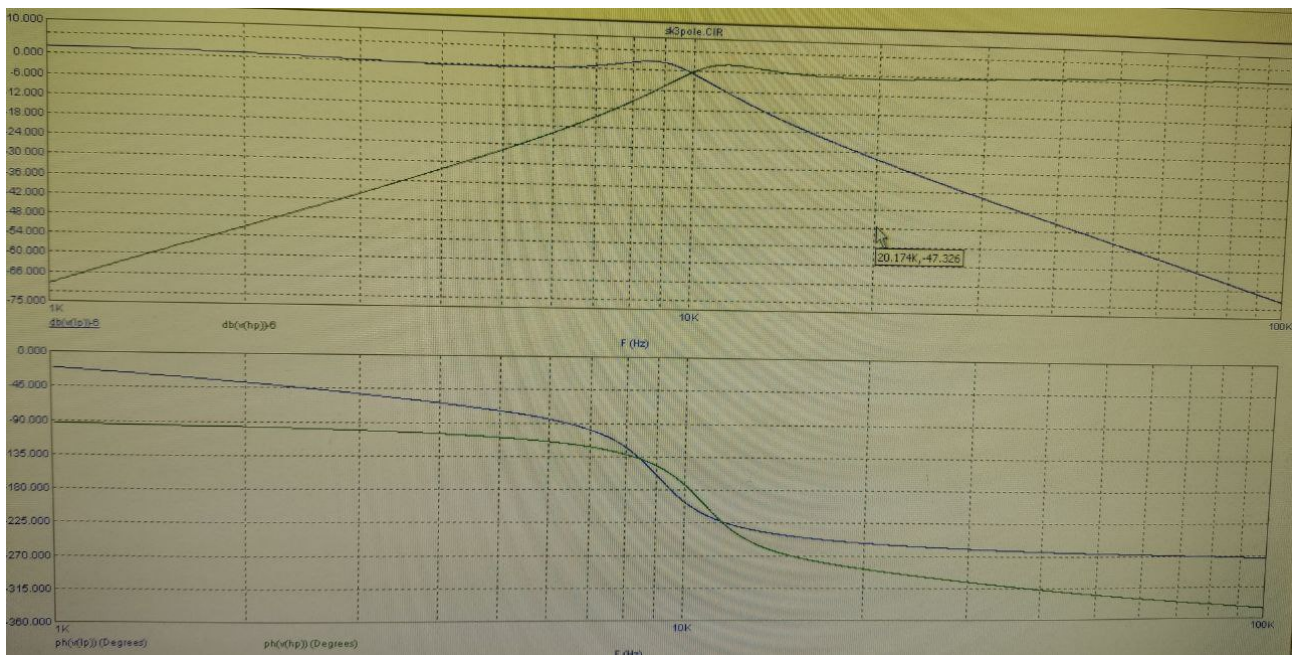


Рис. 3: АЧХ и ФЧХ Чебышева

4) Открыв прототип *sk4pole.cir* реализуем 4-полюсной полосовой фильтр Чебышева с $f_0 = 10k$, $\varepsilon = 1$, $Q = \frac{f_0}{\Delta f} = 6$.

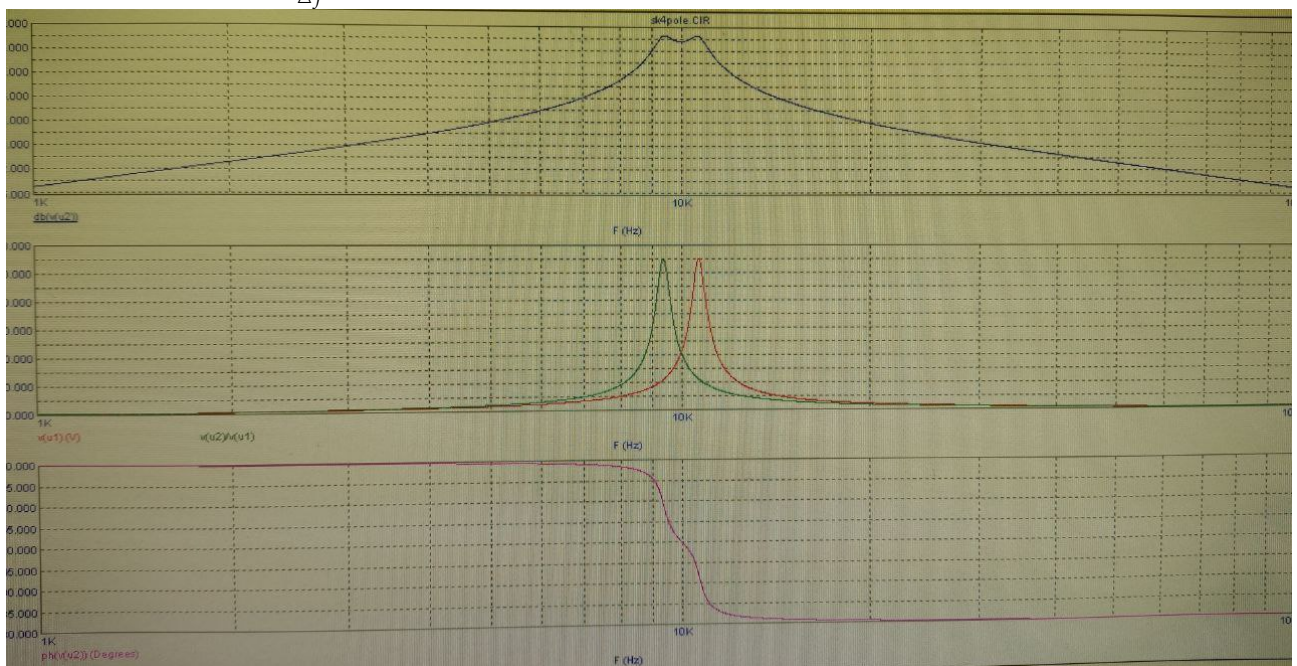


Рис. 4: АЧХ и ФЧХ Чебышева ПФ

Измерим уровни затухания на частотах $f_0/2$, $2f_0$ и $F_0/10$, $10f_0$:

$$\text{ПФ} : \quad 2f_0 \rightarrow -67\text{dB}, \quad 10f_0 \rightarrow -40.9\text{dB}$$

$$\text{ПФ} : \quad f_0/2 \rightarrow 67\text{dB}, \quad f_0/10 \rightarrow 41.1\text{dB}$$

2.1.3 Вывод

Проведенное моделирование подтверждает полученные теоретические выкладки.

2.1.4 Послеслово

Найдем передаточную функцию полосового звена Саллена-Ки на рисунке. Приведем емкостной импеданс к виду $Z_C = \frac{1}{pC} = \frac{R}{s}$; $s = pRC = \frac{p}{\omega_0}$. К тому же, не ограничивая общности, сопротивление R примем за единицу - безразмерная передаточная функция не зависит от того, в каких единицах измеряются сопротивления. Тогда импедансы резисторов окажутся равными 1 или 2, а импеданс емкости - равным $1/s$. Выразим потенциал u на выходе через потенциал в узле v :

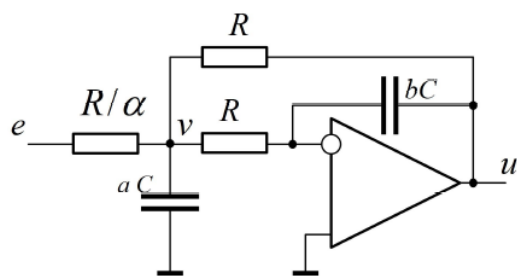
$$u = v \frac{2}{2 + \frac{1}{s}} K \Rightarrow v = u \frac{2s + 1}{2Ks}.$$

Запишем условие равенства нулю токов в узле v :

$$e - v = vs + v \frac{1}{2 + \frac{1}{s}} + v - u \Rightarrow e = v \frac{2(s^2 + 3s + 1)}{2s + 1} - u.$$

Исключив здесь v , получим результат. Формулы для передаточных функций двух других звеньев находятся по аналогии.

2.2 Звенья с двойной обратной связью

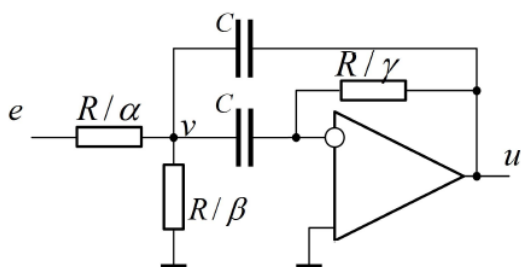


(а) фильтр нижних частот

$$H(s) = -\frac{K_0}{s^2 + 2\xi s + 1}$$

$$s = \frac{j\omega}{\omega_0} \quad \omega_0 = \frac{1}{RC} \quad Q = \frac{1}{2\xi}$$

$$\alpha = K_0 \quad a = Q(K_0 + 2) \quad b = \frac{1}{Q(K_0 + 2)}$$

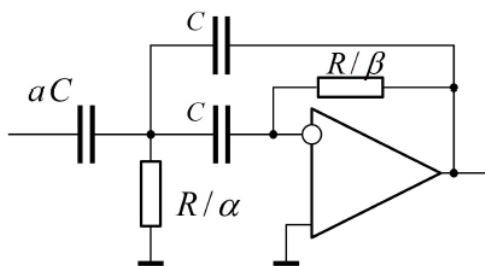


(b) полосовой фильтр

$$H(s) = -\frac{K_0 s}{s^2 + 2\xi s + 1}$$

$$s = \frac{j\omega}{\omega_0} \quad \omega_0 = \frac{1}{RC} \quad Q = \frac{1}{2\xi}$$

$$\alpha = K_0 \quad \gamma = \frac{1}{2Q} \quad \beta = 2Q - K_0$$



(с) фильтр верхних частот

$$H(s) = -\frac{K_0 s^2}{s^2 + 2\xi s + 1}$$

$$s = \frac{j\omega}{\omega_0} \quad \omega_0 = \frac{1}{RC} \quad Q = \frac{1}{2\xi}$$

$$a = K_0 \quad \alpha = Q(K_0 + 2) \quad \beta = \frac{1}{Q(K_0 + 2)}$$

2.2.1 Теория

Схемы звеньев второго порядка на операционном усилителе, охваченном двойной отрицательной обратной связью, показаны на рис. 2. Все они похожи топологически и различаются только расстановкой резисторов-конденсаторов. Расчет звеньев несколько усложняет схемная избыточность: звено второго порядка характеризуется всего тремя параметрами (резонансная частота ω_0 , коэффициент передачи K_0 и добротность Q), а в схеме присутствует целых пять свободных RC-компонентов. В показанных на рисунках схемах свобода выбора несколько ограничена тем, что два из пяти компонентов искусственно объявлены одинаковыми. И все равно задание трех параметров звена не позволяет выбрать оставшиеся четыре компонента однозначно. Приведенные на рисунках расчетные формулы относятся к одному из возможных вариантов выбора, выделенному простотой расчета.

Расчет звена начинается с выбора пары R, C , дающей заданную частоту $\omega_0 = 1/RC$. Конкретные значения R и C в определенной мере произвольны. Далее подключаются приведенные на рисунке в рамках расчетные формулы, которые позволяют однозначно определить номиналы всех пяти компонентов по заданным параметрам K_0 и

Q . Звенья с двойной обратной связью всегда устойчивы. Достижимые значения добротности лимитируются в них отношением номиналов компонентов: в любой схеме присутствует компонент со значением, пропорциональным Q , и компонент со значением, пропорциональным $1/Q$. Отношение номиналов этих компонентов растет как Q^2 , что создает сложности при больших Q .

2.2.2 Выполнение

1) Откроем прототип *amp1bp.cir* и реализуем полосовое звено с $f_0 = 5k$, $K_0 = 5$, $Q = 15$. Измерим ширину полосы по уровню $0.7 = -3dB$ и пиковое усиление QK_0 , оценим добротность:

$$\Delta f = 0.35k$$

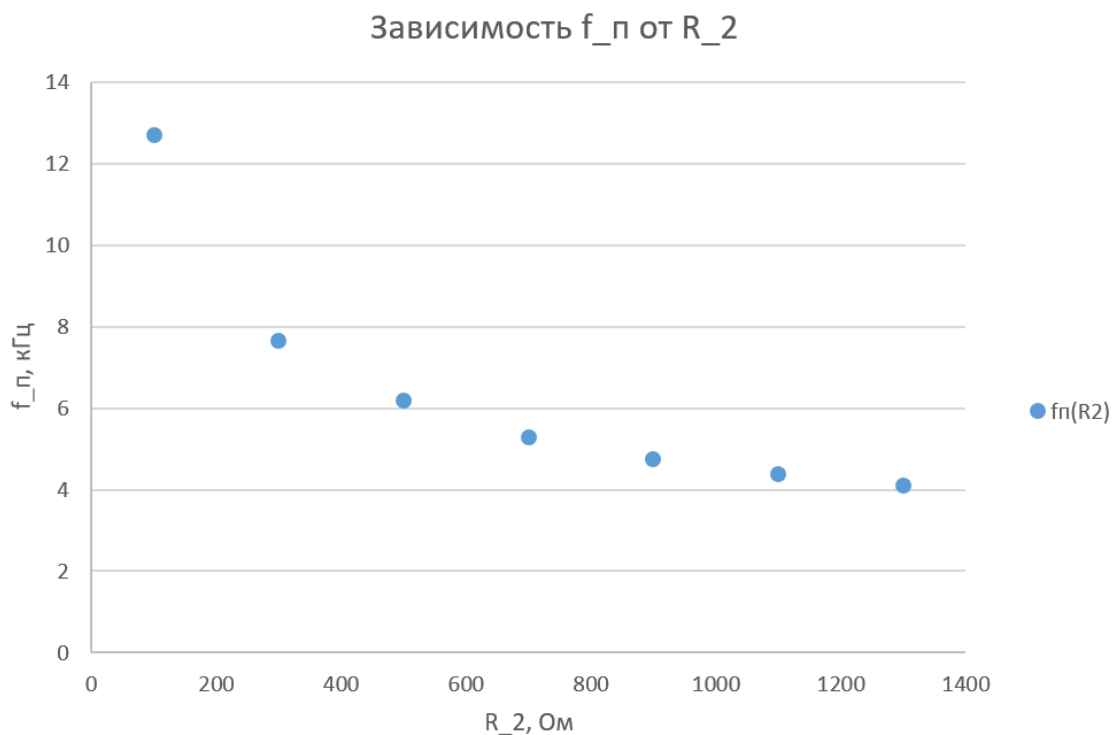
$$Q \approx 14.3$$

$$QK_0 \approx 75$$

Изучить поведение АЧХ при варьировании $R_2 = [100, 1.3k|200]$. Построить график зависимости частоты пика от R_2 .

f , кГц	4,11	4,38	4,74	5,27	6,18	7,65	12,7
R , кОм	1,3	1,1	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1

Построим график



2) Соберем звено на макетной плате. Экспериментально измерим параметры K_0 , f_0 , Q :

$$f_0 = 4.59 \text{ кГц}$$

$$K_m = 50$$

$$\Delta f = 470 \text{ Гц}$$

$$Q \approx 9.7$$

$$K_0 \approx 5$$

Как видим, значения сходятся с используемыми теоретическими параметрами.

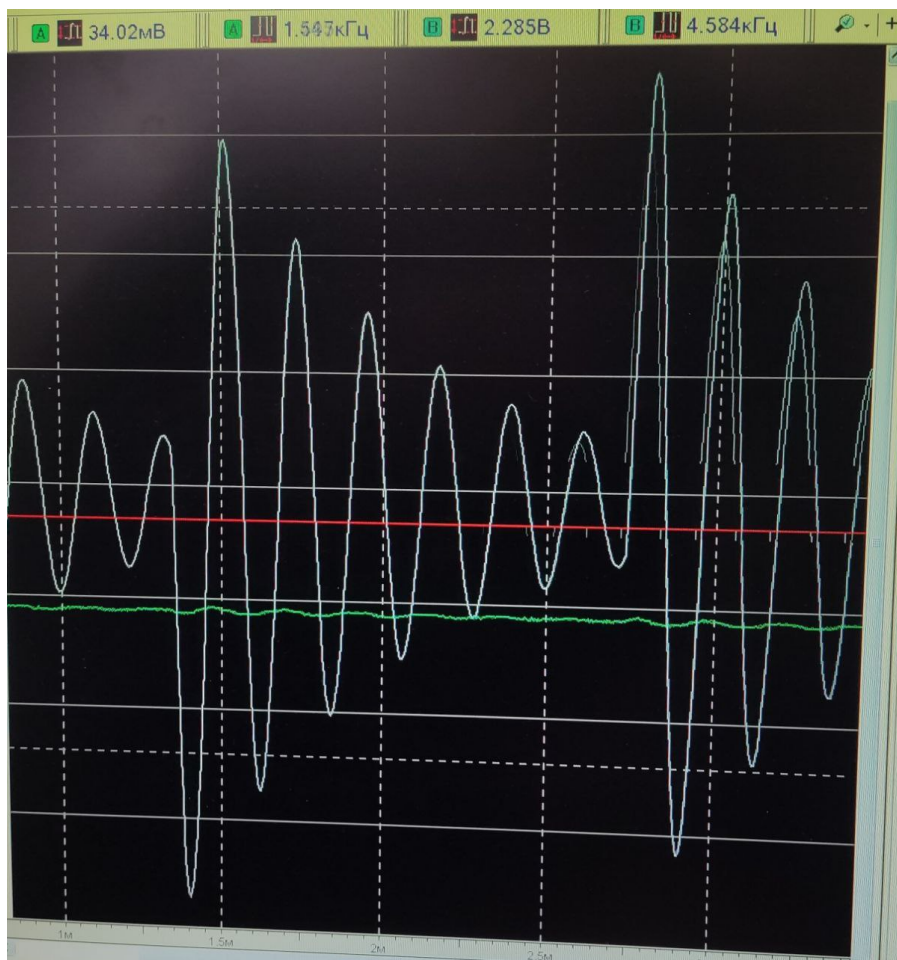
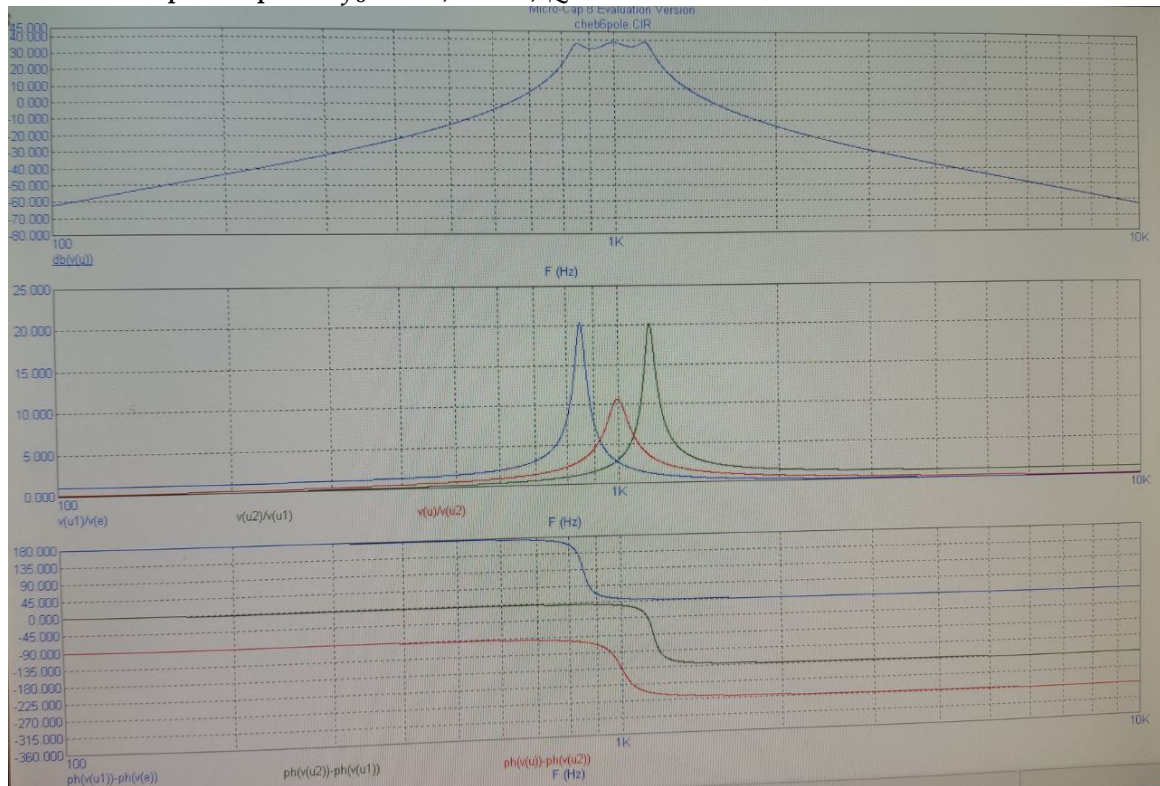


Рис. 5: $h(t)$ полосового звена при подаче прямоугольного низкочастотного сигнала

Можем заметить совпадение переходных характеристик собранной и смоделированной схемы.

3) Откроем прототип *cheb6pole.cir* и реализуем шестиполосный полосовой фильтр Чебышева с параметрами $f_0 = 1k$, $\varepsilon = 1$, $Q = 3$.



Измерим затухания на частотах $0.1k$, $0.5k$, $2k$, $10k$:

$$f = 100 : 61.7dB$$

$$f = 500 : 106.5dB$$

$$f = 2k : 101.1dB$$

$$f = 10k : 61.3dB$$

2.2.3 Вывод

Теория умная, практика умелая, в сумме - красивая лаба.

3 Вывод

Результаты моделирования, как и ожидается, тождественны теории, в то время как замеры на макетной плате незначительно от нее отличаются. Все это позволяет сказать, что использованные методы расчета и анализа безинерционных линейных цепей дают хорошие результаты в области применимости.