

# Демонстратор: Реализация на универсален филтър по метода на аналоговото моделиране

## 1.Цел:

Този демонстратор има две основни цели:

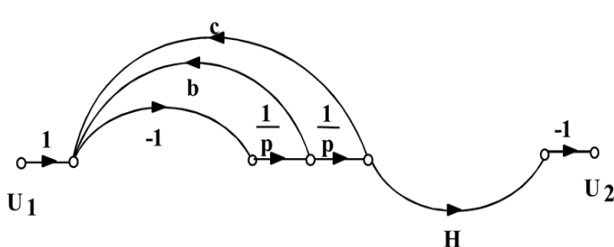
- приложението на метода на аналоговото моделиране, наречен още метод с променливи на състоянието, за синтез на универсално филтърно звено с четири ОУ, което се предлага от фирмата Burr - Brown в интегрално изпълнение – схема тип UAF42
- автоматизирано проектиране на активни филтри със схемата UAF42 в средата на професионалната програма Burr-Brown Filter 42.

## 2. Реализация на биквадратна предавателна функция чрез използването на сигналните графи

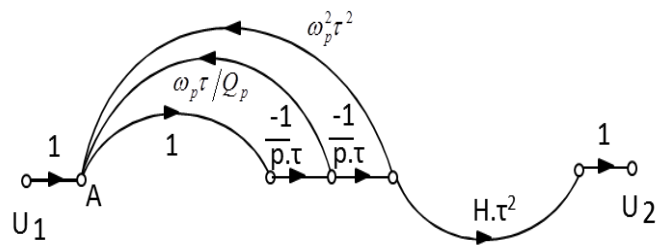
Методът аналоговото моделиране (с променливи на състоянието) се основава първоначално на въвеждането в предавателната функция на променливи на състоянието чрез умножаване на числителя и знаменателя с  $\frac{1}{p^n}$ , където  $n$  е степента на функцията. Следва еквивалентно преобразуване на предавателната функция и реализация на схемата чрез интегратори и суматори.

Схемните реализации на биквадратната предавателна функция в интегрално изпълнение представляват универсални активни филтри, които след добавянето на ограничен брой външни елементи, оразмерени в зависимост от техническата спецификация на проекта намират широко практическо приложение. Чрез тези схеми и производните им се получават полиномиални и дробни филтри с нискочестотни, високочестотни, лентови, заграждащи и все пропускащи функции. Освен това, универсалните активни филтри се характеризират с висока точност на реализация на предавателната функция, големи качествени фактори и значителна гъвкавост.

### 2.1. Определяне на предавателна функция на сигнален граф



фигура 1



фигура 2

Определянето на предавателната функция на графа от фиг. 1 се извършва по

формулата на Мейсън  $T(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^n p_i \Delta_i$ .

За целта нека определим величините:

1. Предаването на контурите с еднопосочни клони

$$L_1 = (-1) \cdot \frac{1}{p} \cdot b = -\frac{b}{ap}, \quad L_2 = (-1) \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{p} \cdot c = -\frac{c}{ap^2};$$

2. Детерминантата на графа

$$\Delta = 1 - \sum L_i + \sum L_i L_j - \dots = 1 - (L_1 + L_2) = 1 - \left[ -\frac{b}{p} + -\frac{c}{p^2} \right] = \frac{p^2 + bp + c}{p^2};$$

3. Броят на преките пътища между възлите  $U_1$  и  $U_2$  е един:  $n=1$ ;

4. Предаването на клоните в преките пътища

$$p_1 = 1 \cdot (-1) \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{p} \cdot H \cdot (-1) = \frac{H}{p^2};$$

5. Детерминантите на частите от графа, които остават след изключване на допиращите се по пътя  $k$  контури:  $\Delta_1 = 1$ .

След заместване на получените изрази във формулата на Мейсън, предавателната функция на графа приема вида:

$$T(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^1 p_i \Delta_i = \frac{\frac{H}{p^2} \cdot p^2}{p^2 + bp + c} = \frac{H}{p^2 + bp + c}.$$



Така полученият резултат представлява нискочестотна предавателна функция.

Нискочестотната предавателна функция може да представим и като:

$$T(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{H}{p^2 + bp + c} = \frac{H}{p^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} p + \omega_p^2}, \text{ където } b = \frac{\omega_p}{Q_p} \text{ и } c = \omega_p^2.$$

## 2.2. Схемна реализация на нискочестотна предавателна функция

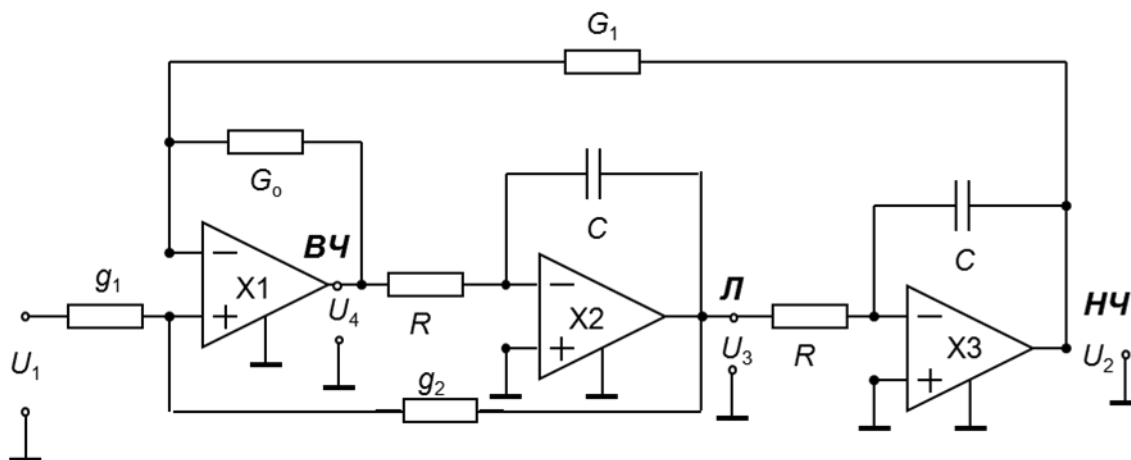
При преобразуване на **НЧ** сигнален граф е необходимо да отчитем реалните характеристики на функционални блокове с които той се реализира.

За реализацията на клоните с предаване  $1/p$  използваме **инвертиращ интегратор**, с времеконстанта  $\tau$ . Тя се отразява като коригираща величина за коефициентите  $b$ ,  $c$  и  $H$  на клоните на графа, свързани с изходите на двата интегратора. Освен това, инвертиращото свойство на интегратора води до смяна на знака на всички клони по главния път и клона с предаване  $c$ .

Сигналния граф, непосредствено управляващ реализацията на нискочестотната предавателна функция при използването на схема на инвертиращ интегратор, е представен на фиг. 2.

За схемната реализация са необходими два интегратора (за реализация на клоните с  $1/p$ ), един тривходов суматор за да се реализира сумата в

знаменателя на предавателната функция (т. А от графа, от където се вижда, че двата входа са неинвертиращи, а един - инвертиращ). Клоните с коефициент на предаване  $-c\tau^2$  и  $b\tau$  нагледно показват веригите на обратната връзка съответно към инвертиращия и към неинвертиращия вход. По този начин лесно синтезираме схемата от фиг. 3:



фигура 3

Получената схема представлява универсален филтър, защото с нейна помощ могат директно да се реализират нискочестотна (ако изхода се вземе от изхода на втория интегратор), високочестотна (ако изхода се вземе от изхода на суматора) и лентова (ако изхода се вземе от изхода на първия интегратор) предавателна функция. За реализация на заграждаща и биквадратна предавателна функция е необходимо включване и на втори суматор.

Съотношенията за параметричен синтез на тази схема се получават, като се използват предавателните функции на аналоговия суматор и на инвертиращия интегратор:

$$\omega_p^2 \tau^2 = -\frac{G_1}{G_0}; H \tau^2 = \frac{g_1}{G_0} \cdot \frac{G_1 + G_0}{g_1 + g_2}; \tau \cdot \frac{\omega_p}{Q_p} = \frac{g_2}{G_0} \cdot \frac{G_1 + G_0}{g_1 + g_2}; Y_* = G_1 + G_0; g_* = g_1 + g_2.$$

От първия етап на синтеза - апроксимацията, са известни коефициентите  $b$ ,  $c$  и  $H$  или все едно -  $\omega_p, Q_p, H$ , а се търсят  $R, C, G_1, G_0, g_1, g_2$ . Тъй като, неизвестните величини са повече от известните, което е типично за синтеза, в методиките за параметрично оразмеряване се добавят нови зависимости, отговарящи на конкретните изисквания.

Една примерна методика за изчисляване на схемните параметри, подходяща за интегрално изпълнение, при което се работи с отношения на проводимости е както следва:

$$\omega_p^2 = \frac{G_1}{G_0} \cdot \frac{1}{\tau^2}; \quad \frac{\omega_p \tau}{Q_p} = \frac{1}{1 + \frac{g_1}{g_2}} \cdot \left( \frac{G_1}{G_0} + 1 \right); \quad H \tau^2 = \frac{1}{1 + \frac{g_2}{g_1}} \cdot \left( \frac{G_1}{G_0} + 1 \right);$$

$$\text{при } \tau = \frac{1}{\omega_p}, \quad G_1 \approx G_0, \quad 2Qp = \frac{g_1}{g_2} + 1.$$

### 3. Проектиране на универсален активен филтър Burr-Brown UAF42



Схемата на Кероин - Хюлсман - Нюкоб се предлага като универсално филтърно звено с четири ОУ в интегрално изпълнение от фирмата *Burr - Brown* тип **UAF42**.

**UAF42** е универсален активен филтър, който може да бъде конфигуриран за нискочестотни, високочестотни лентови и заграждащи филтри. Използва класическа аналогова архитектура с един аналогов суматор, инвертиращ усилвател и два интегратора. Интеграторите включват два кондензатора със стойност  $1000nF$  при  $\pm 0.5\%$  толеранс. Това определя точна настройка на полюсната честота и полюсния качествен фактор.

Приложение на UAF42:

- Измервателни и тестващи устройства;
- Комуникационна техника;
- Медицинска техника.

В различните приложения на схемата могат да бъдат използвани три или четири ОУ за реализация на полиномиални и дробни филтри.

За реализация на полиномни предавателни функции се използват две основни конфигурации **инвертираща и не инвертираща**.

Извършете проектиране на нискочестотен филтър със зададени изискванията към АЧХ на филтъра дадени в **таблица 1** и извършете апроксимация по теоретичният метод на *Чебишев* в средата на *Burr-Brown Filter 42*.

**таблица 1**

№	Параметри	Означение	Стойност
1	Максимално допустима неравномерност на АЧХ в лентата на пропускане за честота $f_p$ ( <i>Maximum pass-band ripple</i> )	$A_p$	2 dB
2	Ред на предавателната функция ( <i>Order</i> )	$n$	4
3	Гранична честота в лентата на пропускане ( <i>Pass-band cutoff frequency</i> )	$f_0$	1 kHz

Проектирането на нискочестотния филтър се извършва на няколко етапа:

#### 3.1. Апроксимация на предавателната функция



През първия етап на синтеза - апроксимацията - се получава схемната предавателна функция във вид на дробно - рационална функция на комплексната променлива  $p$ . Определят се коефициентите пред различните степени на  $p$  и/или съвкупността от нейните полюси и нули. **В резултат на апроксимацията се получава математическият модел на електронната схема.**

Необходимо е да се извърши апроксимиране на нискочестотна функция в средата на **Burr-Brown Filter 42** с изисквания към АЧХ посочени в **таблица 1**, съответно по теоретичния метод на *Чебишев*.



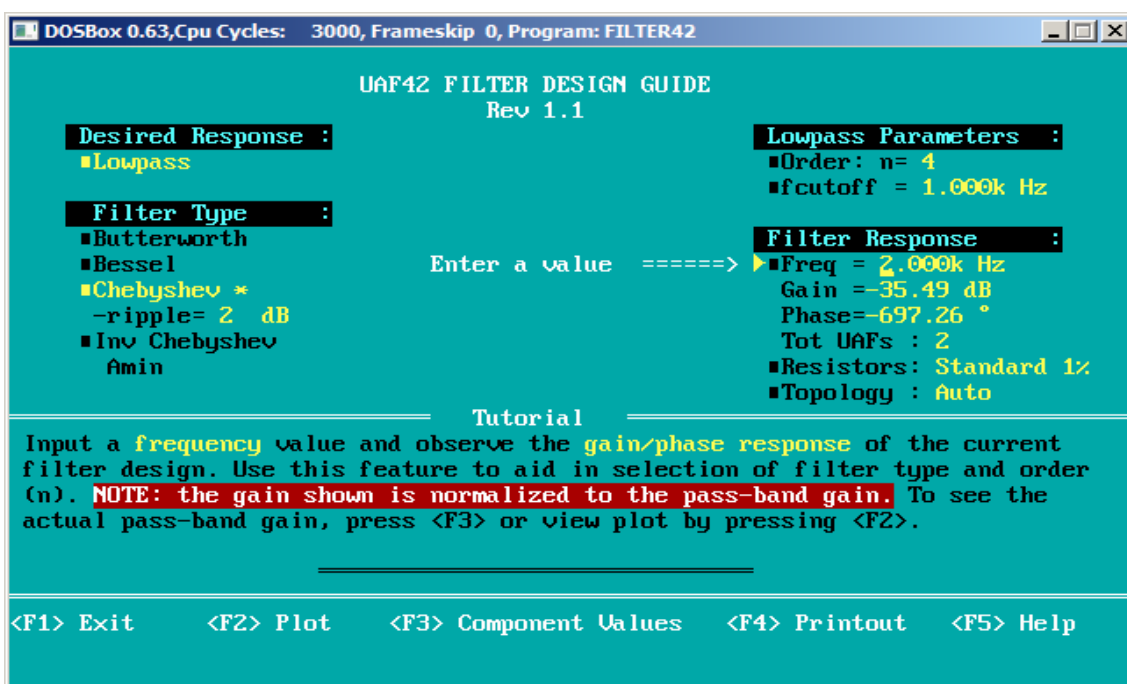
Стартирайте програмата **Burr-Brown Filter 42** чрез иконата на **Filter 42**



Програмата работи под DOS, така че навигацията в програмата се осъществява чрез бутоните на клавиатурата (**мишката не се използва**). С помощта на бутона <Space> разгледайте първите три работни полета и се запознайте с възможностите на програмата и начина на работа с нея. Стартирайте програмата и задайте изискванията към АЧХ посочени в **таблица 1**.



При работата с програмата следете коментарите (в графичен и текстови вид в лентата *Tutorial*). Изборът в отделните позиции за задаване се извършва чрез използването на бутона <Enter>, а преминаването между позициите се осъществява чрез стрелките надолу и нагоре.



фигура 4

Задайте параметрите на синтезирания филтър:

1. От *Desired Response* : задайте вида на предавателната функция: **Lowpass**.
2. От *Filter Type* : задайте теоретичния метод за апроксимация и необходимите параметри:  
**Chebyshev**  
- ripple= 2 dB.
3. От *Lowpass* (променя се в зависимост от зададената предавателна функция) *Parameters* : задайте параметрите на филтъра (също се променят):  
**Order: n= 4**. (степен на предавателната функция)  
**Fcutoff= 1k Hz** (Гранична честота в лентата на пропускане)
4. От *Filter Response* : задайте параметрите за реализация и получите информация от етапа апроксимация съответно:

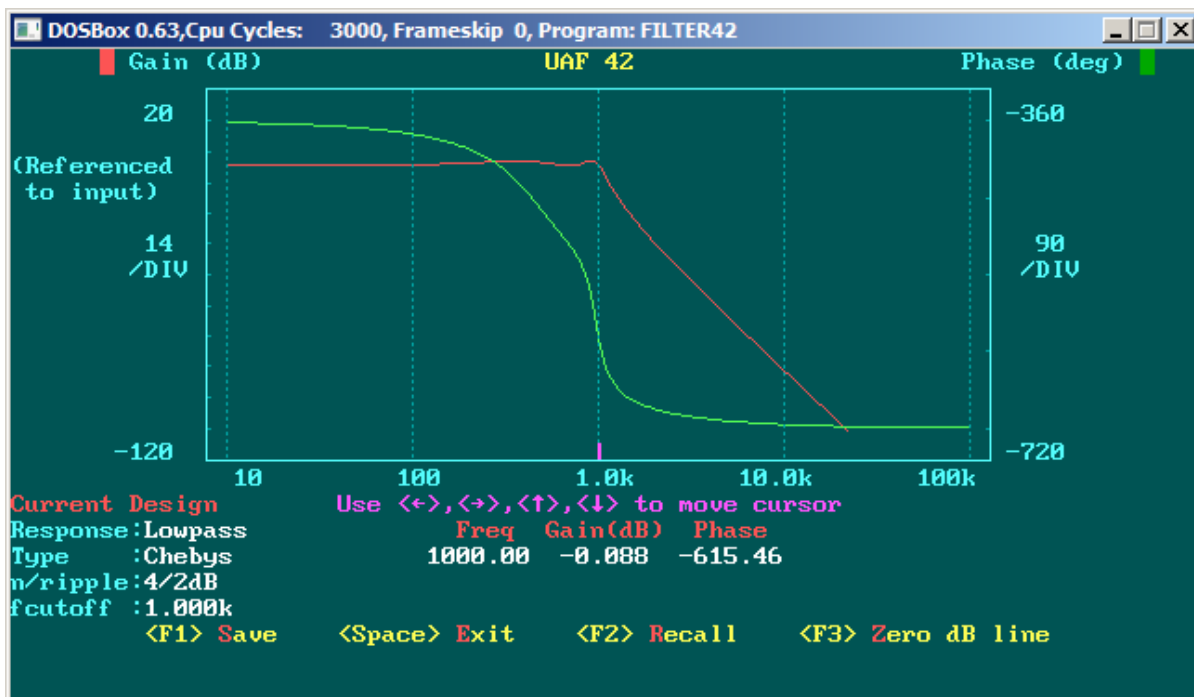
**Freq:** запишете честотата, която Ви интересува и след натискане на бутона <Enter>, автоматично ще получите информация за модула (**Gain** =) и фазата (**Phase** =) на коефициента на предаване по напрежение за зададената честота.

**Tot UAFs :** 2 (необходим брой интегрални схеми (брой на звената в каскадната структура)).

**Resistors: Standard 1%** (клас на точност на използваните резистори или изчислените стойности)

**Topology: Auto** (реализация с инвертиране, без инвертиране на изходния сигнал или автоматичен избор)

След натискане на функционалния бутон <F2> (**Plot**), автоматично ще получите в една и съща работна страница, но в две координатни системи **АЧХ** в **dB** и **ФЧХ** на анализирания предавателна функция по метода **Чебишев** за целия филтър (фиг. 5). (Връщането в основното работно поле се извършва с бутона <Space>).



фигура 5

С помощта на курсор отчетете стойностите на следните параметри:

Метод / Параметър	Задание T'(p)	Чебишев (Chebyshev)		
		f	T(f)	φ(f)
Измервателна единица	dB	Hz	dB	°
първи минимум	-2	10	3m	-361.43
първи максимум	-2	380,19	1,973	-434,55
втори минимум	-2	660,69	-8m	-498,85

втори максимум	-2	912,01	1,824	-565,91
fp=1 kHz	-2	1k	-88,44m	-615,46
fs =2 kHz	-30	2k	-35.49	-697,26

Получените резултати показват, че в лентата на пропускане затихването не надвишава зададената максимална неравномерност (**-2 dB**), а в лентата на задържане затихването (**-35,49 dB**) надвишава минимално допустимото затихване (**-30 dB**).

### 3.2. Реализация на апроксимираната предавателна функция

⚠ През втория етап на синтеза - реализацията - по намерената предавателна функция се проектира самата схема, т. е. установява се нейната структура и се изчисляват параметрите на елементи ѝ. Реализацията е процес на поставяне в съответствие на предавателната функция и съвкупността от схемни решения. След натискане на функционалния бутон <F3> (**Component Values**), автоматично ще получите стойностите на изчислените параметри от фиг.6:

```

***UAF42 Filter Component Values***
Response: Lowpass          Input Config: Inverting      fcutoff   : 1.000kHz
Type      : Chebyshev      Order n    : 4
Ripple   : 2 dB           Resistors  : nearest 1%

Subckt   f0      Q      fz      RF1,2   RQ      RG      RZn
C ext    Rp      Cp      Rz1     Rz2     Rz3    Ckt-gain
Sub      PP3    468.1Hz 929.4m  ----   340.0k  28.00k  50.00k  ----
Ckt 1   ----    ----   ----   ----   ----   1.000

Sub      PP3    964.6Hz 4.594  ----   165.0k  3.920k  50.00k  ----
Ckt 2   ----    ----   ----   ----   ----   1.000

Gain, Max Uin: 1.00U/U , 8.31U

<Space> to exit

```

фигура 6

За конкретния случай се установява, че :

1. Препоръчителна топология (*Input Config*): реализация с инвертиране (*Inverting*);

- Коефициент на предаване по напрежение на реализирания активен филтър в лентата на пропускане (в пъти): (**Gain= ...V/V**): **1 V/V**;
- Максимално допустимото входно напрежение на активния филтър ( $V_{In} = \dots V$ ): **8.31 V**;
- Параметрите на активния филтър са дадени в **таблица 2**:

**таблица 2**

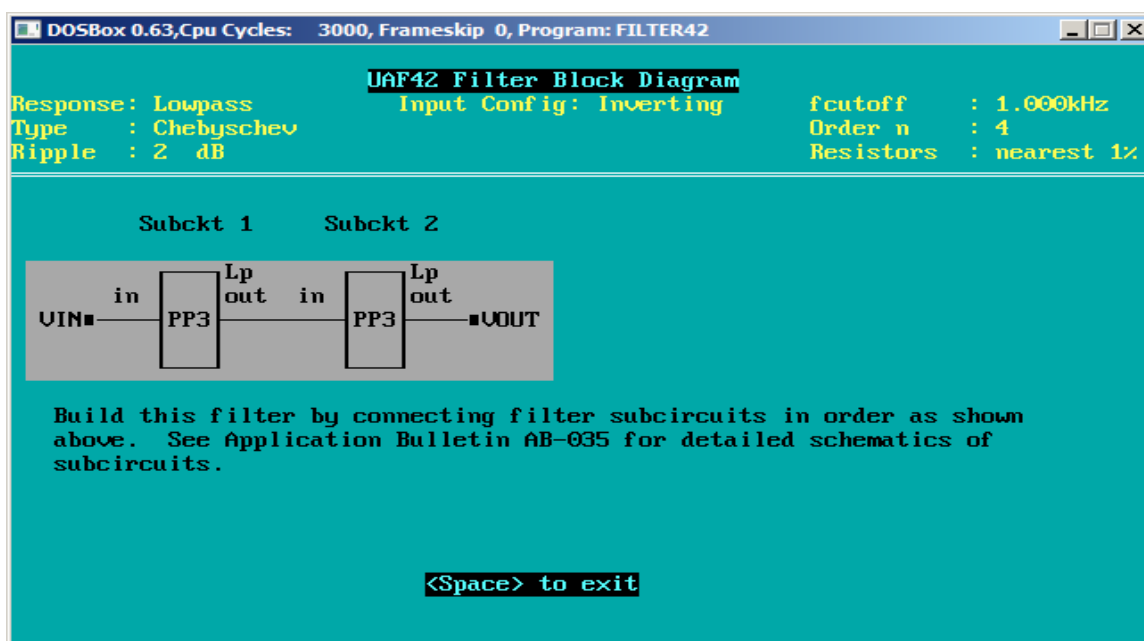
Но на звено	Тип на схемната конфигурация (Subckt)	Полюс а честота $f_0, Hz$	Качествен фактор $Q$	Честота на нулата $f_z, Hz$	Коефициент на предаване в лентата на пропускане <i>Circuit - Gain</i>
1	PP3	468,1	929,4m	-	1
2	PP3	964,6	4,594	-	1

- Стойностите на схемните елементи са дадени в **таблица 3**:

**таблица 3**

No на звено	Честотно определящи резистори $R_{F1}, \Omega; R_{F2}, \Omega$	Резистор за настройка на Q $R_Q, \Omega$	Резистор за настройка на коефициента на предаване $R_G, \Omega$	Резистор за осигуряване на стабилност за $f_0 > 10KHz$ $R_{2A}, \Omega$	Външни капацитети $C_{ext}$	Реален полюс		Сумиращи резистори		
						$R_P, \Omega$	$C_P, F$	$R_{Z1}, \Omega$	$R_{Z2}, \Omega$	$R_{Z3}, \Omega$
1	340 k	28 k	50 k	-	-	-	-	-	-	-
2	165 k	3,92 k	50 k	-	-	-	-	-	-	-

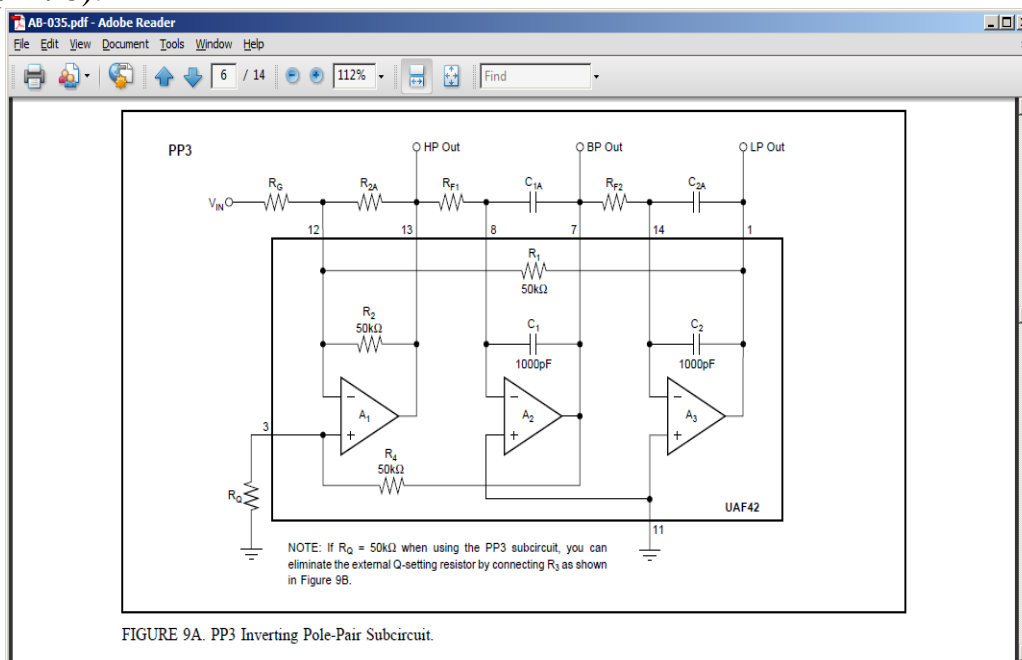
Преминавайки в следващото работно поле (чрез бутона *< Space >*) се установява начина на свързване на звената (фиг. 7) и е посочено, че за повече подробности относно схемната конфигурация на всяко звено е необходимо да се използва бюлетина **AB-035**:



**фигура 7**



В конкретният случай двете съставни звена са свързани каскадно, като се използва нискочестотния изход ( $Lp$ ). От бюлетина **AB-035** се установява схемната конфигурация **PP3**, необходима за реализацията и на двете съставни звена (фиг. 8).



фигура 8

### 3.3. Верификация на проекта в средата на Design Lab

Анализирайте с помощта на числени симулации в средата на *Design Lab* проектирания филтър с цел оценка на честотните му характеристики и параметри.

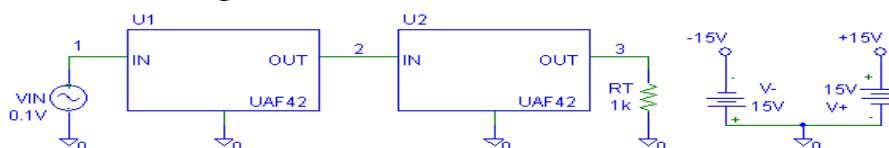
За начертаването на схемата на проектирания филтър използвайте структурната схема от фиг. 9. Заместете всяко от звената “U1” и “U2” със съответната схемна конфигурация от фиг. 8, а стойностите на елементите от **таблица 4**.

В средата на графичния редактор *Schematics* начертайте и съхранете схемата или отворете предварително подготвения файл с начертаната схема ( **.sch** ) **фиг. 10** и извършете зададените анализи.

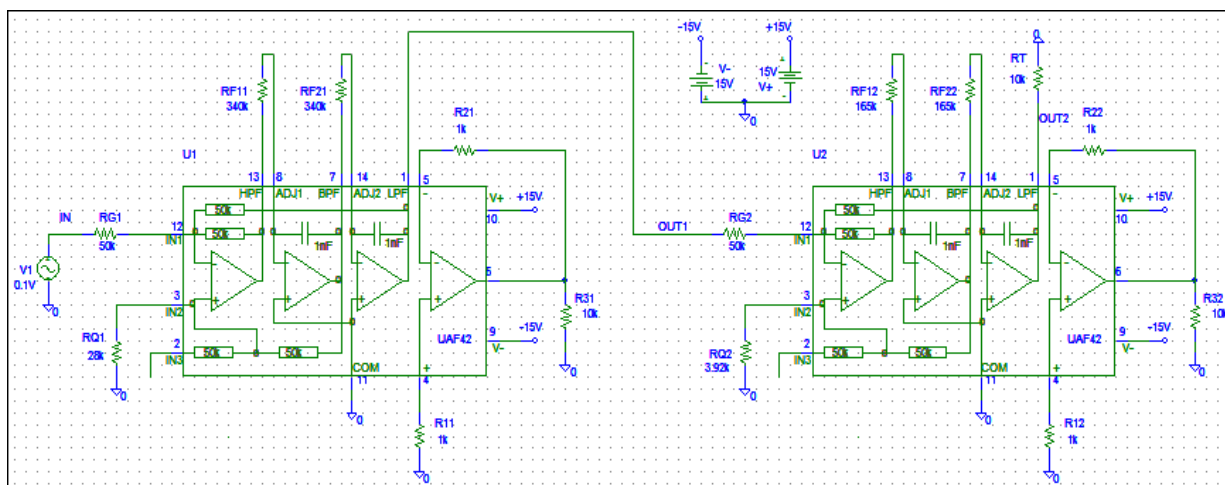


При чертането на схемата спазвайте следните изисквания:

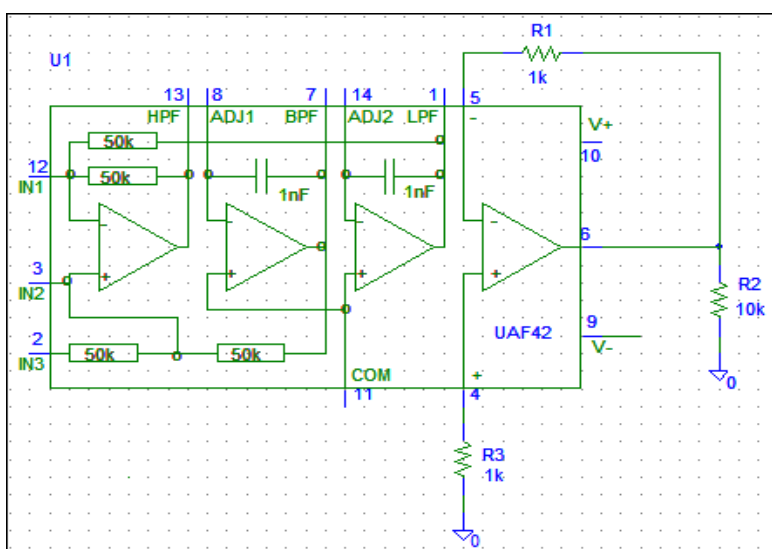
1. Не поставяйте елементи, за които няма изчислена стойност в **таблица 4**. На тяхно място оставете отворена верига;
2. Не закръгляйте допълнително стойностите на елементите;
3. Ако четвъртият операционен усилвател не се използва, свържете го по схемата показана на **фиг. 11**;



4. фигура 9



фигура 10



фигура 11

На входа на схемата поставете променливотоков независим източник на напрежение  $V_{AC}$  и задайте атрибутите му: име  $V_{in}$  и  $ACMAG 100mV$ , както е показано на фиг. 12.

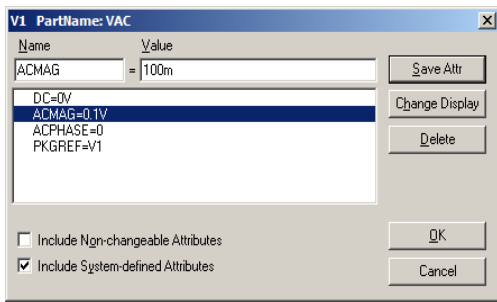
Специфицирайте параметрите на честотния анализ AC sweep.

Честотният диапазон за изследване ще зададете, ако за начална стойност (*Start value*) запишете **10**, 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. 13).

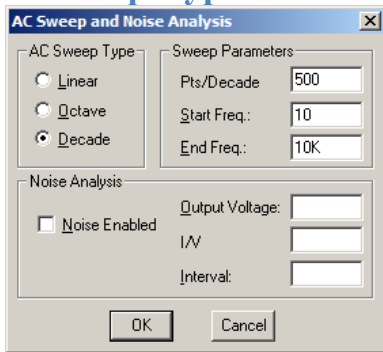
Стартирайте симулациите.

В графичния постпроцесор (програмен осцилоскоп) *Probe* в едно работно поле, но на различни оси постройте **АЧХ** и **ФЧХ** (фиг. 14).

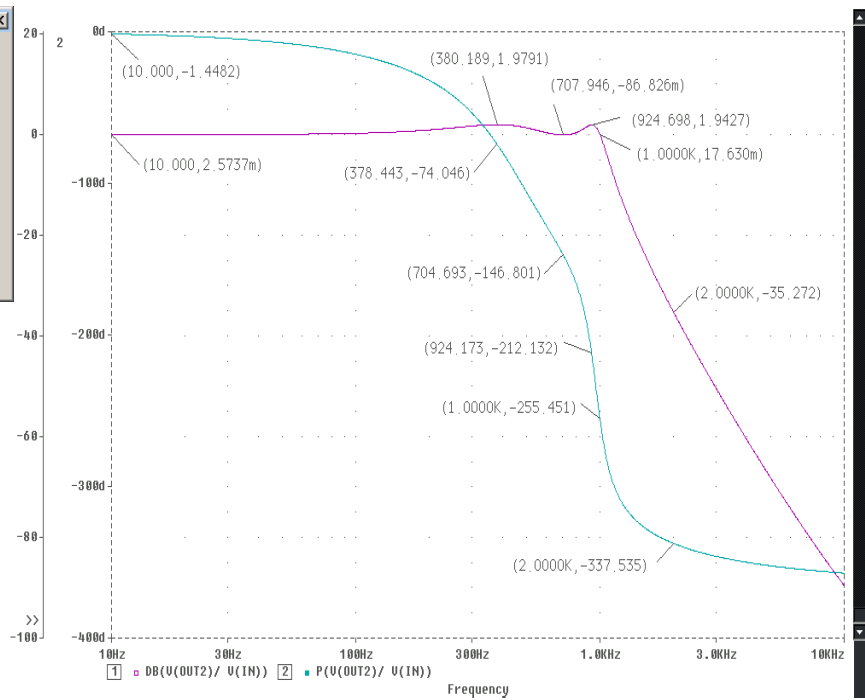
В едно работно поле, постройте **АЧХ** на целия филтър и на отделните съставни звена (фиг. 15).



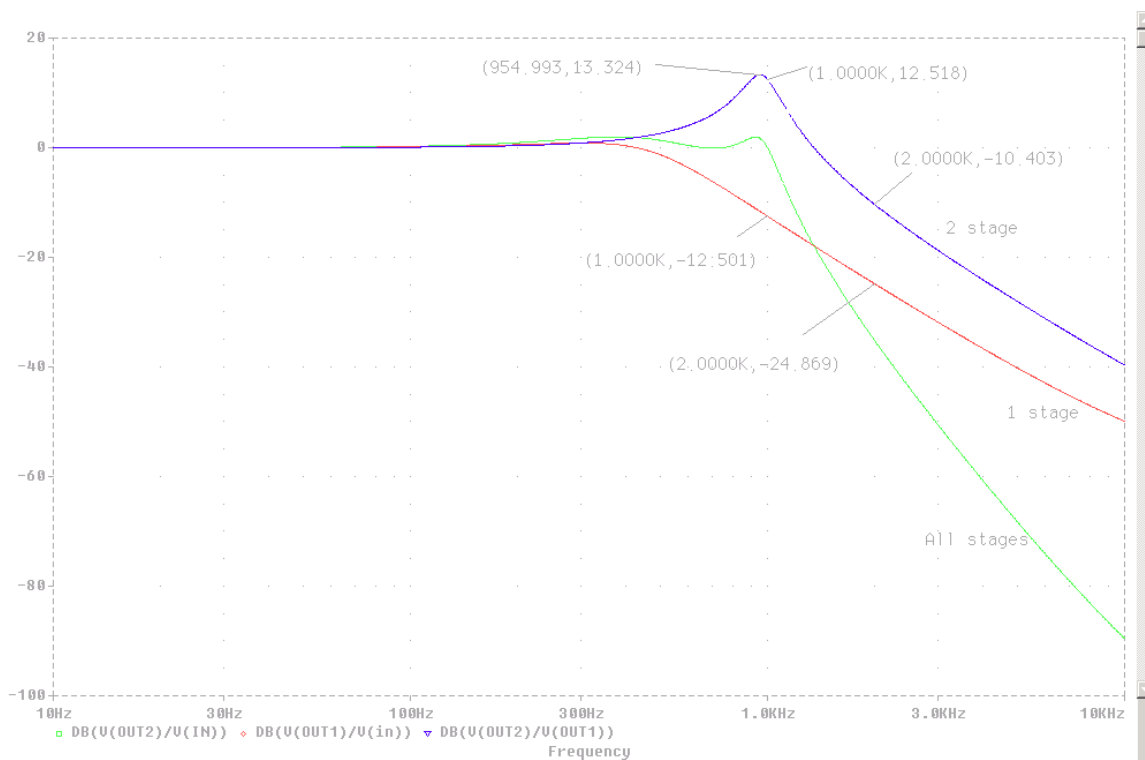
фигура 12



фигура 14



фигура 13



фигура 15

С помощта на курсор отчетете стойностите на следните параметри:

Таблица 5

Параметри	Резултати	Апроксимация	Реализация	$\delta$ , %	
Ред, n=4					
Параметри на общата предавателна характеристика					
	$T(f)$ , dB	$T(f)$ , пъти	$T(f)'$ , dB	$T(f)'$ , пъти	
първи минимум	3m	1,0003	2,5737m	1,0003	-0,005

първи максимум	1,973	1,255	1,9791	1,256	0,070
втори минимум	-8m	0,999	-86,826m	0,990	-0,903
втори максимум	1,824	1,234	1,9427	1,251	1,376
fp=1 kHz	-88,44m	0,990	17,63m	1,002	1,229
fs =2 kHz	-35.49	0,017	-35,272	0,017	2,542
<b>I звено</b>					
максимум			-		
fp=1 kHz			-12,501		
fs =2 kHz			-24,869		
<b>II звено</b>					
максимум			13,324		
fp=1 kHz			12,518		
fs =2 kHz			-10,403		
<b>Фазово-честотна характеристика</b>					
	(φ-360), °		φ', °		δ**□□, %
първи минимум	-1,43		-1,4482		1,273
първи максимум	-74,55		-74,046		-0,676
втори минимум	-138,85		-146,801		5,726
втори максимум	-205,91		-212,132		3,022
fp=1 kHz	-255,46		-255,451		-0,004
fs =2 kHz	-337,26		-337,535		0,082

**Забележка:**  $\delta^* = [(\Gamma(f), \text{п\`ыти} - \Gamma(f)', \text{п\`ыти}) / \Gamma(f)', \text{п\`ыти}].100 \%$ ,  
 $\delta^{**} = [(\varphi(f) - \varphi(f)') / \varphi(f)'].100 \%$

Синтезият филтър отговаря на зададените изисквания.

Звеното с по-нисък номер (с по-нисък качествен фактор) определя лентата на пропускане, а звеното с по-висок номер (с по-висок качествен фактор) определя наклона в преходната област.



**Определете предавателните функции, зададени посредством сигнални графи и синтезирайте универсални филтри, за да се уверите, че познавате техните основни характеристики и параметри и особеностите на различните методи на апроксимация и реализация по метода на аналоговото моделиране.**