

Лекция 8

Електрически филтри

Съдържание на Лекция 8

▲ Електрически филтри

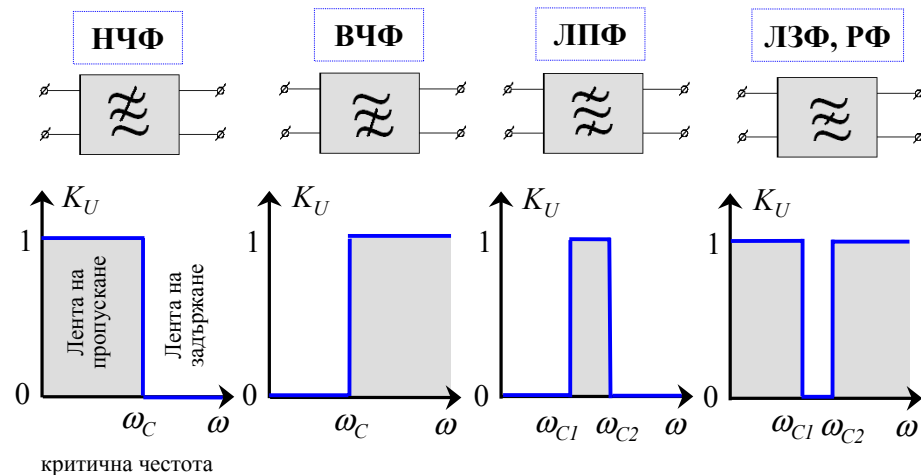
- 8.1 Класификация на електрическите филтри, параметри, идеални и реални характеристики.
- 8.2 Характерни особености и параметри на LC и RC филтри. Схеми на НЧФ и ВЧФ филтри. Многозвенни филтри. Пример за синтез на НЧФ и ВЧФ чрез обобщени g-параметри.
- 8.3 Лентово-пропускащи и режекторни филтри – схеми, реализация, свойства, характеристики, примери.
- 8.4 Филтри за свръх-високи честоти – някои примери.

Лекция 8

8.1 Класификация на електрическите филтри. Параметри, идеални и реални характеристики

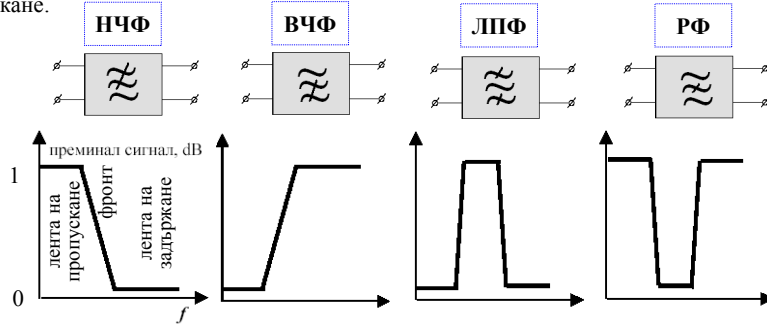
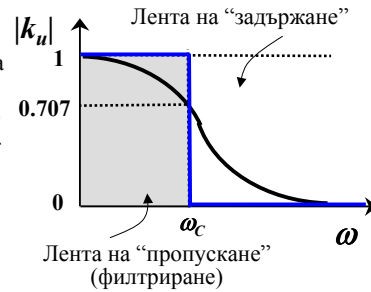
Класификация на електрическите филтрите

Електрическият филтър е четириполюсник с честотна избирателност при пропускане на сигнали в определени честотни обхвати. Това означава, че електрическите сигнали могат да променят своя спектър при преминаване през филтъра. Има 4 основни типа филтри според тяхната избирателност: ниско-честотни, високо-честотни, лентово-пропускащи и лентово-задържащи (или режекторни).



Идеални и реални характеристики на филтрите

Основна характеристика на филтъра е неговият коефициент на предаване по напрежение (на по-високи честоти – коефициентът на предаване по мощност). За всеки филтър може да се дефинират поне две различни честотни ленти: лента на пропускане (филтриране) на сигнала (когато $|K_U| = 1$ при идеална характеристика) и лента на задържане на сигнала (когато $|K_U| = 0$). В реалния случай двете ленти не са рязко отделени и има фронт на прехода. Преходът става на критичната честота ω_c , която се дефинира на ниво на сигнала по напрежение 0.707 от максималния коефициент на пропускане.



Загуби на сигнала

От казаното дотук се вижда, че при преминаване на сигнала през реален (не идеален) филтър, той търпи загуби: малки (но не 0) в лентата на пропускане и големи (но не ∞) – в лентата на задържане. Загубите имат енергетичен характер. При определянето им се използва изразът за коефициента на предаване по мощност K_P или на квадрата на коефициента на предаване по напрежение K_U . Много е удобно внесените загуби IL от филтъра да се определят в dB (децибели) (вж. изразите). $IL = 0$ dB означава $K_P, K_U = 1$. Критичната честота ω_c се определя на ниво $IL = -3$ dB (т.е. $K_P = 0.501$; $K_U = 0.708$) – вж. Табл. В акустиката се използват и “напрежителни” dB, определяни от $10 \cdot \log(U_2/U_1)$. Те се различават от “мощностните” dB, които се ползват много по-често.



$$K_U = \frac{U_2}{U_1}$$

$$K_P = \frac{P_2}{P_1} \sim \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2$$

Табл. Връзки между IL в dB; U_2/U_1 и P_2/P_1 в пъти

$IL, \text{ dB}$	$U_2/U_1, \text{ пъти}$	$P_2/P_1, \text{ пъти}$	$IL, \text{ dB}$	U_2/U_1	P_2/P_1
0	1.0	1.0	-0.8	0.912	0.832
-0.010	0.999	0.998	-0.9	0.902	0.813
-0.025	0.972	0.994	-1	0.891	0.794
-0.050	0.945	0.988	-2	0.794	0.631
-0.075	0.991	0.983	-3	0.708	0.501
-0.1	0.988	0.977	-4	0.631	0.397
-0.2	0.978	0.955	-5	0.562	0.316
-0.3	0.966	0.933	-6	0.501	0.251
-0.4	0.955	0.912	-7	0.447	0.199
-0.5	0.944	0.891	-8	0.398	0.158
-0.6	0.933	0.871	-9	0.355	0.126
-0.7	0.923	0.851	-10	0.316	0.100

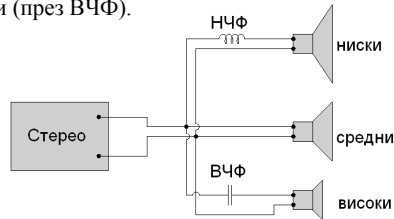
Загуби на сигнала в $IL, \text{ dB}$
(Insertion Losses)

$$IL, \text{ dB} = 20 \log \frac{U_2}{U_1}$$

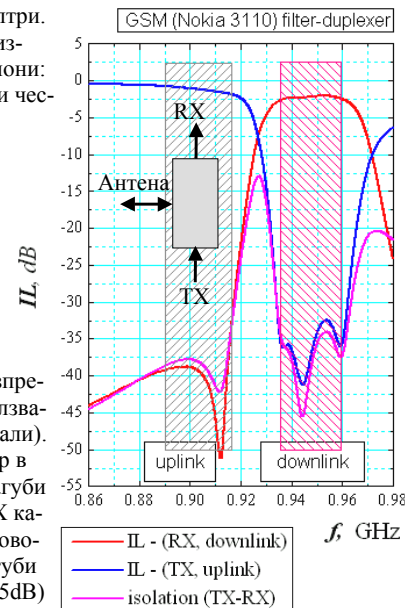
$$IL, \text{ dB} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

Примери за използване на филтри в електрониката

За илюстрация са показани две приложения на филтри. Първото е много популярно и е свързано с възпроизвеждане на стерео-звук сигнали с три типа тон-колони: за средни честоти, за ниски (през НЧФ) и за високи честоти (през ВЧФ).



Второто приложение е филтър-дуплексер за GSM мобилна станция MS. Това е устройство, което разпределя 2 сигнала (TX - излъчен; RX - приет) при използване на една антена (за uplink/downlink честотни канали). Използват се два типа филтри - режекторен филтър в uplink канала (MS→BS), който осигурява малки загуби <math>< 2 \text{ dB}</math> за TX сигнала, но големи загуби -40 dB в RX канала. Обратно, в downlink канала се използва лентово-пропускащ филтър (BS→MS), който осигурява загуби <math>< 2 \text{ dB}</math> за приет RX сигнала, но големи загуби (~ -35dB) за TX канала (разпознайте ги на графиката).

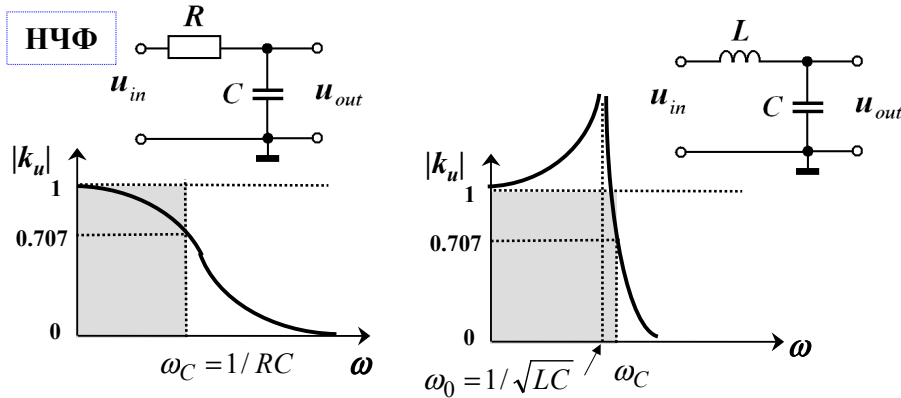


Лекция 8

8.2 Характерни особености и параметри на LC и RC филтри. Схеми на НЧФ и ВЧФ филтри. Многозвенни филтри. Пример за синтез на НЧФ и ВЧФ чрез обобщени g-параметри

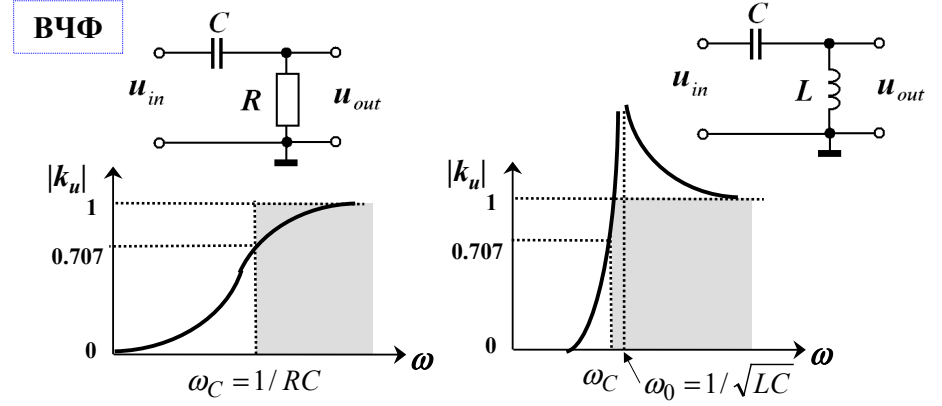
Прости схеми на нискочестотни филтри с RC и LC елементи

Долу са показани най-простите схеми на нискочестотни филтри, реализирани с помощта на RC или LC схеми. RC схемите вече бяха разгледани (Лекция 6, 6.2). Характерна особеност на този тип филтри е наличие на не много стръмен фронт на АЧХ на филтъра при прехода между лентата на пропускане и лентата на задържане на сигнала. Ако, обаче, R-елементът се замени с L-елемент (вж. долу вдясно), схемата остава НЧФ, но АЧХ се различава от предишния случай. Сега тя има силен максимум при честотата на резонанс ω_0 на LC-кръга, а фронтът на прехода между двете ленти е по-стръмен. Подобен фронт е пожелан в много приложения на филтрите в електрониката и комуникациите.



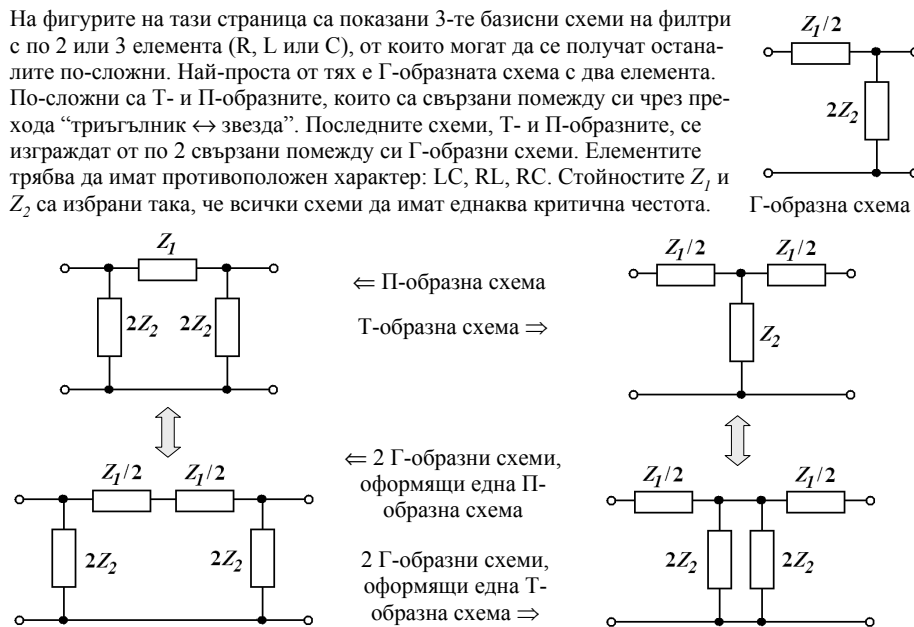
Прости схеми на високочестотни филтри с RC и LC елементи

На тази страница са показани най-простите схеми на високочестотни филтри, реализирани с помощта на RC или LC схеми. Както при нискочестотните филтри, характерна особеност на този тип филтри е наличие на полегат фронт на АЧХ на филтъра при прехода между лентата на пропускане и лентата на задържане на сигнала. Ако и тук R-елементът се замени с L-елемент (вж. долу вдясно), схемата остава ВЧФ, но АЧХ се различава от предишния случай. Сега тя има силен максимум при честотата на резонанс ω_0 на LC-кръга, а фронтът на прехода между двете ленти е по-стръмен и по-добре се разделят двете ленти на филтъра.



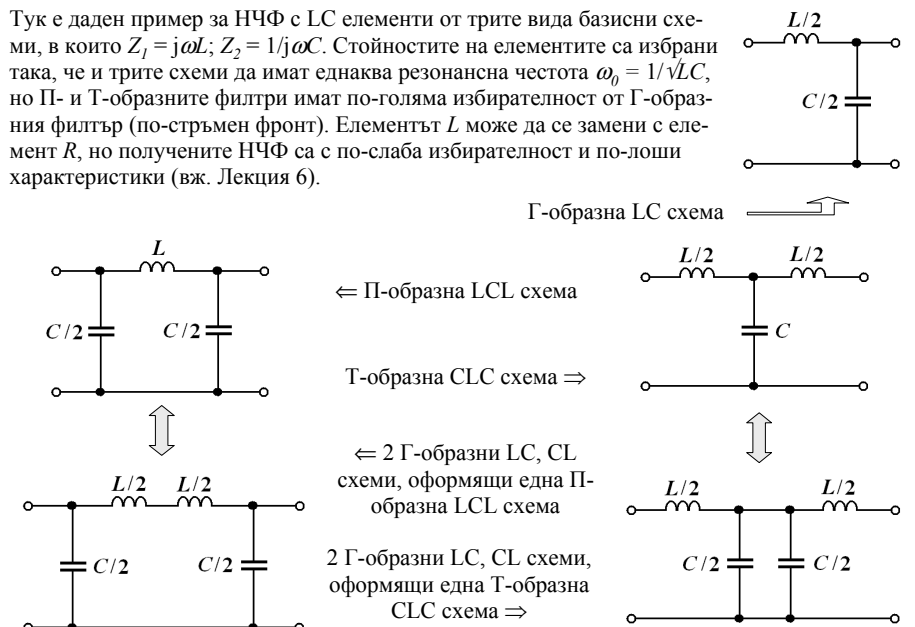
Прости схеми на високочестотни филтри с RC и LC елементи

На фигурите на тази страница са показани 3-те базисни схеми на филтри с по 2 или 3 елемента (R, L или C), от които могат да се получат останалите по-сложни. Най-проста от тях е Г-образната схема с два елемента. По-сложни са Т- и П-образните, които са свързани помежду си чрез прехода "триъгълник ↔ звезда". Последните схеми, Т- и П-образните, се изграждат от по 2 свързани помежду си Г-образни схеми. Елементите трябва да имат противоположен характер: LC, RL, RC. Стойностите Z_1 и Z_2 са избрани така, че всички схеми да имат еднаква критична честота.



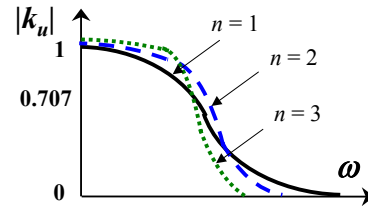
Примери за НЧФ с Г-, Т- и П-образни схеми с LC елементи

Тук е даден пример за НЧФ с LC елементи от трите вида базисни схеми, в които $Z_1 = j\omega L$; $Z_2 = 1/j\omega C$. Стойностите на елементите са избрани така, че и трите схеми да имат еднаква резонансна честота $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, но П- и Т-образните филтри имат по-голяма избирателност от Г-образния филтер (по-стръмен фронт). Елементът L може да се замени с елемент R, но получените НЧФ са с по-слаба избирателност и по-лоши характеристики (вж. Лекция 6).

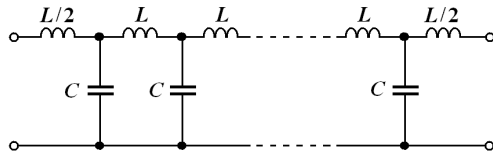


Многозвенни НЧФ

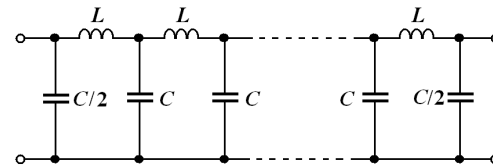
За подобряване на характеристиките на филтрите – по-стръмни фронтове и по-добра избиращелност, се използва и друг подход – репродуциране на една схема на филтъра (Т- или П-образна). Така се получават многозвенните (много-стъпалните) филтри. На фигурата вдясно е показан пример за подобряване на стръмността на характеристиката на НЧФ с повече от 1 звено.



Пример за АЧХ на многозвенен НЧФ



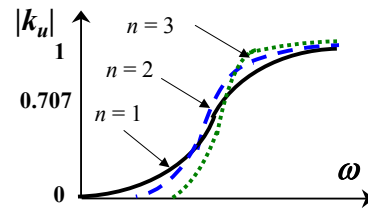
Многозвенен филтър с каскадно свързани Т-образни звена. Всеки среден елемент L се разглежда като два последователни свързани елемента $L/2$, принадлежащи към всяко предишно и следващо Т-образно звено



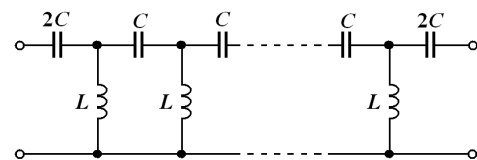
Многозвенен филтър с каскадно свързани П-образни звена. Всеки среден елемент C се разглежда като два паралелно свързани елемента $C/2$, принадлежащи към всяко предишно и следващо П-образно звено

Многозвенни ВЧФ

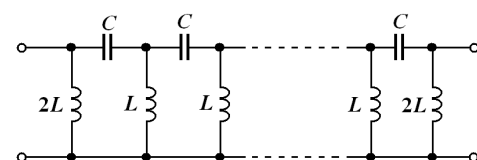
Както при НЧФ, при ВЧФ за подобряване на характеристиките (по-стръмни фронтове и по-добра избиращелност), се използват многозвенни филтри. На фигурата вдясно е показан пример за подобряване на стръмността на характеристиката на ВЧФ с повече от 1 звено. Показани са филтри с еднакви звена, но има и друг начин за синтез на филтри с подобрени характеристики. Това става чрез специален подбор на LC параметрите на всяко отделно звено (вж. по-нататък).



Пример за АЧХ на многозвенен ВЧФ



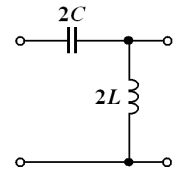
Многозвенен филтър с каскадно свързани Т-образни звена. Всеки среден елемент L се разглежда като два последователни свързани елемента $L/2$, принадлежащи към всяко предишно и следващо Т-образно звено



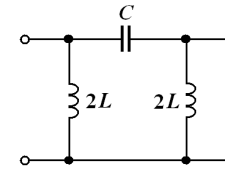
Многозвенен филтър с каскадно свързани П-образни звена. Всеки среден елемент C се разглежда като два паралелно свързани елемента $C/2$, принадлежащи към всяко предишно и следващо П-образно звено

Примери за ВЧФ с Г-, Т- и П-образни схеми с LC елементи

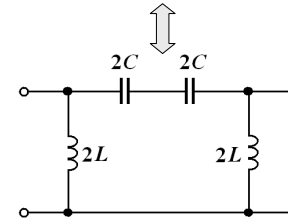
Тук е даден пример за ВЧФ с LC елементи от трите вида базисни схеми, в които $Z_1 = 1/j\omega C$; $Z_2 = j\omega L$. Стойностите на елементите са избрани така, че и трите схеми отново да имат еднаква критична честота $\omega_c = 1/\sqrt{LC}$. И тук П- и Т-образните филтри имат по-голяма избиращелност от Г-образния филтър (по-стръмни фронтове). Елементът L може да се замени с елемент R , но получените ВЧФ са с по-слаба избиращелност и по-лоши характеристики (вж. Лекция 6).



Г-образна CL схема



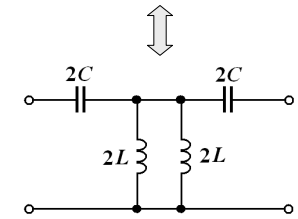
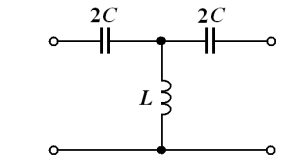
⇐ П-образна LCL схема



Т-образна CLC схема ⇒

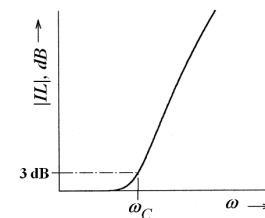
⇐ 2 Г-образни LC, CL схеми, оформящи една П-образна LCL схема

2 Г-образни LC, CL схеми, оформящи една Т-образна CLC схема ⇒

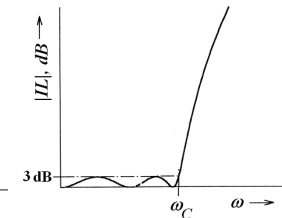


Синтез на много-стъпални филтри със зададени характеристики

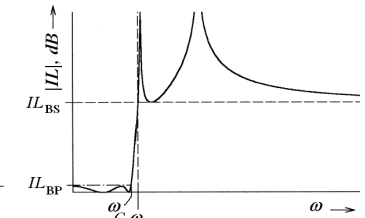
За да се получи филтър с определени честотни характеристики трябва да се извърши синтез на неговите параметри. Синтезът на еднозвенен филтър е относително просто, ако е дадена критичната честота. При многозвенни филтри има много повече възможности за синтез. Долу са показани типични АЧХ криви на три от най-известните типове филтри (за НЧФ).



НЧФ с максимално-пласка характеристика (Butterworth филтър)



НЧФ с осцилираща характеристика (Чебишовски филтър)

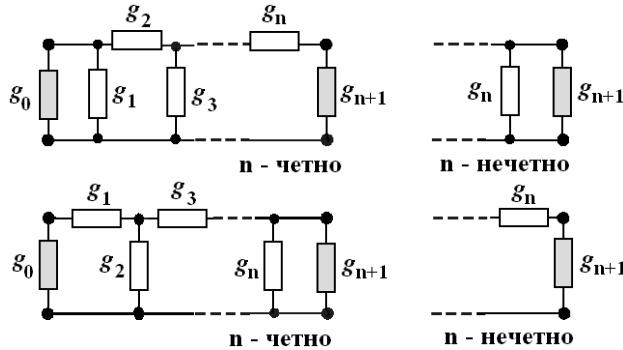


Пример за НЧФ с елиптическа характеристика

Ако филтърът се проектира само в лентата на пропускане, има два основни типа характеристики: максимално-пласка (на Butterworth) и осцилираща (Чебишовска). При първия тип загубите са малки при ниски честоти и нарастват само около критичната честота, а при втория – осцилират между минимална и максимална стойност. Има и филтри, които се проектират и в двете си ленти – на пропускане и на задържане (напр. елиптическите филтри). При последните, напр. в лентата на пропускане може да се иска да имат минимални загуби на определена честота f (напр. на някакъв генератор) а в лентата на задържане – да имат максимални загуби на честотата $2f$ на първата хармонична на същия генератор и т. н.

Метод за синтез на много-стъпални филтри чрез g-параметри

Има различни начини на синтез на филтри със зададени параметри. Един от най-фундаменталните е методът на синтез на нискочестотния филтър-прототип. На фигурите долу са дадени двете възможни схеми на много-стъпален филтър с обобщени g-елементи (L или C) с Т- или П-образни схеми, всяка с четен или нечетен брой такива елементи. Идеята на метода е проста – стойностите на обобщените нормирани g-параметри (n на брой) да се определят по зададените изисквания за филтъра, а след това тези елементи да се заместят с реални елементи: L , C или комбинации от тях LC по определено правило. Проектирането се извършва за максимално-плоска характеристика, Чебишова, елиптична, гаусова и пр. характеристики. В лекциите имаме възможност да се запознаем по-подробно само със примерен синтез на относително прости Butterworth филтри.



Синтез на филтри с максимално-плоска характеристика

В лекциите ще представим само един пример за синтез на много-стъпален филтър с максимално-плоска характеристика. За определеност на графиката долу сме дали пример за НЧФ, но случаят може да се обобщи и за другите типове филтри.

Въвеждаме нормирана честота Ω , свързана с истинската кръгова честота ω в зависимост от типа на филтъра (вж. примерите надолу). Определяме нормирани критични честоти Ω_{BP} и Ω_{BS} , чрез които потребителя задава съответно границата на лентата на пропускане на допустимо ниво на загуби $|L_{BP}|$, dB и границата на лентата на задържане на допустимо ниво $|L_{BS}|$, dB. При използване на n обобщени g-елемента, техните стойности могат да се определят от:

$$g_0 = 1; \quad g_i = 2 \sin \left[\frac{(2i-1)\pi}{2n} \right] \quad \text{за } i = 1 \div n; \quad g_{n+1} = 1$$

Тук параметрите $g_0 = g_{n+1} = 1$ са обобщеното входно и товарно съпротивление или проводимост (в зависимост от схемата), а за останалите се наблюдава симетрия: $g_1 = g_n, g_2 = g_{n-1}, \dots$

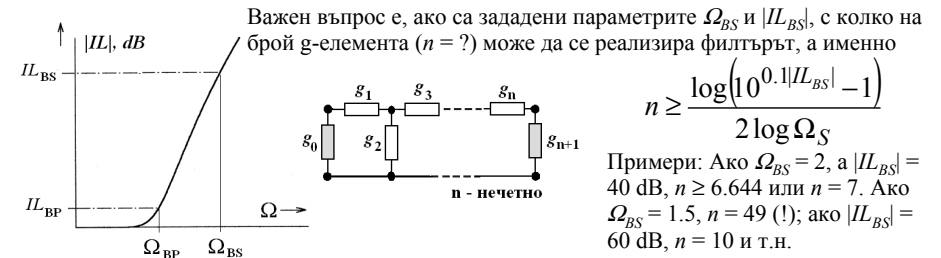
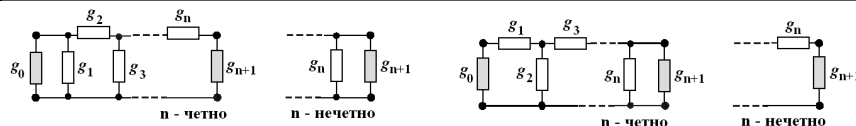


Таблица със стойностите на g-параметрите за синтез на филтри с максимално-плоска характеристика

За улеснение, при синтеза на филтри се ползват готови таблици със стойностите на g-параметрите, необходими за постигане на филтри с желани параметри. Долу е дадена таблица за тези параметри при $\Omega_{BP} = 1$ за Butterworth филтри при $n = 1 \div 8$. Този вид таблици са още по-важни при проектиране на специалните типове филтри с оптимизирани параметри (Чебишови, елиптични, Гаусови и пр.; те не се разглеждат в лекциите). Като се знаят g-параметрите, могат да се определят конкретните стойности на необходимите L и C елементи.

n	g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9
1	1.0000	2.0000	1.0000							
2	1.0000	1.4142	1.4142	1.0000						
3	1.0000	1.0000	2.0000	1.0000	1.0000					
4	1.0000	0.7654	1.8478	1.8478	0.7654	1.0000				
5	1.0000	0.6180	1.6180	2.0000	1.6180	0.6180	1.0000			
6	1.0000	0.5176	1.4142	1.9318	1.9318	1.4142	0.5176	1.0000		
7	1.0000	0.4450	1.2470	1.8019	2.0000	1.8019	1.2470	0.4450	1.0000	
8	1.0000	0.3902	1.1111	1.6629	1.9616	1.9616	1.6629	1.1111	0.3902	1.0000



Пример за синтез на НЧФ с максимално-плоска характеристика

При НЧФ на местата на съответните g-елементи се въвеждат L и C елементи съгласно посоченото вдясно правило и съответните формули за връзка на LC-елементите с g-елементите. Тук нормираната честота е $\Omega = (\Omega_C / \omega_C) \omega$.

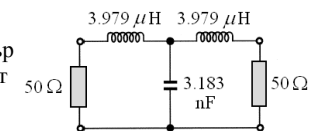
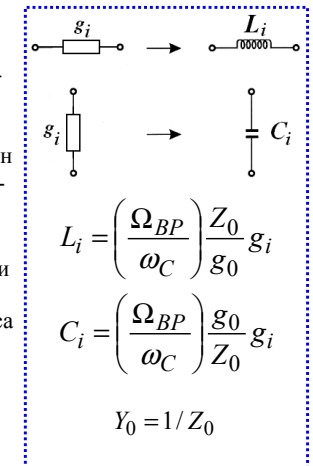
Да разгледаме прост пример – синтез на Butterworth НЧФ с критична честота $f_C = 2$ MHz на ниво $|L_{BP}| = 3.01$ dB и товарен импеданс $Z_L = 50 \Omega$. Нека допълнително условие е изискването лентата на задържане на филтъра да започва от честота $f_{BS} = 2f_C = 4$ MHz на ниво $|L_{BS}| = 16$ dB.

При тези условия и $\Omega_{BP} = 1$ и $\Omega_{BS} = 2$, получаваме $n \geq 2.64$ или $n = 3$. Това са 3 g-елемента (вж. схемата долу). По условието на задачата импедансът на източника и товарният импеданс са $Z_0 = 50 \Omega$. Елементите $L_{1,3}$ и C_2 са

$$L_{1,3} = \left(\frac{1}{2\pi \times 2 \cdot 10^6} \right) 50 \times 1.0 = 3.979 \mu\text{H}$$

$$C_2 = \left(\frac{1}{2\pi \times 2 \cdot 10^6} \right) \frac{2.0}{50} = 3.183 \text{ nF}$$

На фигурата вдясно е дадена схемата на синтезирания филтър с получените стойности на LC-елементите. Студентите могат да се опитат да синтезират филтър при същите условия, но при ниво $|L_{BS}| = 30$ dB.



Пример за синтез на ВЧФ с максимално-плоска характеристика

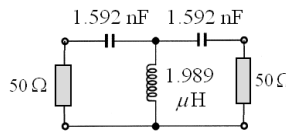
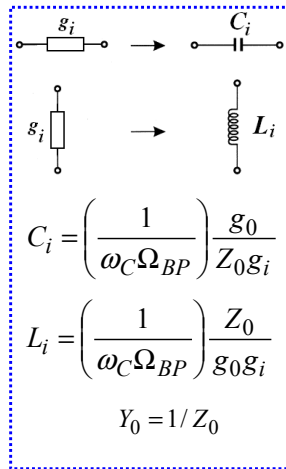
При ВЧФ на местата на съответните g-елементи се въвеждат C и L елементи съгласно посоченото вдясно правило и съответните формули за връзка на LC-елементите с g-елементите. Тук нормираната честота е $\Omega = -(\omega_c/\omega_c)/\omega$.

Да разгледаме друг пример – синтез на Butterworth ВЧФ отново с критична честота $f_c = 2$ MHz на ниво $|L_{BP}| = 3.01$ dB и товарен импеданс $Z_L = 50 \Omega$. Нека допълнително условие е изискването лентата на задържане на филтъра да завършва на честота $f_{BS} = f_c/2 = 1$ MHz на ниво $|L_{BS}| = 16$ dB (за улеснение начертайте АЧХ на филтъра). Сега отново $\Omega_{BP} = 1$ и $\Omega_{BS} = 2$. При същите останали условия, отново $n \geq 2.64$ или $n = 3$. Това са други 3 g-елемента в обобщената схема, различни от предишните. Сега елементите $C_{1,3}$ и L_2 са (при $Z_0 = 50 \Omega$):

$$C_{1,3} = \left(\frac{1}{2\pi \times 2.10^6} \right) \frac{1}{50} = 1.592 \text{ nF}$$

$$L_2 = \left(\frac{1}{2\pi \times 2.10^6} \right) \frac{50}{2.0} = 1.989 \mu\text{H}$$

На фигурата вдясно е дадена схемата на синтезирания ВЧФ с получените стойности на LC-елементите. За упражнение студентите могат да се опитат да синтезират ВЧФ при същите условия, но при ниво $|L_{BS}| = 30$ dB.

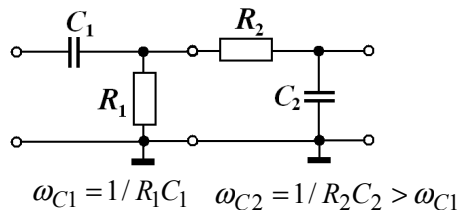
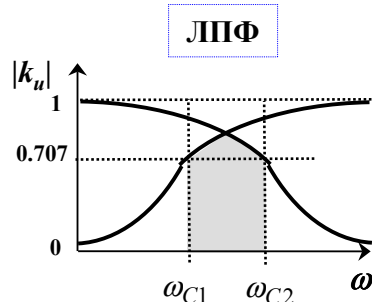
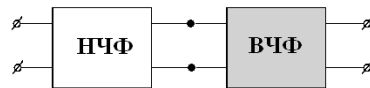


Лекция 8

8.3 Лентово-пропускащи и лентово-задържащи (режекторни) филтри - схеми, реализация, свойства, характеристики, примери

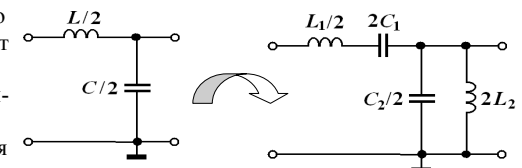
Лентово-пропускащ филтър ЛПФ като двойка НЧФ и ВЧФ

Лентово-пропускащите филтри се използват много често в електрониката и комуникациите. Причините са свързани с необходимост от отделянето на сигнал в тясна честотна лента (от генератор, в комуникационен канал и пр.) и недопускане на паразитни сигнали извън лентата. Как могат да се реализират подобни филтри? Видяхме, че с простите RC, RL и LC вериги се реализират нискочестотни или високочестотни филтри. За да се реализира ЛПФ, могат да се използват два каскадно свързани НЧФ и ВЧФ с различни честоти на срязване ω_{C1} и ω_{C2} . Нека $\omega_{C1} < \omega_{C2}$, и двете честоти да се различават достатъчно. Тогава двата каскадно свързани филтъра оформят АЧХ на ЛПФ с относително широка лента на пропускане $\omega_{C2} - \omega_{C1}$. Ако ω_{C1} и ω_{C2} са близки (при теснолентов ЛПФ), този подход е неприемлив, защото елементите им си взаимодействат и на д и двете честоти да се различават резонансно като свързани трептящи кръгове или трансформатори.



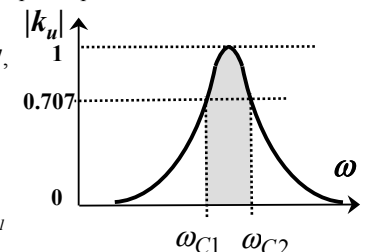
Теснолентови ЛПФ с Г-образни схеми с LC кръгове

При реализация на ЛПФ с относително тясна лента на пропускане се използват свързани трептящи кръгове (на високо честоти – свързани резонатори). На фигурата е показана Г-образна LC схема на НЧФ, в която L-елементът се заменя с последователен LC-кръг, а C-елементът – с паралелен LC-кръг. По-долу е показана и АЧХ на този филтър.



Г-образни резонансни LC схеми

Как работи схемата? Както вече показахме в Лекция 7, на честотата на резонанс последователният LC-кръг представлява малко съпротивление, а паралелният кръг – обратно, голямо съпротивление. Точно този случай се наблюдава, когато честотата е в интервала $\omega \in (\omega_{C1}, \omega_{C2})$ и сигналът постъпва на изхода с малки загуби. При честоти $\omega < \omega_{C1}$ последователният кръг $L_1 - C_1$ има висок капацитивен импеданс, а паралелният кръг $L_2 \parallel C_2$ има нисък индуктивен импеданс; така се формира ВЧФ, който “реже” нискочестотните сигнали. При честоти $\omega > \omega_{C1}$ последователният кръг $L_1 - C_1$ има висок индуктивен импеданс, а паралелният кръг $L_2 \parallel C_2$ има нисък капацитивен импеданс; така се формира НЧФ, който “реже” високочестотните сигнали.



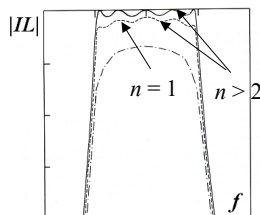
АЧХ на теснолентов ЛПФ с критични честоти:

$$\omega_{C1} = 1 / \sqrt{L_1 C_1}$$

$$\omega_{C2} = 1 / \sqrt{L_2 C_2}$$

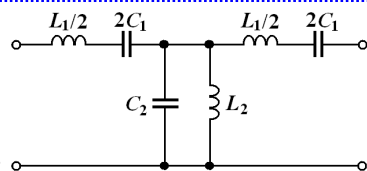
Теснолентови ЛПФ с Т- и П-образни схеми и многозвенни ЛПФ

Както при НЧФ и ВЧФ, основните звена на ЛПФ представляват Т-образни или П-образни схеми. Те могат да се разглеждат като свързани една с друга схеми, състоящи се от по две Г-образни звена. Предимство е, че Т- и П-схемите ги по-симетрични в сравнение с Г-схемите. Освен това, и тук се извършва репродуциране на една схема на филтъра, за да се получи многозвенов филтър. Това са прави отново главно за подобряване на характеристиките на филтрите – по-стръмни фронтове и по-добра избиращателност, и по-ниски загуби в лентата на пропускане.

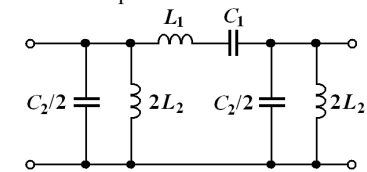


⇐ Пример за АЧХ на многозвенни ЛПФ: по-ниски загуби в лентата на пропускане и по-стръмни фронтове при увеличаване на броя на звената ⇒

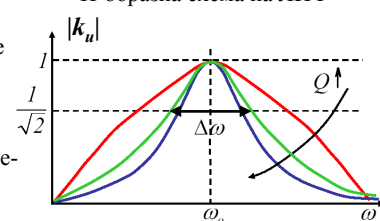
Пример за АЧХ на теснолентов ЛПФ с по-висок качествен фактор Q на използваните трептящи кръгове (резонатори): лентата на пропускане се стеснява ⇒



Т-образна схема на ЛПФ

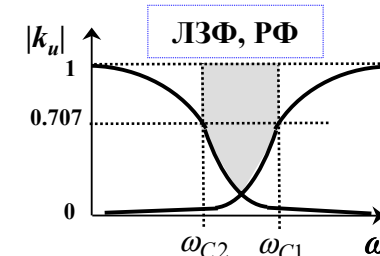
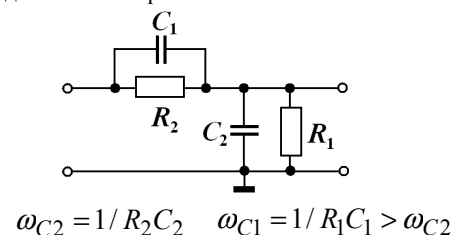
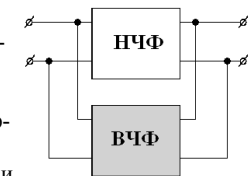


П-образна схема на ЛПФ



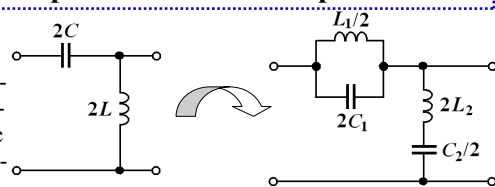
Лентово-задържач филтър ЛЗФ като двойка НЧФ и ВЧФ

Подобно на ЛПФ, лентово-задържачите филтри ЛЗФ също намират специално приложение в електрониката и комуникациите. Тук целта е да се пропуснат всички сигнали, с изключение на тези в дадена честотна лента на режекция (затова се наричат и режекторни филтри РФ). Използват се често в смесителите и приемните устройства, както и при осигуряване на електромагнитна съвместимост ЕМС на едновременно работещи комуникационни устройства. ЛЗФ се реализират подобно на ЛПФ по два основни начина: чрез паралелно свързани ВЧФ и НЧФ с различни честоти на срязване ω_{C1} и ω_{C2} (широколентови ЛЗФ) и чрез резонансни LC трептящи кръгове (теснолентови ЛЗФ). Първо разглеждаме два паралелно свързани НЧФ и ВЧФ. Нека ω_{C2} (на НЧФ) $<$ ω_{C1} , и двете честоти да се раздалечени достатъчно. Тогава двата свързани филтъра оформят АЧХ на ЛЗФ с относително широка лента на пропускане $\omega_{C1} - \omega_{C2}$. Ако ω_{C1} и ω_{C2} са близки (при теснолентов ЛЗФ), този подход отново е неприемлив.

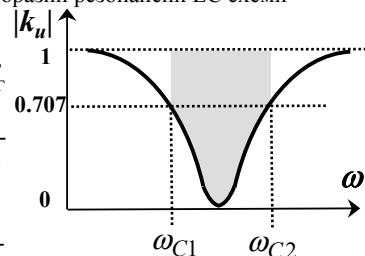


Теснолентови ЛЗФ с Г-образни схеми с LC кръгове

При реализация на теснолентови ЛЗФ се използват свързани трептящи кръгове (свързани резонатори). На фигурата е показана Г-образна LC схема на ВЧФ, в която паралелният L-елементът се заменя с последователен LC-кръг, а последователният C-елемент – с паралелен LC-кръг. По-долу е показана и АЧХ на филтъра.



Г-образни резонансни LC схеми



АЧХ на теснолентов ЛЗФ с критични честоти:

$$\omega_{C1} = 1/\sqrt{L_1 C_1}$$

$$\omega_{C2} = 1/\sqrt{L_2 C_2}$$

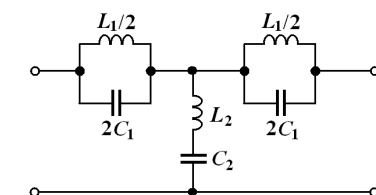
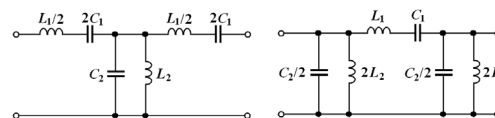
Студентите могат сами да дадат обяснение как работи филтъра, преди да прочетат текста надолу. Повтаряме, че на честотата на резонанс последователният LC-кръг представлява малко съпротивление, а паралелният – голямо. Това се наблюдава при $\omega \in (\omega_{C1}, \omega_{C2})$ и сигналът се “реже” от изхода, т.е. “постъпва” с големи загуби, защото се отвежда на “маса”. При честоти $\omega < \omega_{C1}$ последователният кръг $L_1 - C_1$ има висок капацитивен импеданс, а паралелният кръг $L_2 \parallel C_2$ има нисък индуктивен импеданс, поради което се формира НЧФ, пропускащ нискофреkwотните сигнали. Об-ратно, при честоти $\omega > \omega_{C1}$ последователният кръг $L_1 - C_1$ има висок индуктивен импеданс, а паралелният кръг $L_2 \parallel C_2$ – нисък капацитивен импеданс; така се формира ВЧФ, който пропуска високочестотните сигнали.

Теснолентови ЛЗФ с Т- и П-образни схеми и многозвенни ЛЗФ

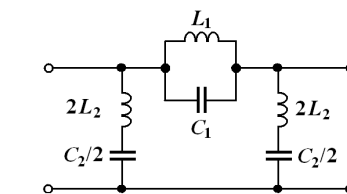
Както при НЧФ и ВЧФ, а и при ЛПФ, основните звена на ЛЗФ представляват Т-образни или П-образни схеми (вж. схемите вдясно). Те могат да се разглеждат като свързани една с друга схеми, състоящи се от по две Г-образни звена. Предимство е, че Т- и П-схемите ги по-симетрични в сравнение с Г-схемите. Освен това, и тук се извършва репродуциране на една схема на филтъра, за да се получи многозвенов филтър. Това са прави отново главно за подобряване на характеристиките на филтрите – по-стръмни фронтове и по-добра избиращателност, и по-ниски загуби в лентата на пропускане.

Задача за студентите: прегледайте схемите, дадени на настоящата страница и сравнете тяхното действие като ЛПФ и ЛЗФ.

Т- и П-образни схеми на ЛЗФ (за сравнение)



Т-образна схема на ЛЗФ

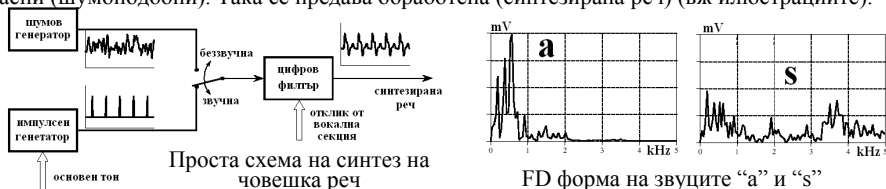


П-образна схема на ЛЗФ

Цифрови филтри



В електрониката често се налага група от сигнали да бъдат разделени честотно (1) или даден сигнал с изкривявания и шум да бъде “реконструиран” (поправен) (2). Това може да стане с аналоговите филтри, разгледани досега, но много по-добре и по-качествено – с помощта на *цифрови филтри*. Тези филтри не се разглеждат в настоящия курс, но те са изключително важни при съвременните принципи на обработка на сигналите, защото има много силни тенденции за замяна на аналоговите схеми с цифрови DSP алгоритми. Цифровите филтри се използват за обработка на сигнали в TD (напр. изглаждане, изменение на вълновата форма и пр.) или във FD (НЧФ, ВЧФ, ЛПФ, ЛЗФ). Работят по два алгоритъма: конволюция и рекурсия. Първите са с отлични характеристики като филтри, но са бавни, а вторите – бързи, но с по-лоши характеристики. Цифровите филтри се използват главно в обработката на висококачествен звук, в измерителната техника и в съвременните гласови комуникации. Долу е показан пример за обработка на човешка реч. Тя е звук с ограничен спектър (0.08-12 kHz, в комуникационните канали – 0.3-3.4 kHz), но с много излишна информация. Цифровите филтри се използват да намалят излишната информация и да увеличат скоростта на предаване на цифрова реч. Това става чрез линейни филтри с променливи коефициенти, които се настройват според типа звук – гласни (акустични резонанси) и съгласни (шумоподобни). Така се предава обработена (синтезирана реч) (вж илюстрациите).



Лекция 8

8.4 Филтри за свръх-високи честоти – примери

Филтри на високи честоти – особености и реализация

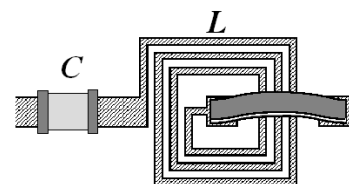


На високи и свръхвисоки честоти също се използват електрически аналогови филтри, но тук съществува доста по-голямо разнообразие при тяхната реализация. Освен класическия вариант: използването на LC трептящи кръгове със съсредоточени LC елементи, тук се използват и други техники: филтри от отрязъци от предавателни линии с разпределени параметри (Лекция 9), филтри с вълноводни, коаксиални, диелектрични, планарни и др. резонатори и др.

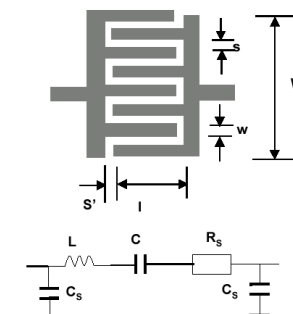
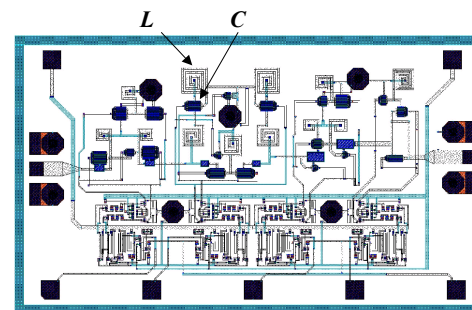
Класификация на филтрите според типа на използваните предавателни линии: честотен обхват, честотна лента в % качествен фактор на използваните резонатори

Тип предавателна структура	Работен честотен обхват GHz	Реализуема лента на пропускане в %	Качествен фактор на използваните резонатори
Вълноводи	1-100	0.1-20	5000
Коаксиални линии	0.1 - 40	1-30	2000
Лентови линии	0.1 - 20	5 Октави	150
Микролентови линии	0.1-100	5 Октави	200
Диелектрични резонатори	1-40	0.2-20	10 000
LC съсредоточени елементи	0.01-10 Хибридни	20 октави	200
	0.1-60 Монолитни	20 октави	100
ПАВ филтри	0.01-5		

Филтри със съсредоточени LC елементи в интегралните схеми



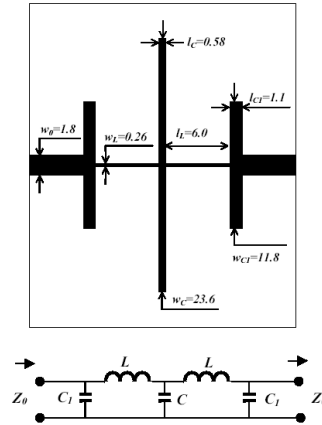
Използването на филтри с LC елементи на високи честоти е възможно, но тук елементите имат особена конструкция, при която паразитните параметри (R и C при L или R и L при C) са минимизирани. Подобни структури се ползват или до 1-2 GHz или до по-високи честоти, но в интегралните схеми. Тук се използват и специални конструкции: спирални индуктивности и гребеновидни кондензатори (comb-line, hairpin).



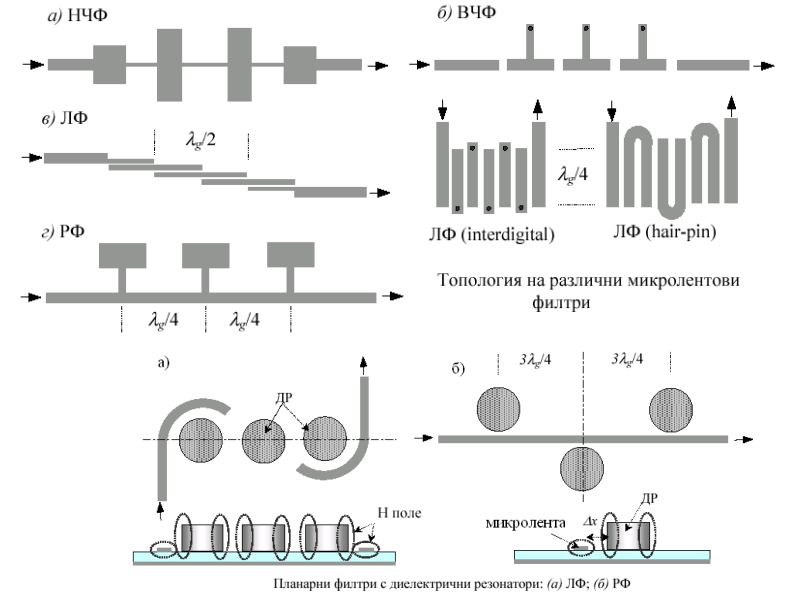
Планарни филтри със съсредоточени или разпределени параметри

За имитация на различни L и C елементи на високи честоти се използват и планарни (микролентови) структури (вж. и Лекция 9). В Табл. Долу е показано как могат да се използват тънки и широки микролентови линии в качеството на индуктивности и кондензатори на високо честоти. За пример е показана реализацията на нискочестотен филтър с подобни LC елементи, както и еквивалентната LC схема на този филтър. Разпознайте използваните елементи, дадени в таблицата.

Название и еквивалентна схема на елемента	Топология на елемента	Формула за изчисление на елемента
<ul style="list-style-type: none"> последователен кондензатор 		
<ul style="list-style-type: none"> паралелен кондензатор 		$C, \text{pF} = 3.33 \frac{l \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}{Z_1} \quad (1)$ $l, \text{mm}; Z_1, \Omega$ $l \ll \lambda_g / 8; Z_1 < Z_c$
<ul style="list-style-type: none"> последователна индуктивност 		$L, \text{nH} = \frac{Z_2 l \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}{300} \quad (2)$ $l, \text{mm}; Z_2, \Omega$ $l \ll \lambda_g / 8; Z_2 > Z_c$
<ul style="list-style-type: none"> паралелна индуктивност 		



Примери за планарни филтри и филтри с диелектрични резонатори



Симулация на планарен микролентов НЧФ филтър с помощта на електромагнитен симулатор

