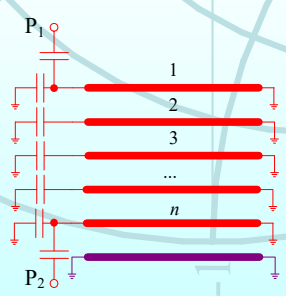
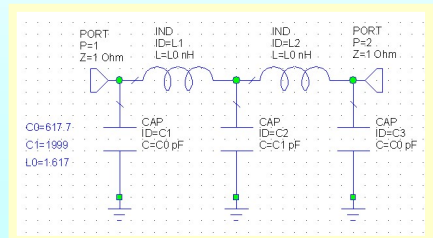
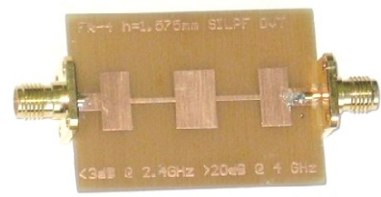
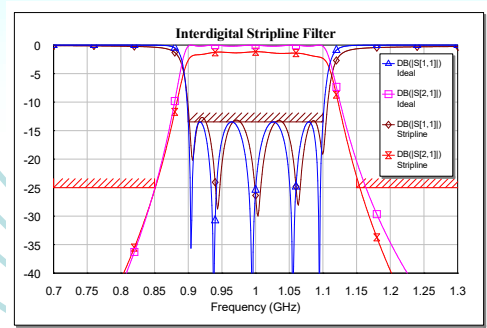
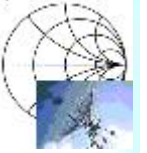


Пројектовање микроталасних филтара

x = појам филтра, прототип филтра, LC реализација, каскадна секција водова, Ричардсова трансформација, Куродини идентитети, инвертори, полуталасни резонатор

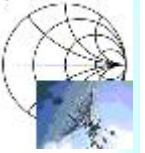


Милка Потребих
Дејан Тошић



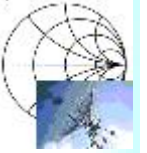
Појам електричних филтара

- Мреже са два или више приступа селективне по учестаности
- Задатак је да сигнале неких учестаности добро пропуштају, а да сигнале других учестаности слабе
- Филтри најчешће слабе сигнал тако што га рефлектују
- Задатак филтра може бити и да уобличи фазу улазног сигнала



Трансфер функција

- Трансфер функција, $H(s)$, је количник комплексних представника величина на излазу и улазу филтра
- $H(j\omega)$ је фреквенцијски одзив, $H(j\omega) = M(\omega)e^{j\Phi(\omega)}$
- $M(\omega)$ и $\Phi(\omega)$ су амплитудски и фазни одзив
- Графици: амплитудска и фазна карактеристика
- У линеарној скали или у dB, f -оса линеарна или логаритамска (декаде и октаве)
- Групно кашњење $\tau(\omega) = -\frac{d\Phi(\omega)}{d\omega}$



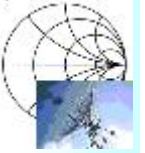
Амплитудска, фазна карактеристика, Бодеови диаграми...

- Амплитудска карактеристика $M_{dB}(\omega) = 20 \log_{10} M(\omega)$
- Фазна карактеристика се некад црта у степенима ($^{\circ}$) $\Phi_{deg}(\omega) = \Phi(\omega) \cdot 180/\pi$
- Фреквенцијске карактеристике се цртају и као упрошћени приближни графици састављени од изломљених линија, који се називају Бодеови диаграми

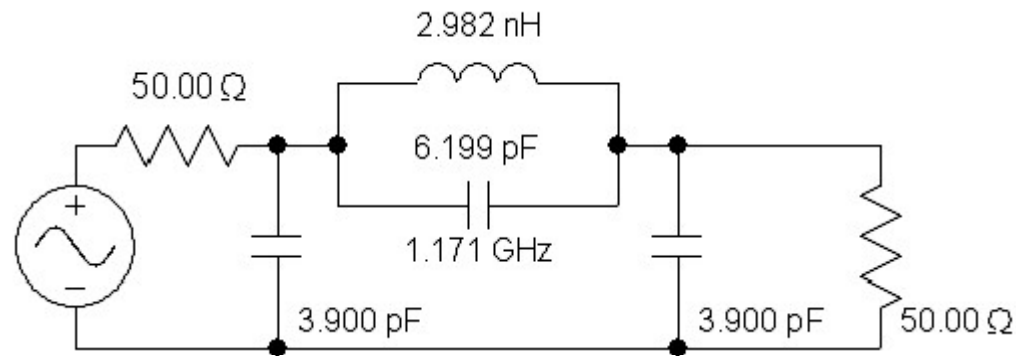


Слабљење, појачање...

- Количник Лапласових трансформација величине на улазу и величине на излазу филтра, назива се слабљење (attenuation)
- Реципрочна вредност слабљења је појачање (gain, amplification)



Трансфер функција филтра са концентрисаним елементима



$$H(s) = \frac{3,901 \cdot 10^9 s^2 + 2,11 \cdot 10^{29}}{s^3 + 6,355 \cdot 10^9 s^2 + 4,745 \cdot 10^{19} s + 2,11 \cdot 10^{29}}$$

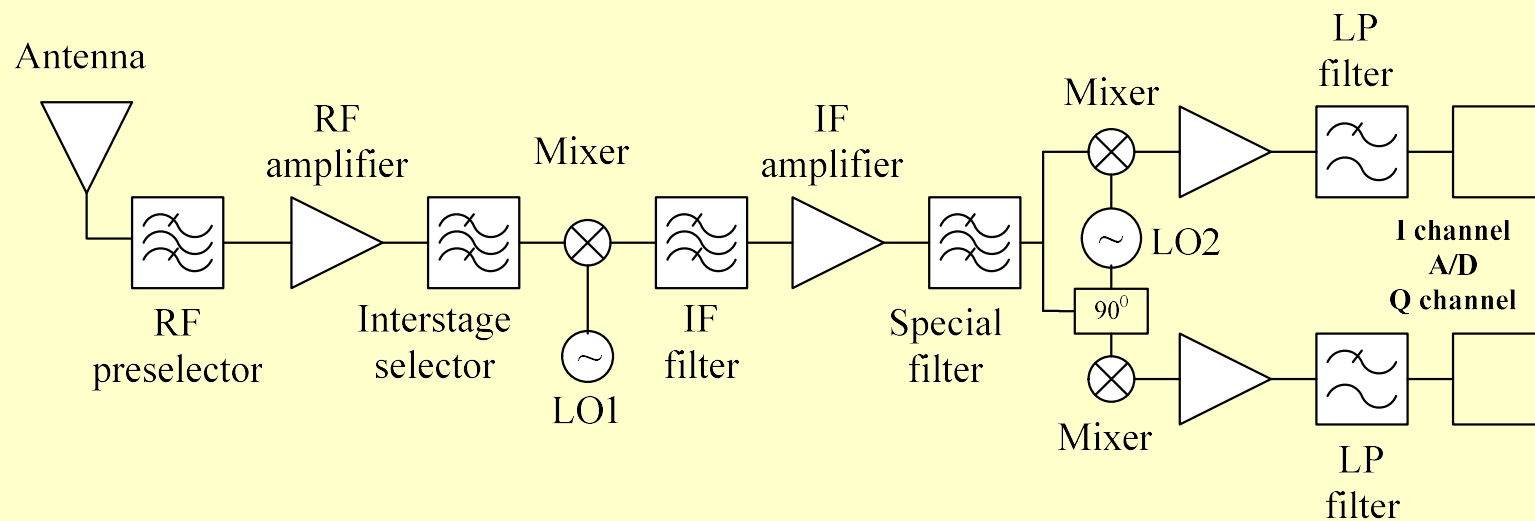
$$s_{z1,2} = \pm j 7,355 \cdot 10^9 \text{ rad/s}$$

$$s_{p1} = -5,128 \cdot 10^9 \text{ rad/s}, \quad s_{p2,3} = (-0,613 \pm j 6,385) \cdot 10^9 \text{ rad/s}$$

$$H(s) = H_0 ((s - s_{z1})(s - s_{z2}) \dots) / ((s - s_{p1})(s - s_{p2}) \dots)$$



Примена филтара у комуникационом уређају





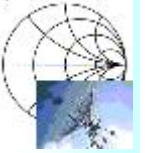
Кораци при пројектовању микроталасних филтара

- Спецификација
- Апроксимација
- Шеме филтра са идеалним елементима
- Реализација
- Студија имперфекције

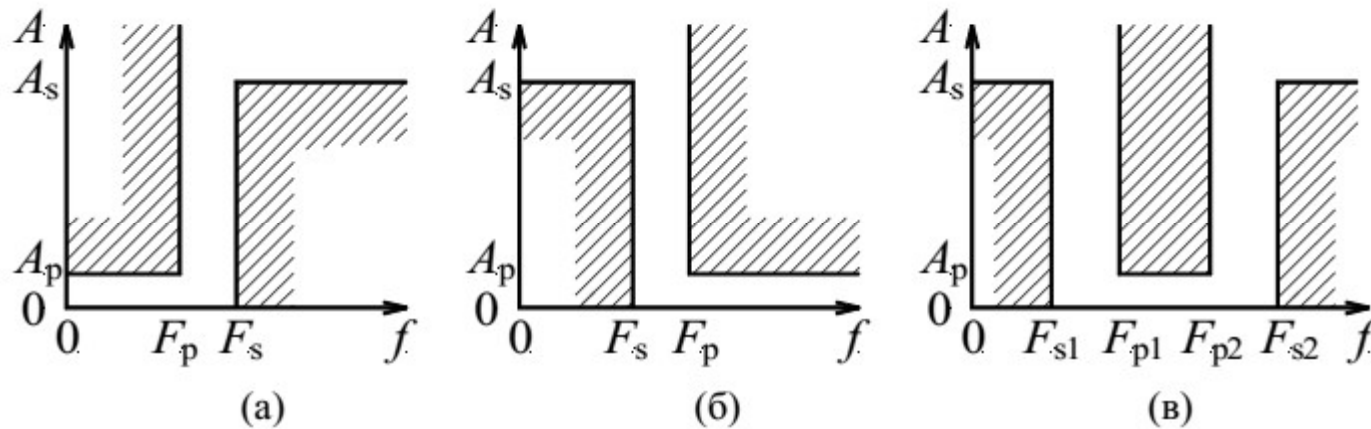


Спецификација

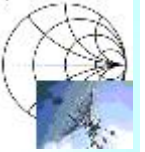
- Скуп услова које филтар треба да задовољи назива се спецификација
- Основну спецификацију чини спецификација амплитудског одзива
- Задаје се област у којој треба да буде амплитудска карактеристика
- Границе ове области чине габарит



Амплитудска спецификација (унето слабљење)



Амплитудска спецификација (унето слабљење) за: (а) пропусник ниских учестаности, (б) пропусник високих учестаности, (в) пропусник опсега учестаности.



Апроксимација

- Апроксимација је аналитички израз фреквенцијског одзива који задовољава спецификацију и може да се оствари у пракси
- Апроксимација мора задовољити услов каузалности: **импулсни одзив мора бити каузалан**, тј. не може да постоји пре побуде
- Код пројектовања микроталасних филтара уобичајено је да се апроксимација прво тражи као функција која се може остварити мрежама са идеалним кондензаторима и калемовима, тј. LC -филтром
- Трансфер функција LC -филтара је рационална по s



Најпознатије апроксимације

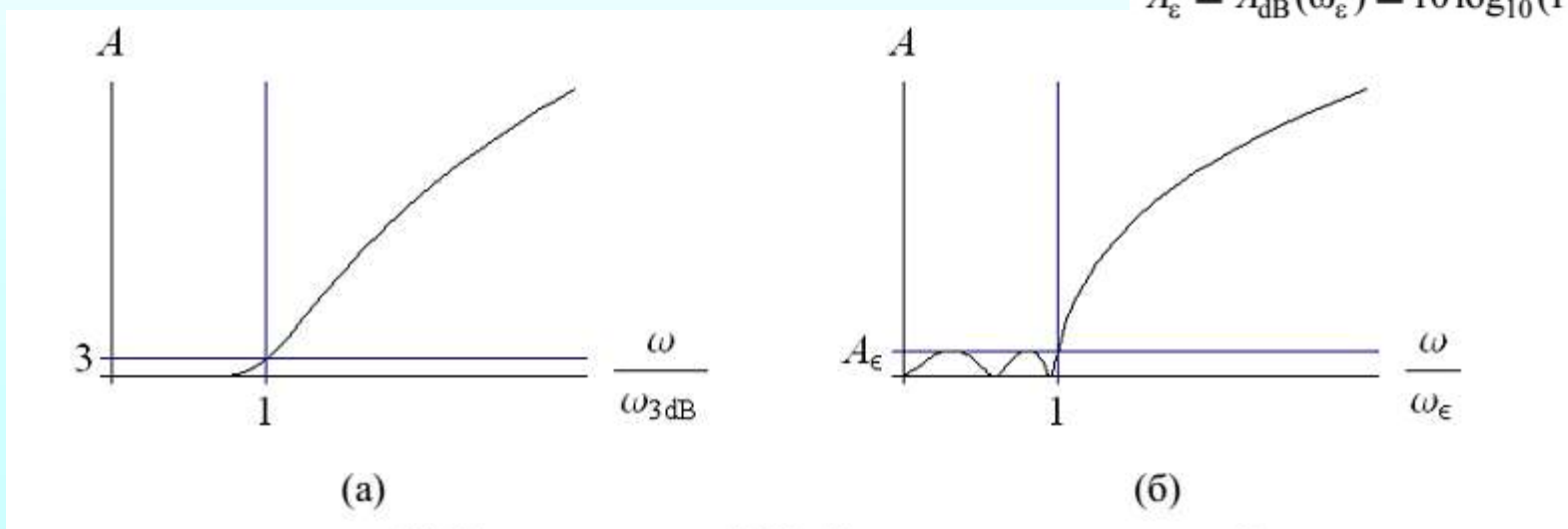
- Батервортова (Butterworth)

$$A_{\text{dB}}(\omega) = 10 \cdot \log_{10} (1 + (\omega/\omega_{3\text{dB}})^{2n})$$

- Чебишевљева (Chebyshev или Tschebyscheff)

$$A_{\text{dB}}(\omega) = 10 \cdot \log_{10} (1 + \varepsilon^2 T_n^2(\omega/\omega_\varepsilon))$$

$$A_\varepsilon = A_{\text{dB}}(\omega_\varepsilon) = 10 \log_{10} (1 + \varepsilon^2)$$

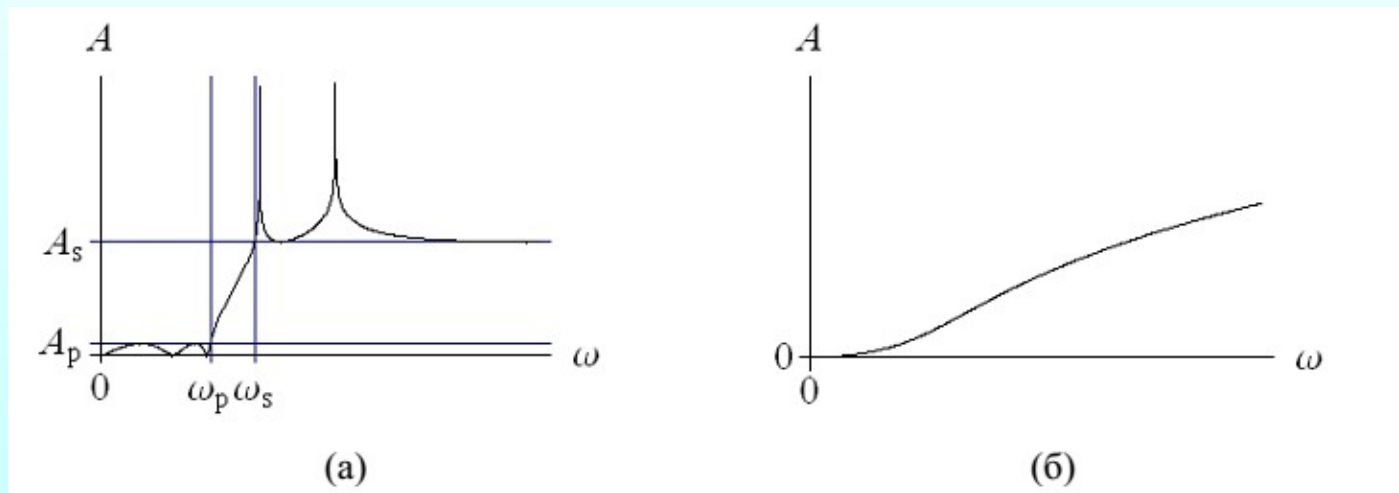


(а) Батервортова и (б) Чебишевљева апроксимација.



Елиптичка и Беселова апроксимација

- Елиптичка $A_{dB}(\omega) = 10 \cdot \log_{10}(1 + \varepsilon^2 R_n^2(\omega/\omega_c, \xi))$
- Апроксимација са максимално равним групним кашњењем у пропусном опсегу је Беселова (Bessel). Фазна карактеристика је скоро линеарна у пропусном опсегу (практично константно групно кашњење); селективност Беселовог филтра је знатно мања од Батервортовог



(a) Елиптичка и (б) Беселова апроксимација.

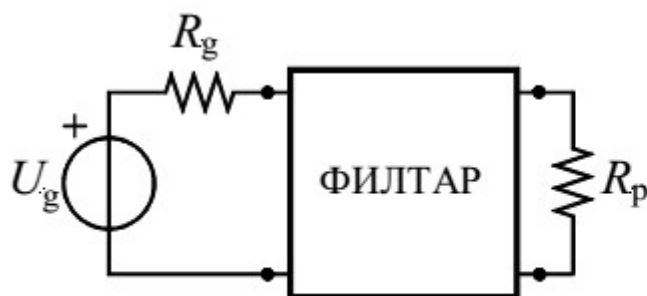


Шема филтра са идеалним елементима

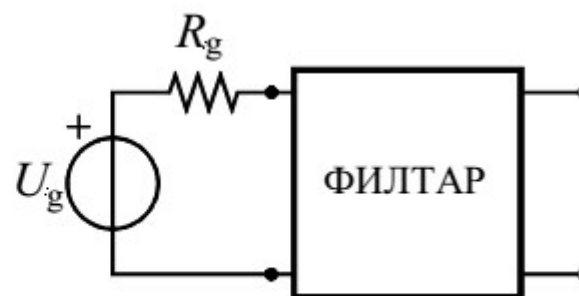
- За усвојену апроксимацију образује се електрична шема филтра са идеалним елементима, која задовољава спецификацију
Идеални елементи су кондензатор, калем, отпорник, трансформатор, секција вода и спрегнути водови
- Основни задатак ове шеме је да оствари трансфер функцију одређену апроксимацијом
- Следећи задатак је да оствари везу елемената (топологију) која је подесна за реализацију; нпр. у техници микротракастих водова отворени огранак је подеснији за реализацију од кратко спојеног



Двоструко и једноструко затворена мрежа

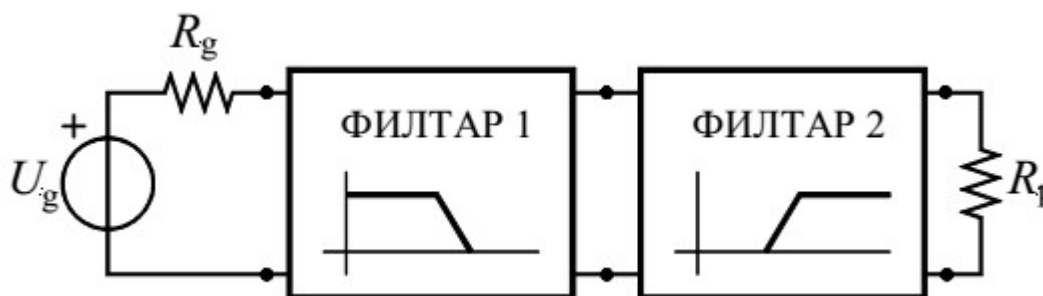


(a)

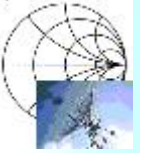


(б)

Општа шема реализације филтра са два приступа
(a) двоструко затворена, и (б) једноструко затворена.

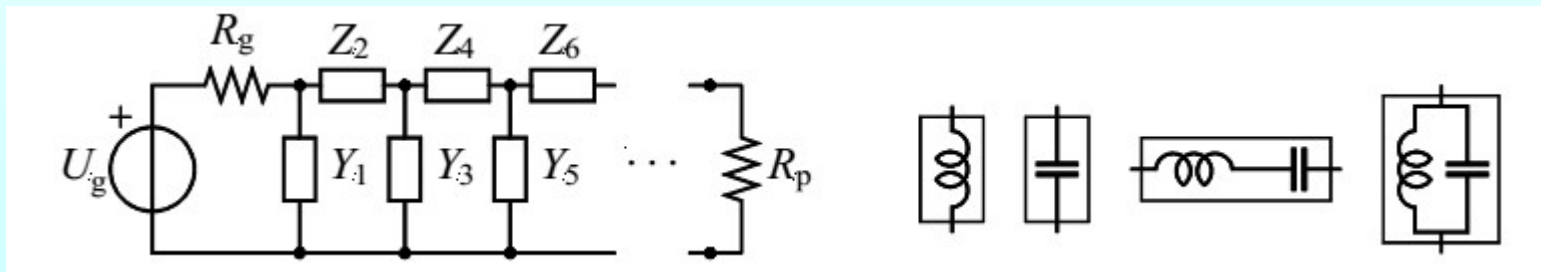


Општа каскадна шема филтра пропусника опсега.



Лествичаста шема филтра

- Лествичаста шема је најважнија у пројектовању пасивних филтара
- За Батервортову и Чебишевљеву апроксимацију постоје аналитички изрази из којих се одређују параметри елемената лествичасте шеме

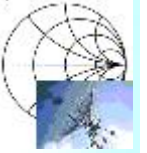


Лествичаста шема и најчешћи састав паралелних и редних мрежа



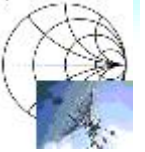
Реализација

- Шема са идеалним елементима је апстракција из које је потребно конструисати физичку нараву
- Да би се то постигло, потребно је одабрати технику у којој ће филтар бити физички остварен и одговарајуће компоненте филтра
- Сваки елемент шеме са идеалним елементима замењује се реалном компонентом (реалном концентрисаном компонентом или секцијом реалног вода)



Студија имперфекције

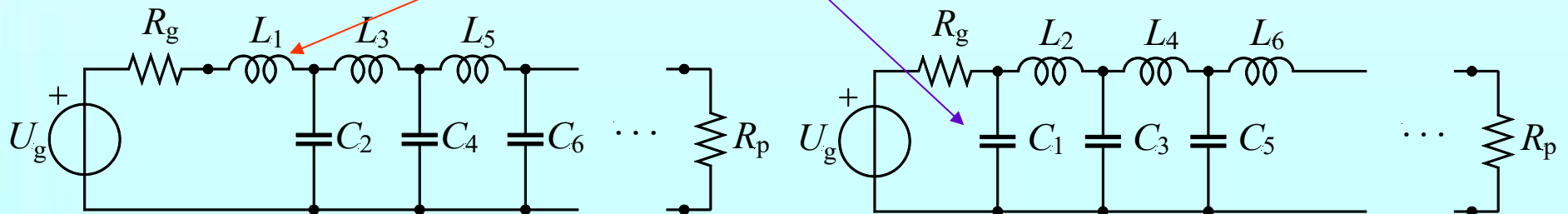
- Замена идеалних елемената реалним(несавршеним) компонентама уноси нежељене(паразитне) ефекте
- Паразитни ефекти изобличују фреквенцијске карактеристике, тако да се често мора кориговати синтеза (апроксимација + шема са идеалним елементима) да би се задовољила спецификација
- Студија имперфекције (проучавање несавршености) помаже да се неке од несавршености благовремено узму у обзир, и у синтези и у реализацији



Прототип филтра и LC -лествичаста шема

- Прототип филтра је LC -лествичаста шема филтра пропусника ниских учестаности за $\Omega_{p,proto} = 1 \text{ rad/s}$ $R_{g,proto} = 1 \Omega$
- Број динамичких елемената (калемова и кондензатора) је једнак реду апроксимације
- Каноничка синтеза: број елемената је најмањи за дати ред апроксимације

Први елемент је **калем** или **кондензатор**



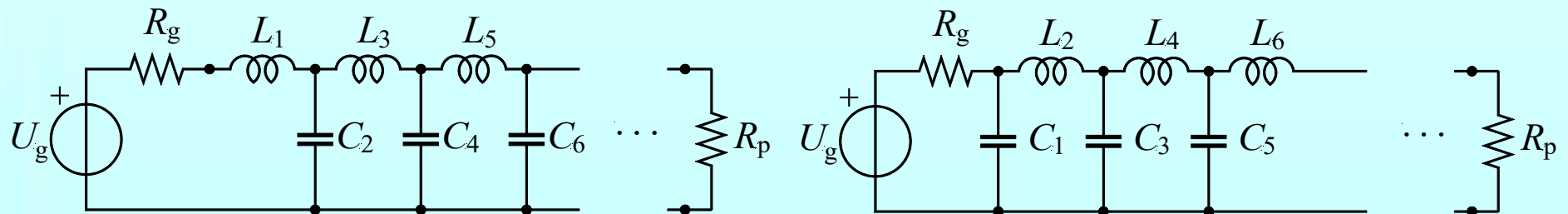


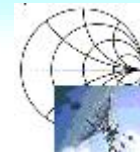
Рачунање параметара елемената прототипа

- За Батервортову и Чебишевљеву апроксимацију постоје аналитички изрази
- Батервортова апроксимација:

$$g_0 = 1,$$
$$g_i = 2 \sin \left(\frac{2i-1}{2n} \pi \right), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$
$$g_{n+1} = 1,$$

$$R_{g, \text{proto}} = g_0,$$
$$L_{k, \text{proto}} = g_k,$$
$$C_{k, \text{proto}} = g_k,$$
$$R_{p, \text{proto}} = g_{n+1}.$$



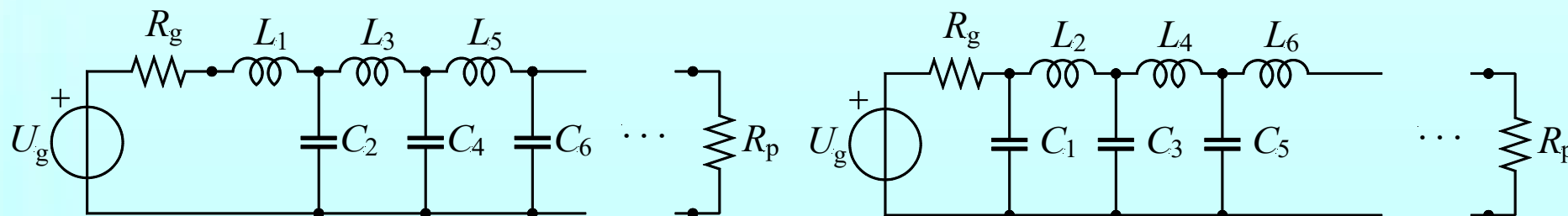


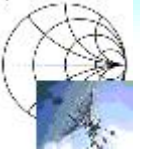
Рачунање параметара елемената прототипа...

- Чебишевљева апроксимација:

$$z = -\ln \left(\operatorname{cth} \frac{A_p [dB]}{17,37} \right), \quad x = \operatorname{sh} \frac{z}{2n},$$
$$a_i = \sin \left(\frac{2i-1}{2n} \pi \right), \quad b_i = x^2 + \sin^2 \frac{i\pi}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$
$$g_0 = 1, \quad g_1 = 2 \frac{a_1}{x}, \quad g_i = \frac{4a_{i-1}a_i}{b_{i-1}g_{i-1}}, \quad i = 2, 3, \dots, n,$$
$$g_{n+1} = \begin{cases} 1, & n = 1, 3, 5, \dots \\ \operatorname{cth}^2 \frac{z}{4}, & n = 2, 4, 6, \dots, \end{cases}$$

$$R_{g, \text{proto}} = g_0,$$
$$L_{k, \text{proto}} = g_k,$$
$$C_{k, \text{proto}} = g_k,$$
$$R_{p, \text{proto}} = \begin{cases} g_{n+1}, & \text{последњи КОНД.} \\ \frac{1}{g_{n+1}}, & \text{последњи КАЛЕМ} \end{cases}$$



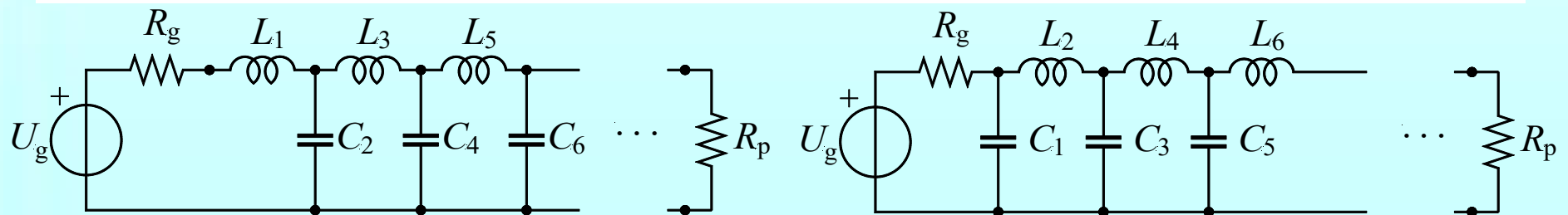


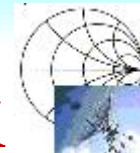
Рачунање параметара елемената прототипа...

- За остале апроксимације постоје таблице
- Беселова апроксимација:

n	$\Omega_{1\%}$	$L_{\Omega_{1\%}}$ [dB]	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
2	0,5627	0,4794	1,5774	0,4226								
3	1,2052	1,3365	1,2550	0,5528	0,1922							
4	1,9314	2,4746	1,0598	0,5116	0,3181	0,1104						
5	2,7090	3,8156	0,9303	0,4577	0,3312	0,2090	0,0718					
6	3,5245	5,3197	0,8377	0,4116	0,3158	0,2364	0,1480	0,0505				
7	4,3575	6,9168	0,7677	0,3744	0,2944	0,2378	0,1778	0,1104	0,0375			
8	5,2175	8,6391	8,7125	0,3446	0,2735	0,2297	0,1867	0,1387	0,0855	0,0289		
9	6,0685	10,349	0,6678	0,3203	0,2547	0,2184	0,1859	0,1506	0,1111	0,0682	0,0230	
10	6,9495	12,188	0,6305	0,3002	0,2384	0,2066	0,1808	0,1539	0,1240	0,0911	0,0557	0,0187

Параметри елемената прототипа са Беселовом апроксимацијом ($g_0 = g_{n+1} = 1$, $\Omega_{p,proto} = 1$ rad/s).
Гранична угаона учестаност $\Omega_{1\%}$ за коју групно кашњење опадне за 1% у односу на вредност на $\Omega = 0$ rad/s. $L_{\Omega_{1\%}}$ [dB] је унето слабљење на $\Omega_{1\%}$.





Шема LC -филтра пропусника ниских учестаности (ПНУ) из прототипа

- За произвољну отпорност генератора R_g и граничну угаону учестаност $\Omega_p = 2\pi F_p$

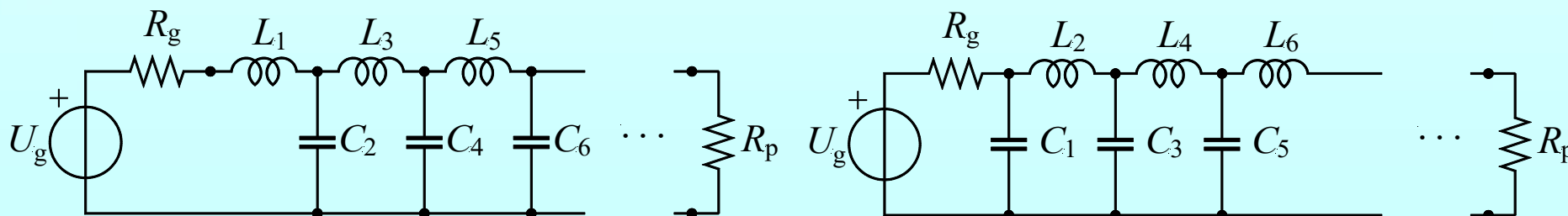
$$R_g = R_g R_{g, \text{proto}} = R_g$$

$$L_k = R_g \frac{1}{\Omega_p} L_{k, \text{proto}}$$

$$R_p = R_g R_{p, \text{proto}}$$

$$C_k = \frac{1}{R_g} \frac{1}{\Omega_p} C_{k, \text{proto}}$$

тако да су на Ω_p све импедансе R_g пута веће од импеданси прототипа на $\Omega_{p, \text{proto}} = 1 \text{ rad/s}$





Пример: Шеме филтра ПНУ за три апроксимације

- Спецификација филтра ПНУ

$$n = 5, \quad F_p = 2 \text{ GHz}, \quad A_p = 3 \text{ dB}, \quad R_g = 50 \Omega$$

- Задатак: одредити Батервортов филтар

Филтер
Wizard
MWO

Filter Synthesis Wizard

Lowpass Parameter Specifications
Specify the lowpass parameter values.

Filter Order: N

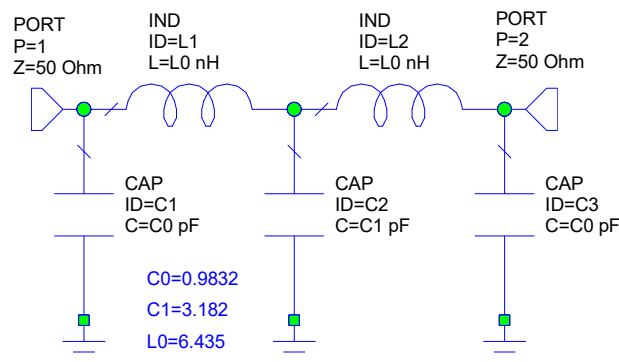
Band Edge Frequency: FC GHz

Passband Parameter: PP

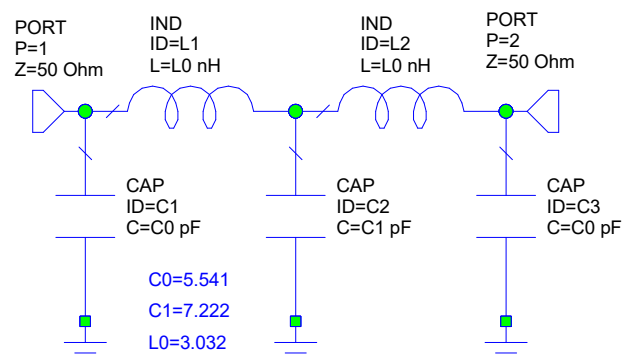
Passband Parameter Value: PV dB

Source Resistance: RS Ohm

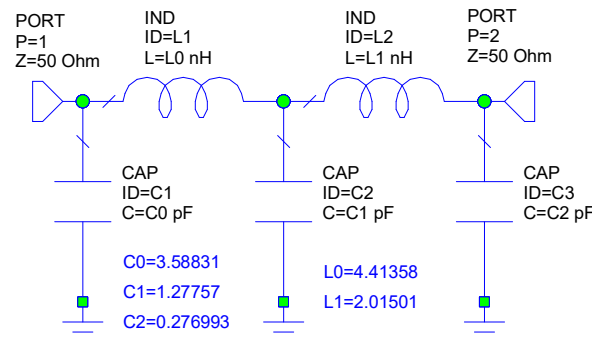
Load Resistance: RL Ohm



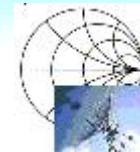
Бат.



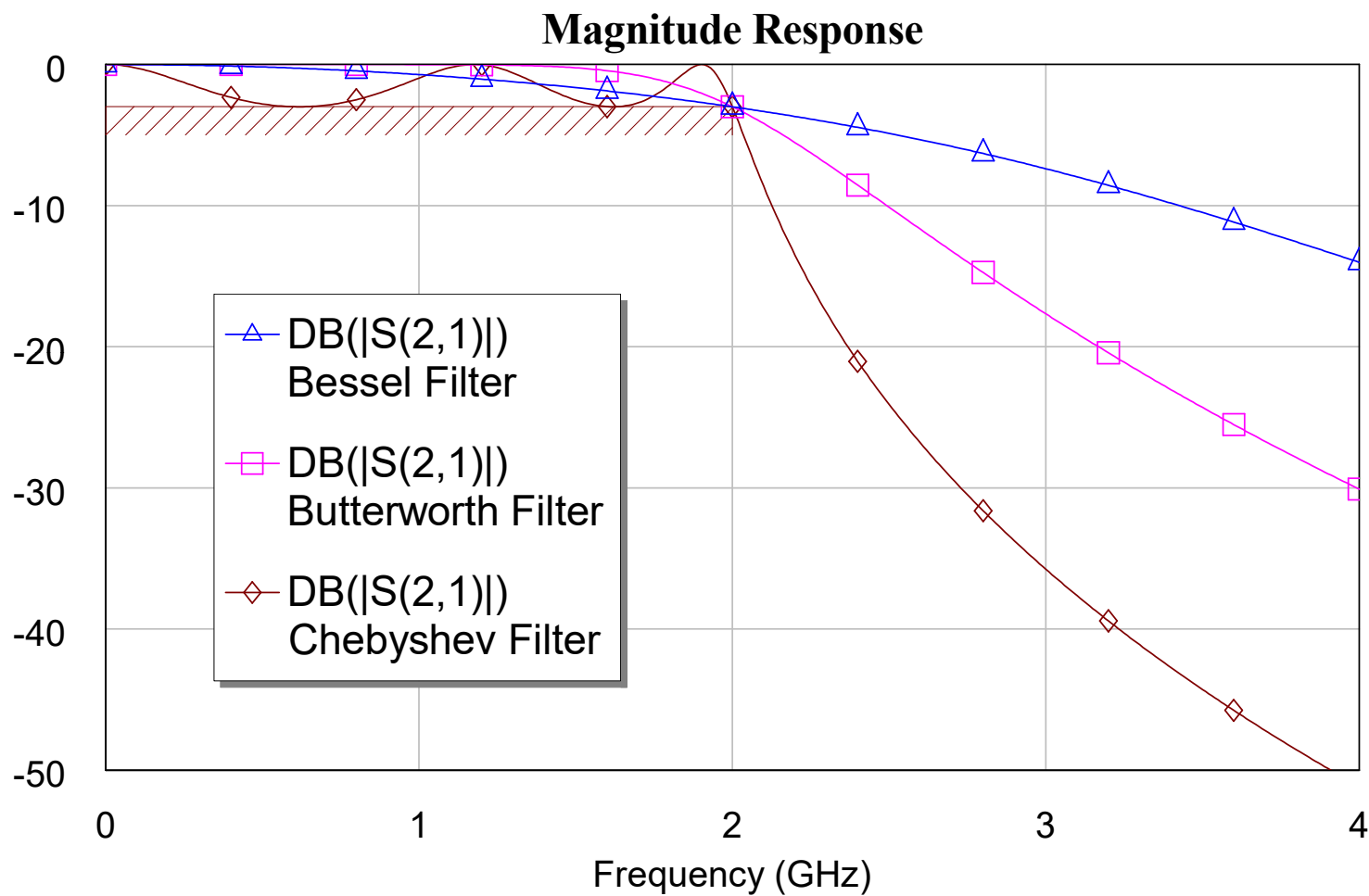
Чеб.

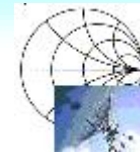


Бес.

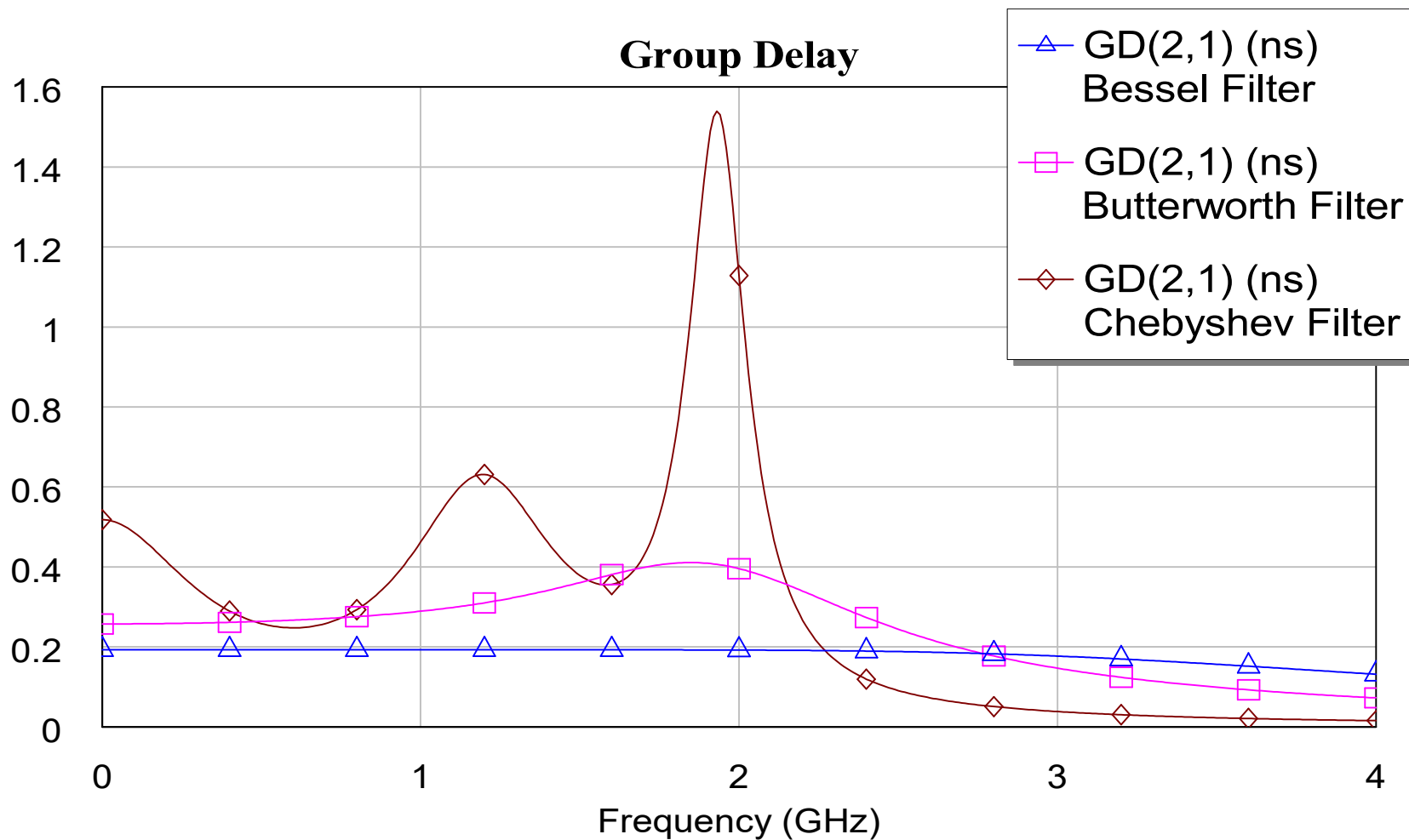


Амплитудска карактеристика





Групно кашњење



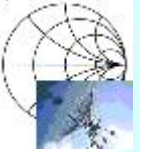
Шема LC -филтра пропусника високих учестаности (ПВУ) из прототипа



- Паралелни кондензатори замене се калемовима индуктивности $1/C_{k,proto}$
- Редни калемови замене се кондензаторима капацитивности $1/L_{k,proto}$
- За изабране Ω_p и R_g добија се

$$L_{k,HP} = R_g \frac{1}{\Omega_p} \frac{1}{C_{k,proto}}$$

$$C_{k,HP} = \frac{1}{R_g} \frac{1}{\Omega_p} \frac{1}{L_{k,proto}}$$



Пример: Шема филтра ПВУ из прототипа

- Чебишевљево ПВУ филтар

$$n = 3, \quad F_p = 500 \text{ MHz}, \quad A_p = 0,4 \text{ dB}, \quad R_g = R_p = Z_0 = 50 \Omega$$

- Решење:

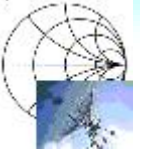
$$g_0 = 1, \quad g_1 = 1,49088, \quad g_2 = 1,118, \quad g_3 = 1,49088, \quad g_4 = 1$$

Нека је први елемент (паралелни) кондензатор

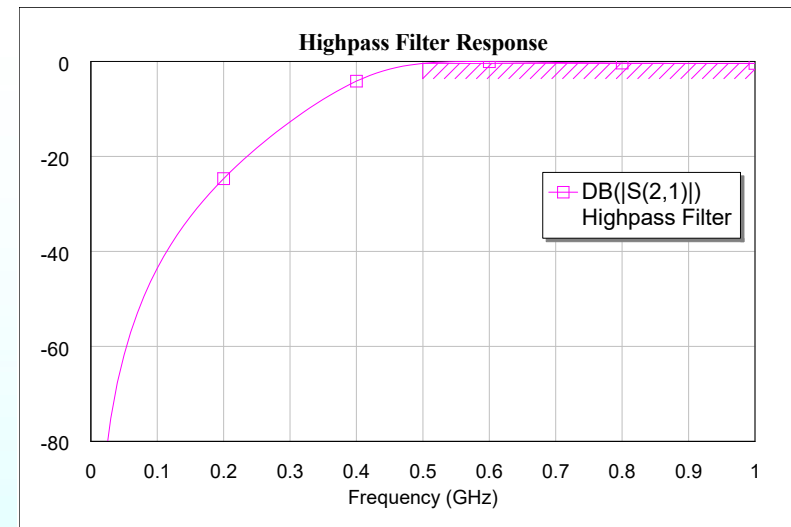
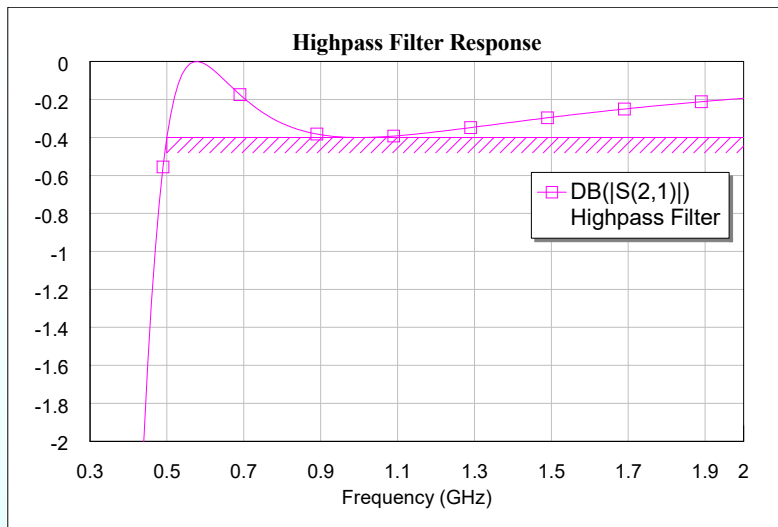
$$R_{g,\text{proto}} = R_{p,\text{proto}} = 1, \quad C_{1,\text{proto}} = C_{3,\text{proto}} = 1,49, \quad L_{2,\text{proto}} = 1,12,$$

$$L_{1,\text{HP}} = L_{3,\text{HP}} = 10,7 \text{ nH}, \quad C_{2,\text{HP}} = 5,69 \text{ pF}$$

У шеми филтра први елемент је (паралелни) калем

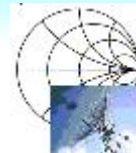


Пример: Шема филтра ПВУ из прототипа...



- Ако је потребно остварити и услов да је $A_s = 20$ dB на $F_s = 400$ MHz , који ред филтра треба одабрати?
- Одговор: $n = 7$ (наћи из аналитичког израза или претраживањем)

Шема LC -филтра пропусника опсега учестаности (ПОУ) из прототипа



- Сваки паралелни кондензатор замени се паралелном LC везом

$$C_{k, \text{BP}} = \frac{1}{R_g} \frac{1}{\Omega_{p2} - \Omega_{p1}} C_{k, \text{proto}}$$

$$L_{k, \text{BP}} = \frac{1}{\Omega_{p2} \Omega_{p1} C_{k, \text{BP}}}$$

- Сваки редни калем замени се редном LC везом

$$L_{k, \text{BP}} = R_g \frac{1}{\Omega_{p2} - \Omega_{p1}} L_{k, \text{proto}}$$

$$C_{k, \text{BP}} = \frac{1}{\Omega_{p2} \Omega_{p1} L_{k, \text{BP}}}$$

$$L_{k, \text{BP}} C_{k, \text{BP}} = \text{const} = 1/(\Omega_{p2} \Omega_{p1})$$



Пример: Шеме филтра ПОУ из прототипа

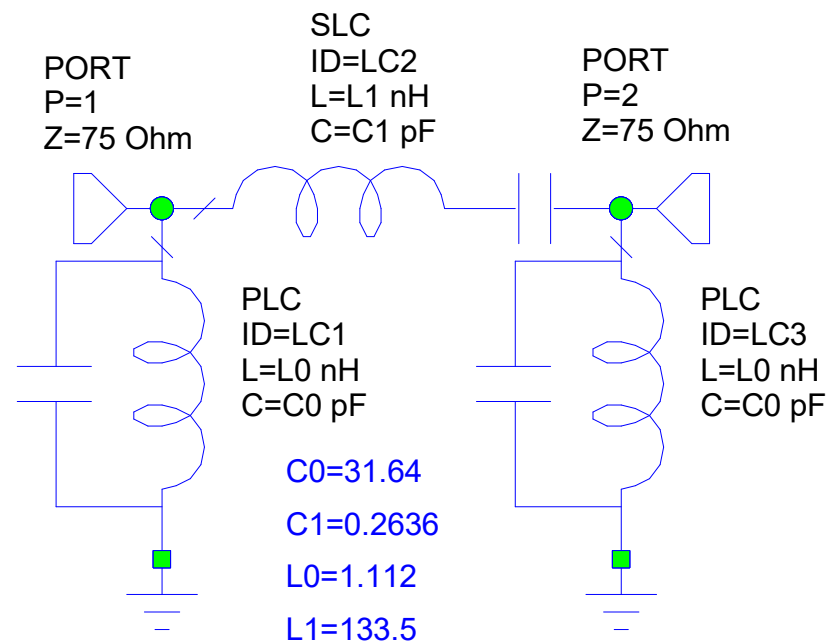
- Чебишевљев филтар ПОУ:

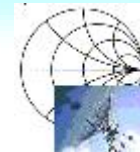
$$n = 3, \quad F_{p1} = 800 \text{ MHz}, \quad F_{p2} = 900 \text{ MHz},$$
$$A_p = 0,4 \text{ dB}, \quad R_g = R_p = Z_0 = 75 \Omega$$

Filter Synthesis Wizard

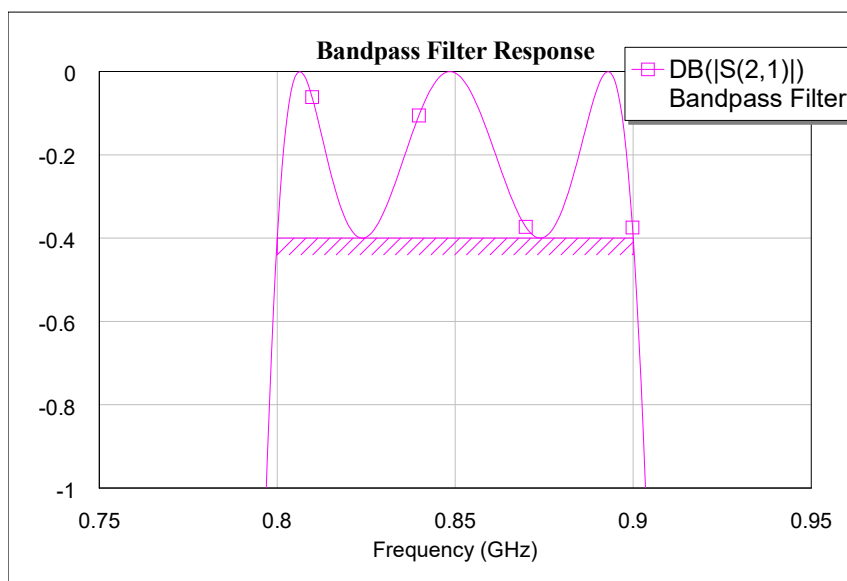
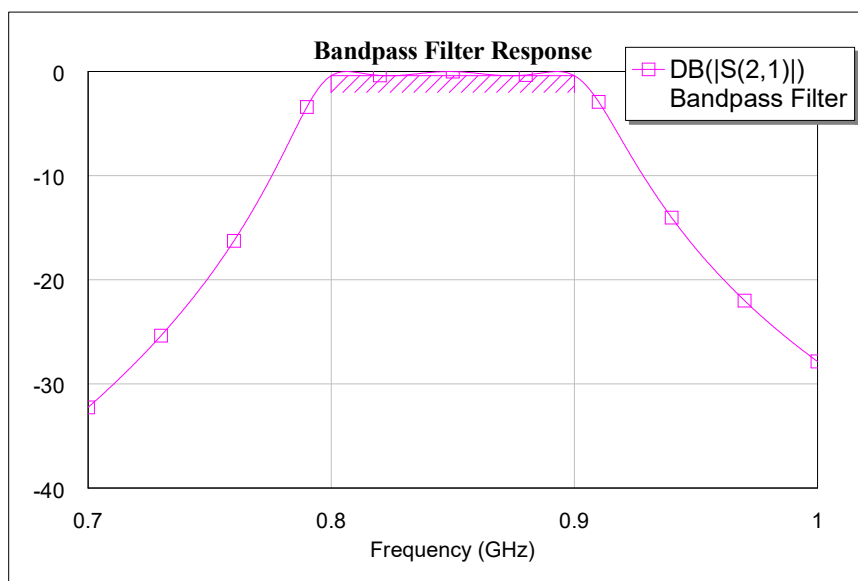
Bandpass Parameter Specifications
Specify the bandpass parameter values.

Filter Order:	N	3
Lower Edge of Passband:	FL	0.8 GHz
Upper Edge of Passband:	FH	0.9 GHz
Passband Parameter:	PP	Ripple [dB]
Passband Parameter Value:	PV	0.4 dB
Source Resistance:	RS	75 Ohm
Load Resistance:	RL	75 Ohm





Пример: Шема филтра ПОУ из прототипа...





Шема LC -филтра непропусника опсега учестаности (НОУ) из прототипа

- Сваки паралелни кондензатор замени се редном LC везом

$$L_{k,BS} = R_g \frac{1}{\Omega_{p2} - \Omega_{p1}} \frac{1}{C_{k,proto}}$$

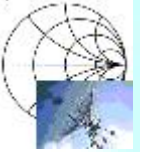
$$C_{k,BS} = \frac{1}{\Omega_{p2}\Omega_{p1}L_{k,BS}}$$

- Сваки редни калем замени се паралелном LC везом

$$C_{k,BS} = \frac{1}{R_g} \frac{1}{\Omega_{p2} - \Omega_{p1}} \frac{1}{L_{k,proto}}$$

$$L_{k,BS} = \frac{1}{\Omega_{p2}\Omega_{p1}C_{k,BS}}$$

- Поново је $L_{k,BS}C_{k,BS} = \text{const} = 1/(\Omega_{p2}\Omega_{p1})$



Пример: Шеме филтра НОУ из прототипа

- Чебишевљев BS филтар:

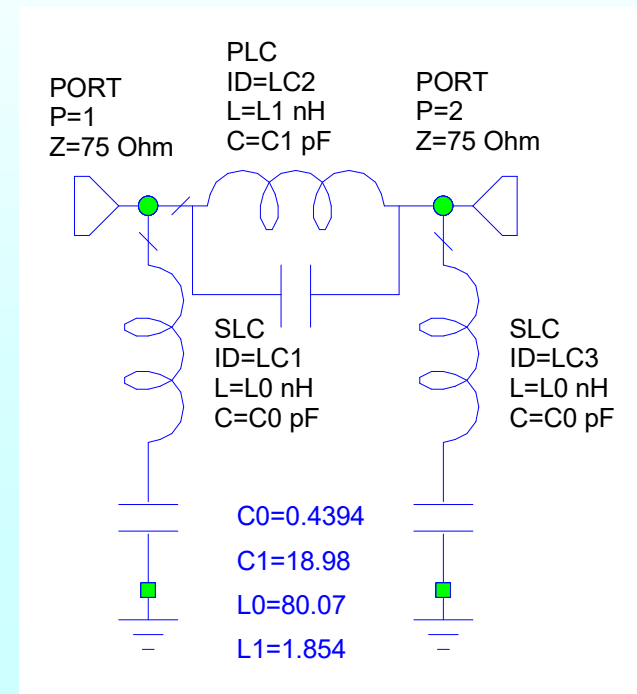
$$n = 3, \quad F_{p1} = 800 \text{ MHz}, \quad F_{p2} = 900 \text{ MHz},$$

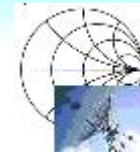
$$A_p = 0,4 \text{ dB}, \quad R_g = R_p = Z_0 = 75 \Omega$$

Filter Synthesis Wizard

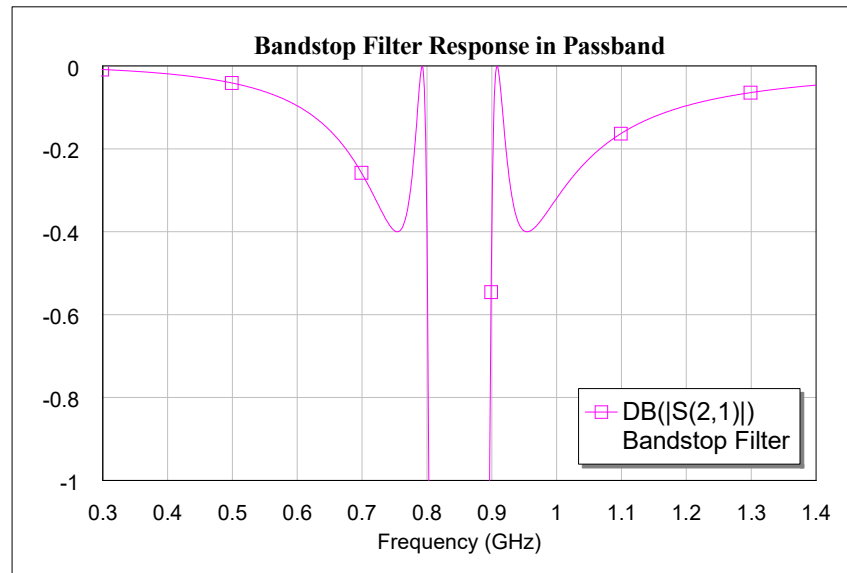
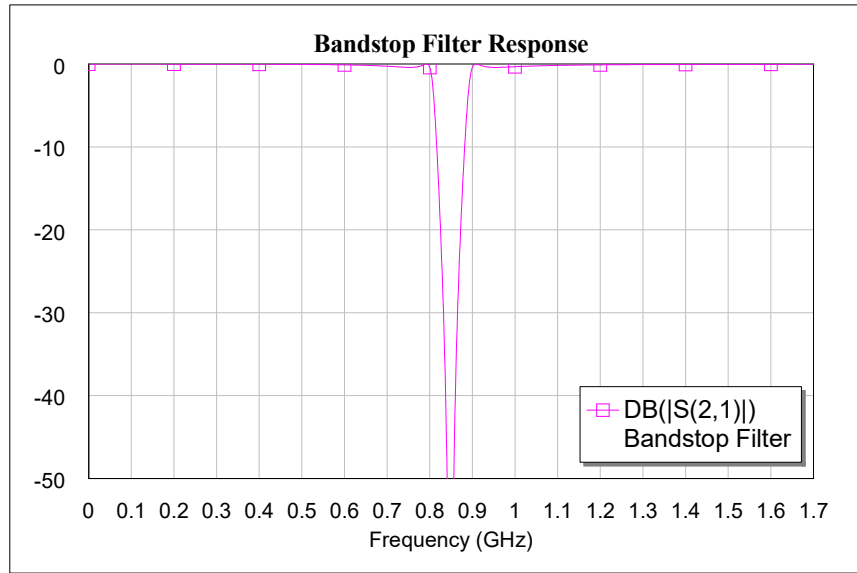
Bandstop Parameter Specifications
Specify the bandstop parameter values.

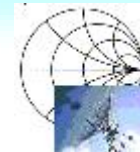
Filter Order:	N	<input type="text" value="3"/>
Lower Edge of Passband:	FL	<input type="text" value="0.8"/> GHz
Upper Edge of Passband:	FH	<input type="text" value="0.9"/> GHz
Passband Parameter:	PP	<input type="text" value="Ripple [dB]"/>
Passband Parameter Value:	PV	<input type="text" value="0.4"/> dB
Source Resistance:	RS	<input type="text" value="75"/> Ohm
Load Resistance:	RL	<input type="text" value="75"/> Ohm



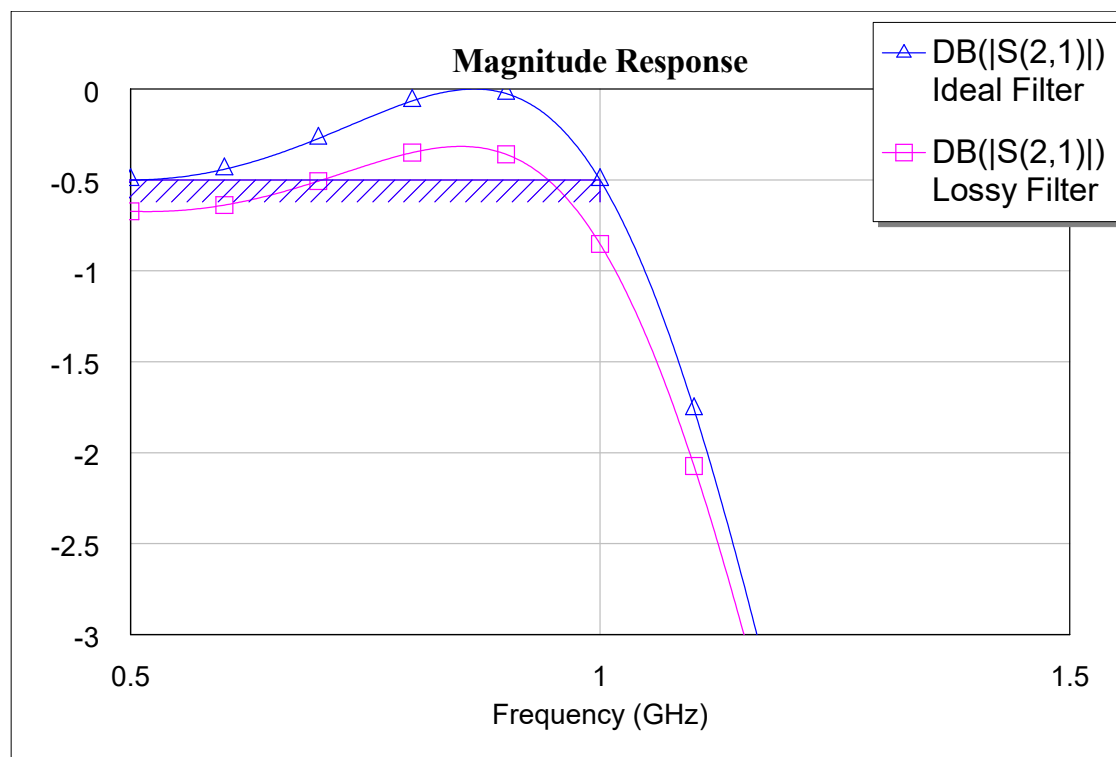
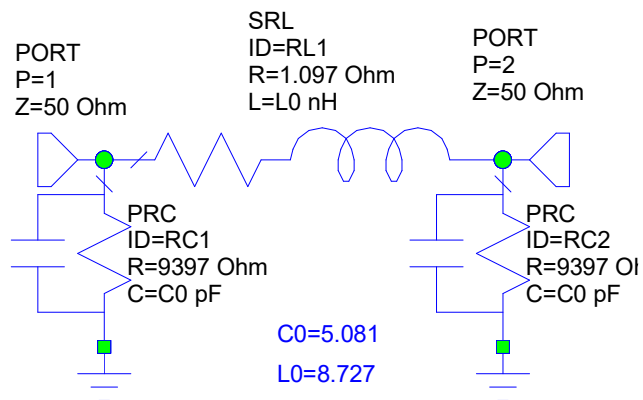


Пример: Шема филтра НОУ из прототипа...





Утицај губитака на амплитудску карактеристику филтра



У Wizard-y:

Element Loss

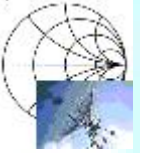
Include Element Loss

Inductor Q:

Capacitor Q:

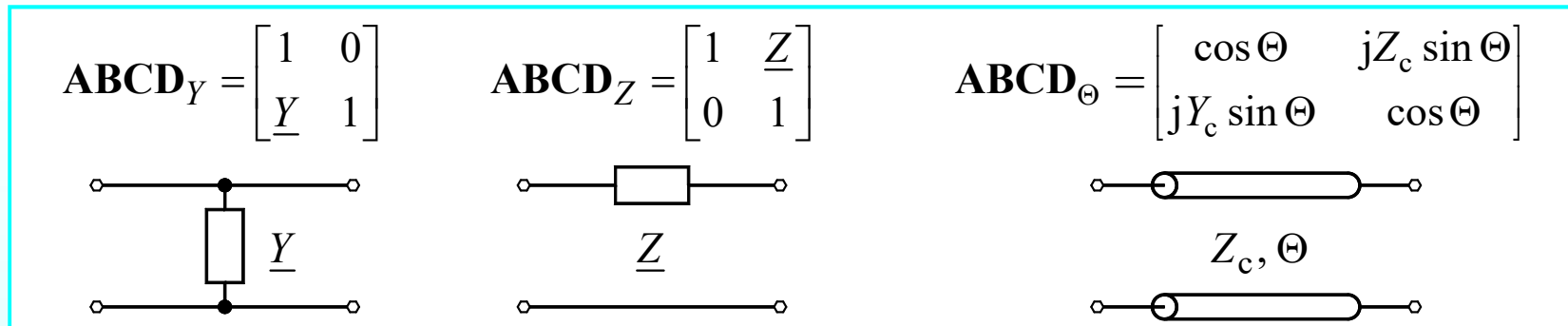
Resonator Q:

0 = Infinite Q



Реализација филтра помоћу каскада секција вода

- Да ли се секцијом вода може реализовати концентрисани елементат?



- За мало $\Theta_{[\text{rad}]}$ је $\mathbf{ABCD}_\Theta \approx \begin{bmatrix} 1 & jZ_c \Theta \\ jY_c \Theta & 1 \end{bmatrix}$
- Мало $Z_c \rightarrow$ паралелна капацитивна адмитанса
- Велико $Z_c \rightarrow$ редна индуктивна импеданса



Прорачун дужина секција водова

- У своји се $Z_{c,\min}$ и $Z_{c,\max}$ (микротрак. вод: 20Ω , 100Ω)
- Паралелни кондензатор:

$$Z_c = Z_{c,\min}$$

$$\Theta_0 = C\omega_0 Z_{c,\min} = C_{\text{proto}} Z_{c,\min} / R_g$$

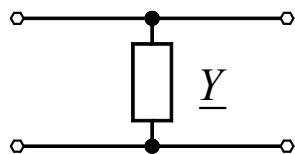
- Редни калем:

$$Z_c = Z_{c,\max}$$

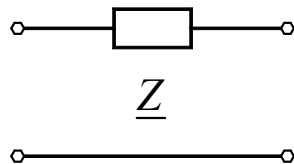
$$\Theta_0 = L\omega_0 / Z_{c,\max} = L_{\text{proto}} R_g / Z_{c,\max}$$

Θ_0 је у радијанима!

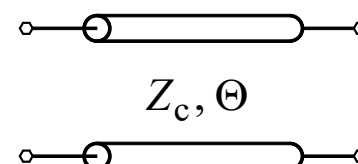
$$\mathbf{ABCD}_Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \underline{Y} & 1 \end{bmatrix}$$



$$\mathbf{ABCD}_Z = \begin{bmatrix} 1 & \underline{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



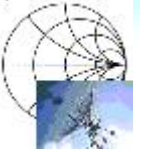
$$\mathbf{ABCD}_\Theta = \begin{bmatrix} \cos \Theta & jZ_c \sin \Theta \\ jY_c \sin \Theta & \cos \Theta \end{bmatrix}$$





Stepped-impedance филтар

- "High-Z-low-Z" реализација
- Пропусник ниских учестаности (ПНУ)
- Има умерену селективност
- Амплитудска карактеристика има паразитне пропусне опсеге



Пример: Прорачун Stepped-impedance филтра

- Максимално равна карактеристика филтра ПНУ:

$$F_p = 2,5 \text{ GHz}, \quad A_p = 3 \text{ dB}, \quad F_s = 4 \text{ GHz}, \quad A_s = 20 \text{ dB},$$

$$R_g = R_p = Z_0 = 50 \Omega, \quad Z_{c,\min} = 20 \Omega, \quad Z_{c,\max} = 120 \Omega$$

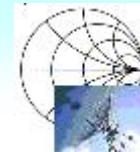
- Прорачун (први елемент кондензатор):

$$A_{\text{dB}}(f) = 10 \log_{10} (1 + (f/F_{3\text{dB}})^{2n})$$

$$A_{\text{dB}}(F_s) \geq A_s \Rightarrow n \geq 5$$

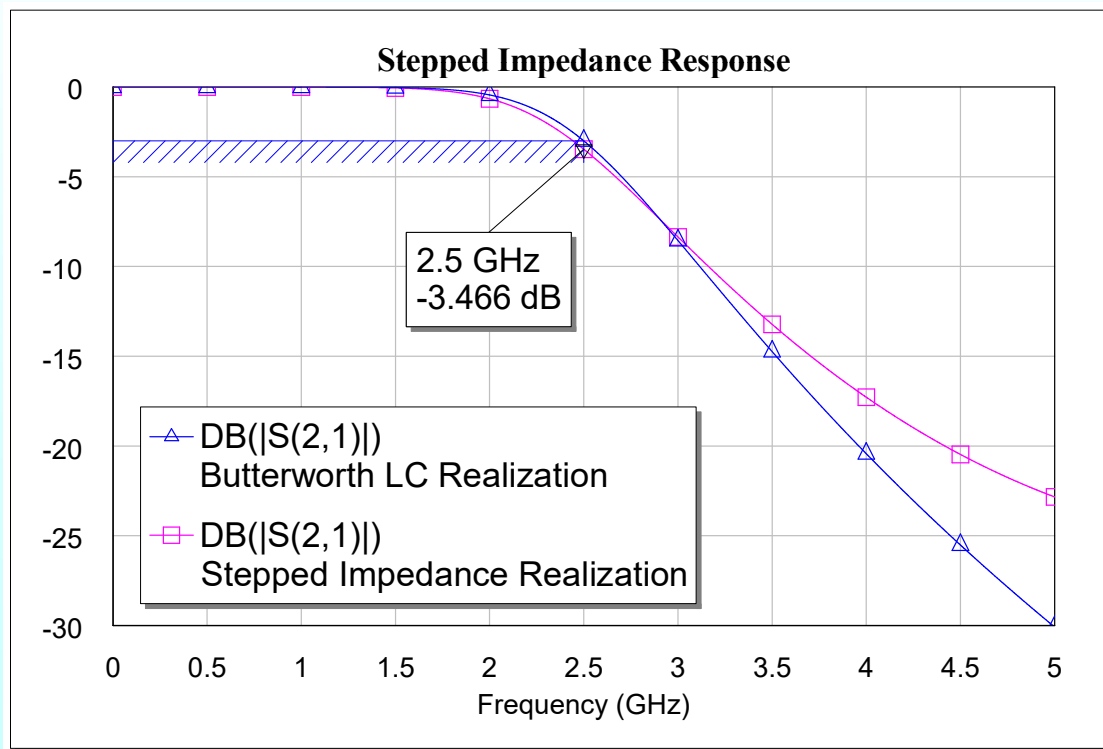
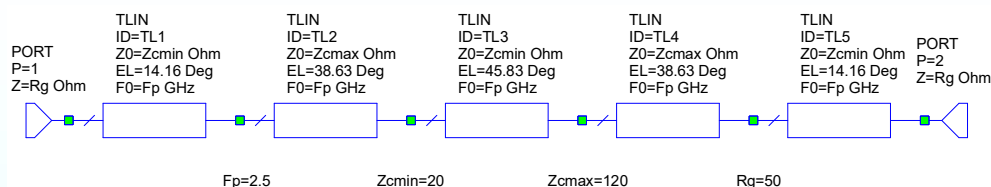
$$g_0 = 1, \quad g_1 = 0,618034, \quad g_2 = 1,61803, \quad g_3 = 2, \quad g_4 = 1,61803, \quad g_5 = 0,618034, \quad g_6 = 1$$

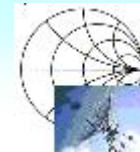
$$\Theta_{01} = 14,16^\circ, \quad \Theta_{02} = 38,63^\circ, \quad \Theta_{03} = 45,84^\circ, \quad \Theta_{04} = 38,63^\circ, \quad \Theta_{05} = 14,16^\circ$$



Пример: Прорачун Stepped-impedance филтра...

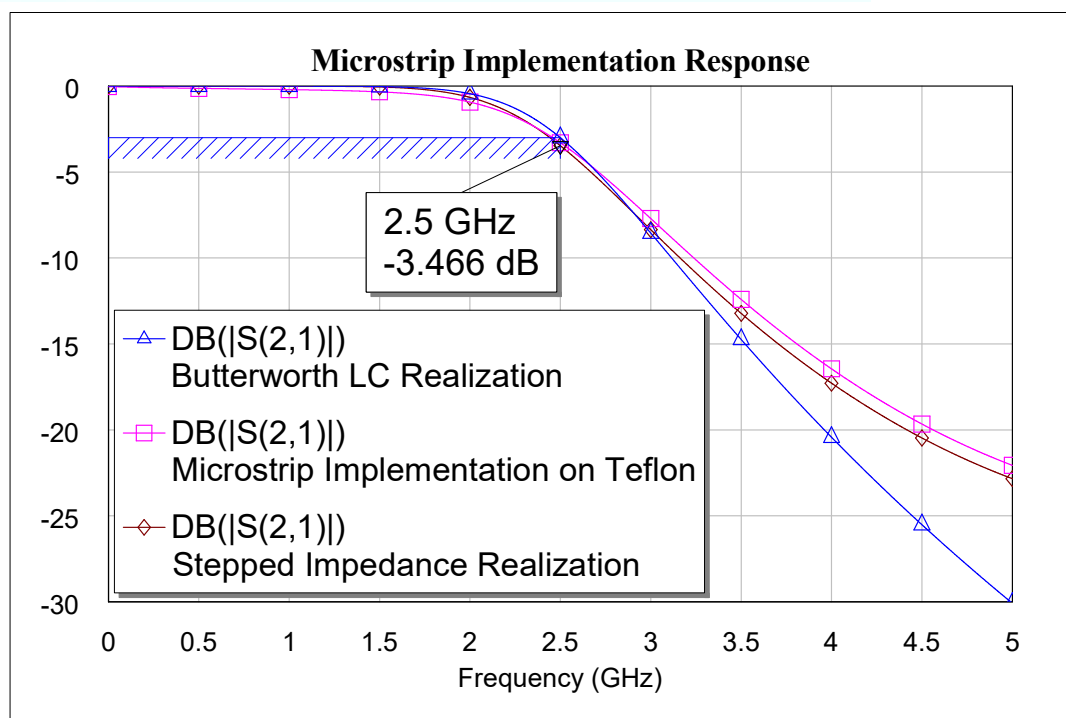
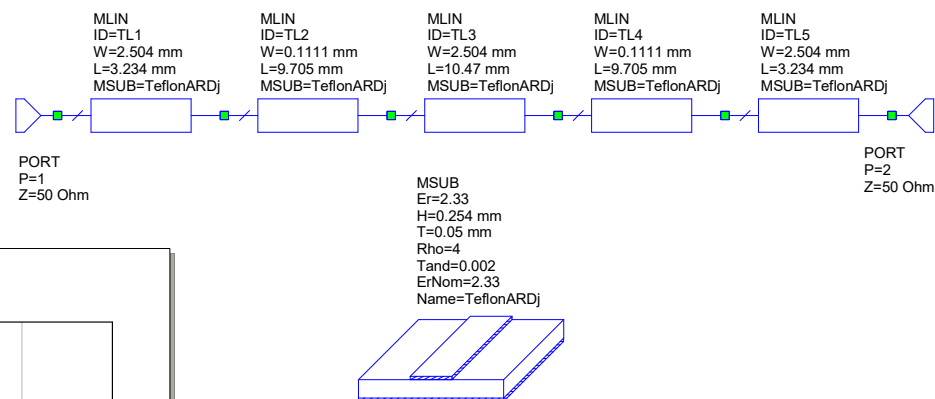
Шема са идеалним водовима

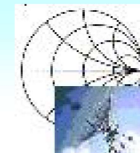




Пример: Прорачун Stepped-impedance филтра...

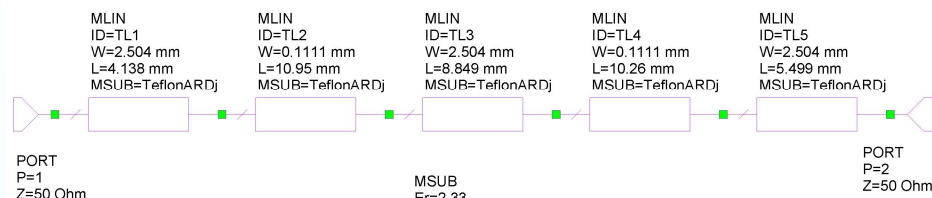
Реализација у микротракастој техници на тefлону



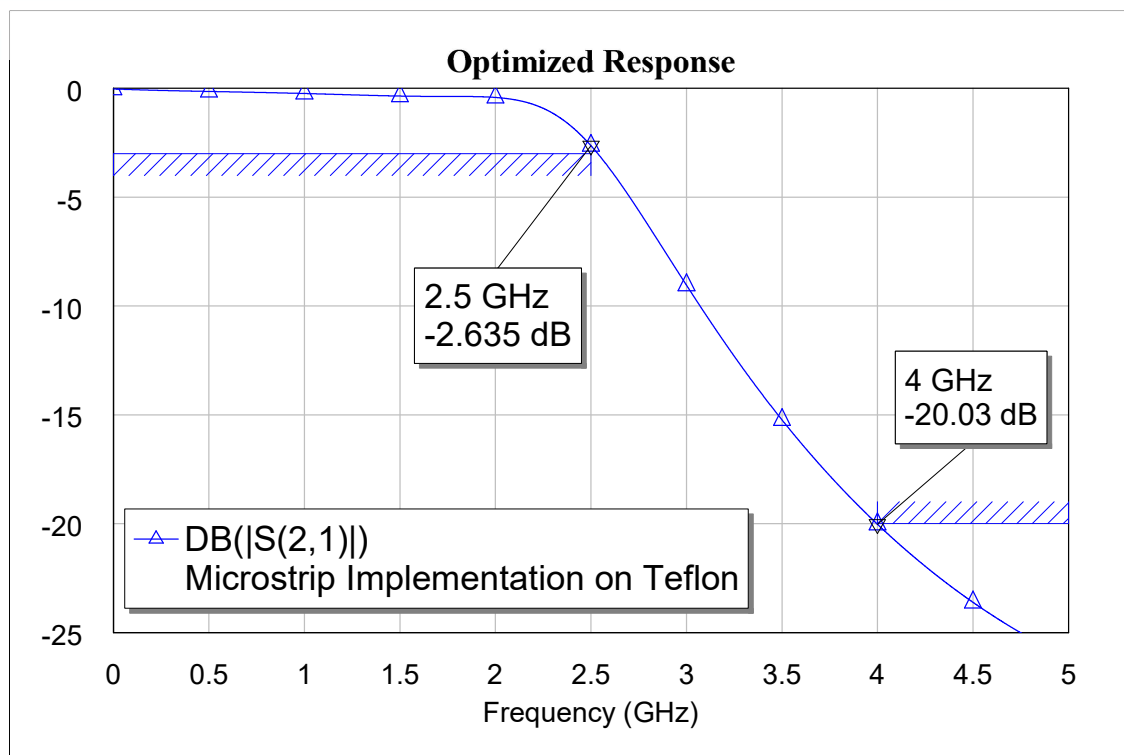
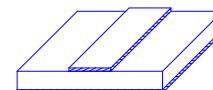


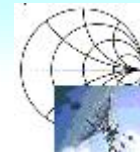
Пример: Прорачун Stepped-impedance филтра...

Оптимизована микротракаста реализација и *layout*



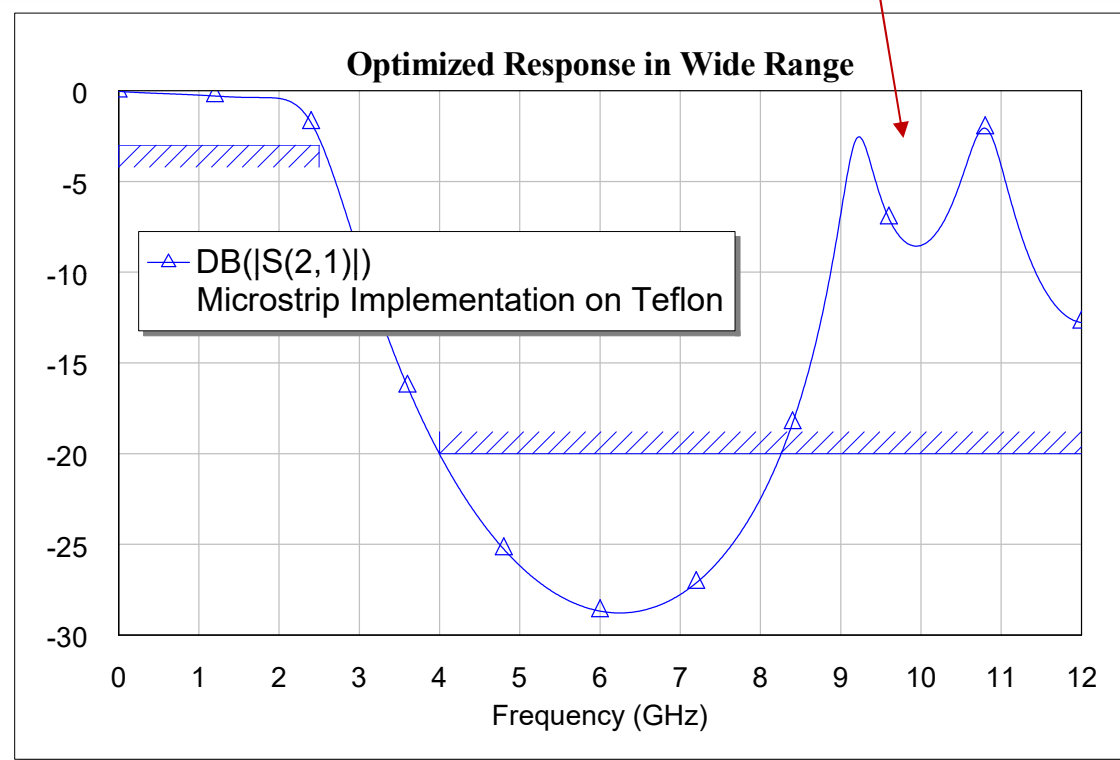
MSUB
Er=2.33
H=0.254 mm
T=0.05 mm
Rho=4
Tand=0.002
ErNom=2.33
Name=TeflonARDj





Пример: Прорачун Stepped-impedance филтра...

Паразитни пропусни опсези



Како их можемо потиснути???

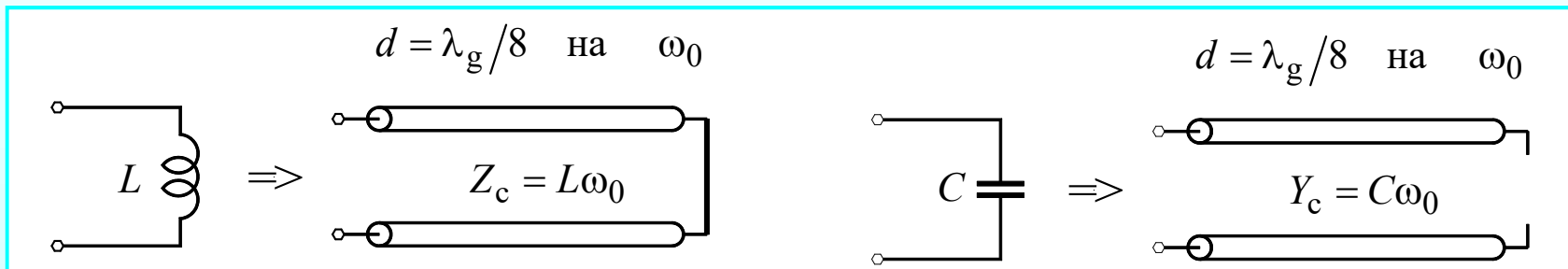


Ричардсова трансформација

- Замена калемова и кондензатора кратко спојеним и отвореним огранцима исте дужине $d = \lambda_g / 8$

$$Z_c = L\omega_0 = R_g L_{\text{proto}}$$

$$Y_c = C\omega_0 = C_{\text{proto}} / R_g$$



- Реализација "*commensurate line*", "*all-stub*"

commensurate (eng.) = сразмеран



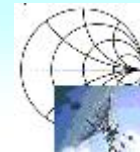
Пример: Ричардсова трансформација филтра ПНУ

- Батервортов филтар ПНУ (први елемент калем),

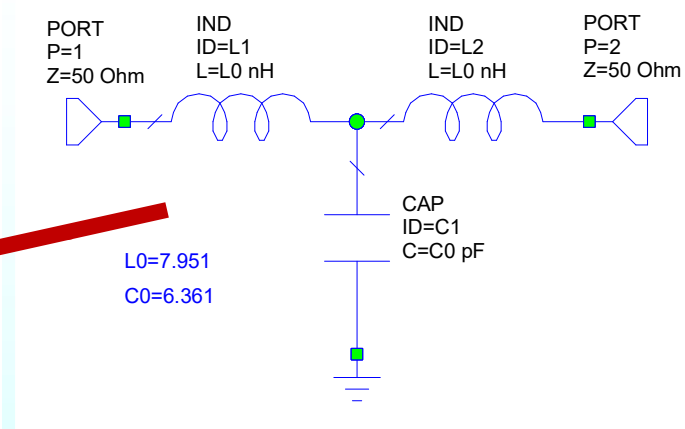
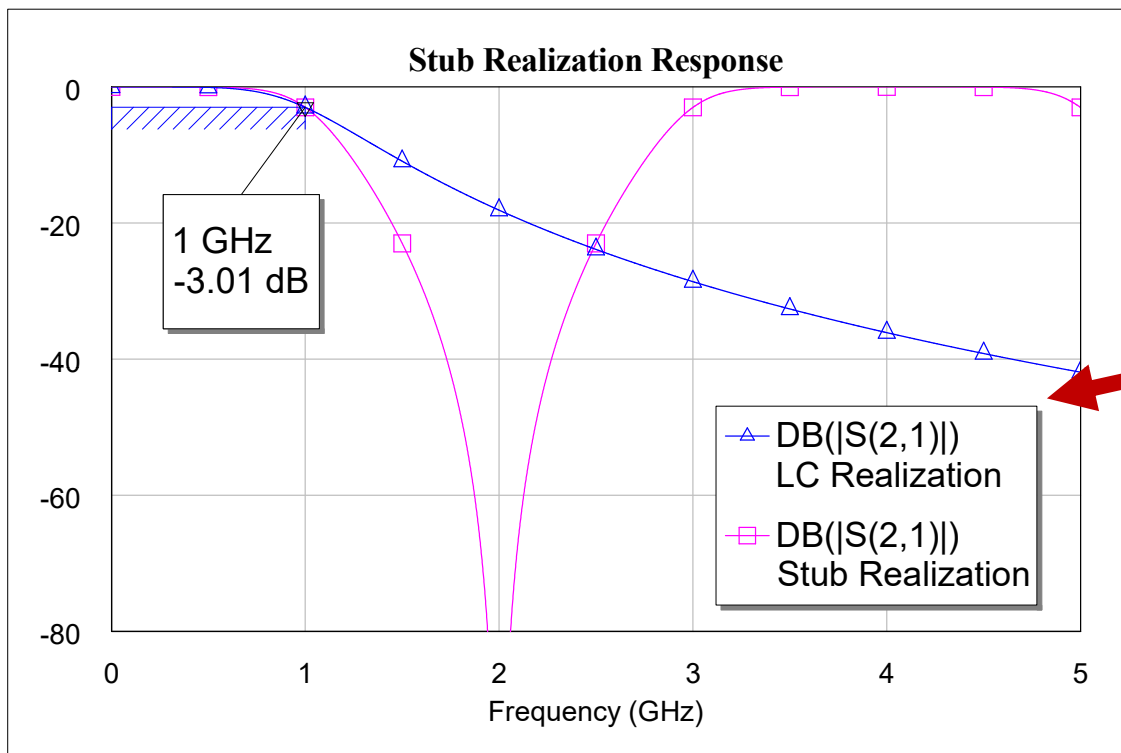
$$n = 3, \quad F_p = 1 \text{ GHz}, \quad A_p = 3 \text{ dB}, \quad Z_0 = 50 \Omega$$

- Резултат:

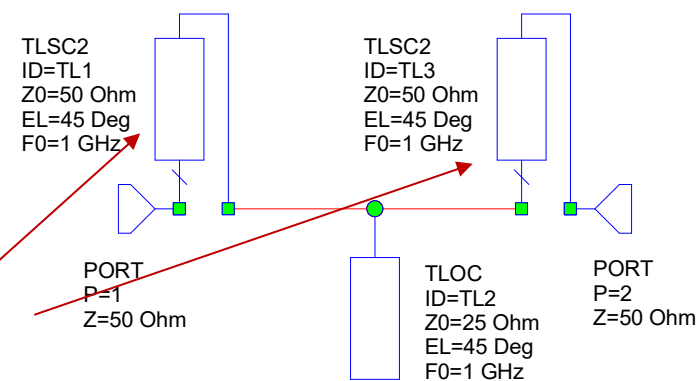
$$g_{0,1,2,3,4} = 1; 1; 2; 1; 1, \quad Z_{c1,2,3} = 50; 25; 50 \Omega$$

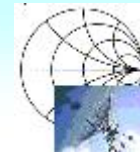


Пример: Ричардсова трансформација филтра ПНУ

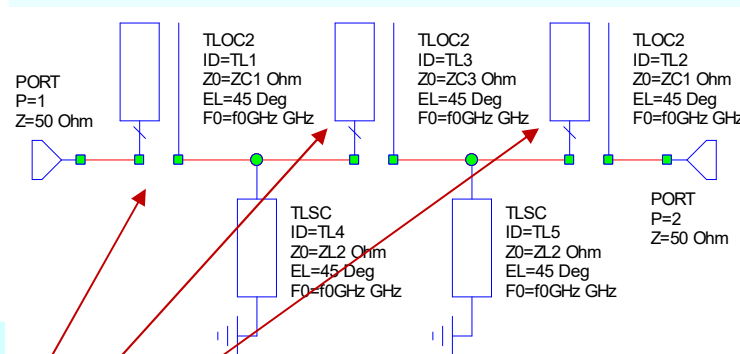
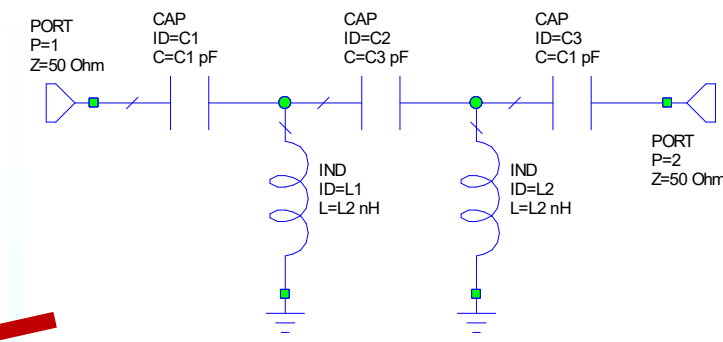
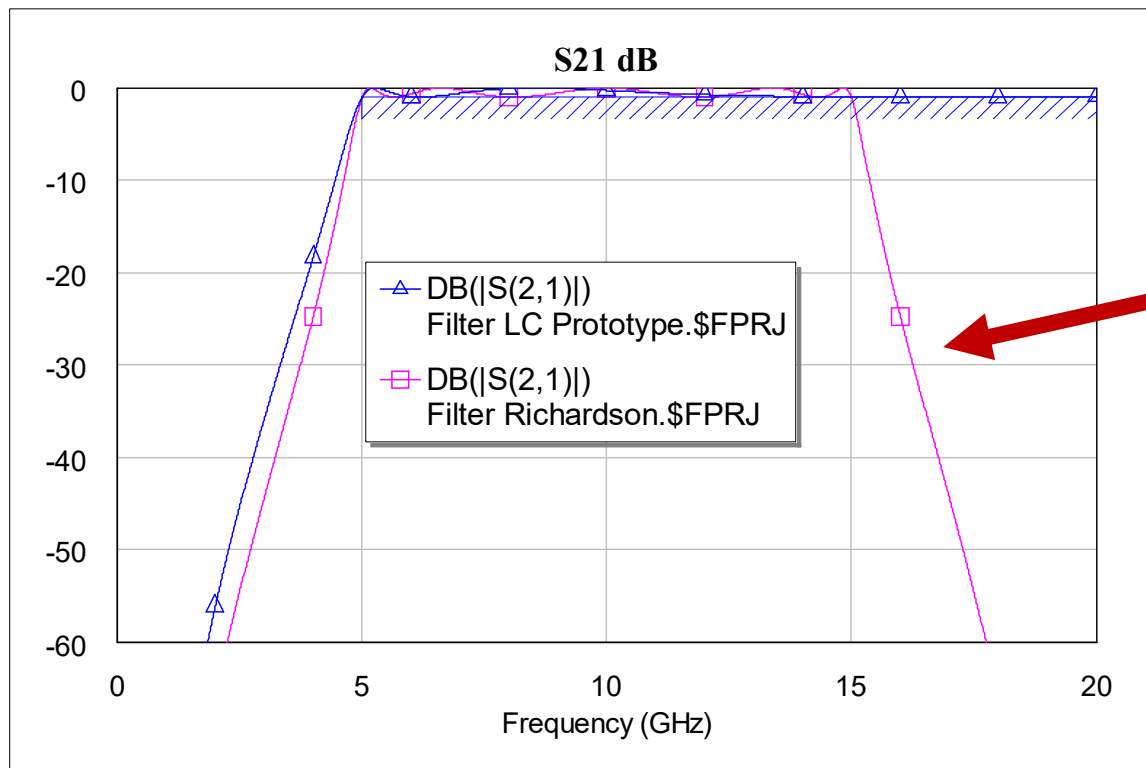


Неподесно за микротракасту имплементацију

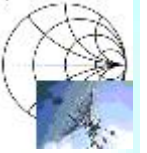




Пример: Ричардсова трансформација филтра ПВУ

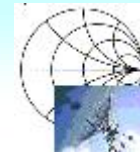


Неподесно за микротракасту имплементацију



Куродини идентитети

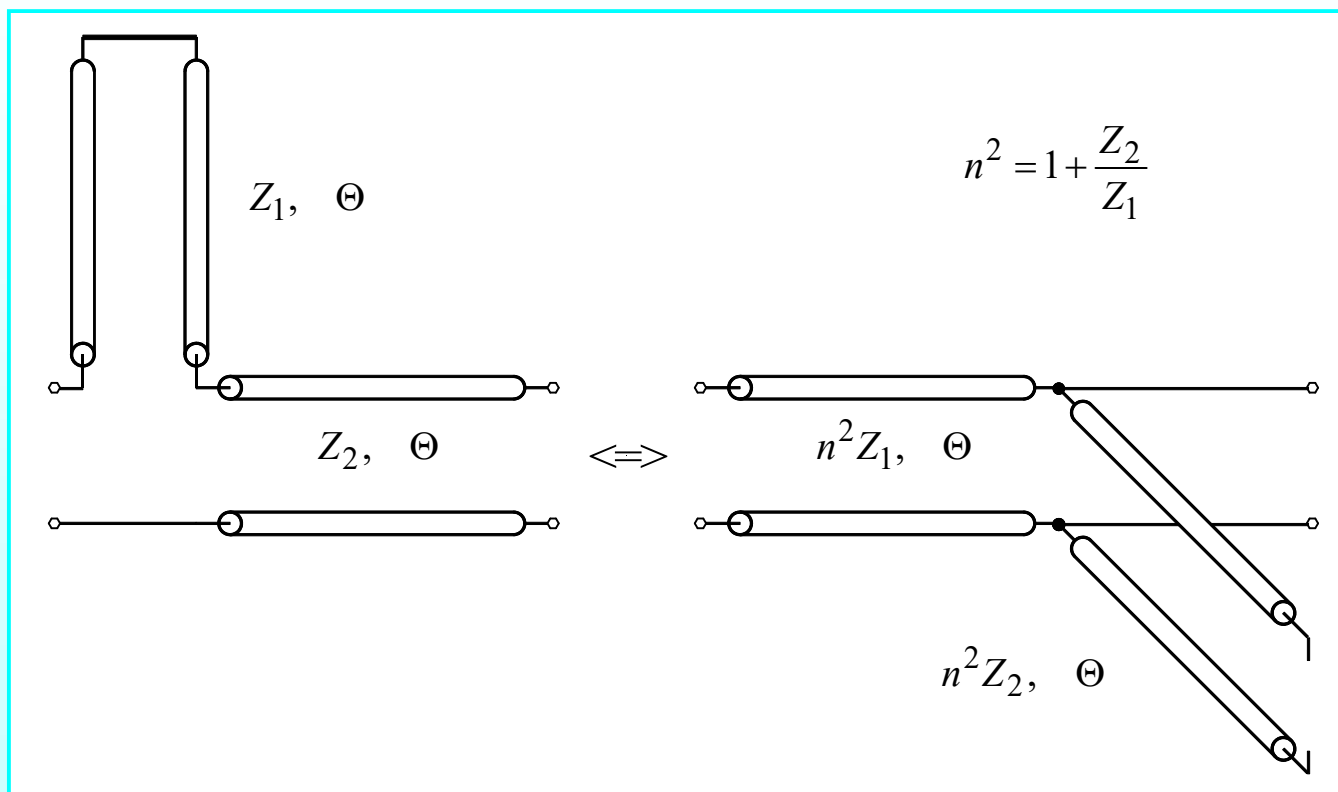
- Заменске (еквивалентне) шеме
- Преуређивање шема добијених Ричардсовом трансформацијом у
 - шеме са огранцима нпр. само у **паралелним гранама**, што је
 - погодно за **микротракасту** реализацију
- Редни огранци се трансфигуришу у паралелне
- Куродини идентитети важе за све учестаности!



Куродини идентитети...

Два најзначајнија идентитета:

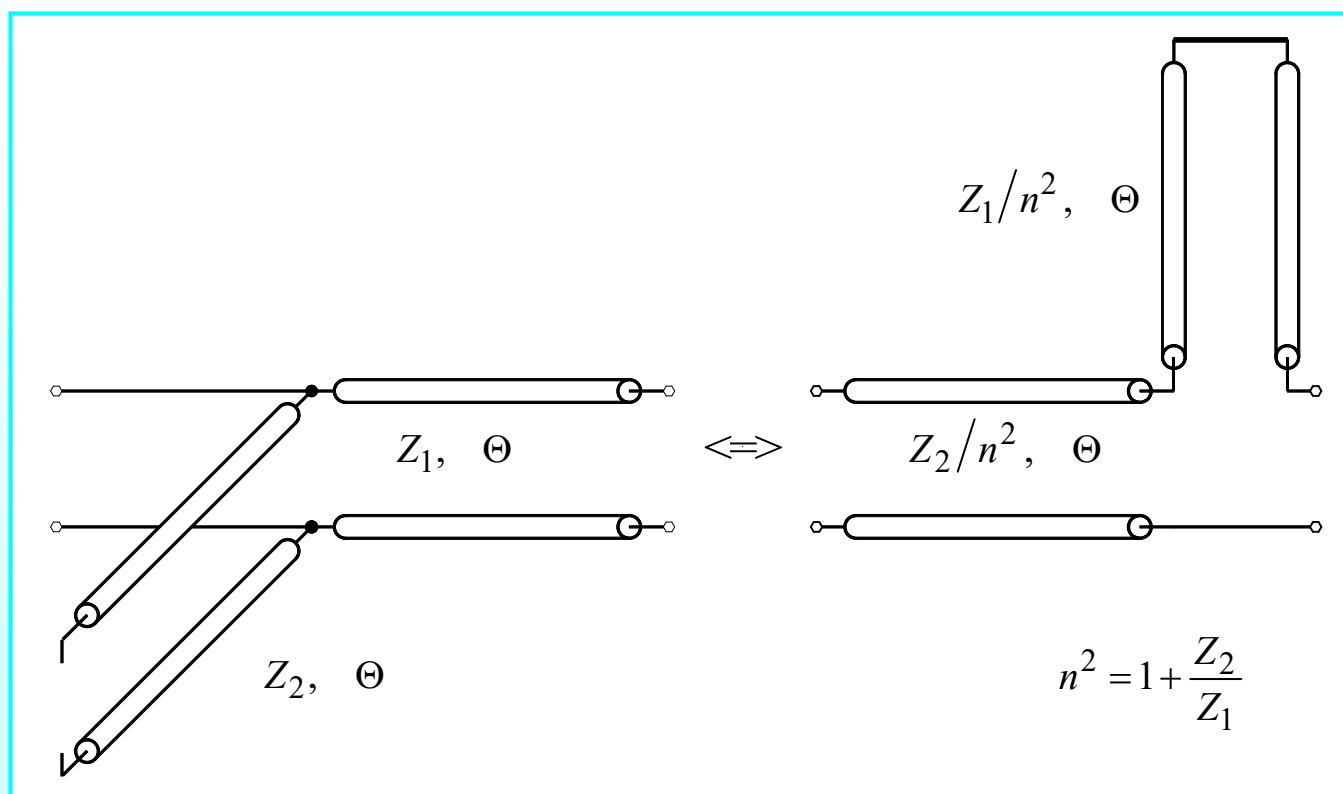
редни к. с. огранак \rightarrow паралелни отв. огранак



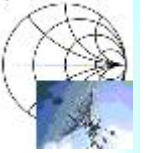


Куродини идентитети...

паралелни отв. огранак \rightarrow редни к. с. огранак



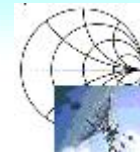
Може се извести из претходног идентитета



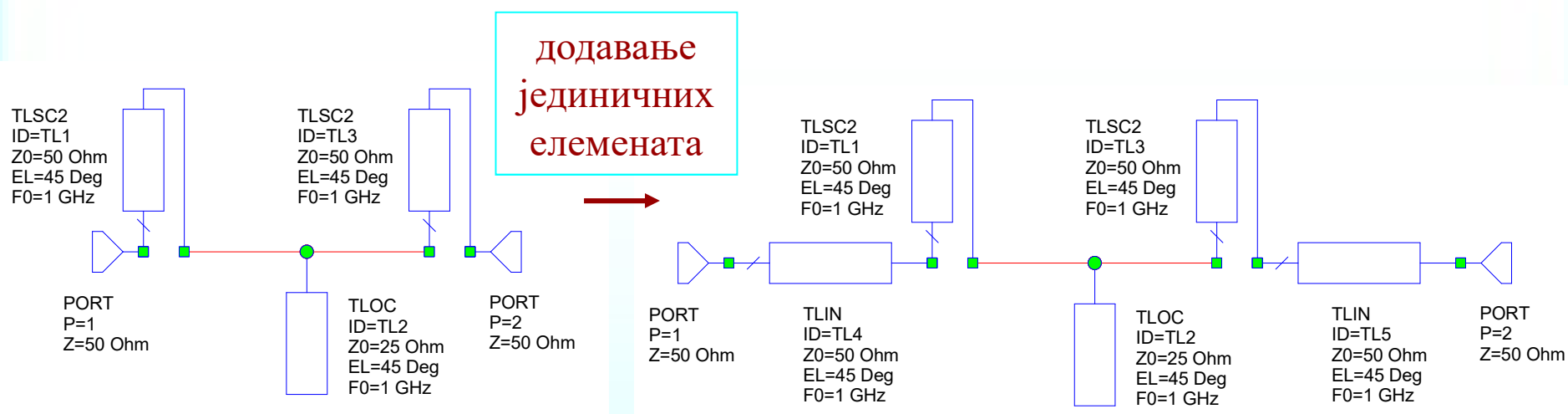
Куродини идентитети...

- Примењује се и став да се модули s -параметара не мењају ако се приступ продужи секцијом идеалног вода $Z_c = Z_0$
- Секција вода дужине $d = \lambda_g / 8, \lambda_g / 4$ или произвољне дужине* назива се **јединични елемент**

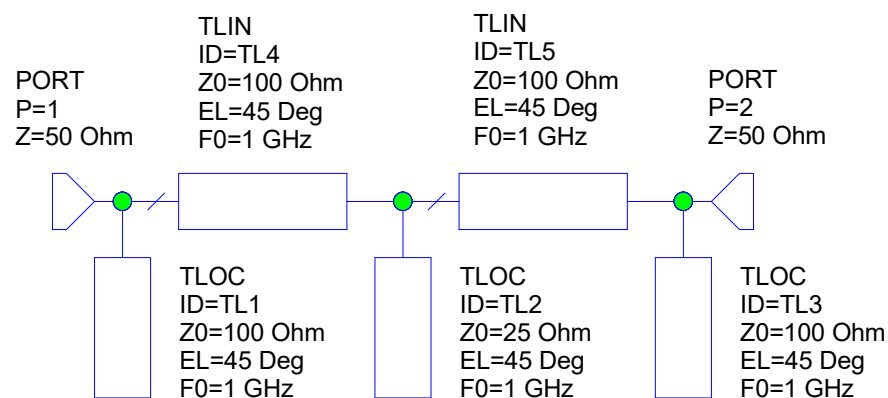
* Аутори на различите начине дефинишу јединични елемент



Пример: Трансфигурација филтра ПВУ Куродиним идентитетима



примена Куродиних идентитета



А како се реализује за већи број елемената у лествици?



Импедансни и адмитансни инвертори

- Користе се за трансфигурацију филтра ПОУ и филтра НОУ тако да LC осцилаторна кола буду само у паралелним или само у редним гранама
- **Инвертор имитансе** (импедансе/адмитансе)



$$\mathbf{ABCD}_{\text{invertora}} = \begin{bmatrix} 0 & jK \\ j/K & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & j/J \\ jJ & 0 \end{bmatrix}$$

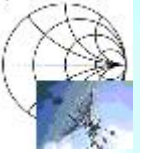
импедансни

$$\underline{Z}_{ul} = K^2 \underline{Y}_p$$

адмитансни

$$\underline{Y}_{ul} = J^2 \underline{Z}_p$$

- Код идеалног инвертора K и J су константе (независне од учестаности)



Реализација инвертора

- Четвртталасни трансформатор је инвертор имитансе: $K = Z_c, J = Y_c$

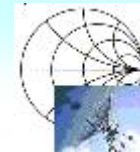
$$\mathbf{ABCD}_{\text{секције вода}} = \begin{bmatrix} \cos \Theta & jZ_c \sin \Theta \\ jY_c \sin \Theta & \cos \Theta \end{bmatrix}$$

$$\Theta = \pi / 2$$

$$\underline{Z}_{ul} = Z_c^2 \underline{Y}_p = K^2 \underline{Y}_p, \text{ импедансни}$$

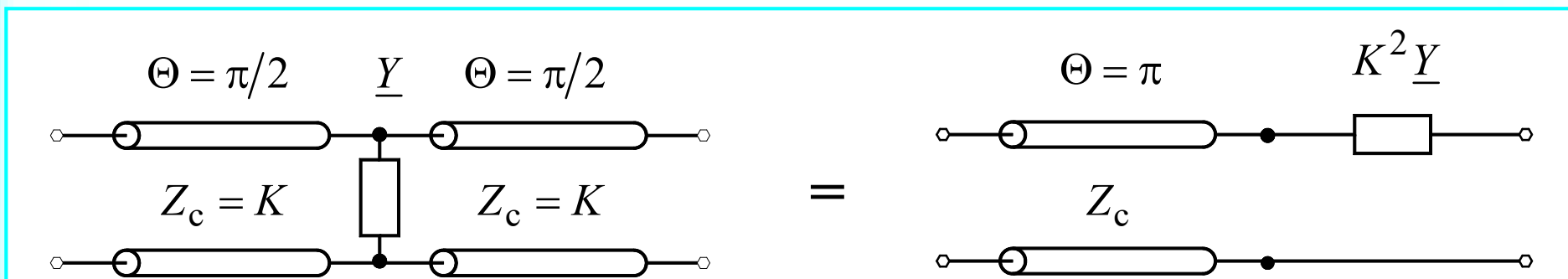
$$\underline{Y}_{ul} = Y_c^2 \underline{Z}_p = J^2 \underline{Z}_p, \text{ адмитансни}$$

- Својство инверзије важи строго само на једној учестаности (f_0)
- Могуће су реализације и са калемовима, кондензаторима и водовима негативних L, C и Θ , такође само на једној учестаности



Пар инвертора

1. Трансформација паралелне импедансе у редну – пар импедансних инвертора

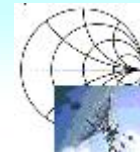


$$\mathbf{ABCD} = \begin{bmatrix} -1 & -K^2 \underline{Y} \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{ABCD} = \begin{bmatrix} -1 & -\underline{Z} \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

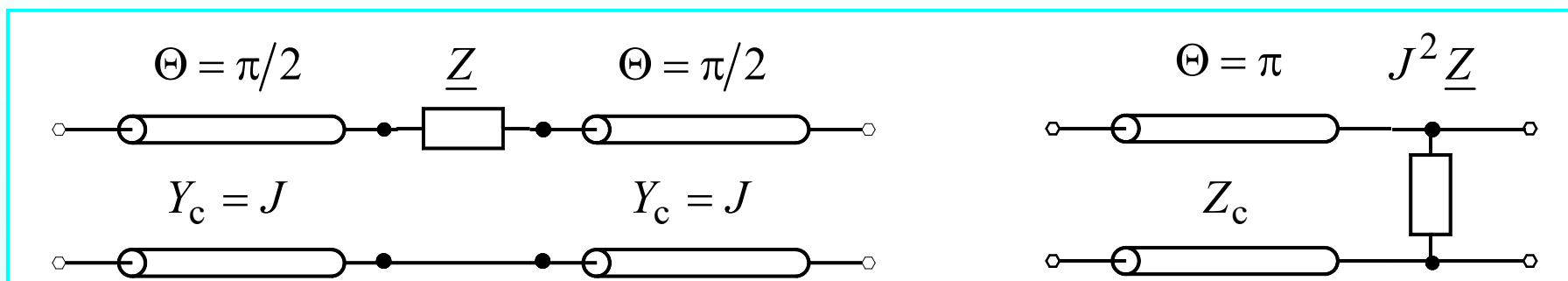
Полуталасни вод служи само за корекцију знака (тј. фазе) и у пракси се изоставља

$$\underline{Z} = K^2 \underline{Y}$$



Пар инвертора...

2. Трансформација редне импедансе у паралелну – пар адмитансних инвертора

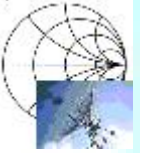


$$\mathbf{ABCD} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -J^2 \underline{Z} & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{ABCD} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -\underline{Y} & -1 \end{bmatrix}$$

Полуталасни вод служи само за корекцију знака (тј. фазе) и у пракси се изоставља

$$\underline{Y} = J^2 \underline{Z}$$



Пример: Трансформација помоћу инвертора (1)

- Паралелна адмитанса у виду паралелног LC кола трансформише се у редну импедансу у виду редног LC кола

$$\underline{Y}_{\text{par}} = j\omega C_{\text{par}} + 1/(j\omega L_{\text{par}})$$

$$\underline{Z}_{\text{red,eq}} = K^2 \underline{Y}_{\text{par}} = j\omega L_{\text{red,eq}} + 1/(j\omega C_{\text{red,eq}})$$

$$L_{\text{red,eq}} = K^2 C_{\text{par}}$$

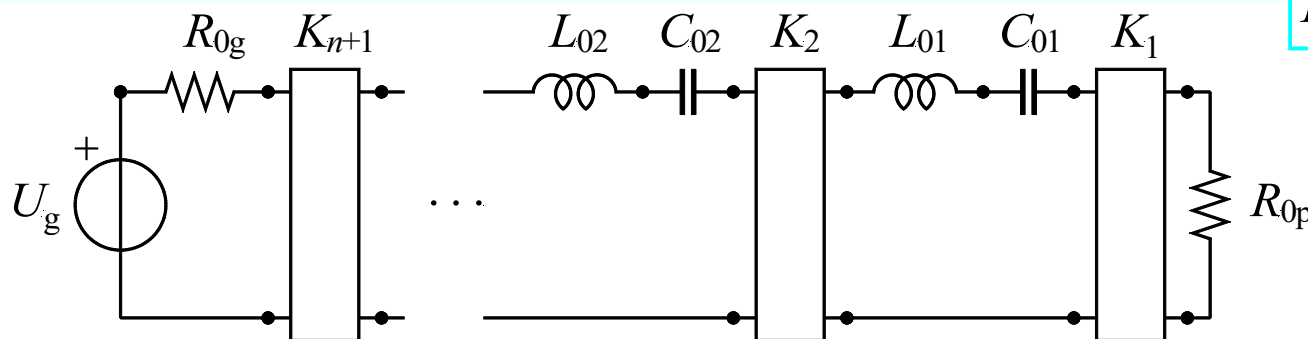
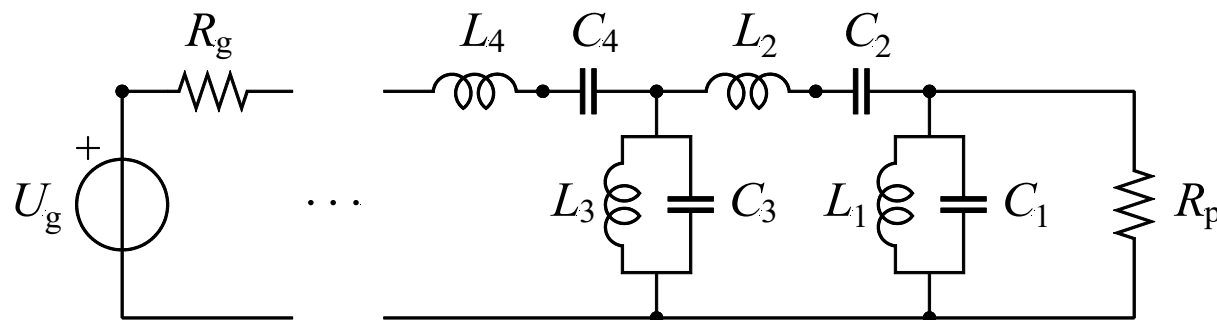
$$C_{\text{red,eq}} = L_{\text{par}} / K^2$$

- Подешавање избором K :
може се подесити нпр.

$$|\underline{Z}|_{\text{red,eq}} \quad L_{\text{red,eq}} \quad C_{\text{red,eq}}$$



Пример: Трансформација помоћу инвертора (1)...



$$L_k C_k = L_{0k} C_{0k} = \text{const}$$

- Могу се изабрати нови R_p, R_g, L_k
- За идеалне инверторе еквиваленција је потпуна (на свим учестаностима)



Пример: Трансформације помоћу инвертора (1)...

Прорачун:

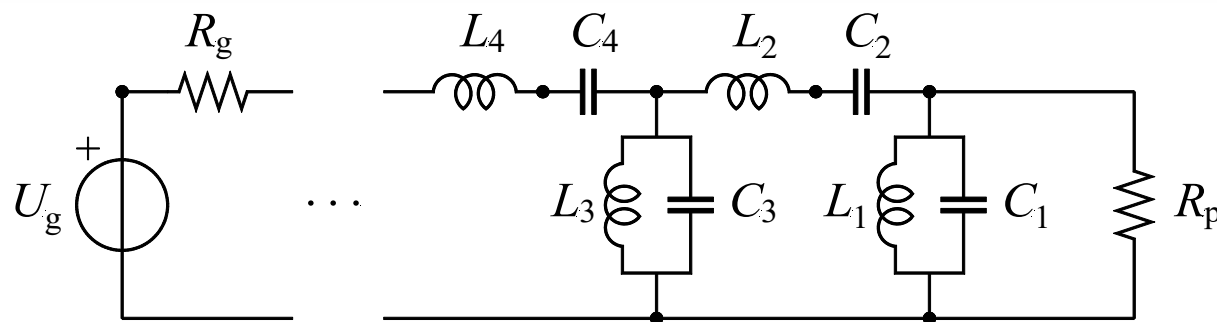
$$K_1 = \sqrt{\frac{L_{01}R_{0p}}{C_1R_p}}$$

$$K_k = \begin{cases} \sqrt{\frac{L_{0k}L_{0k-1}}{L_k C_{k-1}}}, & k = 2, 4, 6, \dots \\ \sqrt{\frac{L_{0k}L_{0k-1}}{C_k L_{k-1}}}, & k = 3, 5, 7, \dots \end{cases}$$

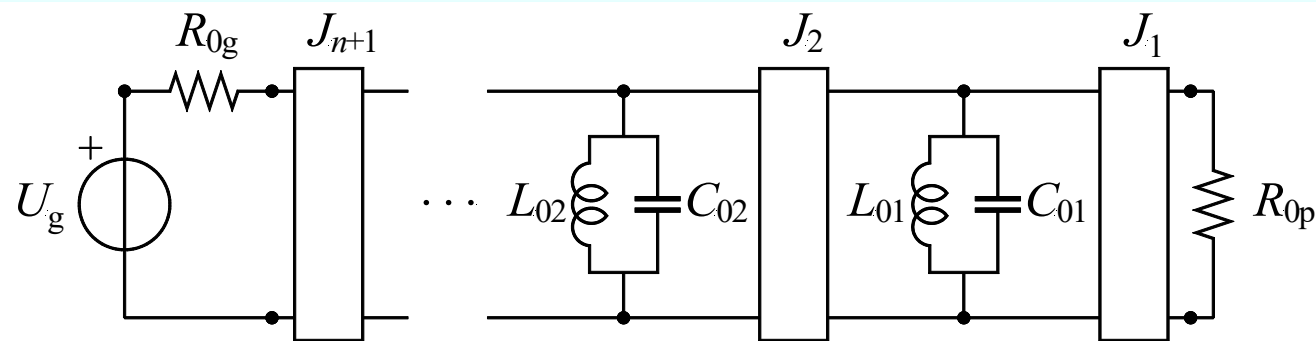
$$K_{n+1} = \begin{cases} \sqrt{\frac{L_{0n}R_{0g}}{C_n R_g}}, & n \text{ непарно} \\ \sqrt{\frac{L_{0n}R_{0g}R_g}{L_n}}, & n \text{ парно} \end{cases}$$



Пример: Трансформација помоћу инвертора (2)



$$L_k C_k = L_{0k} C_{0k} = \text{const}$$





Пример: Трансформација помоћу инвертора (2)...

Прорачун:

$$J_1 = \sqrt{\frac{C_{01}}{C_1 R_{0p} R_p}}$$

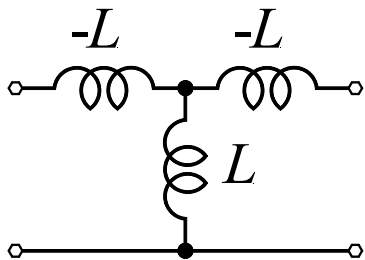
$$J_k = \begin{cases} \sqrt{\frac{C_{0k} C_{0k-1}}{L_k C_{k-1}}}, & k = 2, 4, 6, \dots \\ \sqrt{\frac{C_{0k} C_{0k-1}}{C_k L_{k-1}}}, & k = 3, 5, 7, \dots \end{cases}$$

$$J_{n+1} = \begin{cases} \sqrt{\frac{C_{0n}}{C_n R_{0g} R_g}}, & n \text{ непарно} \\ \sqrt{\frac{C_{0n} R_g}{L_n R_{0g}}}, & n \text{ парно} \end{cases}$$

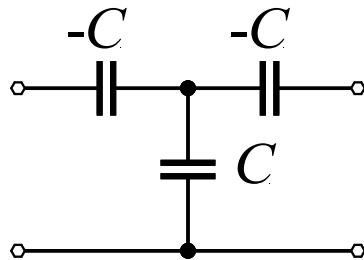


Инвертори са концентрисаним елементима

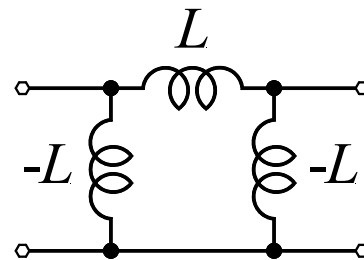
$$\begin{bmatrix} 0 & -j\omega L \\ \frac{-j}{\omega L} & 0 \end{bmatrix}$$



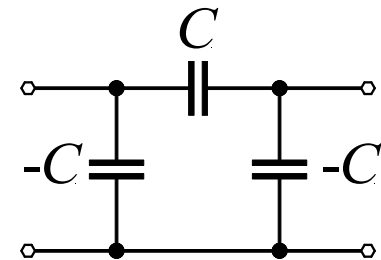
$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{j}{\omega C} \\ j\omega C & 0 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} 0 & j\omega L \\ \frac{j}{\omega L} & 0 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{-j}{\omega C} \\ -j\omega C & 0 \end{bmatrix}$$

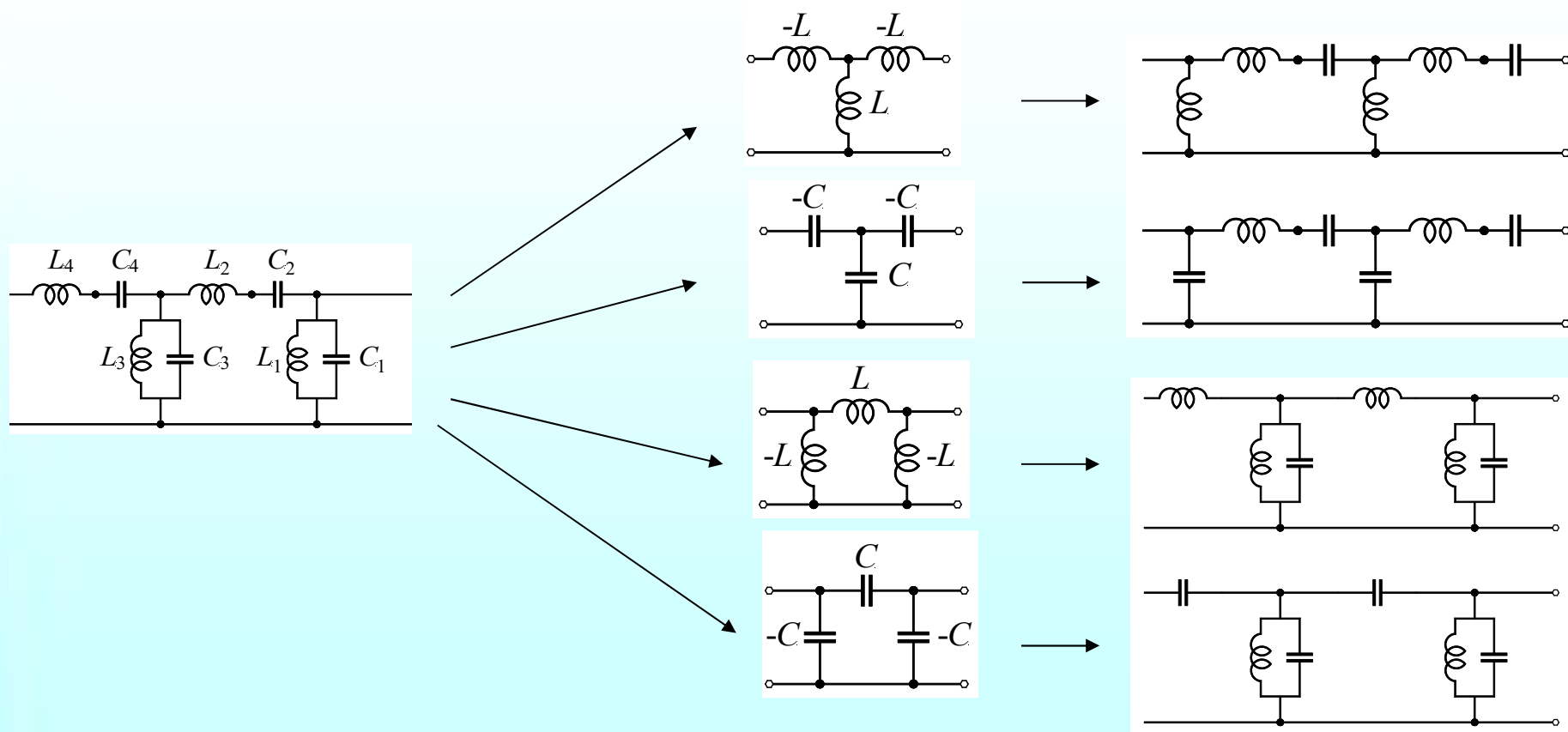


Сви негативни параметри елемената инвертора, у комбинацији са позитивним параметрима суседних резонатора трансфигуришу се у елементе позитивних параметара

Инвертори са концентрисаним елементима...



Реализације филтра ПОУ са реактивно спрегнутим резонаторима

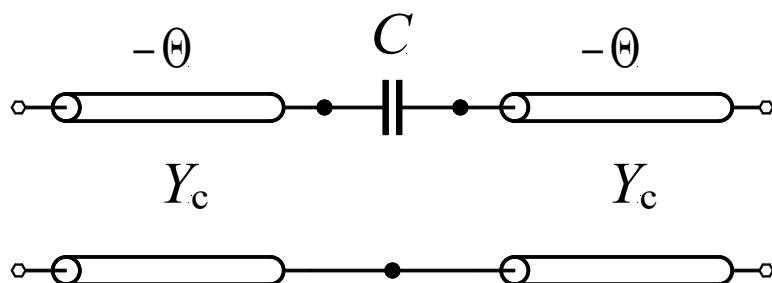




Инвертори са секцијама водова негативне дужине

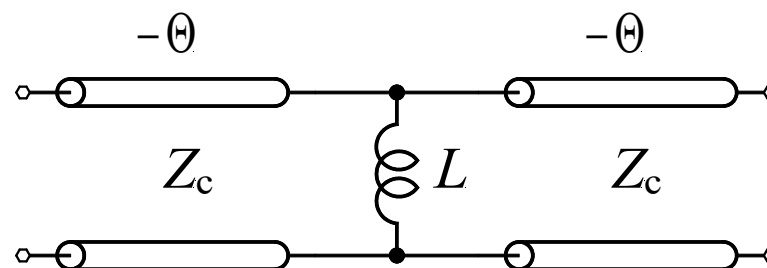
$$\mathbf{ABCD}_{C\Theta} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-j}{Y_c \tan \Theta} \\ -jY_c \tan \Theta & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = Y_c \frac{\tan(2\Theta)}{2\omega} \quad J = Y_c \tan \Theta$$



$$\mathbf{ABCD}_{L\Theta} = \begin{bmatrix} 0 & -jZ_c \tan \Theta \\ \frac{-j}{Z_c \tan \Theta} & 0 \end{bmatrix}$$

$$L = Z_c \frac{\tan(2\Theta)}{2\omega} \quad K = Z_c \tan \Theta$$

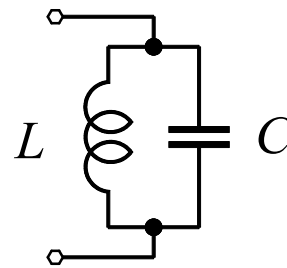
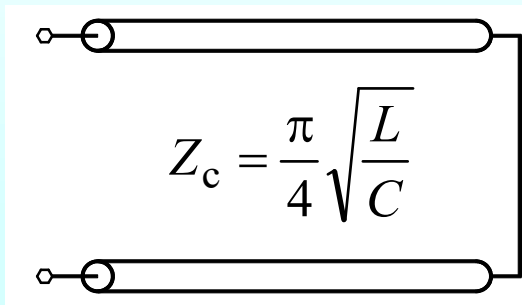


Сви негативни параметри елемената инвертора, у комбинацији са позитивним параметрима суседних резонатора трансфигуришу се у елементе позитивних параметара

Четвртталасни и полуталасни резонатори (у техници водова) као делови филтра



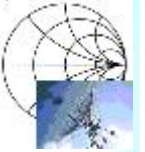
- Редна (резонантна) и паралелна (антирезонантна) осцилаторна кола могу се заменити одговарајућим резонаторима у виду кратко спојених и отворених водова
- Четвртталасни кратко спојени резонатор:



$$\Theta_0 = \frac{\pi}{2}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

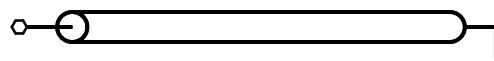
$$\underline{Y}_{\text{k.s.}} = \frac{1}{jZ_c \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{\omega}{\omega_0}\right)} \approx j \frac{\pi}{2Z_c \omega_0} (\omega - \omega_0)$$

$$\underline{Y}_{LC} = j\omega C + \frac{1}{j\omega L} \Big|_{\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}} \approx j2C(\omega - \omega_0)$$

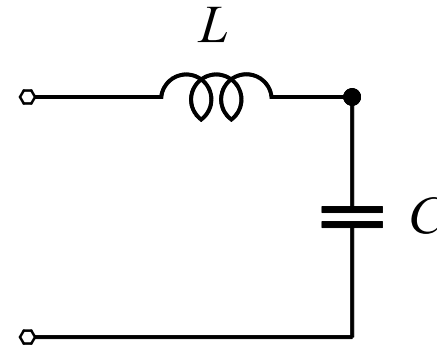


Четвртталасни отворени резонатор

$$\Theta_0 = \frac{\pi}{2}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

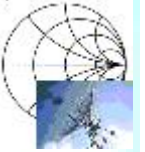


$$Y_c = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{C}{L}}$$



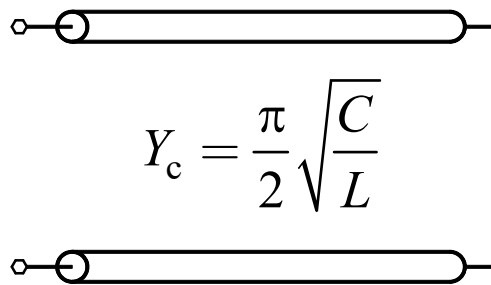
$$\underline{Z}_{\text{отв.}} = \frac{1}{jY_c \tan\left(\frac{\pi}{2} \frac{\omega}{\omega_0}\right)} \approx j \frac{\pi}{2Y_c \omega_0} (\omega - \omega_0)$$

$$\underline{Z}_{LC} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \Big|_{\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}} \approx j2L(\omega - \omega_0)$$

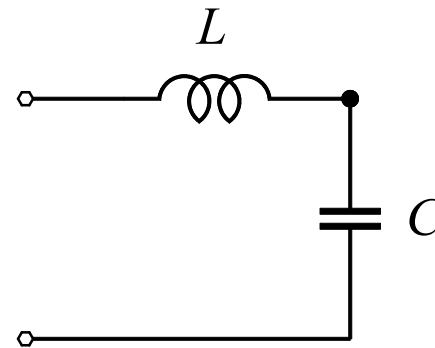


Полуталасни кратко спојени резонатор

$$\Theta_0 = \pi, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

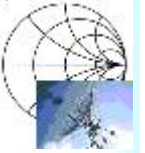


$$Y_c = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$



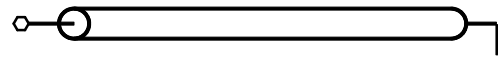
$$\underline{Z}_{k.s.} = jZ_c \tan\left(\pi \frac{\omega}{\omega_0}\right) \approx j \frac{\pi Z_c}{\omega_0} (\omega - \omega_0)$$

$$\underline{Z}_{LC} = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \Big|_{\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}} \approx j2L(\omega - \omega_0)$$

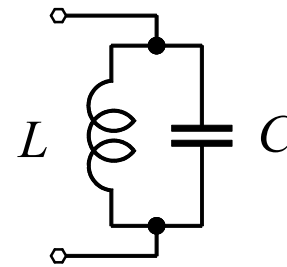
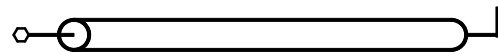


Полуталасни отворени резонатор

$$\Theta_0 = \pi, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



$$Z_c = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$$



$$Y_{\text{otv.}} = jY_c \tan\left(\pi \frac{\omega}{\omega_0}\right) \approx j \frac{\pi Y_c}{\omega_0} (\omega - \omega_0)$$

$$Y_{LC} = j\omega C + \frac{1}{j\omega L} \Big|_{\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}} \approx j2C(\omega - \omega_0)$$

Могуће су и реализације у таласоводној техници