

Hibrid aktív RC szűrők

ETO 621.372.54;621.372.57

A korszerű félvezető-technika a szűrőkapcsolások technikáját is forradalmasította. Napjainkban az olcsó szilícium integrált áramköröknek, valamint a vékonyréteg-ellenállás és kondenzátor-hálózatoknak az elterjedésével az aktív eszközökkel való szűrés gyakorlatilag magvalósíthatóvá, sőt célszerűvé válik. Az aktív szűrők igen sok alkalmazásban, gazdaságosabbaknak, kisebbeknek és hatékonyabbaknak bizonyulnak a hagyományos passzív szűrőknél.

Tételezzük fel, hogy egy igen-nem döntést kell tenni attól függően, hogy a jel tartalmaz-e egy meghatározott frekvenciájú jelet vagy nem. A bejövő jelet — amely a kérdéses frekvencián kívül még számos nemkívánatos frekvenciát is tartalmaz — ekkor keresztül kell vezetni egy szűrőn, amely a bennünket érdeklőn kívül minden más frekvencia továbbjutását megakadályozza. Így már a kérdéses jelet — ha egyáltalán jelen van — könnyűszerrel kimutathatjuk. Tekintettel arra, hogy abban az időben, amikor a szűrőkre először szükség volt, még csak ellenállások, tekercsek és kondenzátorok (tehát RCL elemek) jöhettek számításba építőelemként, a passzív RLC szűrők tervezési módszerei meglehetősen magas fokra fejlődtek. Az alkatrészgyártás területén elért eredmények lehetővé tették kiváló minőségű és olcsó áramköri elemek előállítását. A passzív szűrők egyik további fontos jellemzője, hogy nagy tömegben, tipizált — és az egység üzemi használati körülményei között meg nem ismételtető — beállításokkal gazdaságosan gyárthatók.

A felsorolás ezzel itt véget is érne, ha nem kellene megemlíteni a passzív szűrők néhány fontosabb hátrányát, illetve nem kellene szólni ezek megszüntetése érdekében tett erőfeszítésekről. A legjelentősebb hátrány az, hogy a tekercseken, mint veszteséges áramköri elemeken felemésződik a jel energiájának egy része. A tekercsek veszteségei folytán csökken a passzív szűrők szelektivitása és így az a képességük, hogy az áteresztő sávjuk közvetlen közelében levő nemkívánatos frekvenciákat is kiszűrjék. A fenti kérdések megoldásait több úton is megkönnyíthetjük, így csökkenteni a probléma súlyát a tekercsméretetek növelése és az induktivitás realizálása során alkalmazásra kerülő mágneses anyag permeabilitásának fokozása is.

Az első megoldás (a tekercsek méreteinek növelése) majdnem minden esetben olyan általános méret-növekedéssel jár együtt, hogy az a berendezés tervező mérnökök számára már eleve kizárják a probléma könnyítésének ezt a lehetőségét.

Ugyanakkor viszont a második megoldás (a tekercs mágneses anyaga permeabilitásának fokozása) pedig

lényegesen megnöveli a szűrő érzékenységét a hőmérséklet-ingadozásokkal és a feszültség-változásokkal szemben.

A másik nagy hátrányuk a passzív szűrőknek az, hogy a szűrők karakterisztikáját ha egyszer már beállítottuk, akkor azt nem lehet egykönnyen megváltoztatni sem fokozatosan, sem folyamatosan. Ez pedig azt jelenti, hogy a passzív szűrőket nehéz hozzáidomítani a változó körülményekhez, hiányzik belőlük a rugalmasság.

A fenti hátrányok egyértelműen kiküszöbölhetők aktív elemek és RC tagok kombinációjából álló szűrőhálózatok alkalmazásával. Így már lehetővé válik a passzív szűrő szintézise során megszokottá vált szűrőkarakterisztikák realizálása is.

Aktív RC szűrők realizálásának lehetőségei

A konkrét tervezés és realizálás során a tervező passzív RC tagok mellett speciális vezérelt generátorokat alkalmaz a kívánt szűrőkarakterisztika megvalósításához. Tekintsük át ezen speciális vezérelt generátorokat és főbb tulajdonságaikat (1. ábra). Írjuk fel az 1. ábrán látható girátor négyfólyus egyenleteit.

$$U_1 = -R \cdot i_2 \quad (1)$$

$$U_2 = R \cdot i_1,$$

ahol R az átvitelre jellemző konstans.

Vizsgáljuk meg a girátor komplex teljesítmény viszonyait.

$$P = U_1 \cdot I_1^* + U_2 \cdot I_2^* \quad (2)$$

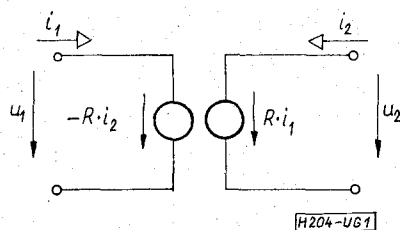
az (1) egyenletből kifejezve U_2 és I_2 értékét és azokat (2) egyenletbe helyettesítve írhatjuk a következőket:

$$P = U_1 \cdot I_1^* + (R \cdot I_1) \left(\frac{U_1}{-R} \right)^*$$

$$P = U_1 \cdot I_1^* - U_1^* \cdot I_1 \quad (3)$$

$$P = j2\text{Im}(U_1 \cdot I_1^*)$$

A (3) egyenletből megállapítható, hogy a girátor teljesítménye tisztán képzetes, tehát egy passzív nonreciprok áramköri elem. Ezután jogosan merül fel az a kérdés, hogyan használható a girátor szűrő



1. ábra Girátor szimbolikus jelölése

* A jelen közleményben foglaltak a szerzőnek az 1972. október 11—13. között Kecskeméten megtartott „Mikroelektronikai Alkatrész Ankét”-on elhangzott előadását tartalmazza, néhány vonatkozásban kibővített formában.

realizálás céljaira. Ennek jobb megértése érdekében vizsgáljuk meg a girátor bemenő impedanciájának, a lezáró impedanciától való függését. Ezért a girátor kimeneti (kettes) pontjait zárjuk le egy tetszőleges Z_2 impedanciával, és írjuk fel a bemeneti kapcsok között jelentkező impedanciát.

Z_{1be} definíciószerűen a következő:

$$Z_{1be} = \frac{U_1}{I_1} \quad (4)$$

Az (1) egyenletből U_1 és I_1 értékét kifejezve és behelyettesítve a (4) egyenletbe, valamint figyelembe véve, hogy $Z_2 = -\frac{U_2}{I_2}$, írhatjuk:

$$Z_{1be} = \frac{-R \cdot I_2 \cdot R}{U_2} = \frac{R^2}{Z_2} \quad (5)$$

Az (5) egyenletből megállapíthatjuk, hogy a girátor bemenő impedanciája a lezáró impedancia duplájával egyenlő. Legyen pl. a lezáró impedancia egy kapacitás, azaz

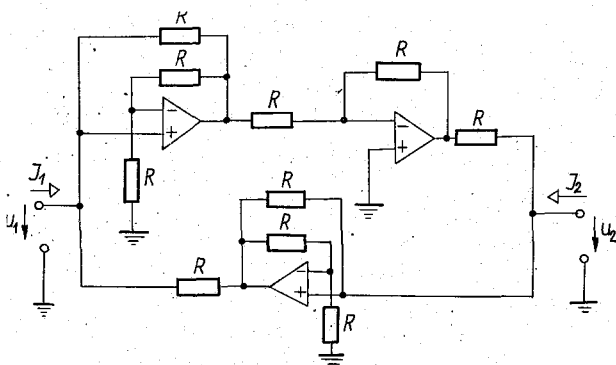
$Z_2 = \frac{1}{pC_2}$ ezt behelyettesítve (5) egyenletbe, akkor a következő kifejezést kapjuk:

$$Z_{1be} = \frac{R^2}{\frac{1}{pC_2}} = pC_2 R^2 = pL \quad (6)$$

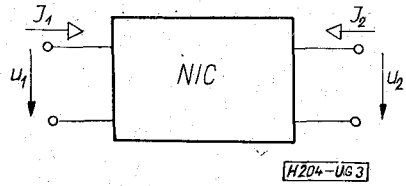
Ilyen módon, ha egy girátort egy kapacitással zárunk le, akkor az a bemenetén $L = C_2 R^2$ értékű induktivitásként jelentkezik. A girátort gyakran használjuk földelt induktivitás és kötetlen (floating) induktivitás (bár ez utóbbit nehezebb megvalósítani) szimulálására. Mivel pillanatnyilag integrált áramkörű girátor nem kapható, ezért a girátor konkrét megvalósítása egy vagy több műveleti erősítőt és passzív R hálózatot igényel. Egy ilyen girátor realizálására mutatunk be példát a 2. ábrán.

A 2. ábrán látható girátor admittancia mátrixa a következő alakban írható fel:

$$\begin{bmatrix} 0 & -2 \\ \frac{2}{R} & 0 \end{bmatrix}$$



2. ábra Műveleti erősítőkkel realizált girátor kapcsolási vázlata



3. ábra. Negatív impedancia konverter szimbolikus jelölése

A következőkben vizsgáljuk meg röviden a 3. ábrán látható másik speciális vezérelt generátort, a negatív impedancia konvertert (NIC).

A vizsgálat menete hasonló lesz a girátornál tárgyaltakéhoz. Írjuk fel a negatív impedancia konverter négyfókus egyenleteit:

$$U_1 = k U_2 \quad (7)$$

$$i_1 = \frac{1}{k} i_2,$$

ahol k az átvitelre jellemző konstans.

Vizsgáljuk a negatív impedancia konverter komplex teljesítményviszonyait:

$$P = U_1 I_1^* + U_2 I_2^* \quad (8)$$

A (7) egyenletből U_1 és I_1 értékét behelyettesítve (8) egyenletbe:

$$P = k U_2 \frac{1}{k} I_2^* + U_2 I_2^* = 2 U_2 I_2^* \quad (9)$$

A (9) egyenletet megvizsgálva, megállapíthatjuk, hogy a negatív impedancia konverter nemcsak a képzetes, hanem a valós teljesítményviszonyok alakulásában is szerepet játszik, tehát ez egy aktív non-reciprok (7. egyenletből) áramköri elem.

A negatív impedancia konverter aktív RC szűrőkben való felhasználása céljából vizsgáljuk meg a NIC bemenő impedanciájának, a lezáró impedanciától való függését. Zárjuk le a kimeneti kapcsokat egy tetszőleges Z_2 impedanciával, így a bemeneti impedancia a következő alakban írható fel:

$$Z_{1be} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{k U_2}{\frac{1}{k} I_2} = -k^2 Z_2 \quad (10)$$

A (10) egyenlet vizsgálatából kitűnik, hogy a NIC a lezáró impedanciát negatív előjellel (a 10. egyenletben $Z_2 = -\frac{U_2}{I_2}$ összefüggést is figyelembe kell venni)

viszi át a bemenetére. Ennek jelentőségét akkor láthatjuk be, ha figyelembe vesszük az aktív RC szintézis eljárások alap gondolatát, a polinom dekompozíciót. Ezt a tételt a következőképpen fogalmazhatjuk meg:

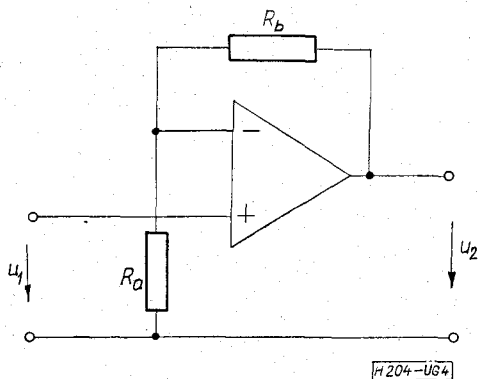
Ha $N(p)$ egy valós együtthatós polinom, melynek gyökei konjugált komplexek, akkor ez az $N(p)$ polinom mindig felbontható két polinom különbségére, azaz írhatjuk:

$$N(p) = N_1(p) - N_2(p) \quad (11)$$

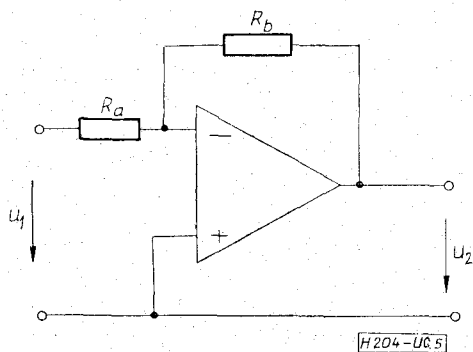
A (11) egyenletben szereplő feltételt negatív impedancia konverterrel teljesíthetjük, azaz NIC-el meg

lehet valósítani, hogy az átviteli függvény nevezőjében két polinom különbségét állítsuk elő, amely a feladat által megkívánt komplex pólusokat realizálja. Megemlítem, hogy a NIC-t alkalmazó aktív RC szintézis eljárásokra két módszer terjedt el. Az egyik, Linvill a másik Yanagisawa által publikált eljárás.

A harmadik vezérelt generátor típus, amely a gyakorlatban leginkább elterjedt, a műveleti erősítő, mint feszültség vezérelt feszültség generátor. A műveleti erősítőknek nagy bemenő ellenállása, alacsony kimenő ellenállása, széles átviteli sávja és nagy erősítése van. Tipikus felhasználáskor, amikor jó minőségű egységekre van szükség a bemenő impedancia több megohm is lehet, a kimenő impedancia viszont egy ohm-nak csak töredéke. Ilyen erősítők szimulálhatnak invertáló és nem invertáló berendezéseket olyanokat, amelyekre aktív szűrők készítésénél van szükség. Ezek egyszeres vagy többszörös visszacsatolással is összekapcsolhatók. A 4. ábrán látható a műveleti erősítő, mint nem invertáló erősítő kapcsolása.



4. ábra. Nem invertáló erősítő kapcsolása



5. ábra. Invertáló erősítő kapcsolása

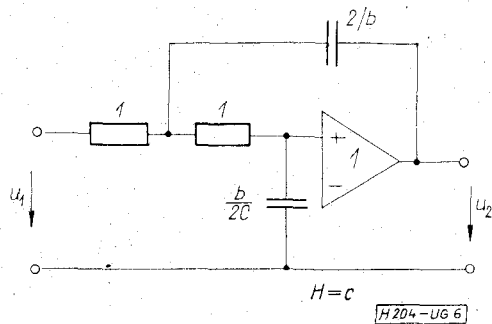
A ki- és bemenő feszültség viszonya ebben az esetben a következőképpen írható fel:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_a + R_b}{R_a} \quad (12)$$

Az 5. ábra az invertáló erősítő kapcsolását mutatja. Erre a kapcsolásra a ki- és bemenő feszültség viszonya:

$$\frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_b}{R_a} \quad (13)$$

Műveleti erősítés aktív RC szűrő tervezésénél a



6. ábra. Másodfokú aluláteresztő szűrő alaptag

szűrő pólusait és zérusait a műveleti erősítő erősítéséből, és a hozzá kapcsolt RC passzív hálózathal határozhatjuk meg. A pólusok helyzetének relatív stabilizálására és az aktív elemek megváltoztatásától való függetlenítésére megfelelő eljárások vannak.

Műveleti erősítőt alkalmazó aktív RC szűrő tervezésekor a tervező a kaskád szintézist alkalmazza. A kaskád szintézis lényege, hogy a tervezett másodfokú blokkok megvalósítására vezetjük vissza. Adott az $F(p)$ hálózatfüggvény a következő alakban:

$$F(p) = \frac{A_0 + A_1p + A_2p^2 + \dots + A_m p^m}{B_0 + B_1p + B_2p^2 + \dots + B_n p^n} \quad (14)$$

A számlálót és nevezőt gyöktényezőkre bontva írhatjuk:

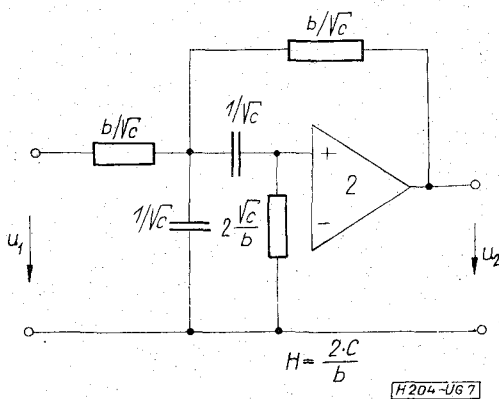
$$F(p) = k \frac{\left(1 + \frac{p}{\omega_1}\right) \left(1 + 2\xi \frac{p}{\omega_3} + \frac{p^2}{\omega_3^2}\right) \dots}{\left(1 + \frac{p}{\omega_2}\right) \left(1 + 2\xi \frac{p}{\omega_4} + \frac{p^2}{\omega_4^2}\right) \dots} \quad (15)$$

Az így felírt $F(p)$ függvényt első és másodfokú blokkok kaskád kapcsolásával tudjuk realizálni.

A fent elmondottak jobb megértése céljából bemutatunk egy másodfokú aluláteresztő és egy sávszűrő alaptag kapcsolási vázlatát, valamint megmutatjuk a hálózatfüggvény együtthatói és a kapcsolási elemek közötti összefüggést.

A 6. ábrán látható másodfokú aluláteresztő alaptag a következő átviteli függvényt realizálja:

$$F(p) = \frac{H}{p^2 + b \cdot p + c} \quad (16)$$



7. ábra. Sávszűrő alaptag

A 7. ábra a sávszűrő alaptagot mutatja, melynek az átviteli függvénye a következő:

$$F(p) = \frac{H \cdot p}{p^2 + b \cdot p + c} \quad (17)$$

A Remix Rádiótechnikai Vállalat Vékonyrétegtechnikai laboratóriumában végzett munka rövid ismertetése

Vállalatunknál 1972. elején a megelőző irodalomtanulmányozás, technológiai adottságaink és lehetőségeink, valamint a piaci igények és szükségletek felmérése után elkezdődött a vékonyréteg RC hálózatokat és műveleti erősítőket tartalmazó aktív RC szűrők tervezése és kísérleti gyártása. Erre az a felismerés vezetett, hogy amikor az aktív szűrőkkel kapcsolatos elképzelések már az úgynevezett vékony film-réteg formájában megjelenő alkatrészek felhasználási lehetőségével is társulnak, úgy ebben az esetben az aktív RC szűrők felhasználása révén a szűrők olyan új generációja válik reális lehetőséggé, amelyektől biztosan elvárhatjuk, hogy az elkövetkezendő években a modern kor szellemének megfelelő miniatürizálási technológiát alkalmazó elektronikus szakterületek legtöbbjében a felmerülő szűrőigényeket kielégítik. A téma bonyolultságára, összetettségére, valamint számításiigényességére való tekintettel a tervezéshez számítógépes tervező programot készítettünk. Igyekeztünk a program rugalmasságát messzemenőleg biztosítani. A bemeneti adatok megadása kétféle úton történhet:

1. Megadjuk a szűrő fokszámát, típusát, a törésponti frekvenciákat és a szükséges tűréseket (Q tűrése, ω_i tűrése).
2. Megadjuk a szűrő típusát, a törésponti frekvenciákat és a kívánt csillapítás-értékeket, a szükséges tűrésekkel.

Ez utóbbi esetben a gép számolja ki a szűrő fokszámát is. Mivel hibrid integrált áramkörös realizálásról van szó, nem hagyhattuk figyelmen kívül a technológiából fakadó előnyöket és korlátokat sem, és ezekre a program elkészítésénél tekintettel voltunk, azaz a vékonyréteg-ellenállások és -kondenzátorok gyártástechnológiájának ismeretében, a tervezés során felhasználható RC elemek értékeit alulról és felülről is korlátoztuk. ($R_{\min} = 10 \Omega$ $R_{\max} = 200 \text{ k}\Omega$, $C_{\min \text{ integrált}} = 100 \text{ pF}$ $C_{\max \text{ integrált}} = 5 \text{ nF}$ $C_{\max \text{ hibrid}} = 50 \text{ nF}$). A másik — technológia ismeretét feltételező — megszorítás az egyes áramköri elemek tolerancia kiosztásában jelentkezik. Mint ismeretes az aktív RC szűrők tervezésének és gyártásának egyik sarkalatos kérdése az, hogy megvizsgáljuk hogyan változik az eszköz átviteli tulajdonsága az egyes áramköri elemek értékeinek megváltozásától. A vékonyréteg-technológia ismeretében nem lett volna célszerű egyenletes tolerancia-elosztást megvalósítani R és C vonatkozásában, mivel a kondenzátorok pontos értékre történő beállítása összehasonlíthatatlanul nehezebb, mint az ellenállásoké. Ezen okok miatt a program tolerancia analízist végző része úgy van kialakítva, hogy a rendelkezésre álló tűrés-

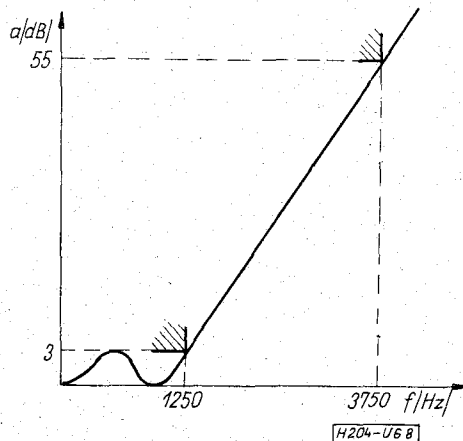
mezőből (specifikációs adat) viszonylag nagy tűréseket enged meg a kondenzátorok névleges értékeitől való eltérésre, míg az ellenállások pontossági követelményei 1—2 nagyságrenddel szigorúbbak. Áramköröinket első és másodfokú alaptagok kaszkád kapcsolásával valósítjuk meg. Egy-egy alaptag általában 1 műveleti erősítőt (709, 741, 748-as típusokat alkalmazunk) és néhány, a feladat jellege által megkívánt számú RC alkatrészt tartalmaz. Az erősítő erősítése általában egységnyi. A megvalósítandó feladatok sokaságában előfordulnak olyan speciális áramkörök is, melyek realizálása során el kell térni az egységnyi erősítéstől, mert pl. az adott feladatot a rendelkezésre álló RC alkatrész értékkészlettel nem tudnánk realizálni. Ilyen esetekben olyan alkapcsolás számítására tér át a program automatikusan, mely nem egységnyi erősítésű erősítőt alkalmaz. A másik elágaztatás a programban a Q értékének függvényében következik be. Mint ismeretes az elemértékek szórása Q függő és nagy Q -jú hálózatok esetén több száz, illetve ezerszeres lehet (az elemszórás Q^2 -tel arányos). A másik probléma az, hogy a nagy Q -jú áramköröknek az érzékenysége az elemek megváltozására. Igen nehéz így stabil, jól működő hálózatot készíteni, valamint az elemek értékeire igen szigorú toleranciák adódnának, amit nem lehet betartani. Ezért, hogy a nagy Q -jú alaptagokat is tudjuk realizálni, az alkapcsolásaink között szerepel két műveleti erősítővel realizált alaptag. Ennek az alaptagnak az a tulajdonsága, hogy az áramkör összérzékenysége független a Q -tól és értéke kétszerezővel egyenlő. A programban a Q szerinti elágaztatás $Q > 5$ értéknél következik be.

A program a következő típusú aktív RC szűrők tervezésére képes:

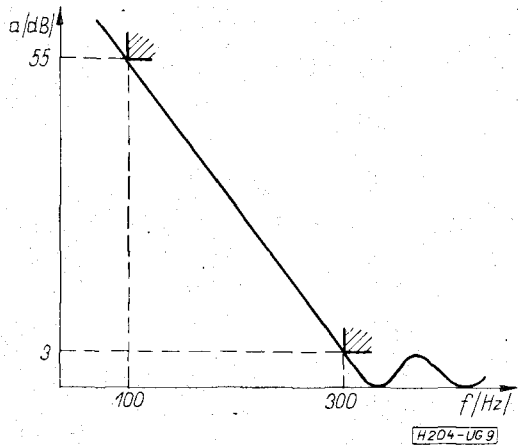
- a) Maximális laposságú (Butterworth) alul- és felüláteresztő szűrők;
- b) Csebisev-típusú alul- és felüláteresztő szűrők;
- c) Elliptikus típusú szűrők;
- d) Sávszűrők.

A realizálható fokszám: 2 és 10 között van.

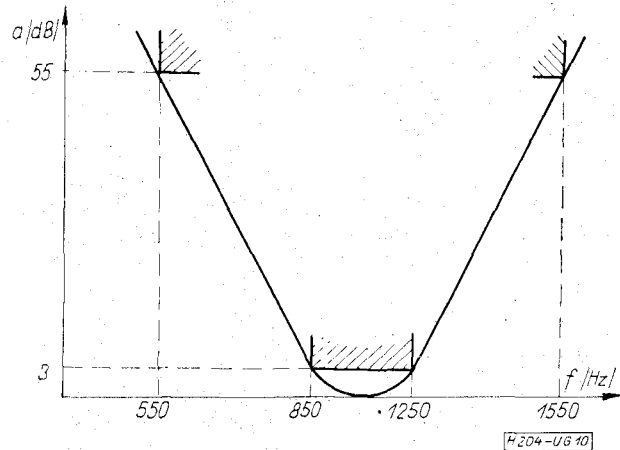
Végezetül szeretnénk bemutatni néhány olyan szűrő tolerancia sémát, amelyeknek a konkrét áramköri realizálása, tervezése laboratóriumunkban megtörtént.



8. ábra. Realizált aluláteresztő szűrő csillapításkarakterisztikája



9. ábra. Megvalósított felüláteresztő szűrő csillapításkarakterisztikája



10. ábra. Realizált sávszűrő csillapításkarakterisztikája