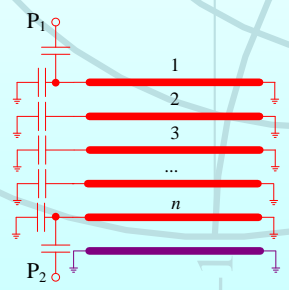
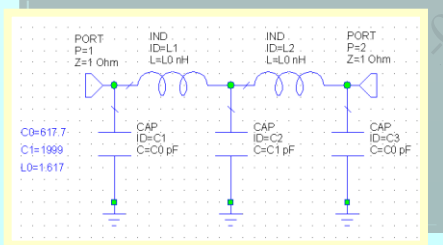
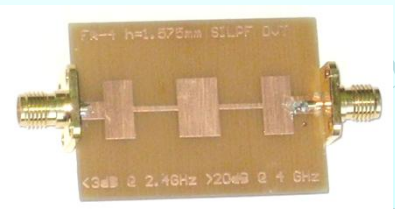
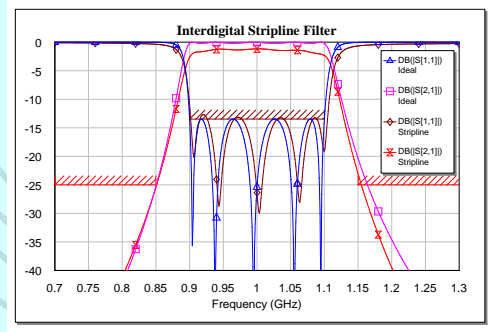


Пројектовање микроталасних филтара

Филтри пропусници опсега у микротракастој техници



Милка Потребих
Дејан Тошић



Филтри пропусници опсега у микротракастој техници (1)

- Приказан је преглед реализација филтара пропусника опсега у техници микротракастих водова.
- Размотрене су опште особине филтара, а изложен је детаљан поступак реализације са освртом на површину заузећа штампане плочице.
- Акцент је стављен на реализације филтара уског пропусног опсега који се састоје од спрегнутих водова.
- Ови филтри припадају класи филтара са спрегнутим резонаторима, а у њих убрајамо
 - филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима,
 - филтар са укосницама,
 - интердигитални филтар,
 - чешљасти филтар, као и неке њихове модификације.



Филтри пропусници опсега у микротракастој техници (2)

- Резонатори могу бити реализовани само помоћу водова као што су полуталасни односно четвртталасни ако су уземљени, а заступљени су код прве три врсте филтара.
- При реализацији резонатора осим водова могу се користити и елементи са концентрисаним параметрима (кондензатори) као код чешљастиг филтра. Исти водови који се употребљавају као резонатори, употребљавају се и за спрегу. Спрега је расподељена.
- Резонантне учестаности резонатора су међусобно једнаке или блиске централној учестаности филтра.



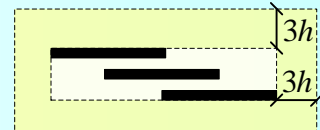
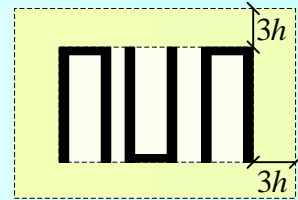
Филтри пропусници опсега у микротракастој техници (3)

- Филтар пропушта сигнале чија је учестаност у околини тих резонантних учестаности, а слаби сигнале других учестаности. Набројаним реализацијама могу се остварити само полиномски филтри.
- При пројектовању филтара уског пропусног опсега најчешће се користи Dishal-ов поступак за одређивање почетних геометријских димензија филтра.
- У случају да спецификација филтра није задовољена почетним димензијама, прибегава се поступку оптимизације.
- „Port tuning“ оптимизација се користи уместо 3D EM оптимизације у циљу уштеде времена.



Филтри пропусници опсега у микротракастој техници (4)

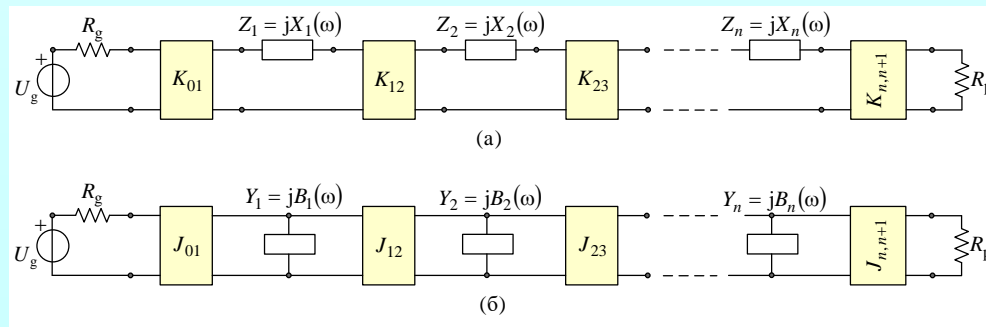
- Минијатуризација димензија филтра је незаобилазна при пројектовању савремених уређаја.
- Као мера минијатуризације уводи се површина заузећа штампане плочице која се може дефинисати као површина најмањег правоугаоника који обухвата целу штампану структуру.
- Да би се избегле нежељене спреге са суседним микротракастим водовима дефинише се заштитна зона („guard zone“) око структуре и одређује се површина правоугаоника који је окружује.
- Обично се узима да је ширина заштитне зоне $3h$ што је у већини практичних случајева довољно да би се избегао утицај нежељених спрега. При налажењу ових површина заузећа не узимају се у обзир уводници, већ само резонатори.





Реализације полиномског филтра помоћу идеалних елемената (1)

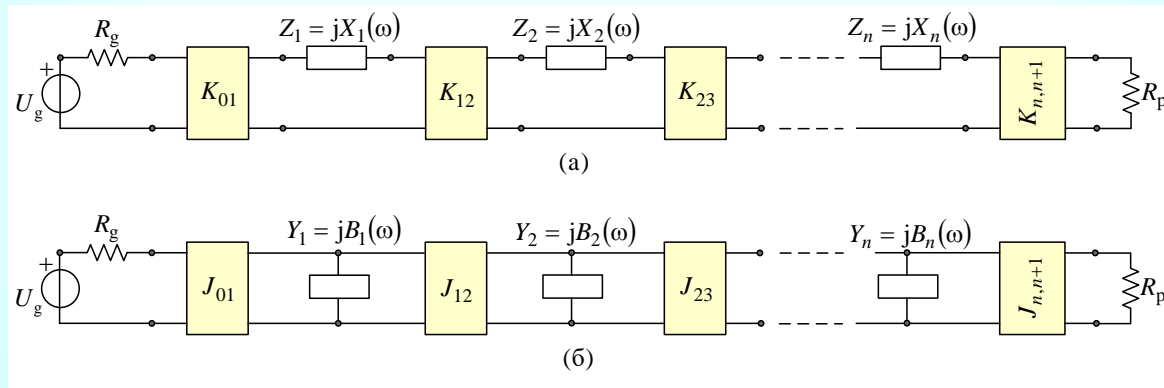
- Опште шеме реализације полиномског филтра помоћу имитансних инвертора и резонатора који нису у спрези.
- Спруге суседних резонатора моделоване су инверторима.
- Приказана је реализација филтра пропусника опсега учестаности са импедансним инверторима и резонаторима у редним гранама.
- LC -резонатори су представљени њиховим реактансама.
- Дуална реализација помоћу адмитансних инвертора и резонатора у паралелним гранама. Резонатори су у овом случају представљени њиховим susceptансама.





Реализације полиномског филтра помоћу идеалних елемената (2)

$$K_{01} = \sqrt{\frac{R_g B_\Delta x_1}{\Omega_{p, \text{proto}} R_{g, \text{proto}} C_{1, \text{proto}}}} \quad K_{i, i+1} = \frac{B_\Delta}{\Omega_{p, \text{proto}}} \sqrt{\frac{x_i x_{i+1}}{L_{i, \text{proto}} C_{i+1, \text{proto}}}} \Big|_{i=1, \dots, n-1} \quad K_{n, n+1} = \sqrt{\frac{B_\Delta x_n R_p}{\Omega_{p, \text{proto}} C_{n, \text{proto}} R_{p, \text{proto}}}} \quad x_i = \frac{\omega_0}{2} \frac{dX_i(\omega)}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_0}$$



$$J_{01} = \sqrt{\frac{B_\Delta b_1}{R_g \Omega_{p, \text{proto}} R_{g, \text{proto}} C_{1, \text{proto}}}} \quad J_{i, i+1} = \frac{B_\Delta}{\Omega_{p, \text{proto}}} \sqrt{\frac{b_i b_{i+1}}{L_{i, \text{proto}} C_{i+1, \text{proto}}}} \Big|_{i=1, \dots, n-1} \quad J_{n, n+1} = \sqrt{\frac{B_\Delta b_n}{\Omega_{p, \text{proto}} C_{n, \text{proto}} R_{p, \text{proto}} R_p}} \quad b_i = \frac{\omega_0}{2} \frac{dB_i(\omega)}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_0}$$



Реализације полиномског филтра помоћу идеалних елемената (3)

- Спруге моделоване помоћу инвертора нису фреквенцијски зависне, за разлику од спруга остварених помоћу линеарног индуктивног трансформатора.
- Изводе се шеме са идеалним елементима у којима се појављују огранци водова, секције водова и секције парова спрегнутих водова. Вод се обично црта на шемама као пар проводника који подсећају на двојични вод.
- Биће приказане релације између параметара LC -шеме филтра са инверторима, еквивалентне представе са одсечцима и огранцима водова и шеме са секцијама парова спрегнутих водова.
- Све три реализације имају идентичне матрице система , односно нормализоване матрице.
- Познајући коефицијенте спруга резонатора и Q -факторе оптерећених резонатора могу се наћи параметри било које од наведене три реализације.



Реализација редног LC -резонатора помоћу огранка кратко спојеног и отвореног вода

Diagram illustrating the realization of an LC resonator using waveguide sections.

The circuit on the left shows an inductor L and a capacitor C connected in series, with an input impedance Z_{us} .

The top waveguide section is a shorted section of length $l = n \frac{\lambda_{g0}}{2}$, connected to Z_{us} . The characteristic impedance is Z_c .

The bottom waveguide section is an open section of length $l = \frac{(2n-1)}{4} \lambda_{g0}$, connected to Z_{us} . The characteristic impedance is Z_c .

The input reactance for the shorted section is given by the equation:

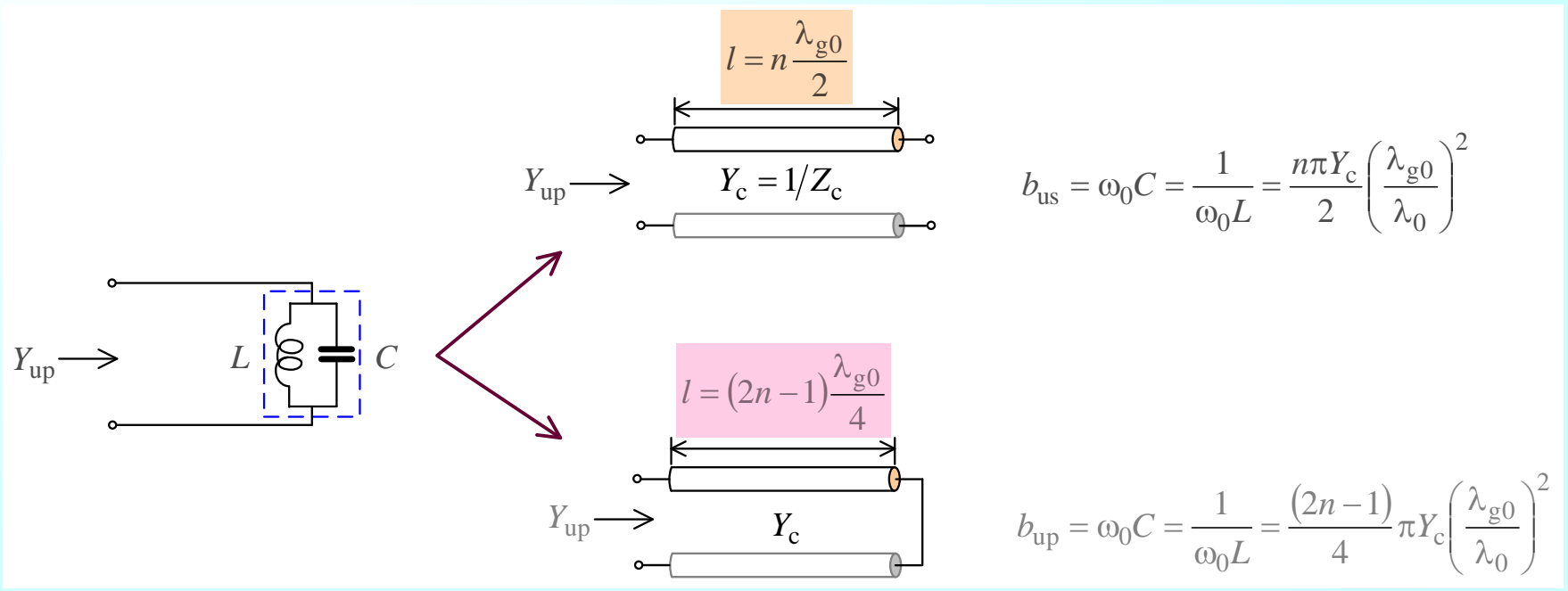
$$x_{us} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{n\pi Z_c}{2} \left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0} \right)^2$$

The input reactance for the open section is given by the equation:

$$x_{us} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{(2n-1)}{4} \pi Z_c \left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0} \right)^2$$

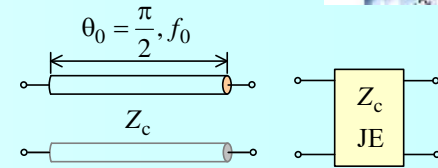


Реализација паралелног LC -резонатора помоћу огранка кратко спојеног и отвореног вода





Имитансни инвертори



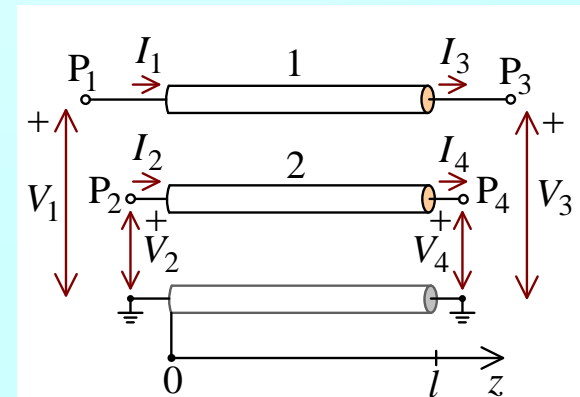
- Имитансни инвертори се замењују четвртталасним трансформатором који представља одсечак идеалног вода без губитака дужине $\lambda_g/4$
- Карактеристична импеданса четвртталасног трансформатора је $Z_c = K$, односно карактеристична адмитанса је $Y_c = J$.
- Овај елемент већина аутора назива јединичним елементом (JE). Својство инверзије импедансе тачно важи само на учестаности f_0 , али се сматра да практично важи у уском опсегу учестаности око f_0 .
- Пар инвертора се може употребити за претварање редне импедансе у паралелну и обрнуто. Инвертори се првенствено користе за реализацију филтра пропусника и непропусника опсега када је подесно да резонатори буду само у паралелним или само у редним гранама.



Пар спрегнутих водова (1)

- Четвртталасни трансформатор заједно са огранцима водова може се заменити секцијом пара спрегнутих водова. Биће приказане неке еквивалентне шеме спрегнутих водова које се употребљавају у пројектовању микроталасних филтара.
- Приказана су два спрегнута вода. Са P_1 , P_2 , P_3 и P_4 означени су приступи мреже у односу на референтни чвор (масу). Дужина одсечка спрегнутих водова је l , док је фазни коефицијент означен са β .
- Циљ је да се од мреже са четири приступа формирају различите мреже са два приступа и да се еквивалентирају огранцима и одсечцима водова. Матрична карактеристична импеданса пара спрегнутих водова је

$$[\mathbf{Z}_c] = \begin{bmatrix} Z_{c11} & Z_{c12} \\ Z_{c21} & Z_{c22} \end{bmatrix} = [\mathbf{Y}_c]^{-1}$$

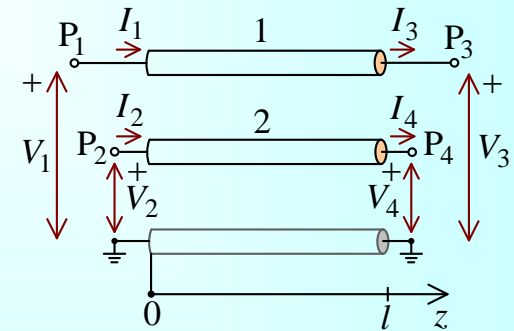




Пар спрегнутих водова (2)

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{c11} \cos(\beta L) & Z_{c12} \cos(\beta L) & Z_{c11} & Z_{c12} \\ Z_{c12} \cos(\beta L) & Z_{c22} \cos(\beta L) & Z_{c12} & Z_{c22} \\ Z_{c11} & Z_{c12} & Z_{c11} \cos(\beta L) & Z_{c12} \cos(\beta L) \\ Z_{c12} & Z_{c22} & Z_{c12} \cos(\beta L) & Z_{c22} \cos(\beta L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = [\mathbf{Z}] \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{c11} \cos(\beta L) & Y_{c12} \cos(\beta L) & -Y_{c11} & -Y_{c12} \\ Y_{c12} \cos(\beta L) & Y_{c22} \cos(\beta L) & -Y_{c12} & -Y_{c22} \\ -Y_{c11} & -Y_{c12} & Y_{c11} \cos(\beta L) & Y_{c12} \cos(\beta L) \\ -Y_{c12} & -Y_{c22} & Y_{c12} \cos(\beta L) & Y_{c22} \cos(\beta L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = [\mathbf{Y}] \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$



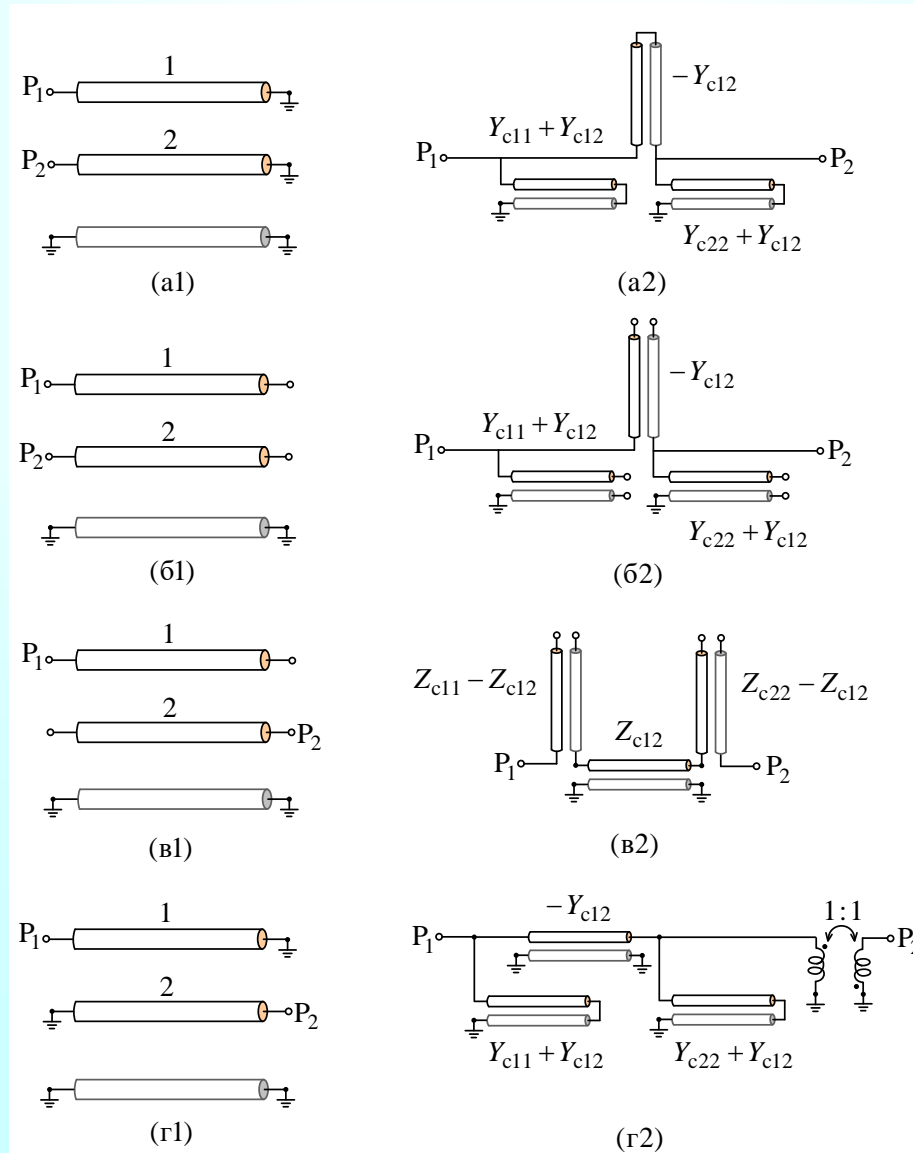
Пар симетричних спрегнутих водова

$$[\mathbf{Z}_c] = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_s \end{bmatrix}$$

$$Z_{ev} = Z_s + Z_m$$

$$Z_{od} = Z_s - Z_m$$

Еквивалентне представе пара спрегнутих водова

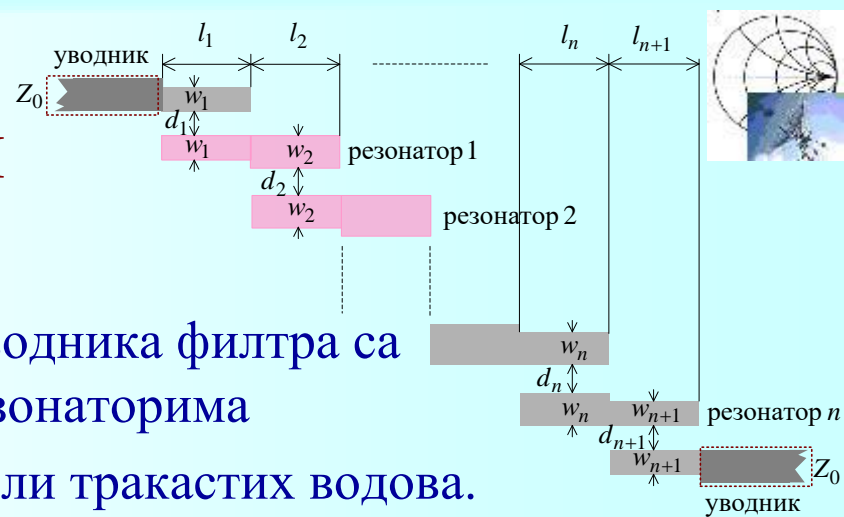




Преглед реализација полиномског филтра у микротракастој техници

- Филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима
- Филтар са укосницама
- Интердигитални филтар
- Чешљасти филтар
- Модификација чешљастог филтра
- Филтри пропусници опсега реализовани са огранцима водова

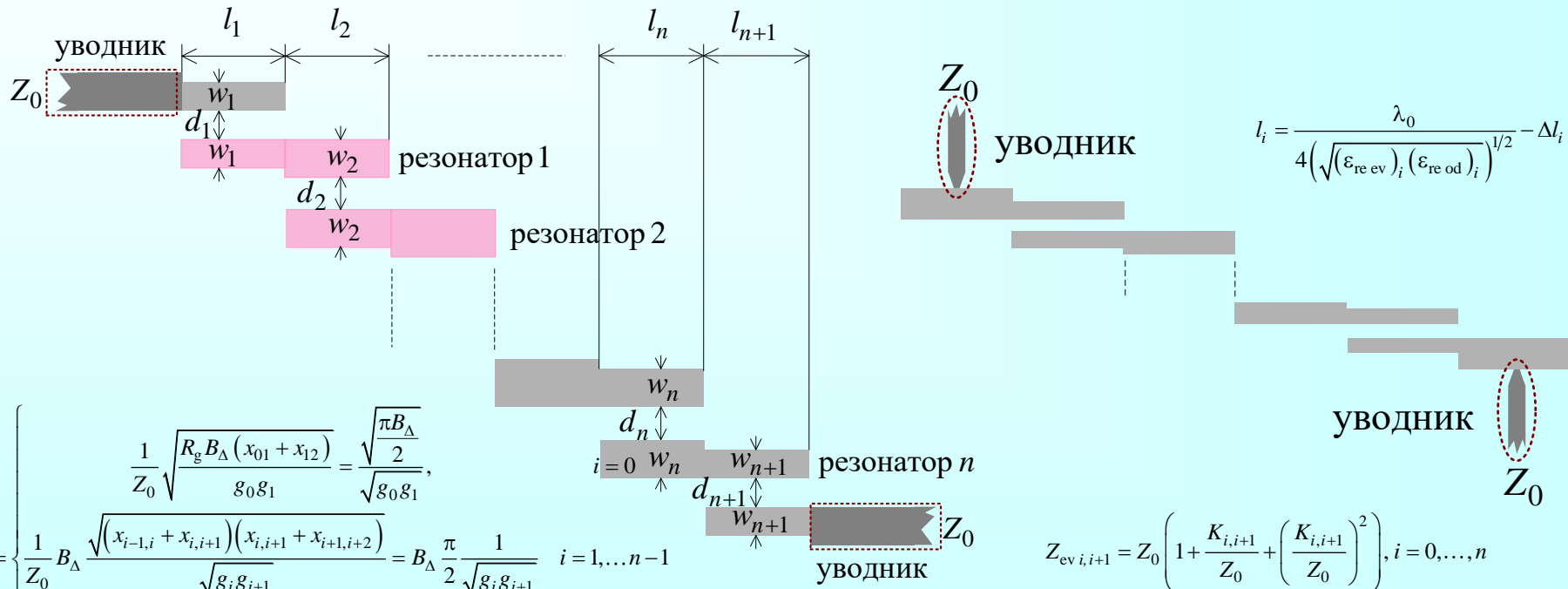
Филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима



- Приказан је типичан изглед врућих проводника филтра са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима реализован у техници микротракастих или тракастих водова.
- Ова структура са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима погодна је за ускопојасне филтре, за релативне ширине пропусног опсега до око 10%, па ће детаљно бити разматрана.
- Филтар се састоји од полуталасних резонатора.
- Сваки резонатор је отворен на оба краја јер је таква реализација једноставнија од реализације кратког споја на оба краја.
- Суседни резонатори су спрегнути на дужини од четвртине таласне дужине.
- Први и последњи резонатор су спрегнути са четвртталасним водовима на које су прикључени уводници. Карактеристична импеданса уводника једнака је номиналној импеданси приступа.
- Ред филтра практично је једнак броју резонатора.



Филтар са паралелно спрегнутим полуталасним резонаторима и кондукционо спрегнутим уводницама



$$l_i = \frac{\lambda_0}{4 \left(\sqrt{(\epsilon_{re\ ev})_i (\epsilon_{re\ od})_i} \right)^{1/2}} - \Delta l_i$$

$$\frac{K_{i,i+1}}{Z_0} = \begin{cases} \frac{1}{Z_0} B_\Delta \frac{\sqrt{(x_{i-1,i} + x_{i,i+1})(x_{i,i+1} + x_{i+1,i+2})}}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} = B_\Delta \frac{\pi}{2} \frac{1}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} & i = 1, \dots, n-1 \\ \frac{1}{Z_0} \sqrt{\frac{R_p B_\Delta (x_{n-1,n} + x_{n,n+1})}{g_0 g_1}} = \frac{\sqrt{\frac{\pi B_\Delta}{2}}}{\sqrt{g_n g_{n+1}}} & i = n \end{cases}$$

$$Z_{ev\ i,i+1} = Z_0 \left(1 + \frac{K_{i,i+1}}{Z_0} + \left(\frac{K_{i,i+1}}{Z_0} \right)^2 \right), i = 0, \dots, n$$

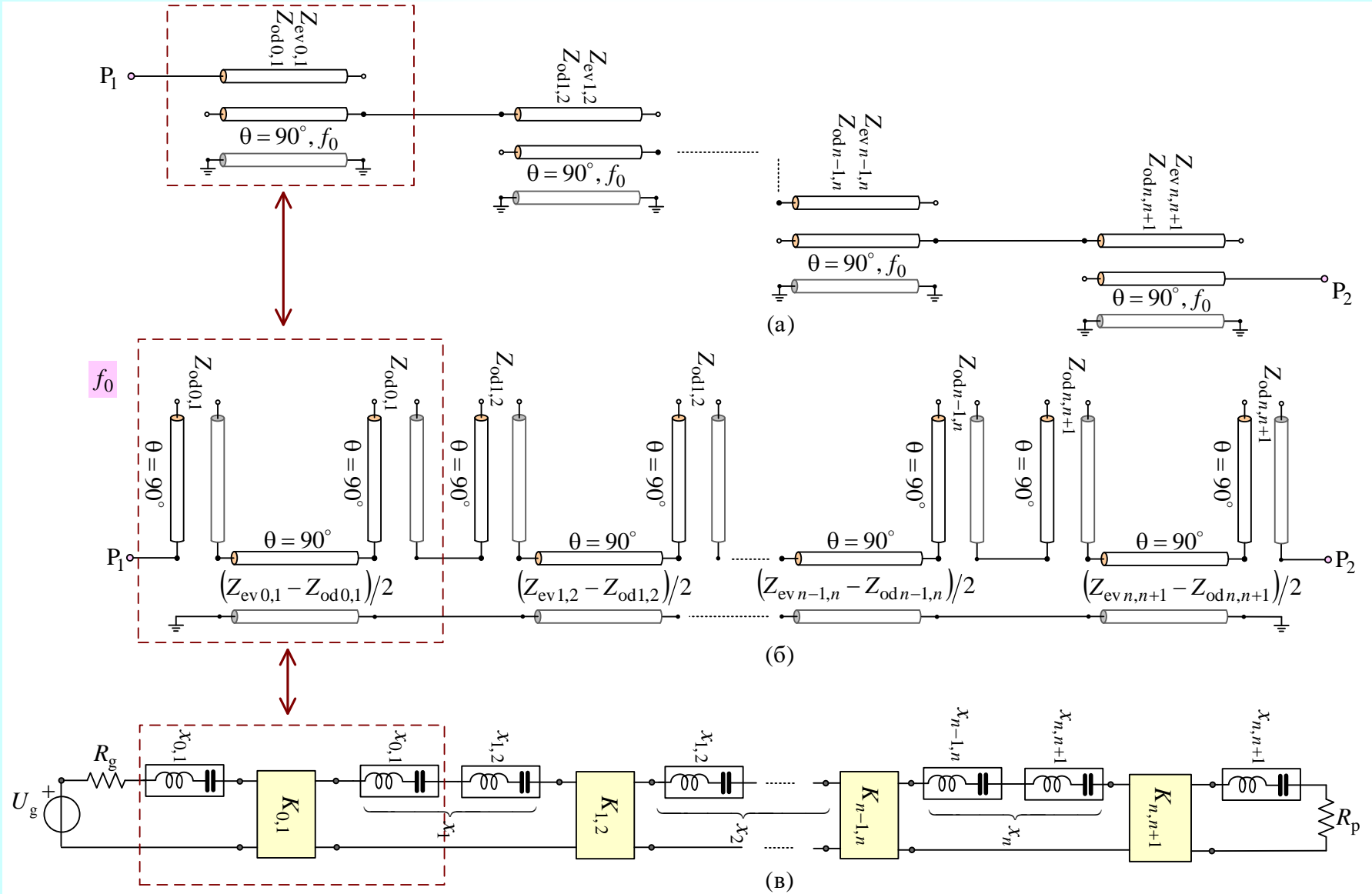
$$Z_{od\ i,i+1} = Z_0 \left(1 - \frac{K_{i,i+1}}{Z_0} + \left(\frac{K_{i,i+1}}{Z_0} \right)^2 \right), i = 0, \dots, n$$

Нормализоване карактеристичне импедансе инвертора

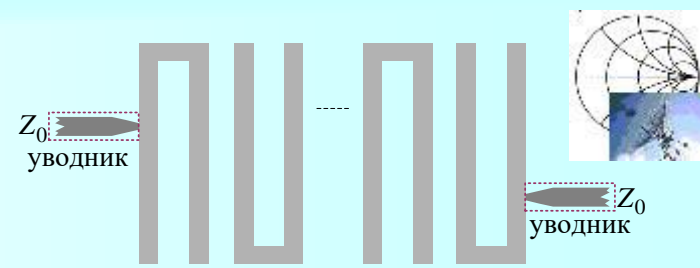
Парне и непарне карактеристичне импедансе секција спрегнутих водова се налазе на основу релација



Еквивалентне шеме филтра



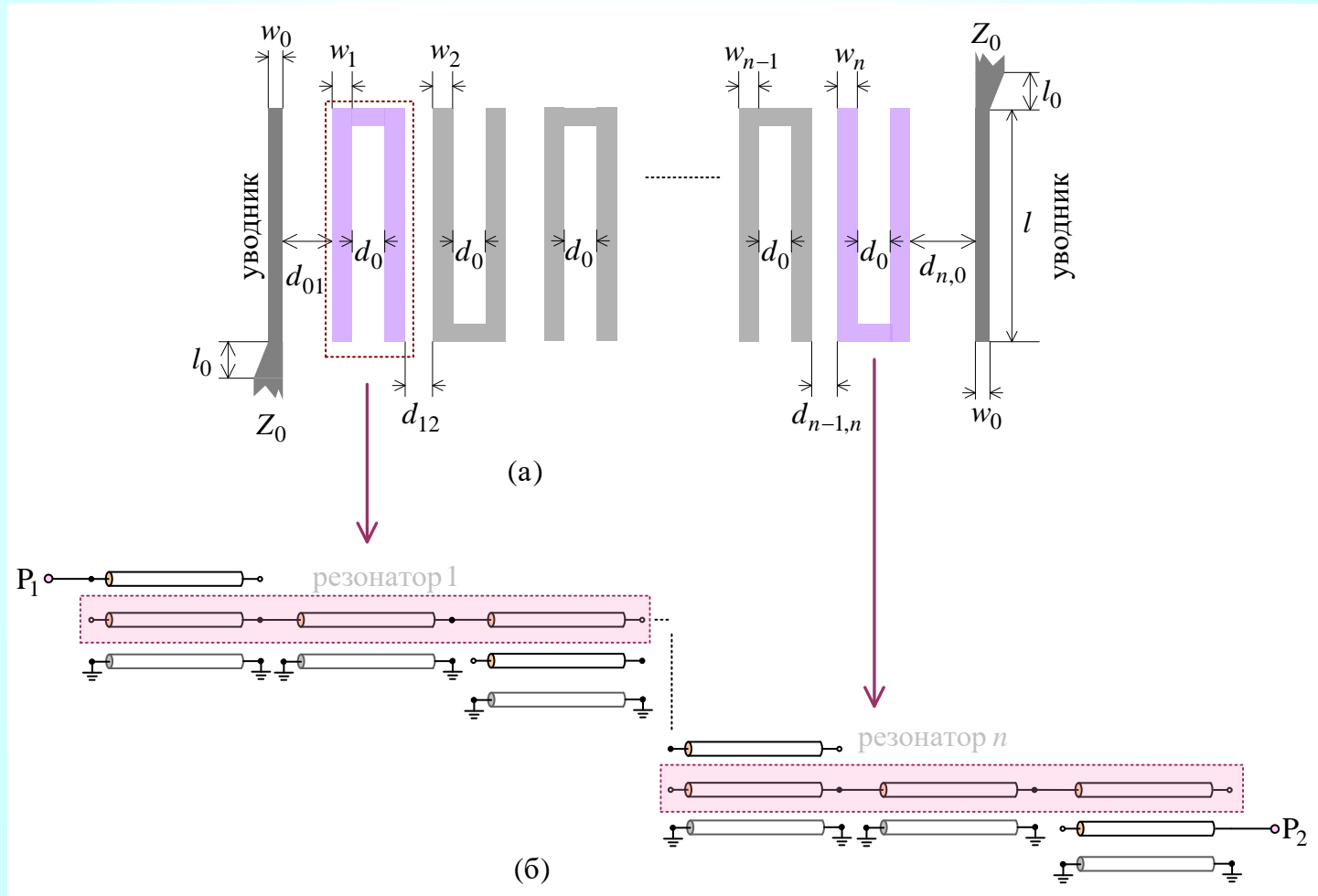
Филтар са укосницама



- Да би се смањиле димензије штампане плочице филтара врши се савијање полуталасних резонатора у облик латиничног слова U.
- Савијени резонатори подсећају на укоснице, па се филтар назива филтром са укосницама („hairpin filter“).
- Ова структура погодна је за реализацију ускопојасних филтара.
- Када се резонатори пресавију, њихове дужине и даље остају једнаке половини таласне дужине.
- Међутим, због геометрије, дужине спрегнутих секција су краће од четвртине таласне дужине. То мења еквивалентну шему филтра. Сада су сваке две суседне секције спрегнутих водова повезане једним краћим водом (чија је спрега са околним водовима занемарљива), уместо да су те секције директно спојене.



Филтар са укосницама



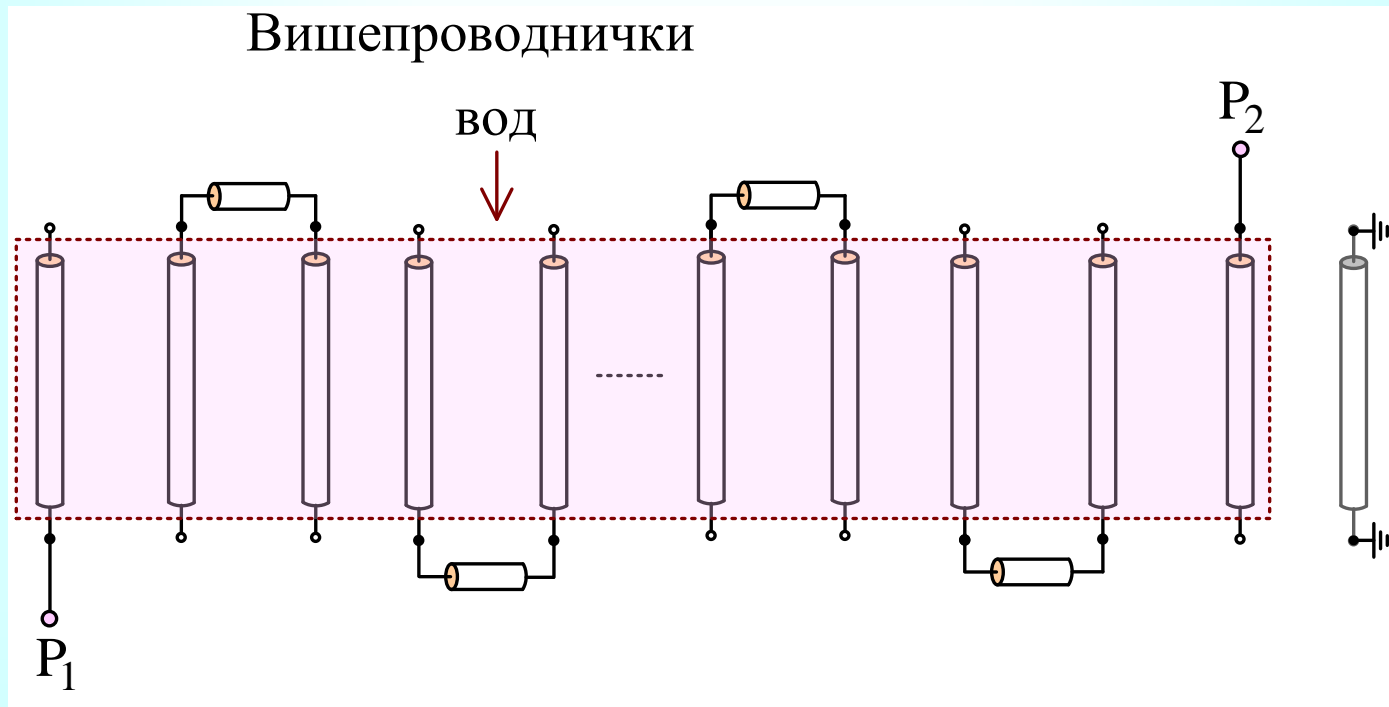


Филтар са укосницама

- Ако се резонатор пресавије, а краци резонатора се поставе сувише близу један другоме, спрега између њих постаје незанемарљива.
- Спрега мора да се укључи у модел филтра.
- Ако се жели да се та спрега са сигурношћу избегне, процеп између кракова резонатора у микротракастој техници мора да буде већи од око $5h$ (где је h дебљина супстрата), а у тракастој техници већи од h_1+h_2 (где су h_1 и h_2 дебљине супстрата).

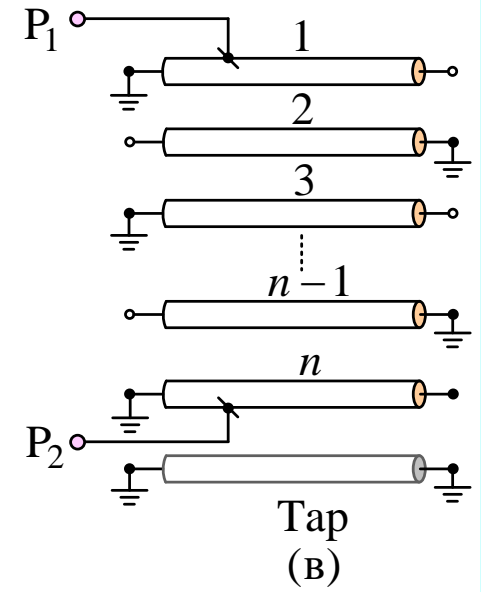
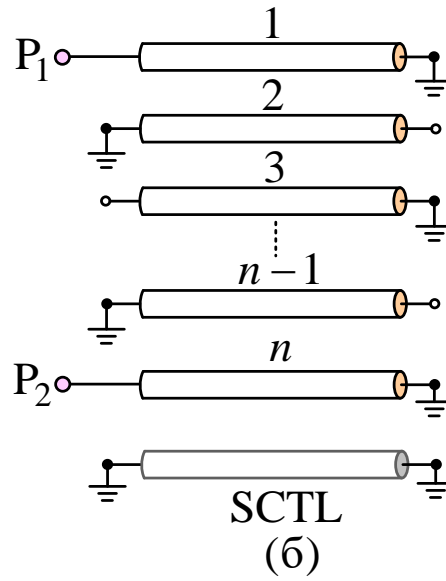
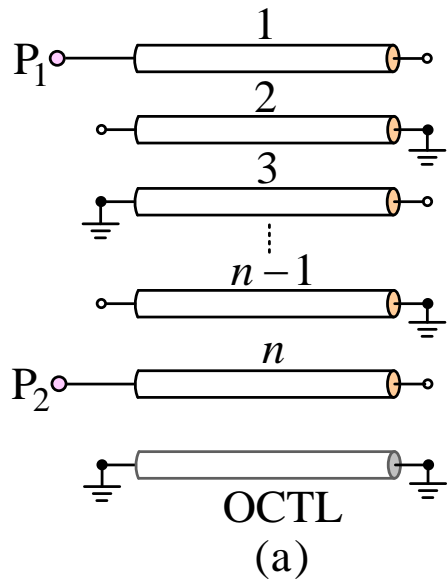


Филтар са укосницама





Интердигитални филтар





Интердигитални филтар

- Интердигитални филтар је филтар пропусник опсега који се састоји од неколико паралелно постављених спрегнутих четвртталасних резонатора.
- Спрега се остварује целом дужином резонатора.
- Доминира спрега између парова суседних резонатора, односно спреге између несуседних резонатора су обично слабе.
- Сви резонатори посматрани заједно чине један вишепроводнички вод.
- Сваки резонатор је отворен на једном крају, а кратко спојен на другом крају, при чему су кратки спојеви и отворене везе у алтернацији.



Интердигитални филтар

- Филтар подсећа на учешљане прсте две руке, па му одатле потиче назив. Попречне димензије проводника су у општем случају различите. Електричне дужине резонатора су у основној верзији једнаке (мада могу да буду и различите).
- Интердигитални филтар је компактних димензија.
- Паразитне резонанције четвртталасних резонатора су на непарним умношцима основне резонантне учестаности. Стога се паразитни пропусни опсези филтра јављају само на непарним умношцима централне учестаности основног пропусног опсега.



Интердигитални филтар

- Спрега између резонатора и приступа остварује се у пракси на један од три начина.
- У прва два случаја се спрега остварује преко уводних водова.
- У првом случају је уводни вод отворен на другом крају (open-circuited transmission line, OCTL), а у другом случају је уводни вод кратко спојен на другом крају (short-circuited transmission line, SCTL).
- Трећа могућност је кондукциона (директна) спрега са првим и последњим резонатором (tap или taper).
- Код филтара је укупан број резонатора непаран. Ако је укупан број резонатора паран, други приступ се налази на десном крају вишепроводничког вода.



Интердигитални филтар

- Интердигитални филтри се могу реализовати и за уске и за широке пропусне опсеге, али се интердигиталним филтрима (за задату најмању ширину процепа) могу остварити шири пропусни опсези него филтрима са укосницама.
- Ускопојасни интердигитални филтри одговарају дискретном прототипу чији је ред једнак укупном броју водова умањеном за два, док је за филтар са кондукционом спрегом ред једнак укупном броју водова. Први и последњи вод имају првенствену улогу уводника.
- Тек ако је пропусни опсег филтра широк, уводници имају значајну селективну улогу. Иначе ширина процепа између уводника и суседног вода највише утиче на постизање прилагођења.
- Ширине осталих унутрашњих процепа утичу на ширину пропусног опсега филтра, тако да шири процепи дају ужи пропусни опсег и обрнуто.



Интердигитални филтар

- Као последица простирања различитих брзина модова код микротракастих филтара, фреквенцијски одзив филтра је несиметричан. Увођењем металног поклопца изнад микротракастог филтра врши се изједначавање брзина модова.
- За разлику од филтра са полуталасним резонаторима, паразитни пропусни опсези се јављају само на непарним умношцима централне учестаности основног опсега.
- Код моделовања интердигиталног филтра треба да се укључе ефекти отворених крајева и кратких спојева.
- У микротракастој техници се кратки спојеви праве као металзоване рупице, или, у грубљој изради, помоћу жичица које се „проштирају“ кроз избушене рупице и залеме.

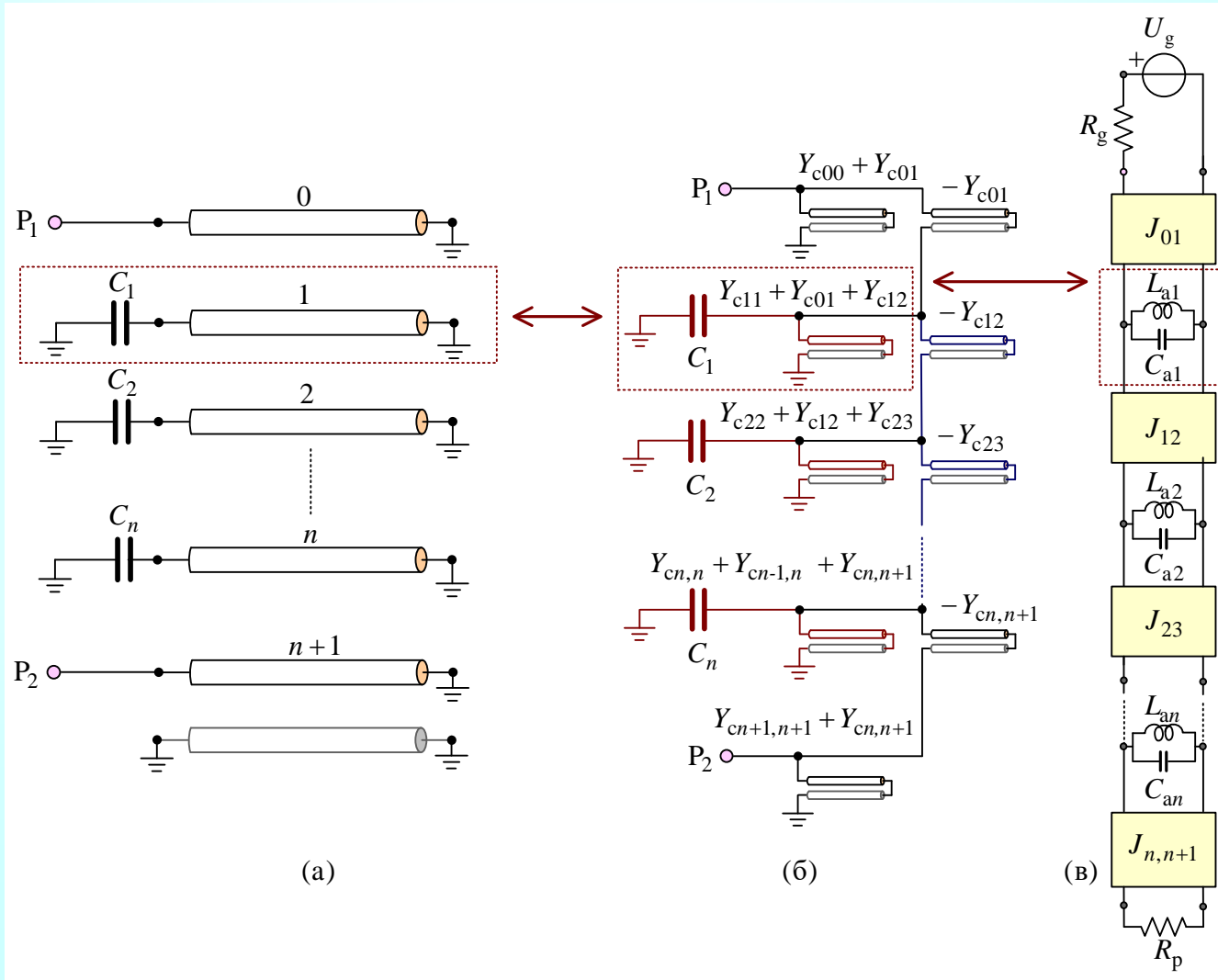


Чешљасти филтар

- Чешљасти филтар је филтар пропусник опсега.
- Састоји се од неколико $(n+2)$ спрегнутих водова.
- На улазу и излазу филтра налазе се два вода који служе првенствено као уводници.
- Селективност уводника долази до изражаја тек далеко од централне учестаности.
- Остали, унутрашњи водови су резонатори. Сваки резонатор се састоји од кратко спојене секције вода (која је краћа од четвртине таласне дужине) и концентрисаног кондензатора.
- Ред филтра је једнак укупном броју водова умањеном за два (n) , односно једнак је броју кондензатора.
- Претпостављено је да је диелектрик вишепроводничког вода хомоген.
- Тај вод је кратко спојен на десном крају.
- Случај кад се занемаре спреге између несуседних врућих проводника.

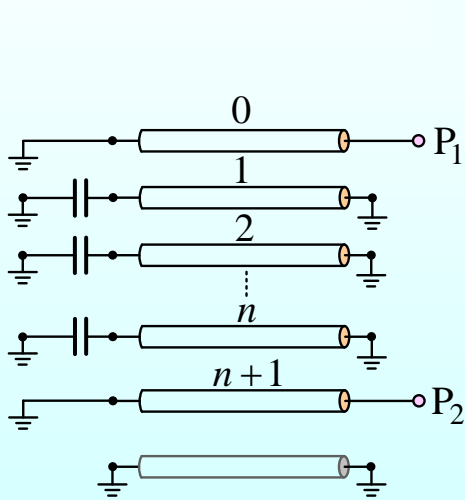


Чешљасти филтар

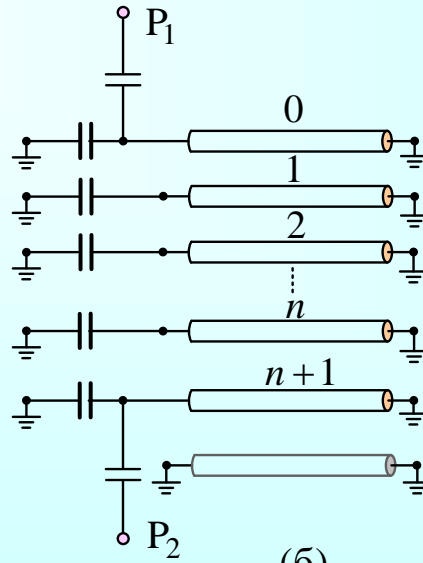




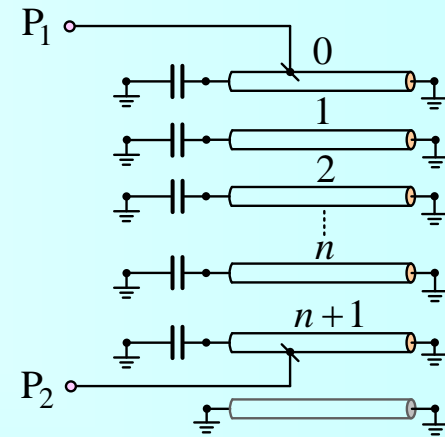
Спреге приступа са чешљастиим филтром



(a)



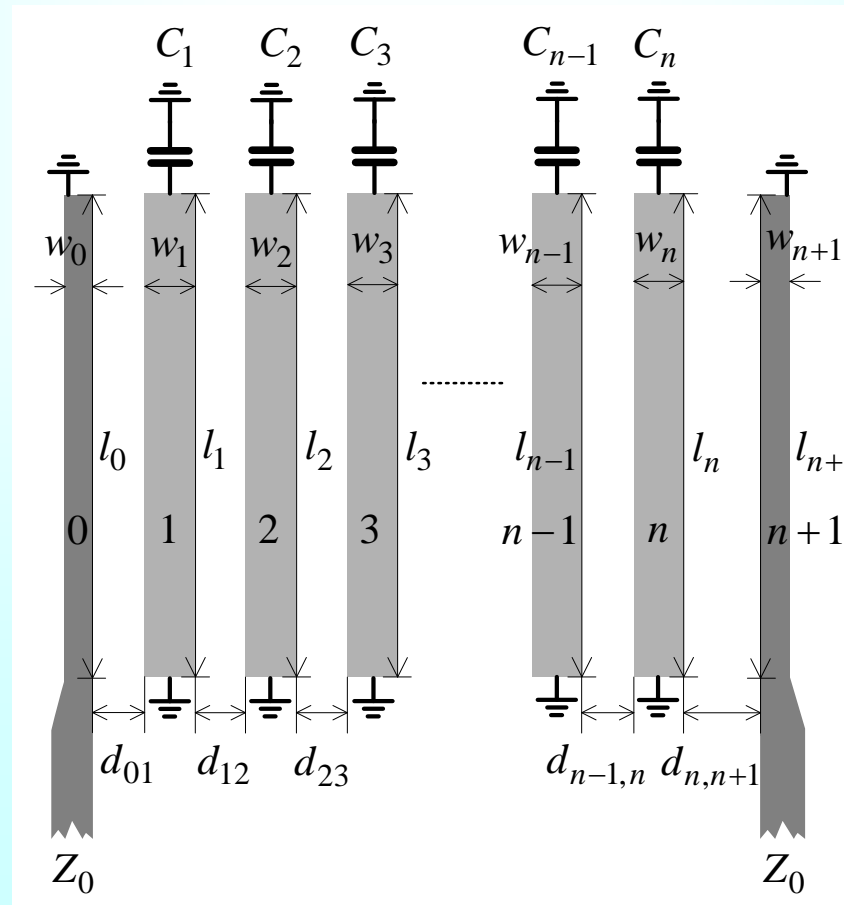
(б)



(B)

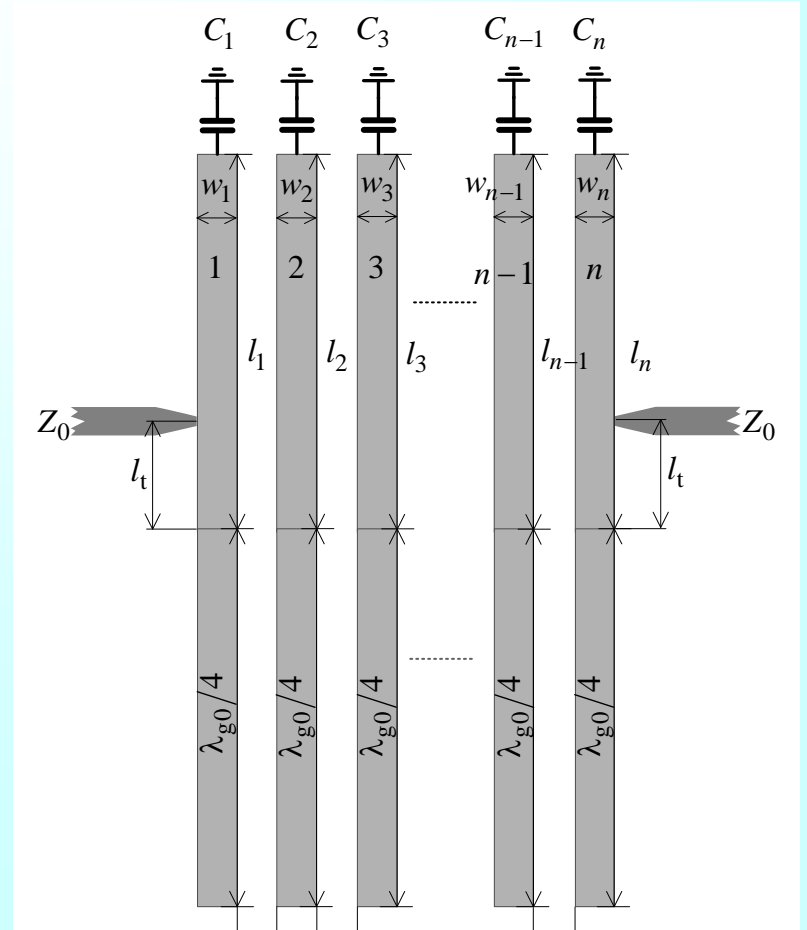
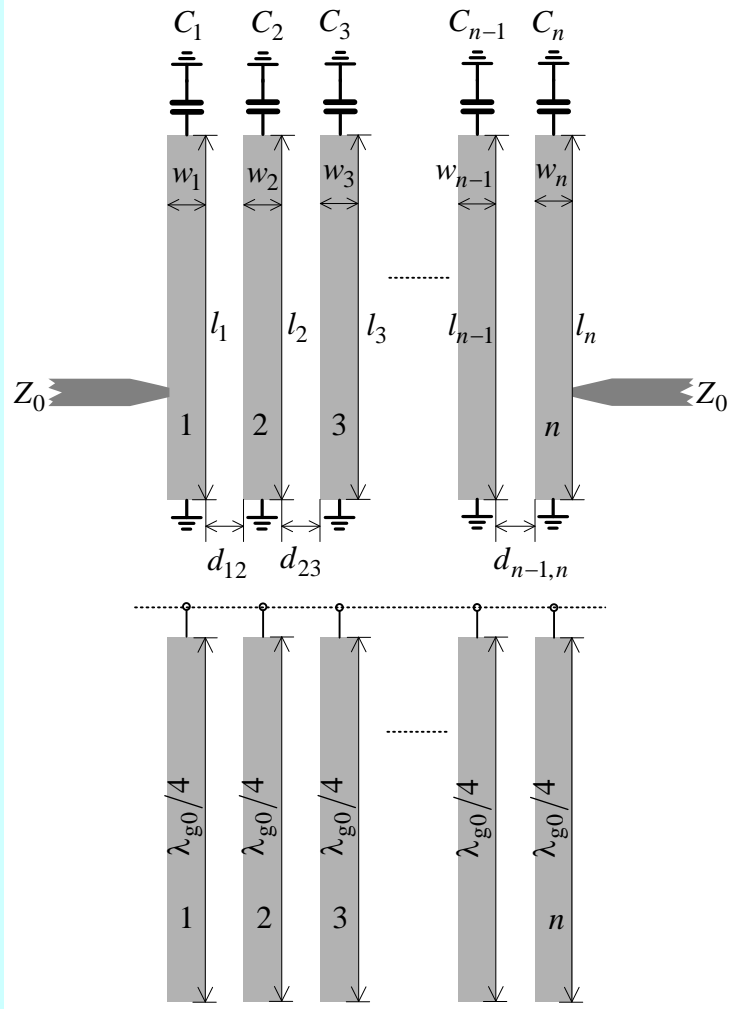


Скица горње стране штампане плочице чешљастиог филтра и уводницима паралелно постављеним резонаторима



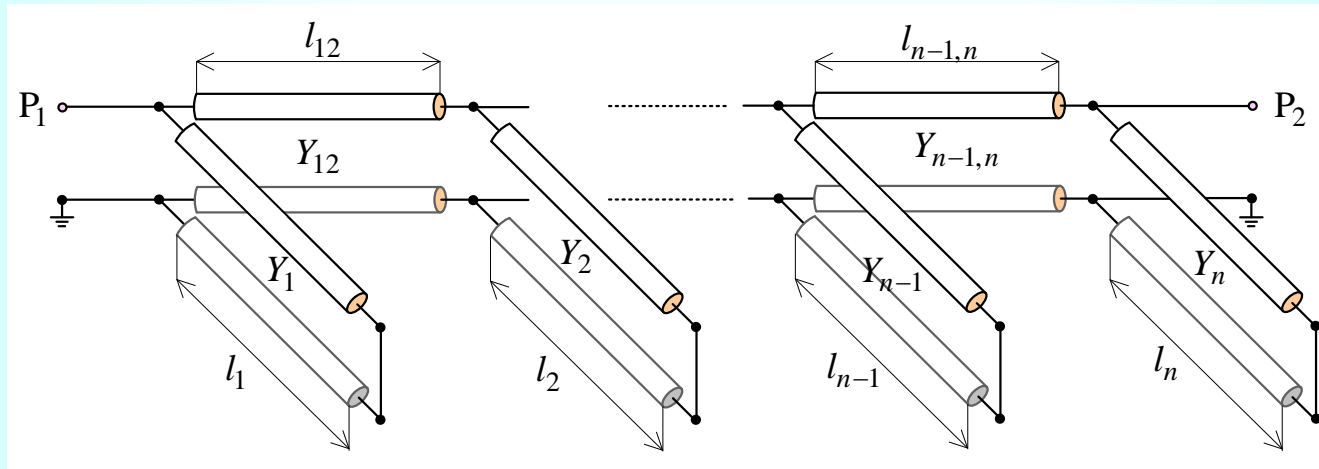


Модификација чешљастиг филтра





Филтри пропусници опсега реализовани кратко спојеним огранцима водовима





Филтри пропусници опсега реализовани отвореним огранцима водова

