

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

МАСТЕР РАД

Синтеза микроталасних филтара од идеалних секција водова помоћу програма MATLAB

Ментор:

Проф. др Дејан В. Тошић

Студент:

Томислав Милошевић 07/3009

Београд, децембар 2008.

Садржај

Садржај	i
0. Увод	1
0.1. Потреба за микроталасним филтрима	1
1. Основни појмови о филтрима	2
1.1. Појам филтра и основне величине	2
1.2. Основни кораци у пројектовању филтара	4
1.3. Својства функције мреже	7
1.3.1. Особине z и u параметара LC мреже са два приступа	9
1.3.2. Упрошћени алгоритам синтезе филтара	9
1.4. Синтеза LC филтара	10
1.4.1. Једноструко затворена мрежа (Singly Terminated Network)	10
Пример 1. Једноструко затворена лествичаста шема са идеалним елементима без нула у функцији преноса. Filter Solutions, Mathematica.	11
Пример 2. Једноструко затворена лествичаста шема са идеалним елементима са комплексним нулама у функцији преноса. Filter Solutions, Mathematica.	13
1.4.2. Двоструко затворена мрежа (Doubly Terminated Network)	15
Пример 3. Двоструко затворена лествичаста шема са идеалним елементима са комплексним нулама у функцији преноса. Filter Solutions, Mathematica.	15
1.5. Микроталасни филтри реализовани помоћу водова	18
2. Софтверска реализација синтезе филтара у MATLAB-у	21
2.1. Пројектни задатак	21
2.2. Опис радног окружења	22
2.3. Развијање програмских функција	22
2.3.1. Опис коришћених функција	24
2.3.2. Функција <code>LCsintez</code>	27
2.3.3. Функција <code>LCsintez2</code>	29
2.3.4. Функција <code>nlcc</code>	31
2.3.5. Функција <code>nlczz</code>	31
2.3.6. Функција <code>MT</code>	32
2.4. Нумеричка подешавања	33
2.4.1. Глобални параметар <code>ttol</code>	33
2.4.2. Број значајних цифара	34
Пример 4. Једноструко затворена лествичаста шема са идеалним елементима без нула у функцији преноса. Пакет <code>LCsintez</code> .	34
Пример 5. Једноструко затворена лествичаста шема са идеалним елементима са комплексним нулама у функцији преноса. Пакет <code>LCsintez</code> .	35
Пример 6. Двоструко затворена лествичаста шема са идеалним елементима са комплексним нулама у функцији преноса. Пакет <code>LCsintez</code> .	35

3. Закључак	36
4. Литература	37
5. Додатак	38
Пример 7. Једноструко затворена шема са идеалним елементима Батервортовог филтра. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, PSpice, WIPL-D Microwave.	38
Пример 8. Једноструко затворена шема са идеалним елементима Лежандровог филтра. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, PSpice, WIPL-D Microwave.	42
Пример 9. Једноструко затворена шема са идеалним елементима Чебишевљевог филтра. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, PSpice, WIPL-D Microwave.	46
Пример 10. Једноструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра седмог реда. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, PSpice, WIPL-D Microwave.	50
Пример 11. Једноструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра шестог реда. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, PSpice, WIPL-D Microwave.	54
Пример 12. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Беселовог филтра. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.	58
Пример 13. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Чебишевљевог филтра. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.	62
Пример 14. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра деветог реда. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.	67
Пример 15. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра деветог реда са отпорностима од 2 Ома. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.	72
Пример 16. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра деветог реда са отпорностима од 19 Ома. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.	77
Пример 17. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра четвртог реда. Пакет LCsinteza, Filter Solutions.	82
Пример 18. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра петнаестог реда. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.	83
Пример 19. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра седамнаестог реда. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.	89
Пример 20. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Лежандровог филтра трећег реда. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.	95
Пример 21. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Батервортовог филтра трећег реда. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.	102
Пример 22. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Лежандровог филтра трећег реда са карактеристичном импедансом 27 Ома. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.	106
Пример 23. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Беселовог филтра седмог реда са карактеристичном импедансом 15 Ома и слабљењем на граничној учестаности 2 dB. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office.	110
Пример 24. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Чебишевљевог филтра четвртог реда. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office.	114
Пример 25. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра петог реда. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office.	118
Списак функција софтверског пакета LCsinteza	121
Списак коришћених ознака	122

0. Увод

0.1. Потребa за микроталасним филтрима

Електрични филтри су неопходни делови електронских уређаја. Посебно, микроталасни филтри су значајне направе у савременим телекомуникационим, мерним и другим уређајима. Посебно је неопходна примена микроталасних филтара у модерним, бежичним комуникацијама. Као развојно-истраживачка тема, микроталасни филтри су актуелни, о чему сведоче и посебна издања часописа IEEE Microwave Magazine (2007) посвећена микроталасним филтрима.

Данас је у индустрији велика потреба за микротракастом реализацијом филтара. Добро је познато да се редна веза водова може веома тешко реализовати у микротракастој техници, па је због тога погодно, у синтези филтара користити Ричардсову трансформацију и Куродине идентитете.

Ради уштеде финансијских средстава, посебна пажња се поклања синтези филтара помоћу софтверских алата. Пожељно је да програм који врши синтезу филтара да што тачнији резултат, што је посебно тешко при синтези филтара који раде на микроталасним учестаностима.

Може се приметити да данашњи софтверски алати нису предвиђени да врше синтезу неких значајних класа електричних филтара при чијој синтези се не могу користити формуле за прорачун електричних елемената у затвореном облику (на пример, елиптичког филтра), већ само из функције мреже.

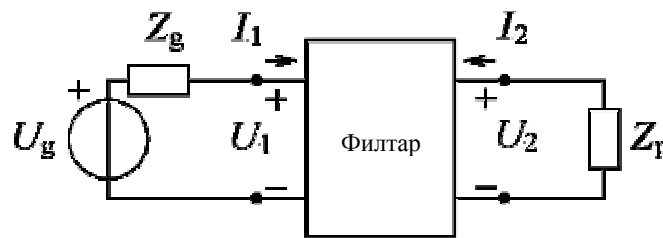
Због наведених разлога, закључено је да би развој софтвера који из функције мреже реализује LC и микроталасне филтре пропуснике ниских учестаности био логичан допринос истраживању области микроталасних и електричних филтара. Очекује се да развијени софтвер за синтезу једне класе филтара буде документован и тестиран на великом броју примера. Потребно је још и да нумерички проблеми који прате прорачун филтара буду посебно документовани и решени као и да буде обезбеђено добијање параметара елемената филтра са највећим бројем тачних цифара. Очекује се да у раду буде коришћено што више софтверских алата како би све провере добијених резултата биле поуздане.

Рад се састоји из пет поглавља и списка коришћених функција и списка коришћених ознака. Уводно поглавље представља мотивацију за писање рада и очекивања. Прво поглавље објашњава основне појмове о филтрима. У другом поглављу је објашњена софтверска реализација програма за синтезу филтара. Треће поглавље је закључак, а у четвртом је наведена коришћена литература. Пето поглавље садржи примере на којима је тестиран софтвер за синтезу филтара са потребним објашњењима и коментарима.

1. Основни појмови о филтрима

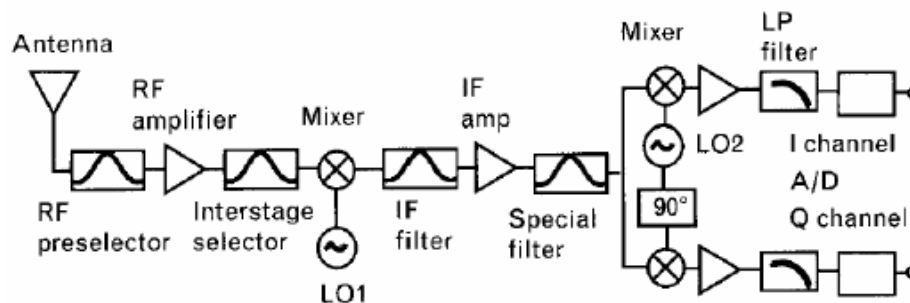
1.1. Појам филтра и основне величине

Електрични филтри су линеарне, временски непроменљиве, фреквенцијски селективне мреже без независних извора чије трансфер функције задовољавају постављене услове. Електрични филтри могу бити аналогни или дигитални; филтри који садрже активне елементе или филтри који се састоје само од пасивних елемената. Број елемената мора бити коначан. Опште коло филтра приказано је на слици 1. Филтар је без губитака и начињен од калемова, кондензатора и идеалних секција водова. Импедансе потрошача и генератора су чисто резистивне.



Слика 1. Опште коло филтра [1].

Електрични филтри су врло значајни делови телекомуникационих уређаја. У савремени телекомуникациони уређај може бити уграђено више различитих врста филтара (слика 2). Пример је мобилни телефон, који за обраду говора користи дигиталне филтре, док је улазни филтар RF дела аналоган. Минијатуризација уређаја је неопходност великог броја савремених система, па су од посебног интереса филтри у техници штампаних водова.



Слика 2. Пример примене филтара у телекомуникационом уређају [2]. Уочава се велики број филтара који су неопходни за правилно функционисање уређаја, што говори о важности примене филтара.

Да би се извршило ефикасно пројектовање филтара, неопходно је упознати се са основном теоријом електричних филтара.

У овом раду претпоставиће се следеће: (а) филтар је без губитака и начињен је од калемова, кондензатора и идеалних секција водова, (б) број елемената је коначан, (в) потрошач је отпорник, (г) извор је простопериодичан, напонски, (д) унутрашња импеданса извора је чисто резистивна, (ђ) одзив је устален, (е) систем (филтар) је без почетне енергије (релаксиран), (ж) разматра се филтар пропусник ниских учестаности, (и) максимални пренос енергије је на фреквенцији која је једнака нули. За описивање филтра се користи функција мреже филтра која се дефинише као количник комплексног одзива и комплексне побуде (слика 1). Референтни смерови струја и напона су усклађени.

Нека је комплексни представник (трансформат Лапласове трансформације) дефинисан као

$$U(s) = \int_0^{\infty} u(t) e^{-st} dt, \quad (1)$$

где је $U(s)$ функција комплексне учестаности, $s = \sigma + j\omega$ и $j = \sqrt{-1}$ имагинарна јединица. Улазна функција мреже је однос величина истог приступа, а преносна функција мреже је однос величина различитих приступа.

У овом раду је од интереса преносна функција мреже дефинисана једначином

$$H(s) = \frac{U_2(s)}{U_g(s)}, \quad (2)$$

где су референтни смерови напона $U_2(s)$ и $U_g(s)$ приказани на слици 1. Овако дефинисана функција преноса представља напонску трансфер функцију. Ако се у описивању филтра користи појам фреквенцијски спектар, онда се претпоставља коришћење Фуријеове трансформације. Посматрање карактеристика филтара у домену трансформације је лакше и природније.

Функција мреже на оси учестаности, $H(j\omega)$, за $s = j\omega$ је фреквенцијски одзив који се представља преко амплитудског одзива као

$$M(\omega) = |H(j\omega)| \quad (3)$$

и фазног одзива

$$\Phi(\omega) = \arg(H(j\omega)), \quad (4)$$

што даје

$$H(j\omega) = M(\omega) \exp(j\Phi(\omega)), \quad (5)$$

где је ω угаона учестаност, $\omega = 2\pi f$ у радијанима у секунди.

Графици $M(\omega)$ и $\Phi(\omega)$ у функцији угаоне учестаности ω или учестаности f се називају фреквенцијске карактеристике.

Карактеристична функција филтра, $K(\omega)$, је дефинисана изразом

$$K(\omega) = \sqrt{\frac{1}{M^2(\omega)} - 1}, \quad (6)$$

при чему се сматра да је амплитудски одзив нормализован, $\max(M(\omega)) = 1$.

Амплитудска карактеристика се често црта у децибелима, $M_{dB}(\omega) = 20 \log_{10}(M(\omega))$ и некада се назива ниво, а фреквенцијска оса може бити линеарна или логаритамска. Ако је логаритамска, може бити у декадама (ако је на апсциси $\log_{10}(\omega/(\text{rad/s}))$ или $\log_{10}(f/\text{Hz})$) или октавама ако је основа логаритма 2. Реципрочна вредност преносне функције је слабљење

$$A(s) = \frac{1}{H(s)}, \quad (7)$$

односно

$$A(j\omega) = \frac{1}{H(j\omega)}. \quad (8)$$

У одсуству филтра, када је потрошач непосредно прикључен на генератор, претпоставићемо да је извршено прилагођење по снази, што значи да је:

$$H_0 = H_{DC}, \quad (9)$$

где је H_{DC} вредност преносне функције филтра при фреквенцији нула. Софтверски алати често приказују нормализовану преносну функцију филтара пропусника ниских учестаности:

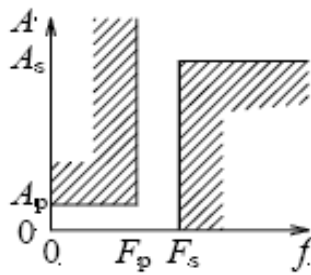
$$H_{\text{norm}} = \frac{H(s)}{H_0}, \quad (10)$$

што понекад збуњује кориснике.

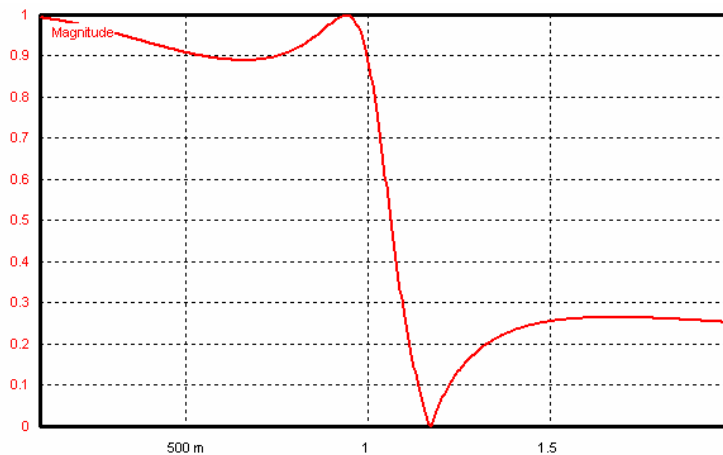
1.2. Основни кораци у пројектовању филтара

Пројектовање филтара је процес од више корака чији је први **спецификација** – постављање услова које филтар треба да задовољи. Основна спецификација је спецификација амплитудског одзива и она је најчешћа у пракси. Могуће је задати и спецификацију фазног одзива што се, на пример, ради при пројектовању такзованих фазних коректора. При спецификацији се задаје област у којој треба да је амплитудска карактеристика. Границе ове области се зову габарит филтра (слика 3а).

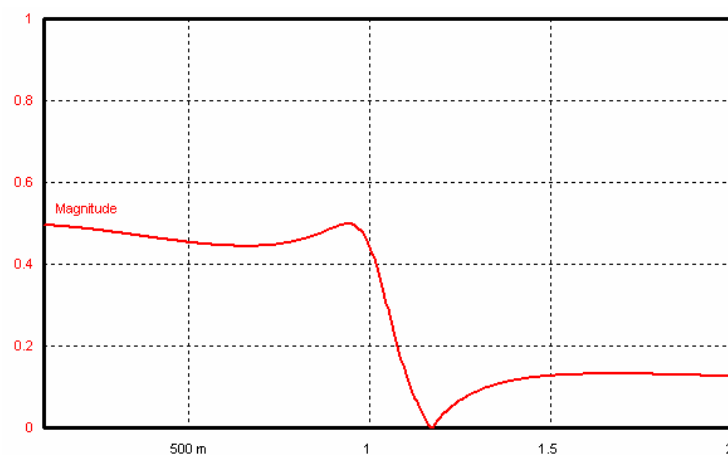
Спецификација амплитудског одзива филтра пропусника ниских учестаности, изражена преко слабљења је дата на слици 3а. Пропусни опсег је опсег учестаности је $0 < f < F_p$ у коме је највеће дозвољено слабљење A_p . Опсег $f > F_s$ је непропусни опсег и у њему је најмање дозвољено слабљење A_s . Опсег $F_p < f < F_s$ је прелазни опсег чија ширина дефинише стрмину филтра. Оваква спецификација се назива амплитудска спецификација унетог слабљења. Постоји још неколико спецификација, а у овој тези ће бити разматрана само спецификација амплитудског одзива. Примери амплитудског одзива су приказани на слици 3б-3д. (У овој тези ће се разматрати филтри пропусници ниских учестаности.) Спецификација микроталасног филтра обично задаје габарит за параметре расејања (s -параметре). На основу спецификације се бира функција мреже филтра, **апроксимација**, и изводи **шема са идеалним елементима**.



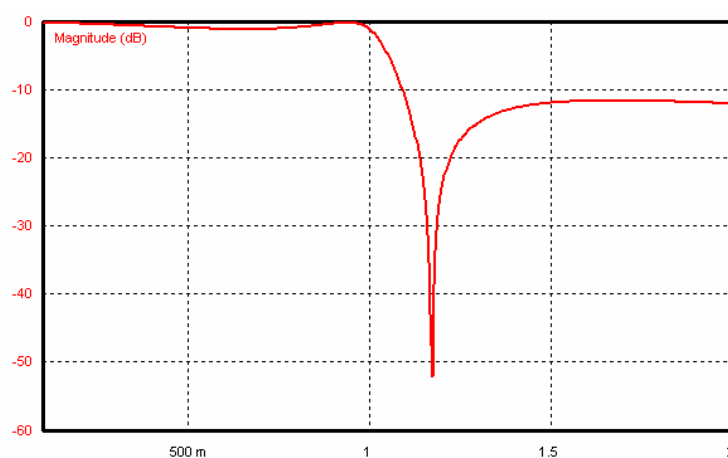
Слика 3а. Габарит унетог слабљења филтра пропусника ниских учестаности. Пропусни опсег је $0 < f < F_p$ у коме је A_p највеће дозвољено слабљење. Опсег $f > F_s$ је непропусни опсег у коме је најмање дозвољено слабљење A_s . Опсег у коме је $F_p < f < F_s$, је прелазни опсег.



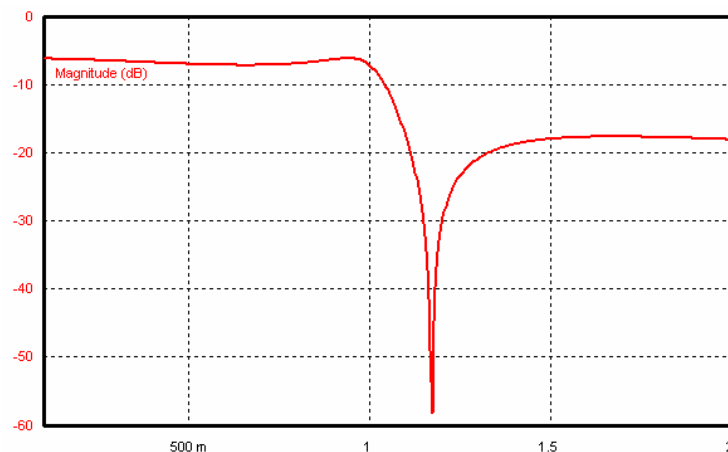
Слика 3б. Амплитудски одзив филтра пропусника ниских учестаности. Нормализована функција преноса.



Слика 3в. Амплитудски одзив филтра пропусника ниских учестаности. Ненормализована функција преноса.



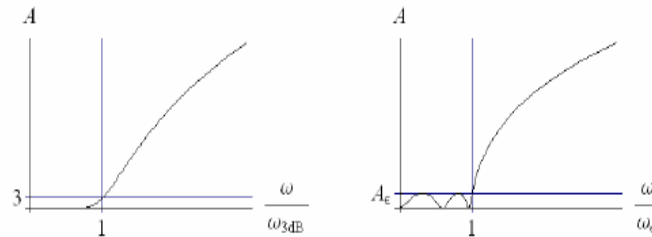
Слика 3г. Амплитудски одзив филтра пропусника ниских учестаности. Нормализована функција преноса приказана у dB.



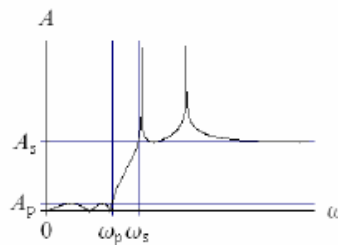
Слика 3д. Амплитудски одзив филтра пропусника ниских учестаности. Ненормализована функција преноса приказана у dB.

Апроксимација је аналитички израз фреквенцијског одзива који задовољава спецификацију и може да се оствари у пракси. Апроксимација мора задовољити услов каузалности. Апроксимација је реално остварљива селективна функција која се прво тражи за мреже сачињене од идеалних кондензатора и калемова. Апроксимација се по правилу задаје за филтар пропусник ниских учестаности. Основне апроксимације су Батервортова (Butterworth) и Чебишевљева (Chebyshev) и оне су приказане на слици 4.

Елиптичка (elliptic) апроксимација (слика 5) има највећу селективност за најмањи ред филтра. Постоје и многе друге апроксимације од којих наводимо Гаусову (Gauss) и Лежандрову (Legendre).



Слика 4. Батервортова и Чебишевљева апроксимација унетог слабљења.



Слика 5. Елиптичка (Каујева) апроксимација унетог слабљења.

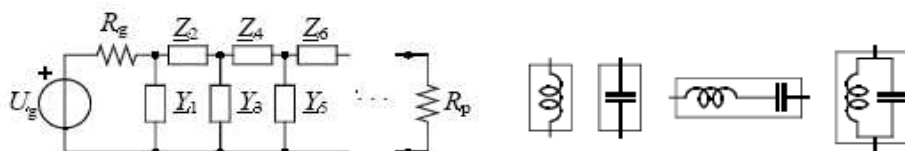
Апроксимација и шема са идеалним елементима чине синтезу филтра. Синтеза филтра је вишезначна.

Према фреквенцијском опсегу који издвајају, постоји следећих пет врста филтара:

- Пропусници ниских учестаности (енгл. Low Pass – LP)
- Пропусници високих учестаности (енгл. High Pass – HP)
- Пропусници опсега учестаности (енгл. Band Pass – BP)
- Непропусници опсега учестаности (енгл. Band Stop; ако је опсег који не пропуштају веома узак онда Notch Filters)
- Свепропусници опсега (фазни коректори, енгл. All Pass)

Електрична шема филтра са идеалним елементима треба да задовољава спецификацију и да јој фреквенцијски одзив одговара апроксимацији. Један од задатака шеме са идеалним елементима је да оствари функцију мреже одређену апроксимацијом. Шема са идеалним елементима је канонична ако садржи најмањи број елемената.

У овом раду ће се посматрати само лествичаста шема са идеалним елементима (слика 6) која је добила назив по томе што личи на мердевине (лестве). Лествичаста шема са идеалним елементима је једна од најзначајнијих за микроталасне филтре. Одликује се једноставном топологијом, не садржи трансформаторе и има најмању осетљивост на промене вредности елемената. Лествичаста шема са идеалним елементима се користи још и за остваривање трансформација у активне филтре. Због наведених разлога, лествичаста шема са идеалним елементима је подесна за инжењерску праксу.



Слика 6. Лествичаста шема филтра са идеалним елементима. Градивни елементи мреже могу бити калем или кондензатор, или неко од осцилаторних кола. У овом раду ће за отпорност потрошача бити уведена ознака R_0 , за коју ће се сматрати да је $R_p = R_0$.

Треба још напоменути да код реалних филтара амплитудски и фазни одзив нису независни, већ што је амплитудска карактеристика селективнија, фазна карактеристика је нелинеарнија.

Прототип филтра је лествичаста LC шема са идеалним елементима филтра пропусника ниских учестаности, граничне угаоне учестаности $\omega = 1 \text{ rad/s}$, прикљученог на генератор унутрашње отпорности $R_g = 1 \Omega$.

1.3. Својства функције мреже

Функција мреже је количник Лапласове трансформације одзива и Лапласове трансформације побуде у филтарском колу. За филтарска кола са слике 6, функција мреже је рационална функција комплексне учестаности. Њена својства ће бити испитана у тексту који следи. Такође, дефинисаће се посебна класа математичких функција којој функција мреже припада.

Брунова функција или позитивна реална функција (ПРФ) је функција $H(s)$ коју дефинишу релације:

$$\left. \begin{aligned} \text{Im}(H(s)) = 0 &\Rightarrow \text{Im}(s) = \omega = 0 \\ \text{Re}(H(s)) > 0 &\Rightarrow \text{Re}(s) = \sigma > 0 \\ \text{Re}(H(s)) \geq 0 &\Rightarrow \text{Re}(s) = \sigma = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Реципрочна функција ПРФ је такође ПРФ. ПРФ нема нула и полова у десној полуравни комплексне учестаности s , а полиноми у бројиоцу и имениоцу су Хурвицови (Hurwitz). То значи да су сви коефицијенти реални и истог знака.

Хурвицови полиноми немају нула у десној полуравни комплексне променљиве. Ниједан степен не сме недостајати између највишег и најнижег степена у полиному, изузев када се све нуле налазе на имагинарној оси.

Највиши степени бројиоца и имениоца рационалне ПРФ могу се разликовати највише за један, а могу бити и једнаки. Најнижи степени бројиоца и имениоца рационалне ПРФ могу се разликовати највише за један, а могу бити и једнаки. Полови на имагинарној оси ПРФ су прости са реалним и позитивним резидуумима. Нуле на имагинарној оси ПРФ су просте а извод функције у њима је реалан и позитиван.

Потребан и довољан услов да функција комплексне учестаности буде улазна имитанса електричне мреже, је да је та функција ПРФ.

Ред имитансе је једнак највећем степену полинома.

Функција мреже филтра са концентрисаним елементима је рационална функција по s са реалним коефицијентима:

$$H(s) = \frac{N(s)}{D(s)}, \quad (12)$$

где су $N(s)$ и $D(s)$ полиноми тј.

$$H(s) = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_2 s^2 + a_1 s^1 + a_0}{b_d s^d + b_{d-1} s^{d-1} + \dots + b_2 s^2 + b_1 s^1 + b_0}. \quad (13)$$

Израз (13) се још назива стандардна форма функција мреже. У овом раду ћемо посматрати филтре сачињене од пасивних елемената (калемова, кондензатора и идеалних секција водова).

Критичне тачке функције мреже су нуле и полови. Нуле функције мреже су нуле бројиоца, а полови функције мреже су нуле имениоца.

Функција мреже може бити представљена у облику производа:

$$H(s) = K \frac{(s-s_1)(s-s_2)\dots(s-s_{n-1})(s-s_n)}{(s-s'_1)(s-s'_2)\dots(s-s'_{d-1})(s-s'_d)}, \quad (14)$$

где је

$$K = \frac{a_n}{b_d}. \quad (15)$$

Функција мреже је рационална функција комплексне учестаности s у целој комплексној равни, а одговарајући фреквенцијски одзив се добија за $s = j\omega$. Конјуговано комплексна функција мреже је једнака функцији мреже конјуговано комплексне учестаности, зато што су вредности елемената реалне, односно сви

коэффициенти функције мреже су реални. Нуле и полови су реални или у конјуговано комплексним паровима. На имагинарној оси ($s = j\omega$) реални део и модул функције мреже су парне функције угаоне учестаности ω , а имагинарни део и аргумент функције мреже су непарне функције учестаности. Нуле и полови имитансе могу бити у левој полуравни или на имагинарној оси, а реални део пола је непозитиван.

Функција минималне фазе се дефинише као преносна функција мреже која нема нула у десној половини равни комплексне учестаности. Код функција мреже са два краја, преносна функција не може имати ни половине у десној половини равни комплексне учестаности. Функција минималне фазе је битна у пројектовању филтара јер се у спецификацији при задатом модулу функције мреже уводи претпоставка да је задата функција преноса, функција минималне фазе.

Пропусна функција је дефинисана као функција код које су све нуле у десној полуравни а полови су негативне вредности нула:

$$H_a(s) = \frac{(s-s_1)(s-s_1^*) \cdots (s-s_m)(s-s_m^*)}{(s+s_1)(s+s_1^*) \cdots (s+s_m)(s+s_m^*)}. \quad (16)$$

Модул на имагинарној оси пропусне функције је једнак јединици а аргумент је опадајућа функција на позитивном делу имагинарне осе. Сваку преносну функцију можемо представити производом једне функције минималне фазе и једне пропусне функције:

$$M(s) = M_a(s)M_m(s), \quad (17)$$

где је $M_a(s)$ пропусна функција, а $M_m(s)$ функција минималне фазе.

Преносна функција и одговарајућа функција минималне фазе имају исти модул на имагинарној оси.

Модулом на имагинарној оси је једнозначно одређена само преносна функција минималне фазе, а све друге преносне функције истог модула на имагинарној оси, дате су производом функције минималне фазе и одговарајуће пропусне функције.

Нека је познат модул трансфер функције:

$$M(\omega) = |H(j\omega)|. \quad (18)$$

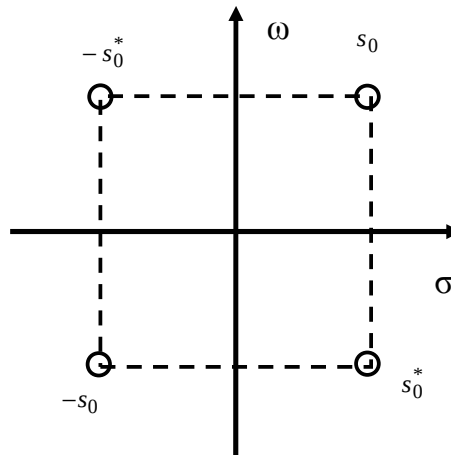
Модулска функција је квадрат модула на имагинарној оси у коме је извршена смена

$$\omega = \frac{s}{j} \quad (19)$$

при чему важи

$$M^2\left(\frac{s}{j}\right) = H(s) \cdot H(-s). \quad (20)$$

Нуле и полови модулске функције су у квадратној симетрији, а полови на имагинарној оси су двоструки (слика 7).



Слика 7. Квадратна симетрија нула модулске функције.

1.3.1. Особине z и y параметара LC мреже са два приступа

Мрежа са два приступа је описана општим једначинама (у домену Лапласове трансформације):

$$\begin{cases} U_1(s) = z_{11}(s)I_1(s) + z_{12}(s)I_2(s) \\ U_2(s) = z_{21}(s)I_1(s) + z_{22}(s)I_2(s) \end{cases} \quad (21)$$

и

$$\begin{cases} I_1(s) = y_{11}(s)U_1(s) + y_{12}(s)U_2(s) \\ I_2(s) = y_{21}(s)U_1(s) + y_{22}(s)U_2(s) \end{cases}, \quad (22)$$

чији су коефицијенти означени као z параметри, односно y параметри. Улазна импеданса (z_{kk}) и улазна адмитанса (y_{kk}) су функције истог облика и особина. За реципрочне мреже важи идентитет $z_{21} = z_{12}$ и $y_{21} = y_{12}$. За симетричне мреже важи $z_{11} = z_{22}$ и $y_{11} = y_{22}$. Имитансе идеалног LC филтра припадају класи рационалних функција комплексне учестаности s са реалним коефицијентима. Улазне импедансе (z_{kk}) подлежу претходној теорији што значи да су ПРФ и то су улазне имитансе отворене или краткоспојене мреже. Ако постоји могућност да се пронађу, онда постоји могућност и да се направи филтар коришћењем Кауеровог развоја. Полови z_{kk} не могу бити у десној полуравни а полови који су на имагинарној оси су прости.

Сваки пол z_{12} је истовремено и пол z_{11} и z_{22} , али обрнуто не важи. Сваки пол y_{12} је истовремено и пол y_{11} и y_{22} , али обрнуто не важи. Најчешће сви параметри имају исте половине.

Импеданса z_{12} је непарна рационална функција са реалним коефицијентима и може имати само просте половине на имагинарној оси. Важи да је $\text{Re}(z_{12}(j\omega)) = 0$. Импеданса z_{12} , међутим, не припада класи ПРФ и може имати нуле у десној полуравни и негативне резидууме у половима на имагинарној оси.

Адмитансни параметри поседују исте особине као и z параметри.

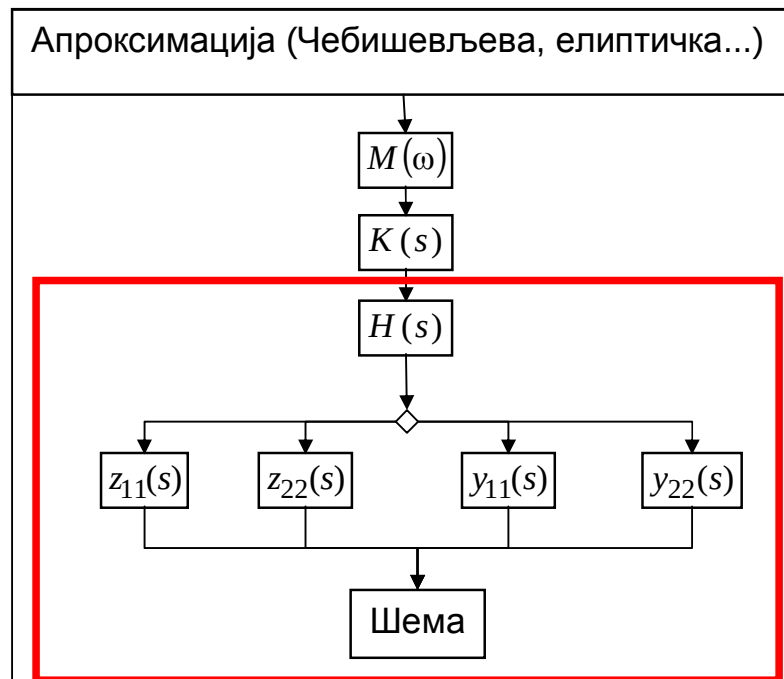
1.3.2. Упрощени алгоритам синтезе филтара

Општи поступак синтезе филтра може се представити кроз следеће кораке:

1. Одабрати апроксимацију $A(\omega)$ (Чебишевљева, елиптика...).
2. Одредити модул функције мреже $M(\omega)$ на основу одабране апроксимације.
3. Одредити карактеристичну функцију $K(s)$ из модула функције мреже.
4. Одредити функцију преноса $H(s)$ из карактеристичне функције.
5. Одредити имитансни параметар $z_{11}(s)$ или $z_{22}(s)$ из функције преноса.
6. Извести шему са идеалним елементима из имитансног параметра.

Овај рад се усредсређује на тачке 5 и 6, на основу метода изложених у литератури у [1], [3, стр. 207], [4], [5], [6] и [7].

Упрощени блок дијаграм алгоритма синтезе филтра је дат на слици 8.



Слика 8. Упрошћени блок дијаграм алгоритма синтезе LC лествичасте мреже.

1.4. Синтеза LC филтара

У овом раду се посматрају две основне реализације филтарских кола:

1. Једноструко затворене лествичасте мреже (Singly terminated ladder networks)
2. Двоструко затворене лествичасте мреже (Doubly terminated ladder networks)

Двоструко затворена лествичаста мрежа се може направити као мрежа најмање осетљивости на промене вредности елемената. У овом раду се претпоставља следеће: (а) филтар је без губитака и начињен је од калемова, кондензатора и идеалних секција водова, (б) број елемената је коначан, (в) потрошач је отпорник, (г) извор је простопериодичан, напонски, (д) унутрашња импеданса извора је отпорничка, (ђ) одзив је устаљен, (е) систем (филтар) је без почетне енергије (релаксиран), (ж) разматра се филтар пропусник ниских учестаности, (и) максимални пренос енергије је на фреквенцији која је једнака нули. Двоструко затворена мрежа је приказана на слици 6. За $R_g = 0 \Omega$ реализација постаје једноструко затворена.

1.4.1. Једноструко затворена мрежа (Singly Terminated Network)

Функција преноса једноструко затворене лествичасте реализације се може представити преко адмитансних параметара као

$$H(s) = -\frac{y_{21}R_0}{1 + y_{22}R_0}, \quad (23)$$

где је R_0 отпорност потрошача. Може се показати да су y_{21} и y_{22} непарне функције комплексне учестаности s . Стога:

$$H(s) = \frac{N_{\text{even}} + N_{\text{odd}}}{D_{\text{even}} + D_{\text{odd}}}, \quad (24)$$

где су N_{even} (D_{even}) паран, и N_{odd} (D_{odd}) непаран део бројиоца (имениоца), респективно. Дељењем (24) са D_{even} (за $N_{\text{even}} = 0$) или D_{odd} (за $N_{\text{odd}} = 0$) добија се:

$$H(s) = \frac{\frac{N_{\text{odd}}}{D_{\text{even}}}}{1 + \frac{D_{\text{odd}}}{D_{\text{even}}}}, \quad (25)$$

за $N_{\text{even}} = 0$, то јест:

$$H(s) = \frac{\frac{N_{\text{even}}}{D_{\text{odd}}}}{1 + \frac{D_{\text{even}}}{D_{\text{odd}}}}, \quad (26)$$

за $N_{\text{odd}} = 0$. Адмитанса се може добити из (23) као

$$y_{22}R_0 = \frac{D_{\text{odd}}}{D_{\text{even}}}, \quad (27)$$

или

$$y_{22}R_0 = \frac{D_{\text{even}}}{D_{\text{odd}}}, \quad (28)$$

у зависности да ли је $N_{\text{even}} = 0$ или $N_{\text{odd}} = 0$, а реализација се врши Кауеровим развојем [1].

Описаним алгоритмом се одређује шема филтра са идеалним елементима када функција преноса нема нула или има нуле само у координатном почетку.

Пример 1. Једноструко затворена лествичаста шема са идеалним елементима без нула у функцији преноса. Filter Solutions, Mathematica.

Нека је одабрана Чебишевљева апроксимација петог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити професионалним, комерцијалним програмом Filter Solutions [8] ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 0 ($R_g = 0 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$), Pass Band Ripple је 1 dB, Pass Band Frequency је 1 rad/s. Функција преноса једноструко затворене LC лествичасте шеме са идеалним елементима је

$$H(s) = \frac{0.12282667}{s^5 + 0.93682013s^4 + 1.688816s^3 + 0.97439607s^2 + 0.58053415s + 0.12282667}^1. \quad (29)$$

Помоћу „папира и оловке” или програма за симболичку математику као што је Mathematica [9] може се спровести поступак синтезе филтра.

Полиноми N_{even} , D_{even} , N_{odd} и D_{odd} се одређују из функције преноса као:

$$N_{\text{even}} = 0.12282667 \quad (30)$$

$$N_{\text{odd}} = 0 \quad (31)$$

$$D_{\text{even}} = 0.93682013s^4 + 0.97439607s^2 + 0.12282667 \quad (32)$$

$$D_{\text{odd}} = s^5 + 1.688816s^3 + 0.58053415s \quad (33)$$

Како је $N_{\text{odd}} = 0$, функција мреже ће бити представљена као:

¹ У овом раду ће представљање децималних бројева бити вршено користећи децималну тачку, а не децимални зарез. Разлог томе је одржавање конзистентности са, у инжењерској пракси одомаћеном, англосаксонском номенклатуром.

$$H(s) = \frac{\frac{N_{\text{even}}}{D_{\text{odd}}}}{1 + \frac{D_{\text{even}}}{D_{\text{odd}}}}. \quad (34)$$

Из (28) следи:

$$y_{22} R_0 = \frac{D_{\text{even}}}{D_{\text{odd}}}, \quad (35)$$

тј.

$$y_{22} = \frac{D_{\text{even}}}{R_0 D_{\text{odd}}}. \quad (36)$$

У примеру је $R_0 = 1 \Omega$ (без губитка општости), па је

$$y_{22} = \frac{0.93682013s^4 + 0.97439607s^2 + 0.12282667}{s^5 + 1.688816s^3 + 0.58053415s}. \quad (37)$$

Како је степен бројиоца мањи од степена имениоца, прорачун се наставља користећи импедансу:

$$z_{22} = \frac{s^5 + 1.688816s^3 + 0.58053415s}{0.93682013s^4 + 0.97439607s^2 + 0.12282667}. \quad (38)$$

Импеданса z_{22} се раставља на збир полинома и праве рационалне функције тако што се подели бројилац имениоцем:

$$z_{22} = 1.0674408s + \frac{0.692455135s^3 + 0.479733452s}{s^4 + 1.04011009s^2 + 0.131110195}. \quad (39)$$

Види се да се импеданса z_{22} може представити као редна веза пасивног калема чија је индуктивност $L = 1.0674408 \text{ H}$ и импедансе нижег реда:

$$z_{22}^{\#2} = \frac{0.692455135s^3 + 0.479733452s}{s^4 + 1.04011009s^2 + 0.131110195}. \quad (40)$$

Сада је потребно наћи инверзни облик импедансе (адмитансу) јер је именилац степена већег од бројиоца:

$$y_{22}^{\#2} = \frac{s^4 + 1.04011009s^2 + 0.131110195}{0.692455135s^3 + 0.479733452s}. \quad (41)$$

Адмитанса $y_{22}^{\#2}$ се раставља на збир полинома и праве рационалне функције тако што се подели бројилац имениоцем.

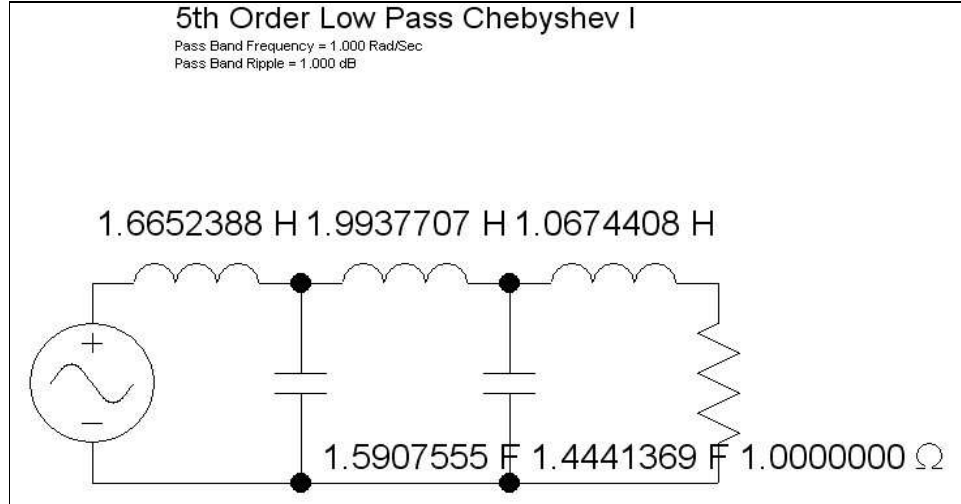
$$y_{22}^{\#2} = 1.4441369s + \frac{0.501562196s^2 + 0.18934226}{s^3 + 0.692800772s}. \quad (42)$$

Из (42) се види да се адмитанса $y_{22}^{\#2}$ може представити као редна веза пасивног кондензатора чија је капацитивност $C = 1.4441369 \text{ F}$ и адмитансе нижег реда. Даље се прорачун наставља користећи импедансу:

$$z_{22}^{\#3} = \frac{s^3 + 0.692800772s}{0.501562196s^2 + 0.18934226}. \quad (43)$$

Понављајући претходно наведен поступак, одређују се остали елементи филтра.

Елементи се добијају редом од потрошача ка генератору, а за наведени пример је електрична шема филтра приказана на слици 9 (Filter Solutions).



Слика 9. Шема са идеалним елементима филтра чија је функција преноса дата у (29). Filter Solutions.

Прорачун коришћењем софтвера *Mathematica* се добро слаже са прорачуном који даје Filter Solutions.

Пример 2. Једноструко затворена лествичаста шема са идеалним елементима са комплексним нулама у функцији преноса. Filter Solutions, Mathematica.

Нека је одабрана елиптичка апроксимација трећег реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 0 ($R_g = 0 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$), Pass Band Frequency је 1 rad/s, Pass Band Ripple је 1 dB и Stop Band Ratio је 1.1. Функција преноса једноструко затворене LC лествичасте шеме са идеалним елементима која има конјуговано комплексне нуле је

$$H(s) = \frac{0.62085963s^2 + 0.8507724}{s^3 + 1.0114629s^2 + 1.2018049s + 0.8507724}. \quad (44)$$

На основу облика функције преноса добијене у овом примеру (бројилац има конјуговано комплексне нуле), може се закључити да филтар садржи осцилаторна кола.

Полиноми N_{even} , D_{even} , N_{odd} и D_{odd} се одређују из функције преноса као

$$N_{\text{even}} = 0.62085963s^2 + 0.8507724, \quad (45)$$

$$N_{\text{odd}} = 0, \quad (46)$$

$$D_{\text{even}} = 1.0114629s^2 + 0.8507724, \quad (47)$$

$$D_{\text{odd}} = s^3 + 1.2018049s. \quad (48)$$

Нуле функције мреже добијене из бројиоца су:

$$s_1 = -1.170603950j \quad (49)$$

и

$$s_2 = 1.170603950j. \quad (50)$$

Нуле трансфер функције се подударају са нулама адмитансног параметра y_{21} , а y_{22} се добија из (28) за $R_0 = 1 \Omega$:

$$y_{22} = \frac{1.0114629s^2 + 0.8507724}{s^3 + 1.2018049s}. \quad (51)$$

Постоји услов да нуле функције преноса морају бити реализоване LC лествичастом мрежом добијеном из y_{22} . Како је степен бројиоца мањи од степена имениоца, прорачун се наставља користећи импедансу:

$$z_{22} = \frac{s^3 + 1.2018049s}{1.0114629s^2 + 0.85077224}, \quad (52)$$

где је z_{22} могуће представити као:

$$Z_{22} = L_1 s + Z_2, \text{ за } Z_2(s_1) = Z_2(s_2) = 0. \quad (53)$$

Индуктивност калема се добија као:

$$L_1 = \left. \frac{Z_{22}}{s} \right|_{s=s_1} = \frac{s^3 + 1.2018049s}{(1.0114629s^2 + 0.85077224)s} \Big|_{s=s_1} = 0.31482304 \text{ H}. \quad (54)$$

Даље је:

$$Z_2 = Z_{22} - L_1 s = \frac{0.67384397s^3 + 0.923377564s}{s^2 + 0.841130604}. \quad (55)$$

Сада је неопходно наћи реципрочни облик импедансе:

$$Y_2 = \frac{s^2 + 0.841130604}{0.67384397s^3 + 0.923377564s}. \quad (56)$$

У изразу (56) се уочава да је степен полинома у бројиоцу мањи од степена полинома у имениоцу. То значи да је потребно екстраковати вредности осцилаторног кола. Адмитанса се може представити као:

$$Y_2 = \frac{1}{sL_2 + \frac{1}{sC_2}} + Y_3 = \frac{\frac{s}{L_2}}{s^2 + s_1 s_2} + Y_3, \quad (57)$$

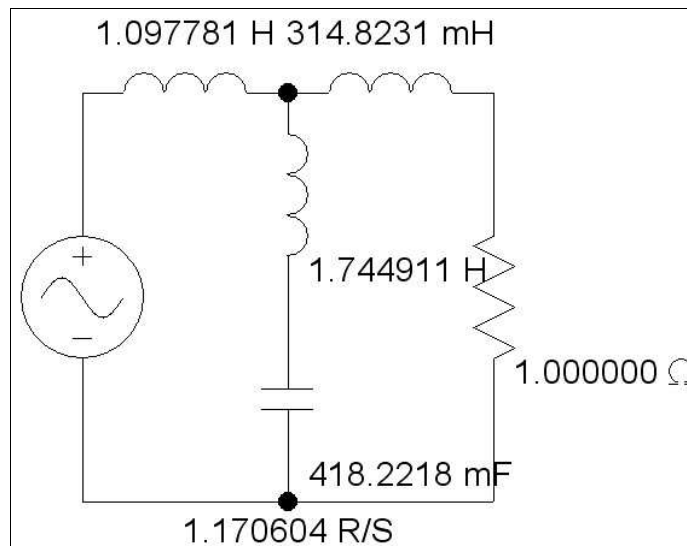
где су s_1 и s_2 нуле функције преноса. Следи:

$$L_2 = Z_2 \left. \frac{s}{s^2 + 1.37031360} \right|_{s=s_1} = 1.74491160 \text{ H} \quad (58)$$

и:

$$C_2 = -\frac{1}{L_2 s_1^2} = 0.418221735 \text{ F}. \quad (59)$$

Поступак се може аналогно наставити даље, а реализација филтра коју даје Filter Solutions је приказана на слици 10.



Слика 10. Шема са идеалним елементима филтра чија је функција преноса дата у (44). Filter Solutions.

1.4.2. Двоструко затворена мрежа (Doubly Terminated Network)

Функција преноса двоструко затворене мреже се разматра за $R_g \neq 0$ и дата је изразом:

$$H(s) = \frac{V_0}{V_g} = \frac{R_0 z_{21}}{R_g R_0 + R_0 z_{11} - z_{12} z_{21} + R_g z_{22} + z_{11} z_{22}}, \quad (60)$$

где се може показати да су z_{11} и z_{22} непарне функције комплексне учестаности s .

Основна идеја коришћена у рачуну са z_{11} и z_{22} је да средња снага која улази у LC мрежу мора бити једнака средњој снази која напушта LC мрежу и предаје се потрошачу. Дефинишимо помоћне функције $K(s)$ и $K_1(\omega^2)$ такве да је

$$K(s)K(-s)|_{s^2=-\omega^2} = K_1(\omega^2) = K_1(-s^2) = \frac{M_{\max}^2}{M^2(\omega)} - 1, \quad (61)$$

где је $M(\omega) = |H(j\omega)|$ амплитудски одзив и $M_{\max} = \max_{\omega} M(\omega)$ максимална вредност амплитудског одзива.

$K_1(-s^2)$ је парна рационална функција по ω . Комплексне нуле функције $K_1(-s^2)$ се јављају у квадриполима ($s_1 = \sigma_1 + j\omega_1$, $s_2 = \sigma_1 - j\omega_1$, $s_3 = -\sigma_1 + j\omega_1$, $s_4 = -\sigma_1 - j\omega_1$, где су σ_1 и ω_1 реални и позитивни), а реалне нуле се јављају у паровима. За даљу обраду се врши избор конјуговано комплексних парова нула са леве или десне стране комплексне равни. Ако су нуле чисто имагинарне, небитно је који ће пар нула бити одабран. Ако су нуле реалне, појављују се у паровима и одабира се било која нула.

Нормализована функција мреже је:

$$H_n(s) = \frac{H(s)}{M_{\max}}, \quad (62)$$

$$H_n(s) = \frac{P(s)}{D_{\text{even}} + D_{\text{odd}}} = \frac{P_{\text{even}} + P_{\text{odd}}}{D_{\text{even}} + D_{\text{odd}}}. \quad (63)$$

Следи:

$$K(s) = \frac{N_{\text{even}} + N_{\text{odd}}}{P(s)} = \frac{N_{\text{even}} + N_{\text{odd}}}{P_{\text{even}} + P_{\text{odd}}}. \quad (64)$$

Усваја се да су полови $K(s)$ нуле функције преноса.

Може се показати да је

$$z_{11} = R_g \frac{D_{\text{even}} - N_{\text{even}}}{D_{\text{odd}} + N_{\text{odd}}} \text{ и } z_{22} = R_0 \frac{D_{\text{even}} + N_{\text{even}}}{D_{\text{odd}} + N_{\text{odd}}}, \quad (65)$$

или

$$z_{11} = R_g \frac{D_{\text{odd}} - N_{\text{odd}}}{D_{\text{even}} + N_{\text{even}}} \text{ и } z_{22} = R_0 \frac{D_{\text{odd}} + N_{\text{odd}}}{D_{\text{even}} + N_{\text{even}}}. \quad (66)$$

Импеданса може бити реализована класичним Кауеровим или Фостеровим разлагањем [1].

Пример 3. Двоструко затворена лествичаста шема са идеалним елементима са комплексним нулама у функцији преноса. Filter Solutions, Mathematica.

Нека је одабрана елиптичка апроксимација трећег реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1\Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1\Omega$), Pass Band Frequency је 1 rad/s, Pass Band Ripple је 1 dB и Stop Band Ratio је 1.1. Функција преноса двоструко затворене LC лествичасте реализације са конјуговано комплексним нулама у бројиоцу је

$$H(s) = \frac{0.620859625490098s^2 + 0.850772398555667}{s^3 + 1.0114629628805s^2 + 1.20180485157191s + 0.850772398555667}. \quad (67)$$

Следи:

$$N_{\text{even}} = 0.620859625490098 s^2 + 0.850772398555667, \quad (68)$$

$$N_{\text{odd}} = 0, \quad (69)$$

$$D_{\text{even}} = 1.0114629628805s^2 + 0.850772398555667, \quad (70)$$

$$D_{\text{odd}} = s^3 + 1.20180485157191s. \quad (71)$$

Нуле бројиоца су:

$$s_1 = -1.17060395360531j \quad (72)$$

и

$$s_2 = +1.17060395360531j. \quad (73)$$

Без губитка општости је усвојено да је максимум амплитудског одзива једнак 1. Неопходно је формирати помоћну функцију $K_1(s)$ и изабрати нуле те функције. Нуле функције $K_1(s)$ се добијају из једначине

$$D_{\text{even}}^2 - D_{\text{odd}}^2 - P_{\text{even}}^2 + P_{\text{odd}}^2 = 0. \quad (74)$$

У нашем случају, из услова да је максимум једнак један, важи да је $N = P$, што се види из једначина (24), (62) и (63), па се једначина (74) може представити као:

$$s^6 - 1.7660190859938218s^4 - 0.7797058530236161s^2 = 0. \quad (75)$$

Решења једначине (75) су:

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= 0 \\ s_2 &= 0 \\ s_3 &= -3.75898961408752 \cdot 10^{-9} - j \cdot 0.93968587373484 \\ s_4 &= -3.75898961408752 \cdot 10^{-9} + j \cdot 0.93968587373484 \\ s_5 &= 3.75898961408752 \cdot 10^{-9} - j \cdot 0.93968587373484 \\ s_6 &= 3.75898961408752 \cdot 10^{-9} + j \cdot 0.93968587373484 \end{aligned} \right\}. \quad (76)$$

Неопходно је одабрати половину нула, тако да одабрана половина има негативни реални део у односу на неодабрану. Нека су одабране нуле са ненегативним реалним делом:

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= 0 \\ s_2 &= 3.75898961408752 \cdot 10^{-9} - j \cdot 0.93968587373484 \\ s_3 &= 3.75898961408752 \cdot 10^{-9} + j \cdot 0.93968587373484 \end{aligned} \right\}. \quad (77)$$

Од њих ће бити формиран полином N_s где ознака (у индексу) s указује на другачији полином у односу на бројилац функције мреже:

$$N_s = s^3 - 7.517979228175037 \cdot 10^{-9}s^2 + 0.8830095446970083s \quad (78)$$

и

$$N_{s\text{-even}} = -7.517979228175037 \cdot 10^{-9}s^2, \quad (79)$$

$$N_{s\text{-odd}} = s^3 + 0.8830095446970083s \quad (80)$$

Коначно, формира се импеданса z_{11} као:

$$z_{11} = R_g \frac{D_{\text{even}} - N_{s\text{-even}}}{D_{\text{odd}} + N_{s\text{-odd}}} = \frac{1.0114629538060291s^2 + 0.850772398555667}{2s^3 + 2.0848143962689183s}. \quad (81)$$

Како је степен бројиоца мањи од степена имениоца, прорачун се наставља са реципрчном вредношћу импедансе. Адмитанса се може приказати у облику

$$Y_{11} = C_1s + Y_2, \text{ за } Y_2(s_1) = Y_2(s_2) = 0. \quad (82)$$

Капацитивност се може добити као

$$C_1 = \left. \frac{Y_{11}}{s} \right|_{s=s_1} = 1.2252479938094667 \text{ F} \quad (83)$$

$$Y_2 = Y_{11} - C_1 s = \frac{0.7520859188901626s^3 + 1.0305935752047566s}{s^2 + 0.8411305578264627} \quad (84)$$

Сада је неопходно наћи реципрочни облик адмитансе:

$$Z_2 = \frac{s^2 + 0.8411305578264627}{0.7520859188901626s^3 + 1.0305935752047566s}. \quad (85)$$

У (85) се уочава да је степен полинома у бројиоцу мањи од степена полинома у имениоцу. То значи да је потребно екстраковати вредности осцилаторног кола. Импеданса се може представити као

$$Z_2 = \frac{1}{\frac{1}{sL_2} + sC_2} + Z_3 = \frac{\frac{s}{C_2}}{s^2 + s_1s_2} + Z_3, \quad (86)$$

одакле се добија

$$C_2 = \left. \frac{1}{Z_2} \frac{s}{s^2 + 1.370313616196381} \right|_{s=s_1} = 1.9475180826449174 \text{ F} \quad (87)$$

и

$$L_2 = -\frac{1}{C_2 s_1^2} = 0.37471279953350584 \text{ H}. \quad (88)$$

Добија се импеданса:

$$Z_3 = Z_2 - \frac{1}{\frac{1}{sL_2} + sC_2} \quad (89)$$

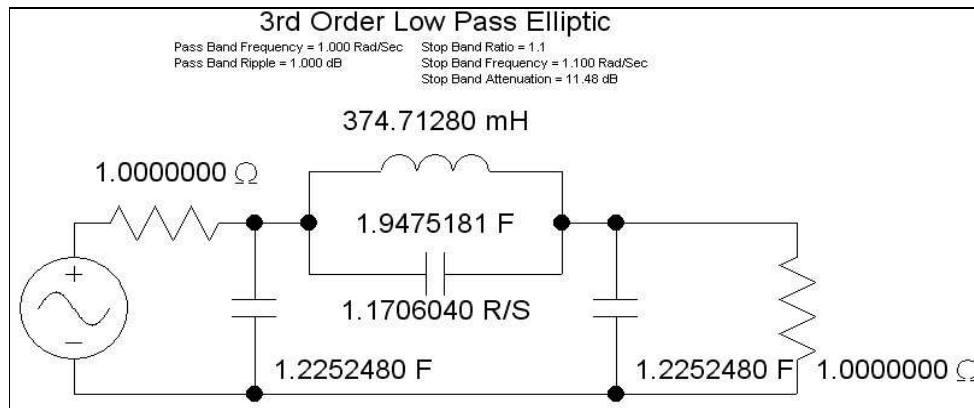
која има облик

$$Z_3 = \frac{1}{sC_3} = \frac{1}{s \cdot 1.22524801546321}. \quad (90)$$

Следи:

$$C_3 = 1.22524801546321 \text{ F}. \quad (91)$$

Шема са идеалним елементима филтра коју даје Filter Solutions је приказана на слици 11. Први елемент у овој реализацији је паралелан. Вредности елемената које даје Filter Solutions са петнаест значајних цифара су: $C_1=1.22524802056822$, $R_1=1.00000000$, $L_2=0.374712801116036$, $C_2=1.94751807441993$, $C_3=1.22524802056822$, $R_3=1.00000000$.



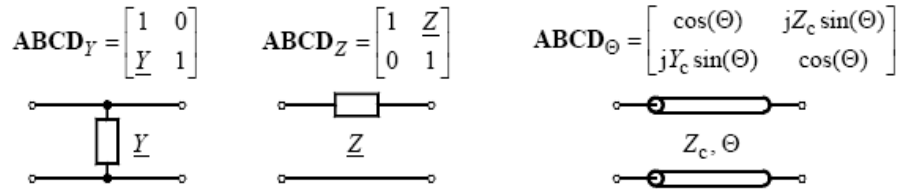
Слика 11. Шема са идеалним елементима елиптичког филтра чија је функција преноса дата у (67). Filter Solutions. Први елемент је паралелан.

Уочава се да су алгоритми добијања L и C елемената код једноструко и двоструко затворених мрежа потпуно исти, само што су алгоритми добијања полинома бројиоца и имениоца одговарајућих имитанси које улазе у прорачун различити.

1.5. Микроталасни филтри реализовани помоћу водова

Микроталасни филтри су најчешће пасивне реципрочне мреже са два приступа. Разлог коришћења пасивних елемената је (тренутно) висока цена активних направа које раде на микроталасним фреквенцијама, потреба за напајањем и компактност. Реализација микроталасних филтара се може изводити помоћу концентрисаних и/или расподељених елемената. То значи да се коришћењем водова могу (под одређеним условима) добити електрична кола истих или сличних особина као кола сачињена од калемова и кондензатора.

Нека је добијена лествичаста LC шема са идеалним елементима филтра пропусника ниских учестаности. Таква шема са идеалним елементима се може схватити као каскадна веза две врсте мрежа, редне импедансе и паралелне адмитансе. Секција идеалног вода се може на једној учестаности представити еквивалентном T или П мрежом чији су елементи калемови и кондензатори. Посматрајући ABCD матрице ових мрежа уочава се, за електрично кратак вод, да ако је карактеристична импеданса мала, идеална секција вода се понаша као паралелна капацитивна адмитанса, а ако је карактеристична импеданса велика, идеална секција вода се понаша као редна индуктивна импеданса (слика 12).



Слика 12. ABCD матрице паралелне адмитансе, редне импедансе и одсечка вода.

Улазна импеданса краткоспојеног огранка идеалног вода је

$$Z_{KS} = jZ_c \tan(\Theta), \quad (92)$$

где је Z_c карактеристична импеданса, а Θ електрична дужина вода и за $0 < \Theta < \pi/2$ има индуктиван карактер. Улазна адмитанса отвореног огранка идеалног вода је:

$$Y_{OV} = jY_c \tan(\Theta), \quad (93)$$

где је Y_c карактеристична адмитанса и за $0 < \Theta < \pi/2$ има капацитиван карактер. Ричардс је предложио трансформацију:

$$\Omega = \tan(\Theta) = \tan(\omega\Theta_0 / \omega_0), \quad (94)$$

где је ω_0 угаона учестаност која одговара граничној фреквенцији нископропусног филтра којом се прототип филтра пресликава у шему филтра са идеалним секцијама водова исте електричне дужине. Вредности елемената се пресликавају у карактеристичне импедансе огранака.

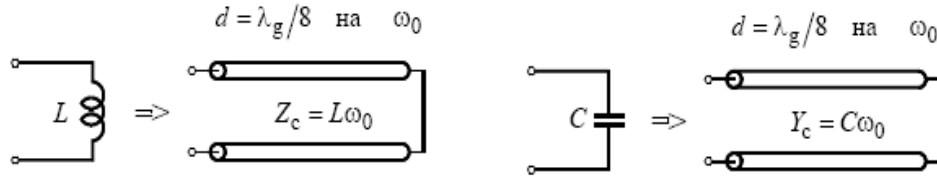
За изабран електрично кратак одсечак $\Theta < \Theta_0 = \pi/4$, LC шема филтра са идеалним елементима пропусника ниских учестаности ће моћи да се замени шемом са идеалним секцијама водова (слика 13). Паралелни кондензатор се мења отвореним огранком карактеристичне адмитансе

$$Y_c = C\omega_0 = C_{\text{proto}} / R_g, \quad (95)$$

где ознака proto у индексу значи да се ради о вредности која је израчуната за прототип филтра. Редни калем треба заменити кратком спојеним огранком карактеристичне импедансе

$$Z_c = L\omega_0 = L_{\text{proto}} R_g. \quad (96)$$

При оваквој реализацији сви огранци имају исту дужину $\lambda_g/8$ на учестаности f_0 која је једнака граничној учестаности филтра, F_p .



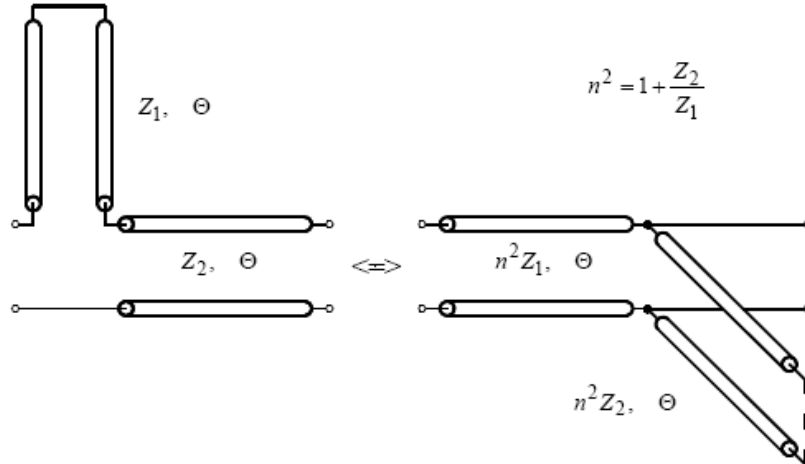
Слика 13. Еквиваленција концентрисаних и расподељених елемената на једној учестаности. Таласна дужина се рачуна на учестаности која је једнака граничној учестаности филтра.

Основни проблем који се јавља код оваквих филтара (филтара начињених од водова) је периодичност фреквенцијског одзива са периодом од $4f_0$. Дата шема са идеалним елементима може бити од интереса за реализацију у коаксијалној техници, али је неподесна за микрострип технологију. Шема са идеалним елементима добијена Ричардсовом трансформацијом намењена микрострип технологији се преуређује применом заменских шема које се називају Куродини идентитети. Заменске шеме важе за произвољне електричне дужине тј. за све учестаности. Усваја се да су водови идеални и без губитака (слика 14).

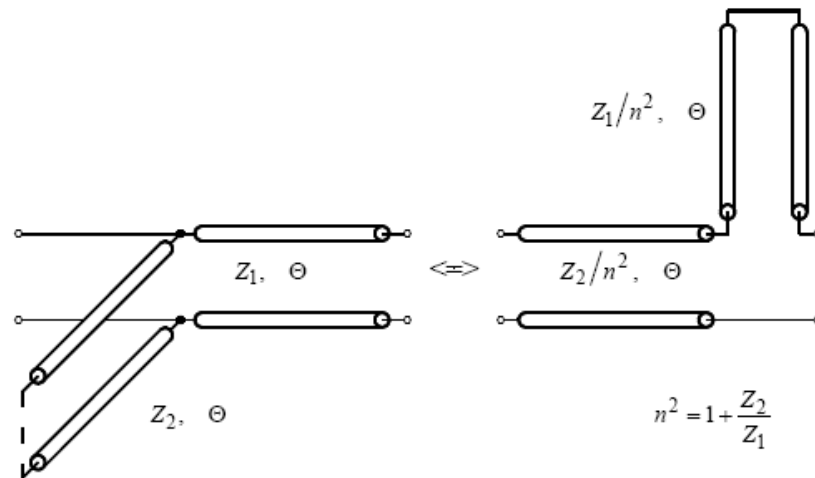
На слици 14 су дате и формуле помоћу којих се врши трансформација импеданси.

Уз Куродине идентитете се примењује став да се модули s -параметра мреже не мењају ако се приступ продужи идеалним водом чија је карактеристична импеданса једнака номиналној импеданси приступа. У првом кораку се додају водови на улаз и/или излаз дужине која одговара дужини уводника који се трансфигурише, у другом се врши трансфигурација.

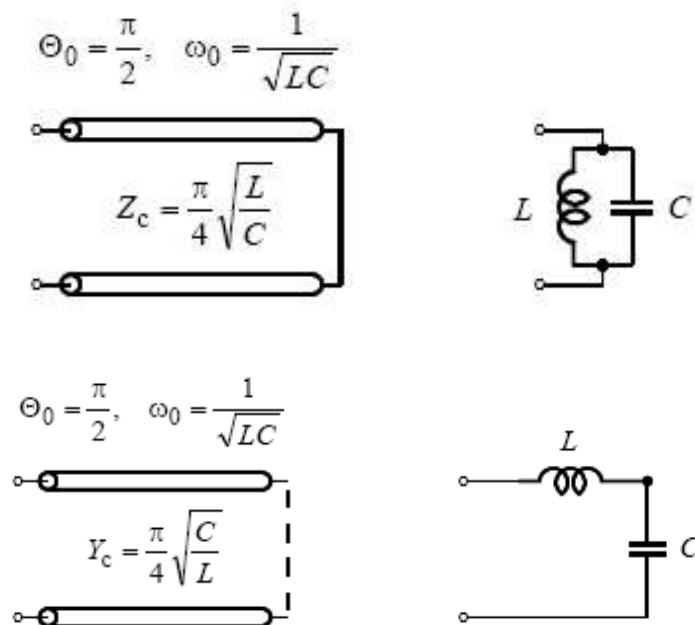
И резонантна кола се могу приближно остварити уз помоћ водова. Четвртталасни резонатор (слика 15) је одсечак идеалног вода без губитака, електричне дужине $\Theta_0 = \pi/2$ на учестаности f_0 . Кратко спојени четвртталасни резонатор се у околини ω_0 понаша као паралелно осцилаторно коло а отворени четвртталасни резонатор се понаша као редно осцилаторно коло. Полуталасни резонатор (слика 16) је одсечак идеалног вода без губитака електричне дужине $\Theta_0 = \pi$ на учестаности $\omega_0 = 2\pi f_0$. Отворени полуталасни резонатор се у околини ω_0 понаша као паралелно осцилаторно коло.



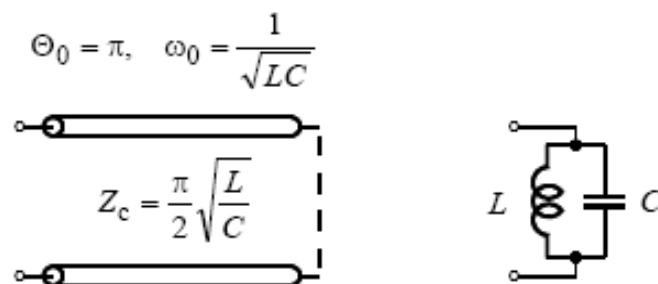
Слика 14а. Куродин идентитет. Трансформација редног кратко спојеног огранка у паралелни отворени.



Слика 14б. Куродин идентитет. Трансформација паралелног отвореног огранка у редни кратко спојени.



Слика 15. Еквиваленције четвртталасног резонатора и осцилаторних кола.



Слика 16. Еквиваленција полуталасног резонатора и осцилаторног кола.

2. Софтверска реализација синтезе филтара у MATLAB-у

2.1. Пројектни задатак

Синтеза електричних филтара се састоји од низа нумеричких прорачуна па је програм MATLAB [12] изабран као подесан алат за софтверску реализацију филтара. Развијен је софтверски пакет (MATLAB toolbox) под називом LCsinteza коме се задаје функција преноса LC лествичасте шеме са идеалним елементима филтра пропусника ниских учестаности. Сматра се да су номиналне импедансе приступа филтра сачињеног у техници водова једнаке и да им је претпостављена вредност $50\ \Omega$. Резултат извршавања пакета LCsinteza су вредности елемената шеме са идеалним елементима филтра.

Пакет LCsinteza се користи позивањем истоимене функције:

$$LCmatrica = LCsinteza(num, den)$$

где су num бројилац и den именилац функције преноса филтра који треба синтетисати (за унос полинома в. 2.2. Опис радног окружења), а LCmatrica је тродимензионална матрица која садржи резултате прорачуна филтра. Трећа димензија матрице је једнака броју различитих шема са идеалним елементима филтра. Свака врста LCmatrica-е одговара једној грани лествиче шеме са идеалним елементима филтра и вредностима елемената који чине грану кола. Излазна матрица, груписана по колонама је облика [tip, sastav, L, C], где променљива tip даје информацију о начину на који је грана повезана са остатком кола (tip=0 за редну грану, tip=1 за паралелну), променљива sastav указује на то какво је коло у одговарајућој грани (sastav=0 за индуктивност, sastav=1 за капацитивност, sastav=2 за редно LC, sastav=3 за паралелно LC коло), променљива L даје информацију о томе колику индуктивност има коло које се налази у одговарајућој грани (у Хенријима (H)), C даје информацију о томе колику капацитивност има коло које се налази у одговарајућој грани (у Фарадима (F)).

Функција треба да врши синтезу LC и микроталасних филтара на основу низа бројева (вектора) који представљају опције. Општи позив пакета LCsinteza је:

$$LCmatrica = LCsinteza(num, den, optio)$$

где је optio вектор (низ) опција. Приказано са проширеним излазом, тј. излазом који обухвата и микроталасну реализацију водова и целобројни показатељ грешке, позив функције LCsinteza је:

$$[LCmatrica, MTmatrica, ier] = LCsinteza(num, den, Z0, ispis, Rg, Rp, MTf)$$

где су опције: (1) Z0, где је Z0 номинална импеданса водова, (2) ispis, а ispis=0 када нема исписивања резултата у излазну датотеку, или ispis=1 када се врши исписивање резултата у излазну датотеку чије се име формира на основу датума и времена покретања пакета LCsinteza, (3) Rg отпорност генератора у Омима (Ω), (4) Rp отпорност потрошача у Омима (Ω) и (5) MTf аргумент који показује да ли се извршава микроталасна реализација филтра (за MTf=1 се извршава, за MTf=0 не).

На излазу су, поред променљиве LCmatrica додате и променљиве MTmatrica (представља шему са идеалним елементима филтра пропусника ниских учестаности у техници водова) и ier (представља целобројни показатељ грешке). У случају да LCsinteza има мање од два аргумента, MATLAB јавља грешку. Ако optio има више од пет аргумената MATLAB такође јавља да се догодила грешка. Аргументи су подешени тако да имају следеће почетне вредности: Z0=50, ispis=0, Rg=1, Rp=1 и MTf=0.

Предвиђено је да Rg и Rp морају бити једнаки, осим када је отпорност генератора једнака нули. Одабрано је да калемови и кондензатори буду идеални и да се користи напонски извор. Шему филтра са идеалним елементима је могуће прорачунати на више начина па се стога може добити више различитих LC кола за исту спецификацију филтра.

2.2. Опис радног окружења

За прављење програмског пакета LCsinteza одабран је MATLAB, а за развој алгоритама у општим бројевима као и нумеричку проверу коришћен је програм *Mathematica*. Наведена окружења нуде велике библиотеке математичких функција и могућност рада са произвољном тачношћу.

Најпре је потребно осврнути се на неке од особина MATLAB-а. За све алгоритме који су овде имплементирани, основа је нумерички рад рачунара, а не симболички. Такав избор има своје предности и своје мане. Главна предност је у брзини прорачуна. Наиме, прорачун који се врши нумерички, у највећем броју случајева се брже извршава од симболичног. Изузетак је када се употреби велики број `for` петљи, које могу знатно да успоре MATLAB. Мана може бити непрецизност што ће касније бити детаљно анализирано. Прорачун који се врши симболички коришћењем података типа стринг (`string`) за нумеричка прорачунавања може бити неупоредиво прецизнији од нумеричког.

MATLAB без симболичног пакета (`toolbox-a`) записује бројеве у бинарном формату од 64 цифре (8 бајта) и софтверски пакет LCsinteza користи управо овакав запис бројева. Аритметика коју пружа симболички пакет се не користи зато што се планира софтверска реализација развијених алгоритама у другим програмским језицима који немају аритметику произвољне тачности. Број бајтова којим се представља нумерички податак је веома битан за прорачун филтара што се одражава на прецизност прорачуна међурезултата. У овом раду се, стога, посебно истичу проблеми добијања највећег могућег броја тачних цифара вредности елемената.

У нумеричком прорачуну филтара, као једно од главних питања намеће се следеће: Колику максималну тачност међурезултата је могуће постићи? Код MATLAB-а, када се прорачуни врше нумерички, тачност записивања бројева и тачност појединачних функција (`sin`, `cos`, `log` ...) је реда величине 10^{-15} . На први поглед се може учинити да је ова тачност сасвим довољна за апсолутно све прорачуне филтара. Међутим, код филтара високог реда (на пример, једанаестог), наведена тачност може бити недовољна због знатног нагомилавања грешке у току прорачуна.

Програм MATLAB записује полиноме помоћу низова тако што први елемент низа представља коефицијент полинома уз највиши степен. У програму *Mathematica* се коефицијенти полинома наводе обрнутим редом у односу на MATLAB. На пример, низ `[0 0 1.56 1.2 2 1]` у MATLAB-у представља полином $0 \cdot x^5 + 0 \cdot x^4 + 1.56x^3 + 1.2x^2 + 2 \cdot x^1 + 1 = 1.56x^3 + 1.2x^2 + 2 \cdot x^1 + 1$, док се исти полином записује у програму *Mathematica* као $1 + 2 \cdot x^1 + 1.2 \cdot x^2 + 1.56 \cdot x^3 + 0 \cdot x^4 + 0 \cdot x^5 = 1 + 2 \cdot x^1 + 1.2 \cdot x^2 + 1.56 \cdot x^3$

Једна од погодности коју нуди MATLAB за развој алгоритама је постојање радног простора (`Workspace`) за приказивање коришћених променљивих. То је посебно значајно при откривању грешака, на пример, при коришћењу `for` петљи и за надгледање међурезултата.

Петља као програмска конструкција за итерацију (било да је `for` или `while`) у MATLAB-у се обично користи када је алгоритам немогуће кодovati преко матричних операција, односно операција на низовима као променљивима. За разлику од традиционалних паскалоидних програма као што су Паскал (`Pascal`), Фортран (`Fortran`) или С (`programming language C`), MATLAB је оптимизован за рад са матрицама па се препоручује избегавање петљи где год је то могуће. Синтеза филтара се одвија у коначном броју алгоритамских корака па је брзина одговарајућег софтверског решења синтезе на савременим рачунарима толика да је просечно трајање извршења програма за синтезу мање од минута.

2.3. Развијање програмских функција

MATLAB омогућава да је функције које имају више излазних променљивих, могуће позивати тако што се, у позиву функције, као излазна променљива наведе само један параметар, а осталим променљивама се придружује препрограмирана вредност или им се не придружи никаква вредност. Из тог разлога су функције које на излазу имају две променљиве а једна од те две променљиве је целобројни показатељ грешке, писане тако да се показатељ грешке увек појави као други излаз. Разлог томе је краће записивање функције у случају када није потребно посматрати број који представља показатељ грешке. Са друге стране, неке функције са више од две излазне променљиве које су посебно писане за овај програм, а наменом нису предвиђене за употребу у неком другом програмском систему, су писане тако да се извештај о грешци појављује као прва излазна променљива. Разлог оваквог записа лежи у томе што су те функције током прављења програмског система тестиране на грешке, па је при тим тестовима било неопходно првенствено анализирати код грешке а не нумерички резултат. У целом програмском систему се посматрање грешака

врши само на улазу података (мисли се на контролу грешака коју уводи програмер). У случају да ипак дође до неких непредвиђених грешки, MATLAB ће приказати своје поруке о грешци.

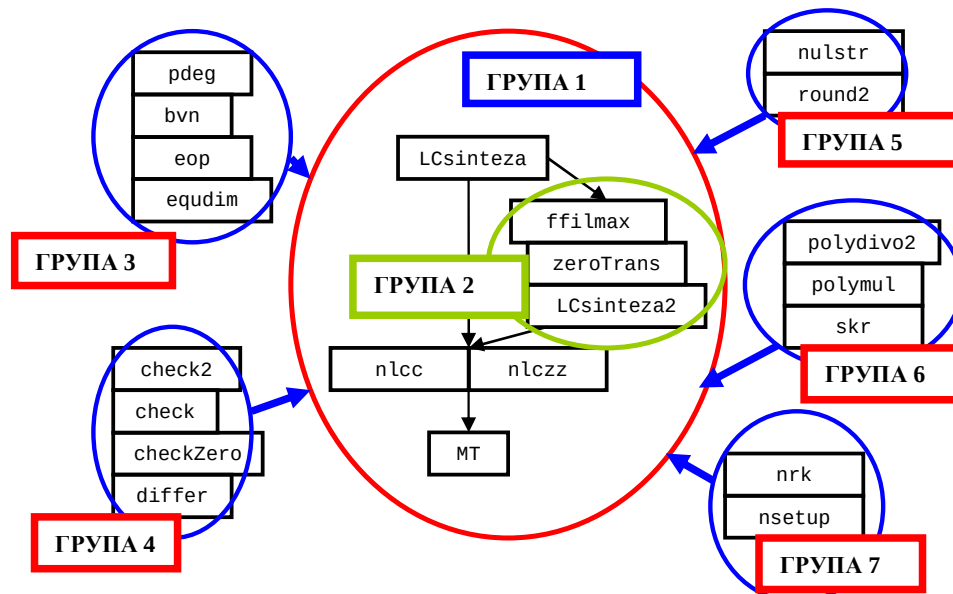
У литератури постоје детаљни примери и теоријска објашњења синтезе филтара. У MATLAB-у не постоје уграђене функције ни пакети за синтезу лествичастих филтара па је било неопходно развити оригиналне функције које одређују LC шему са идеалним елементима из функције преноса филтра.

Непосредно пре писања кода у MATLAB-у, сви алгоритми су проверени у програму *Mathematica* да би се омогућило разумевање алгоритама за синтезу филтара. Већ у првој фази развоја пакета (програмирање и тестирање) уочено је да се код појединих међурезултата губе тачне цифре. Због тога су на самом почетку развијане функције за смањивање губитака тачних цифара. Као упоредни програм за тестирање пакета LCsinteza коришћен је професионални, комерцијални програм Filter Solutions.

Основни задатак пакета LCsinteza је (в. одељак 2.1. Пројектни задатак) одредити реализацију филтра на основу функције преноса, у најопштијем случају. Пакет се не бави одређивањем функције преноса. Сходно томе, у свим случајевима се примењује општи поступак синтезе за одређивање елемената и не користе се познате формуле изведене за Батервортову и Чебишевљеву апроксимацију.

Циљ ове тезе је нумеричко језгро за синтезу филтара па се из тог разлога не посвећује пажња провери улазних података. Кориснички интерфејс и друге функције су остављене за будућа истраживања и развој. Очекује се да корисник пакета LCsinteza у потребној мери познаје теорију филтара и да као улазни податак задаје исправне функције преноса.

Програмски пакет LCsinteza се састоји од 22 функције које су организоване као што је приказано на слици 17.



Слика 17. Организациона шема пакета LCsinteza.

Функције које припадају групи 1 чине језгро програмског система и директно учествују у синтези LC мреже. Стрелице црне боје приказују хијерархијски однос (да би се позвала nlcc прво се мора проћи кроз LCsinteza)

Група 2 представља скуп функција које раде са филтрима парног реда. Група 2 је предвиђена за извршавање трансформација коефицијента рефлексije филтра. Сматра се подгрупом групе 1 јер се у пракси чешће користе филтри непарног реда тако да би цео пакет LCsinteza могао да задовољи већину захтева корисника не користећи групу 2.

Структурне манипулације коефицијентима полинома, третираних као низ, извршавају функције групе 3 (на пример, ако низ који представља коефицијенте полинома поседује водеће нуле, функција bvn их уклања, чиме се низ ефективно скраћује). Битно је уочити да иако функције наведене групе врше обраде полинома, оне не раде никакве нумеричке апроксимације.

Провере валидности и неких особина међурезултата врше функције из групе 4. На пример, функција check испитује да ли је могуће извршити синтезу филтра користећи одређену имитансу, док функција checkZero врши проверу нула помоћне функције $K_1(s)$, која је дефинисана у одељку 1.4.2. Двоструко затворена мрежа, израз (61).

Заокруживање бројева на произвољан број цифара се врши уз помоћ функција из групе 5.

Нумеричка обрада полинома се обавља функцијама из групе 6. Уз помоћ наведене групе, врши се скраћивање полинома, множење полинома и дељење полинома квадратним триномом.

Функције које имплементирају неке од алгоритама који су специфични за пројектовање филтара а који се односе на обраду низова нула полинома су у групи 7 (нпр. `nrk` групише комплексне нуле које се јављају у квадриполима).

Групе означене плавом бојом не учествују непосредно у синтези и опслужују функције групе 1 и групе 2.

2.3.1. Опис коришћених функција

Све функције које су саставни део пакета `LCsinteza`, биће сажето описане у даљем тексту. Функције ће бити наведене у абecedном реду. Коришћене функције су:

- `bvn` – функција скраћује улазни низ са леве стране уклањањем водећих нула тако да први елемент буде различит од нуле. Ова функција се користи за сређивање коефицијената полинома тако што се први члан низа коефицијената уклања ако је једнак нули, а поступак се наставља док се не дође до коефицијента који је различит од нуле. Функција `bvn` се користи као припрема полинома за одређивање резидуума. Синтакса позива функције је

$$[p, ier] = bvn(q)$$

где је `q` улазни низ који представља коефицијенте полинома, `p` излазни низ који представља коефицијенте полинома, `ier` целобројни показатељ грешке. Ако нема грешке `ier=0`, а `ier=9` ако је грешка откривена, тј. у случају да низ `q` нема ненултих чланова.

- `check2` – проверава елементе тродимензионалног низа `LCmatrica` у коме се чувају вредности капацитивности и индуктивности свих пронађених шема филтра са идеалним елементима. Две матрице елемената се сматрају истим ако је релативна грешка разлике елемената по модулу мања од 5%. Синтакса позива функције је

$$flag = check2(LCmatrica, k, m)$$

где је улаз `LCmatrica` која представља тродимензионални низ бројева, тј. скуп матрица у којима се записују вредности елемената шеме са идеалним елементима и димензије `k` и `m` које су целобројне ознаке матрица шема са идеалним елементима. Променљиве `k` и `m` могу имати целобројне вредности: 1, 2, 3 или 4. Излаз је целобројна логичка променљива која има вредности 1 или 0. Вредност `flag=1` значи да се матрице шема са идеалним елементима сматрају једнаким, а `flag=0` значи да су матрице различите.

- `check` – проверава да ли је рационална функција остварљива имитанса, испитујући паран и непаран део бројиоца и имениоца. Синтакса позива функције је

$$flag = check[denEven, denOdd, numEven, numOdd, impadm, form]$$

где улазни подаци `denEven`, `denOdd`, `numEven`, `numOdd` представљају парни (Even) и непарни (Odd) део бројиоца (`num`) и имениоца (`den`) рационалне функције имитансе (једначине (65) и (66)). Улазној променљивој `impadm` се може доделити вредност 1, за случај да је рационална функција импеданса филтра или вредност 0, у случају да је рационална функција адмитанса. Аргументу `form` се могу доделити вредности 1, 2, 3 или 4, што је одређено формирањем имитансе (једначине (65) и (66)). Излазна променљива `flag` добија вредност 1 ако је рационална функција остварљива имитанса мреже филтра, а `flag=0` у случају да рационална функција није остварљива имитанса мреже филтра.

- `checkZero` – функција је намењена провери нула функције $K_1(s)$ при прорачуну филтара чији потрошач и генератор имају једнаке вредности отпорности. Неопходно ју је активирати после нумеричке обраде нула функције $K_1(s)$, за шта је предвиђена функција `nsetup`. Синтакса при позиву је:

$$flag = checkZero(nule)$$

где се на улазу јавља низ нула назван `nule` (низ, не полином!). Излаз је логичка променљива `flag`, којој се додељује вредност 1 ако су нуле валидне, или 0 ако нуле нису валидне. У случају да нуле нису валидне, тј. да је низ нула дужине која је непаран број, извршавање програма се прекида приказујући поруку о грешци. У случају да број комплексних нула није дељив са 4, или да елементи низа нула нису у складу са изложеном теоријом у одељку 1.4.2. и одељку Пример 3, програм приказује упозорење (WARNING) и додељује вредност нула излазној променљивој `flag`.

- `differ` – спада у помоћне функције које служе да испитају нумеричку грешку као последицу дискретног нумеричког записа бројева. Намена функције је да испита да ли је однос апсолутне вредности полуразлике апсолутних вредности и аритметичке средине два броја мањи од нумеричке вредности задате у процентима. Предвиђена је заштита од могућих сингуларних услова који се могу јавити при израчунавању односа два броја. Синтакса позива функције је:

$$\text{flag} = \text{differ}(n1, n2, p)$$

где су улазни аргументи први број ($n1$), други број ($n2$) и задати проценат (p). Излазни податак је логичка променљива `flag` којој се придружује вредност 1 у случају да однос горе наведених величина мањи или једнак вредности која представља проценте. У супротном, `flag=0`. У случају да је бар један број који се упоређује мањи од 10^{tol} (в. 2.4.1. Глобални параметар `tol`), функција не врши прорачун и даје резултат `flag=0`. Ово је веома битно, јер се избором глобалне променљиве `tol` утиче на максималан број значајних цифара међурезултата.

- `eop` – функција рачуна парни и непарни део полинома. Синтакса позива је:

$$[\text{ier}, \text{pEven}, \text{pOdd}] = \text{eop}(p, d)$$

где су улазни подаци полином (p) и дужина низа (d) на коју је могуће поставити излазне полиноме. На излазу се јављају показатељ грешке `ier` и два полинома, парни део улазног полинома `pEven` и непарни део улазног полинома `pOdd`. Полиноми на излазу могу бити исте дужине као и улазни полином, или дужи ако је параметар d већи од дужине улазног полинома. Ако је d мање од дужине улазног полинома, функција наставља обраду занемарујући тај податак. Програм даје поруку о грешци и прекида рад ако је d једнак нули или ако је низ p празан и у том случају је `ier=15`. Ако грешка није откривена, `ier=0`.

- `equdim` – функција врши изједначавање дужина улазних полинома додавањем водећих нула (са леве стране (на почетак) низа) чиме се вредност полинома не мења. Синтакса позива је:

$$[\text{pOut1}, \text{pOut2}, \text{ier}] = \text{equdim}(\text{pIn1}, \text{pIn2})$$

где су `pIn1` и `pIn2` улазни полиноми, а на излазу се јављају полиноми `pOut1` и `pOut2` који су исте дужине. Излазни параметар је и целобројни показатељ грешке `ier`. У случају да је бар један од улазних полинома празан низ, испишује се порука о грешци, прекида рад програма и показатељ грешке добија вредност 13. У случају да никаква грешка није откривена, `ier=0`.

- `ffilmax` – функција се употребљава за проналажење нула коефицијента рефлексije филтра и користи се у случају да је потребно синтетисати неки од филтара парног реда где се врши трансформација нула и полова коефицијента рефлексije. У функцији `ffilmax` је имплементирано неколико алгоритама за нумеричку обраду међурезултата. Нумерички остетљив део кода је онај у коме се користе функције за обраду скупова, па се у случају неуспелих обрада реалних бројева могу јавити грешке. Ипак, проблеми са овим делом кода нису уочени током тестирања програма. Синтакса позива је:

$$[\text{maxniz}] = \text{ffilmax}(\text{num}, \text{den})$$

где се на улазу јављају бројилац и именилац функције мреже (`num` и `den`, респективно) а на излазу је растући низ нула коефицијента рефлексije који одговара филтру чија је функција мреже на улазу.

- `LCsinteza2`, `LCsinteza`, `MT`, `nlcc`, `nlcz` – биће детаљно објашњене у даљем тексту; функције које имплементирају у теоријском уводу представљене алгоритме синтезе филтара.

- `nrk` – функција која обезбеђује груписање нула помоћне функције $K_1(s)$ за даљу обраду (в. 1.4.2.). Груписање нула се врши без обзира на поредак нула у улазном низу. Синтакса позива функције је:

$$[\text{ier}, \text{nuLP}, \text{nuLN}] = \text{nrk}(\text{nule})$$

где је на улазу низ (`nule`) чији елементи представљају решења једначине $K_1(s)=0$. Као излаз се јављају целобројни показатељ грешке (`ier`) и два низа нула, један је са ненегативним (`nuLP`) а други са непозитивним (`nuLN`) реалним деловима елемената. У случају да је низ нула на улазу празан или да је дужина низа на улазу непаран број `ier=15`, а `ier=0` у случају да нема грешке.

- `nsetup` – функција врши нумеричку припрему нула функције $K_1(s)$ (одељак 1.4.2.) за даљу обраду. Ово је функција у којој се врше провера и усредњавање међурезултата због смањења нумеричких грешака. Провера и усредњавање нула које су блиске по вредности се врши да би програм добијене међурезултате, у даљој логичкој обради могао да раздвоји и проследи на даље прорачуне. При релативно високом реду филтра, у овој функцији се може приметити нумеричка осетљивост. Синтакса позива је:

$$[\text{nulls}] = \text{nsetup}(\text{nule})$$

где је улаз низ нула (nule) добијен помоћу функције која је уграђена у MATLAB, а излаз је нумерички обрађени низ нула (nulls). Порука о грешци се исписује у командном прозору MATLAB-а када је улазни низ празан или ако је улазни низ дужине која је непаран број.

- `nulstr` – функција која је настала у почетној фази развоја програма а касније је потиснута употребом функције `round2`. Врши заокруживање бројева (реалног и имагинарног дела броја) ка нули. Потпуно се може заменити функцијом `round2` која није ограничена само на бројеве који су блиски нули. Синтакса позива је:

$$[po, ier] = nulstr(p, tol)$$

где је улазни податак који је неопходно унети `p`, број који треба заокружити ка нули. Податак који се произвољно уноси је `tol` (толеранција). На излазу се јавља број добијен апроксимацијом (`po`) и показатељ грешке `ier`. Ако је дужина улазног низа 0 или ако су унета више од два улазна аргумента `ier=11`, а `ier=0` у случају да нема грешке.

- `pdeg` – функција рачуна степен полинома који је представљен као низ бројева (в. одељак 2. Софтверска реализација синтезе филтара у MATLAB-у). Синтакса позива је:

$$[d, ier] = pdeg(p)$$

где је улаз полином `p`, а на излазу се јављају степен полинома (`d`) и показатељ грешке (`ier`) који су целобројни подаци. Ако се на улазу појави низ (полином) дужине нула `ier=7`, а `ier=0` у случају да нема грешке.

- `polydivo2` – функција се користи за дељење полинома квадратним триномом. Синтакса позива је:

$$[ier, w, r, normdenorm] = polydivo2(num, den)$$

где се на улазу јављају дељеник и делилац (`num` и `den`, респективно) а на излазу се јављају показатељ грешке, дељеник остатка, количник без остатка и ознака да ли је делилац нормализован (`ier`, `w`, `r`, `normdenorm`, респективно). Функција захтева да улазни низови (који представљају полиноме) буду једнаких дужина без обзира што полиноми који учествују у дељењу могу бити драстично различитих степена. Ако улазни низови нису матрице-врсте или ако делилац није квадратни трином функција `ier=8` и таква ситуација се пријављује као грешка. Ако грешка није откривена `ier=0`.

- `polymul` – функција множи два полинома. Синтакса позива је:

$$[p, ier] = polymul(p1, p2)$$

где се као улаз јављају полиноми `p1` и `p2` а као излаз полином `p` који је резултат множења улазних полинома и показатељ грешке. Грешка се јавља ако је бар један улазни низ (који представља полином) дужине 0 и тада је `ier=7`, а `ier=0` ако нема грешке.

- `round2` – се користи за заокруживање бројева користећи толеранцију која је представљена као цео број који показује колико значајних цифара је потребно. Синтакса позива функције је:

$$po = round2(p, tol)$$

где је на улазу нумерички параметар који се заокружује (`p`) и број значајних цифара после децималне тачке (`tol`). Параметар `tol` се може унети као празна матрица и у том случају му се додељује предефинисана вредност `tol=4`. На излазу се јавља `po`, заокружени број.

- `skr` – функција врши скраћивање бројиоца и имениоца праве, рационалне функције. При имплементацији алгорита за синтезу филтара, да би се избегао прорачун елемента из последње итерације (првог елемента до генератора) позива се ова функција која је развијена тако да пронађе сличне нуле (што значи да су у функцији имплементирани алгоритми за нумеричку обраду међурезултата) и да их изостави из бројиоца и имениоца. Синтакса позива је:

$$[numS, denS, ier] = skr(num, den)$$

где се на улазу јављају бројилац (`num`) и именилац (`den`) праве, рационалне функције, који представљају полиноме које треба скратити, а као излаз скраћени полиноми бројиоца (`numS`) и имениоца (`denS`) и показатељ грешке (`ier`). Толеранција избора сличности нула се подешава унутар функције, аутоматски, на основу глобалне променљиве `tto1`. У случају да је бар један улазни низ (који представља полином) дужине 0, `ier=10`, а `ier=0` у случају да грешка није откривена.

- `zeroTransf` – функција врши трансформацију нула и полова према формулама које су наведене у програму Filter Solutions (Help Topics: Filter Solutions Help Guide):

$$s' = \sqrt{\frac{s^2 + \omega_r^2}{1 - \omega_r^2}}, \quad (97)$$

$$s' = \sqrt{\frac{(\omega_t^2 - 1)s^2}{\omega_t^2 + s^2}}, \quad (98)$$

где ознаке наведене у једначинама (97) и (98) имају следеће значење: s је нетрансформисана комплексна учестаност, s' је комплексна учестаност после трансформације, ω_r и ω_t су најнижа и највиша нула коефицијента рефлексије, респективно. Због немогућности имплементације парног реда неких LC филтара, потребно је извршити трансформацију нула и полова и то такву да се први пол коефицијента рефлексије помери у тачку 0 по фреквенцији према једначини (97), а највиша нула коефицијента рефлексије да се помери у бесконачност према једначини (98). Функција има алгоритме за усредњавање међурезултата. Стога није потребна никаква обрада улазних података пре позива. Синтакса позива функције је

```
[numo,deno] = zeroTransf(num,den)
```

где су на улазу полиноми који представљају бројилац (num) и именилац (den) функције мреже а на излазу су трансформисани полиноми бројилоца (num) и имениоца (den) функције мреже.

2.3.2. Функција LCsinteza

Функција LCsinteza је једина функција коју треба позвати за одређивање шеме са идеалним елементима филтра. За корисника је само она важна и може се позвати из командног прозора (MATLAB Command Window) или из скрипт (script) датотеке. Из дате функције преноса, функција LCsinteza одређује капацитивности и индуктивности елемената лествичасте шеме са идеалним елементима филтра пропусника ниских учестаности и по потреби врши прорачун водова којима се LC елементи замењују. Излазни подаци се уписују у датотеку LCsinteza.dat. Синтакса позива функције је

```
[LCmatrica,MTmatrica,ier] = LCsinteza(num,den)
```

или

```
[LCmatrica,MTmatrica,ier] = LCsinteza(num,den,optio)
```

или

```
[LCmatrica,MTmatrica,ier] = LCsinteza(num,den,Z0,ispis,Rg,R0,MTf)
```

где су обавезни улазни подаци једнодимензионални низ num (који представља бројилац трансфер функције) и једнодимензионални низ den (именилац трансфер функције).

Променљива optio је једнодимензионални низ реалних бројева у коме се наводе потребне отпорности за синтезу, подешава се запис резултата у датотеку и по потреби генерише шема одговарајућег микроталасног филтра (у овом раду, то је шема филтра са идеалним секцијама водова). Низ optio је дефинисан као

```
optio = [Z0,ispis,Rg,R0,MTf]
```

Низови num и den представљају коефицијенте полинома бројилоца и имениоца трансфер функције. Први члан низа одговара коефицијенту полинома највећег степена. Последњи члан низа одговара константном члану полинома.

Номинална импеданса приступа је z_0 и претпостављена, почетна вредност (default) кој је 50Ω ако се експлицитно не наведе у низу optio. Начин записивања резултата у датотеку одређује променљива која је названа ispis. Ако ispis има вредност 0, резултати се записују у датотеку LCsinteza.dat и постојећа датотека истог имена се брише. Ако ispis има вредност 1, резултати се записују и у датотеку јединственог имена које се образује од текућег датума и времена. То име је унија стрингова "LCsinteza_", датума, слова "T" и времена формирања датотеке LCsinteza.dat (на пример: LCsinteza_20081121T165654.dat, где се из назива датотеке види да је датотека направљена 21. новембра 2008. године у 16:56:54 часова и да је приказани начин записивања времена по стандарду ISO 8601).

Отпорност генератора (R_g) се задаје у Омима (Ω). То је позитиван и реалан број, а претпостављена, почетна вредност му је 1Ω . Отпорност потрошача (R_0) се такође задаје у Омима (Ω) и представља позитиван и реалан број, а претпостављена, почетна вредност му је 1Ω .

Прорачун шеме филтра са идеалним секцијама водова се одређује помоћу променљиве MTf. Претпостављена, почетна вредност променљиве MTf је 0 и тада се не прорачунава шема филтра са идеалним секцијама водова. Ако променљива MTf има вредност 1, калемови и кондензатори се замењују огранцима идеалних водова, примењују се Куродини идентитети и прорачунава се шема одговарајућег микроталасног филтра. Шема микроталасног филтра је прилагођена техници микротракастих водова и Куродини идентитети се користе за остваривање паралелних огранака у случајевима где је то могуће.

Излазне променљиве су $LCmatrica$, $MTmatrica$ и целобројни показатељ грешке ier .

Излазна променљива $LCmatrica$ је вишедимензионални низ која садржи податке о шеми филтра са идеалним елементима. Свака врста $LCmatrica$ -е одговара једној грани лествице шеме филтра са идеалним елементима и вредностима елемената који чине грану кола. Излазна матрица има врсту облика $[tip, sastav, L, C]$, где променљива tip садржи информацију о начину на који је грана повезана са остатком кола ($tip=0$ за редну грану, $tip=1$ за паралелну), променљива $sastav$ указује на то какво је коло у одговарајућој грани ($sastav=0$ за индуктивност, $sastav=1$ за капацитивност, $sastav=2$ за редно LC, $sastav=3$ за паралелно LC коло), променљива L садржи информацију о томе колику индуктивност има коло које се налази у одговарајућој грани (у Хенријима (H)), C садржи информацију о томе колику капацитивност има коло које се налази у одговарајућој грани (у Фарадима (F)). Трећа димензија матрице је једнака броју различитих шема филтра са идеалним елементима.

Ако се не захтева шема филтра са идеалним секцијама водова, променљива $MTmatrica$ добија вредност 0. Променљива $MTmatrica$ је матрица од 5 колона и онолико врста колико врста има и улазна променљива $LCmatrica$ (тј. колико грана има LC шема са идеалним елементима). Променљива $MTmatrica$ има врсту облика $[vod, Zc, ks, eld, F0]$. Целобројна променљива vod има следеће вредности: $vod=0$ за паралелни огранак, $vod=1$ за редни огранак и $vod=3$ за одсечак вода. Реална позитивна променљива Zc представља вредност карактеристичне импедансе вода у Омима (Ω). Целобројна променљива ks има вредност 1 ако је огранак кратко спојен, вредност 0 ако је отворен или у случају одсечка вода. Реална позитивна променљива eld представља електричну дужину вода у радијанима, а $F0$ фреквенцију у Херцима (Hz) на којој се рачуна електрична дужина вода.

Шема филтра са идеалним секцијама водова се прорачунава коришћењем најједноставнијег приближног поступка који примењује једначине (92)-(96). Остварљивост карактеристичне импедансе се не проверава.

Показатељ грешке добија вредност 14 ($ier=14$) у случају да је број улазних променљивих мањи од два или већи од седам, ако бројилац и именилац нису унесени као низови-врсте, ако број нула помоћне функције $K_1(s)$ није паран или ако број имагинарних нула функције $K_1(s)$ није дељив са 4.

Нека је, на пример, дата функција преноса (99) из примера 1,

$$H(s) = \frac{0.12282667}{s^5 + 0.93682013s^4 + 1.688816s^3 + 0.97439607s^2 + 0.58053415s + 0.12282667}. \quad (99)$$

Нека су познати следећи параметри једноструко затворене мреже филтра: отпорност генератора је $R_g = 0 \Omega$, отпорност потрошача је $R_0 = 1 \Omega$, номинална импеданса је $Z_0 = 50 \Omega$. Претпоставимо још да је потребно наћи шему филтра са идеалним секцијама водова и да је све податке потребно уписати у датотеку јединственог имена (коју неће пребрисати поновно извршавање функције $LCsinteza$). За наведене параметре, позив функције $LCsinteza$ из командног прозора MATLAB-а је дат на слици 18.

Најпре се врши унос бројиоца и имениоца функције преноса у форми једнодимензионалних низова коефицијената полинома. Затим се, по потреби дефинишу елементи низа $optio$. На крају је могуће функцију $LCsinteza$ позвати из командног прозора MATLAB-а (слика 18).

Аналогно, из командног прозора MATLAB-а, се функција $LCsinteza$ може позвати за сваки, у раду наведени, пример.

```
>> num=[0.12282667];
>> den=[1 0.93682013 1.688816 0.97439607 0.58053415 0.12282667];
>>
>> Z0=50; ispis=1;
>>
>> Rg=0; R0=1; MTf=1;
>>
>> [LCmatrica, MTmatrica, ier]=LCsinteza(num, den, Z0, ispis, Rg, R0, MTf);
```

Слика 18. Позив функције $LCsinteza$ из командног прозора MATLAB-а.

Претпоставимо да је потребно синтетисати LC мрежу чија је функција преноса (100) из примера 2,

$$H(s) = \frac{0.62085963s^2 + 0.8507724}{s^3 + 1.0114629s^2 + 1.2018049s + 0.8507724}. \quad (100)$$

Нека је су познати следећи параметри једноструко затворене мреже филтра: отпорност генератора је $R_g = 0 \Omega$, отпорност потрошача је $R_0 = 1 \Omega$, номинална импеданса је $Z_0 = 50 \Omega$. Претпоставимо да је потребно наћи микроталасну реализацију филтра и да је све податке потребно уписати у јединствену

датотеку. За наведене параметре, позив функције `LCsinteza` из командног прозора MATLAB-a је дат на слици 19.

```
>> num=[0.62085963 0 0.8507724];
>> den=[1 1.0114629 1.2018049 0.8507724];
>>
>> Z0=50; ispis=1;
>>
>> Rg=0; R0=1; MTf=1;
>>
>> [LCmatrica,MTmatrica,ier]=LCsinteza(num,den,Z0,ispis,Rg,R0,MTf);
```

Слика 19. Позив функције `LCsinteza` из командног прозора MATLAB-a.

Синтезишимо филтар чија је функција преноса (101) претходно наведена у примеру 3,

$$H(s) = \frac{0.62085963s^2 + 0.8507724}{s^3 + 1.0114629s^2 + 1.2018049s + 0.8507724}. \quad (101)$$

Нека су познати следећи параметри двоструко затворене мреже филтра: отпорност генератора је $R_g = 1\Omega$, отпорност потрошача је $R_0 = 1\Omega$, номинална импеданса је $Z_0 = 50\Omega$. Претпоставимо да је потребно наћи микроталасну реализацију филтра и да је све податке потребно уписати у јединствену датотеку. За наведене параметре, позив функције `LCsinteza` из командног прозора MATLAB-a је дат на слици 20.

```
>> num=[0.62085963 0 0.8507724];
>> den=[1 1.0114629 1.2018049 0.8507724];
>>
>> Z0=50; ispis=1;
>>
>> Rg=0; R0=1; MTf=1;
>>
>> [LCmatrica,MTmatrica,ier]=LCsinteza(num,den,Z0,ispis,Rg,R0,MTf);
```

Слика 20. Позив функције `LCsinteza` из командног прозора MATLAB-a.

Функција `LCsinteza` прво препознаје степен функције мреже филтра, на основу тога даје препоруку за број тачних цифара унешених коефицијената полинома и аутоматски подешава толеранцију (в. одељак 2.4.1. Глобална променљива `ttol`), тј. приказује потребан број значајних цифара за остваривање тачног прорачуна и даје такву препоруку да корисник може при поновном стартовању програма да повећа број значајних цифара. Иста препорука се појављује и при провери нула функције $K_1(s)$, после коришћења функције `checkZero`, ако се нуле препознају као неупотребљиве за даљи прорачун. Током коришћења функције, јавља се неколико упозорења (WARNING-a). Једно од њих се јавља после провере броја значајних цифара које се користе при представљању функције мреже филтра (превелика захтевана прецизност може да поремети алгоритме усредњавања и да деградира тачност прорачуна).

На основу унесених отпорности генератора и потрошача, врши се одабир да ли функција `LCsinteza` синтезише филтар који је једноструко или двоструко затворен. Даље се позивају помоћне функције, извршавају алгоритми провере који су уграђени у функцију и алгоритми припреме улазних података који се прослеђују осталим функцијама. На крају се по потреби врши уписивање резултата у излазну датотеку и извршавање прорачуна шеме са идеалним секцијама водова.

Ако се у шеми са идеалним секцијама водова јаве резонатори, у командном прозору се исписује обавештење да је потребно оптимизовати дужине водова. За примену Куродиних идентитета на микроталасне филтре који имају више од три елемента даје се обавештење да су идентитети примењени само на водове који су непосредно повезани са приступима. Потребно је напоменути да функција `LCsinteza` броји уназад. То значи да је редослед записа L и C елемената такав, да први ред у LC матрици представља елемент који је први до потрошача. У последњем реду LC матрице су подаци о првом елементу до генератора. У случају да за двоструко затворену мрежу програм прорачуна само једну матрицу LC елемената (матрица која у MATLAB-у нема трећу димензију) функција `LCsinteza` даје упозорење да је резултат нумерички потенцијално нестабилан.

2.3.3. Функција `LCsinteza2`

Ова функција синтезише филтре парног реда. За разлику од функције `LCsinteza`, функција `LCsinteza2` примењује трансформацију нула и полова коефицијента рефлексије да би се добила остварљива функција мреже. Функција `LCsinteza2` се извршава у оквиру функције `LCsinteza` и није намењена за самостално

коришћење. Разлог прављења функције `LCsinteza2` је избегавање подешавања која би била неопходна да `LCsinteza` позива саму себе у случају синтезе филтара парног реда. Синтакса позива функције је:

```
[LCmatrica,MTmatrica,ier] = LCsinteza2(num,den,optio)
```

или,

```
[LCmatrica,MTmatrica,ier] = LCsinteza2(num,den,Z0,ispis)
```

или,

```
[LCmatrica,MTmatrica,ier] = LCsinteza2(num,den,Z0,ispis,Rg,R0,MTf,chebFil)
```

где су обавезни улазни подаци једнодимензионални низ `num` (који представља бројилац трансфер функције), једнодимензионални низ `den` (именилац трансфер функције) и параметри `Z0` (номинална импеданса приступа код шеме филтра са идеалним секцијама водова) и `ispis` (одређује начин записивања резултата у датотеке).

Променљива `optio` је једнодимензионални низ у коме се наводе потребне отпорности за синтезу, подешава се упис резултата у датотеку, по потреби генерише шема филтра са идеалним секцијама водова и прослеђује информација да ли се врши синтеза Чебишевљевог филтра. Низ `optio` је дефинисан као

```
optio = [Z0,ispis,Rg,R0,MTf,chebFil]
```

Низови `num` и `den` представљају коефицијенте полинома бројилоца и имениоца трансфер функције. Први члан низа одговара коефицијенту полинома највећег степена. Последњи члан одговара константном сабирку полинома.

Номинална импеданса приступа која се користи код реализације филтра са одсечцима водова је `Z0` и она се мора унети као улазни податак при позивању функције `LCsinteza2`. Друга променљива која се мора унети при позиву функције `LCsinteza2` је `ispis` и она одређује начин записивања резултата у датотеку. Ако `ispis` има вредност 0, резултати се записују у датотеку `LCsinteza.dat` и постојећа датотека истог имена се брише. Ако `ispis` има вредност 1, резултати се записују и у датотеку јединственог имена које се образује од текућег датума и времена. То име је унија стрингова "LCsinteza_", датума, слова "Т" и времена формирања датотеке `LCsinteza.dat` (на пример: `LCsinteza_20081121T165654.dat`, где се из назива датотеке види да је датотека направљена 21. новембра 2008. године у 16:56:54 часова и да је приказани начин записивања времена по стандарду ISO 8601).

Отпорност генератора (R_g) се задаје у Омима (Ω). То је позитиван и реалан број, а претпостављена, почетна вредност му је 1Ω . Отпорност потрошача (R_0) се такође задаје у Омима (Ω) и представља позитиван и реалан број, а претпостављена, почетна вредност му је 1Ω .

Прорачун шеме филтра од идеалних секција водова одређује се помоћу променљиве `MTf`. Претпостављена, почетна вредност променљиве `MTf` је 0 и тада се не прорачунава шема филтра са идеалним секцијама водова. Ако променљива `MTf` има вредност 1, калемови и кондензатори се замењују огранцима идеалних водова, примењују се Куродини идентитети и прорачунава се шема филтра од идеалних секција водова која је прилагођена техници микротракастих водова и Куродини идентитети се користе за остваривање паралелних огранака у случајевима где је то могуће.

Улазни аргумент `chebFil` представља информацију о томе да ли се обрађује Чебишевљев филтар парног реда о чему програм одлучује аутоматски, на основу коефицијената полинома функције мреже. Вредност `chebFil=1` у случају да се синтетише Чебишевљев филтар парног реда, а у супротном је `chebFil=0`.

Излазне променљиве су `LCmatrica`, `MTmatrica` и целобројни показатељ грешке `ier`.

Променљива `LCmatrica` је вишедимензионални низ која садржи податке о шеми са идеалним елементима филтра. Свака врста `LCmatrica`-е одговара једној грани лествице шеме са идеалним елементима филтра и вредностима елемената који чине грану кола. Излазна матрица има врсту облика `[tip, sastav, L, C]`, где променљива `tip` садржи информацију о начину на који је грана повезана са остатком кола (`tip=0` за редну грану, `tip=1` за паралелну), променљива `sastav` указује на то какво је коло у одговарајућој грани (`sastav=0` за индуктивност, `sastav=1` за капацитивност, `sastav=2` за редно LC, `sastav=3` за паралелно LC коло), променљива `L` садржи информацију о томе колику индуктивност има коло које се налази у одговарајућој грани (у Хенријима (H)), `C` садржи информацију о томе колику капацитивност има коло које се налази у одговарајућој грани (у Фарадима (F)). Трећа димензија матрице је једнака броју различитих шема филтра са идеалним елементима.

Ако се не захтева шема филтра са идеалним секцијама водова, променљива `MTmatrica` добија вредност 0. Променљива `MTmatrica` је матрица од 5 колона и онолико врста колико врста има и улазна променљива `LCmatrica` (тј. колико грана има LC реализација филтра). Променљива `MTmatrica` има врсту облика `[vod, Zc, ks, eld, F0]`. целобројна променљива `vod` има следеће вредности: `vod=0` за паралелни огранак, `vod=1` за редни огранак и `vod=3` за одсечак вода. Реална позитивна променљива `Zc` представља вредност карактеристичне импедансе вода у Омима (Ω). Целобројна променљива `ks` има вредност 1 ако је огранак кратко спојен, вредност 0 ако је отворен или у случају одсечка вода. Реална позитивна променљива `eld`

представља електричну дужину вода у радијанима, а F_0 фреквенцију у Херцима (Hz) на којој се рачуна електрична дужина вода.

Оваква матрица је резултат прорачуна коришћењем формула које су дате у затвореној форми у једначинама (92) и (96). То је посебно значајно јер се разматрају елементи на високим фреквенцијама који су расподељени па је, у пракси неопходно добијене резултате оптимизовати у неком од софтверских алата за тродимензионалну ЕМ анализу.

Показатељ грешке добија вредност 14 ($ier=14$) у случају да је број улазних променљивих мањи од два или већи од седам, ако бројилац и именилац нису унесени као низови-врсте, ако број нула помоћне функције $K_1(s)$ није паран или ако број имагинарних нула функције $K_1(s)$ није дељив са 4.

Ток извршавања функције `lcsintezaz` је сличан току извршавања функције `lcsintezaz`: позивају се помоћне функције, извршавају алгоритми провере који су уграђени у функцију и алгоритми припреме улазних података који се прослеђују осталим функцијама. На крају се по потреби врши уписивање резултата у излазну датотеку и извршавање прорачуна шеме филтра са идеалним секцијама водова.

Ако се у шеми филтра са идеалним секцијама водова јаве осцилаторна кола, у командном прозору се исписује обавештење да је потребно оптимизовати дужине водова. За примену Куродиних идентитета на микроталасне филтре који имају више од три елемента даје се обавештење да су идентитети примењени само на завршне делове филтра. Потребно је напоменути да функција `lcsintezaz` броји уназад. То значи да је редослед записа L и C елемената такав, да први ред у LC матрици представља елемент који је први до потрошача. У последњем реду LC матрице су подаци о првом елементу до генератора.

2.3.4. Функција `nlcc`

Намена функције је реализација LC мреже на основу функције мреже која има комплексне нуле. Ова функција се користи и за двоструко и за једноструко затворене мреже. Разлог томе је што су алгоритми добијања елемената LC мреже исти у ова два случаја, само је припрема улазних полинома другачија. У овој функцији је имплементиран алгоритам који је описан у одељку 1.4. Синтеза LC филтара. Синтакса позива функције је

$$[LCmatrica,ier] = nlcc(vian,viad,tfzer,impadm)$$

где су улазне променљиве: `vian`, једнодимензионални низ реалних бројева који представља полином бројиоца импедансе или адмитансе, `viad` једнодимензионални низ реалних бројева који представља полином имениоца импедансе или адмитансе, `tfzer`, једнодимензионални низ комплексних бројева у коме су нуле функције преноса и `impadm` целобројни податак који може имати вредности 1 (`impadm=1`), када су улазни полиноми бројилац и именилац рационалне функције импедансе мреже или 0 (`impadm=0`), када су улазни полиноми бројилац и именилац рационалне функције адмитансе мреже.

Излазни подаци су `LCmatrica`, и целобројни показатељ грешке `ier`. Променљива `LCmatrica` је дводимензионални (у случају филтра првог реда, једнодимензионални) низ која садржи податке о реализацији филтра. Свака врста `LCmatrica`-е одговара једној грани лествице шеме са идеалним елементима филтра и вредностима елемената који чине грану кола. Излазна матрица има врсту облика `[tip, sastav, L, C]`, где променљива `tip` садржи информацију о начину на који је грана повезана са остатком кола (`tip=0` за редну грану, `tip=1` за паралелну), променљива `sastav` указује на то какво је коло у одговарајућој грани (`sastav=0` за индуктивност, `sastav=1` за капацитивност, `sastav=2` за редно LC, `sastav=3` за паралелно LC коло), променљива `L` садржи информацију о томе колику индуктивност има коло које се налази у одговарајућој грани (у Хенријима (H)), `C` садржи информацију о томе колику капацитивност има коло које се налази у одговарајућој грани (у Фарадима (F)).

Целобројни показатељ грешке може имати две вредности. Вредност `ier=16` у случају да се догодила грешка. Ако нема грешке `ier=0`.

У функцији постоји део кода где се врше нумеричке апроксимације међурезултата код филтара реда који је већи од осам. Успешност поменутих апроксимација у многоме зависи од максималног броја тачних цифара међурезултата.

2.3.5. Функција `nlczz`

Ова функција је намењена шеми са идеалним елементима LC мреже филтра у случају да функција преноса филтра нема нуле. Потпрограма је заснован на проналажењу резидуума уз помоћ једне од уграђених функција MATLAB-а. Синтакса позива функције је

$$[LCmatrica,ier] = nlczz(vian,viad,impadm)$$

где су улазне променљиве: *vian*, једнодимензионални низ реалних бројева који представља полином бројиоца импедансе или адмитансе, *viad* једнодимензионални низ реалних бројева који представља полином имениоца импедансе или адмитансе и *impadm* целобројни податак који може имати вредности 1 (*impadm*=1), када су улазни полиноми бројилац и именилац рационалне функције импедансе мреже или 0 (*impadm*=0), када су улазни полиноми бројилац и именилац рационалне функције адмитансе мреже.

Излазни подаци су: *LCmatrica* и целобројни показатељ грешке *ier*. Променљива *LCmatrica* је вишедимензионални низ која садржи резултате прорачуна филтра. Свака врста *LCmatrica*-е одговара једној грани лествице реализације филтра и вредностима елемената који чине грану кола. Излазна матрица има врсту облика [*tip*, *sastav*, *L*, *C*], где променљива *tip* садржи информацију о начину на који је грана повезана са остатком кола (*tip*=0 за редну грану, *tip*=1 за паралелну), променљива *sastav* указује на то какво је коло у одговарајућој грани (*sastav*=0 за индуктивност, *sastav*=1 за капацитивност, *sastav*=2 за редно LC, *sastav*=3 за паралелно LC коло), променљива *L* садржи информацију о томе колику индуктивност има коло које се налази у одговарајућој грани (у Хенријима (H)), *C* садржи информацију о томе колику капацитивност има коло које се налази у одговарајућој грани (у Фарадима (F)).

Целобројни показатељ грешке може добити две вредности. Вредност *ier*=17 у случају да се догодила грешка. Ако нема грешке *ier*=0.

Постоји део кода где се врши скраћивање бројиоца и имениоца рационалне функције имитансе и тачност прорачуна који обавља тај део кода у многоме зависи од броја тачних цифара међурејултата.

2.3.6. Функција МТ

Функција МТ се користи за добијање шеме филтара са идеалним секцијама водова. У функцији су за прорачун водова имплементирани формуле (92)-(96). Прорачун водова се врши помоћу Куродиних идентитета и Ричардсове трансформације. Калемови и кондензатори се замењују огранцима идеалних водова, примењују се Куродини идентитети и прорачунава се шема филтра од идеалних секција водова. Шема филтра од идеалних секција водова је прилагођена техници микротракастих водова и Куродини идентитети се користе за остваривање паралелних огранака у случајевима где је то могуће.

Синтакса позива функције је

```
[ier,MTmatrica,transLine] = MT(LCmatrica,nomImp)
```

где су улазни аргументи *LCmatrica* која је подматрица вишедимензионалне матрице која представља LC реализацију филтра (в. одељак 2.3.2. Функција *LCsinteza*) и параметар *nomImp* који представља вредност номиналне импедансе приступа и задаје се у Омима (Ω). Излазне променљиве су: *ier*, целобројни показатељ грешке, *MTmatrica* која представља микроталасну реализацију филтра и низ *transLine* који представља низ целих бројева у коме су редни бројеви секција водова који су дефинисани као *transmission line*.

Променљива *LCmatrica* је дводимензионални (за филтар првог реда једнодимензионални) низ која садржи резултате прорачуна филтра. Свака врста *LCmatrica*-е одговара једној грани лествице шеме са идеалним елементима филтра и вредностима елемената који чине грану кола. Излазна матрица има врсту облика [*tip*, *sastav*, *L*, *C*], где променљива *tip* садржи информацију о начину на који је грана повезана са остатком кола (*tip*=0 за редну грану, *tip*=1 за паралелну), променљива *sastav* указује на то какво је коло у одговарајућој грани (*sastav*=0 за индуктивност, *sastav*=1 за капацитивност, *sastav*=2 за редно LC, *sastav*=3 за паралелно LC коло), променљива *L* садржи информацију о томе колику индуктивност има коло које се налази у одговарајућој грани (у Хенријима (H)), *C* садржи информацију о томе колику капацитивност има коло које се налази у одговарајућој грани (у Фарадима (F)).

Параметар *nomImp* представља вредност номиналне импедансе и задаје се у Омима (Ω). Претпоставља се да је реалан и позитиван.

Целобројни показатељ грешке, у случају да функција МТ препозна нерегуларан унос података, добија вредност 12 (*ier*=12). Ако нема грешке *ier*=0.

Променљива *MTmatrica* је матрица од 5 колона и онолико врста колико врста има и улазна променљива *LCmatrica* (тј. колико грана има LC реализација филтра). Променљива *MTmatrica* има врсту облика [*vod*, *Zc*, *ks*, *eld*, *F0*]. Целобројна променљива *vod* има следеће вредности: *vod*=0 за паралелни огранак, *vod*=1 за редни огранак и *vod*=3 за одсечак вода. Реална позитивна променљива *Zc* представља вредност карактеристичне импедансе вода у Омима (Ω). Целобројна променљива *ks* има вредност 1 ако је огранак кратко спојен или вредност 0 ако је отворен. Реална позитивна променљива *eld* представља електричну дужину вода у радијанима, а *F0* фреквенцију у Херцима (Hz) на којој се рачуна електрична дужина вода.

Изазни низ `transLine` показује редни број вода који је постављен као `transmission line`, а последица је примене Куродиних идентитета. То је једнодимензионални низ чији су елементи позитивни, цели бројеви.

Функција `MT` броји уназад, као и функција `LCsinteza` (в. 2.3.2. Функција `LCsinteza`), што значи да се прва врста матрице `MTmatrixa` односи на елемент (вод) који је први до потрошача. То значи да ако се приступ генератора означи као први, а приступ потрошача као други, први елемент из `MTmatrixa-e` ће бити први елемент до потрошача.

Шема филтра са идеалним секцијама водова се прорачунава коришћењем најједноставнијег приближног поступка који примењује једначине дате у (92)-(96). Остварљивост карактеристичне импедансе се не проверава.

Шема филтра са идеалним секцијама водова је прилагођена техници микротракастих водова и Куродини идентитети се користе за остваривање паралелних огранака у случајевима где је то могуће.

2.4. Нумеричка подешавања

Развој функција за нумеричке алгоритме синтезе филтара показао је да је `MATLAB` код за синтезу веома осетљив на нумеричке грешке које се јављају при нумеричком дељењу полинома и налажењу нула полинома. Због тога је од посебног интереса било да се имплементирају ефикасни алгоритми нумеричких израчунавања који пресликавају коефицијенте задате функције у излазни резултат – вредности елемената `LC` и шеме филтра са идеалним секцијама водова. При нумеричкој обради података се, у овом програмском пакету, проблеми решавају користећи два параметра: променљиву `ttol` и број значајних цифара.

2.4.1. Глобални параметар `ttol`

`MATLAB` сваки реалан број представља као 64-битни бинарни број и записује га у осам бајтова радне меморије по стандарду `IEEE` аритметике. Познато је да се произвољан реалан број, у општем случају, не може тачно представити помоћу коначног броја бинарних цифара. Из тог разлога се може десити да при израчунавањима која се изводе, дође до заокруживања бројева, што смањује тачност прорачуна. Са друге стране, прорачун који се врши може дати нетачан резултат захваљујући томе што се посматра већи број цифара него што је оптимално са гледишта простирања нумеричке грешке. На пример, нека је прорачуном добијен пар корена полинома и нека наведени пар корена, по теорији, треба да је конјуговано комплексан: $-j \cdot 0.123456789123$ и $j \cdot 0.123456789456$. Полином који се добија од ових корена нема све реалне коефицијенте: $s^2 - 3.33 \cdot 10^{-10} \cdot j \cdot s + 0.0152416$. Ако се наведени корени полинома заокруже тако да се добије пар бројева $-j \cdot 0.123456789$ и $j \cdot 0.123456789$, полином који се добија од нула добијених апроксимацијом је $s^2 + 0.0152416$ и то јесте полином који има конјуговано комплексне нуле.

Простирање нумеричке грешке може условити да теоријски тачне формуле дају погрешне резултате. Уочено је да су последње две или три цифре у децималном запису међурезултата најкритичније. На први поглед делује да ово не представља проблем за даље израчунавање, међутим претпоставимо да је потребно упоредити два броја која се разликују почев од петнаесте децимале. На пример, ово је важно у услову (`if` наредба) код упоређивања апсолутних вредности конјуговано комплексних парова нула (нпр. код помоћне функције $K_1(s)$). На основу теорије је познато да се неке нуле функције $K_1(s)$ јављају у квадриполима. То значи да постоје парови нула чији су реални делови једнаки и чији су модули имагинарних делова једнаки. Посматрајмо сада таква два броја која по теорији треба да буду једнака, на пример, настала тражењем нула полинома. Због нагомилане нумеричке грешке непосредно упоређивање таква два броја у `MATLAB`-у командом `==`, показало би да су бројеви различити. Да би се узела у обзир нагомилана грешка и истовремено извршило поређење сходно теоријском предзнању, уведен је нов критеријум једнакости бројева. Бројеви се сматрају условно једнаким ако им се поклапа задати број првих цифара мантисе и задати број цифара експонента. Уведен је параметар `ttol` помоћу кога се врши заокруживање бројева пре поређења. Бројеви се сматрају једнаким ако су им заокружене вредности једнаке.

На пример, нека је добијена функција мреже елиптичког филтра трећег реда (в. Пример 3.). Представимо је у сагласности са нотацијом `MATLAB`-а (за нотацију у `MATLAB`-у, в. 2.2. Опис радног окружења). Нека је бројилац функције преноса

```
num = [0.62086 0 0.850772];
```

и именилац

```
den = [1 1.01146 1.2018 0 .850772];
```

при чему је за филтар трећег реда $ttol=8$. Помоћна функција је облика

```
кром = [-1 0 -1.766015808 0 -0.7797001536 0 0]
```

а нуле функције без заокруживања (без коришћења параметра $ttol$) су

```
nule = [0 0 8.3267e-017+0.94058i 8.3267e-017-0.94058i 1.3878e-017+0.93879i...
        1.3878e-017-0.93879i]
```

Види се да овакве нуле нису у сагласности са теоријом филтара, јер четири нуле које имају реални и имагинарни део не формирају квадрипол.

После примене заокруживања нула коришћењем параметра $ttol$, добија се резултат који се поклапа са теоријом, тј. четири нуле које имају реални и имагинарни део формирају квадрипол:

```
nuleZaok=[ 0 0 0.9396846i -0.9396846i +0.9396846i -0.9396846i]
```

Променљива $ttol$ је глобална, дефинисана у функцији `LCsinteza` и као таква је видљива за сваку функцију пакета `LCsinteza`. Подешено је да `LCsinteza` у зависности од степена функције мреже, датој променљивој аутоматски додељује вредност за коју је процењено да је оптимална. Процена је добијена на основу низа нумеричких експеримената, кроз примере релевантне за праксу.

2.4.2. Број значајних цифара

Да би се добио неопходан број тачних цифара за вредности елемената шеме са идеалним елементима, потребно је да улазни подаци имају довољно тачних цифара. Пакет `LCsinteza` анализира задате коефицијенте функције преноса и обавештава корисника о минималном броју тачних цифара које треба да поседује сваки коефицијент.

За синтезу филтара високог реда (на пример, једанаестог реда), без обзира колико су квалитетни нумерички алгоритми синтезе, немогуће је тачно прорачунати елементе филтра ако не постоји довољно тачних цифара у улазним подацима. `LCsinteza` аутоматски генерише поруке за корисника о броју значајних цифара међурезултата и крајњих резултата. На први поглед то је нелогично, јер по извршеном програму таква порука кориснику није потребна. Значај ове поруке је да мотивише корисника да унесе све расположиве значајне цифре коефицијената функције преноса.

Пример 4. Једноструко затворена лествичаста шема са идеалним елементима без нула у функцији преноса. Пакет `LCsinteza`.

Нека је одабрана Чебишевљева апроксимација петог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом `Filter Solutions` ако се задају следеће вредности: `Standard Pass Band Attenuation` је 3.010 dB, `Source Res` (`Source Resistance`) је 0 ($R_g = 0 \Omega$), `Load Res` (`Load Resistance`) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$), `Pass Band Ripple` је 1 dB, `Pass Band Frequency` је 1 rad/s.

Шема са идеалним елементима филтра коју врши функција `LCsinteza` је дата на слици 21.

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008			
Z0[Ohm]	Rg[Ohm]	R0[Ohm]	
50.000000	0.000000	1.000000	
Shema sa idealnim elementima 1			
tip	sastav	L [H]	C [F]
0	0	1.067441	0.000000
1	1	0.000000	1.444137
0	0	1.993771	0.000000
1	1	0.000000	1.590756
0	0	1.665239	0.000000

Слика 21. Шема са идеалним елементима филтра чија је функција преноса дата у (99). `LCsinteza`.

Пример 5. Једноструко затворена лествичаста шема са идеалним елементима са комплексним нулама у функцији преноса. Пакет LCsinteza.

Нека је одабрана елиптичка апроксимација трећег реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 0 ($R_g = 0 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$), Pass Band Frequency је 1 rad/s, Pass Band Ripple је 1 dB, и Stop Band Ratio је 1.1.

Шема са идеалним елементима филтра коју врши функција LCsinteza је дата на слици 22.

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

Z0[Ohm]	Rg[Ohm]	R0[Ohm]
50.000000	0.000000	1.000000

Shema sa idealnim elementima 1

tip	sastav	L [H]	C [F]
0	0	0.314823	0.000000
1	2	1.744912	0.418222
0	0	1.097781	0.000000

Слика 22. Шема са идеалним елементима филтра чија је функција преноса дата у (100). LCsinteza.

Пример 6. Двоструко затворена лествичаста шема са идеалним елементима са комплексним нулама у функцији преноса. Пакет LCsinteza.

Нека је одабрана елиптичка апроксимација трећег реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$), Pass Band Ripple је 1 dB, Pass Band Frequency је 1 rad/s и Stop Band Ratio је 1.1.

Шема са идеалним елементима филтра коју врши функција LCsinteza је дата на слици 23.

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

Z0[Ohm]	Rg[Ohm]	R0[Ohm]
50.000000	1.000000	1.000000

Shema sa idealnim elementima 1

tip	sastav	L [H]	C [F]
1	1	0.000000	1.224714
0	3	0.374713	1.947518
1	1	0.000000	1.225782

Shema sa idealnim elementima 2

tip	sastav	L [H]	C [F]
0	0	1.224714	0.000000
1	2	1.947518	0.374713
0	0	1.225782	0.000000

Слика 23. Шема са идеалним елементима филтра чија је функција преноса дата у (101). LCsinteza.

Упоредјујући резултате из примера 1, 2, 3, 4, 5 и 6, уочава се да LCsinteza даје резултате који се добро слажу са резултатима софтвера Filter Solutions.

3. Закључак

Пројектовање филтара који раде на микроталасним учестаностима је актуелна развојно-истраживачка област савремене микроталасне технике о чему сведоче и посебна издања часописа IEEE Microwave Magazine (2007) посвећена микроталасним филтрима.

Циљ ове тезе је био развој ефикасних алгоритама и одговарајуће софтверско решење у MATLAB-у за синтезу једне класе микроталасних филтара од одсечака водова.

Допринос ове тезе је оригинални софтверски пакет LСsinteza, који полази од задате функције преноса филтра и из ње одређује реализацију микроталасног филтра пропусника ниских учестаности. У првом кораку, пакет LСsinteza одређује LC лествичасту мрежу, док се у другом кораку применом Ричардсове трансформације и Куродиних идентитета одређује шема филтра са идеалним секцијама водова. Са корисничког гледишта, синтеза филтра се врши позивом једне функције којој се прослеђују коефицијенти функције мреже у форми једнодимензионалних низова реалних бројева.

У току развоја пакета LСsinteza, уочено је да је прорачун електричних филтара нумерички сложен и осетљив на број тачних цифара међурезултата, посебно при нумеричком дељењу полинома и налажењу нула полинома.

Програмски пакет LСsinteza је коришћен за синтезу филтара, што је показано у примерима (в. Пример 7 – Пример 25). LСsinteza је упоређиван са професионалним, комерцијалним софтвером Filter Solutions.

У овом раду је свака од функција пакета LСsinteza документована у оквиру одељка 2.3.

Правци даљег развоја програмског пакета LСsinteza су, на првом месту, прављење графичке спреге са корисником (GUI – Grafical User Interface), могућност синтезе микроталасних филтара са инверторима и побољшање језгра програма (кернел) у смислу повећања броја тачних цифара. Планира се још и повећање реда филтара који се могу успешно синтетисати, побољшање ефикасности синтезе филтара парног реда, могућност синтезе филтара при различитим (у општем случају, комплексним) импедансама генератора и потрошача, увођење толеранција при синтези филтра и могућност оптимизације.

4. Литература

- [1] Тошић, Д. В., *Пројектовање микроталасних филтара*, предавања, Електротехнички факултет у Београду, 2008.
- [2] Gilmore R., Besser L., *Practical RF Circuit Design for Modern Wireless Systems, volume I: Passive Circuits and Systems*, Artech House, Boston, 2003.
- [3] Lutovac, M. D., Тошић, Д. В. and Evans, B. L., *Filter Design for Signal Processing Using MATLAB and Mathematica*, Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- [4] Хорват, Р., *Синтеза електричних мрежа*, Научна књига, Београд, 1977.
- [5] Гмитровић, М. В., *Синтеза мрежа I*, Електронски факултет у Нишу, 2000.
- [6] Гмитровић, М. В., *Микроталасни и таласни дигитални филтри*, Електронски факултет у Нишу, 2007.
- [7] Петровић, В. Д., Тошић, Д. В., Ђорђевић, А. Р., *Микроталасна пасивна кола*, Београд, 2008.
- [8] Filter Solutions 2006 Advanced, Version 11.0.0, Nuhertz Technologies, LLC, <http://www.filter-solutions.com>
- [9] *Mathematica*, Version 6.0., Wolfram Research, Inc., <http://www.wolfram.com/>
- [10] MATLAB, Version 2007a, The MathWorks, Inc., <http://www.mathworks.com/>
- [11] Microwave Office, Version 7, Applied Wave Research, Inc., <http://www.mwoffice.com/>
- [12] WIPL-D Microwave Pro NET, Version 1.1, WIPL-D d.o.o., <http://www.WIPL-d.com/>
- [13] Pspice Student, Version 9.1, Cadence Design Systems, <http://www.cadence.com/>
- [14] Focus on Filters, *IEEE Microwave Magazine*, vol. 8, no. 2, April 2007.
- [15] Милошевић, Т. С., Тошић, Д. В., MATLAB програм за синтезу LC филтара из задате трансфер функције, 16. телекомуникациони форум ТЕЛФОР, Београд, новембар 2008.

5. Додатак

Додатак садржи примере у којима се врши поређење резултата функције LCsinteza и професионалног, комерцијалног програма Filter Solutions. Амплитудски одзиви филтара које синтетише LCsinteza су проверени уз помоћ професионалних, комерцијалних програма Microwave Office (MWO) [11], WIPL-D Microwave [12] и некомерцијалне верзије програма PSpice [13]. Filter Solutions је подешен да приказује вредности елемената користећи четири значајне цифре док LCsinteza ради са седам значајних цифара.

Пример 7. Једноструко затворена шема са идеалним елементима Батервортовог филтра.

Пакет LCsinteza, Filter Solutions, PSpice, WIPL-D Microwave.

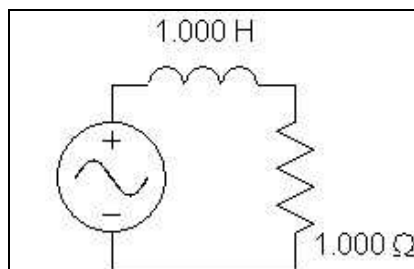
Нека је одабрана Батервортова апроксимација првог реда. Одговарајућа функција преноса се добија програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 0 ($R_g = 0 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$), Pass Band Frequency је 1rad/s.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати LC филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима PSpice и WIPL-D Microwave.

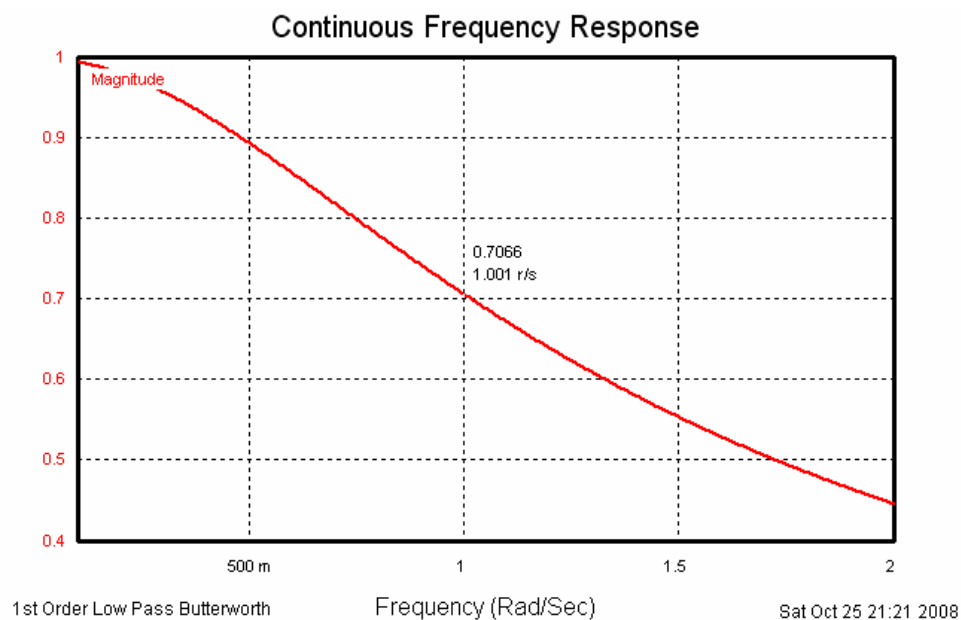
На слици 24 је приказана спецификација филтра, док је на слици 25 приказана његова шема са идеалним елементима. На слици 26 је амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 27. Слика 28 приказује шему филтра у програму PSpice, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 29 је амплитудски одзив филтра који је добијен у PSpice-у, а приказан у MATLAB-овом прозору за графичко представљање резултата. На слици 30 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave, а на слици 31 су вредности симбола коришћене у програму WIPL-D Microwave. На слици 32 је амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave.



Слика 24. Спецификација Батервортовог филтра првог реда. Filter Solutions.



Слика 25. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 24. Filter Solutions.



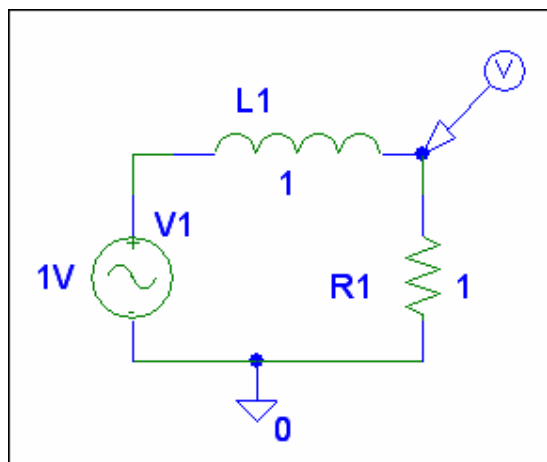
Слика 26. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 24. Filter Solutions.

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

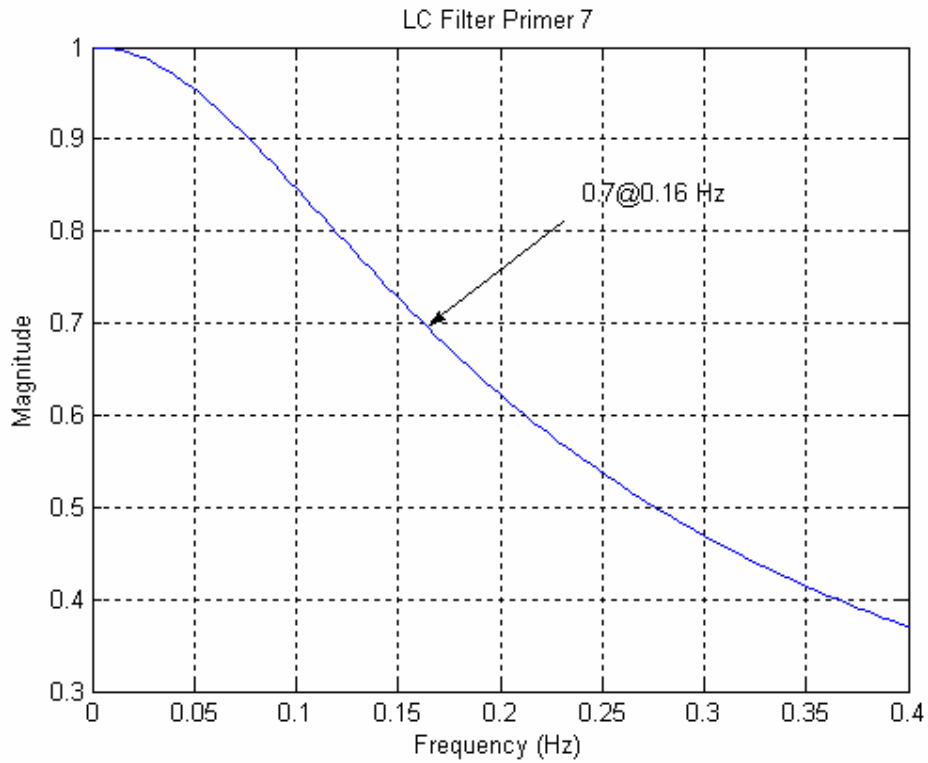
Z0[Ohm]	Rg[Ohm]	R0[Ohm]
50.000000	0.000000	1.000000

Shema sa idealnim elementima 1			
tip	sastav	L [H]	C [F]
0	0	1.000000	0.000000

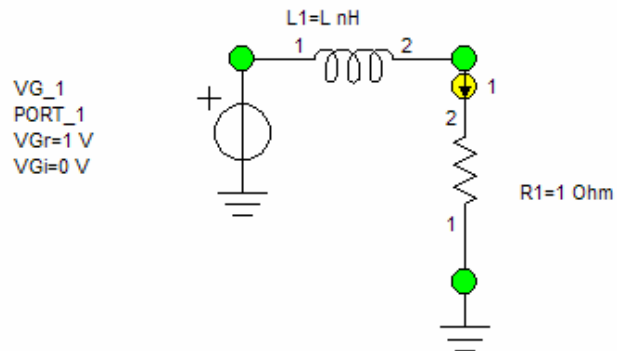
Слика 27. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 24. Пакет LCsinteza.



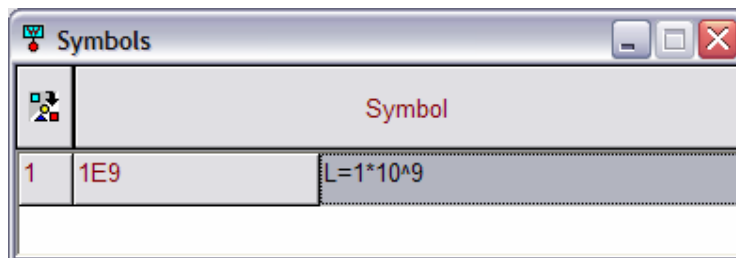
Слика 28. Шема филтра према прорачуну са слике 27. PSpice.



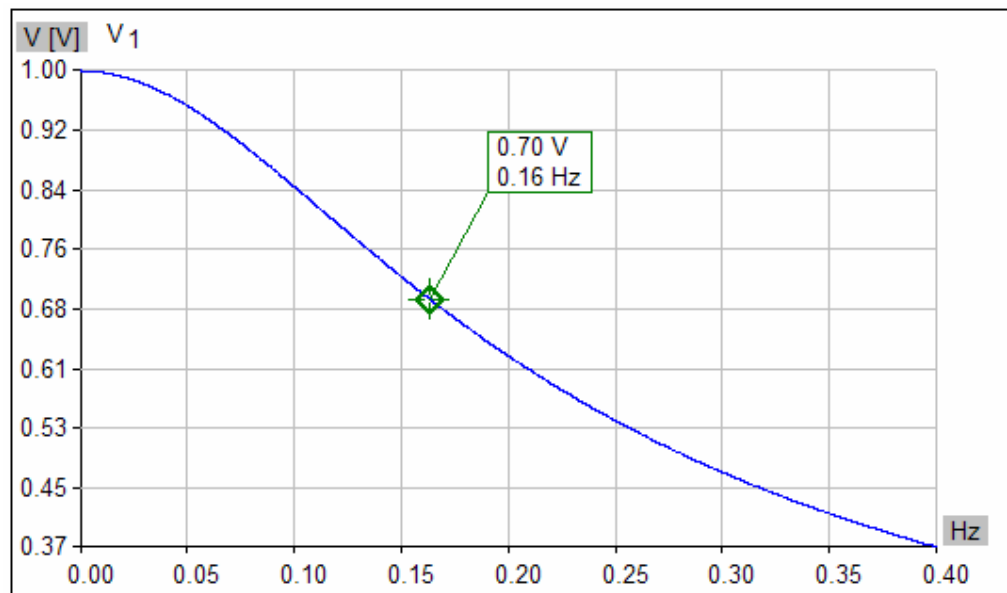
Слика 29. Амплитудски одзив филтра са слике 28. PSpice, MATLAB.



Слика 30. Шема филтра према прорачуну са слике 27. WIPL-D Microwave.



Слика 31. Вредности симбола са слике 30.



Слика 32. Амплитудски одзив филтра са слике 30. WIPL-D Microwave (12 фреквенција).

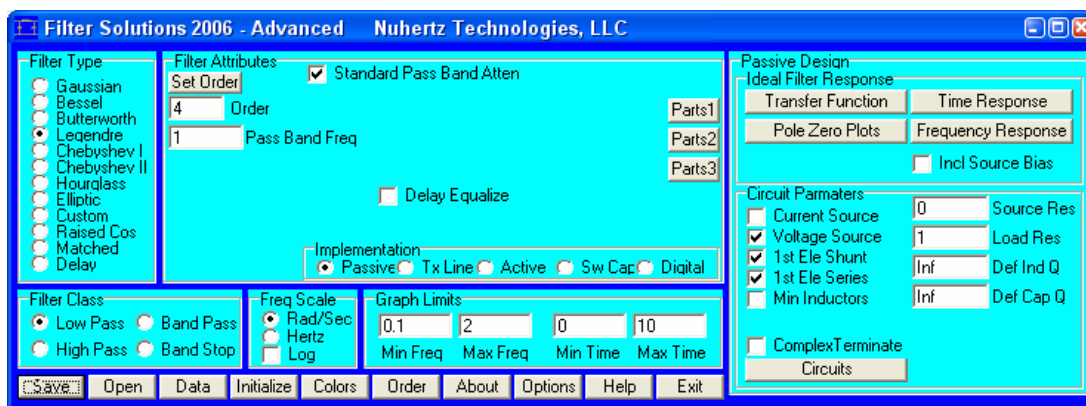
Упоредивањем слика 26, 29 и 32 и слика 25 и 27 види се да се прорачун добијен пакетом LCsinteza у потпуности слаже са шемом филтра са идеалним елементима коју прави професионални, комерцијални софтвер Filter Solutions.

Пример 8. Једноструко затворена шема са идеалним елементима Лежандровог филтра. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, PSpice, WIPL-D Microwave.

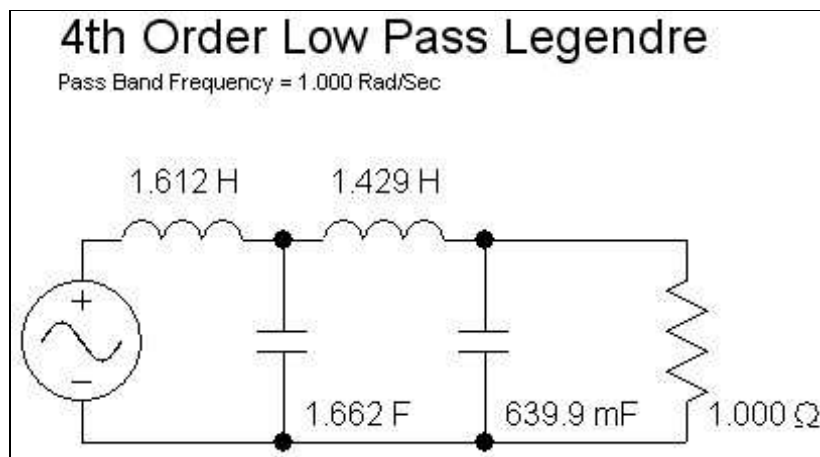
Нека је одабрана Лежандрова апроксимација четвртог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 0 ($R_g = 0 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$), Pass Band Frequency је 1 rad/s.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати LC филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима PSpice и WIPL-D Microwave.

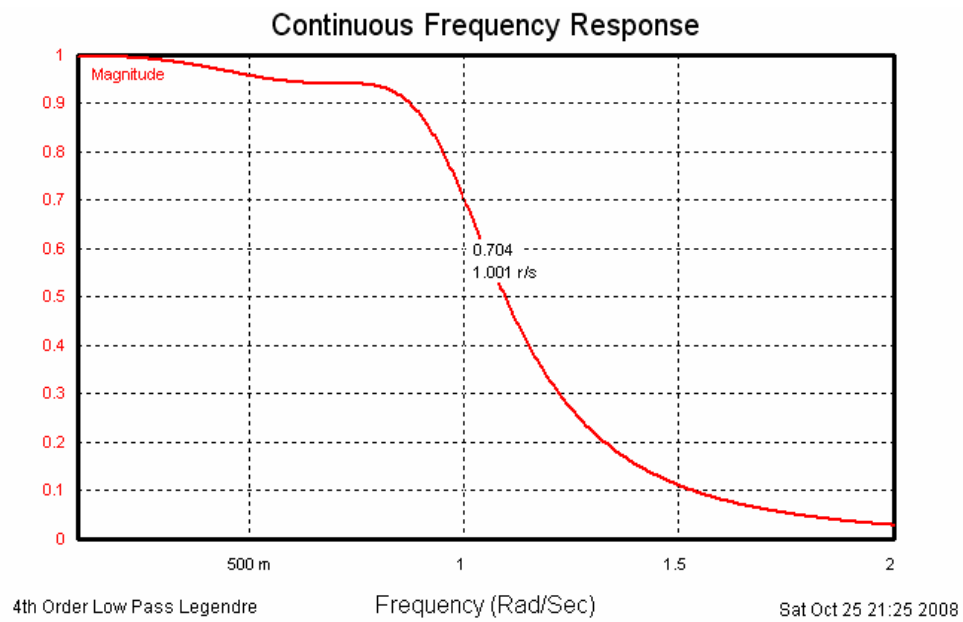
На слици 33 је приказана спецификација филтра, док је на слици 34 приказана његова шема са идеалним елементима. На слици 35 је амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 36. Слика 37 приказује шему филтра у програму PSpice, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 38 је амплитудски одзив филтра који је добијен у PSpice-у, а приказан у MATLAB-овом прозору за графичко представљање резултата. На слици 39 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave, а на слици 40 су вредности симбола коришћене у програму WIPL-D Microwave. На слици 41 је амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave.



Слика 33. Спецификација Лежандровог филтра четвртог реда. Filter Solutions.



Слика 34. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 33. Filter Solutions.



Слика 35. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 33. Filter Solutions.

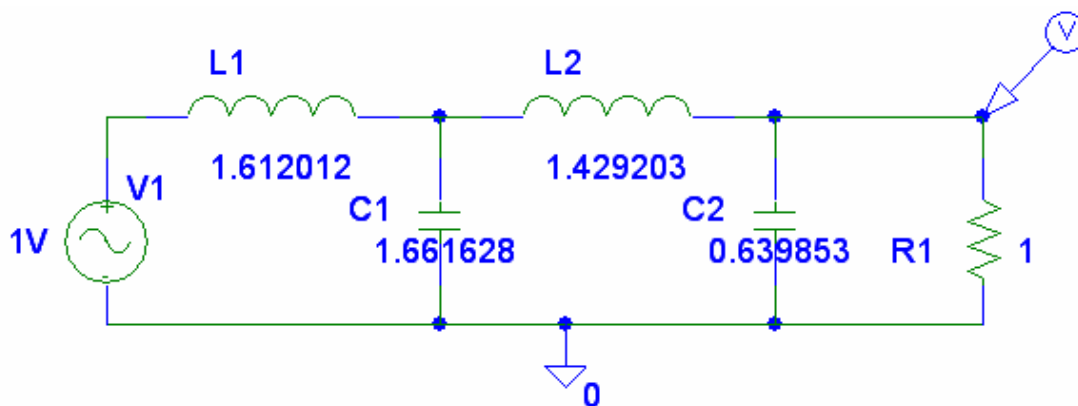
LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

Z0[Ohm] Rg[Ohm] R0[Ohm]
 50.000000 0.000000 1.000000

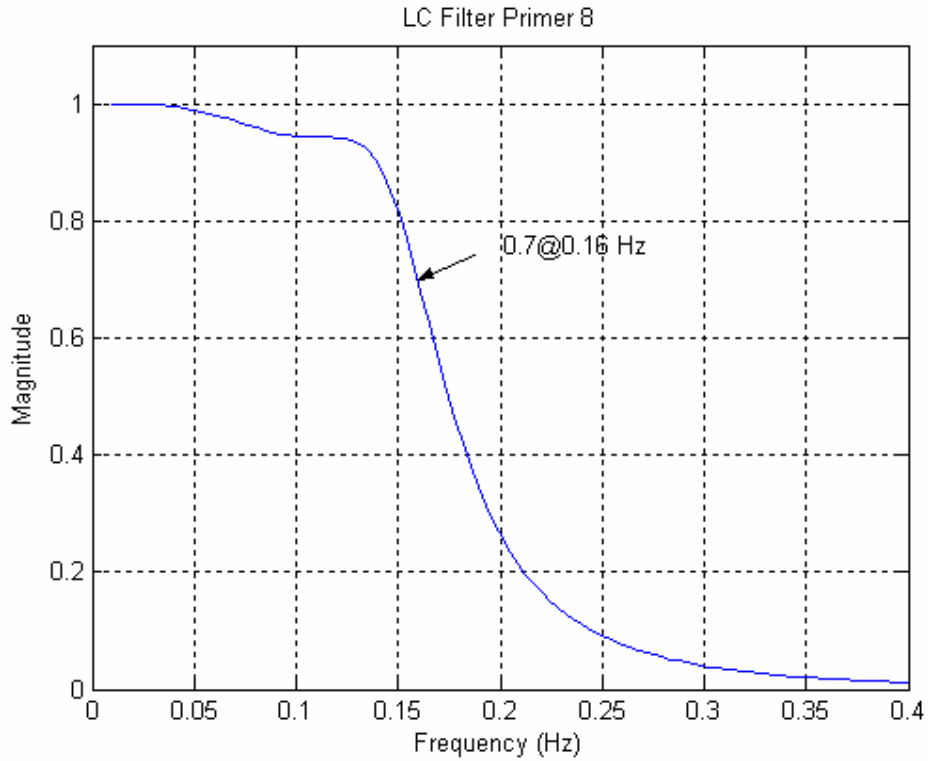
Shema sa idealnim elementima 1

tip	sastav	L [H]	C [F]
1	1	0.000000	0.639853
0	0	1.429203	0.000000
1	1	0.000000	1.661628
0	0	1.612012	0.000000

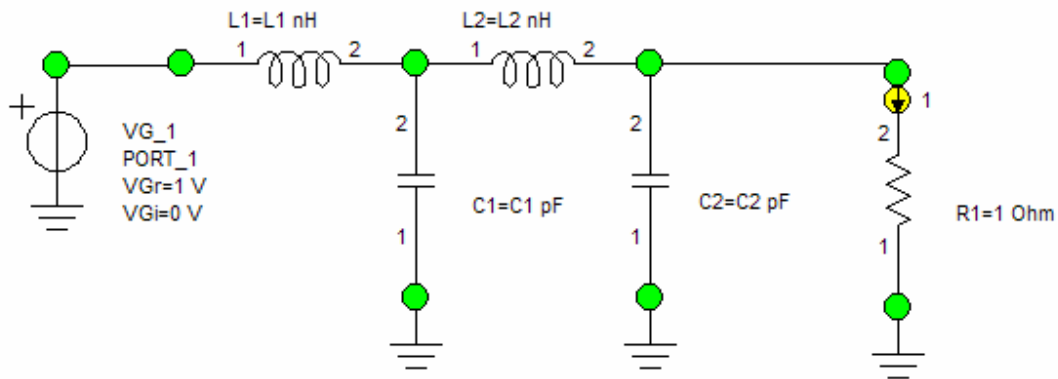
Слика 36. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 33. Пакет LCsinteza.



Слика 37. Шема филтра према прорачуну са слике 36. PSpice.



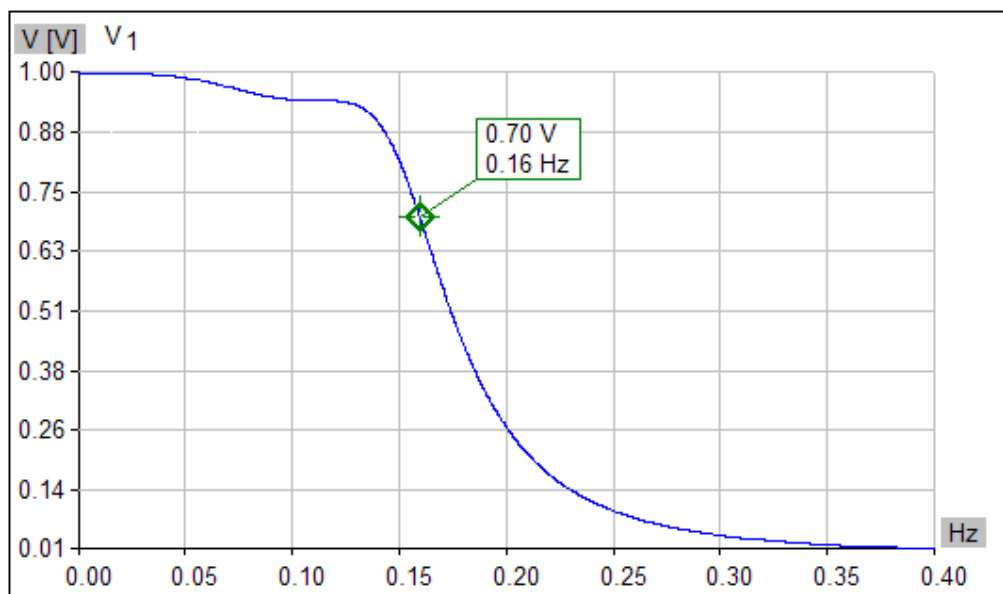
Слика 38. Амплитудски одзив филтра са слике 37. Pspice, MATLAB.



Слика 39. Шема филтра према прорачуну са слике 36. WIPL-D Microwave.

Symbols		
	Symbol	
1	1.612012E9	$L1=1.612012 \cdot 10^9$
2	1.429203E9	$L2=1.429203 \cdot 10^9$
3	1.661628E12	$C1=1.661628 \cdot 10^{12}$
4	6.39853E11	$C2=0.639853 \cdot 10^{12}$

Слика 40. Вредности симбола са слике 39.



Слика 41. Амплитудски одзив филтра са слике 39. WIPL-D Microwave.

Упоредивањем слика 35, 38 и 41 и слика 34 и 36 види се да се прорачун добијен пакетом LCsinteza у потпуности слаже са шемом филтра са идеалним елементима коју прави софтвер Filter Solutions.

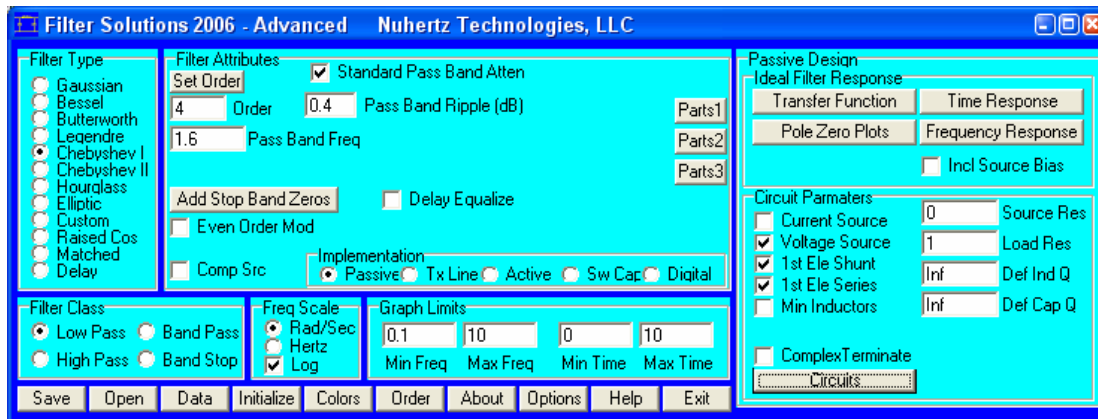
Пример 9. Једноструко затворена шема са идеалним елементима Чебишевљевог филтра.

Пакет LCsinteza, Filter Solutions, PSpice, WIPL-D Microwave.

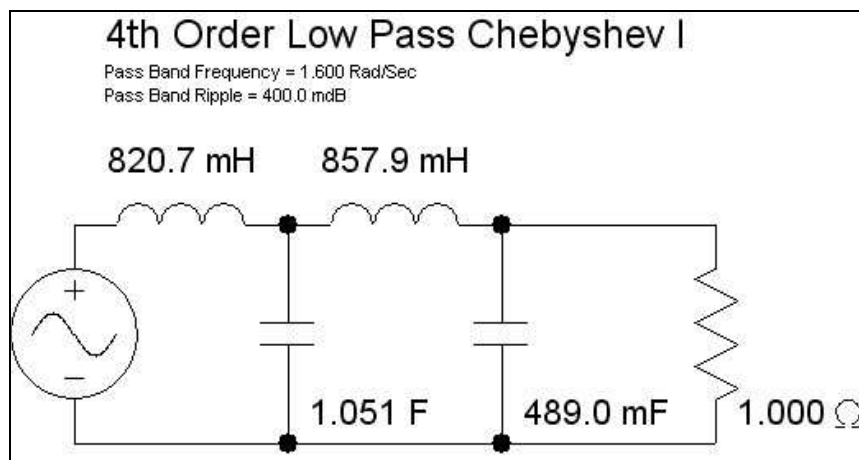
Нека је одабрана Чебишевљева апроксимација четвртог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 0 ($R_g = 0 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$), Pass Band Frequency је 1.6 rad/s и Band Pass Ripple 0.4 dB.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати LC филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима PSpice и WIPL-D Microwave.

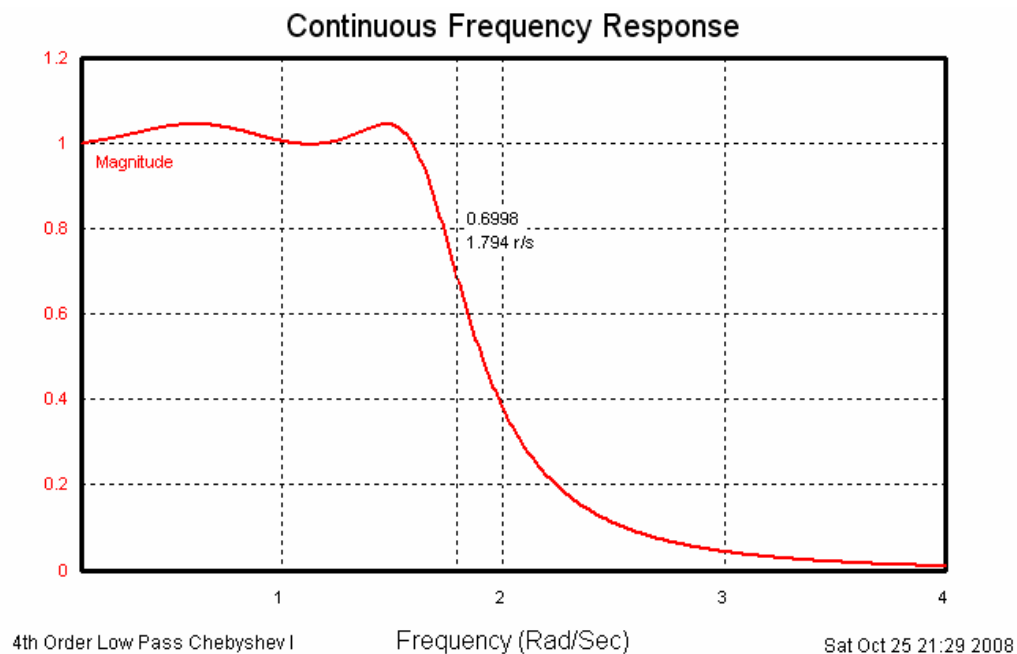
На слици 42 је приказана спецификација филтра, док је на слици 43 приказана његова шема са идеалним елементима. На слици 44 је амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 45. Слика 46 приказује шему филтра у програму PSpice, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 47 је амплитудски одзив филтра који је добијен у PSpice-у, а приказан у MATLAB-овом прозору за графичко представљање резултата. На слици 48 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave, а на слици 49 су вредности симбола коришћене у програму WIPL-D Microwave. На слици 50 је амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave.



Слика 42. Спецификација Чебишевљевог филтра четвртог реда. Filter Solutions.



Слика 43. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 42. Filter Solutions.



Слика 44. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 42. Filter Solutions.

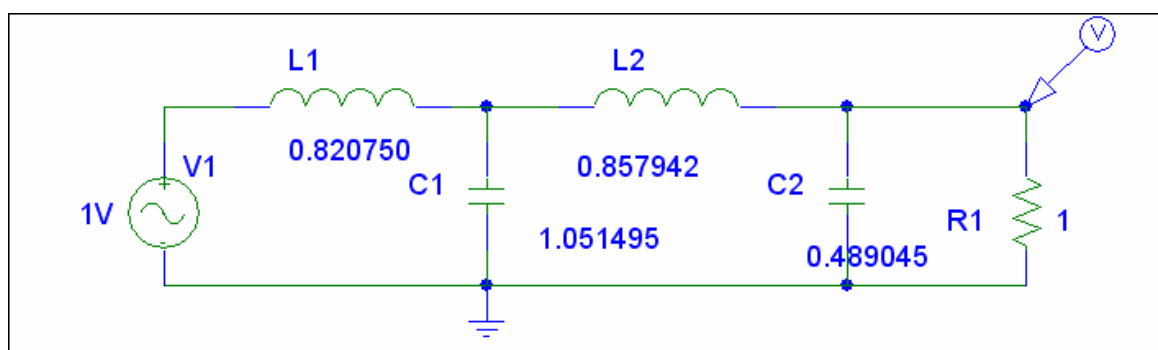
LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

Z0[Ohm] Rg[Ohm] R0[Ohm]
 50.000000 0.000000 1.000000

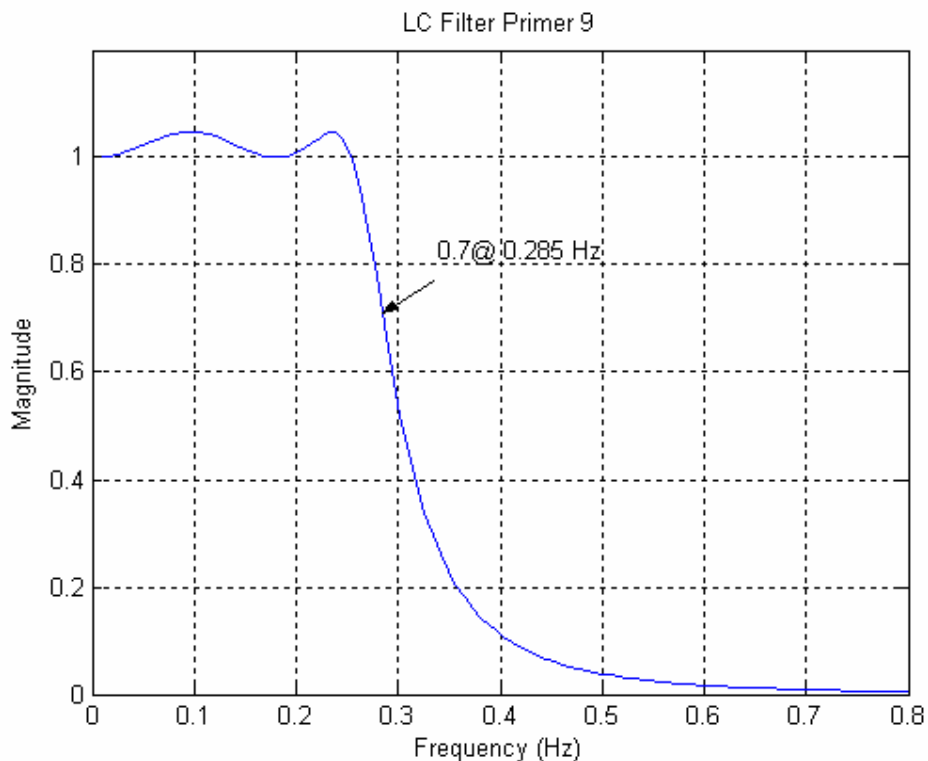
Shema sa idealnim elementima 1

tip	sastav	L [H]	C [F]
1	1	0.000000	0.489045
0	0	0.857942	0.000000
1	1	0.000000	1.051495
0	0	0.820750	0.000000

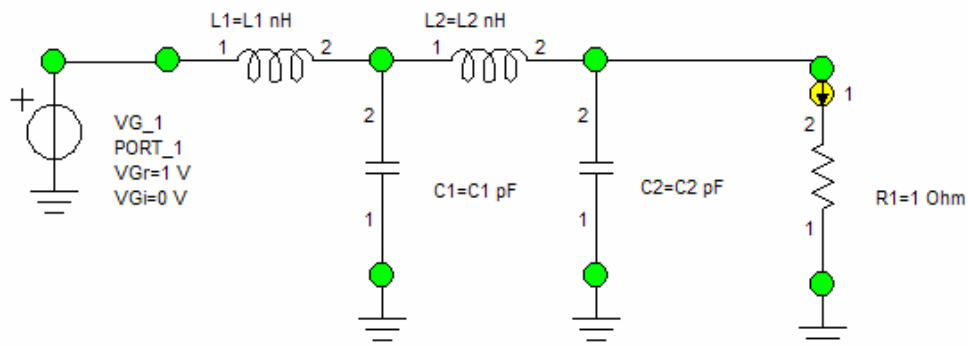
Слика 45. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 42. Пакет LCsinteza.



Слика 46. Шема филтра према прорачуну са слике 45. PSpice.



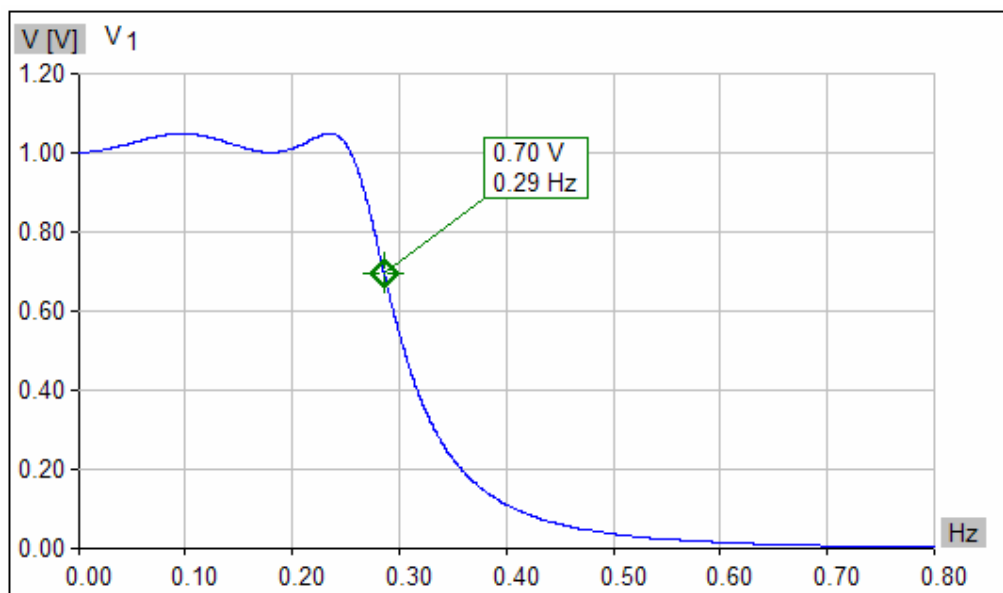
Слика 47. Амплитудски одзив филтра са слике 46. PSpice, MATLAB.



Слика 48. Шема филтра према прорачуну са слике 45. WIPL-D Microwave.

Symbols		
	Symbol	
1	8.2075E8	L1=0.820750*10 ⁹
2	8.57942E8	L2=0.857942*10 ⁹
3	1.051495E12	C1=1.051495*10 ¹²
4	4.890453E11	C2=0.4890453*10 ¹²

Слика 49. Вредности симбола са слике 48.



Слика 50. Амплитудски одзив филтра са слике 48. WIPL-D Microwave.

Упоредивањем слика 44, 47 и 50 и слика 43 и 45 види се да се прорачун добијен пакетом LCsinteza у потпуности слаже са шемом филтра са идеалним елементима коју прави професионални, комерцијални софтвер Filter Solutions.

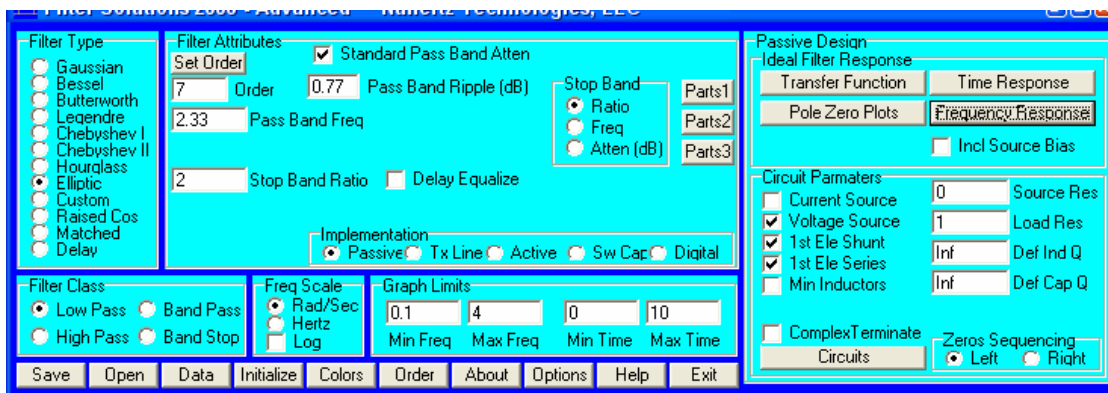
Пример 10. Једноструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра седмог реда.

Пакет LCsinteza, Filter Solutions, PSpice, WIPL-D Microwave.

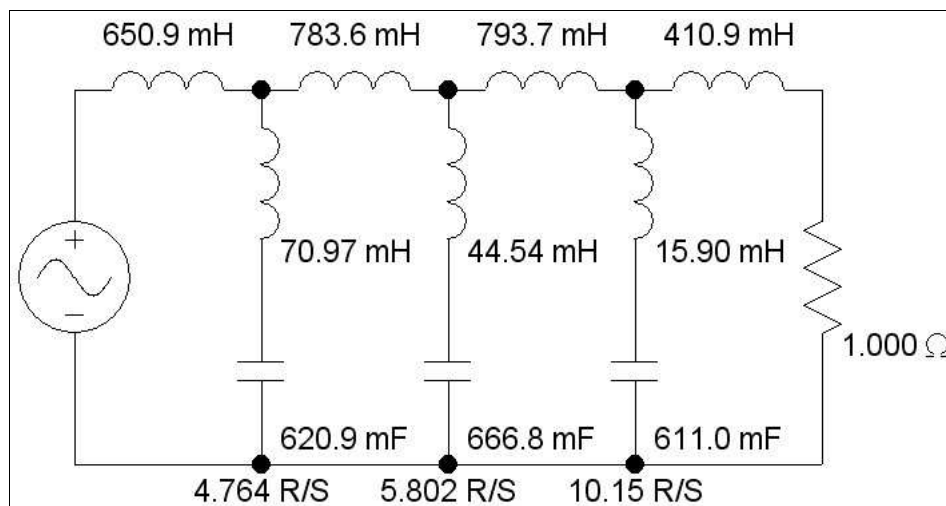
Нека је одабрана елиптичка апроксимација седмог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 0 ($R_g = 0 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$), Pass Band Frequency је 2.33 rad/s, Stop Band Ratio је 2 и Pass Band Ripple је 0.77 dB.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати LC филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима PSpice и WIPL-D Microwave.

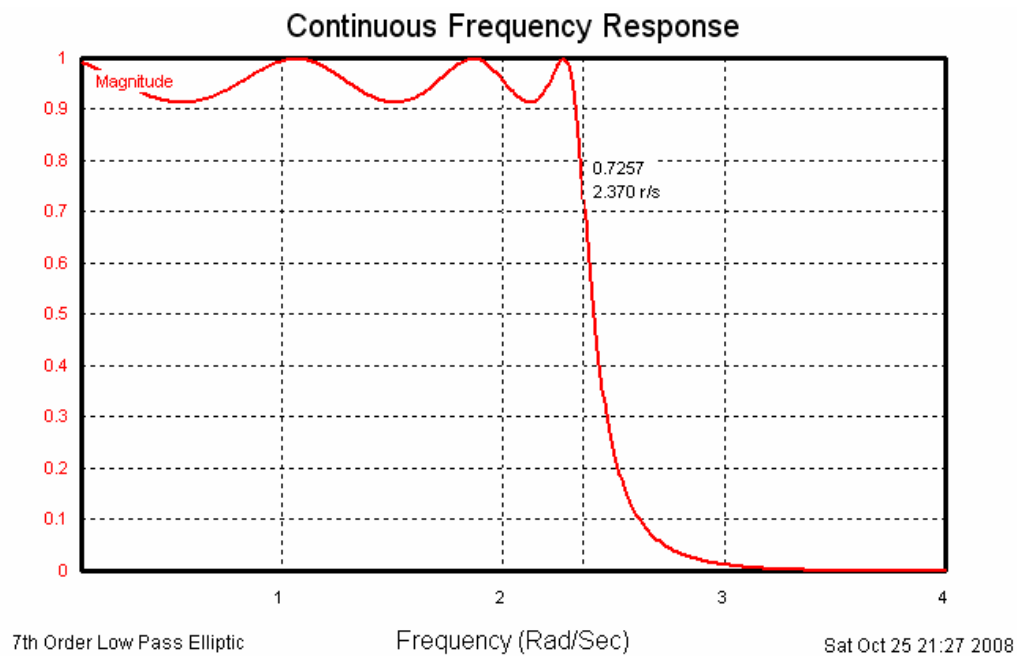
На слици 51 је приказана спецификација филтра, док је на слици 52 приказана његова шема са идеалним елементима. На слици 53 је амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 54. Слика 55 приказује шему филтра у програму PSpice, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 56 је амплитудски одзив филтра који је добијен у PSpice-у, а приказан у MATLAB-овом прозору за графичко представљање резултата. На слици 57 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave, а на слици 58 су вредности симбола коришћене у програму WIPL-D Microwave. На слици 59 је амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave.



Слика 51. Спецификација елиптичког филтра седмог реда. Filter Solutions.



Слика 52. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 51. Filter Solutions.



Слика 53. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 51. Filter Solutions.

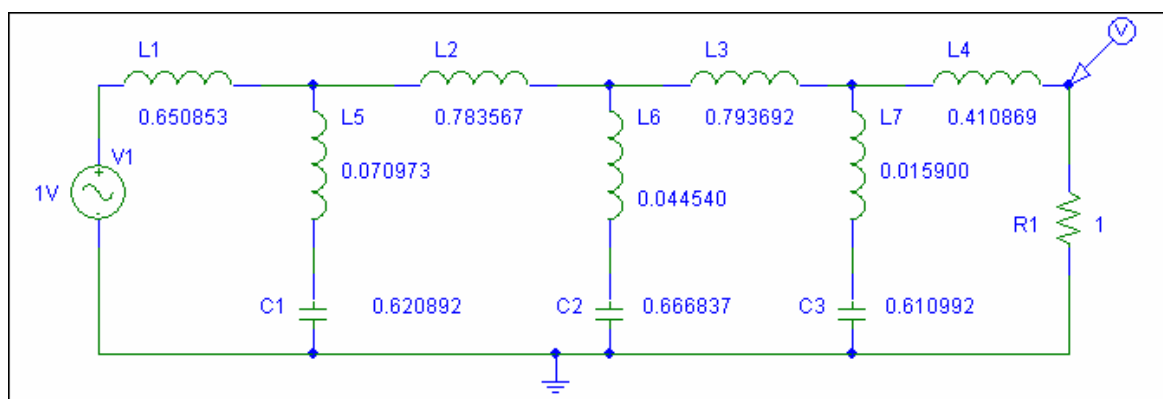
LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

Z0[Ohm] Rg[Ohm] R0[Ohm]
 50.000000 0.000000 1.000000

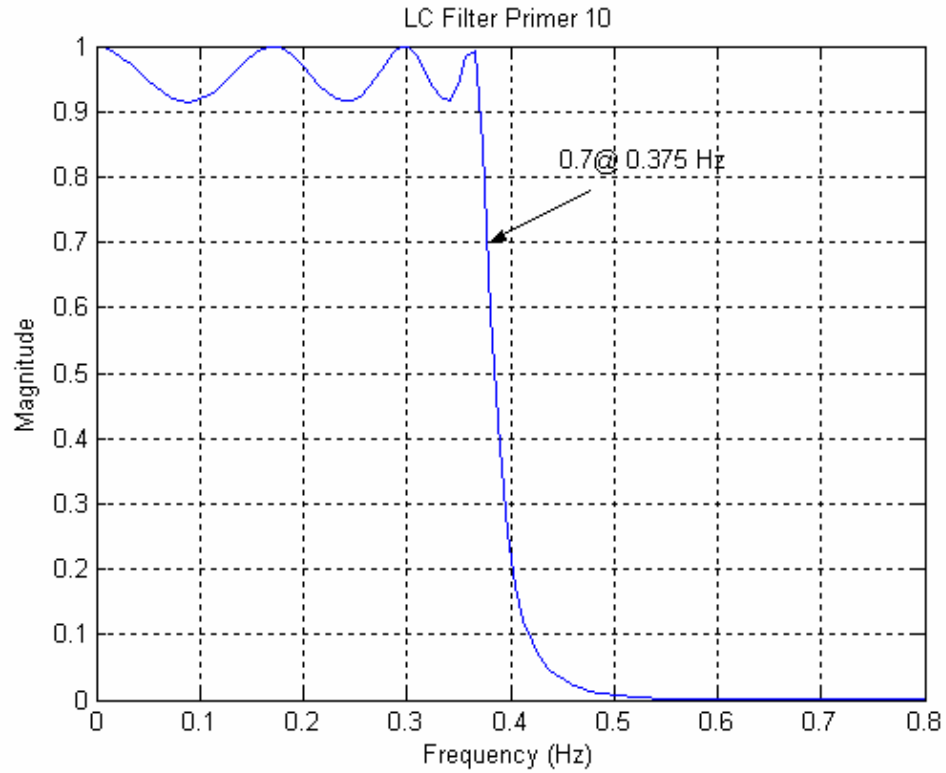
Shema sa idealnim elementima 1

tip	sastav	L [H]	C [F]
0	0	0.410869	0.000000
1	2	0.015900	0.610992
0	0	0.793692	0.000000
1	2	0.044540	0.666837
0	0	0.783567	0.000000
1	2	0.070973	0.620892
0	0	0.650853	0.000000

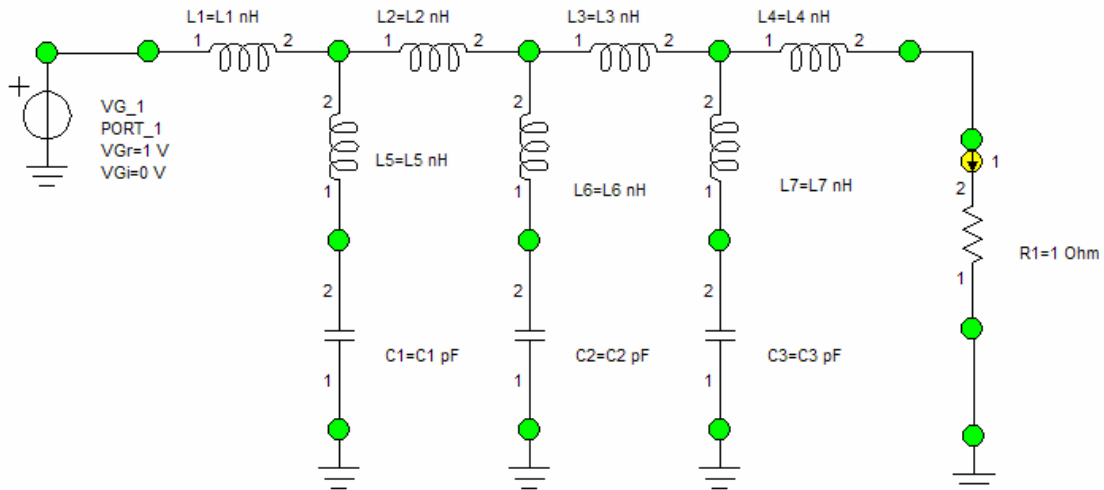
Слика 54. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 51. Пакет LCsinteza.



Слика 55. Шема филтра према прорачуну са слике 54. PSpice.



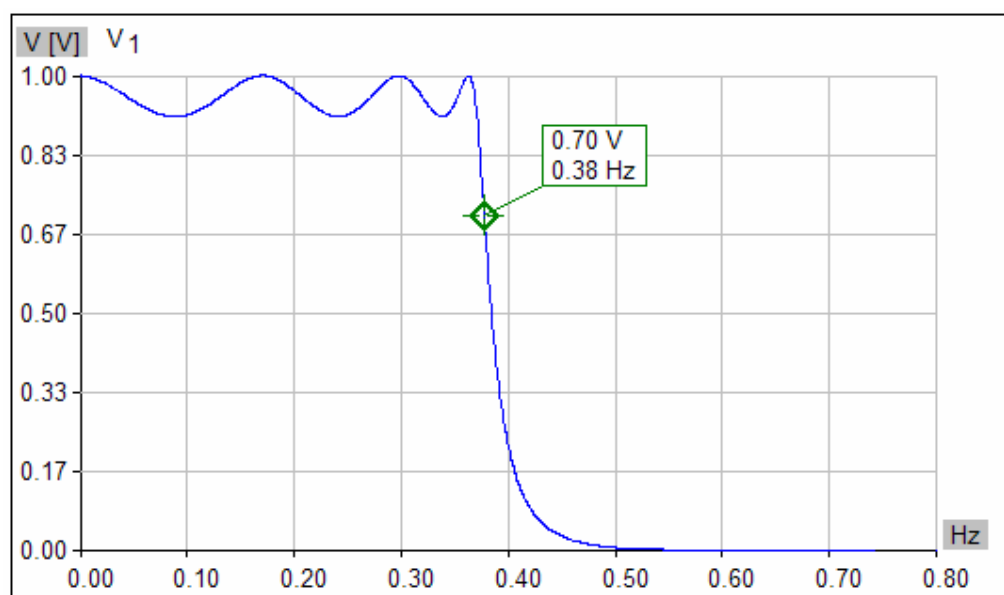
Слика 56. Амплитудски одзив филтра са слике 55. PSpice, MATLAB.



Слика 57. Шема филтра према прорачуну са слике 54. WIPL-D Microwave.

	Symbol	
1	6.50853E8	$L1=0.650853 \cdot 10^9$
2	7.83567E8	$L2=0.783567 \cdot 10^9$
3	7.93692E8	$L3=0.793692 \cdot 10^9$
4	4.10869E8	$L4=0.410869 \cdot 10^9$
5	6.20892E11	$C1=0.620892 \cdot 10^{12}$
6	6.66837E11	$C2=0.666837 \cdot 10^{12}$
7	6.10992E11	$C3=0.610992 \cdot 10^{12}$
8	7.0973E7	$L5=0.070973 \cdot 10^9$
9	4.454E7	$L6=0.044540 \cdot 10^9$
10	1.59E7	$L7=0.015900 \cdot 10^9$

Слика 58. Вредности симбола са слике 57.



Слика 59. Амплитудски одзив филтра са слике 57. WIPL-D Microwave.

Упоредивањем слика 53, 56 и 59 и слика 52 и 54 види се да се прорачун добијен пакетом LCsinteza у потпуности слаже са шемом филтра са идеалним елементима коју прави софтвер Filter Solutions.

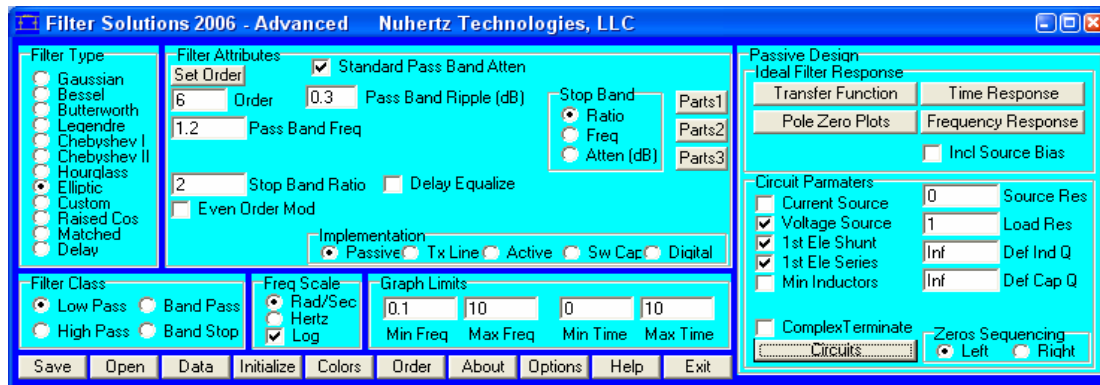
Пример 11. Једноструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра шестог реда.

Пакет LCsinteza, Filter Solutions, PSpice, WIPL-D Microwave.

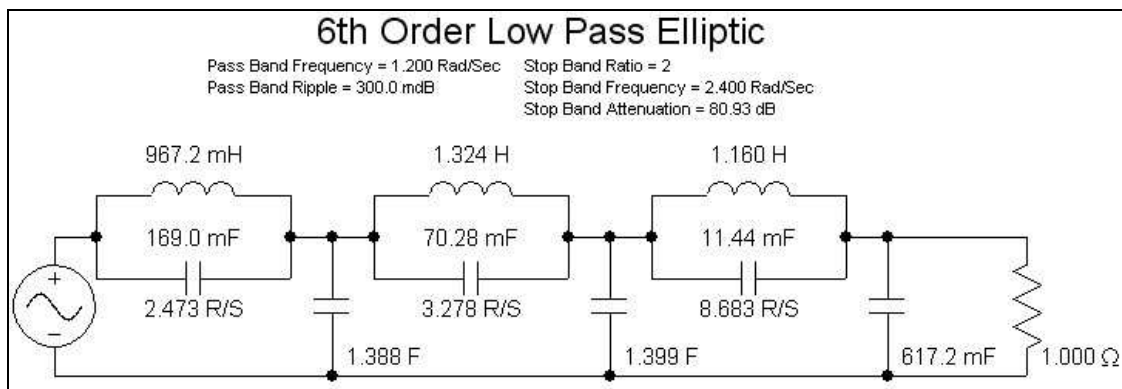
Нека је одабрана елиптичка апроксимација шестог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 0 ($R_g = 0 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$), Pass Band Frequency је 1.2 rad/s, Stop Band Ratio је 2, и Pass Band Ripple је 0.3 dB.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати LC филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима PSpice и WIPL-D Microwave.

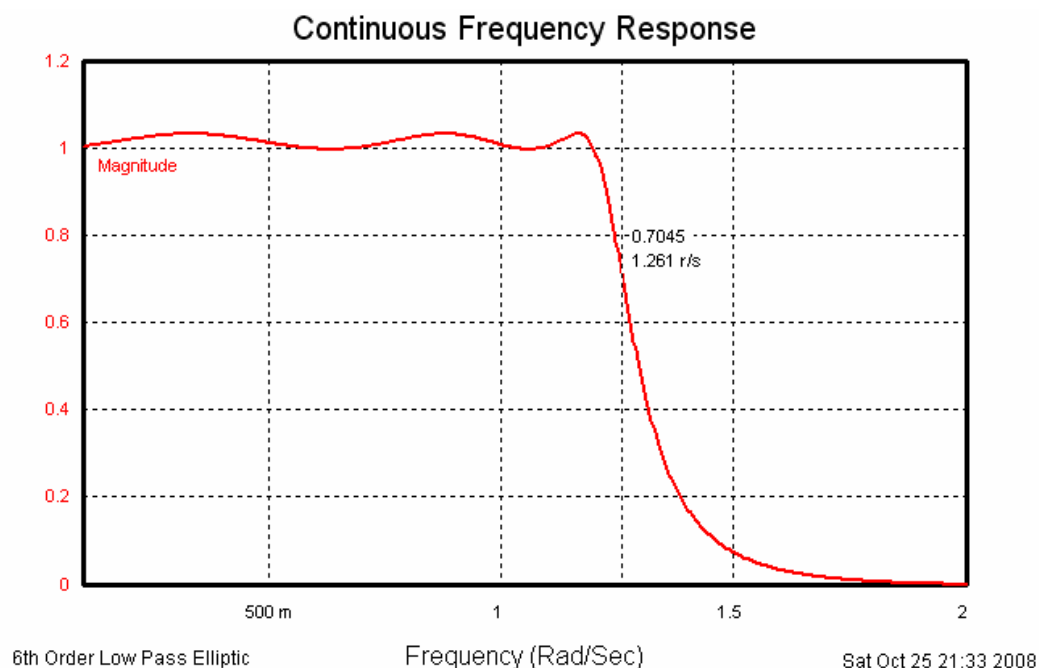
На слици 60 је приказана спецификација филтра, док је на слици 61 приказана његова шема са идеалним елементима. На слици 62 је амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 63. Слика 64 приказује шему филтра у програму PSpice, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 65 је амплитудски одзив филтра који је добијен у PSpice-у, а приказан у MATLAB-овом прозору за графичко представљање резултата. На слици 66 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave, а на слици 67 су вредности симбола коришћене у програму WIPL-D Microwave. На слици 68 је амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave.



Слика 60. Спецификација елиптичког филтра шестог реда. Filter Solutions.



Слика 61. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 60. Filter Solutions.



Слика 62. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 60. Filter Solutions.

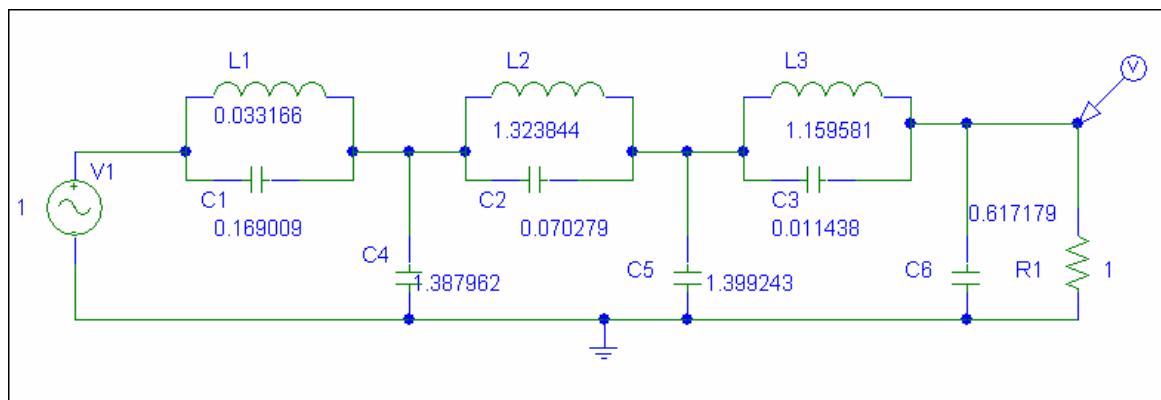
LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

Z0[Ohm] Rg[Ohm] R0[Ohm]
 50.000000 0.000000 1.000000

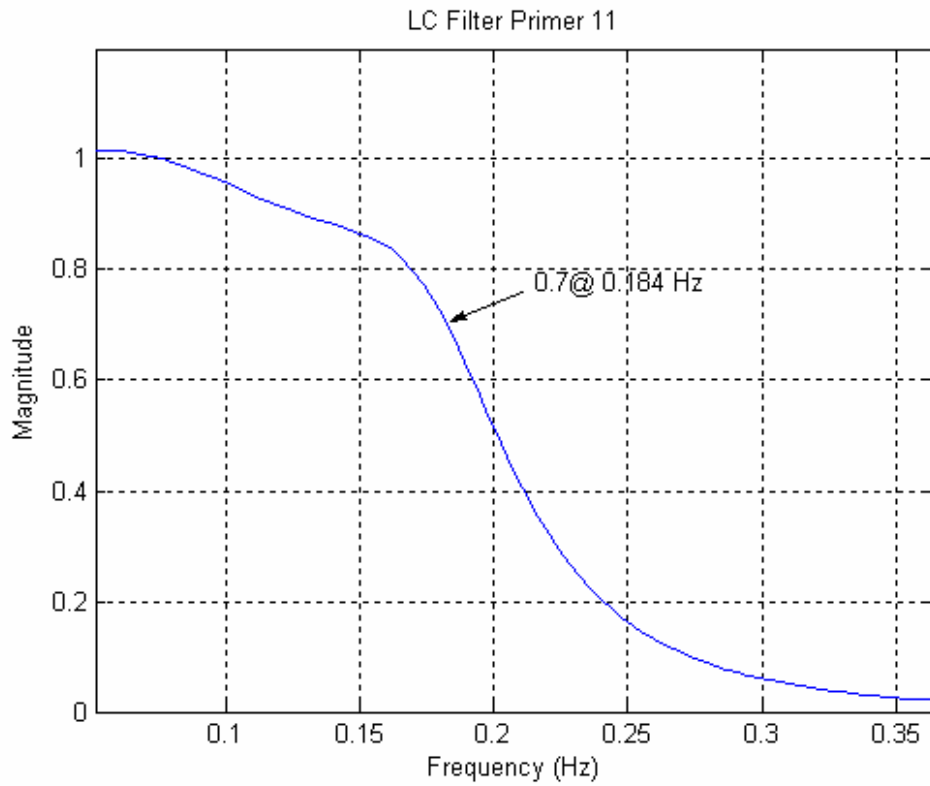
Shema sa idealnim elementima 1

tip	sastav	L [H]	C [F]
1	1	0.000000	0.617179
0	3	1.159581	0.011438
1	1	0.000000	1.399243
0	3	1.323844	0.070279
1	1	0.000000	1.387962
0	3	0.033166	0.169009

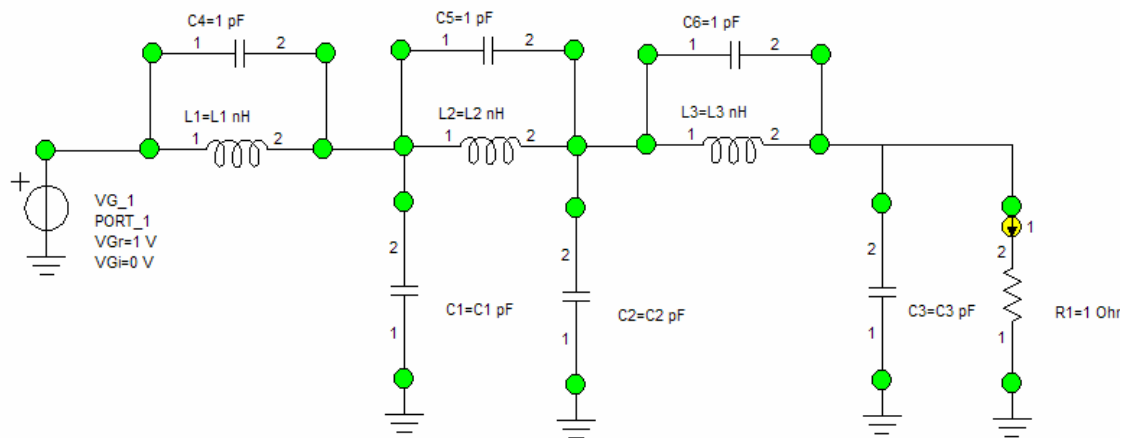
Слика 63. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 60. Пакет LCsinteza.



Слика 64. Шема филтра према прорачуну са слике 63. PSpice.



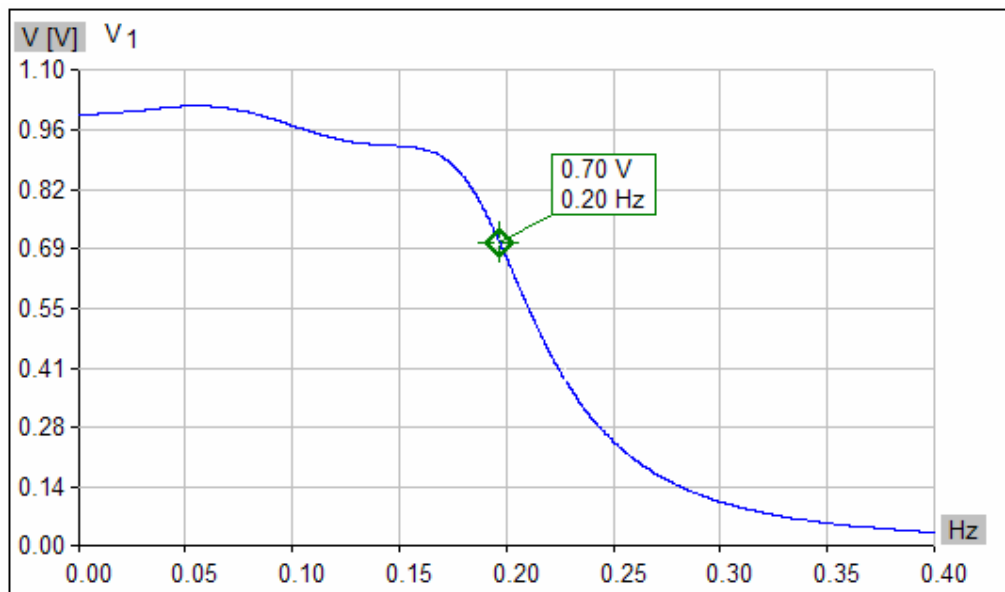
Слика 65. Амплитудски одзив филтра са слике 64. PSpice, MATLAB.



Слика 66. Шема филтра према прорачуну са слике 63. WIPL-D Microwave.

Symbols		
	Symbol	
1	3.3166E7	$L1=0.033166 \cdot 10^9$
2	1.323844E9	$L2=1.323844 \cdot 10^9$
3	1.159581E9	$L3=1.159581 \cdot 10^9$
4	1.387962E12	$C1=1.387962 \cdot 10^{12}$
5	1.399243E12	$C2=1.399243 \cdot 10^{12}$
6	6.17179E11	$C3=0.617179 \cdot 10^{12}$
7	1.69009E11	$C4=0.169009 \cdot 10^{12}$
8	7.0279E10	$C5=0.070279 \cdot 10^{12}$
9	1.1438E10	$C6=0.011438 \cdot 10^{12}$

Слика 67. Вредности симбола са слике 66.



Слика 68. Амплитудски одзив филтра са слике 66. WIPL-D Microwave.

Упоређивањем слика 62, 65 и 68 и слика 61 и 63 се види да се прорачун добијен пакетом LCsinteza разликује од прорачуна добијеног помоћу програма Filter Solutions. Разлика у прорачуну је у вредности првог калема до генератора, тј. калема у осцилаторном колу до генератора.

У примерима 7-11 пакет LCsinteza синтетише једноструко затворене мреже. Коментар за све случајеве синтезе је био да се резултати програма Filter Solutions и пакета LCsinteza, у свим наведеним примерима (осим у примеру 11), добро слажу. Може се закључити да добијање шеме са идеалним елементима из задате функције преноса једноструко затворених филтара није претерано нумерички захтевно. То се могло претпоставити јер функције мреже код датих филтара не подлежу нумеричким трансформацијама пре прорачуна LC елемената, већ само бројилац и именилац функције мреже (који су дати у форми полинома) подлежу структурним манипулацијама.

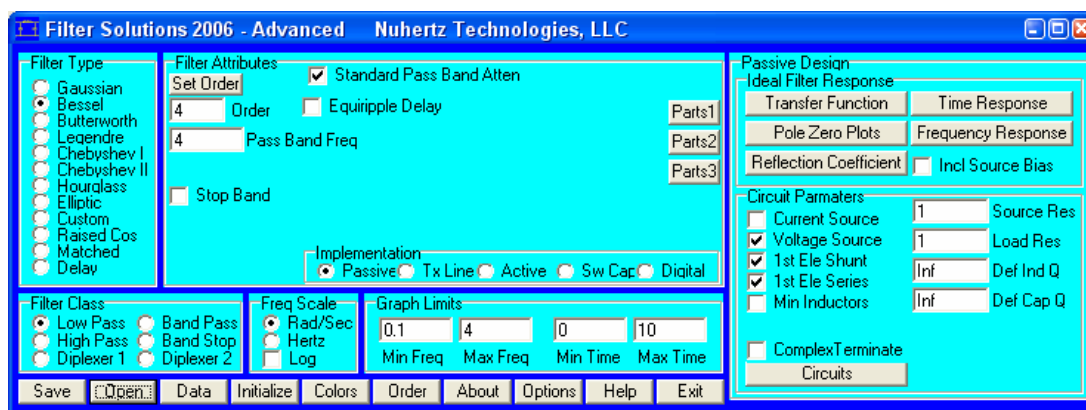
Пример 11 приказује синтезу филтра парног реда. За пасивне филтре парног реда је карактеристично да се код двоструко затворених мора вршити трансформација коефицијента рефлексије да би се добила LC шема. Код једноструко затворених филтара то није случај.

Пример 12. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Беселовог филтра. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.

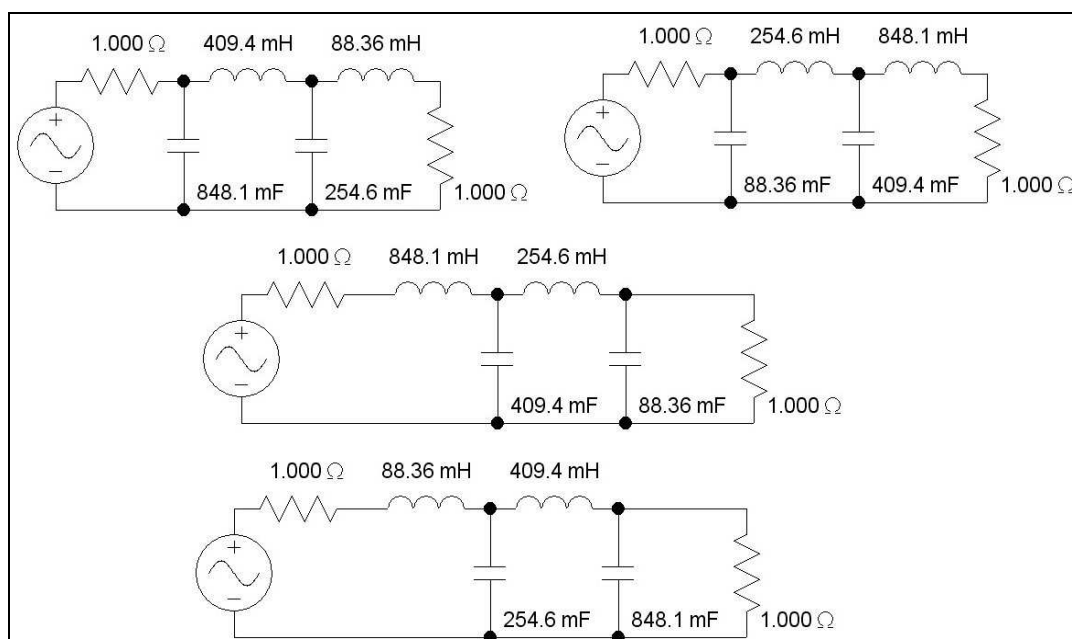
Нека је одабрана Беселова апроксимација четвртог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1\Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1\Omega$) и Pass Band Frequency је 4 rad/s.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати LC филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave.

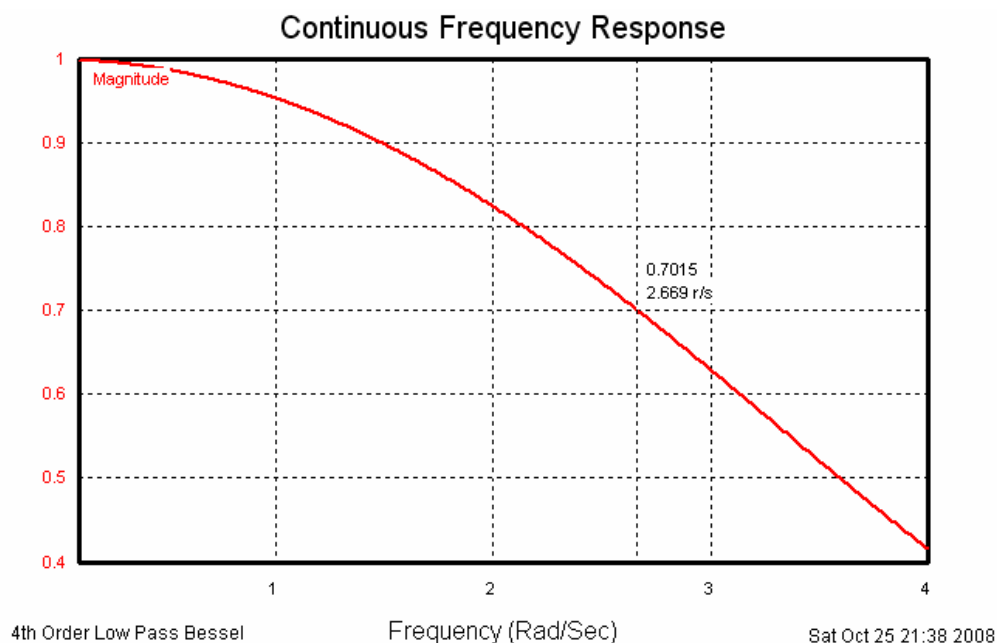
На слици 69 је приказана спецификација филтра, док је на слици 70 приказана његова шема са идеалним елементима. На слици 71 је амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 72. Слика 73 приказује шему филтра у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 74 је амплитудски одзив филтра који је добијен помоћу MWO-а. На слици 75 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave, а на слици 76 су вредности симбола коришћене у програму WIPL-D Microwave. Слика 77 приказује амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave.



Слика 69. Спецификација Беселовог филтра четвртог реда. Filter Solutions.



Слика 70. Шеме са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 69. Filter Solutions.



Слика 71. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 69. Filter Solutions.

```

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

Z0[Ohm]    Rg[Ohm]    R0[Ohm]
50.000000  1.000000  1.000000

Shema sa idealnim elementima 1
tip  sastav      L [H]    C [F]
0     0           0.848146  0.000000
1     1           0.000000  0.409432
0     0           0.254599  0.000000
1     1           0.000000  0.088365

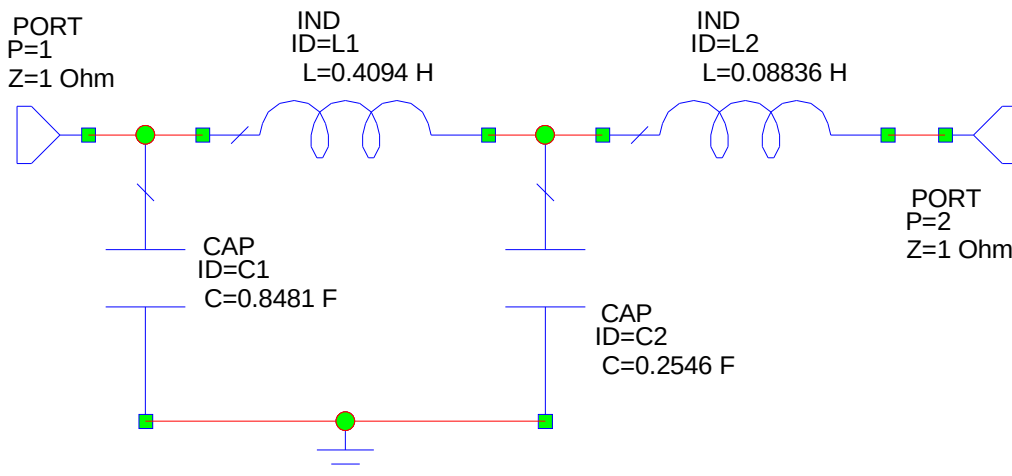
Shema sa idealnim elementima 2
tip  sastav      L [H]    C [F]
1     1           0.000000  0.848146
0     0           0.409432  0.000000
1     1           0.000000  0.254599
0     0           0.088365  0.000000

Shema sa idealnim elementima 3
tip  sastav      L [H]    C [F]
1     1           0.000000  0.088365
0     0           0.254599  0.000000
1     1           0.000000  0.409432
0     0           0.848146  0.000000

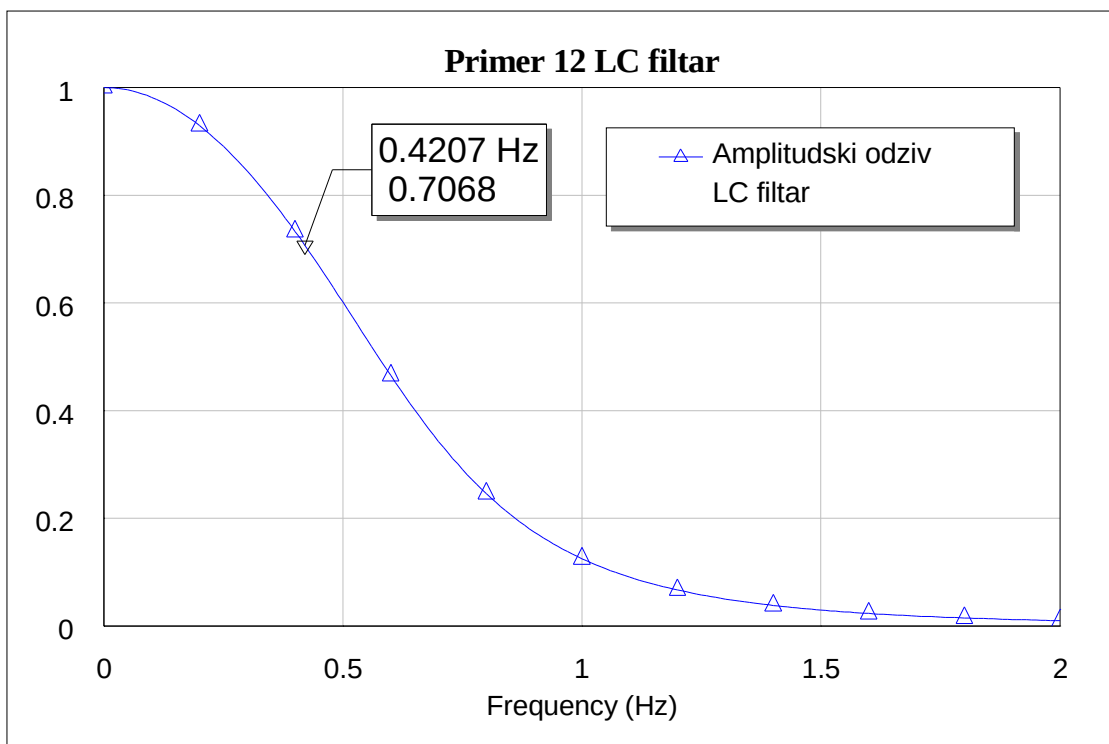
Shema sa idealnim elementima 4
tip  sastav      L [H]    C [F]
0     0           0.088365  0.000000
1     1           0.000000  0.254599
0     0           0.409432  0.000000
1     1           0.000000  0.848146

```

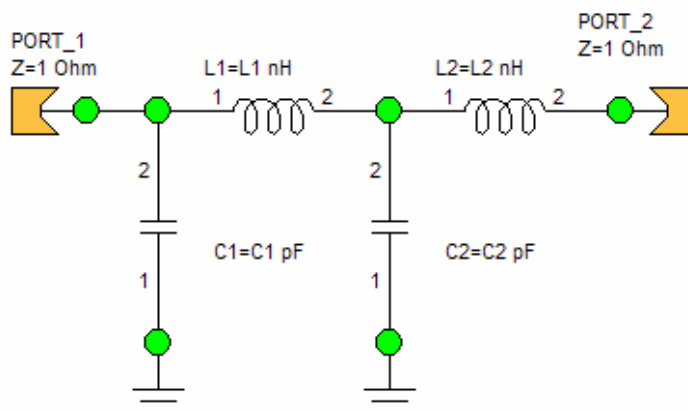
Слика 72. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 69. Пакет LCsinteza.



Слика 73. Шема филтра према прорачуну са слике 72. Microwave Office.



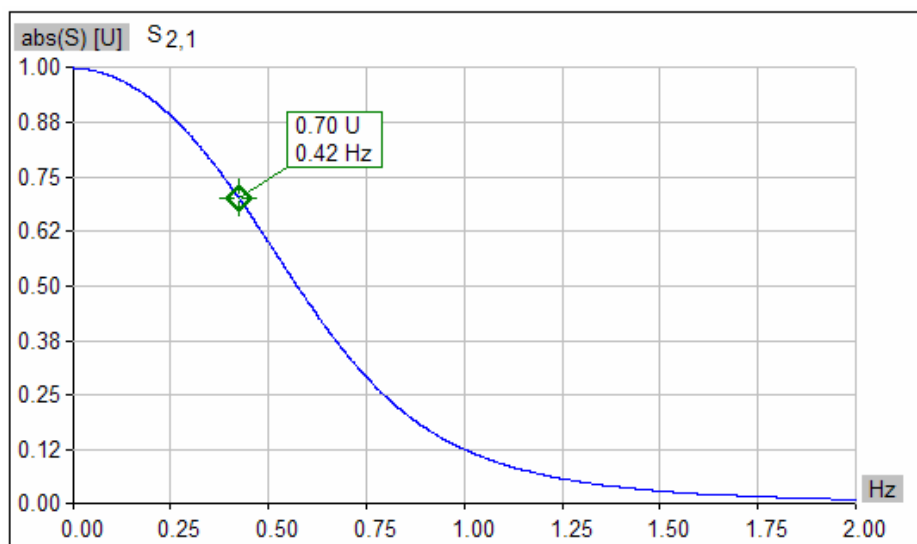
Слика 74. Амплитудски одзив филтра са слике 73. Microwave Office.



Слика 75. Шема филтра према прорачуну са слике 72. WIPL-D Microwave.

Symbols		
	Symbol	
1	1	N=1
2	4.094E8	$L1=0.4094 \cdot 10^9 / N$
3	8.836E7	$L2=0.08836 \cdot 10^9 / N$
4	8.481E11	$C1=0.8481 \cdot 10^{12} / N$
5	2.546E11	$C2=0.2546 / N \cdot 10^{12}$

Слика 76. Вредности симбола са слике 75.



Слика 77. Амплитудски одзив филтра са слике 75. WIPL-D Microwave.

Упоредивањем слика 71, 74 и 77 и слика 70 и 72, види се да се прорачун добијен пакетом LCsinteza у потпуности слаже са шемом филтра са идеалним елементима коју прави професионални, комерцијални софтвер Filter Solutions.

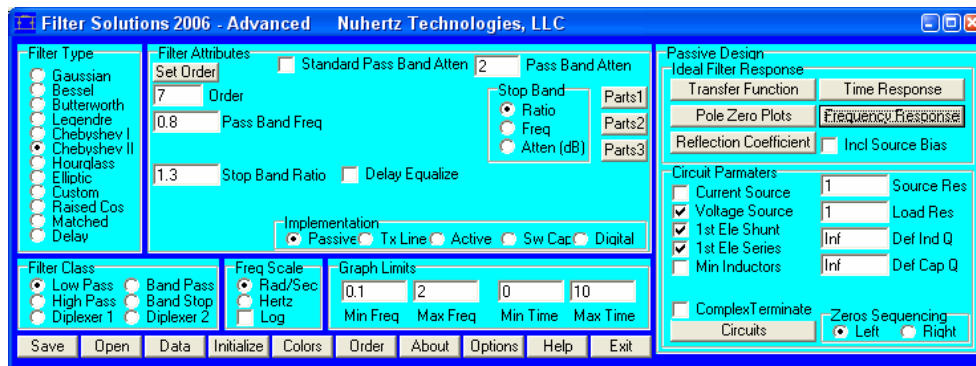
Овај пример илуструје вишезначност синтезе филтара (у овом случају, двоструко затворених). За приказани Беселов филтар постоје четири шеме које успешно проналази и LCsinteza.

Пример 13. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Чебишевљевог филтра. Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.

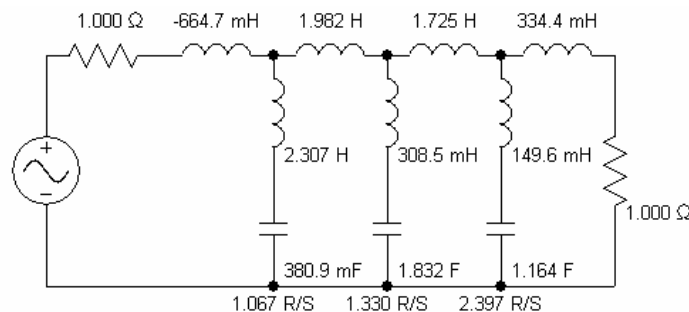
Нека је одабрана Чебишевљева апроксимација седмог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Pass Band Attenuation је 2 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$), Pass Band Frequency је 0.8 rad/s и Stop Band Ratio је 1.3.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати LC филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave.

На слици 78 је приказана спецификација филтра, док су на сликама 79 и 80 његове шеме са идеалним елементима. На слици 81 је амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 82. Слика 83 приказује шему филтра у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 84 је амплитудски одзив филтра који је добијен помоћу MWO-а. На слици 85 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave, а на слици 86 су вредности симбола коришћене у програму WIPL-D Microwave. Слика 87 приказује амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave.



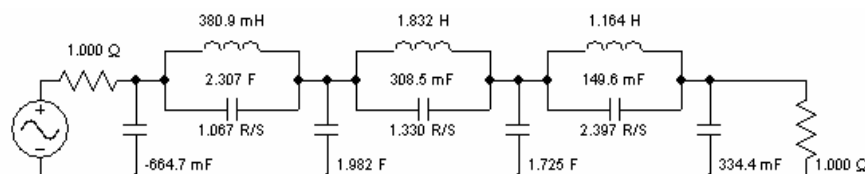
Слика 78. Спецификација Чебишевљевог филтра седмог реда. Filter Solutions



WARNING: Contains Negative Elements

Sat Aug 30 03:44:36 2008

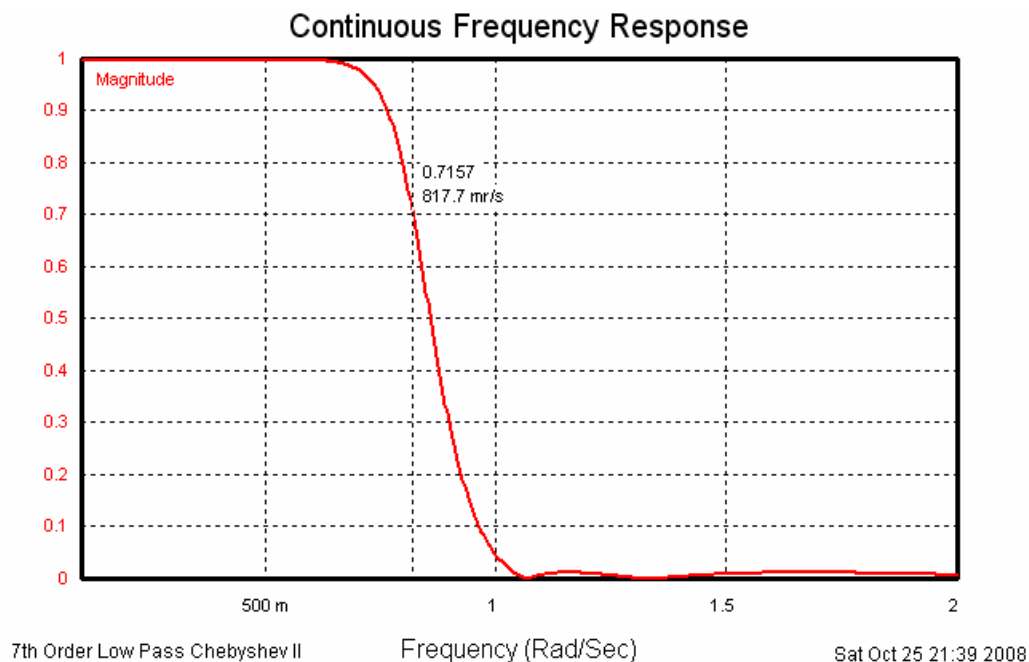
Слика 79. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 78. Filter Solutions.



WARNING: Contains Negative Elements

Sat Aug 30 03:44:36 2008

Слика 80. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 78. Filter Solutions.



Слика 81. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 78. Filter Solutions.

```

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

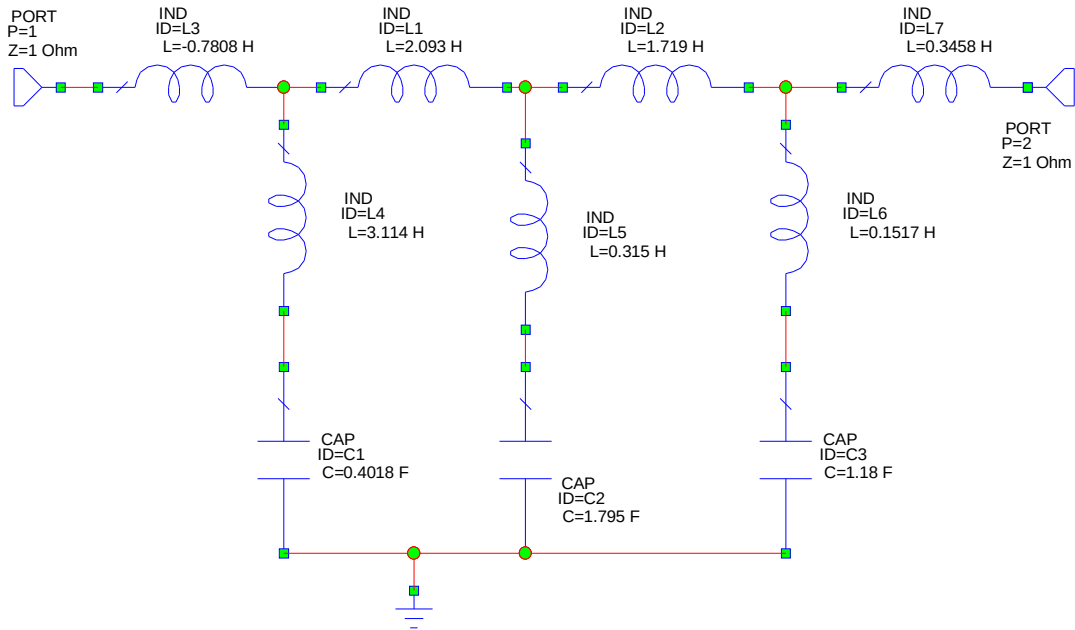
Z0[Ohm]    Rg[Ohm]    R0[Ohm]
50.000000  1.000000  1.000000

Shema sa idealnim elementima 1
tip    sastav      L [H]    C [F]
1      1          0.000000  0.345797
0      3          1.180398  0.151670
1      1          0.000000  1.718975
0      3          1.794554  0.314971
1      1          0.000000  2.092924
0      3          0.401844  3.113872
1      1          0.000000 -0.780844

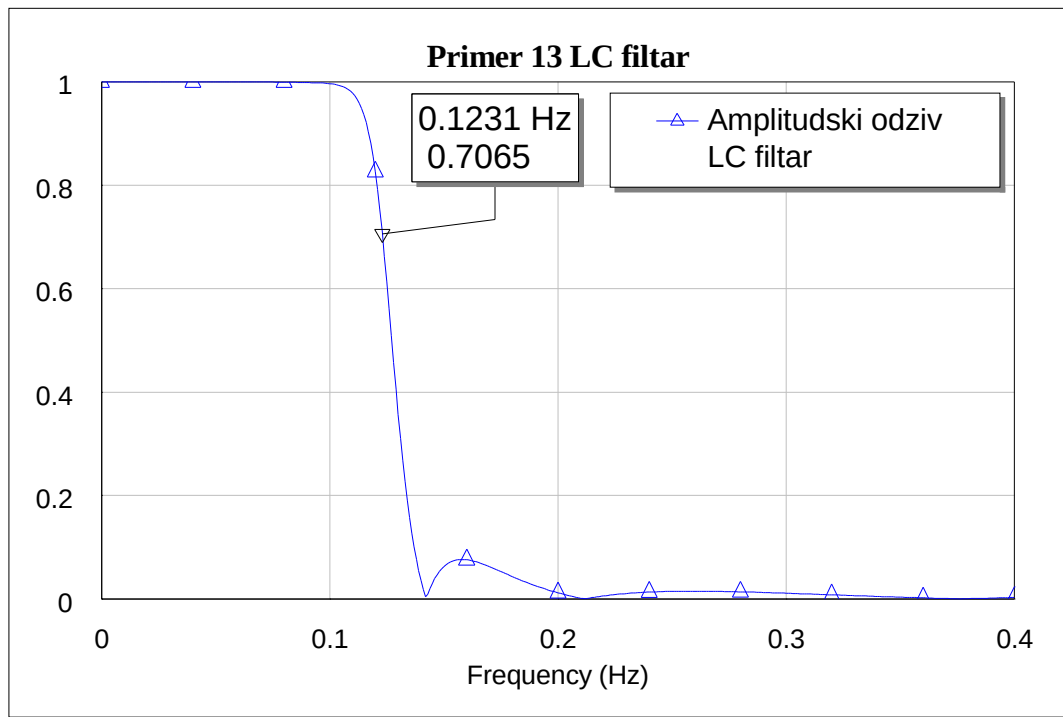
Shema sa idealnim elementima 2
tip    sastav      L [H]    C [F]
0      0          0.345797  0.000000
1      2          0.151670  1.180398
0      0          1.718975  0.000000
1      2          0.314971  1.794554
0      0          2.092924  0.000000
1      2          3.113872  0.401844
0      0          -0.780844  0.000000

```

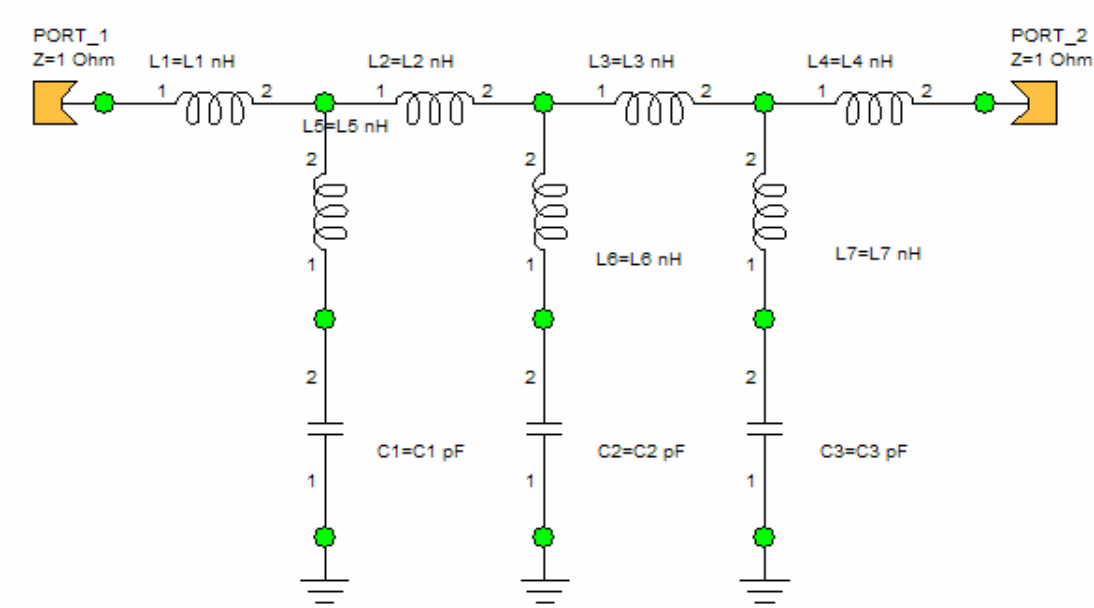
Слика 82. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 78. Пакет LCsinteza.



Слика 83. Шема филтра према прорачуну са слике 82. Microwave Office.



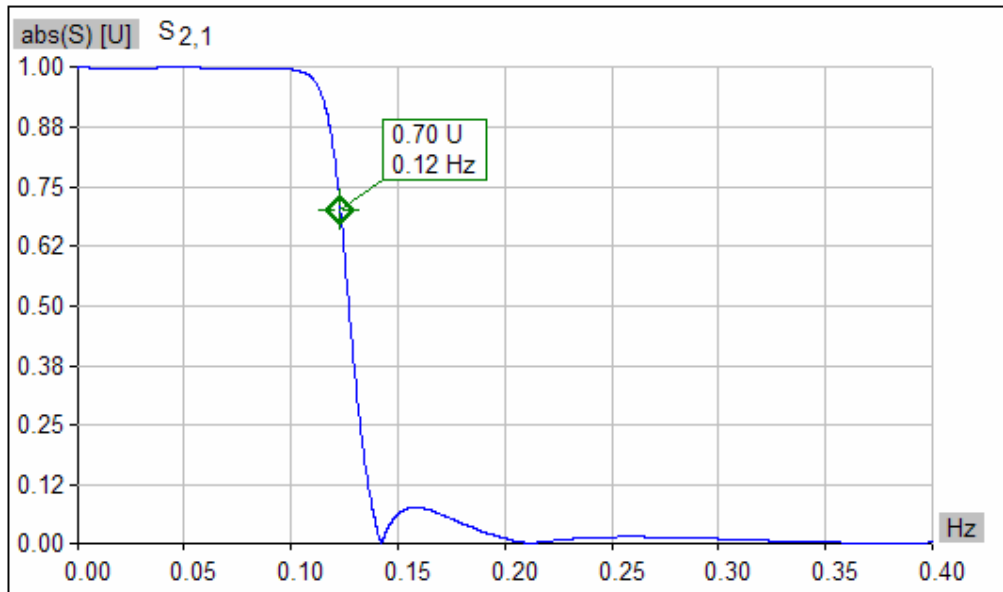
Слика 84. Амплитудски одзив филтра са слике 83. Microwave Office.



Слика 85. Шема филтра према прорачуну са слике 82. WIPL-D Microwave.

Symbols		
	Symbol	
1	1	N=1
2	-7.80844E8	L1=-0.780844*10^9/N
3	2.092924E9	L2=2.092924*10^9/N
4	1.71897E9	L3=1.71897*10^9/N
5	3.45797E8	L4=0.345797*10^9/N
6	4.01844E11	C1=0.401844*10^12/N
7	1.794554E12	C2=1.794554*10^12/N
8	1.180398E12	C3=1.180398*10^12/N
9	3.113872E9	L5=3.113872*10^9/N
10	3.1497E8	L6=0.31497*10^9/N
11	1.5167E8	L7=0.151670*10^9/N

Слика 86. Вредности симбола са слике 85.



Слика 87. Амплитудски одзив филтра са слике 85. WIPL-D Microwave.

Упоређивањем слика 81, 83 и 87 и слика 79, 80 и 82 се види да прорачун добијен пакетом LCsinteza одступа и преко 20% у односу на прорачун извршен програмом Filter Solutions. Стога се може закључити да је филтар који се синтетише из Чебишевљево (друге) апроксимације нумерички нестабилан. Ипак, лествичасте мреже су мало осетљиве на промену вредности елемената, па су, без обзира на грешку у прорачуну, амплитудски одзиви дати на сликама 87, 84 и 81 приближни.

LC шема овог филтра садржи негативне елементе.

Пример 14. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра деветог реда.

Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.

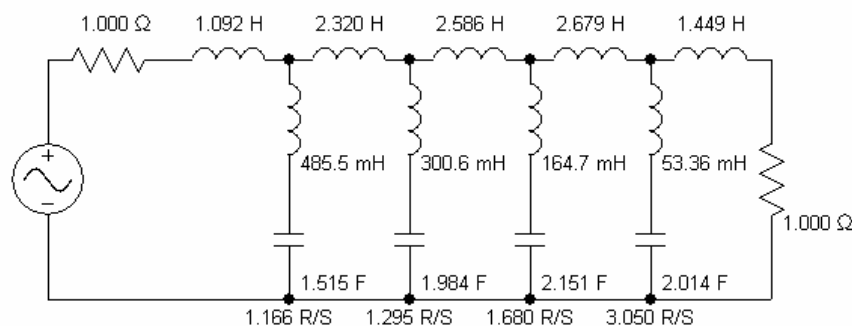
Нека је одабрана елиптичка апроксимација деветог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Pass Band Attenuation је 1 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$), Pass Band Frequency је 0.72 rad/s, Stop Band Ratio је 1.6 и Pass Band Ripple је 0.05.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати LC филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave.

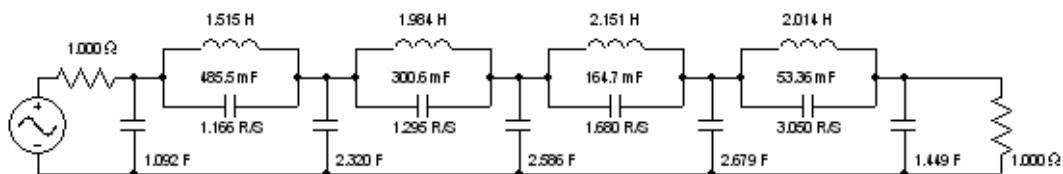
На слици 88 је приказана спецификација филтра, док су на сликама 89 и 90 његове шеме са идеалним елементима. На слици 91 је амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 92. Слика 93 приказује шему филтра у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 94 је амплитудски одзив филтра који је добијен помоћу MWO-а. На слици 95 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave, а на слици 96 су вредности симбола коришћене у програму WIPL-D Microwave. Сlike 97 и 98 приказују амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave, нацртане на основу вредности за 12 и 100 фреквенција, респективно.



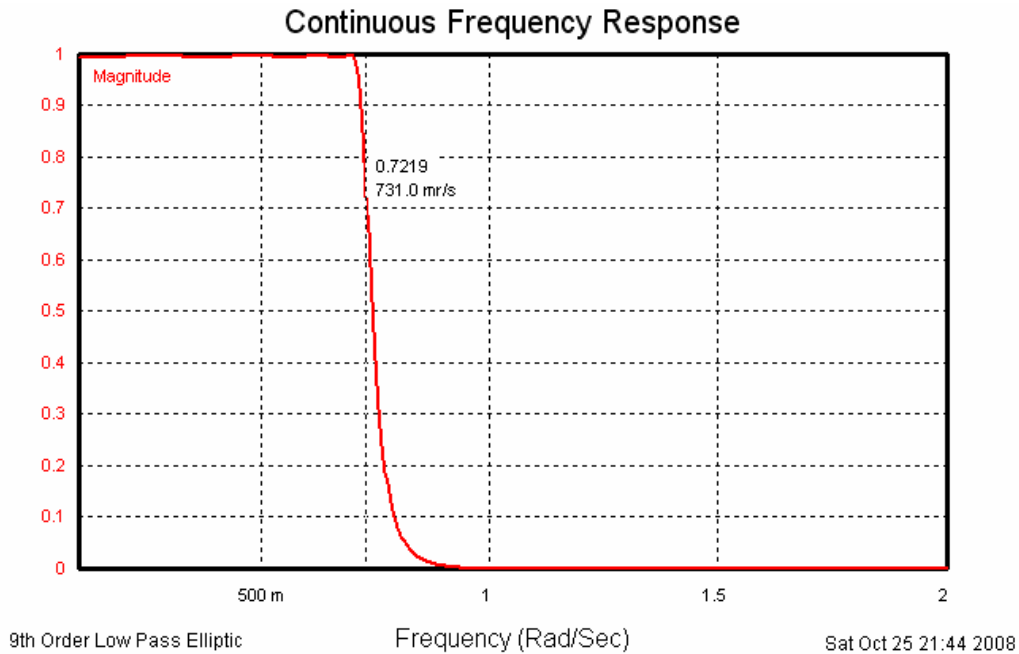
Слика 88. Спецификација елиптичког филтра деветог реда. Filter Solutions.



Слика 89. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 88. Filter Solutions.



Слика 90. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 88. Filter Solutions.



Слика 91. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 88. Filter Solutions.

```

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

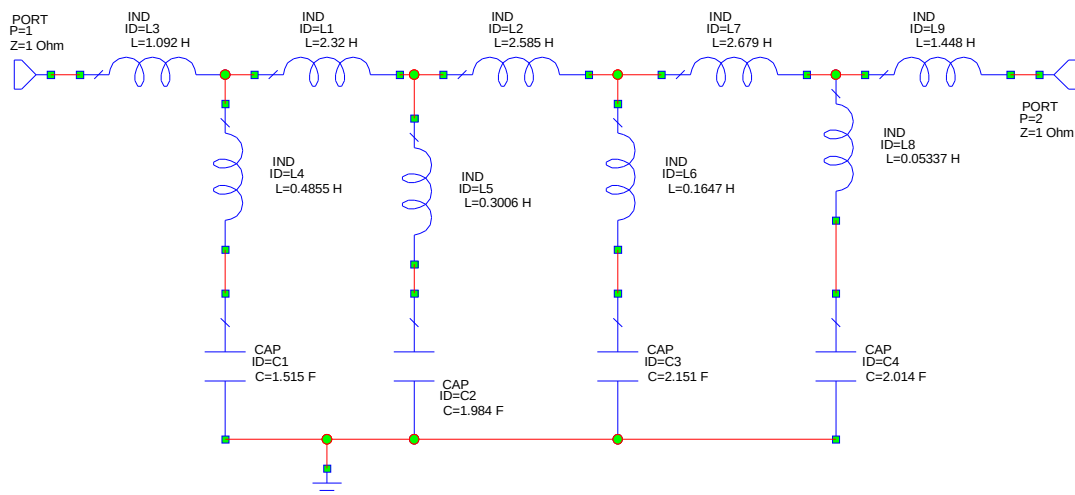
Z0[Ohm]    Rg[Ohm]    R0[Ohm]
50.000000  1.000000  1.000000

Shema sa idealnim elementima 1
tip    sastav      L [H]    C [F]
1      1          0.000000  1.448444
0      3          2.013976  0.053365
1      1          0.000000  2.678824
0      3          2.151265  0.164719
1      1          0.000000  2.585481
0      3          1.984492  0.300596
1      1          0.000000  2.319979
0      3          1.514871  0.485533
1      1          0.000000  1.092388

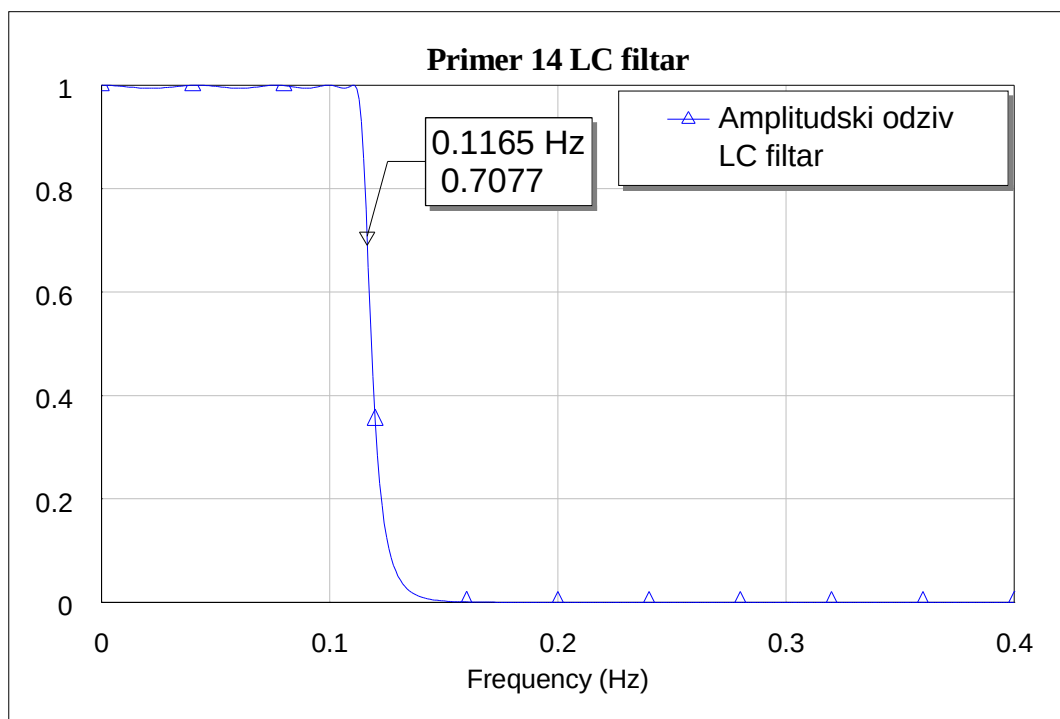
Shema sa idealnim elementima 2
tip    sastav      L [H]    C [F]
0      0          1.448444  0.000000
1      2          0.053365  2.013976
0      0          2.678824  0.000000
1      2          0.164719  2.151265
0      0          2.585481  0.000000
1      2          0.300596  1.984492
0      0          2.319979  0.000000
1      2          0.485533  1.514871
0      0          1.092388  0.000000

```

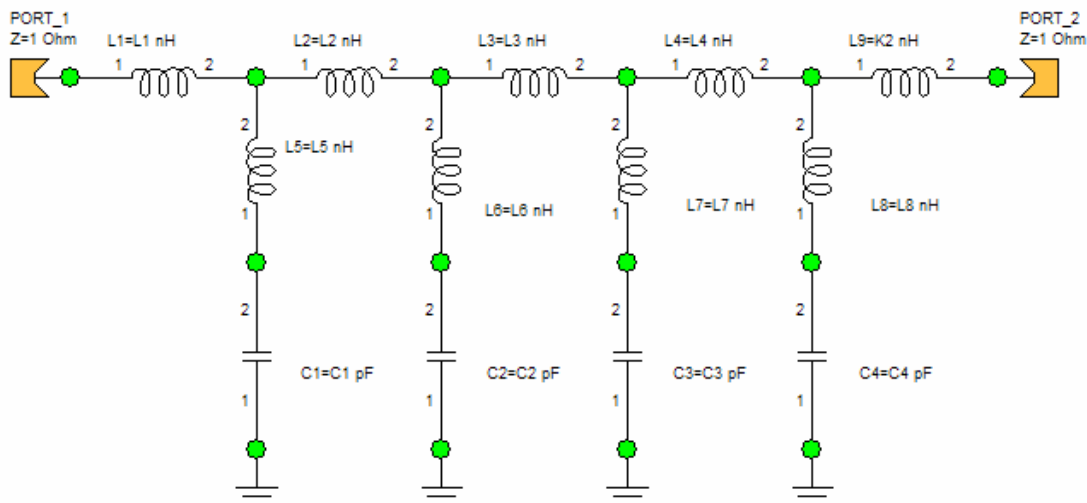
Слика 92. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 88. Пакет LCsinteza.



Слика 93. Шема филтра према прорачуну са слике 92. Microwave Office.



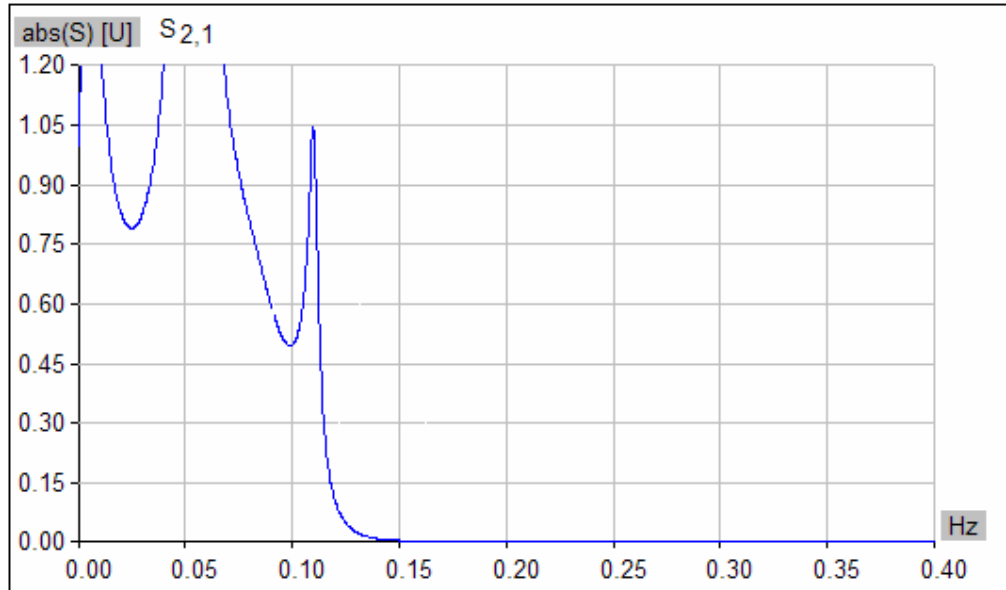
Слика 94. Амплитудски одзив филтра са слике 93. Microwave Office.



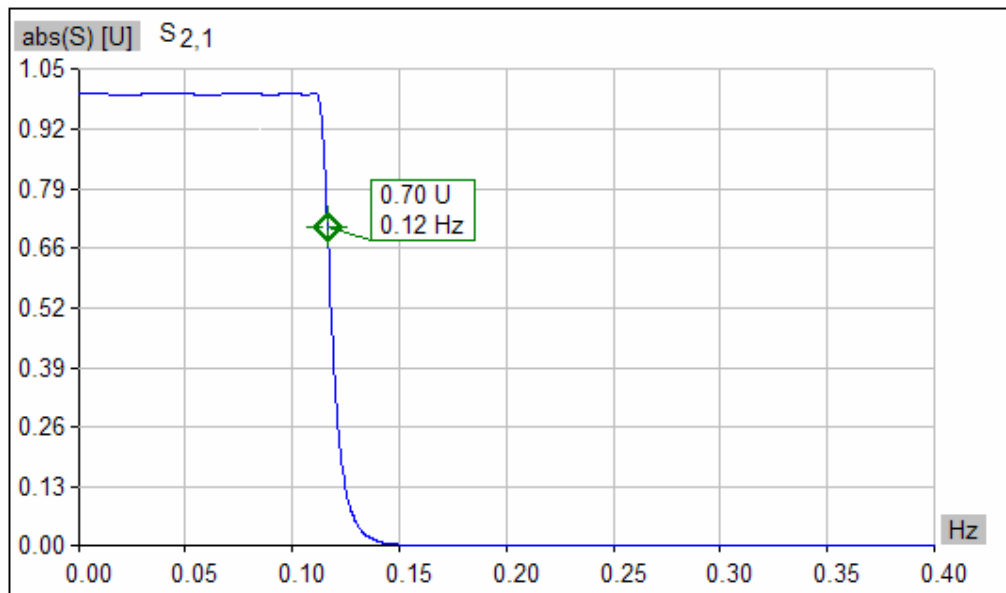
Слика 95. Шема филтра према прорачуну са слике 92. WIPL-D Microwave.

Symbols		
	Symbol	
1	1	N=1
2	1.092388E9	L1=1.092388*10 ⁹ /N
3	2.319979E9	L2=2.319979*10 ⁹ /N
4	2.585481E9	L3=2.585481*10 ⁹ /N
5	2.678824E9	L4=2.678824*10 ⁹ /N
6	1.51487E12	C1=1.51487*10 ¹² /N
7	1.984492E12	C2=1.984492*10 ¹² /N
8	2.151265E12	C3=2.151265*10 ¹² /N
9	2.013976E12	C4=2.013976*10 ¹² /N
10	4.85533E8	L5=0.485533*10 ⁹ /N
11	3.00596E8	L6=0.300596*10 ⁹ /N
12	1.448444E9	K2=1.448444*10 ⁹ /N
13	1.64719E8	L7=0.164719*10 ⁹ /N
14	5.3365E7	L8=0.053365*10 ⁹ /N

Слика 96. Вредности симбола са слике 95.



Слика 97. Амплитудски одзив филтра са слике 95. WIPL-D Microwave. 12 фреквенција.



Слика 98. Амплитудски одзив филтра са слике 95. WIPL-D Microwave. 100 фреквенција.

Упоредивањем слика 91, 94 и 98 и слика 89, 90 и 92 види се да се прорачун добијен пакетом LCsinteza у потпуности слаже са шемом филтра са идеалним елементима коју прави софтвер Filter Solutions.

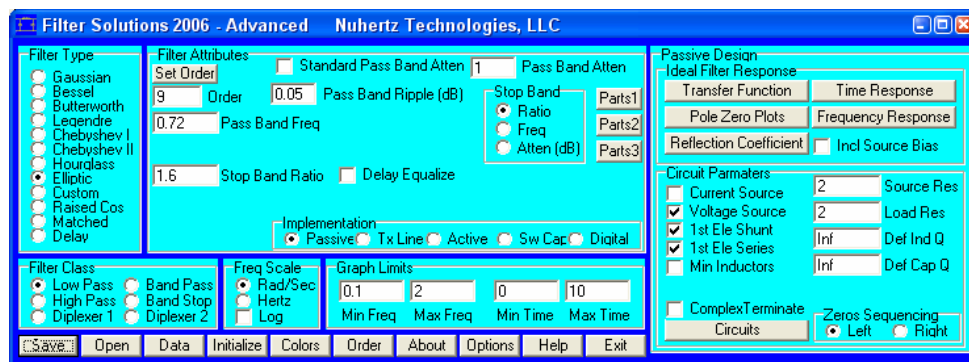
Фреквенцијски одзив на слици 97 је нацртан на основу вредности за 12 фреквенција. Програм за цртање графика у WIPL-D Microwave-у аутоматски користи фитовање да би нацртао график у свим тачкама приказне површине. Уочава се да график на слици 97 значајно одступа од жељене апроксимације. Број тачака треба изабрати тако да корак по фреквенцији буде мањи од растојања локалних екстремума. Препорука је да број фреквенција треба изабрати тако да у пропусном опсегу број фреквенција буде бар два пута већи од реда филтра. У овом случају је произвољно одабрано да број фреквенција буде 100 (слика 98).

Пример 15. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра деветог реда са отпорностима од 2 Ома.
Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.

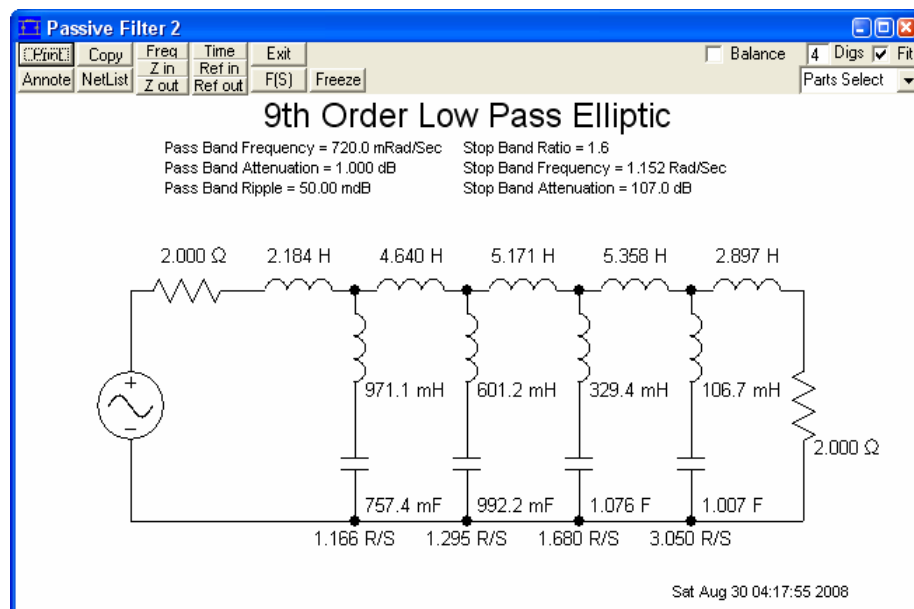
Нека је одабрана елиптичка апроксимација деветог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Pass Band Attenuation је 1 dB, Source Res (Source Resistance) је 2 ($R_g = 2 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 2 ($R_0 = 2 \Omega$), Pass Band Frequency је 0.72 rad/s, Stop Band Ratio је 1.6 и Pass Band Ripple је 0.05.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати LC филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave.

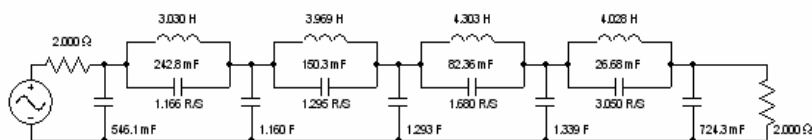
На слици 99 је приказана спецификација филтра, док су на сликама 100 и 101 његове шеме са идеалним елементима. На слици 102 је амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 103. Слика 104 приказује шему филтра у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 105 је амплитудски одзив филтра који је добијен помоћу MWO-а. На слици 106 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave, а на слици 107 су вредности симбола коришћене у програму WIPL-D Microwave. Сlike 108а и 108б приказују амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave, нацртане на основу вредности за 12 и 100 фреквенција, респективно.



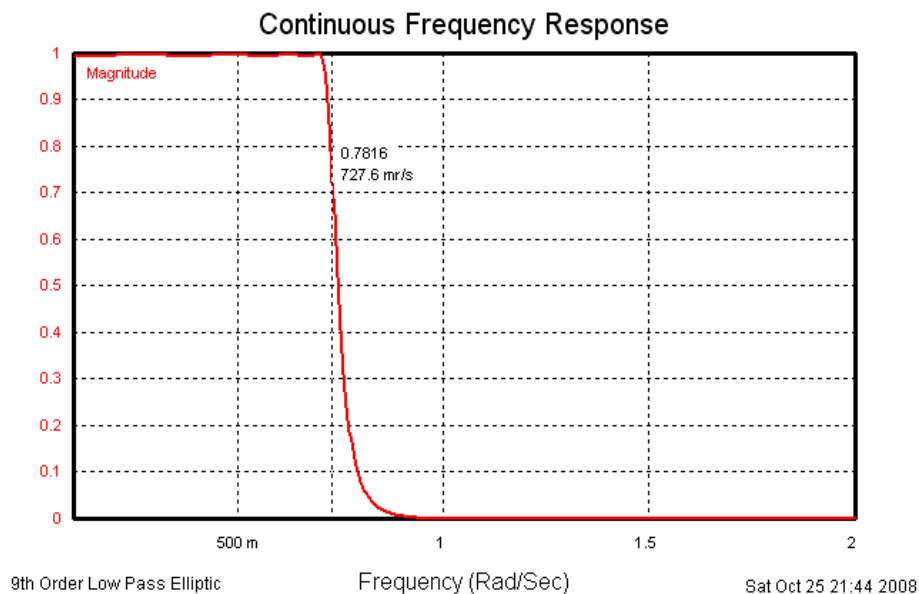
Слика 99. Спецификација елиптичког филтра деветог реда. Filter Solutions.



Слика 100. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 99. Filter Solutions.



Слика 101. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 99. Filter Solutions.



Слика 102. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 99. Filter Solutions.

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

Z0[Ohm] Rg[Ohm] R0[Ohm]
50.000000 2.000000 2.000000

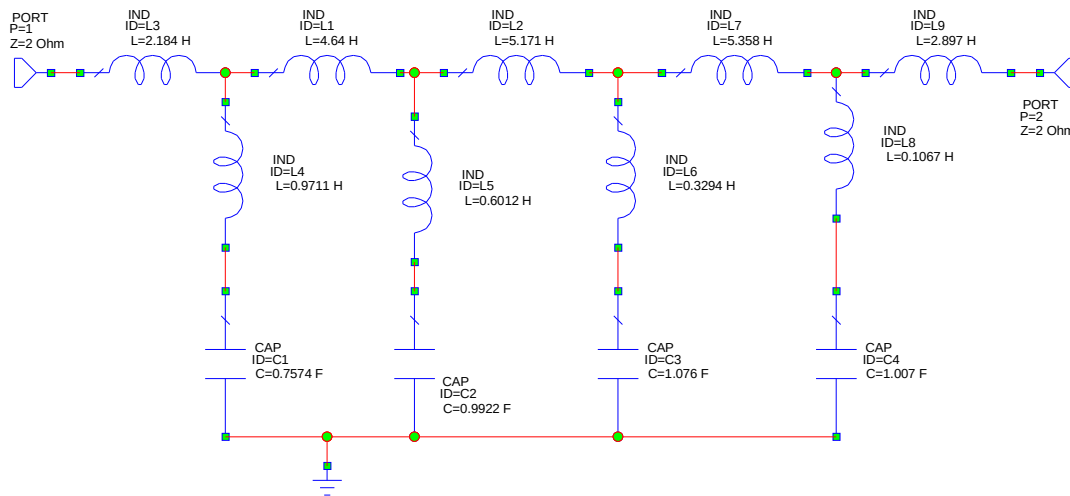
Shema sa idealnim elementima 1

tip	sastav	L [H]	C [F]
1	1	0.000000	0.724324
0	3	4.027915	0.026683
1	1	0.000000	1.339411
0	3	4.302613	0.082358
1	1	0.000000	1.292747
0	3	3.968900	0.150301
1	1	0.000000	1.159979
0	3	3.029771	0.242764
1	1	0.000000	0.546098

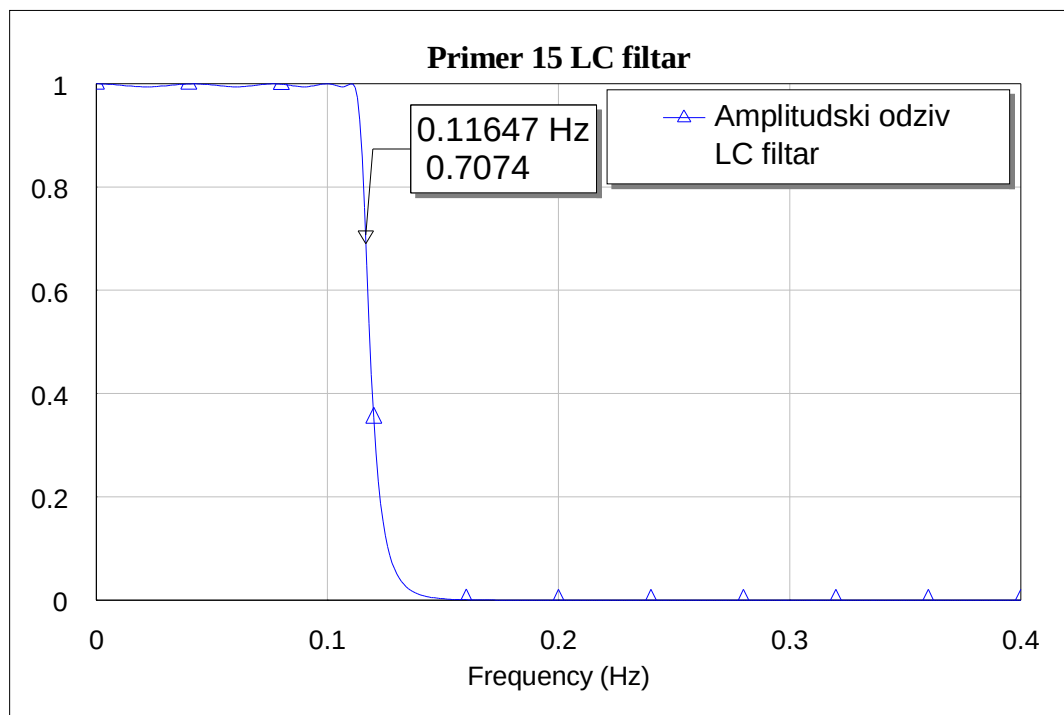
Shema sa idealnim elementima 2

tip	sastav	L [H]	C [F]
0	0	2.897294	0.000000
1	2	0.106731	1.006979
0	0	5.357645	0.000000
1	2	0.329432	1.075653
0	0	5.170990	0.000000
1	2	0.601205	0.992225
0	0	4.639915	0.000000
1	2	0.971056	0.757443
0	0	2.184392	0.000000

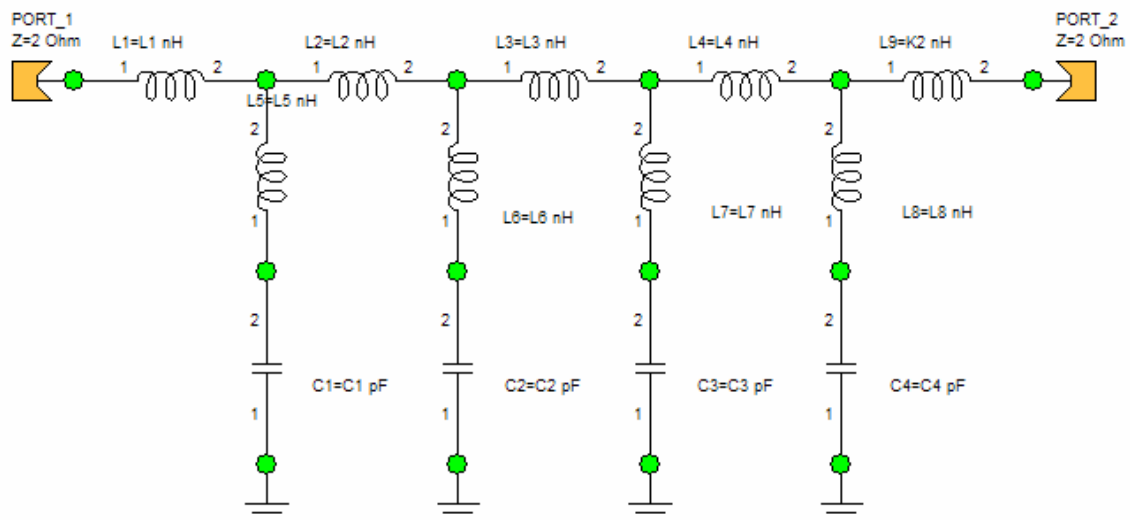
Слика 103. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 99. Пакет LCsinteza.



Слика 104. Шема филтра према прорачуну са слике 103. Microwave Office.



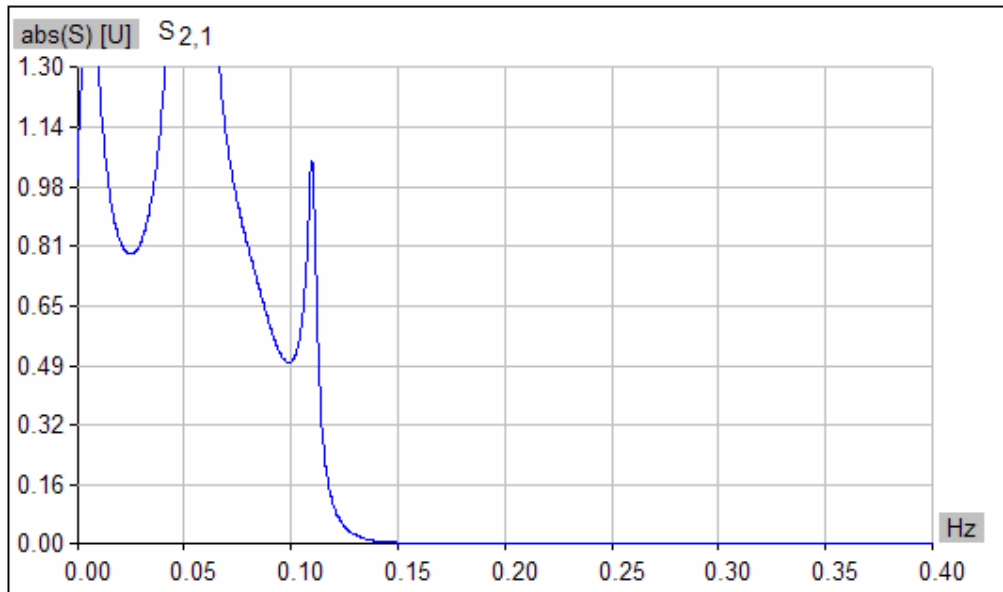
Слика 105. Амплитудски одзив филтра са слике 104. Microwave Office.



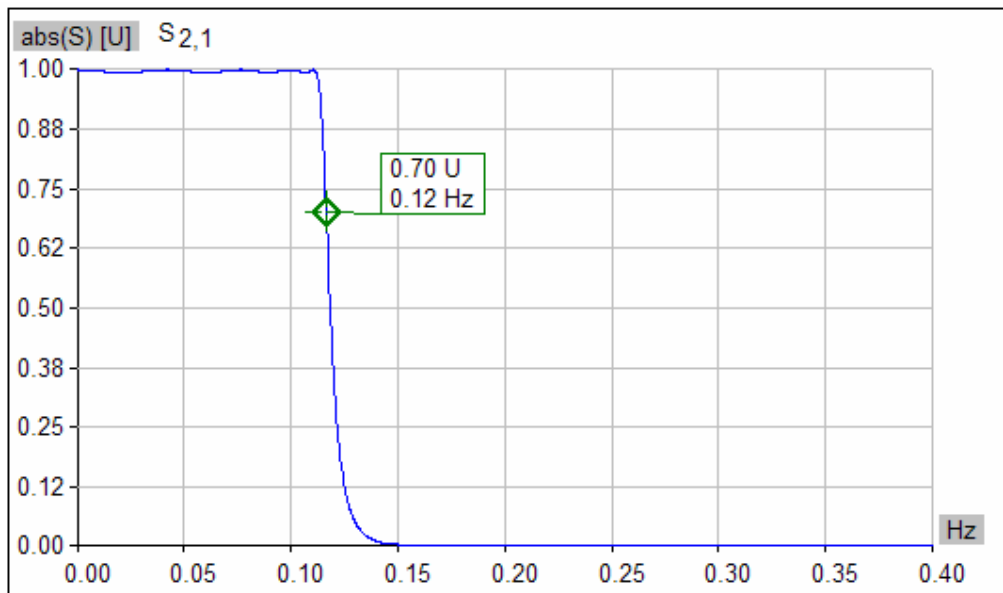
Слика 106. Шема филтра према прорачуну са слике 103. WIPL-D Microwave.

Symbols		
	Symbol	
1	1	N=1
2	2.184776E9	$L1=2*1.092388*10^9/N$
3	4.639958E9	$L2=2*2.319979*10^9/N$
4	5.170962E9	$L3=2*2.585481*10^9/N$
5	5.357648E9	$L4=2*2.678824*10^9/N$
6	7.57435E11	$C1=1.51487*10^{12}/(N^2)$
7	9.92246E11	$C2=1.984492*10^{12}/(N^2)$
8	1.075632E12	$C3=2.151265*10^{12}/(N^2)$
9	1.006988E12	$C4=2.013976*10^{12}/(N^2)$
10	9.71066E8	$L5=2*0.485533*10^9/N$
11	6.01192E8	$L6=2*0.300596*10^9/N$
12	2.896888E9	$K2=2*1.448444*10^9/N$
13	3.29438E8	$L7=2*0.164719*10^9/N$
14	1.0673E8	$L8=2*0.053365*10^9/N$

Слика 107. Вредности симбола са слике 106.



Слика 108а. Амплитудски одзив филтра са слике 106. WIPL-D Microwave. 12 фреквенција.



Слика 108б. Амплитудски одзив филтра са слике 106. WIPL-D Microwave. 100 фреквенција.

Упоредивањем слика 102, 105 и 108б и слика 100, 101 и 103 види се да се прорачун добијен пакетом LСsinteza у потпуности слаже са шемом филтра са идеалним елементима коју прави софтвер Filter Solutions.

Фреквенцијски одзив на слици 108а је нацртан на основу вредности за 12 фреквенција. Програм за цртање графика у WIPL-D Microwave-у аутоматски користи фитовање да би нацртао график у свим тачкама приказне површине. Уочава се да график на слици 108а значајно одступа од жељене апроксимације. Број тачака треба изабрати тако да корак по фреквенцији буде мањи од растојања локалних екстремума. Препорука је да број фреквенција треба изабрати тако да у пропусном опсегу број фреквенција буде бар два пута већи од реда филтра. У овом случају је произвољно одабрано да број фреквенција буде 100 (слика 108б).

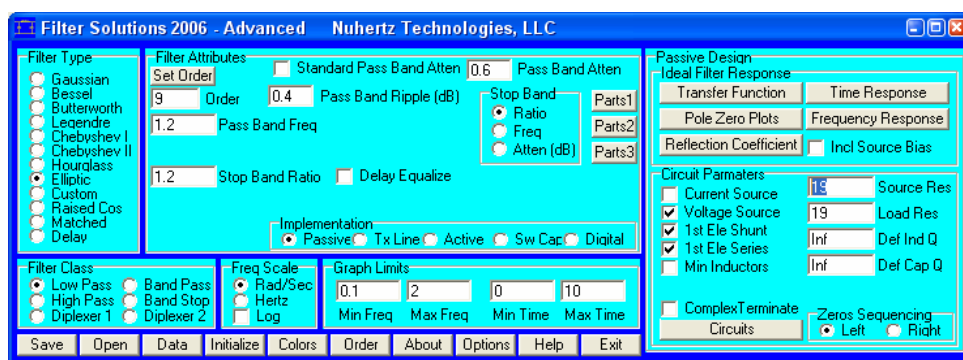
У овом примеру је анализиран случај када је филтар затворен отпорницима који имају једнаке отпорности веће од 1.

Пример 16. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра деветог реда са отпорностима од 19 Ома.
Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.

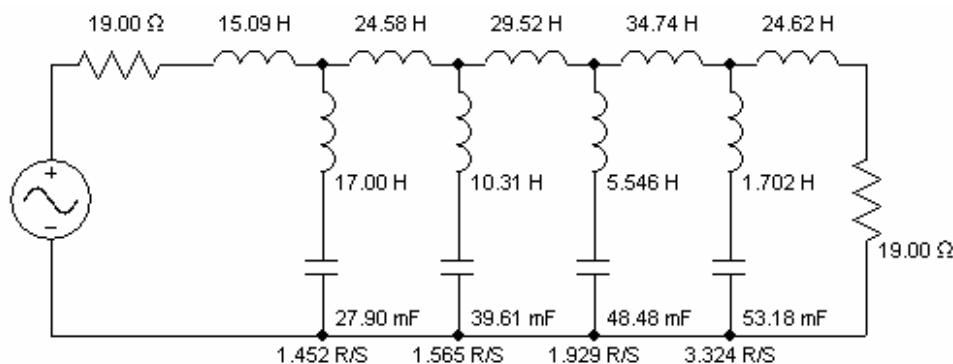
Нека је одабрана елиптичка апроксимација деветог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Pass Band Attenuation је 0.6 dB, Source Res (Source Resistance) је 19 ($R_g = 19 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 19 ($R_0 = 19 \Omega$), Pass Band Frequency је 1.2 rad/s, Stop Band Ratio је 1.2 и Pass Band Ripple је 0.4.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати LC филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave.

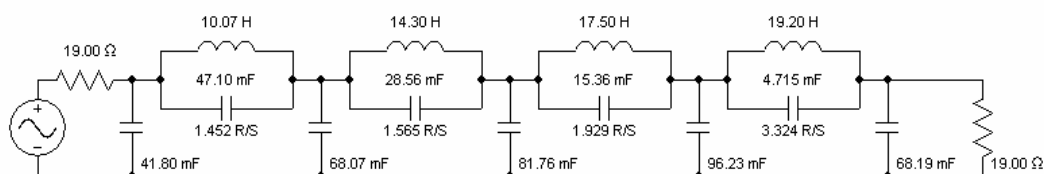
На слици 109 је приказана спецификација филтра, док су на сликама 110 и 111 његове шеме са идеалним елементима. На слици 112 је амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 113. Слика 114 приказује шему филтра у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 115 је амплитудски одзив филтра који је добијен помоћу MWO-а. На слици 116 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave, а на слици 117 су вредности симбола коришћене у програму WIPL-D Microwave. Слика 118 приказује амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave и нацртана је на основу вредности за 100 фреквенција.



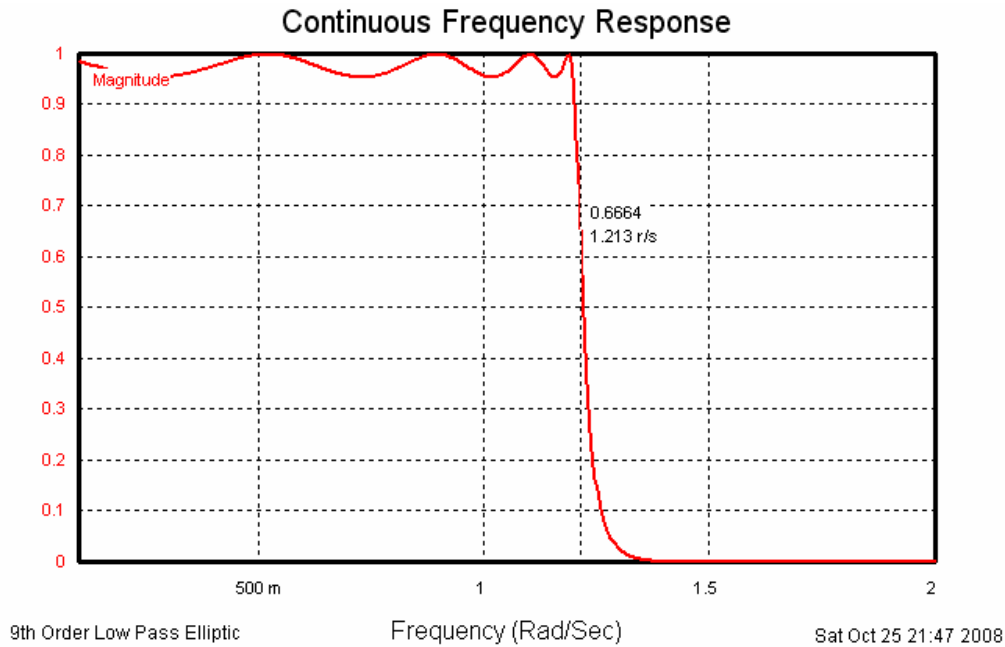
Слика 109. Спецификација елиптичког филтра деветог реда. Filter Solutions.



Слика 110. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 109. Filter Solutions.



Слика 111. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 109. Filter Solutions.



Слика 112. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 109. Filter Solutions.

```

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

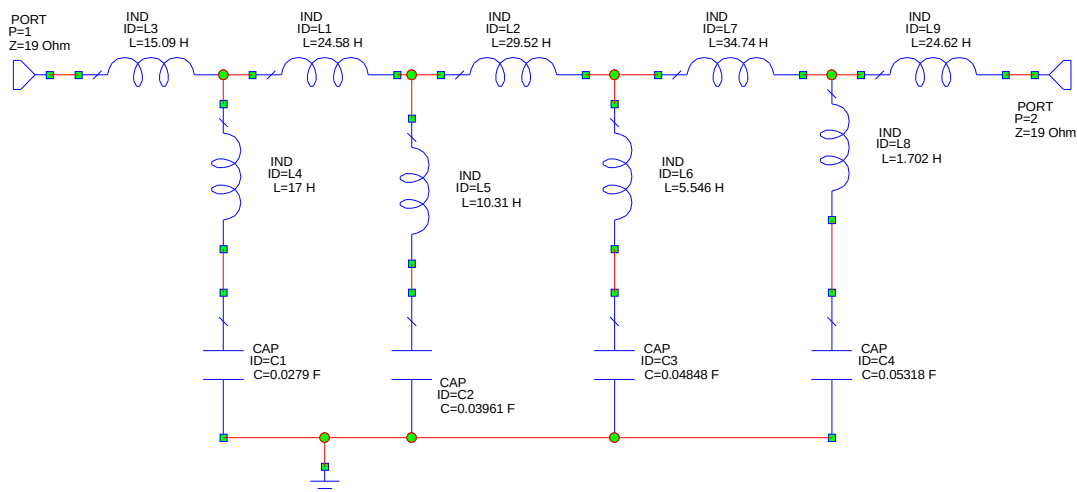
Z0[Ohm]    Rg[Ohm]    R0[Ohm]
50.000000  19.000000  19.000000

Shema sa idealnim elementima 1
tip  sastav      L [H]    C [F]
1    1          0.000000  0.068193
0    3          19.199258  0.004715
1    1          0.000000  0.096228
0    3          17.500482  0.015363
1    1          0.000000  0.081761
0    3          14.298442  0.028560
1    1          0.000000  0.068075
0    3          10.071978  0.047101
1    1          0.000000  0.041793

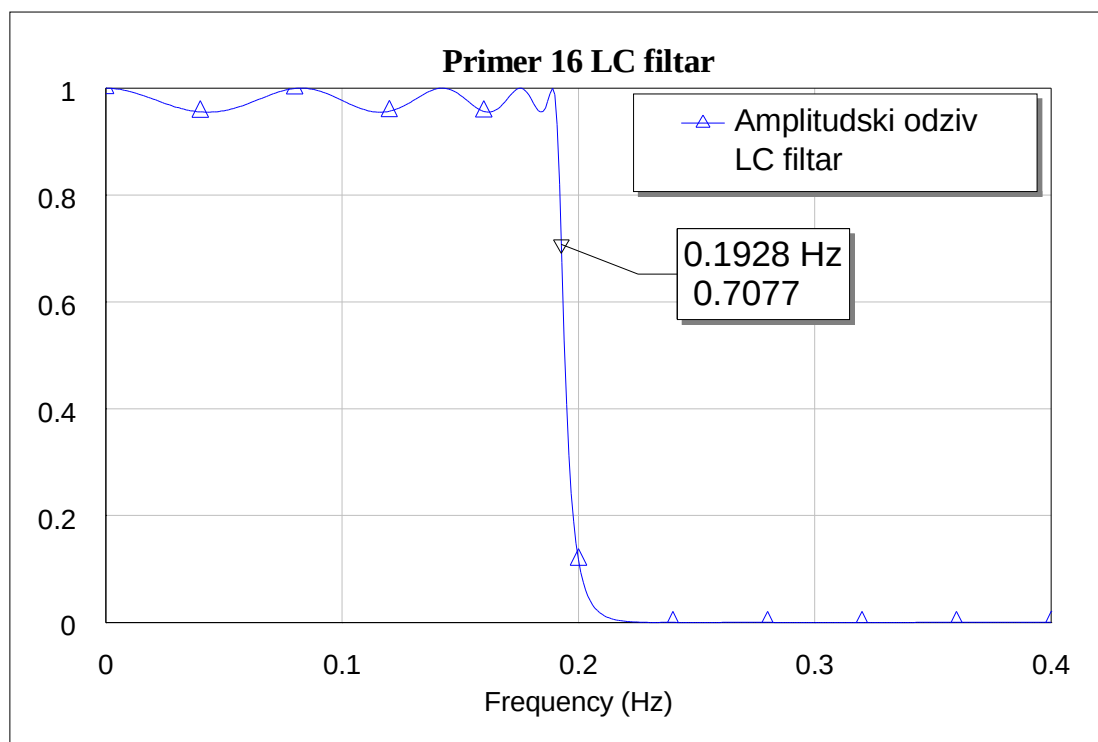
Shema sa idealnim elementima 2
tip  sastav      L [H]    C [F]
0    0          24.617746  0.000000
1    2          1.702136  0.053184
0    0          34.738322  0.000000
1    2          5.546101  0.048478
0    0          29.515847  0.000000
1    2          10.310078  0.039608
0    0          24.575008  0.000000
1    2          17.003323  0.027900
0    0          15.087351  0.000000

```

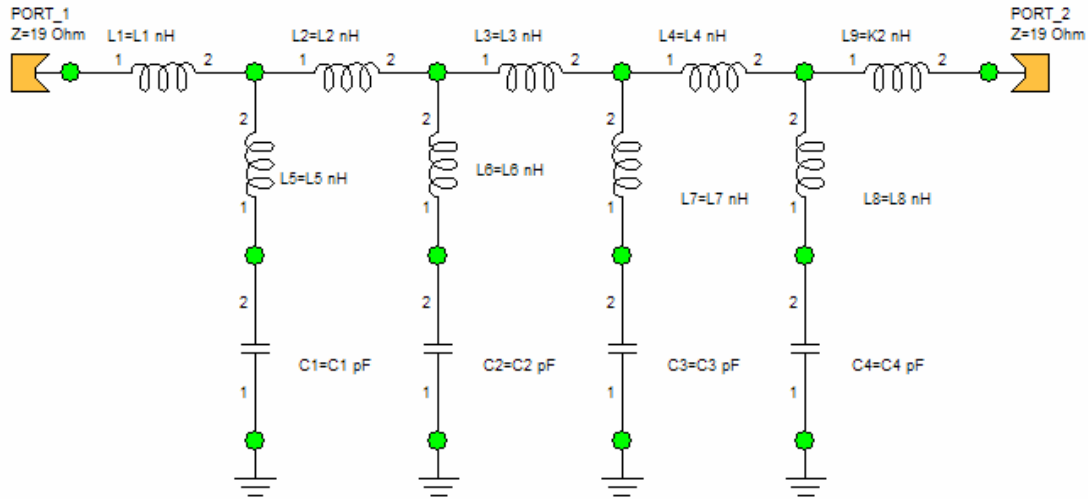
Слика 113. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 109. Пакет LCsinteza.



Слика 114. Шема филтра према прорачуну са слике 113. Microwave Office.



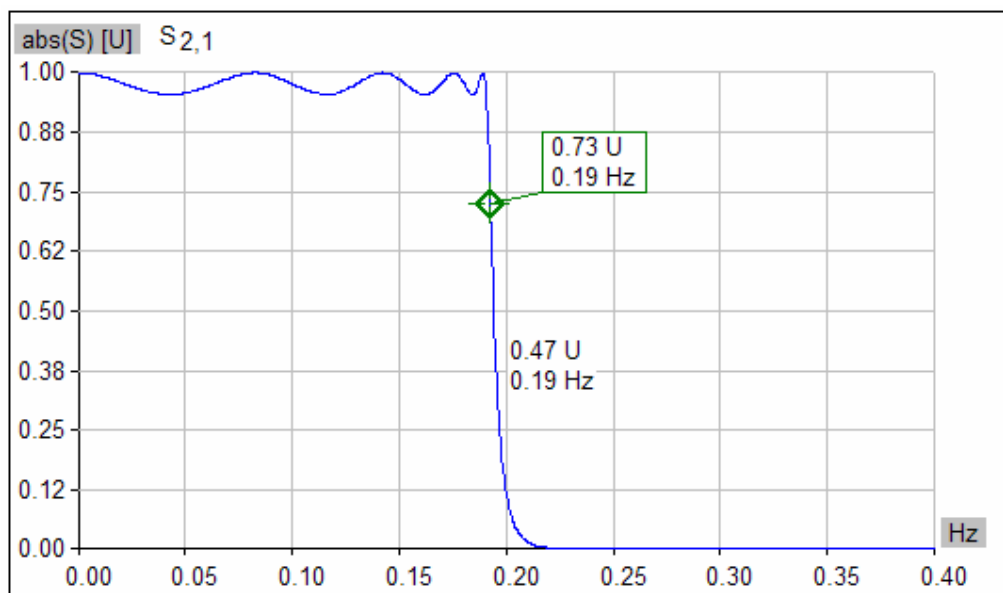
Слика 115. Амплитудски одзив филтра са слике 113. Microwave Office.



Слика 116. Шема филтра према прорачуну са слике 113. WIPL-D Microwave.

Symbols		
	Symbol	
1	1	$N=1$
2	1.508735E10	$L1=15.087351 \cdot 10^9/N$
3	2.457508E10	$L2=24.57508 \cdot 10^9/N$
4	2.951584E10	$L3=29.51584 \cdot 10^9/N$
5	3.473832E10	$L4=34.738322 \cdot 10^9/N$
6	2.79E10	$C1=0.027900 \cdot 10^{12}/N$
7	3.9608E10	$C2=0.039608 \cdot 10^{12}/N$
8	4.8478E10	$C3=0.048478 \cdot 10^{12}/N$
9	5.3184E10	$C4=0.053184 \cdot 10^{12}/N$
10	1.700332E10	$L5=17.003323 \cdot 10^9/N$
11	1.031008E10	$L6=10.310078 \cdot 10^9/N$
12	2.461775E10	$K2=24.617746 \cdot 10^9/N$
13	5.546101E9	$L7=5.546101 \cdot 10^9/N$
14	1.710214E9	$L8=1.7102136 \cdot 10^9/N$

Слика 117. Вредности симбола са слике 116.



Слика 118. Амплитудски одзив филтра са слике 116. WIPL-D Microwave.

Упоредивањем слика 112, 115 и 118 и слика 110, 111 и 113 види се да се прорачун добијен пакетом LСsinteza у потпуности слаже са шемом филтра са идеалним елементима коју прави софтвер Filter Solutions.

Фреквенцијски одзив на слици 118 је нацртан на основу вредности за 100 фреквенција и у примерима који ће бити обрађени ће се подразумевати да су у програму WIPL-D Microwave амплитудски одзиви добијени на основу вредности за 100 фреквенција. Евентуално одступање од наведене поделе фреквенцијске осе ће бити наглашено.

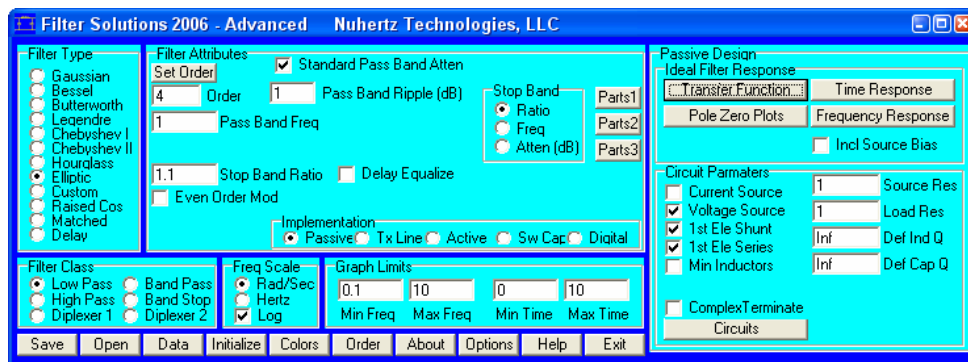
У овом примеру је анализиран случај када је филтар затворен отпорницима који имају једнаке отпорности веће од 1.

Пример 17. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра четвртог реда.
Пакет LCsinteza, Filter Solutions.

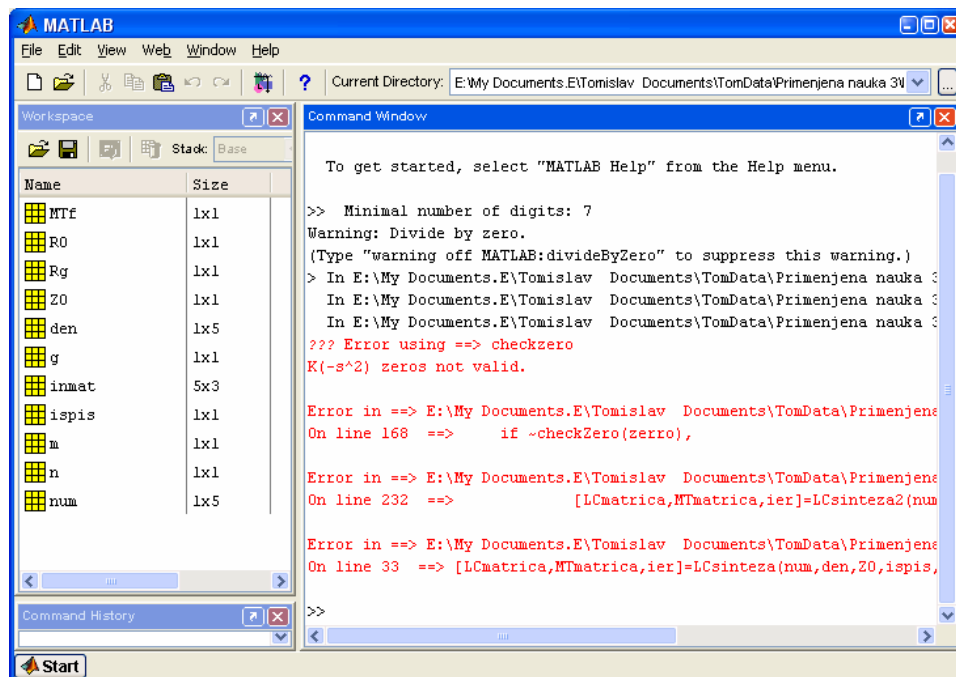
Нека је одабрана елиптичка апроксимација четвртог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1\Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1\Omega$), Pass Band Frequency је 1 rad/s, Stop Band Ratio је 1.1 и Pass Band Ripple је 1dB.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати LC филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave.

На слици 119 је дата спецификација филтра, док је на слици 120 приказан прозор MATLAB-а после неуспеле обраде међурезултата двоструко затвореног филтра парног реда.



Слика 119. Спецификација елиптичког филтра четвртог реда. Filter Solutions.



Слика 120. Грешка у прорачуну после неуспешне трансформације нула и полова коефицијента рефлексије филтра чија је спецификација на слици 119.

Синтеза двоструко затворених филтара парног реда није увек могућа и та тврдња је поткрепљена управо овим примером. У случају да LCsinteza не прихвати неке од међурезултата као теоријски исправне, програм се прекида и исписује се порука о грешци.

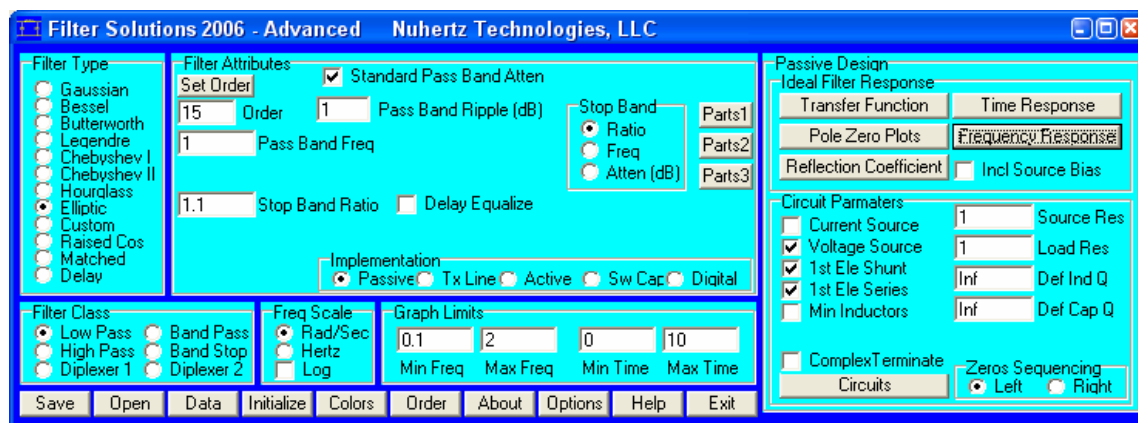
Пример 18. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра петнаестог реда.

Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.

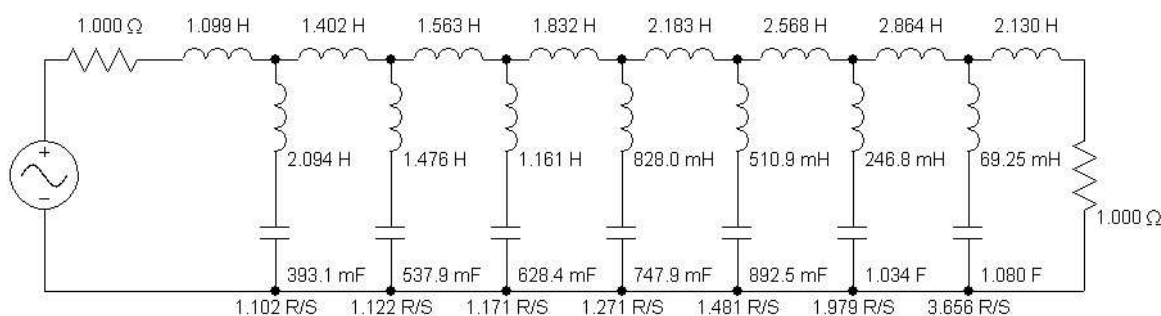
Нека је одабрана елиптичка апроксимација петнаестог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1\Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1\Omega$), Pass Band Frequency је 1rad/s, Stop Band Ratio је 1.1 и Pass Band Ripple је 1.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати LC филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave.

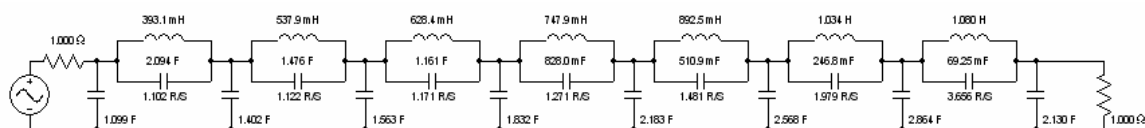
На слици 121 је приказана спецификација филтра, док су на сликама 122 и 123 његове шеме са идеалним елементима. На слици 124 је амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 125. Слика 126 приказује шему филтра у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 127 је амплитудски одзив филтра који је добијен помоћу MWO-а. На слици 128 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave, а на слици 129 су вредности симбола коришћене у програму WIPL-D Microwave. Слика 130 приказује амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave.



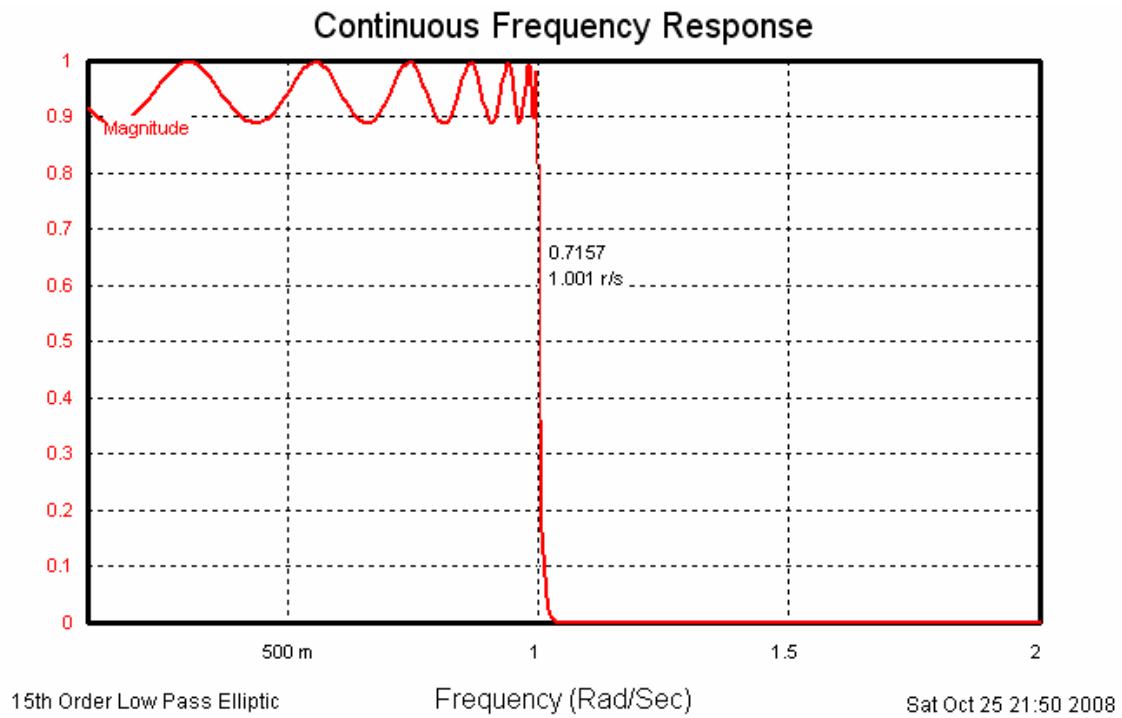
Слика 121. Спецификација елиптичког филтра петнаестог реда. Filter Solutions.



Слика 122. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 121. Filter Solutions.



Слика 123. Шема са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 121. Filter Solutions.



Слика 124. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 121. Filter Solutions.

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

Z0[Ohm] Rg[Ohm] R0[Ohm]
 50.000000 1.000000 1.000000

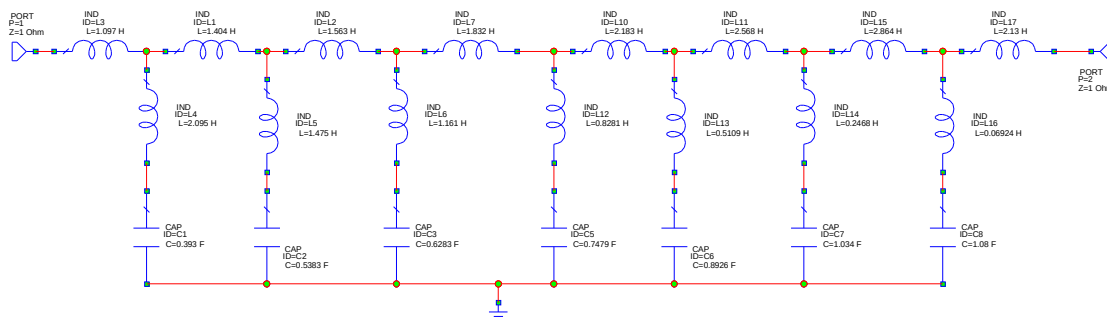
Shema sa idealnim elementima 1

tip	sastav	L [H]	C [F]
1	1	0.000000	2.129608
0	3	1.080364	0.069244
1	1	0.000000	2.864497
0	3	1.034321	0.246763
1	1	0.000000	2.568298
0	3	0.892581	0.510853
1	1	0.000000	2.183209
0	3	0.747886	0.828092
1	1	0.000000	1.831891
0	3	0.628321	1.161444
1	1	0.000000	1.563344
0	3	0.538257	1.475280
1	1	0.000000	1.403913
0	3	0.392980	2.094862
1	1	0.000000	1.096811

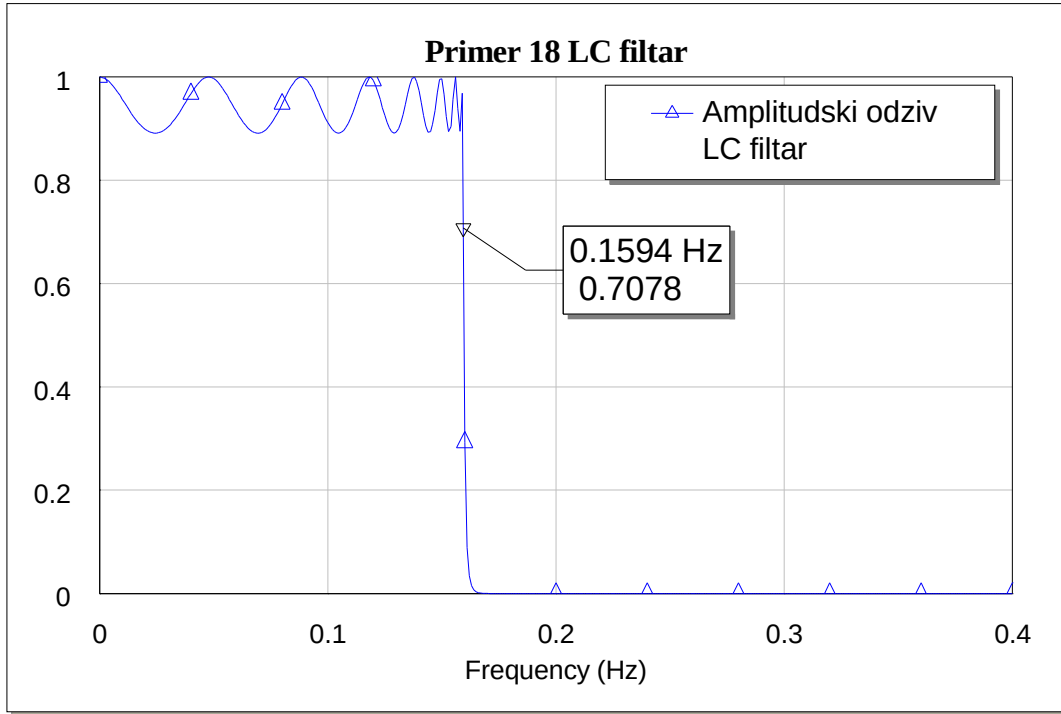
Shema sa idealnim elementima 2

tip	sastav	L [H]	C [F]
0	0	2.129608	0.000000
1	2	0.069244	1.080364
0	0	2.864497	0.000000
1	2	0.246763	1.034321
0	0	2.568298	0.000000
1	2	0.510853	0.892581
0	0	2.183209	0.000000
1	2	0.828092	0.747886
0	0	1.831891	0.000000
1	2	1.161444	0.628321
0	0	1.563344	0.000000
1	2	1.475280	0.538257
0	0	1.403913	0.000000
1	2	2.094862	0.392980
0	0	1.096811	0.000000

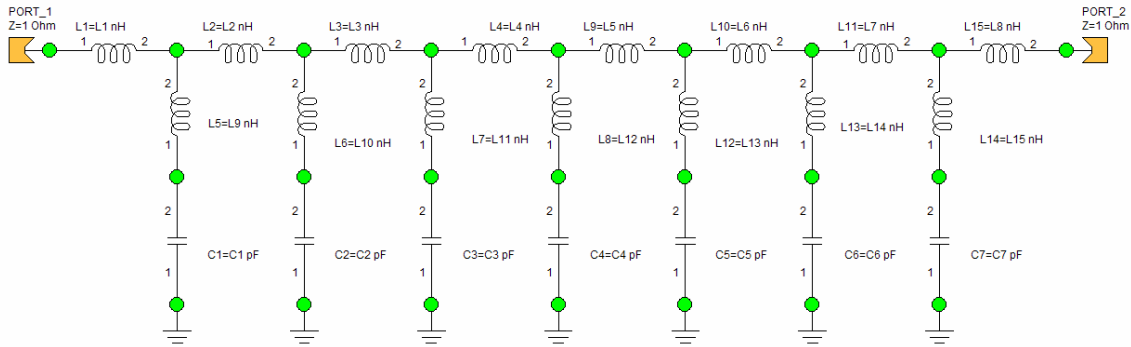
Слика 125. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 121. Пакет LCsinteza.



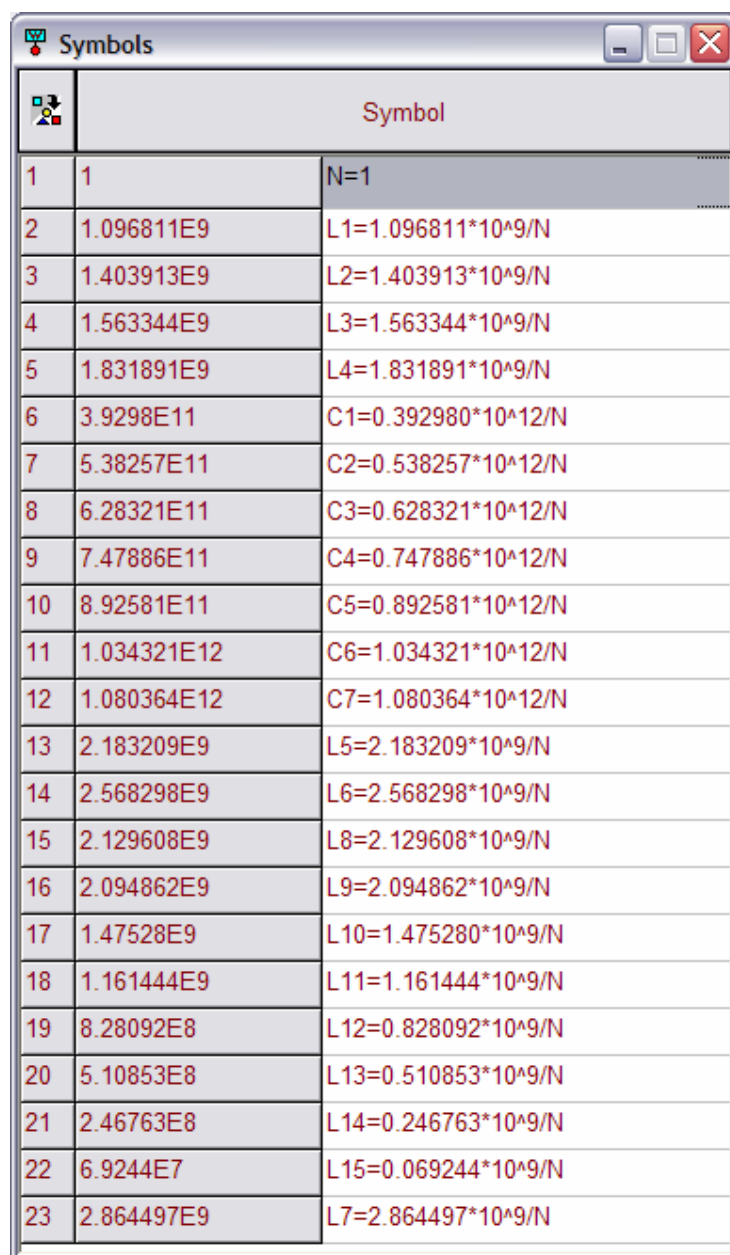
Слика 126. Шема филтра према прорачуну са слике 125. Microwave Office.



Слика 127. Амплитудски одзив филтра са слике 126. Microwave Office.

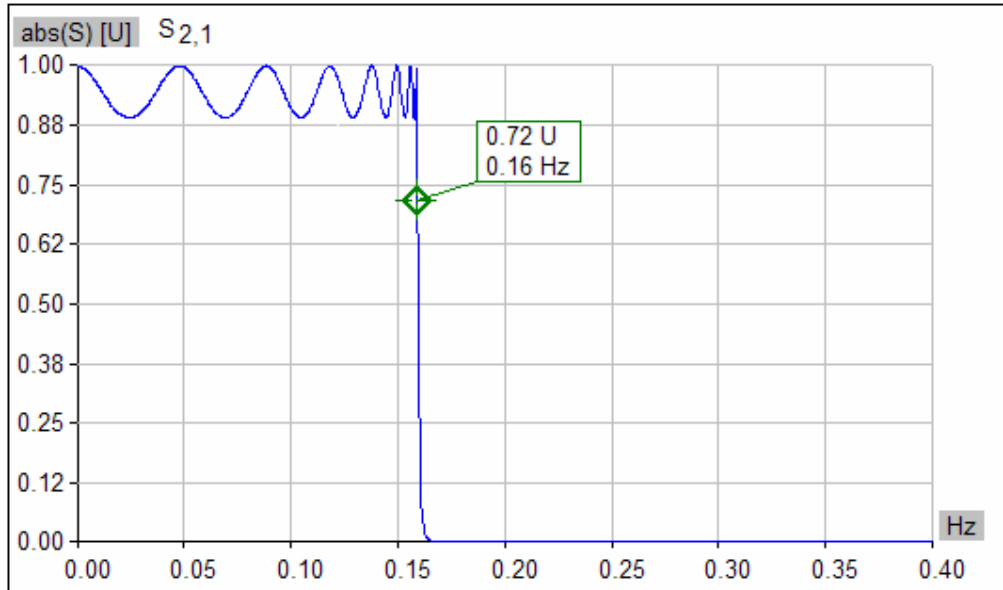


Слика 128. Шема филтра према прорачуну са слике 125. WIPL-D Microwave.



	Symbol	
1	1	$N=1$
2	1.096811E9	$L1=1.096811 \cdot 10^9/N$
3	1.403913E9	$L2=1.403913 \cdot 10^9/N$
4	1.563344E9	$L3=1.563344 \cdot 10^9/N$
5	1.831891E9	$L4=1.831891 \cdot 10^9/N$
6	3.9298E11	$C1=0.392980 \cdot 10^{12}/N$
7	5.38257E11	$C2=0.538257 \cdot 10^{12}/N$
8	6.28321E11	$C3=0.628321 \cdot 10^{12}/N$
9	7.47886E11	$C4=0.747886 \cdot 10^{12}/N$
10	8.92581E11	$C5=0.892581 \cdot 10^{12}/N$
11	1.034321E12	$C6=1.034321 \cdot 10^{12}/N$
12	1.080364E12	$C7=1.080364 \cdot 10^{12}/N$
13	2.183209E9	$L5=2.183209 \cdot 10^9/N$
14	2.568298E9	$L6=2.568298 \cdot 10^9/N$
15	2.129608E9	$L8=2.129608 \cdot 10^9/N$
16	2.094862E9	$L9=2.094862 \cdot 10^9/N$
17	1.47528E9	$L10=1.475280 \cdot 10^9/N$
18	1.161444E9	$L11=1.161444 \cdot 10^9/N$
19	8.28092E8	$L12=0.828092 \cdot 10^9/N$
20	5.10853E8	$L13=0.510853 \cdot 10^9/N$
21	2.46763E8	$L14=0.246763 \cdot 10^9/N$
22	6.9244E7	$L15=0.069244 \cdot 10^9/N$
23	2.864497E9	$L7=2.864497 \cdot 10^9/N$

Слика 129. Вредности симбола са слике 128.



Слика 130. Амплитудски одзив филтра са слике 128. WIPL-D Microwave.

Упоредивањем слика 124, 127 и 130 и слика 122, 123 и 125 види се да се прорачун добијен пакетом LCsinтеза у потпуности слаже са шемом филтра са идеалним елементима коју прави професионални, комерцијални софтвер Filter Solutions.

У овом примеру је анализиран случај елиптичког филтра петнаестог реда, што значи да је филтар високог реда и да је прорачун осетљив на нумеричку обраду међурезултата.

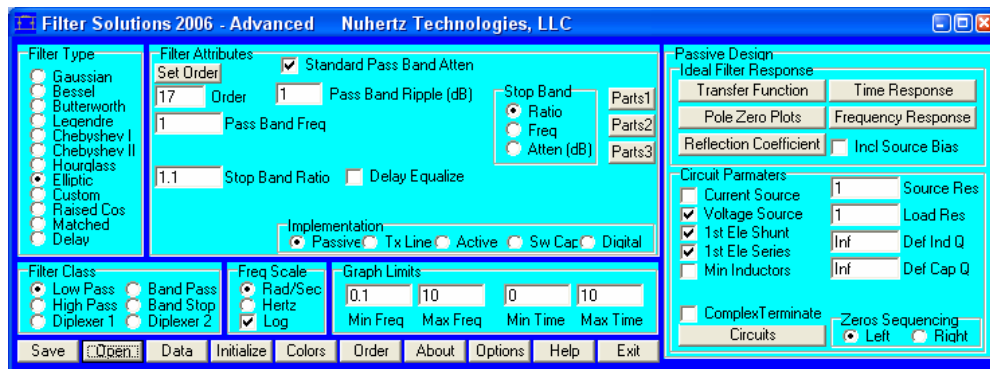
Пример 19. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра седамнаестог реда.

Пакет LCsintezа, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.

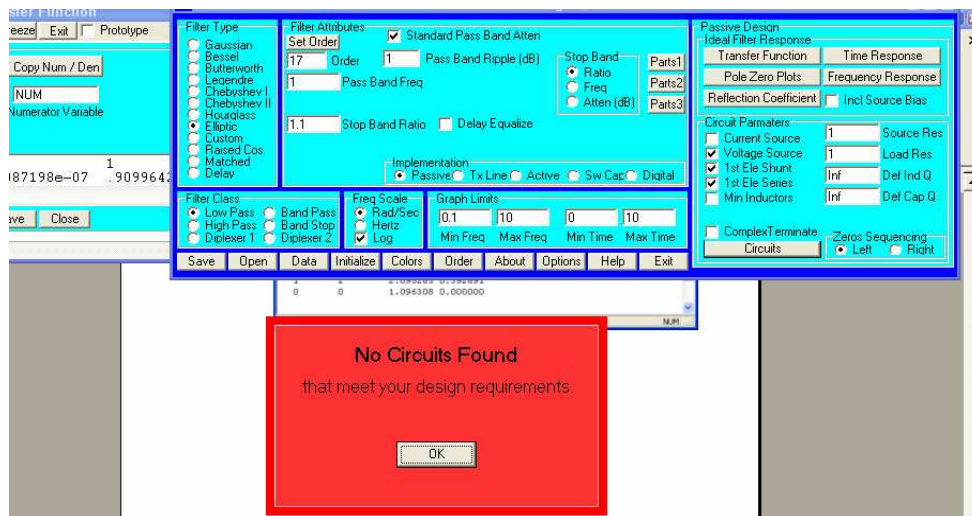
Нека је одабрана елиптичка апроксимација седамнаестог реда. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1\Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1\Omega$), Pass Band Frequency је 1rad/s, Stop Band Ratio је 1.1 и Pass Band Ripple је 1.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати LC филтар позивом функције LCsintezа. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave.

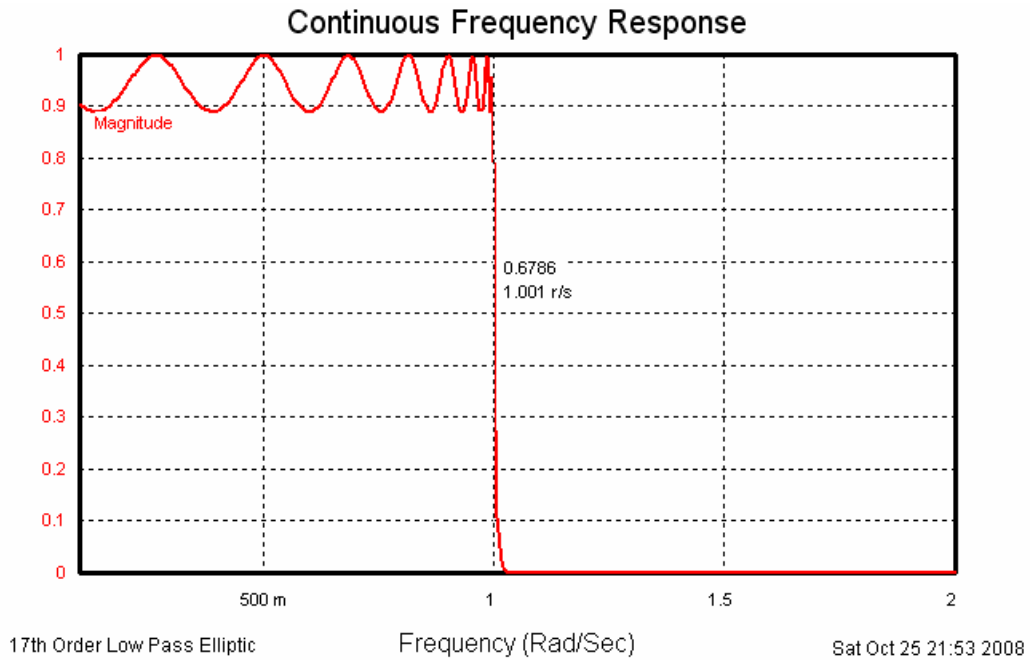
На слици 131 је приказана спецификација филтра. Професионални, комерцијални програм Filter Solutions не успева да одреди шему са идеалним елементима и исписује поруку грешке као што је приказано на слици 132. Пакет LCsintezа успешно одређује шему са идеалним елементима са тачношћу од најмање 4 цифре, као што је приказано на слици 135. На слици 133 је приказана амплитудска карактеристика на основу функције преноса. На другим сликама (слике 134, 137а, 137б, 140а и 140б) је приказана амплитудска карактеристика на основу шеме филтра са идеалним елементима добијене помоћу пакета LCsintezа. Слика 136 приказује шему филтра у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsintezа. На слици 138 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave, а на слици 139 су вредности симбола коришћене у програму WIPL-D Microwave. Сlike 140а и 140б приказују амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave, нацртане на основу вредности за 100 и 200 фреквенција, респективно.



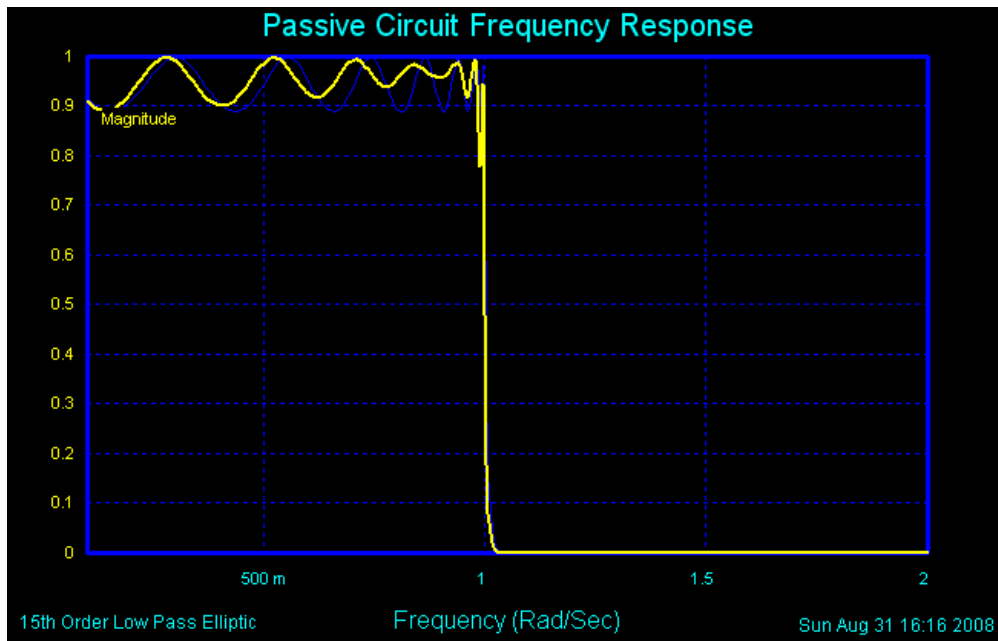
Слика 131. Спецификација елиптичког филтра седамнаестог реда. Filter Solutions.



Слика 132. Порука о немогућем добијању шеме са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 131. Filter Solutions.



Слика 133. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 131. Filter Solutions.



Слика 134. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 131, а шема са идеалним елементима добијена пакетом LСsinteza (в. слику 135). Filter Solutions.

```

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

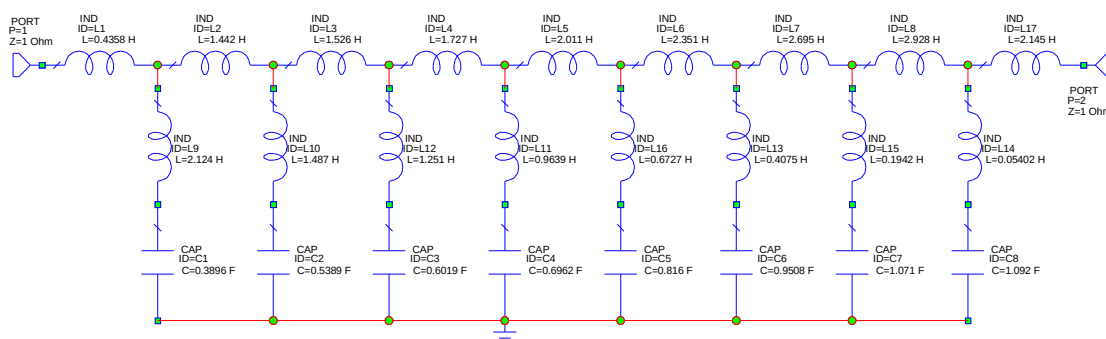
Z0[Ohm]    Rg[Ohm]    R0[Ohm]
50.000000  1.000000  1.000000

Shema sa idealnim elementima 1
tip    sastav    L [H]    C [F]
1      1          0.000000  2.145309
0      3          1.091894  0.054021
1      1          0.000000  2.927846
0      3          1.070610  0.194190
1      1          0.000000  2.694893
0      3          0.950774  0.407492
1      1          0.000000  2.350721
0      3          0.815953  0.672704
1      1          0.000000  2.010887
0      3          0.696177  0.963932
1      1          0.000000  1.727266
0      3          0.601943  1.250874
1      1          0.000000  1.525566
0      3          0.538938  1.487310
1      1          0.000000  1.441760
0      3          0.389603  2.124393
1      1          0.000000  0.435775

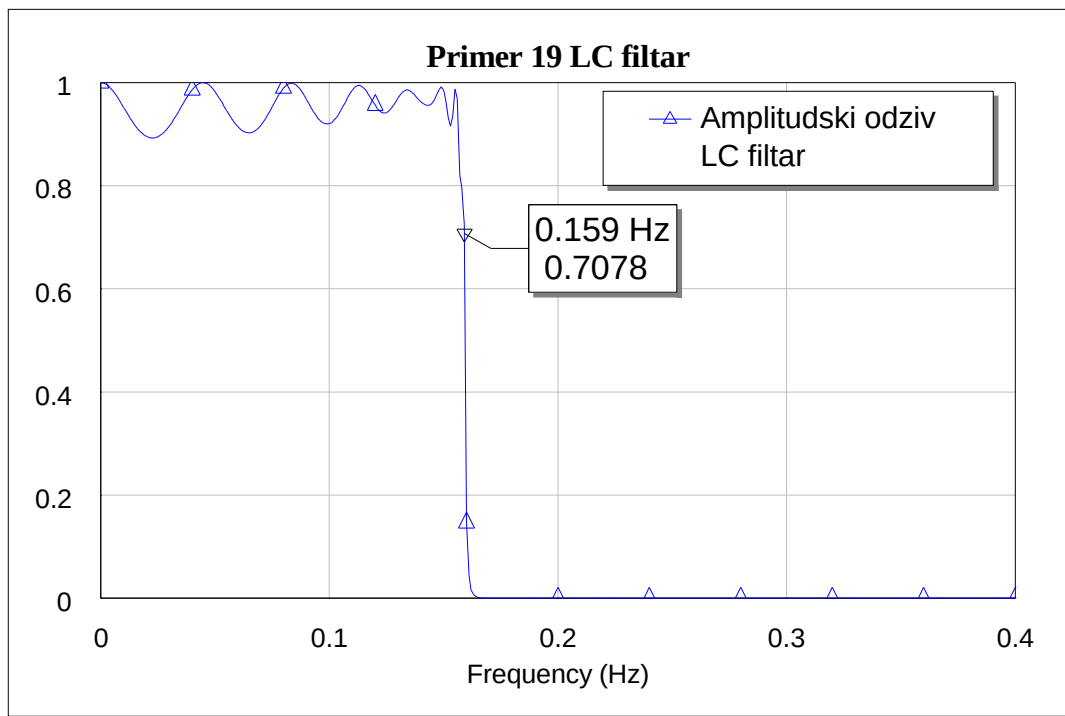
Shema sa idealnim elementima 2
tip    sastav    L [H]    C [F]
0      0          2.145309  0.000000
1      2          0.054021  1.091894
0      0          2.927846  0.000000
1      2          0.194190  1.070610
0      0          2.694893  0.000000
1      2          0.407492  0.950774
0      0          2.350721  0.000000
1      2          0.672704  0.815953
0      0          2.010887  0.000000
1      2          0.963932  0.696177
0      0          1.727266  0.000000
1      2          1.250874  0.601943
0      0          1.525566  0.000000
1      2          1.487310  0.538938
0      0          1.441760  0.000000
1      2          2.124393  0.389603
0      0          0.435775  0.000000

```

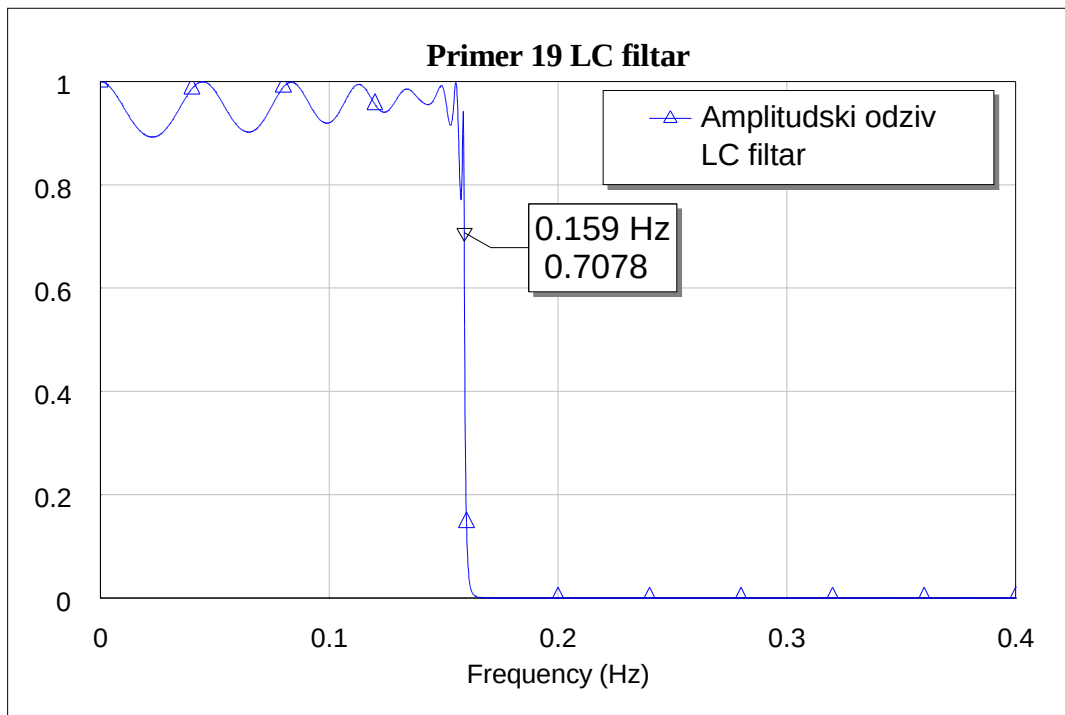
Слика 135. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 131. Пакет LCsinteza.



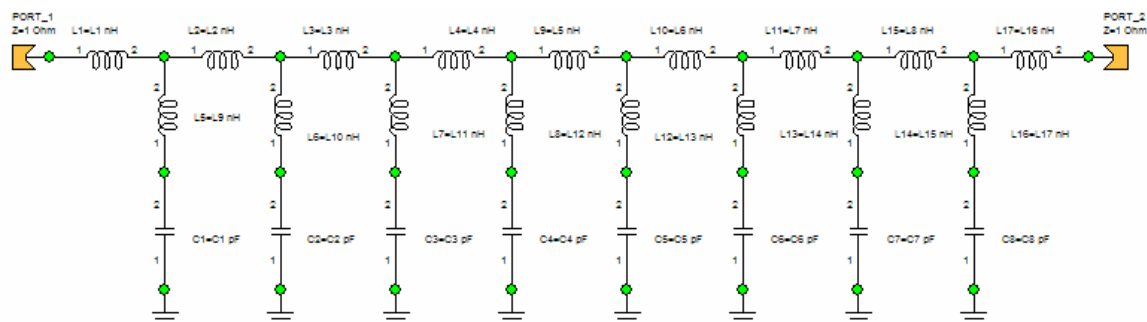
Слика 136. Шема филтра према прорачуну са слике 135. Microwave Office.



Слика 137а. Амплитудски одзив филтра са слике 136. Microwave Office. Корак апсцисе 0.001.



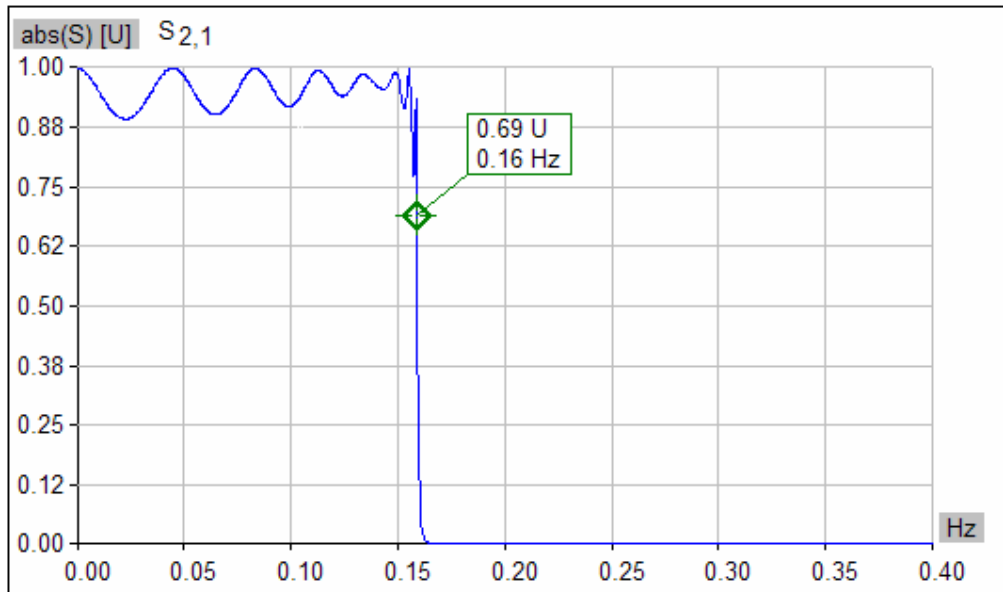
Слика 137б. Амплитудски одзив филтра са слике 136. Microwave Office. Корак апсцисе 0.0001.



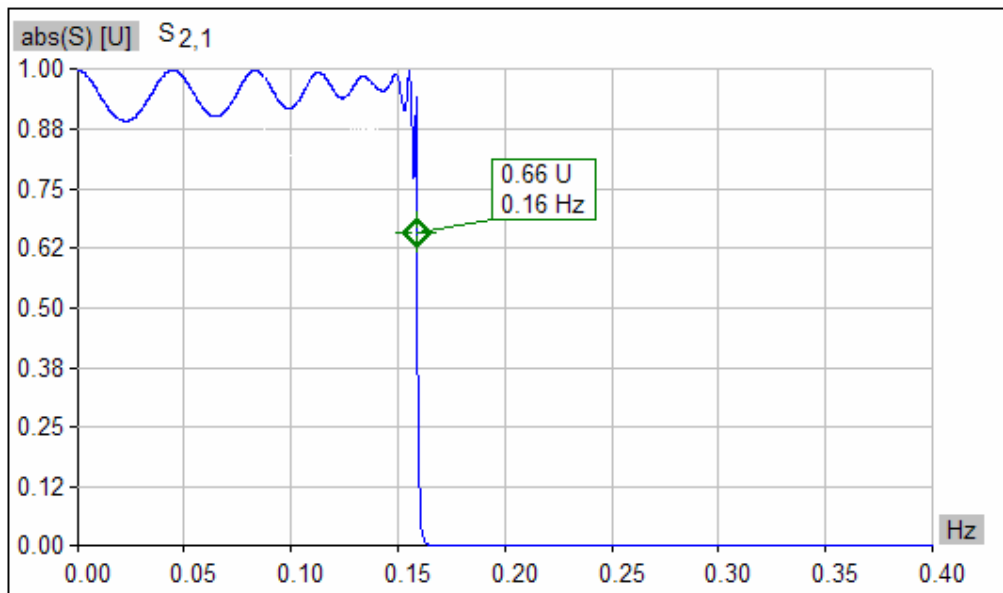
Слика 138. Шема филтра према прорачуну са слике 135. WIPL-D Microwave.

Symbols		
	Symbol	
1	1	N=1
2	4.35775E8	$L1=0.435775 \cdot 10^9/N$
3	1.44176E9	$L2=1.441760 \cdot 10^9/N$
4	1.525566E9	$L3=1.525566 \cdot 10^9/N$
5	1.727266E9	$L4=1.727266 \cdot 10^9/N$
6	3.89603E11	$C1=0.389603 \cdot 10^{12}/N$
7	5.38938E11	$C2=0.538938 \cdot 10^{12}/N$
8	6.01943E11	$C3=0.601943 \cdot 10^{12}/N$
9	6.96177E11	$C4=0.696177 \cdot 10^{12}/N$
10	8.15953E11	$C5=0.815953 \cdot 10^{12}/N$
11	9.50774E11	$C6=0.950774 \cdot 10^{12}/N$
12	1.07061E12	$C7=1.070610 \cdot 10^{12}/N$
13	1.091894E12	$C8=1.091894 \cdot 10^{12}/N$
14	2.010887E9	$L5=2.010887 \cdot 10^9/N$
15	2.350721E9	$L6=2.350721 \cdot 10^9/N$
16	2.927846E9	$L8=2.927846 \cdot 10^9/N$
17	2.124393E9	$L9=2.124393 \cdot 10^9/N$
18	1.48731E9	$L10=1.487310 \cdot 10^9/N$
19	1.250874E9	$L11=1.250874 \cdot 10^9/N$
20	9.63932E8	$L12=0.963932 \cdot 10^9/N$
21	6.72704E8	$L13=0.672704 \cdot 10^9/N$
22	4.07492E8	$L14=0.407492 \cdot 10^9/N$
23	1.9419E8	$L15=0.194190 \cdot 10^9/N$
24	2.694893E9	$L7=2.694893 \cdot 10^9/N$
25	2.145309E9	$L16=2.145309 \cdot 10^9/N$
26	5.4021E7	$L17=0.054021 \cdot 10^9/N$

Слика 139. Вредности симбола са слике 138.



Слика 140а. Амплитудски одзив филтра са слике 138. WIPL-D Microwave. 100 фреквенција.



Слика 140б. Амплитудски одзив филтра са слике 138. WIPL-D Microwave. 200 фреквенција.

Фреквенцијски одзиви на сликама 137а и 137б су нацртани на основу вредности за корак апсцисе 0.001 и 0.0001, респективно. Фреквенцијски одзиви на сликама 140а и 140б су нацртани на основу вредности за 100 и 200 фреквенција, респективно. Уочава се да финија подела у случају графика из MWO-а, приказује боље резултате, што се види из поређења слика 137а, 137б, 140а и 140б.

Овај пример сликовито приказује осетљивост и сложеност нумеричких прорачуна филтара чији се ред на први поглед чини ниским.

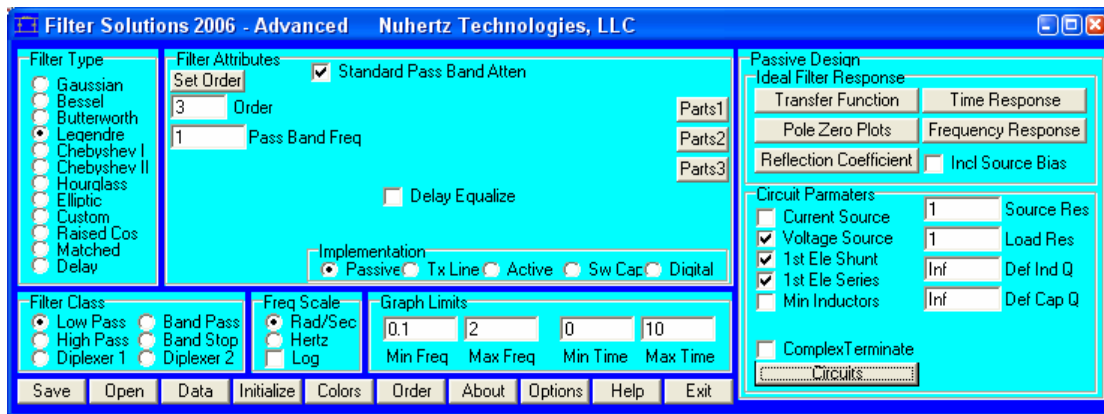
Пример 20. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Лежандровог филтра трећег реда.

Пакетом LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.

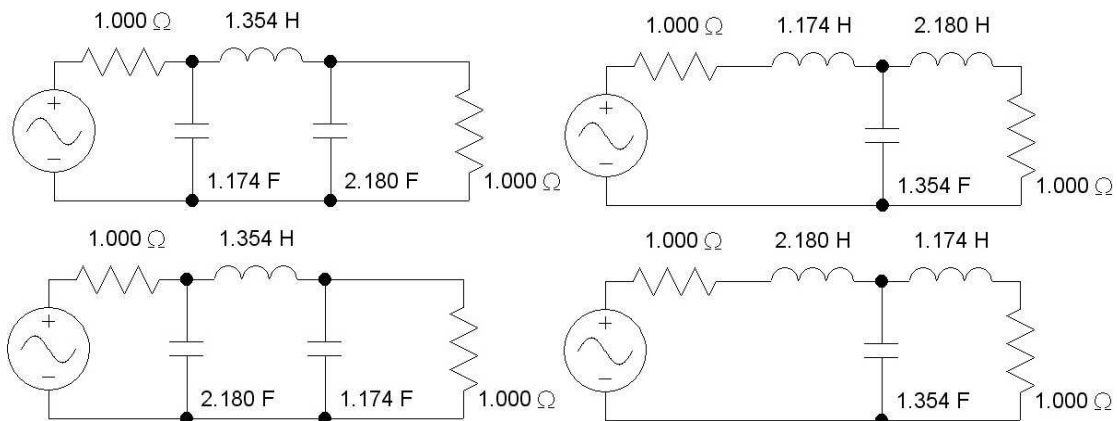
Нека је одабрана Лежандрова апроксимација трећег реда и нека је одабран прототип филтра. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1\ \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1\ \Omega$) и Pass Band Frequency је 1 rad/s.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати микроталасни и LC филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave. Номиналне импедансе приступа су 50 Ω .

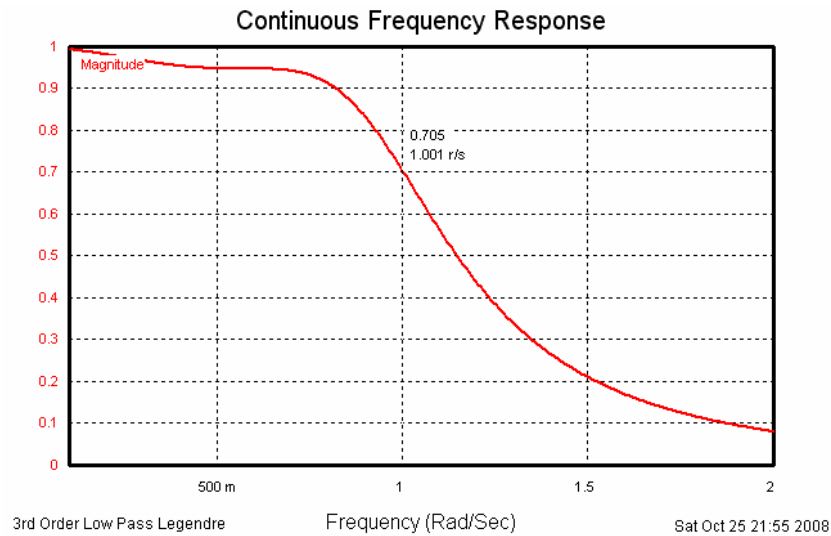
На слици 141 је приказана спецификација филтра, док је на слици 142 његова шема са идеалним елементима. На слици 143 је амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 144. Слика 145 приказује шему филтра у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 146 је амплитудски одзив филтра који је добијен помоћу MWO-а. На слици 147 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave, а на слици 148 су вредности симбола коришћене у програму WIPL-D Microwave. Слика 149 приказује амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave.



Слика 141. Спецификација Лежандровог филтра трећег реда. Filter Solutions.



Слика 142. Шеме са идеалним елементима филтра чија је спецификација на слици 140. Filter Solutions.



Слика 143. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 140. Filter Solutions.

```

23-Nov-2008 18:01:47

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

num=[ 0.577350]
den=[ 1.000000 1.310700 1.358970 0.577350]

Z0[Ohm]    Rg[Ohm]    R0[Ohm]
50.000000  1.000000  1.000000

Shema sa idealnim elementima 1
tip  sastav      L [H]    C [F]
1    1           0.000000  1.173699
0    0           1.353804  0.000000
1    1           0.000000  2.180109

Shema sa idealnim elementima 2
tip  sastav      L [H]    C [F]
1    1           0.000000  2.180109
0    0           1.353805  0.000000
1    1           0.000000  1.173699

Shema sa idealnim elementima 3
tip  sastav      L [H]    C [F]
0    0           1.173699  0.000000
1    1           0.000000  1.353804
0    0           2.180109  0.000000

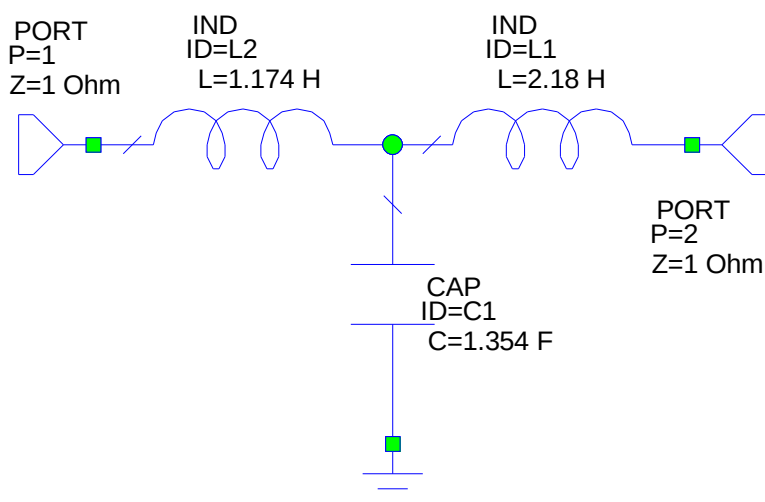
Shema sa idealnim elementima 4
tip  sastav      L [H]    C [F]
0    0           2.180109  0.000000
1    1           0.000000  1.353805
0    0           1.173699  0.000000

Shema sa idealnim sekcijama vodova 1
vod  Zc[Ohm]      k.s.    eld[rad]  F0[Hz]
0    42.60037     0       0.785398  0.159100
1    67.69022     1       0.785398  0.159100

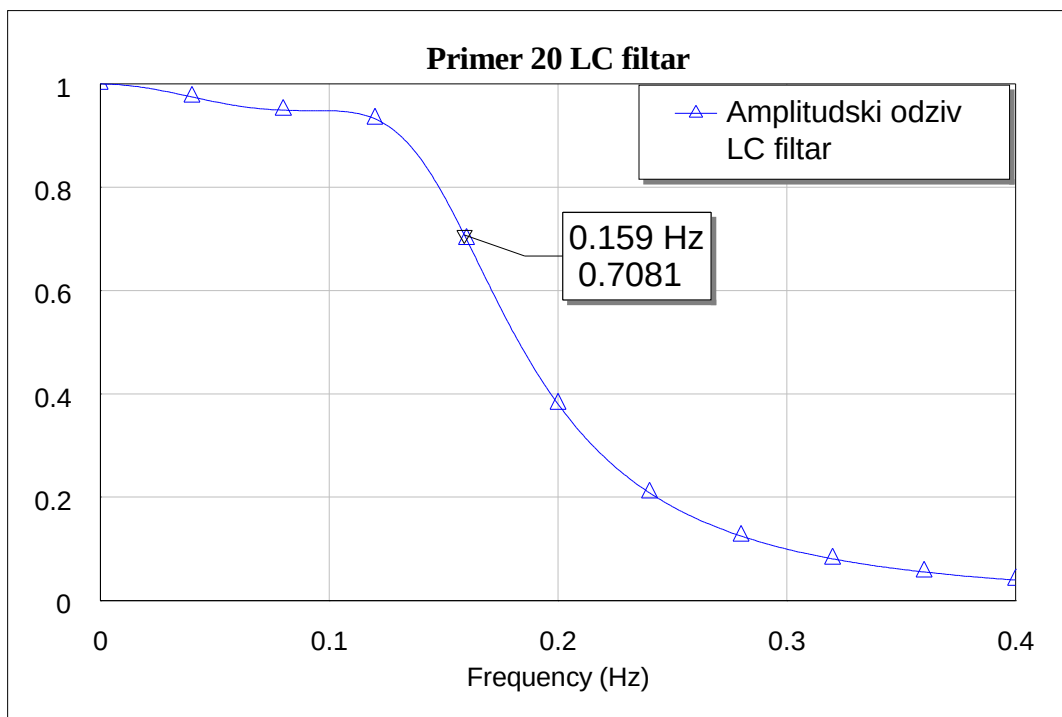
```

0	22.93463	0	0.785398	0.159100
Shema sa idealnim sekcijama vodova 2				
vod	Zc[Ohm]	k.s.	eld[rad]	F0[Hz]
0	22.93463	0	0.785398	0.159100
1	67.69023	1	0.785398	0.159100
0	42.60037	0	0.785398	0.159100
Shema sa idealnim sekcijama vodova 3				
vod	Zc[Ohm]	k.s.	eld[rad]	F0[Hz]
0	92.60037	0	0.785398	0.159100
3	108.68494	0	0.785398	0.159100
0	36.93296	0	0.785398	0.159100
3	159.00546	0	0.785398	0.159100
0	72.93463	0	0.785398	0.159100
Shema sa idealnim sekcijama vodova 4				
vod	Zc[Ohm]	k.s.	eld[rad]	F0[Hz]
0	72.93463	0	0.785398	0.159100
3	159.00546	0	0.785398	0.159100
0	36.93295	0	0.785398	0.159100
3	108.68493	0	0.785398	0.159100
0	92.60037	0	0.785398	0.159100

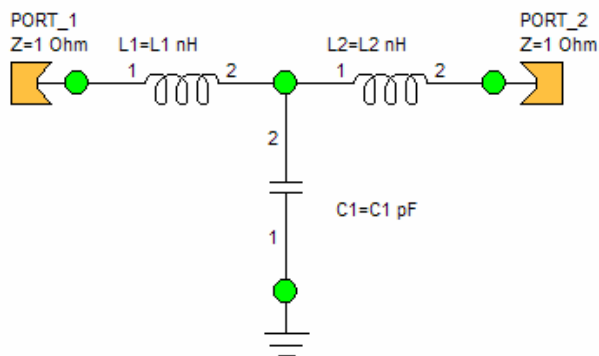
Слика 144. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 140. Пакет LCsinteza.



Слика 145. Шема филтра према прорачуну са слике 144. Microwave Office.



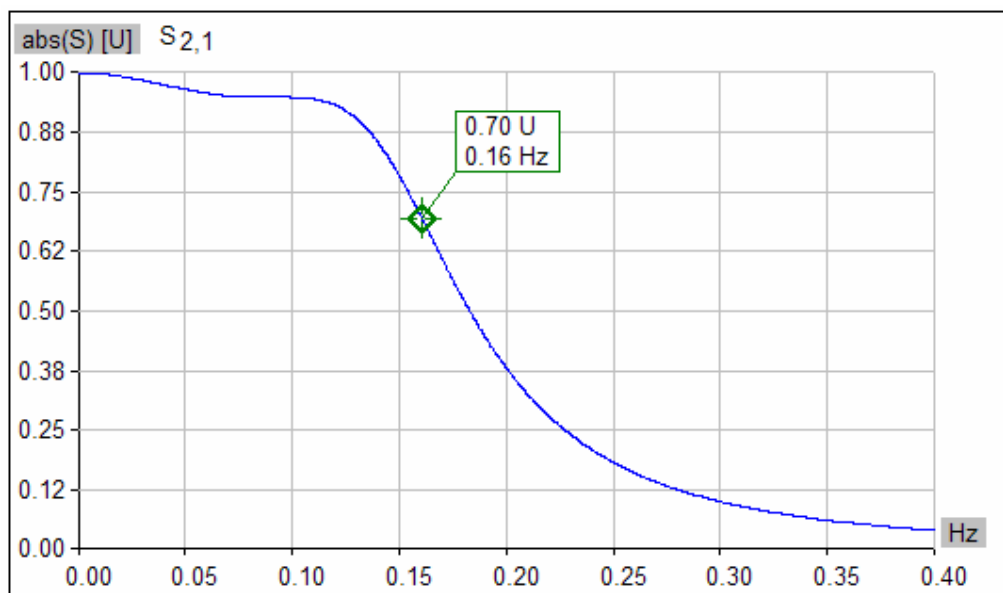
Слика 146. Амплитудски одзив филтра са слике 145. Microwave Office.



Слика 147. Шема филтра према прорачуну са слике 144. WIPL-D Microwave.

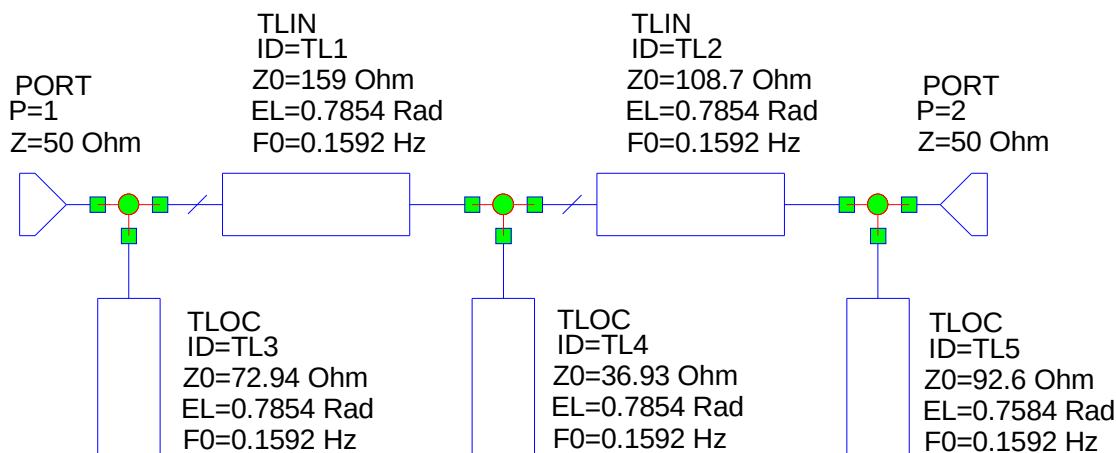
Symbols		
	Symbol	
1	1	N=1
2	1.173694E9	L1=1.173694*10 ⁹ /N
3	2.180112E9	L2=2.180112*10 ⁹ /N
4	1.353808E12	C1=1.353808*10 ¹² /N

Слика 148. Вредности симбола са слике 147.

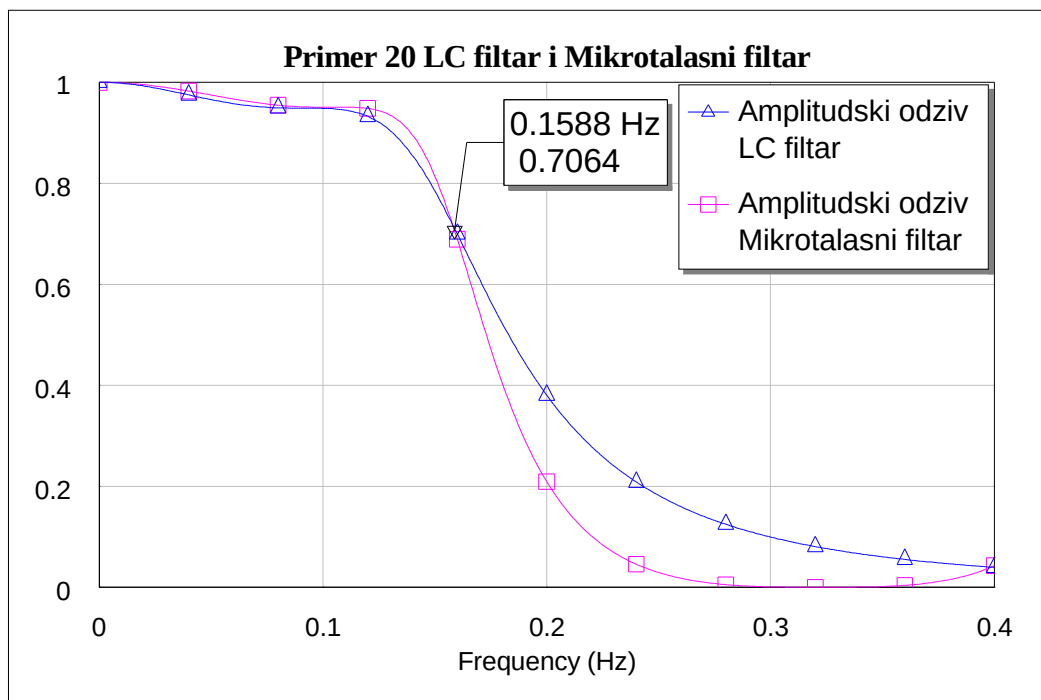


Слика 149. Амплитудски одзив филтра са слике 147. WIPL-D Microwave.

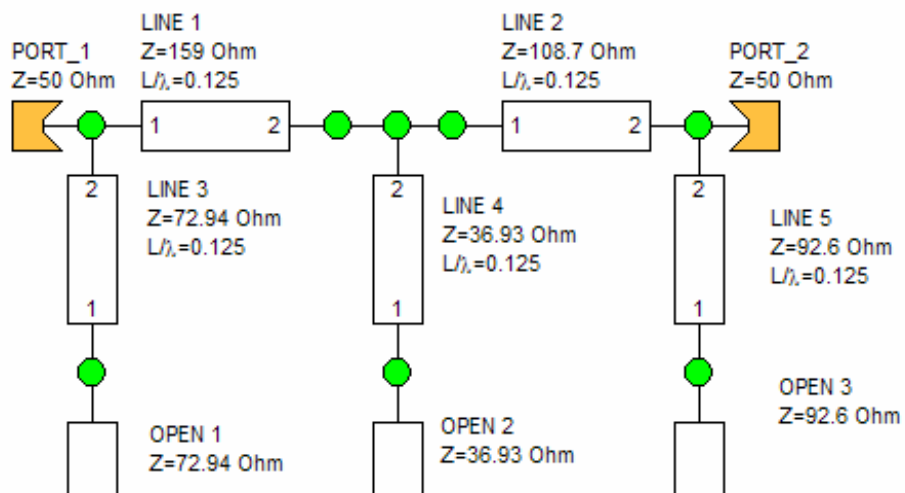
На слици 150 је шема филтра са идеалним секцијама водова у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. Слика 151 приказује амплитудски одзив филтра у техници водова који је добијен помоћу MWO-а. На слици 152 је шема филтра са идеалним секцијама водова у програму WIPL-D Microwave. Слика 153 приказује амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave.



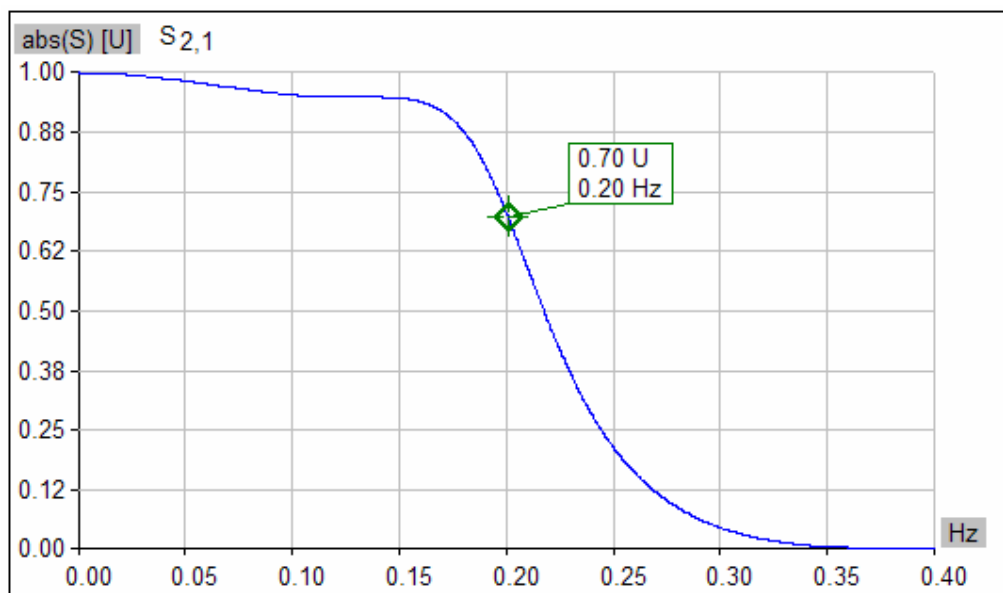
Слика 150. Шема филтра са идеалним секцијама водова према прорачуну са слике 144. Microwave Office.



Слика 151. Амплитудски одзив филтра са слике 150. Microwave Office.



Слика 152. Шема филтра са идеалним секцијама водова према прорачуну са слике 144. WIPL-D Microwave.



Слика 153. Амплитудски одзив филтра са слике 152. WIPL-D Microwave.

Упоредивањем слика 143, 146, 149, 151 и 153 види се да амплитудске карактеристике синтетисаног филтра у потпуности одговарају амплитудској карактеристици филтра коју прави софтвер Filter Solutions.

Слика 151 показује да LC мрежа (LC Filtar, слика 151) и мрежа сачињена од водова (Mikrotalasni filtari, слика 151) имају приближно исту амплитудску карактеристику. Мрежа која је названа Mikrotalasni filtari је прорачуната помоћу Куродиних идентитета и Ричардсове трансформације и графици на слици 151 се само приближно поклапају. Разлика у поклапању која настаје у овом случају је последица несавршености трансформација које су коришћене у прорачуну.

На слици 153 је амплитудска карактеристика филтра у програму WIPL-D Microwave и може се уочити да је тачка на фреквенцијској оси где напон има вредност 0.7 V померена на 0.2 Hz у односу на слику 151 коју даје MWO. Разлог томе је утицај ефекта отвореног вода, тј. начин на који WIPL-D Microwave и MWO врше прорачун отворених водова.

Примери који ће даље бити наведени се односе само на шеме филтра са идеалним секцијама водова.

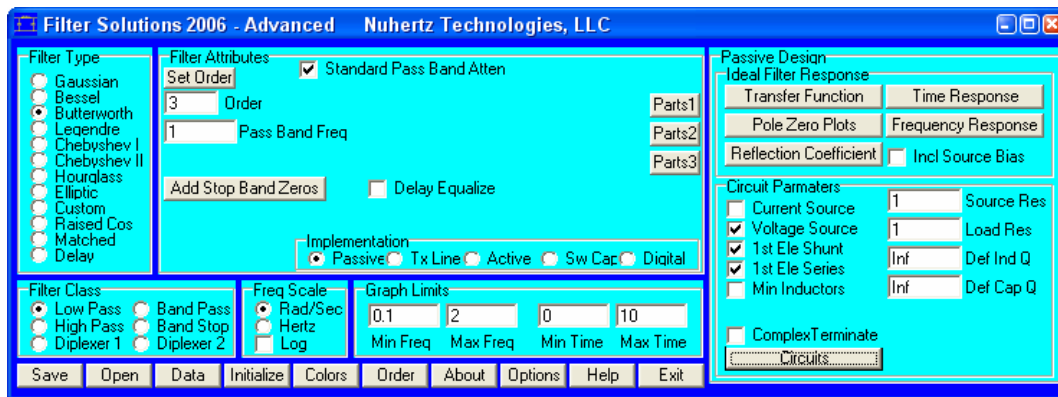
Пример 21. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Батервортовог филтра трећег реда.

Пакет LCsintezа, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.

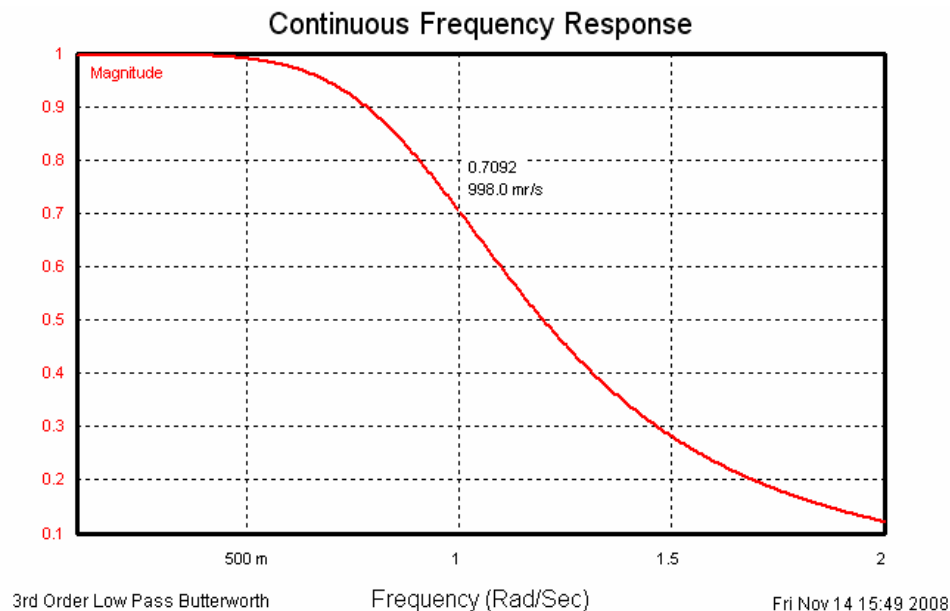
Нека је одабрана Батервортова апроксимација трећег реда и нека је одабран прототип филтра. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$) и Pass Band Frequency је 1 rad/s.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати микроталасни филтар позивом функције LCsintezа. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave. Номиналне импедансе приступа су 50Ω .

На слици 154 је приказана спецификација филтра, док је на слици 155 амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsintezа је приказан на слици 156. Слика 157 приказује шему филтра у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsintezа. На слици 158 је амплитудски одзив филтра добијен помоћу MWO-а. На слици 159 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave. Слика 160 приказује амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave.



Слика 154. Спецификација Батервортовог филтра трећег реда. Filter Solutions.



Слика 155. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 154. Filter Solutions.

```

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

num=[ 1.000000]
den=[ 1.000000 2.000000 2.000000 1.000000]

Z0[Ohm]    Rg[Ohm]    R0[Ohm]
50.000000  1.000000  1.000000

Shema sa idealnim elementima 1
tip    sastav      L [H]    C [F]
1      1           0.000000  1.000000
0      0           2.000000  0.000000
1      1           0.000000  1.000000

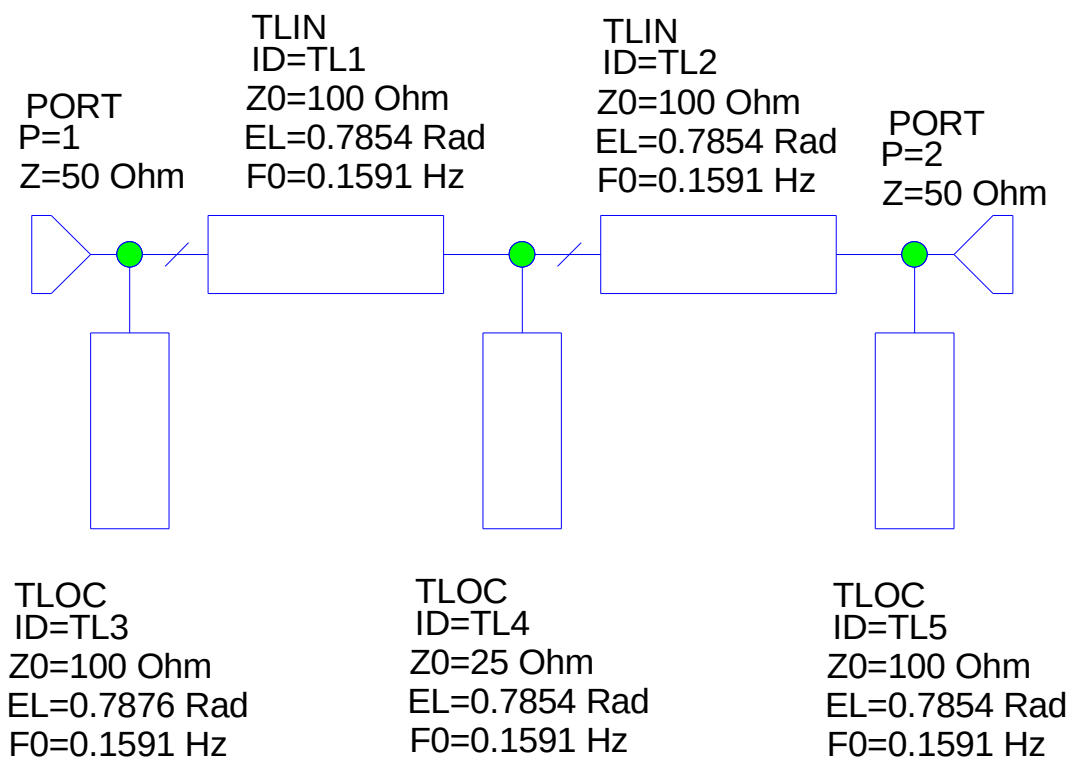
Shema sa idealnim elementima 2
tip    sastav      L [H]    C [F]
0      0           1.000000  0.000000
1      1           0.000000  2.000000
0      0           1.000000  0.000000

Shema sa idealnim sekcijama vodova 1
vod    Zc[Ohm]      k.s.    eld[rad]    F0[Hz]
0      50.00000     0      0.785398    0.159100
1      100.00000    1      0.785398    0.159100
0      50.00000     0      0.785398    0.159100

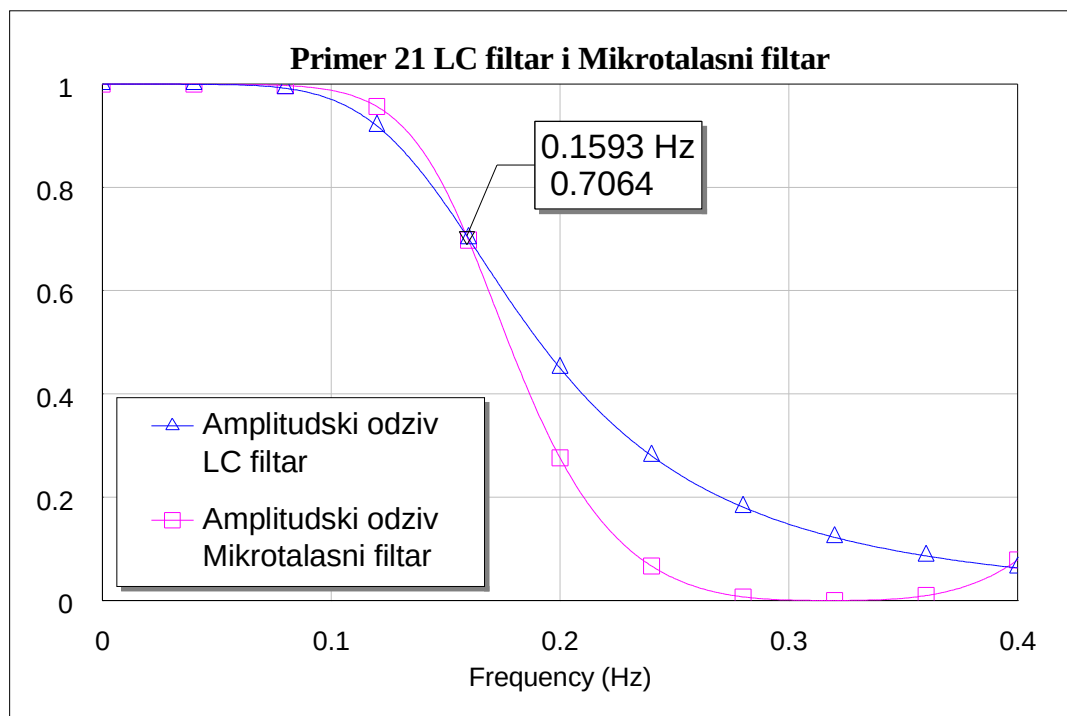
Shema sa idealnim sekcijama vodova 2
vod    Zc[Ohm]      k.s.    eld[rad]    F0[Hz]
0      100.00000    0      0.785398    0.159100
3      100.00000    0      0.785398    0.159100
0      25.00000     0      0.785398    0.159100
3      100.00000    0      0.785398    0.159100
0      100.00000    0      0.785398    0.159100

```

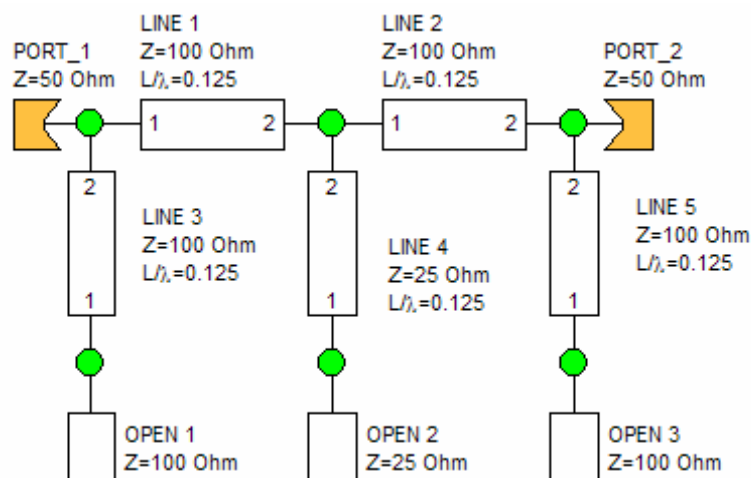
Слика 156. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 154. Пакет LCsinteza.



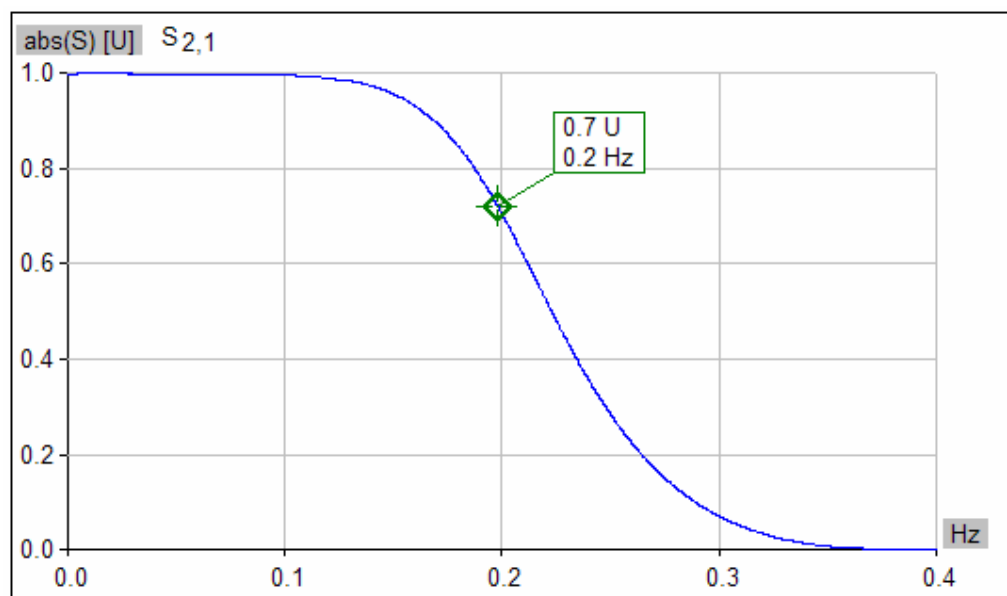
Слика 157. Шема филтра са идеалним секцијама водова према прорачуну са слике 156. Microwave Office.



Слика 158. Амплитудски одзив филтра са слике 157. Microwave Office.



Слика 159. Шема филтра са идеалним секцијама водова према прорачуну са слике 156. WIPL-D Microwave.



Слика 160. Амплитудски одзив филтра са слике 159. WIPL-D Microwave.

Упоредивањем слика 155, 158 и 160 се види да амплитудске карактеристике синтетисаног филтра одговарају амплитудској карактеристици филтра коју прави софтвер Filter Solutions.

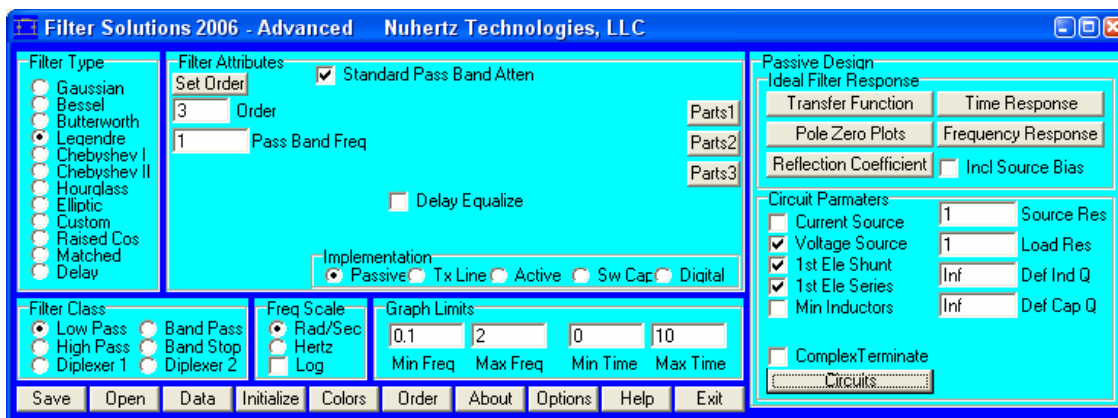
На слици 160 је амплитудска карактеристика филтра у програму WIPL-D Microwave и може се уочити да је тачка на фреквенцијској оси где напон има вредност 0.7 V померена на 0.2 Hz у односу на слику 158 коју даје MWO. Разлог томе је утицај ефекта отвореног вода, тј начин на који WIPL-D Microwave и MWO врше прорачун отворених водова.

Пример 22. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Лежандровог филтра трећег реда са карактеристичном импедансом 27 Ома.
Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office, WIPL-D Microwave.

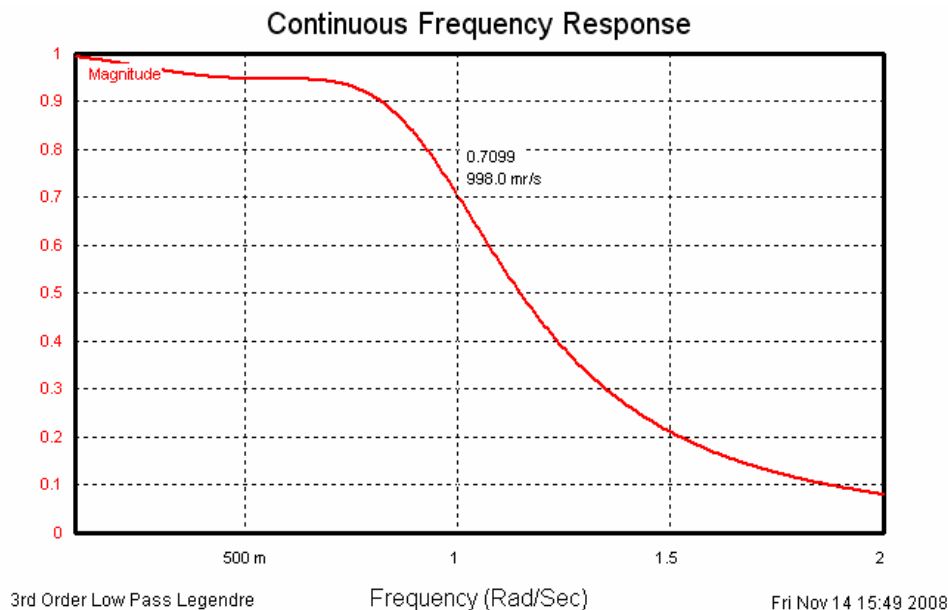
Нека је одабрана Лежандрова апроксимација трећег реда и нека је одабран прототип филтра. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$) и Pass Band Frequency је 1 rad/s.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати микроталасни филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave. Номиналне импедансе приступа су 27 Ω .

На слици 161 је приказана спецификација филтра, док је на слици 162 амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 163. Слика 164 приказује шему филтра у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 165 је амплитудски одзив филтра добијен помоћу MWO-а. На слици 166 је шема филтра у програму WIPL-D Microwave. Слика 167 приказује амплитудски одзив филтра добијен уз помоћ програма WIPL-D Microwave.



Слика 161. Спецификација Лежандровог филтра трећег реда. Filter Solutions.



Слика 162. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 161. Filter Solutions.

23-Nov-2008 18:06:06

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

num=[0.577350]

den=[1.000000 1.310700 1.358970 0.577350]

Z0[Ohm] Rg[Ohm] R0[Ohm]
 27.000000 1.000000 1.000000

Shema sa idealnim elementima 1

tip	sastav	L [H]	C [F]
1	1	0.000000	1.173699
0	0	1.353804	0.000000
1	1	0.000000	2.180109

Shema sa idealnim elementima 2

tip	sastav	L [H]	C [F]
1	1	0.000000	2.180109
0	0	1.353805	0.000000
1	1	0.000000	1.173699

Shema sa idealnim elementima 3

tip	sastav	L [H]	C [F]
0	0	1.173699	0.000000
1	1	0.000000	1.353804
0	0	2.180109	0.000000

Shema sa idealnim elementima 4

tip	sastav	L [H]	C [F]
0	0	2.180109	0.000000
1	1	0.000000	1.353805
0	0	1.173699	0.000000

Shema sa idealnim sekcijama vodova 1

vod	Zc[Ohm]	k.s.	eld[rad]	F0[Hz]
0	23.00420	0	0.785398	0.159100
1	36.55272	1	0.785398	0.159100
0	12.38470	0	0.785398	0.159100

Shema sa idealnim sekcijama vodova 2

vod	Zc[Ohm]	k.s.	eld[rad]	F0[Hz]
0	12.38470	0	0.785398	0.159100
1	36.55272	1	0.785398	0.159100
0	23.00420	0	0.785398	0.159100

Shema sa idealnim sekcijama vodova 3

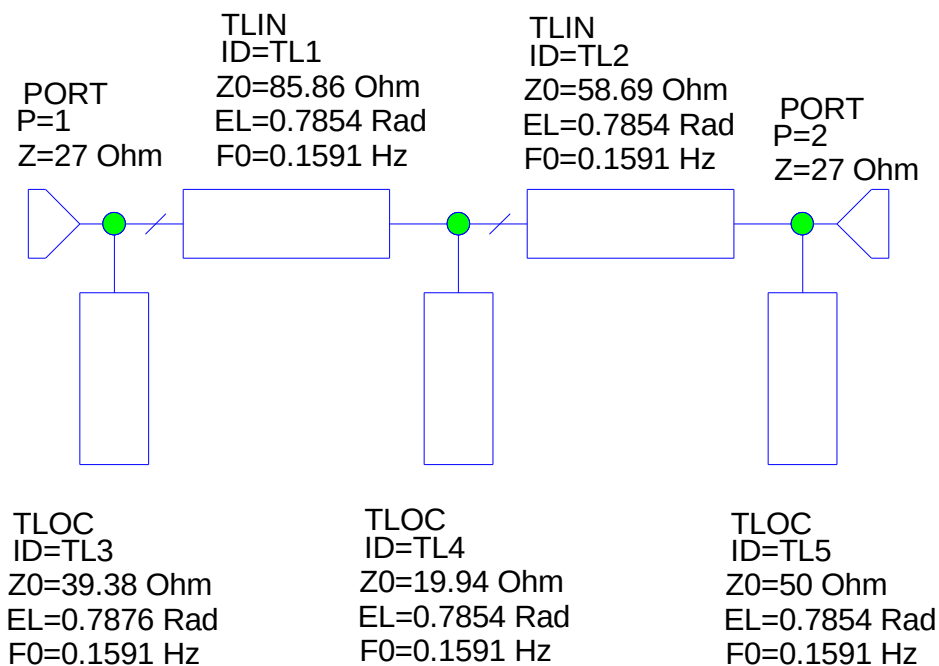
vod	Zc[Ohm]	k.s.	eld[rad]	F0[Hz]
0	50.00420	0	0.785398	0.159100
3	58.68987	0	0.785398	0.159100
0	19.94380	0	0.785398	0.159100
3	85.86295	0	0.785398	0.159100
0	39.38470	0	0.785398	0.159100

Shema sa idealnim sekcijama vodova 4

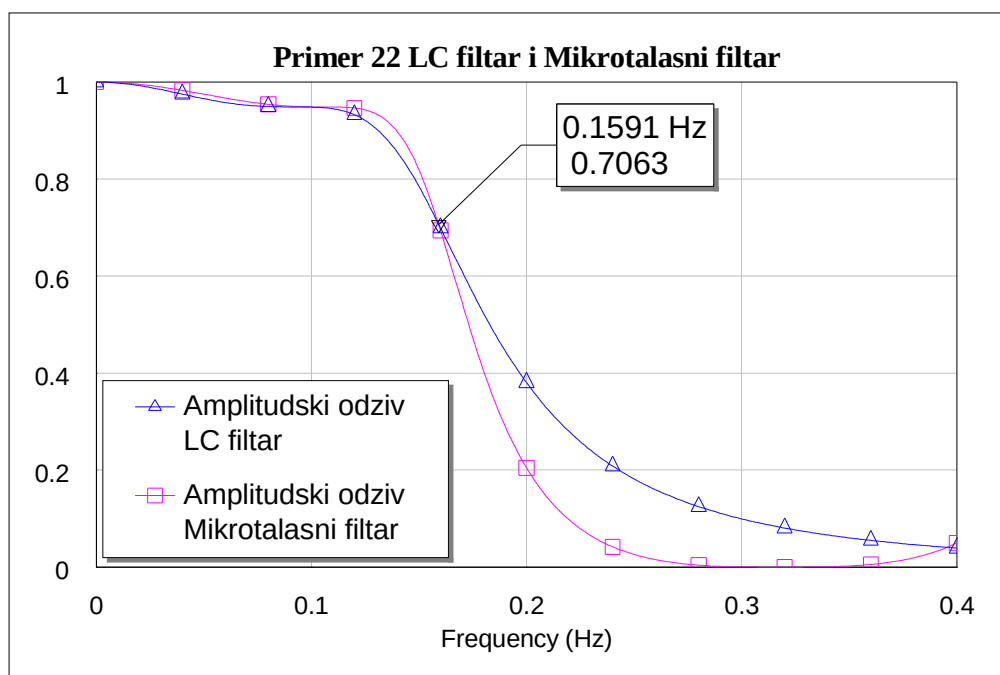
vod	Zc[Ohm]	k.s.	eld[rad]	F0[Hz]
0	39.38470	0	0.785398	0.159100
3	85.86295	0	0.785398	0.159100
0	19.94380	0	0.785398	0.159100

3	58.68986	0	0.785398	0.159100
0	50.00420	0	0.785398	0.159100

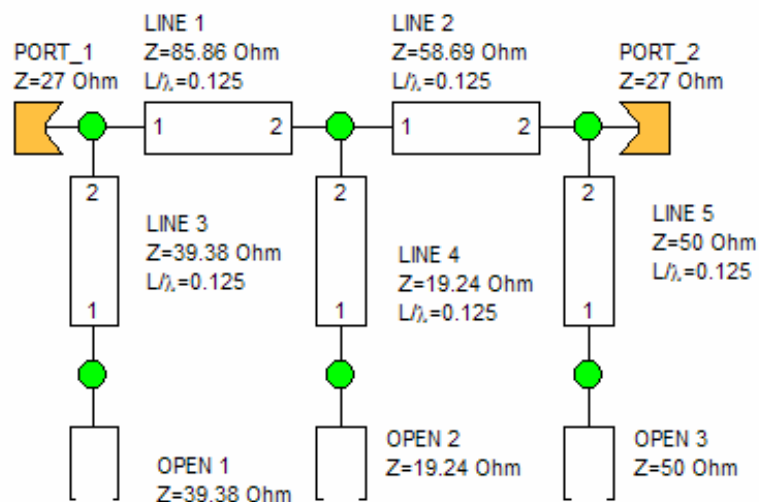
Слика 163. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 161. Пакет LCsinteza.



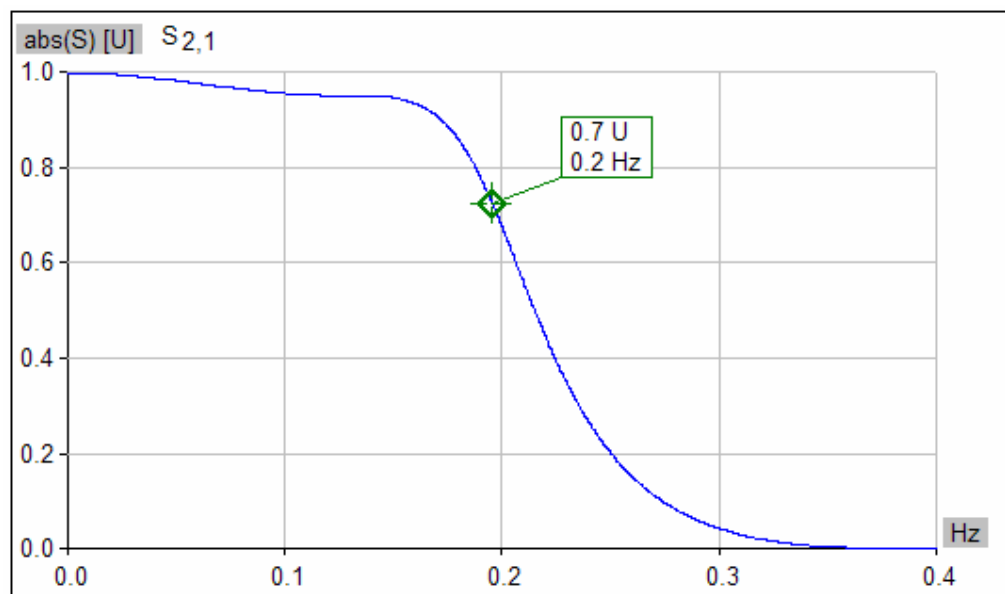
Слика 164. Шема филтра са идеалним секцијама водова према прорачуну са слике 163. Microwave Office.



Слика 165. Амплитудски одзив филтра са слике 164. Microwave Office.



Слика 166. Шема филтра са идеалним секцијама водова према прорачуну са слике 163. WIPL-D Microwave.



Слика 167. Амплитудски одзив филтра са слике 166. WIPL-D Microwave.

Упоредивањем слика 162, 165 и 167 се види да амплитудске карактеристике синтетисаног филтра у потпуности одговарају амплитудској карактеристици филтра коју прави софтвер Filter Solutions.

На слици 167 је амплитудска карактеристика филтра у програму WIPL-D Microwave и може се уочити да је тачка на фреквенцијској оси где напон има вредност 0.7 V померена на 0.2 Hz у односу на слику 165 коју даје MWO. Разлог томе је утицај ефекта отвореног вода, тј начин на који WIPL-D Microwave и MWO врше прорачун отворених водова.

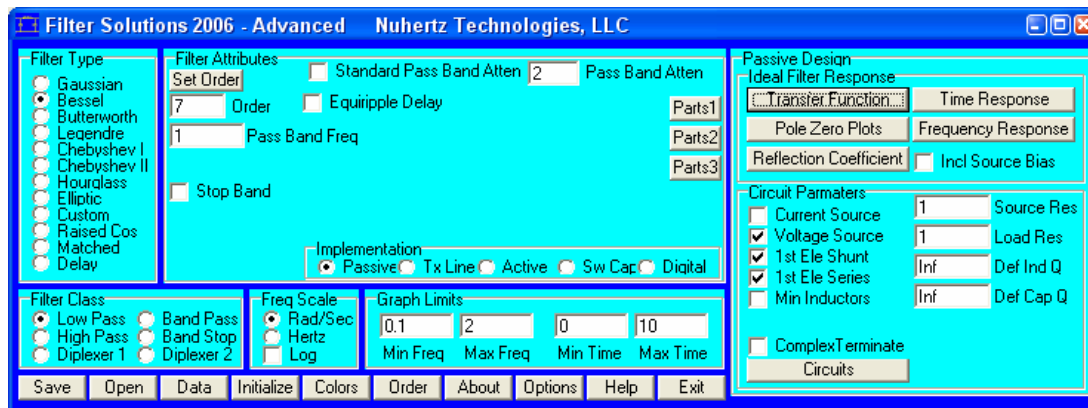
Пример 23. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Беселовог филтра седмог реда са карактеристичном импедансом 15 Ома и слабљењем на граничној учестаности 2 dB.

Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office.

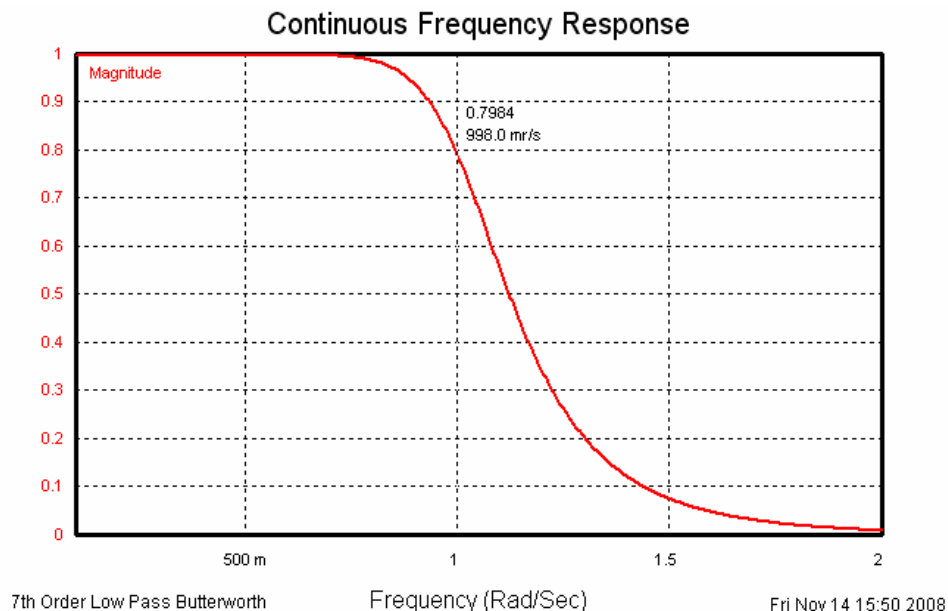
Нека је одабрана Беселова апроксимација седмог реда и нека је одабран прототип филтра. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Pass Band Attenuation је 2 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$) и Pass Band Frequency је 1 rad/s.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати микроталасни филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave. Номиналне импедансе приступа су 15Ω .

На слици 168 је приказана спецификација филтра, док је на слици 169 амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 170. Слика 171 приказује шему филтра у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 172 је амплитудски одзив филтра добијен помоћу MWO-а.



Слика 168. Спецификација Беселовог филтра седмог реда. Filter Solutions.



Слика 169. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 168. Filter Solutions.

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

num=[277.815000]

den=[1.000000 11.569090

64.531840222.194800504.937700751.071700672.379700277.815000]

Z0[Ohm] Rg[Ohm] R0[Ohm]

15.000000 1.000000 1.000000

Shema sa idealnim elementima 1

tip	sastav	L [H]	C [F]
1	1	0.000000	0.090655
0	0	0.267210	0.000000
1	1	0.000000	0.430382
0	0	0.575607	0.000000
1	1	0.000000	0.712552
0	0	0.906172	0.000000
1	1	0.000000	1.857909

Shema sa idealnim elementima 2

tip	sastav	L [H]	C [F]
1	1	0.000000	1.857909
0	0	0.906172	0.000000
1	1	0.000000	0.712552
0	0	0.575605	0.000000
1	1	0.000000	0.430369
0	0	0.267180	0.000000
1	1	0.000000	0.090668

Shema sa idealnim elementima 3

tip	sastav	L [H]	C [F]
0	0	0.090655	0.000000
1	1	0.000000	0.267210
0	0	0.430382	0.000000
1	1	0.000000	0.575607
0	0	0.712552	0.000000
1	1	0.000000	0.906172
0	0	1.857909	0.000000

Shema sa idealnim elementima 4

tip	sastav	L [H]	C [F]
0	0	1.857909	0.000000
1	1	0.000000	0.906172
0	0	0.712552	0.000000
1	1	0.000000	0.575605
0	0	0.430369	0.000000
1	1	0.000000	0.267180
0	0	0.090668	0.000000

Shema sa idealnim sekcijama vodova 1

vod	Zc[Ohm]	k.s.	eld[rad]	F0[Hz]
0	165.46276	0	0.785398	0.159100
1	4.00814	1	0.785398	0.159100
0	34.85275	0	0.785398	0.159100
1	8.63410	1	0.785398	0.159100
0	21.05111	0	0.785398	0.159100
1	13.59257	1	0.785398	0.159100
0	8.07359	0	0.785398	0.159100

Shema sa idealnim sekcijama vodova 2

vod	Zc[Ohm]	k.s.	eld[rad]	F0[Hz]
0	8.07359	0	0.785398	0.159100
1	13.59257	1	0.785398	0.159100
0	21.05111	0	0.785398	0.159100
1	8.63408	1	0.785398	0.159100
0	34.85378	0	0.785398	0.159100
1	4.00771	1	0.785398	0.159100
0	165.43934	0	0.785398	0.159100

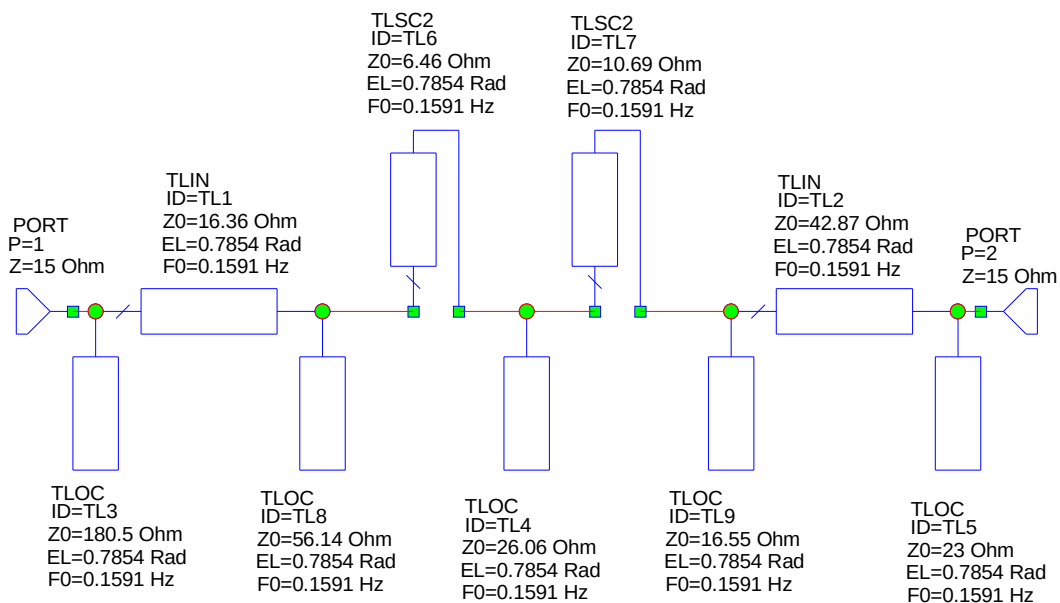
Shema sa idealnim sekcijama vodova 3

vod	Zc[Ohm]	k.s.	eld[rad]	F0[Hz]
0	180.46276	0	0.785398	0.159100
3	16.35982	0	0.785398	0.159100
0	56.13572	0	0.785398	0.159100
1	6.45573	1	0.785398	0.159100
0	26.05945	0	0.785398	0.159100
1	10.68827	1	0.785398	0.159100
0	16.55316	0	0.785398	0.159100
3	42.86863	0	0.785398	0.159100
0	23.07359	0	0.785398	0.159100

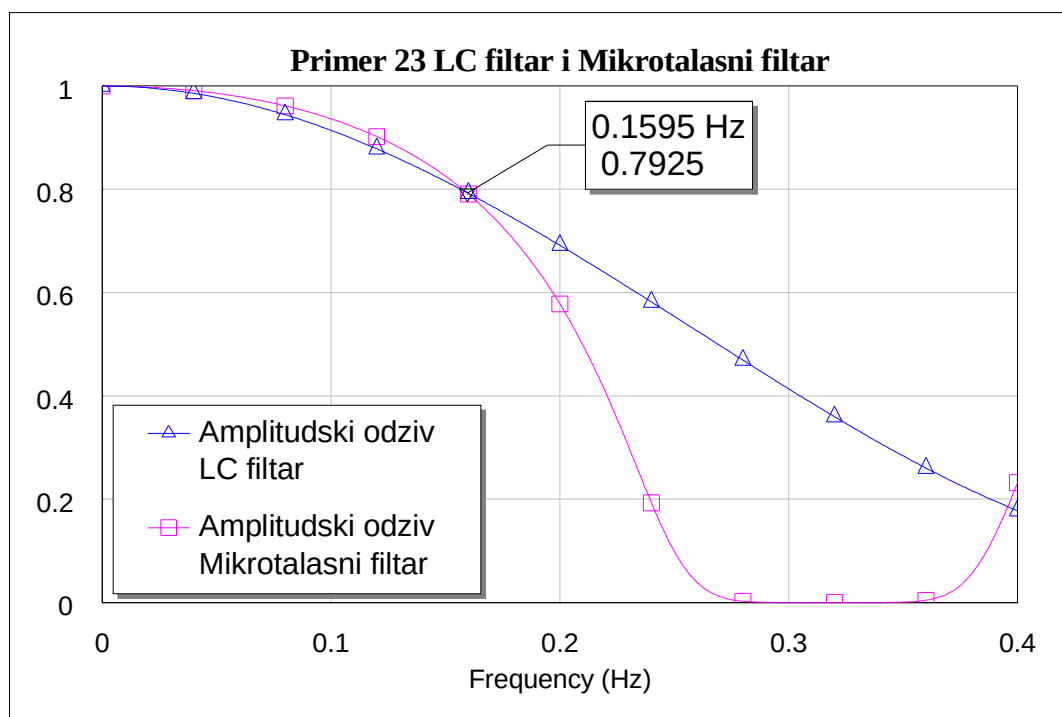
Shema sa idealnim sekcijama vodova 4

vod	Zc[Ohm]	k.s.	eld[rad]	F0[Hz]
0	23.07359	0	0.785398	0.159100
3	42.86863	0	0.785398	0.159100
0	16.55316	0	0.785398	0.159100
1	10.68827	1	0.785398	0.159100
0	26.05952	0	0.785398	0.159100
1	6.45554	1	0.785398	0.159100
0	56.14184	0	0.785398	0.159100
3	16.36002	0	0.785398	0.159100
0	180.43934	0	0.785398	0.159100

Слика 170. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 168. Пакет LCsinтеза.



Слика 171. Шема филтра са идеалним секцијама водова према прорачуну са слике 168. Microwave Office.



Слика 172. Амплитудски одзив филтра са слике 171. Microwave Office.

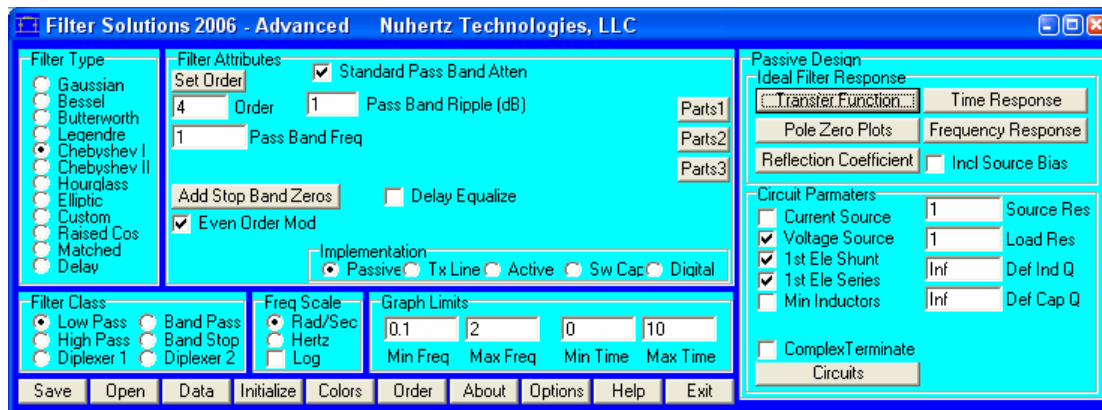
Упоређивањем слика 169 и 172 се види да амплитудска карактеристика синтетисаног филтра одговара амплитудској карактеристици филтра коју прави софтвер Filter Solutions.

Пример 24. Двоструко затворена шема са идеалним елементима Чебишевљевог филтра четвртог реда.
Пакет LCsintezа, Filter Solutions, Microwave Office.

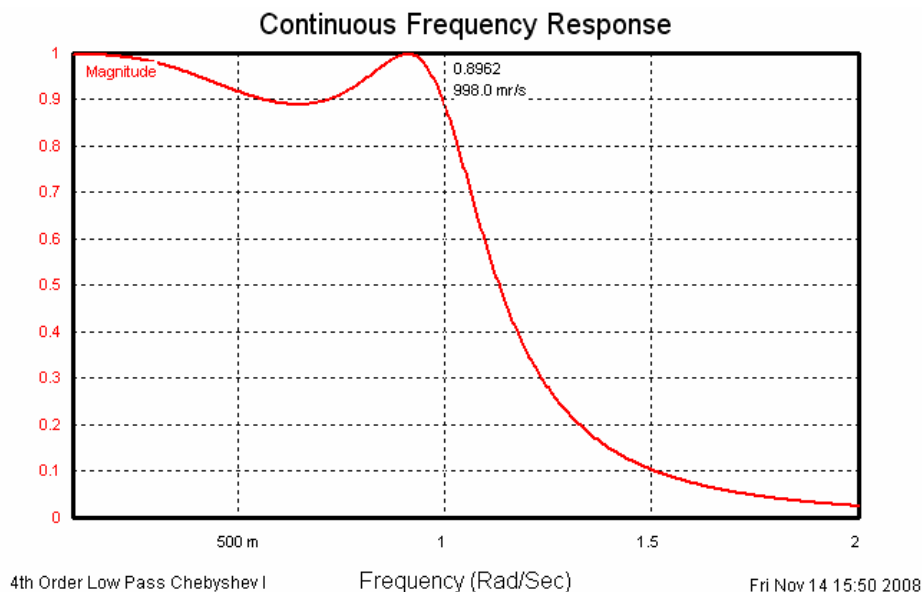
Нека је одабрана Чебишевљева апроксимација четвртог реда и нека је одабран прототип филтра. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1 \Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1 \Omega$), Pass Band Frequency је 1 rad/s и Pass Band Ripple је 1 dB. Нека је, збор парног реда двоструко затвореног филтра, активирана трансформација коефицијента рефлексије филтра (Even Order Mod).

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати микроталасни филтар позивом функције LCsintezа. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave. Номиналне импедансе приступа су 75Ω .

На слици 173 је приказана спецификација филтра, док је на слици 174 амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsintezа је приказан на слици 175. Слика 176 приказује шему филтра у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsintezа. На слици 177 је амплитудски одзив филтра добијен помоћу MWO-а.



Слика 173. Спецификација Чебишевљевог филтра четвртог реда. Filter Solutions.



Слика 174. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 173. Filter Solutions.

```

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

num=[ 0.337180]
den=[ 1.000000 1.275920 1.642420 1.052420 0.337180]

Z0[Ohm]    Rg[Ohm]    R0[Ohm]
75.000000  1.000000  1.000000

Shema sa idealnim elementima 1
tip  sastav      L [H]    C [F]
0     0          1.570985  0.000000
1     1          0.000000  1.550258
0     0          1.557218  0.000000
1     1          0.000000  1.564021

Shema sa idealnim elementima 2
tip  sastav      L [H]    C [F]
1     1          0.000000  1.570985
0     0          1.550258  0.000000
1     1          0.000000  1.557218
0     0          1.564021  0.000000

Shema sa idealnim elementima 3
tip  sastav      L [H]    C [F]
1     1          0.000000  1.564021
0     0          1.557218  0.000000
1     1          0.000000  1.550258
0     0          1.570985  0.000000

Shema sa idealnim elementima 4
tip  sastav      L [H]    C [F]
0     0          1.564021  0.000000
1     1          0.000000  1.557218
0     0          1.550258  0.000000
1     1          0.000000  1.570985

Shema sa idealnim sekcijama vodova 1
vod  Zc[Ohm]      k.s.    eld[rad]    F0[Hz]
0    122.74074    0      0.785398    0.159100
3    192.82389    0      0.785398    0.159100
0    48.37905     0      0.785398    0.159100
1    116.79138    1      0.785398    0.159100
0    47.95331     0      0.785398    0.159100

Shema sa idealnim sekcijama vodova 2
vod  Zc[Ohm]      k.s.    eld[rad]    F0[Hz]
0    47.74074     0      0.785398    0.159100
1    116.26934    1      0.785398    0.159100
0    48.16280     0      0.785398    0.159100
3    192.30159    0      0.785398    0.159100
0    122.95331    0      0.785398    0.159100

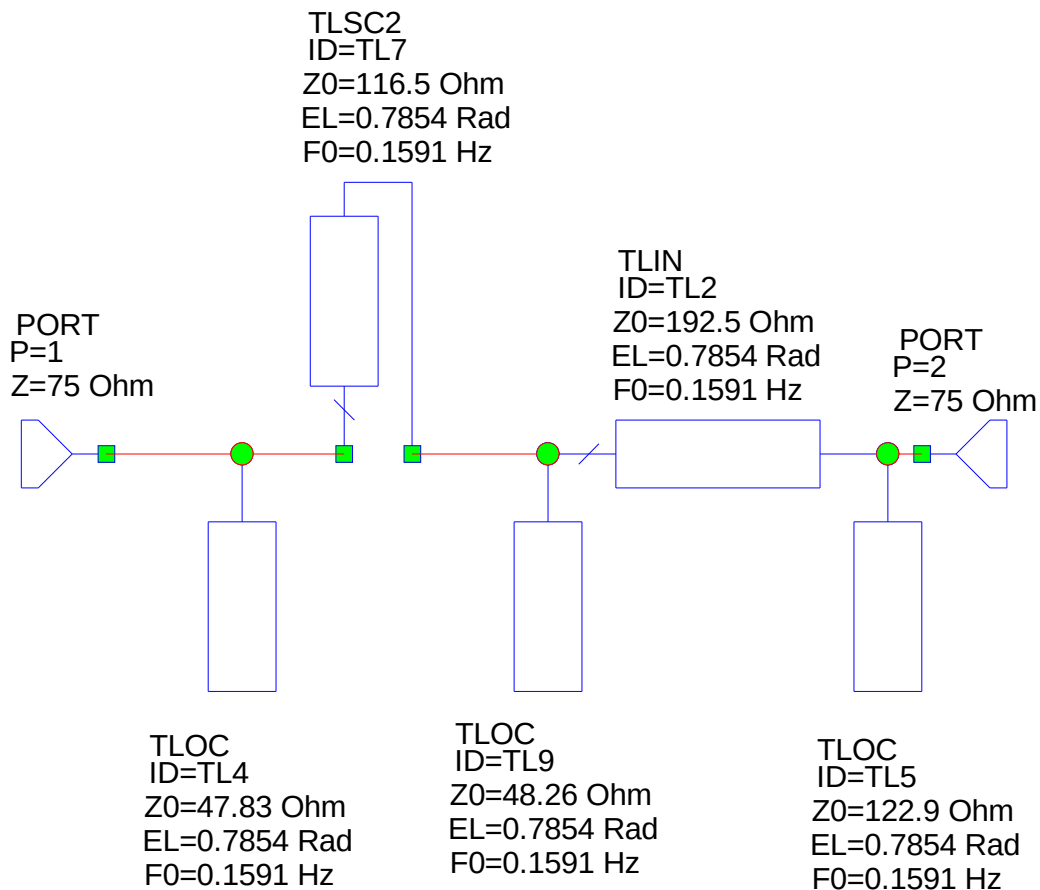
Shema sa idealnim sekcijama vodova 3
vod  Zc[Ohm]      k.s.    eld[rad]    F0[Hz]
0    47.95331     0      0.785398    0.159100
1    116.79138    1      0.785398    0.159100
0    48.37905     0      0.785398    0.159100
3    192.82389    0      0.785398    0.159100
0    122.74074    0      0.785398    0.159100

```

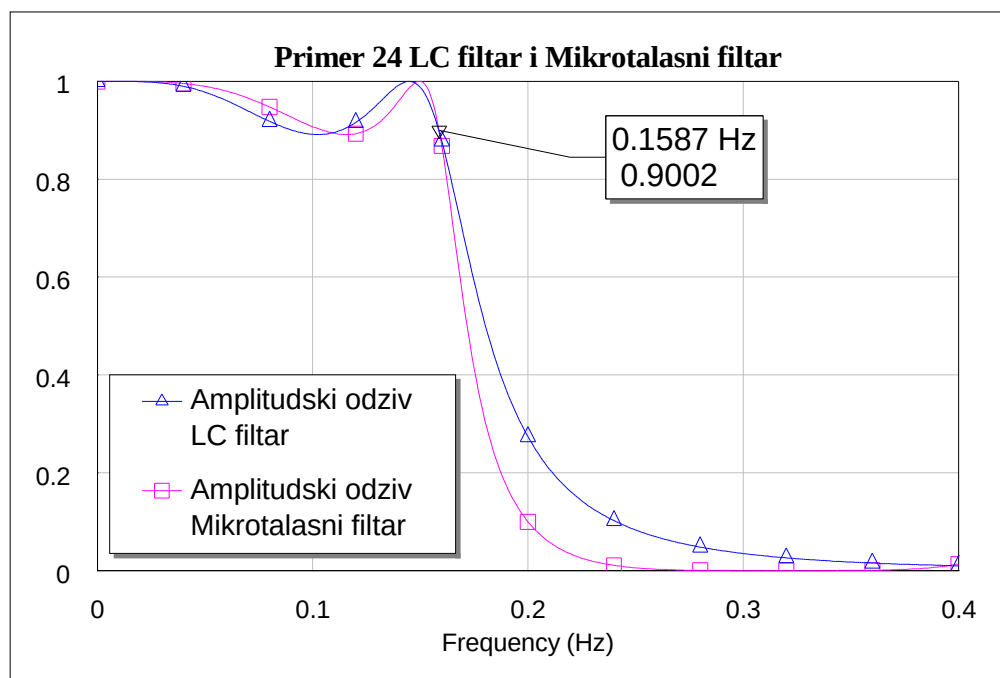
Schema sa idealnim sekcijama vodova 4

vod	Zc[Ohm]	k.s.	eld[rad]	F0[Hz]
0	122.95331	0	0.785398	0.159100
3	192.30159	0	0.785398	0.159100
0	48.16280	0	0.785398	0.159100
1	116.26934	1	0.785398	0.159100
0	47.74074	0	0.785398	0.159100

Слика 175. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 173. Пакет LCsinteza.



Слика 176. Шема филтра са идеалним секцијама водова према прорачуну са слике 175. Microwave Office.



Слика 177. Амплитудски одзив филтра са слике 176. Microwave Office.

Упоредивањем слика 174 и 179 се види да амплитудска карактеристика синтетисаног филтра одговара амплитудској карактеристици филтра коју прави софтвер Filter Solutions.

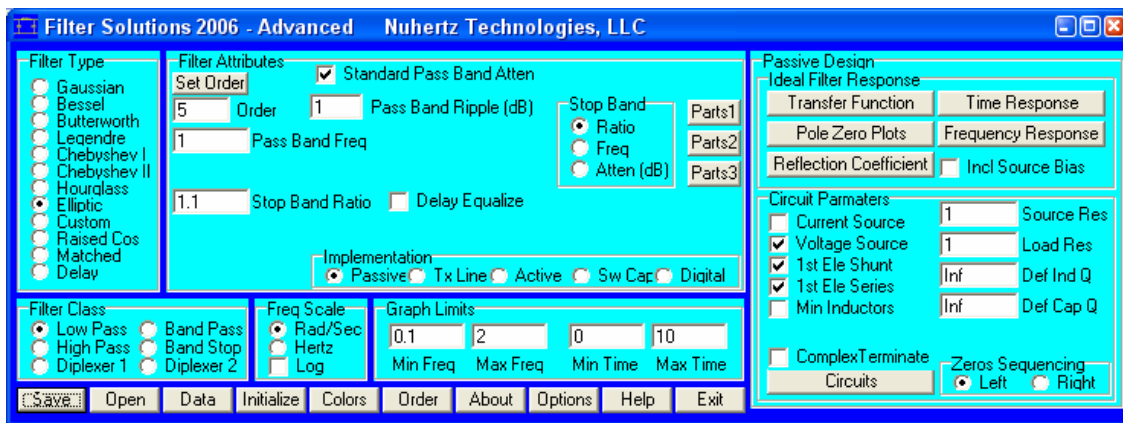
Пример 25. Двоструко затворена шема са идеалним елементима елиптичког филтра петог реда.

Пакет LCsinteza, Filter Solutions, Microwave Office.

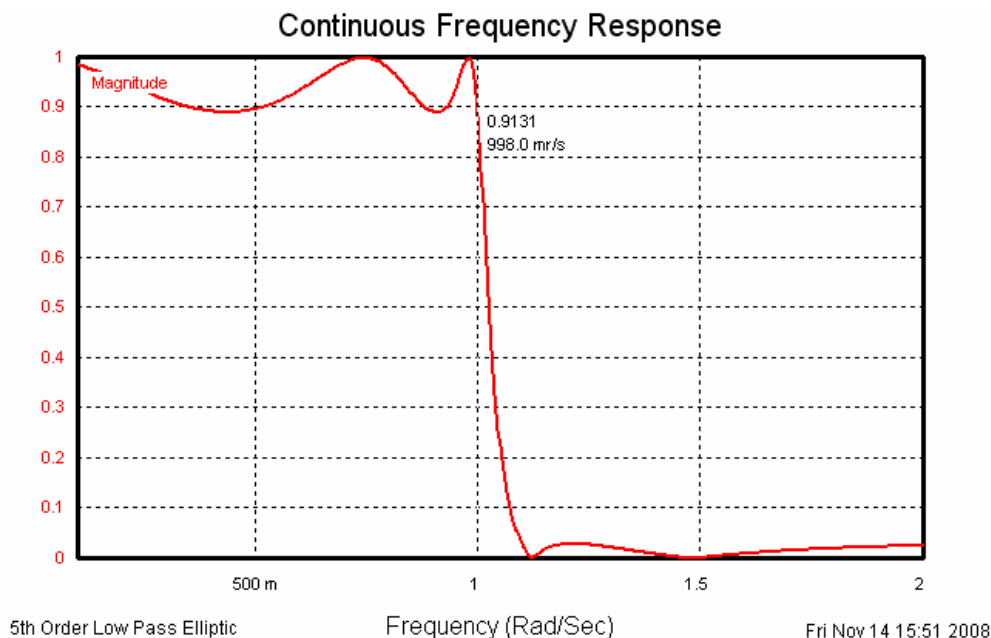
Нека је одабрана елиптичка апроксимација петог реда и нека је одабран прототип филтра. Одговарајућа функција преноса се може одредити програмом Filter Solutions ако се задају следеће вредности: Standard Pass Band Attenuation је 3.010 dB, Source Res (Source Resistance) је 1 ($R_g = 1\Omega$), Load Res (Load Resistance) је 1 ($R_0 = 1\Omega$), Pass Band Frequency је 1 rad/s, Stop Band Ratio је 1.1 и Pass Band Ripple је 1 dB.

На основу функције преноса коју рачуна Filter Solutions, синтетисати микроталасни филтар позивом функције LCsinteza. Резултате синтезе проверити у програмима MWO и WIPL-D Microwave. Номиналне импедансе приступа су 50Ω .

На слици 173 је приказана спецификација филтра, док је на слици 174 амплитудски одзив филтра. Прорачун филтра помоћу пакета LCsinteza је приказан на слици 175. Слика 176 приказује шему филтра у програму MWO, где су вредности елемената прорачунате коришћењем пакета LCsinteza. На слици 177 је амплитудски одзив филтра добијен помоћу MWO-а.



Слика 178. Спецификација елиптичког филтра петог реда. Filter Solutions.



Слика 179. Амплитудски одзив филтра чија је спецификација на слици 178. Filter Solutions.

```

23-Nov-2008 18:13:51

LCsinteza Ver. 1.0 (c)2008

num=[ 0.111514 0.000000 0.384993 0.000000 0.307980]
den=[ 1.000000 0.920092 1.929635 1.219899 0.891797 0.307980]

Z0[Ohm]    Rg[Ohm]    R0[Ohm]
50.000000  1.000000  1.000000

Shema sa idealnim elementima 1
tip  sastav      L [H]    C [F]
1    1          0.000000 1.696907
0    3          0.775115 0.588270
1    1          0.000000 1.798925
0    3          0.399221 1.989070
1    1          0.000000 1.121087

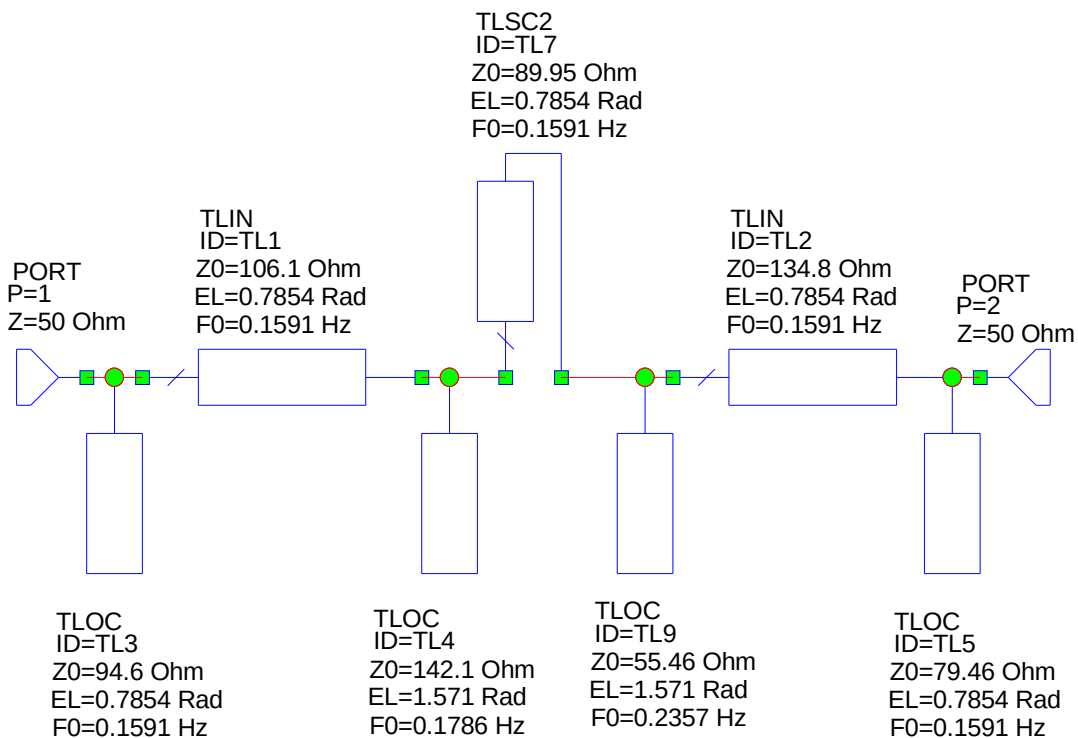
Shema sa idealnim elementima 2
tip  sastav      L [H]    C [F]
0    0          1.696907 0.000000
1    2          0.588270 0.775115
0    0          1.798925 0.000000
1    2          1.989070 0.399221
0    0          1.121087 0.000000

Shema sa idealnim sekcijama vodova 1
vod  Zc[Ohm]      k.s.    eld[rad]  F0[Hz]
0    29.46537     0      0.785398  0.159100
1    45.07694     1      1.570796  0.235694
0    27.79438     0      0.785398  0.159100
1    17.59307     1      1.570796  0.178603
0    44.59956     0      0.785398  0.159100

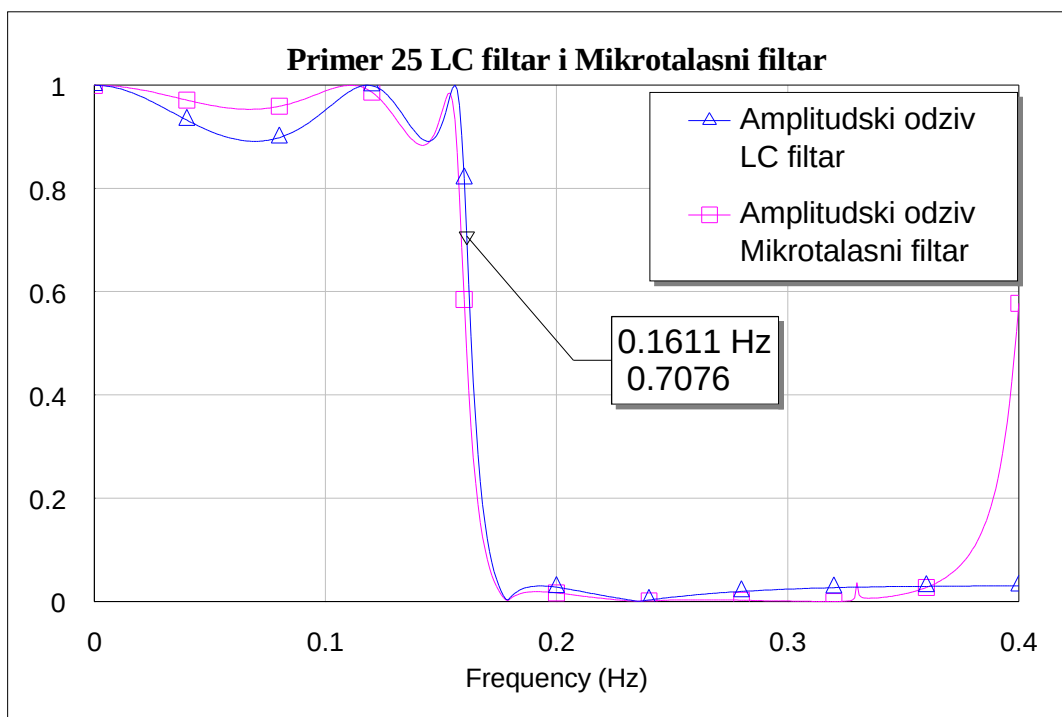
Shema sa idealnim sekcijama vodova 2
vod  Zc[Ohm]      k.s.    eld[rad]  F0[Hz]
0    79.46537     0      0.785398  0.159100
3    134.84535     0      0.785398  0.159100
0    55.46072     0      1.570796  0.235694
1    89.94624     1      0.785398  0.159100
0    142.10140     0      1.570796  0.178603
3    106.05437     0      0.785398  0.159100
0    94.59956     0      0.785398  0.159100

```

Слика 180. Прорачун филтра чија је спецификација на слици 178. Пакет LCsinteza.



Слика 181. Шема филтра са идеалним секцијама водова према прорачуну са слике 180. Microwave Office.



Слика 182. Амплитудски одзив филтра са слике 181. Microwave Office.

Упоредивањем слика 179 и 182 се види да амплитудска карактеристика синтетисаног филтра одговара амплитудској карактеристици филтра коју прави софтвер Filter Solutions.

Списак функција софтверског пакета LCsinteza

bvn	без водећих нула. Уклања водеће нуле са леве стране низа.
check2	check 2 (провера 2). Проверава елементе тродимензионалног низа LCmatrica.
check	check (провера). Проверава да ли је рационална функција остварљива имитанса.
checkZero	checking zeros (провера нула). Проверава нуле функције $K_1(s)$.
differ	difference (разлика). Испитује нумеричку грешку као последицу дискретног нумеричког записа бројева.
eop	even-odd polynomial part (парни и непарни део полинома). Рачуна парни и непарни део полинома.
equdim	equal dimension (изједначавање дужина улазних низова (полинома)). Врши изједначавање дужина улазних полинома додавањем водећих нула са леве стране.
ffilmax	find filter transfer function maximum (проналажење нула коефицијента рефлексije филтра). Употребљава се за проналажење нула коефицијента рефлексije филтра парног реда.
LCsinteza2	синтеза LC кола 2. Врши синтезу филтара парног реда.
LCsinteza	синтеза LC кола. Врши синтезу филтара (главна функција, носи име целог софтверског пакета).
MT	микроталасна секција вода. Врши добијање шеме филтара са идеалним секцијама водова.
nlcc	налажење LC complex (налажење LC елемената за функције мреже са комплексним нулама у бројиоцу). Функција проналази LC шему на основу функције мреже која има комплексне нуле.
nlczz	налажење LC за константу (налажење LC елемената за функције мреже са константом у бројиоцу). Функција проналази LC шему на основу функције мреже која има константу у бројиоцу.
nrk	nulls ready for k (припрема нула функције $K_1(s)$ за даљу обраду). Обезбеђује груписање нула помоћне функције $K_1(s)$ за даљу обраду.
nsetup	nulls setup (нумеричко подешавање нула функције $K_1(s)$). Врши припрему нула функције $K_1(s)$ за даљу обраду.
nulstr	null straight to (заокруживање бројева ка нули). Врши заокруживање релативно малих бројева ка нули.
pdeg	polynom degree (степен полинома). Одређује степен полинома.
polydivo2	polynomial division using 2nd order polynom (дељење полинома квадратним триномом). Врши дељење полинома квадратним триномом.
polymul	polynomial multiplication (множење полинома). Врши множење полинома.
round2	rounding 2 (заокруживање бројева за произвољну толеранцију). Врши заокруживање бројева за задату толеранцију.
skr	скраћивање бројиоца и имениоца. Врши скраћивање бројиоца и имениоца праве, рационалне функције.
zeroTransf	zeros transformation (трансформација нула и полова). Врши трансформацију нула и полова неких филтара парног реда.

Посебно издвојен фајл:

starter.m	скрипт фајл коришћен од стране аутора пакета ради покретања функције LCsinteza. Није обавезно користити га. Олакшава употребу пакета LCsinteza ако се улазни подаци добијају из програма Filter Solutions.
-----------	--

Списак коришћених ознака

$A(s)$	унето слабљење
$A(j\omega)$	унето слабљење на имагинарној оси
A_p	највеће дозвољено слабљење у пропусном опсегу
A_s	најмање дозвољено слабљење у непропусном опсегу
C	капацитивност
d	оператор диференцирања
$D(s)$	именилац функције мреже
f	учестаност
F_p	гранична учестаност пропусног опсега
F_s	гранична учестаност непропусног опсега
$\Phi(\omega)$	фазни одзив
$h(t)$	имплулсни одзив филтра
$H(j\omega)$	фреквенцијски одзив
$H(s)$	функција преноса
H'	ненормализована функција преноса
H_{DC}	функција преноса филтра при фреквенцији нула
j	имагинарна јединица
$K(\omega)$	карактеристична функција
$K_1(-s^2)$	помоћна функција
L	индуктивност
λ_g	таласна дужина на воду
$M(\omega)$	амплитудски одзив
$M_{\max}$	максимална вредност амплитудског одзива
$N(s)$	бројилац функције мреже
ω	кружна учестаност, имагинарни део комплексне променљиве Лапласове трансформације
π	константа „пи” (3.14159265358979)
R_g	отпорност генератора

R_p	отпорност потрошача
σ	реални део комплексне променљиве Лапласове трансформације
s	комплексна променљива Лапласове трансформације
t	време
$T(s)$	преносна функција
$T_a(s)$	пропусна функција
$T_m(s)$	модулска функција
$\tau(\omega)$	временско кашњење
Θ	електрична дужина
$u(t)$	тренутна вредност напона
$\underline{U}(s)$	Лапласова трансформација напона
$U_2(s)$	Лапласова трансформација напона потрошача
$U_g(s)$	Лапласова трансформација напона генератора
V_0	напон на потрошачу
V_g	напон генератора
w_t	највиша нула коефицијента рефлексije
w_r	најнижа нула коефицијента рефлексije
Y	адмитанса
Y_C	карактеристична адмитанса
y_{kk}	адмитансни параметри
Z	импеданса
Z_C	карактеристична импеданса
z_{kk}	импедансни параметри