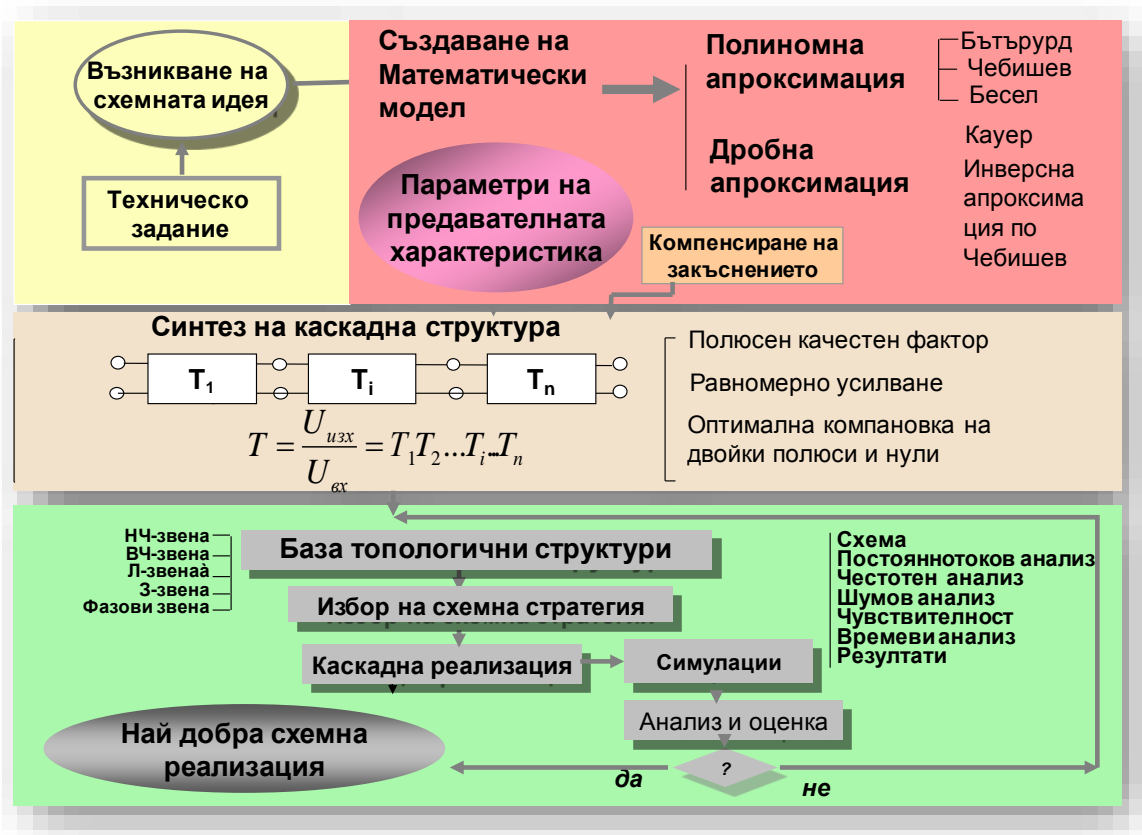


Демонстратор: Синтез на активен високочестотен филтър - апроксимация и каскадна реализация.

1. Цел:

Целта на демонстратора е да илюстрира методологията за синтез на активни филтри с всички необходими етапи и дейности за анализ, проектиране и оценка на високочестотен филтър в средата на **Filter Synthesis**.

Методологията за автоматизиран синтез на активни филтри, която следваме в работата си е представена на фиг. 1.



Фигура 1 Методология за автоматизиран синтез на активни

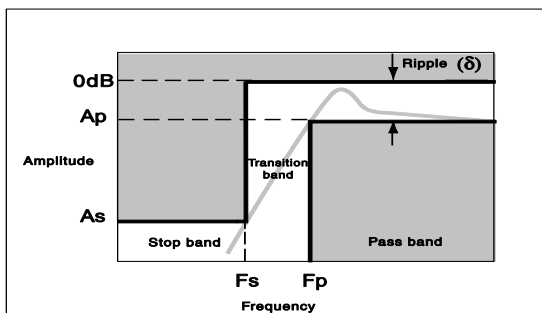
Filter Synthesis е програма за интерактивно проектиране подпомагащо синтеза и анализа на активни и пасивни филтри в средата на **MicroSim Design Lab**. Тя осигурява на потребителя възможности за извършване на серия от многократни проекти, визуализиране и документиране чрез отчети на резултатите и графиките от проектирането, принципните електронни схеми и създаване на интерфейс за симулационни пакети, вкл. PSpice, за допълнителна верификация на проекта.

2. Апроксимация на ВЧФ по изисквания към АЧХ в лентата на пропускане и лентата на задържане. Сравнение на методите на Бътървурт, Чебишев и Кауер.

Спецификацията на високочестотния филтър е дадена в таблица 1.

Таблица 1

№	Параметри	Означение	Стойност
1	Гранична честота в лентата на пропускане (<i>Pass-band cutoff frequency</i>)	f_p	400 Hz
2	Максимално допустимо затихване (неравномерност) на АЧХ в лентата на пропускане за честота f_p (<i>Maximum pass-band ripple</i>)	A_p	1 dB
3	Гранична честота в лентата на задържане (<i>Stop-band cutoff frequency</i>)	f_s	250 Hz
4	Минимално допустимо затихване на АЧХ в лентата на задържане за честота f_s (<i>Minimum stop-band attenuation for stop-band cutoff frequency</i>)	A_s	20 dB
5	Коефициент на усилване в лентата на пропускане (<i>Gain</i>)	G_o	6 dB



Фигура 2 Параметри на ВЧФ

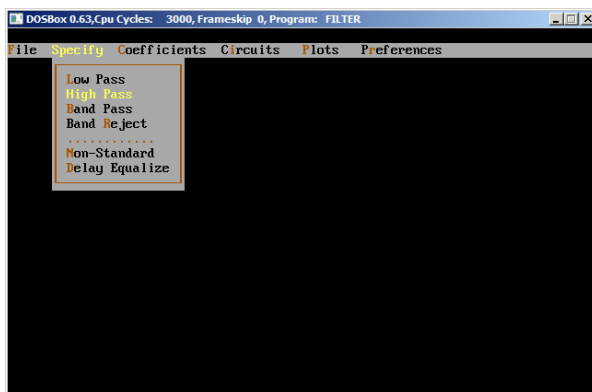
В средата на *Filter Synthesis* извършваме апроксимация по теоретичните методи на Бътървурт, Чебишев и Кауер.

Стартирайте програмата *Filter Synthesis*

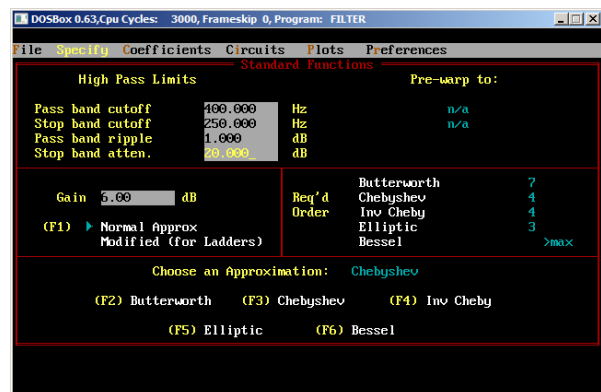


чрез иконата на Filter

С помощта на стрелките отворете диалоговият прозорец *Specify* и изберете вида на проектирания филтър (фиг. 3). Задайте изискванията към АЧХ посочени в таблица 1 (фиг. 4).



Фигура 3 Диалогов прозорец за задаване на параметрите на филтъра



Фигура 4 Зададени параметри

Програмата *Filter Synthesis* има богата база от теоретични методи за създаване на математическия модел на проектираната схема, а именно: **методите за полиномна апроксимация на Бътървурт (F2), на Чебишев (I род) (F3) и на Бесел (F6)**, както и методите за **дробно-рационална апроксимация на Кауер (Elliptic) (F5) и инверсната апроксимация на Чебишев (II род) (F4)**. Автоматично получавате информация за реда на предавателната

функция (**Req'd Order**) (фиг. 4.), от която можете да определите броя на елементарните функции (звена), на които се разлага предавателната функция (**Таблица 2**).



Анализът на получените резултати показва, че при различните методи за апроксимация, редът на предавателната функция е различен, като при метода *Кауер* той е най-малък (n=3), а сред полиномните апроксимации, най-добра е тази по метода на *Чебишев* (n=4).

Таблица 2

Параметър	Бътървурт (Butterworth)	Чебишев (Chebyshev)	Кауер (Elliptic, Cauey)
Ред на схемната функция	7	4	3
Брой елементарни функции (звена)	1 звено от 1 ред; 3 звено от 2 ред	2 звена от 2 ред	1 звено от 1 ред; 1 звено от 2 ред

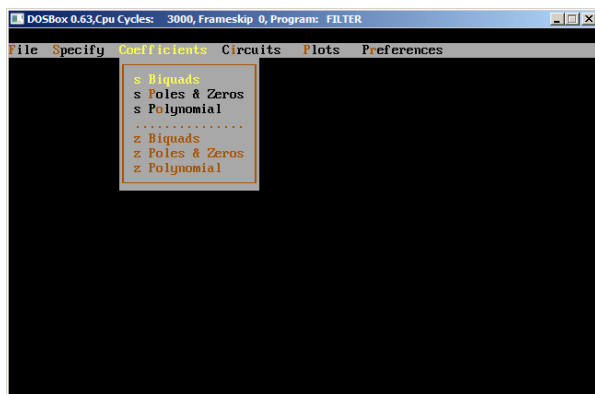


В литературни източници и други програмни продукти се използват различни означения за коефициентите и параметрите на предавателните функции. Във **Filter Synthesis** комплексната променливата е означена с *s* вместо *p*, коефициентите в числителя – с *k₂, k₁, k₀*, а коефициентите в знаменателя са изразени чрез полюсната честота ω_0 и полюсния качествен

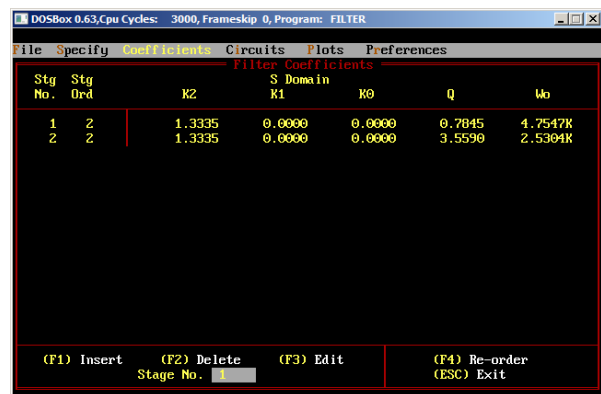
фактор *Q*, т.е. биквадратната предавателната функция има вида
$$T(s) = \frac{k_2 \cdot s^2 + k_1 \cdot s + k_0}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot s + \omega_0^2}$$

2.1. Апроксимация по метода на Чебишев

За апроксимацията по Чебишев (<F3>) можем да определим параметрите на предавателната функция. С бутона < Esc > излезте от активния прозорец **Specify** и отворете диалоговия прозорец **Coefficients** (фиг. 5). От менюто *s Biquads* ще получите информация за реда и стойностите на коефициентите в числителя *k₂, k₁, k₀*, полюсната честота ω_0 и полюсния качествен фактор *Q* на предавателните функции на съставните звена (фиг. 6). (С бутона < Esc > излезте от активния прозорец).



Фигура 5 Диалогов прозорец за получаване на коефициентите на елементарните предавателни функции



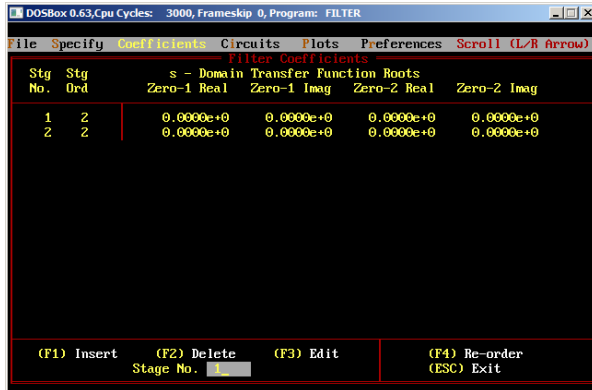
Фигура 6 Коефициенти на елементарните предавателни функции



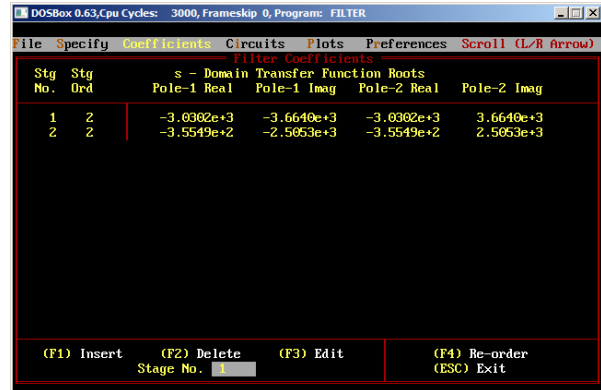
Получените резултати показват, че общата предавателна функция от 4 ред се разлага на 2 високочестотни елементарни предавателни функции от 2 ред (в числителя само коефициентът

k_2 пред втората степен на комплексната променлива е различен от нула). Полиномите в техните знаменатели са полиноми на Хурвиц (ω и Q са различни от нула и с еднакъв знак).

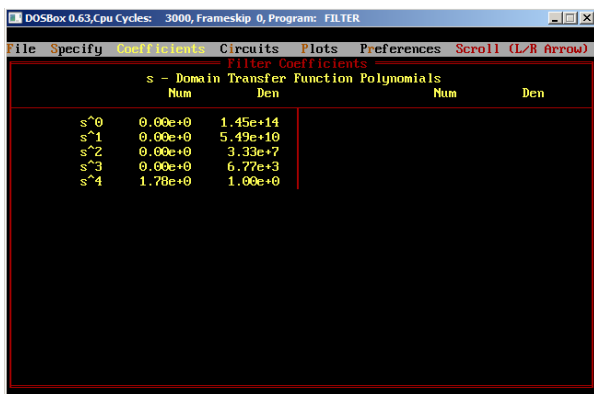
От менюто *s Poles&Zeros* ще получим подробна информация за стойностите на реалните и на имагинерните части на *нулите* на предавателната функция на отделните звена (фиг. 7). За да получим стойностите на реалните и имагинерните части на *полюсите* на елементарните предавателни функции (фиг. 8), е необходимо да се натисне 4 пъти стрелката за надясно.



Фигура 7 Нули на предавателните функции на съставните звена (в случая са разположени в безкрайността).



Фигура 8 Полюси на предавателните функции на съставните звена



Фигура 9 Коефициенти на предавателната функции, апроксимирана по Чебишев



Получените резултати показват, че нулите на елементарните предавателни функции, апроксимирани по Чебишев, са разположени в началото на координатната система, а комплексно спрегнатите двойки полюси имат отрицателна реална част (изпълнено е условието за устойчивост на схемите).

От менюто *s Polynomial* ще получите информация за стойностите на коефициентите в знаменателя на предавателната функция на пълната предавателна функция (фиг. 9).

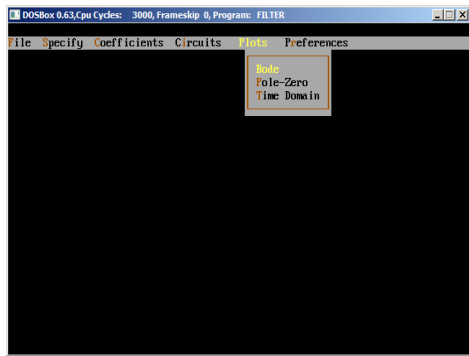
Математическият модел, получен по метода на Чебишев има вида:

$$T(s) = \frac{1,3335 \cdot s^2}{s^2 + \frac{4754,7}{0,7845} s + \sqrt{4754,7}} \cdot \frac{1,3335 \cdot s^2}{s^2 + \frac{2530,4}{3,559} s + \sqrt{2530,4}} = \frac{1,78 \cdot s^4}{1s^4 + 6,77e^3 s^3 + 3,33e^7 s^2 + 5,49e^{10} s + 1,45e^{14}}$$

Таблица 3

Параметър	I звено	II звено
$Q_p = \frac{\omega_p}{2\sigma_p}$	0,7845	3,559
ω_p	68,95	49,3
f_p	10,97	7,85

В диалоговия прозорец *Plots* (фиг. 10) ще получите възможност за графичен анализ, оценка и визуализация на резултатите от етапа апроксимация (Фиг. 11 и Фиг. 12).



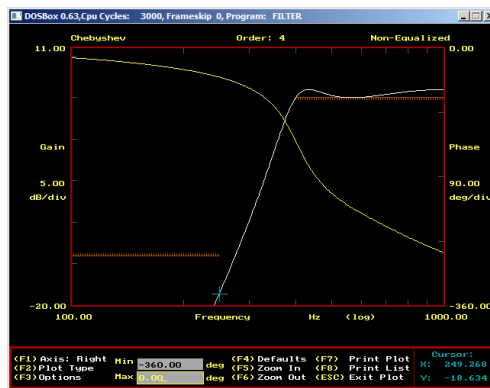
Фигура 10 Диалогов прозорец за получаване на резултатите в графичен вид



Фигура 11 Полюсно-нулевата диаграма по метода на Чебишев

Полюсите с по-висок качествен фактор са разположени по-близко до имагинерната ос. Двете нули съвпадат с началото на координатната система.

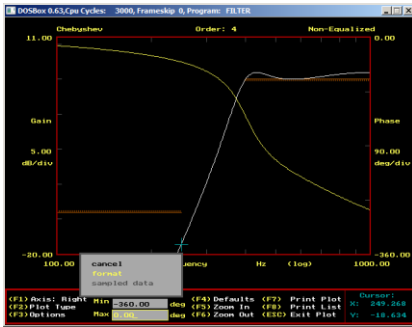
От менюто **Bode** ще получите **АЧХ** и **ФЧХ** за пълната предавателна функция, както и на елементарните предавателни функции (фиг. 12).



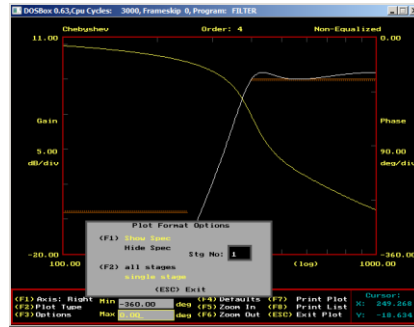
Фигура 12 АЧХ и ФЧХ по метода на Чебишев

За логаритмичен мащаб по абсцисната ос чрез бутона < F2 > изберете log. За да построите **АЧХ** в **dB** чрез бутона < F1 > изберете лява вертикална ос (*Left Vert*), след това чрез бутона < F2 > **dB** (*Gain - dB*). За да построите **ФЧХ** в същото работно поле, но на различна ос чрез бутона < F1 > изберете дясна вертикална ос (*Right Vert*), след това чрез бутона < F2 > фаза (*Phase*).

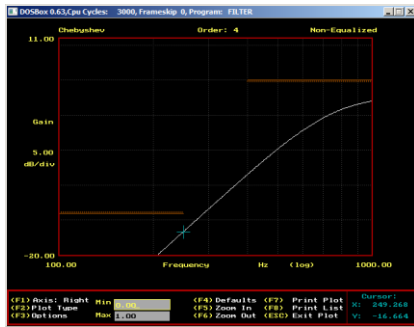
За да построите **АЧХ** в **dB** на съставните звена (фиг. 15, фиг. 16) чрез бутона < F1 > изберете дясна вертикална ос (*Right Vert*), след това чрез бутона < F2 > премахване **ФЧХ** (*no plot*). Чрез бутона < F3 > **format** (фиг. 13), а с бутона < F2 > изберете изобразяване на едно звено (*single stage*), след това в полето номер на звено (*Stg. №*) запишете номера на звеното (фиг. 14). Чрез бутона < ESC > автоматично се построява желаната графика. За да изберете подходящ мащаб на оста Y, с бутона < F1 > изберете лява вертикална ос (*Left Vert*), след това в полето **MAX** запишете **15** (фиг. 16).



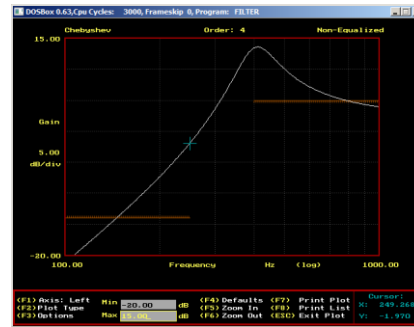
Фигура 13 Диалогов прозорец за избор на звено за изобразяване



Фигура 14 Диалогов прозорец за избор на звено за изобразяване



Фигура 15 АЧХ на първо звено по метода на Чебишев (0,7845)



Фигура 16 АЧХ на второ звено по метода на Чебишев (3,559)

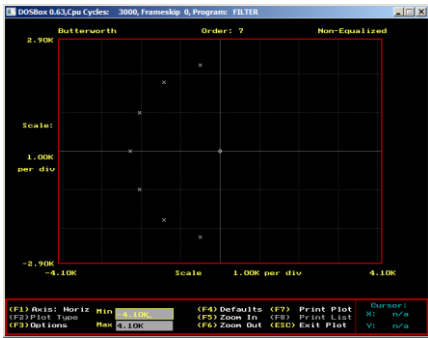


Звеното с по-голям качествен фактор (с номер 2) има отскок в АЧХ и по-голям наклон в преходната област.

2.2. Апроксимация по методите на Бътървурт и Кауер

Върнете се в диалоговият прозорец *Specify* и чрез бутоните < F2 > и < F5 > изберете последователно апроксимация по методите на *Бътървурт* и *Кауер* и повторете действията за получаване на резултатите в табличен и графичен вид. Резултатите подредете в таблици и направете коментар на получените характеристики.

Бътървурт



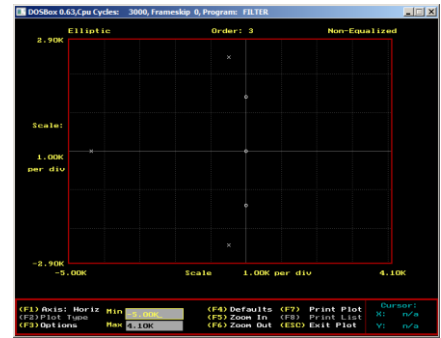
Фигура 17 Карта на полюсите и нулите по метода на Бътървурт

Чебишев

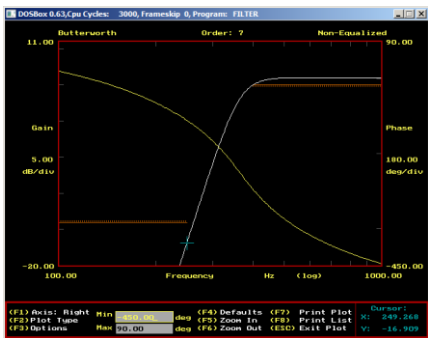


Фигура 18 Карта на полюсите и нулите по метода на Чебишев

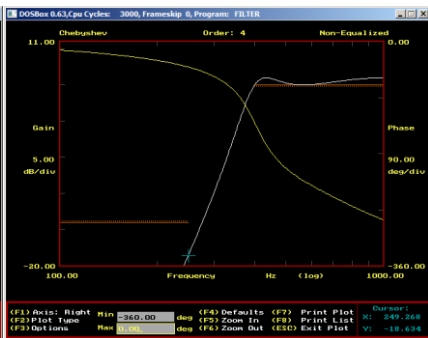
Кауер



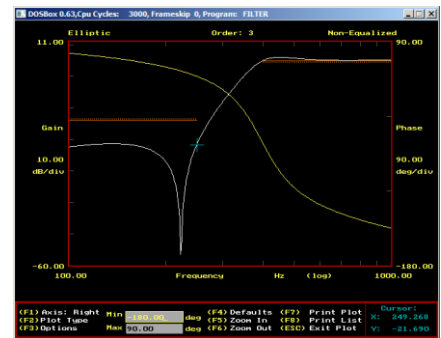
Фигура 19 Карта на полюсите и нулите по метода на Кауер



Фигура 20 АЧХ и ФЧХ по метода на Бътървурт



Фигура 21 АЧХ и ФЧХ по метода на Чебишев



Фигура 22 АЧХ и ФЧХ по метода на Кауер

Таблица 4

Апроксимация					
Бътървурт (Butterworth)		Чебишев (Chebyshev)		Кауер (Elliptic, Cauer)	
f, Hz	T(p), dB	f, Hz	T(p), dB	f, Hz	T(p), dB
401,17	5,036	401,17	5,082	401,17	5,06
249,27	-16,909	249,27	-18,634	249,27	-21,69

От получените резултати в текстови и графичен вид, можем да характеризираме методите за полиномиална апроксимация на Бътървурт, на Чебишев и метода на Кауер за дробно рационална апроксимация.



Полюси и нули:

- при метода на Бътървурт полюсите са разположени равномерно в кръг в лявата полуравнина (което удовлетворява условията за устойчивост), а за звеното от 1 ред, полюстът лежи на абсцисната ос; има две нули в началото на координатната система;
- при метода на Чебишев двете двойки комплексни полюси са разположени равномерно по елипса в лявата полуравнина (което удовлетворява условията за устойчивост); има две нули в началото на координатната система.
- апроксимацията по метода на Кауер е дробно-рационална апроксимация с нули, разположени върху имагинерната ос, а за звеното от 1 ред, нулата е разположена в началото на координатната система. Понеже предавателната функция е от 3^{ти} ред,

двойката комплексни полюси са разположени в лявата полуравнина, а третият полюс лежи върху реалната ос в лявата полуравнина.



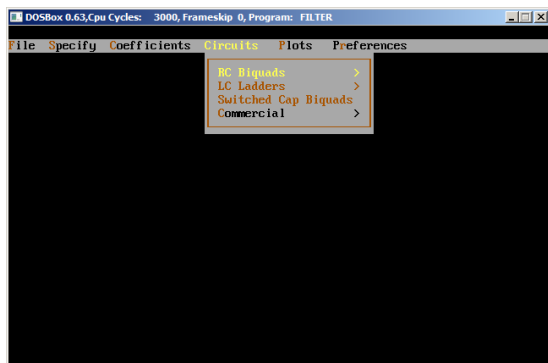
АЧХ и ФЧХ:

- АЧХ на функцията апроксимирана по метода на *Бътървурт* съвпада с идеалния НЧФ прототип само за честота $\Omega = 0$, след което нейната неравномерност нараства. Стръмността на АЧХ в преходната област е равна на $20.n \text{ dB/dec}$. ФЧХ нараства линейно в областта на ниските честоти;
- Апроксимираната предавателна функция по теоретичния метод на Чебишев има равно вълнова АЧХ, която в лентата на пропускане съвпада с идеалния НЧФ прототип в повече точки, а не само в една както е при апроксимацията по Бътървурт, което зависи от степента на функцията n . Параметрите на апроксимацията по Чебишев ε и n осигуряват две степени на свобода. Това дава възможност апроксимацията да се извърши при удовлетворяване на по-голям брой изисквания, поставени към проектирания филтър;
- Теоретичният метод на Кауер внася качествено нов елемент в апроксимацията - предавателна функция има нули за крайни честоти. Физическата интерпретация на този факт са филтри, които осигуряват коефициент на предаване равен на нула за определени реални честоти в лентата на задържане.

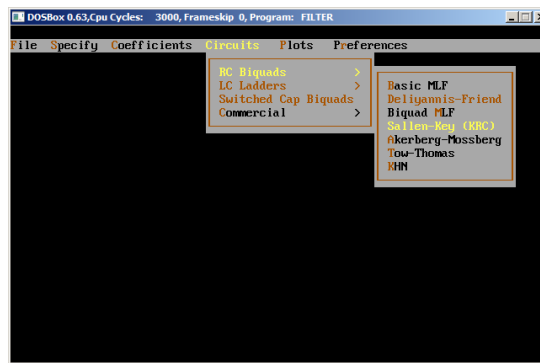
3. Каскадна реализация на апроксимираната по метода на Чебишев предавателна функция чрез схемата на Селен-Кий

3.1. Избор на схемна стратегия

Върнете се в диалоговия прозорец *Specify* и чрез бутона < F3 > изберете апроксимация по методите на *Чебишев*. В диалоговия прозорец *Circuits* (фиг. 23) изберете стратегия на реализация с активни RC-звена (*RC Biquads*).



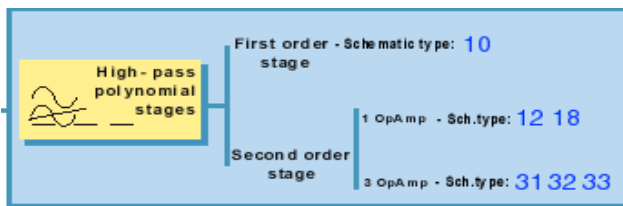
Фигура 23 Диалогов прозорец за избор на схемна стратегия за реализация



Фигура 24 Диалогов прозорец за избор на схема за реализация



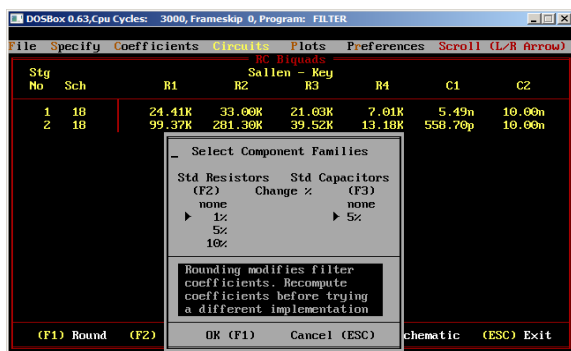
Програмата *Filter Synthesis* позволява използването на стратегии и процедури за схемна реализация, които включват активни RC-звена (*RC Biquads*), пасивни LC-многозвенни филтри (*LC Ladders*), звена с превключваеми кондензатори (*Switched Cap Biquads*), комерсиални филтри (*Commercials*). Групата на активни RC-филтри обхваща повече от 30 типови схеми с операционни усилватели обхванати от честотно-зависими обратни връзки: схеми с многоконтурна отрицателна обратна връзка (*Basic MLF*), лентов филтър на Дилиянис (*Delyannis-Friend*), биквадратно звено с многоконтурна отрицателна обратна връзка (*Biquad MLF*), схема на Селен-Кий (*Sallen-Key KRC*), схема на Акерберг-Мосберг (*Akerberg-Mossberg*) и т.н.



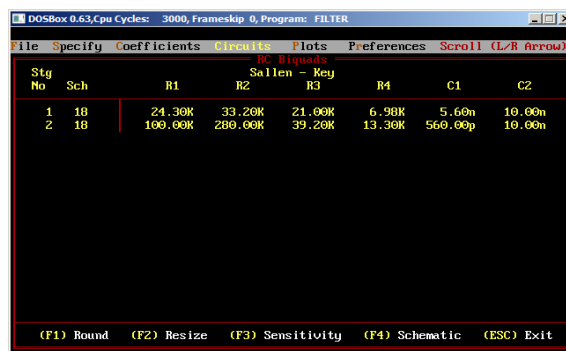
Фигура 25 База топологични структури за реализация на нискочестотни филтри

На фиг. 25 е показана базата от топологични структури за реализация на високочестотни звена от първи и втори ред във **Filter Synthesis**. В зависимост от типа елементарна предавателна функция, системата осигурява селективен достъп до схемите, които могат да бъдат използвани (тези, които са маркирани в кафяво, не могат да се използват при реализацията).

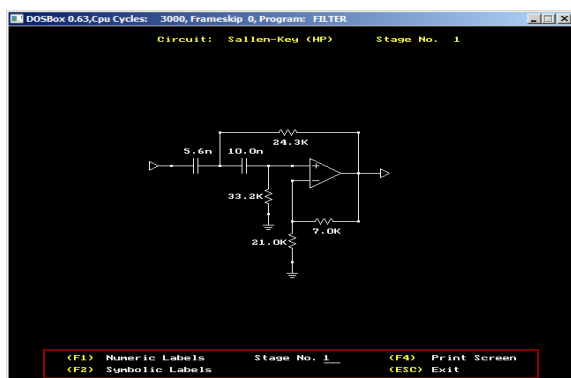
Избираме широко използваната в инженерната практика схемна реализация със схемата на Селен-Кий (**Sallen-Key KRC**) (фиг. 24). Тя включва шест пасивни елемента (4 резистора и два кондензатора). Чрез бутона < F1 > може да зададете класа на точност на пасивните елементи. За целта чрез бутона < F2 > задайте **1%** за резисторите, а с бутона < F3 > - **5%** за кондензаторите (фиг. 26). За да потвърдите въведеното, натиснете бутона < F1 > (фиг. 27). Чрез бутона < F4 > ще получите схемата със стойностите на 1^{st} звено (фиг. 28). За да получите схемата на 2^{nd} звено натиснете стрелката нагоре или надолу (фиг. 29).



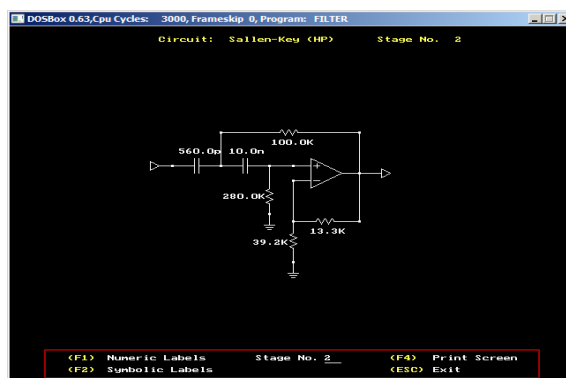
Фигура 26 Диалогов прозорец за избор на класа на точност на пасивните елементи



Фигура 27 Стойности на схемните параметри



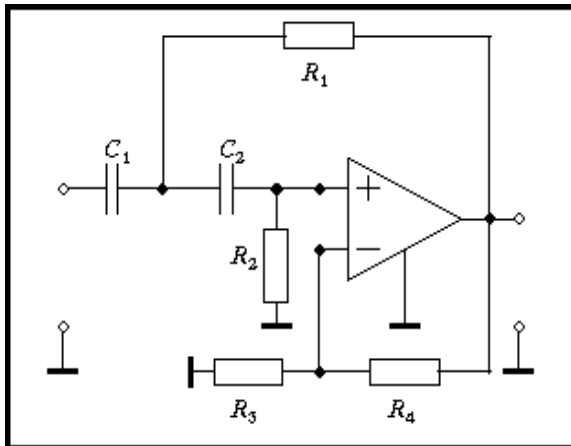
Фигура 28 Схема с изчислените параметри на първото звено



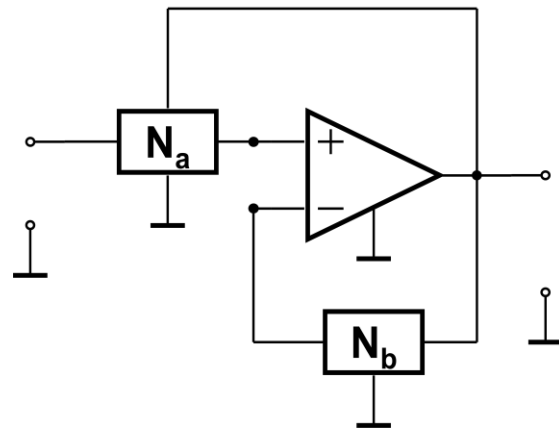
Фигура 29 Схема с изчислените параметри на второто звено

3.2. Анализ на схемата на Селен-Кий и определяне на параметрите в общ вид

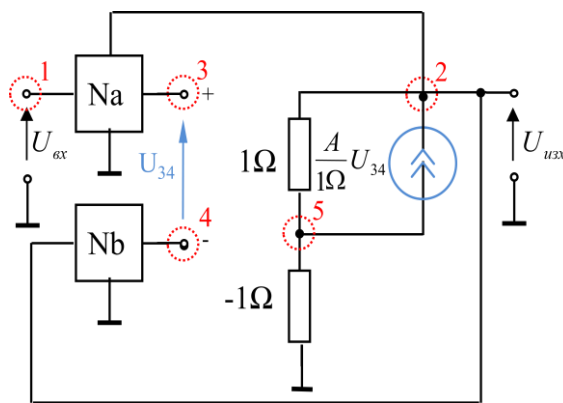
Нека за избраната схема за реализация (Фиг.30) да определим предавателната функция по напрежение в символен вид, функциите на относителната чувствителност на параметрите k_2 , ω_0 и Q по отношение изменението на пасивните елементи. За целта прилагаме метода на възловите напрежения.



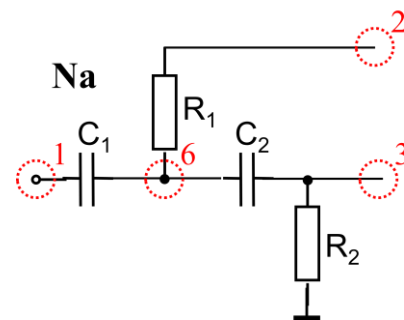
Фигура 30 Схема на Селен-Кий



Фигура 31 Структурна схема с многополюсник



Фигура 32 Еквивалентна схема



Фигура 33 Многополюсна подсхема

Матрицата на проводимостите на схемата от Фиг. 32 има вида:

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11}^{N_a} & Y_{12}^{N_a} & Y_{13}^{N_a} & 0 & 0 \\ Y_{21}^{N_a} & Y_{22}^{N_a} + Y_{22}^{N_b} + 1 & Y_{23}^{N_a} - A & Y_{24}^{N_b} + A & -1 \\ Y_{31}^{N_a} & Y_{32}^{N_a} & Y_{33}^{N_a} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{42}^{N_b} & 0 & Y_{44}^{N_b} & 0 \\ 0 & -1 & A & -A & 0 \end{bmatrix}$$

Понеже получената матрица е по голяма от **4x4** (с размерност **5x5**), добре е тя да бъде развита по елементите на 5-ти стълб (стълб или ред с най-малко ненулеви елементи):

$$[Y] = (-1)^{2+5} \cdot (-1) \cdot \begin{bmatrix} Y_{11}^{N_a} & Y_{12}^{N_a} & Y_{13}^{N_a} & 0 \\ Y_{31}^{N_a} & Y_{32}^{N_a} & Y_{33}^{N_a} & 0 \\ 0 & Y_{42}^{N_b} & 0 & Y_{44}^{N_b} \\ 0 & -1 & A & -A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}^{N_a} & Y_{12}^{N_a} & Y_{13}^{N_a} & 0 \\ Y_{31}^{N_a} & Y_{32}^{N_a} & Y_{33}^{N_a} & 0 \\ 0 & Y_{42}^{N_b} & 0 & Y_{44}^{N_b} \\ 0 & -1 & A & -A \end{bmatrix}$$

Коефициентът на предаване по напрежение K_U при отворена верига е $K_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\Delta_{ab}}{\Delta_{aa}}$.

Входният възел е означен с номер 1, а изходният с 2, следователно е необходимо да се определят адюнгираните количества :

$$\Delta_{11} = (-1)^{1+1} \cdot \begin{bmatrix} Y_{32}^{N_a} & Y_{33}^{N_a} & 0 \\ Y_{42}^{N_b} & 0 & Y_{44}^{N_b} \\ -1 & A & -A \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} Y_{32}^{N_a} & 0 \\ 0 & -A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{42}^{N_b} & 0 \\ A & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{33}^{N_a} & Y_{44}^{N_b} \\ -1 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{32}^{N_a} & Y_{44}^{N_b} \\ 0 & A \end{bmatrix} \right\} = ;$$

$$= 0 + 0 + (Y_{33}^{N_a})(Y_{44}^{N_b})(-1) - 0 - (Y_{33}^{N_a})(Y_{42}^{N_b})(-A) - (Y_{32}^{N_a})(Y_{44}^{N_b})(A) = (-Y_{32}^{N_a} \cdot Y_{44}^{N_b} + Y_{33}^{N_a} \cdot Y_{42}^{N_b})A - Y_{33}^{N_a} \cdot Y_{44}^{N_b}$$

$$\Delta_{12} = (-1)^{1+2} \cdot \begin{bmatrix} Y_{31}^{N_a} & Y_{33}^{N_a} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{44}^{N_b} \\ 0 & A & -A \end{bmatrix} = (-1) \cdot \left\{ \begin{bmatrix} Y_{31}^{N_a} & 0 \\ 0 & -A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ A & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{33}^{N_a} & Y_{44}^{N_b} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{31}^{N_a} & Y_{44}^{N_b} \\ 0 & A \end{bmatrix} \right\} =$$

$$= (-1) \cdot [0 + 0 + 0 - 0 - 0 - (Y_{31}^{N_a})(Y_{44}^{N_b})(A)] = Y_{31}^{N_a} \cdot Y_{44}^{N_b} \cdot A$$

$$\Delta_{11} = (-Y_{32}^{N_a} \cdot Y_{44}^{N_b} + Y_{33}^{N_a} \cdot Y_{42}^{N_b})A - Y_{33}^{N_a} \cdot Y_{44}^{N_b}; \quad \Delta_{12} = Y_{31}^{N_a} \cdot Y_{44}^{N_b}.$$

Отчитайки, че коефициента на усилване по напрежение на ОУ е $A \rightarrow \infty$, за предавателната функция K_U се получава:

$$K_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\Delta_{12}}{\Delta_{11}} = \frac{Y_{31}^{N_a} \cdot Y_{44}^{N_b} \cdot A}{(-Y_{32}^{N_a} \cdot Y_{44}^{N_b} + Y_{33}^{N_a} \cdot Y_{42}^{N_b})A - Y_{33}^{N_a} \cdot Y_{44}^{N_b}} = \frac{Y_{31}^{N_a} \cdot Y_{44}^{N_b}}{-Y_{32}^{N_a} \cdot Y_{44}^{N_b} + Y_{33}^{N_a} \cdot Y_{42}^{N_b} + \frac{Y_{33}^{N_a} \cdot Y_{44}^{N_b}}{A}} \Big|_{A \rightarrow \infty} =$$

$$= \frac{Y_{31}^{N_a}}{-Y_{32}^{N_a} + Y_{33}^{N_a} \frac{Y_{42}^{N_b}}{Y_{44}^{N_b}}}$$

Анализът на многополюсната подсхема от (фиг. 33) се извършва по метода с възловите напрежения и редуциране на вътрешния възел 6. Многополюсната подсхема **Na** се описва с матрицата:

$$[Y^{N_a}] = \begin{bmatrix} p \cdot C_1 & 0 & 0 & -p \cdot C_1 \\ 0 & \frac{1}{R_1} & 0 & -\frac{1}{R_1} \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_2} + p \cdot C_2 & -p \cdot C_2 \\ -p \cdot C_1 & -\frac{1}{R_1} & -p \cdot C_2 & \frac{1}{R_1} + p \cdot C_1 + p \cdot C_2 \end{bmatrix}.$$

Редуцирайки вътрешния възел 6, за участващите в предавателната функция параметри на многополюсната подсхема **Na** се получава:

$$Y'_{31} = Y_{31} - \frac{Y_{36} \cdot Y_{61}}{Y_{66}} = 0 - \frac{(-p \cdot C_2)(-p \cdot C_1)}{\frac{1}{R_1} + p \cdot C_1 + p \cdot C_2} = -\frac{C_1 \cdot C_2 \cdot p^2}{(C_1 + C_2) \cdot p + \frac{1}{R_1}};$$

$$Y'_{32} = Y_{32} - \frac{Y_{36} \cdot Y_{62}}{Y_{66}} = 0 - \frac{(-p \cdot C_2) \left(-\frac{1}{R_1}\right)}{\frac{1}{R_1} + p \cdot C_1 + p \cdot C_2} = -\frac{\frac{C_2}{R_1} \cdot p}{(C_1 + C_2) \cdot p + \frac{1}{R_1}};$$

$$Y'_{33} = Y_{33} - \frac{Y_{36} \cdot Y_{63}}{Y_{66}} = \frac{1}{R_2} + p \cdot C_2 - \frac{(-p \cdot C_2)(-p \cdot C_2)}{\frac{1}{R_1} + p \cdot C_1 + p \cdot C_2} = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot p^2 + \left(\frac{C_2}{R_1} + \frac{C_1}{R_2} + \frac{C_2}{R_2}\right) \cdot p + \frac{1}{R_1 \cdot R_2}}{(C_1 + C_2) \cdot p + \frac{1}{R_1}}.$$

Тогава за предавателната функция по напрежение на схемата се получава:

$$K_U = -\frac{p^2 \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)}{p^2 + \left[\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \left(-\frac{R_4}{R_3}\right)\right] \cdot p + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} = \frac{k_2 \cdot p^2}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot p + \omega_0^2}$$

От сравнението на лявата и дясната част на горното уравнение следва:

$$k_2 = 1 + \frac{R_4}{R_3};$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}};$$

$$\frac{1}{Q} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \left(\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} + \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \right) - \frac{R_4}{R_3} \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}}.$$

Определянето на функцията на относителната чувствителност на коефициента k_2 , на ω_0 и на Q се извършва чрез диференциране на съответните изрази спрямо параметрите на елементите R_i и C_i .

Функциите на относителната чувствителност на коефициента k_2 се получават:

$$S_{R_1}^{k_2} = \frac{\partial k_2}{\partial R_1} \cdot \frac{R_1}{k_2} = \frac{\partial \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)}{\partial R_1} \cdot \frac{R_1}{1 + \frac{R_4}{R_3}} = 0.$$

$$\text{Аналогично: } S_{R_2}^{k_2} = 0; \quad S_{R_3}^{k_2} = -\frac{R_4}{R_3 + R_4}; \quad S_{R_4}^{k_2} = \frac{R_3}{R_3 + R_4}; \quad S_{C_1}^{k_2} = 0; \quad S_{C_2}^{k_2} = 0.$$

Функциите на относителната чувствителност на ω_0 се получават:

$$S_{R_1}^{a_0} = S_{R_2}^{a_0} = S_{C_1}^{a_0} = S_{C_2}^{a_0} = -0,5; S_{R_3}^{a_0} = S_{R_4}^{a_0} = 0.$$

Функциите на относителната чувствителност на Q са:

$$S_{R_1}^Q = -\frac{1}{2} + Q \left(\sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}} + \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} \right); S_{R_2}^Q = -S_{R_1}^Q;$$

$$S_{R_2}^Q = -\frac{Q}{2} \left(\frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{R_2 R_3 C_2}{C_1}} - \sqrt{\frac{R_3 C_2}{R_2 C_1}} + \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_3 C_5}} \right);$$

$$S_{R_3}^Q = -Q \frac{R_4}{R_3} \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}}; S_{R_4}^Q = -S_{R_3}^Q$$

$$S_{1+\frac{R_4}{R_3}}^Q = Q \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}}.$$

Оказва се, че функциите на чувствителността на честотата ω_0 към изменението на част от пасивните елементи има стойност 0, а към изменението на останалите е със стойност -0,5. Това означава, че при изменение на съответния елемент с 2% граничната честота се променя с 1% и то в противоположна посока (знак “минус”).



Отрицателната обратна връзка (R_3 и R_4) позволява регулиране на усилването и на качествения фактор на звената, но води до увеличаване на чувствителността на схемната функция от параметрите на елементите.

3.3. Изчисляване на чувствителността в средата на *Filter Synthesis*

Чрез бутона < F3 > ще получите функциите на относителната чувствителност на 1^o звено (фиг. 34). За да получите и за 2^o звено натиснете стрелката нагоре или надолу (фиг. 35).

	S(R2)	S(K1)	S(R0)	S(Q)	S(W0)
R1	0.0000	0.0000	0.0000	-0.9165	-0.5000
R2	0.0000	0.0000	0.0000	0.9167	-0.5000
R3	-0.2494	0.0000	0.0000	-0.4105	0.0000
R4	0.2495	0.0000	0.0000	0.4105	0.0000
C1	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0064	-0.5000
C2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0064	-0.5000

Фигура 34 Функции на чувствителността на първо звено

	S(R2)	S(K1)	S(R0)	S(Q)	S(W0)
R1	0.0000	0.0000	0.0000	-9.4529	-0.5000
R2	0.0000	0.0000	0.0000	9.4707	-0.5000
R3	-0.2533	0.0000	0.0000	-8.9533	0.0000
R4	0.2533	0.0000	0.0000	8.9703	0.0000
C1	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0283	-0.5000
C2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0283	-0.5000

Фигура 35 Функции на чувствителността на второ звено

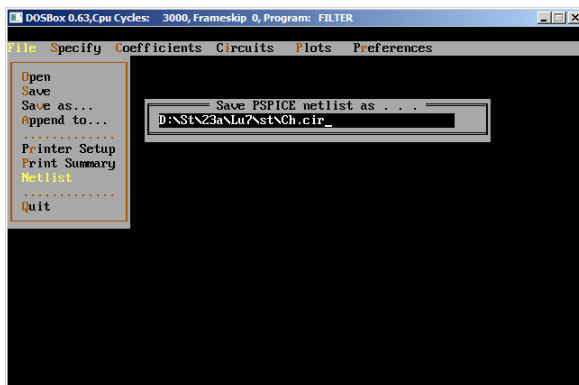


Получените резултати съвпадат с получените чрез числен анализ, което потвърждава направените изводи.

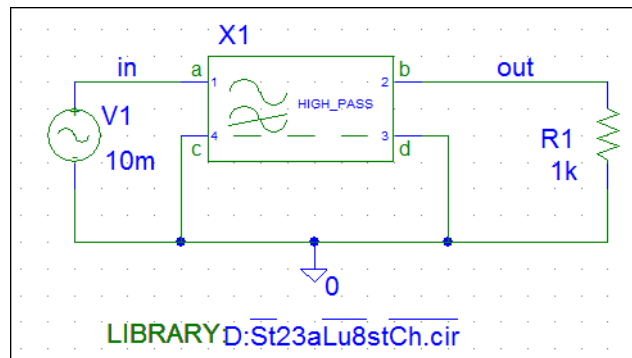
4. Верификация на проекта в средата на *Design Lab*

4.1. Създаване на модел на филтъра, представен като подсхема в PSpice

За да извършим PSpice симулации с цел оценка на честотните характеристики и параметри на проектирания активен ВЧ филтър, е необходимо да създадем файл с описание на връзките и елементите на филтъра **Netlist (.cir)** представен като подсхема. За целта използваме вградените функции на програмата **Filter Synthesis**. От диалоговия прозорец **File** изберете **Netlist** и запишете във вашата работна директория създадения файл (фиг. 36). За начертаването на схемата на опитната постановка използвайте структурната схема от фиг. 37.



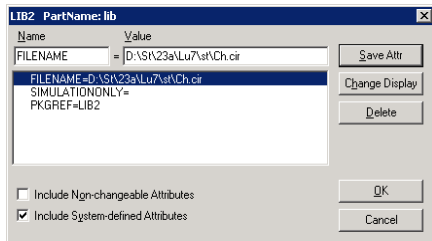
Фигура 36 Диалогов прозорец за създаване на Netlist



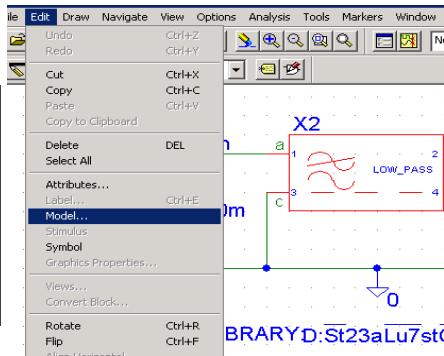
Фигура 37 Схема за симулационно тестване на АЧХ и ФЧХ

За да дефинирате подсхемата на активния филтър извършете следното:

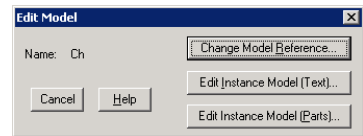
- от символната библиотека **Filter.slb** извикайте елемента за нискочестотен филтър с име **High_Pass** и го свържете като четириполюсник с общ извод между входа и изхода (фиг. 37);
- от символната библиотека **Special.slb** извикайте елемента с име **Library** и го разположете на произволно място в работната страница (фиг. 37);
- задайте атрибутите на елемента **LIBRARY** – името, разширението и мястото на съхранение на файла съдържащ модела на синтезирания активен филтър (фиг. 38);
- изберете елемента **High_Pass** (да е оцветен в червено) и от от менюто **Edit** изберете **Model** (фиг. 39).
- от прозореца **Edit Model** (фиг. 40) изберете **Change Model Reference ...**;
- в диалоговия прозорец **Enter New Model Name**: запишете името на файла съдържащ модела на синтезирания активен филтър (фиг. 41);



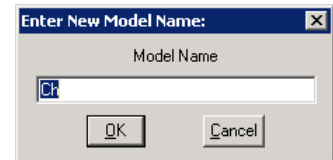
Фигура 38 Атрибути на елемента LIBRARY



Фигура 39 Избор на меню Model



Фигура 40 Прозорец Edit Model



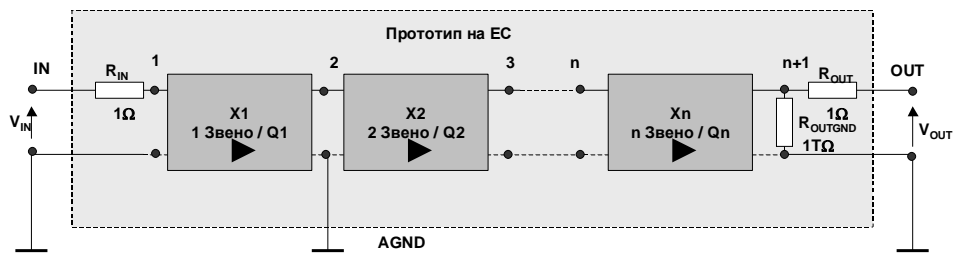
Фигура 41 Задаване на името на модел

Ако кликнете два пъти върху името на файла съдържащ модела на синтезирания активен филтър записан в елемента **LIBRARY** ще получите описанието на филтъра като подсхема (таблица 5).

Таблица 5

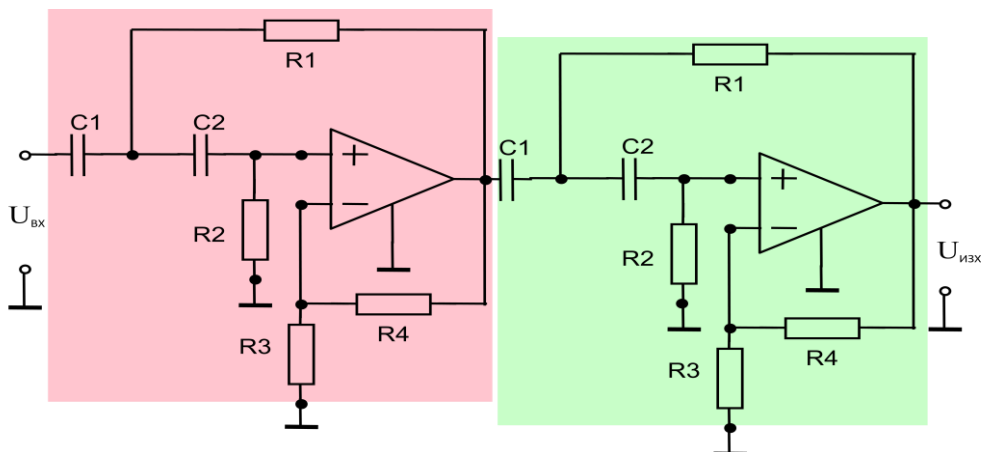
***** FILTER SUBCKTS *****		Изисквания към АЧХ на филтъра
* Filter Designer 6.3 - MicroSim Corp.		
* Design File Name: D:\St\23a\Lu8\st\Ch.cir		
* Order: 4		
* Data type: Continous		
* Function: High Pass		
* Approximation: Chebyshev		
* Specification: Pass band cutoff: 400.0000 Hz		
* Stop band cutoff: 250.0000 Hz		
* Pass band ripple: 1.0000 dB		
* Stop band atten.: 20.0000 dB		
* Gain: 6.0000 dB		
* Circuit Implementation: Sallen - Key		
.SUBCKT Ch IN OUT AGND		Описание на подсхемата: име (Ch) входен възел (IN) изходен възел (OUT) маса (AGND)
RIN IN 1 1		Входно съпротивление на подсхемата
X1 1 2 AGND SKKRCHP/STG		Описание на първото звено
+ PARAMS: C1VAL= 5.600e-9 C2VAL= 10.000e-9		
+ R1VAL= 2.430e+4 R2VAL= 3.320e+4		
+ R3VAL= 2.100e+4 R4VAL= 6.980e+3		
X2 2 3 AGND SKKRCHP/STG		Описание на второто звено
+ PARAMS: C1VAL= 5.600e-10 C2VAL= 10.000e-9		
+ R1VAL= 1.000e+5 R2VAL= 2.800e+5		
+ R3VAL= 3.920e+4 R4VAL= 1.330e+4		
ROUT 3 OUT 1		Изходно съпротивление на подсхемата
ROUTGND OUT AGND 1E12		Изходно съпротивление филтъра
.ENDS		Край на подсхемата

В общия случай, каскадната структура на филтъра е представена на Фиг. 42. В конкретния проект подсхемата съдържа само две съставни звена.



Фигура 42 Каскадна структура на филтъра

Схемата на проектирания филтър има вида от Фиг. 43, а стойностите на елементите са дадени в Таблица 6.



Фигура 43 Схема на проектирания филтър

Таблица 6

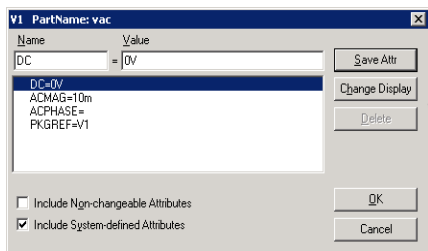
Стойности на елементите		
Параметри	I звено	II звено
R1, kΩ	24,3	100
R2, kΩ	33,2	280
R3, kΩ	21	39,2
R4, kΩ	6,98	13,3
C1, pF	5,6	560
C2, pF	10	10

4.2. Подготовка и извършване на PSpice симулации

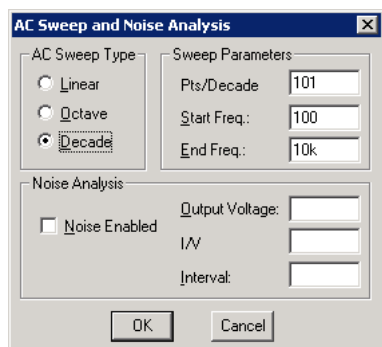
На входа на схемата поставете променливотоков независим източник на напрежение **VAC** и задайте атрибутите му: име **Vin** и **ACMAG 10mV**, както е показано на фиг. 44.

Специфицирайте параметрите на честотния анализ **AC sweep**.

Честотният диапазон за изследване ще зададете, ако за начална стойност (**Start value**) запишете **100**, а за крайна стойност (**End value**) **10K**. Полученият честотен диапазон е голям, което предполага използването на декаден (**Decade**) мащаб (тип) на развивката (**AC Sweep type**), при което изчисленията е добре да се извършват за не повече от **100** точки в декада (**Pts/Decade**) (фиг. 45). Стартирайте симулациите. В графичния постпроцесор (програмен осцилоскоп) **Probe** в едно работно поле, но на различни оси постройте **AЧХ** и **ФЧХ** (фиг. 46).

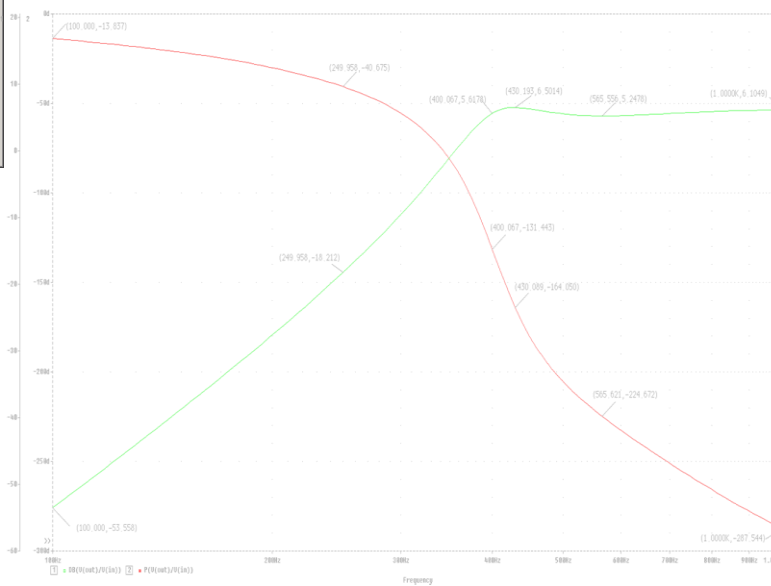


Фигура 44 Атрибути на входния сигнал



Фигура 46

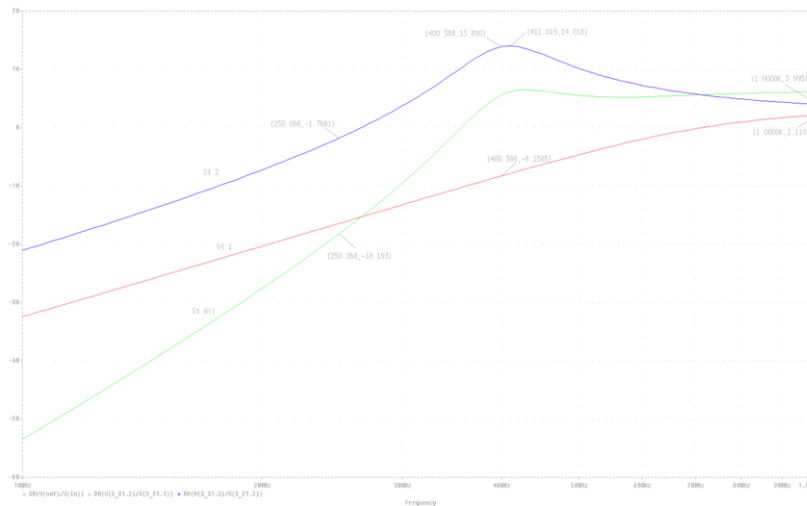
Параметри на честотния анализ



Фигура 45

АЧХ и ФЧХ на проектираният филтър

В едно работно поле, постройте АЧХ на целия филтър и на отделните съставни звена (фиг. 47).



Фигура 47 АЧХ на целия филтър и на отделните звена

Таблица 7

Параметър	Апроксимация		Реализация		δ, %
	T _{анр} (f), dB	T _{анр} (f), пъти	T(f), dB	T(f), пъти	
f _p	5,082	1,7951	5,6178	2,0301	10,54
f _s	-18,634	0,117	-18,212	0,1308	-2,26

Забележка: $\delta^* = [(T(f), \text{п\`ати} - T_{\text{анр, п\`ати}}) / T_{\text{анр, п\`ати}}] \cdot 100 \%$