

4. Aktív szűrőkapcsolások műveleti erősítőkkel

Az elektronikában azokat a négypólusokat nevezzük szűrőnek, amelyek frekvenciafüggő átviteli tulajdonságokkal rendelkeznek. A szűrők feladata átterjeszteni a kívánt frekvenciatartományba eső jeleket, a többi pedig csillapítani.

Az aktív szűrőkapcsolások olyan elektronikus áramkörök, amelyek felépítése ellenállásokat, kondenzátorokat és aktív áramköri elemeket tartalmaz. Segítségükkel a passzív RLC szűrőkapcsolásokra jellemző átviteli karakterisztikákat tudunk kialakítani, anélkül, hogy kapcsolásunk inaktivitásokat tartalmazna. Ez úgy lehetséges, hogy az aktív szűrőkben az inaktivitásokat az erősítő elemek segítségével szimuláljuk. Amíg a passzív szűrők kimenetén a bemeneten felvett villamos energiának csak egy része jelentkezik, az aktív szűrők esetén a kimeneten szolgáltatott energia nagyobb is lehet, mint a bemeneten felvett, annak az energiának a felhasználásával, amit az aktív áramköri elem a tápegységből felvesz.

Az aktív szűrők alkalmazása nagyon előnyös kisfrekvenciás tartományokban. Kisfrekvencián (1kHz), a passzív szűrők méretezése nagyon nagy értékű inaktivitásokat feltételez, amelyek elkészítése csak szélsőséges gyakorlati jellemzők mellett lehetséges: nagyon nagy méretek és nagyon kicsi jósági tényező. Felhasználásuk felső frekvenciahatára megközelítőleg 1MHz, mivel az egyszerű és sokoldalú alkalmazhatóságuk miatt az aktív szűrőket sokszor olyan frekvenciatartományokban is alkalmazzák, ahol a passzív szűrők készítése nem ütközik különösebb nehézségekbe.

A szűrőkapcsolásokkal szemben támasztott legfontosabb gyakorlati követelmények:

- minél egyenletesebb átvitel az átterjesztősávban
- minél meredekebb vágás a zárótartományban
- a fázistolás az átterjesztőtartományban a frekvencia lineáris függvénye legyen

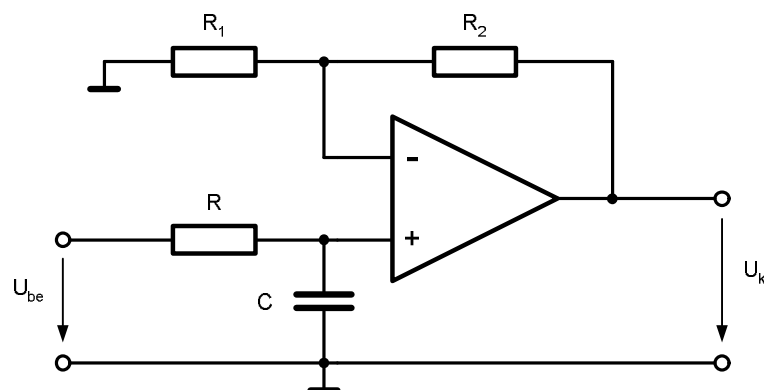
Az aktív szűrők jellemzői, jellemzőinek stabilitása közvetlen módon függ az alkalmazott alkatrészek minőségétől és időbeli stabilitásától.

Elvileg a következő aktív szűrőtípusokat különböztetjük meg:

- aluláteresztő szűrő
- feluláteresztő szűrő
- sáváteresztő szűrő (sávszűrő)
- sávzáró szűrő

4.1 Aktív aluláteresztő szűrők

A legegyszerűbb aktív aluláteresztő szűrőkapcsolás a 4.1 ábrán látható. A műveleti erősítő + bemenetére kapcsoljuk a passzív RC aluláteresztő szűrőt, a - bemenetére kapcsolt R_1 , R_2 ellenálláshálózat pedig meghatározza az áramkör erősítését az átterjesztő frekvenciatartományban.



4.1 ábra Aluláteresztő szűrő alkapcsolás

A C kondenzátoron eső bemeneti feszültség értéke:

$$u_C = \frac{X_C}{R + X_C} \cdot u_{be} = \frac{1}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} \cdot u_{be} = \frac{1}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C} \cdot u_{be}$$

Másfelől, a műveleti erősítő visszacsatolt erősítése:

$$A_{uvo} = \frac{u_{ki}}{u_C} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

A két egyenletből következik:

$$A_{uv} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{1}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C}$$

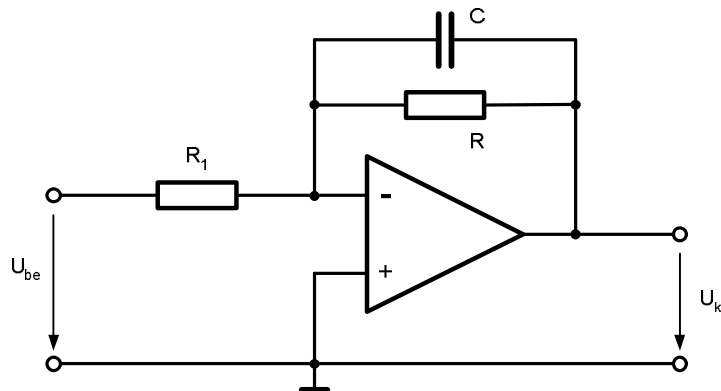
Az aluláteresztő szűrő által beiktatott egyetlen töréspont (elsőfokú szűrő) frekvenciája:

$$\omega_0 = \frac{1}{R \cdot C} \quad \Rightarrow \quad f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Az áteresztési tartományban a szűrő aktív jellegét bizonyítja, hogy az erősítés nagysága:

$$A_{uv} = A_{uvo} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

A 4.2 ábra egy gyakorlati megoldást mutat az invertáló elsőfokú aktív aluláteresztő szűrő kivitelezésére. A kapcsolási rajzon észrevehető, hogy a bemeneten nem alkalmazunk csatolókondenzátort, így az alsó határfrekvencia 0 Hz. A C kondenzátoron keresztül a nagyfrekvenciás jeleket visszacsatoljuk, mivel a kondenzátornak a nagyobb frekvenciákon kicsi az ellenállása. Mivel a műveleti erősítőnek az áramkörben erősítő hatása van, a kapcsolás aktív.



4.2 ábra Elsőfokú aluláteresztő szűrő kapcsolás

A kapcsolás átviteli függvényét az invertáló alapkapsolás tulajdonságainak felhasználásával kapjuk:

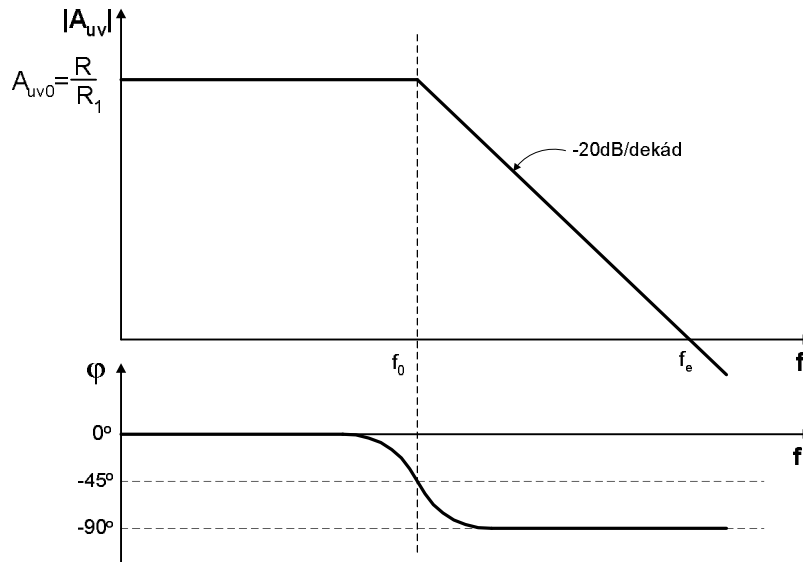
$$A_{uv} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{Z_v}{Z_s} = -\frac{R \times X_C}{R_1} = \frac{R \cdot X_C}{R_1 \cdot (R + X_C)}$$

Komplex számok alkalmazásával:

$$A_{uv} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{Z_v}{Z_s} = -\frac{R \times \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}}{R_1} = \frac{R}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C} = -\frac{R}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C}$$

ahol Z_v a visszacsatoló soros impedancia és Z_s a bemeneti soros impedancia.

Az áramkör átviteli jelleggörbéjét a 4.3 ábra szemlélteti. Megfigyelhető, hogy a kimeneti feszültség, a töréspont frekvenciáját túllépve, -20dB/dekád meredekséggel csökken. Az áteresztési tartományban a az erősítés nagysága: $A_{uv} = -\frac{R}{R_1}$



4.3. ábra Elsőfokú aluláteresztő szűrő átviteli jelleggörbéje

Az aluláteresztő szűrő által beiktatott töréspont frekvenciája:

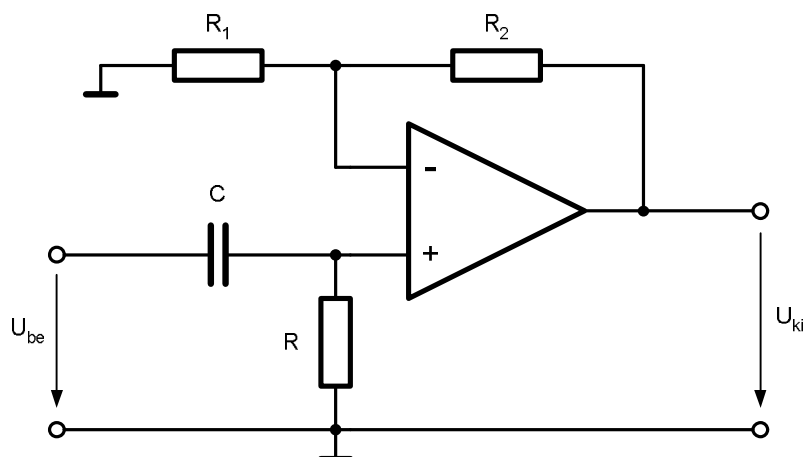
$$\omega_0 = \frac{1}{R \cdot C} \quad \Rightarrow \quad f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

A fáziseltolás kis frekvenciákon nulla, a törésponti frkvenciánál -45° és nagyfrekvenciáknál pedig -90°-hoz közelít. Ez az aktív RC szűrő, aluláteresztő jellege miatt az $u_{be}(t)$ bemeneti jel középértékének képzésére alkalmas.

Ha a szűrő zárótartományi csillapítása nem elég, akkor több szűrőáramkört kapcsolhatunk sorba, így a csillapítási karakterisztika sokkal meredekebb lesz.

4.2 Aktív feluláteresztő szűrők

A legegyszerűbb aktív feluláteresztő szűrőkapcsolást a 4.4 ábra szemlélteti. A műveleti erősítő + bemenetére kapcsoljuk a passzív RC feluláteresztő szűrőt, a - bemenetére kapcsolt R_1 , R_2 ellenálláshálózat pedig meghatározza a az áramkör erősítését az áteresztő frekvenciatartományban.



4.4 ábra Feluláteresztő szűrő alapkapcsolás

Az R ellenálláson eső bemeneti feszültség értéke:

$$u_R = \frac{R}{R + X_C} \cdot u_{be} = \frac{R}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} \cdot u_{be} = \frac{j \cdot \omega \cdot R \cdot C}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C} \cdot u_{be}$$

Másfelől, a műveleti erősítő visszacsatolt erősítése:

$$A_{uvo} = \frac{u_{ki}}{u_C} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

A két egyenletből következik:

$$A_{uv} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{j \cdot \omega \cdot R \cdot C}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C}$$

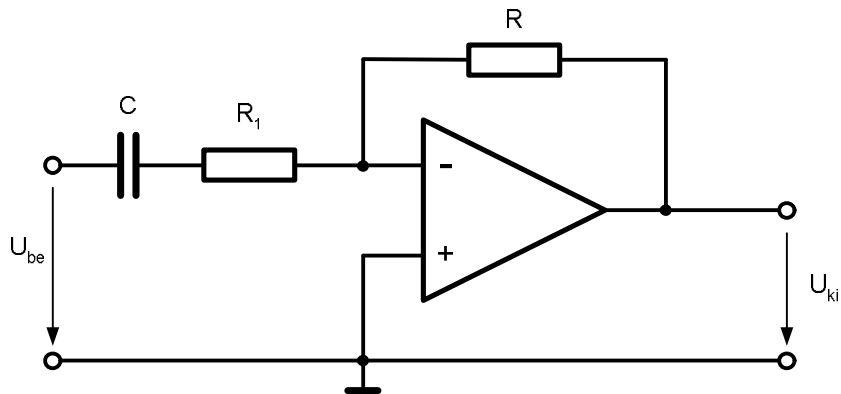
Az felüláteresztő szűrő által beiktatott egyetlen töréspont (elsőfokú szűrő) frekvenciája:

$$\omega_0 = \frac{1}{R \cdot C} \quad \Rightarrow \quad f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Az áteresztési tartományban a szűrő aktív jellegét bizonyítja, hogy az erősítés nagysága:

$$A_{uv} = A_{uvo} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

A 4.5 ábrán egy elsőfokú, invertáló, felüláteresztő szűrőáramkör kapcsolása látható. A bemeneten levő soros C kondenzátor kis frekvencián nagy kapacitív reaktanciával rendelkezik, ezért a kisfrekvenciás jelek erősen csillapítva jutnak az erősítő bemenetére. Nagyobb frekvenciák esetében a kondenzátor gyakorlatilag rövidzárként viselkedik, így a bemeneti jelet nem csökkenti.



4.5 ábra Elsőfokú fázisfordító felüláteresztő szűrő kapcsolás

A felüláteresztő szűrő átviteli függvénye:

$$A_u = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{Z_v}{Z_s} = -\frac{R}{\sqrt{R_1^2 + X_C^2}}$$

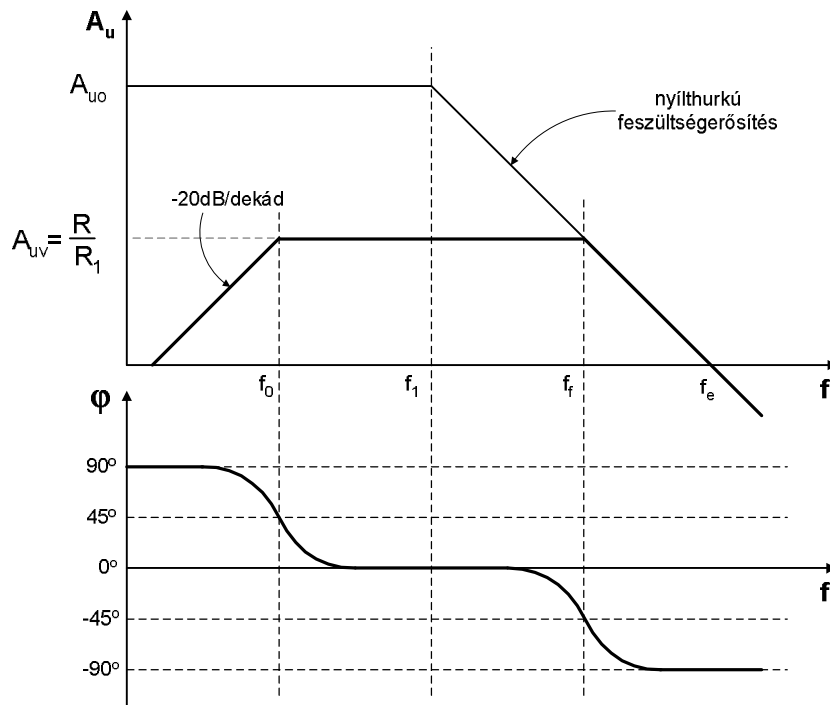
Komplex számok alkalmazásával:

$$A_u = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = -\frac{Z_v}{Z_s} = -\frac{R}{R_1 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} = -\frac{R}{R_1} \cdot \frac{j \cdot \omega \cdot C \cdot R_1}{1 + j \cdot \omega \cdot C \cdot R_1}$$

A szűrő törésponti frekvenciáját a soros elemek határozzák meg:

$$\omega_0 = \frac{1}{R_1 \cdot C} \quad \Rightarrow \quad f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C}$$

A frekvenciaátvitel grafikus képe a 4.6 ábrán látható.



4.6 ábra Elsőfokú felüláteresztő szűrő átviteli jelleggörbéje

A nyílt hurkú erősítés csökkenése a frekvencia növekedésével meghatározza a szűrő felső határfrekvenciáját (ω_f).

Az aktív felüláteresztő szűrők a gyakorlatban igen hajlamosak a begerjedésre vagy kiemelésre az áteresztőtartományban. A felüláteresztő szűrőkben is javíthatjuk a zárótartománybeli csillapítást és meredekséget, ha több áramkört egymás után kapcsolunk.

4.3 Másodfokú aktív szűrőkapcsolások

Általános másodfokú aktív szűrő (Sallen-Key szűrő) kapcsolását szemlélteti a 4.7 ábra. A műveleti erősítő nem invertáló erősítő alkapcsolásban működik, tehát:

$$\frac{u_{ki}}{u_B} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = A_0$$

ha u_B a feszültség értéke a B pontban. Kirchhoff törvényét alkalmazva az A pontra, felírhatjuk:

$$u_{be} \cdot Y_1 = u_A (Y_1 + Y_2 + Y_3) - u_{ki} \cdot Y_3 - u_B \cdot Y_2$$

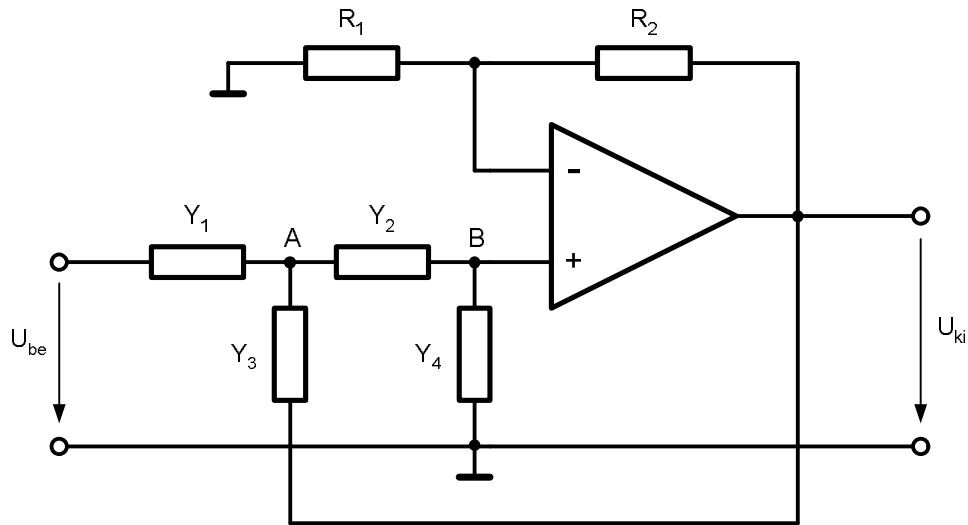
ha u_A a feszültség értéke az A pontban. Kirchhoff törvényét alkalmazva a B pontra, felírhatjuk:

$$u_A \cdot Y_2 = u_B \cdot (Y_2 + Y_4)$$

A fenti egyenletekből következik az áramkör feszültségerősítése:

$$\frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{A_0 \cdot Y_1 \cdot Y_2}{Y_1 \cdot Y_2 + Y_4 \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3) + Y_2 \cdot Y_3 \cdot (1 - A_0)}$$

Az így kapott eredményt felhasználjuk a másodfokú alul- és felüláteresztő szűrők tanulmányozására.

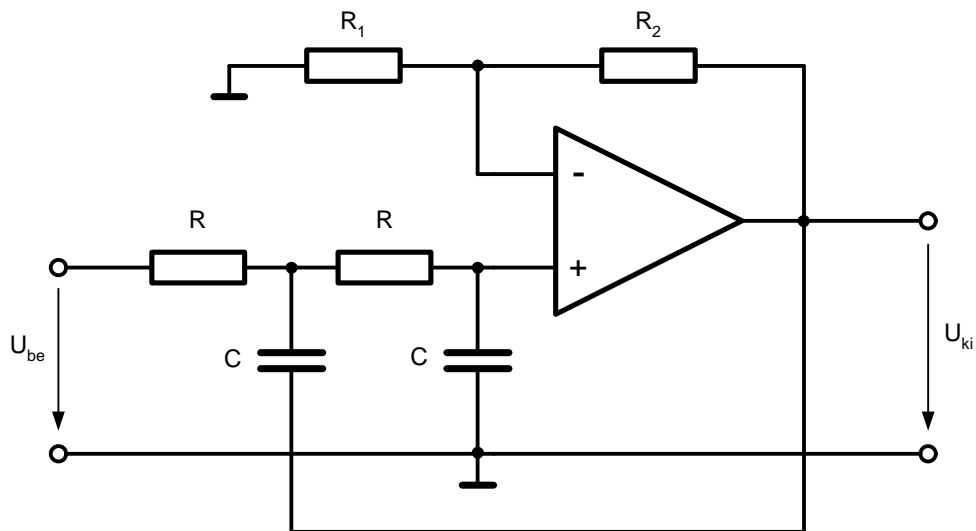


4.7 ábra Általános másodfokú aktív szűrő (Sallen-Key szűrő) kapcsolás

Ha $Y_1 = Y_2 = \frac{1}{R}$ és $Y_3 = Y_4 = j \cdot \omega \cdot C$, akkor a 4.8 ábrán szemléltetett másodfokú aktív aluláteresztő szűrőt kapjuk. A szűrő transzferkarakterisztikája ebben az esetben:

$$H(\omega) = \frac{A_0}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C \cdot (3 - A_0) + (j \cdot \omega \cdot R \cdot C)^2}$$

Megfigyelhető, hogy ha $\omega = 0$, akkor $H(0) = A_0$, illetve ha $\omega \rightarrow \infty$, akkor $H(\infty) = 0$, ami aluláteresztő frekvenciakarakterisztikára utal.

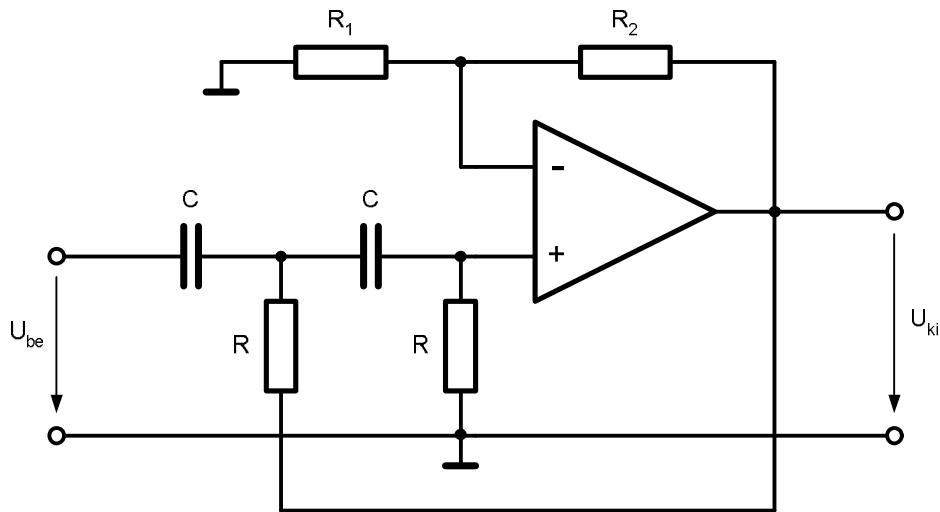


4.8 ábra Másodfokú aluláteresztő aktív szűrőkapcsolás

Ha $Y_1 = Y_2 = j \cdot \omega \cdot C$ és $Y_3 = Y_4 = \frac{1}{R}$, akkor a 4.9 ábrán szemléltetett másodfokú aktív feluláteresztő szűrőt kapjuk. A szűrő transzferkarakterisztikája ebben az esetben:

$$H(\omega) = \frac{A_0 \cdot (j \cdot \omega \cdot R \cdot C)^2}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C \cdot (3 - A_0) + (j \cdot \omega \cdot R \cdot C)^2}$$

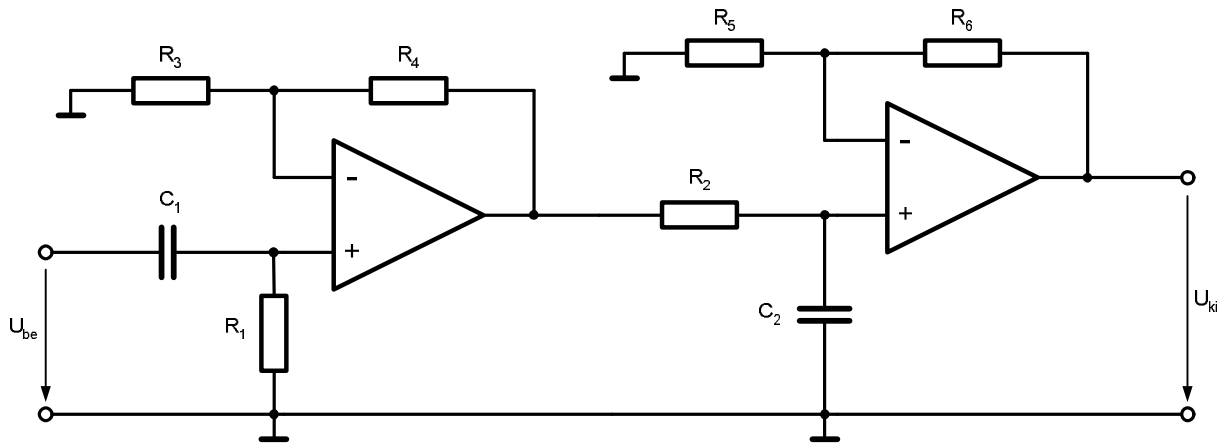
Megfigyelhető, hogy ha $\omega = 0$, akkor $H(0) = 0$, illetve ha $\omega \rightarrow \infty$, akkor $H(\infty) = A_0$, ami felüláteresztő frekvenciakarakterisztikára utal.



4.9 ábra Másodfokú felüláteresztő aktív szűrőkapcsolás

4.4 Aktív sávszűrők

A legegyszerűbb aktív sávszűrőkapcsolást a felüláteresztő illetve az aluláteresztő alapszűrőkapcsolások sorbakapcsolásával valósíthatjuk meg (4.10 ábra).



4.10 ábra Sávszűrő alapkapsolás

Az eredő sávszűrő átviteli függvénye:

$$\frac{u_{ki}}{u_{be}} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) \cdot \frac{1}{1 + j \cdot \omega \cdot R_1 \cdot C_1} \cdot \frac{j \cdot \omega \cdot R_2 \cdot C_2}{1 + j \cdot \omega \cdot R_2 \cdot C_2}$$

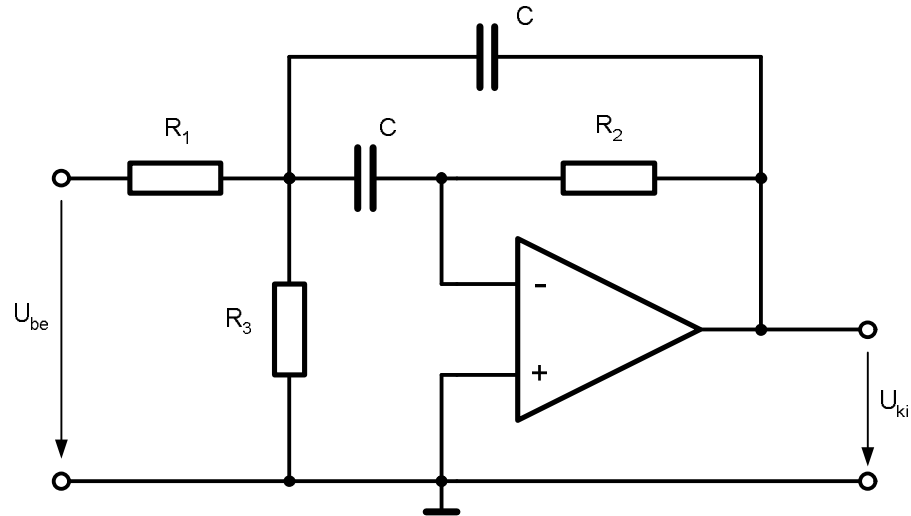
Az alsó és felső töréspont frekvenciái:

$$f_a = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} \quad \text{és} \quad f_f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_2}$$

Gyakorlati, aktív, invertáló, keskenysáváteresztő szűrő kapcsolás látható a 4.11 ábrán. A szűrő az f_0 frekvencia környezetében átenged és más tartományban a bemenő jeleket csillapítja. A keskeny átviteli frekvenciasávot a többszörös negatív visszacsatolás biztosítja.

A 4.11 ábra adatai szerint az átviteli függvény:

$$A_{uv} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = - \frac{\frac{R \cdot R_3}{R_1 + R_3} \cdot j \cdot \omega \cdot C}{1 + 2 \cdot \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} \cdot j \cdot \omega \cdot C + \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_3} (j \cdot \omega \cdot C)^2}$$



4.11 ábra Többszörös negatív visszacsatolású sávszűrő kapcsolás

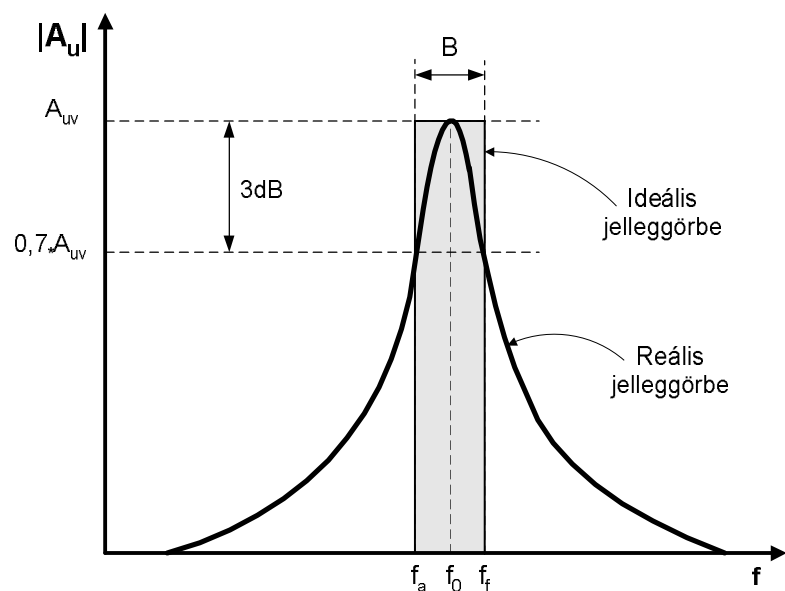
Abban az esetben, ha $R_1 = R_2 = \frac{R}{2}$ és $R_3 = 4 \cdot R$, az átviteli függvény a következő alakra egyszerűsíthető:

$$A_{uv} = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = - \frac{j \cdot \omega \cdot R \cdot C}{1 + \frac{1}{2} \cdot j \cdot \omega \cdot R \cdot C + (j \cdot \omega \cdot R \cdot C)^2}$$

Ebben az esetben a sávközép frekvencia:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

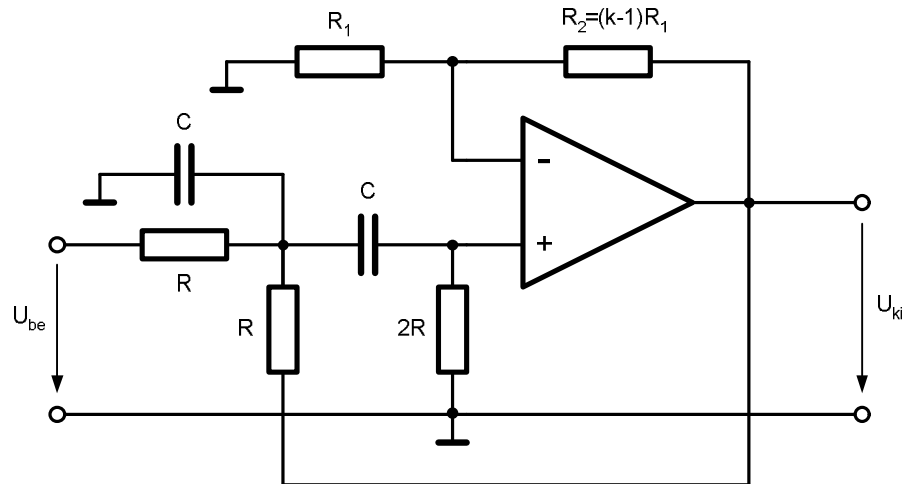
A sávszűrő átviteli karakterisztikáját a 4.12 ábra szemlélteti.



4.12 ábra Többszörös negatív visszacsatolású sávszűrő átviteli jelleggörbéje

Az áramkör előnyös tulajdonsága, hogy megfelelő kompenzálás esetén stabil működésű, gerjedésre nem hajlamos. A két $\frac{R}{2}$ értékű ellenállást együttfutó potencióméterekkel helyettesítve, a sávközépi frekvencia közel lineáris változtatása lehetséges, anélkül, hogy a szűrő jósági tényezője számottevően változna.

Sáváteresztő szűrőkapcsolás megvalósításának harmadik lehetősége a 4.13 ábra szerinti egyszeres pozitív visszacsatolt elrendezés. Megfigyelhető, hogy az áramkör az általános másodfokú aktív szűrőkapcsolásra (Sallen-Key) vezethető vissza, ha $Y_1 = Y_3 = \frac{1}{R}$, $Y_4 = \frac{1}{2 \cdot R}$, $Y_2 = j \cdot \omega \cdot C$ és a visszacsatolás kimenetét egy C értékű kondenzátorral földeljük.



4.13 ábra Egyszeres pozitív visszacsatolású sávszűrő

Ha a negatív visszacsatolásban szereplő R2 ellenállás értéke $R_2 = (k-1) \cdot R_1$, akkor az áramkör erősítése a + bemenettől a kimenetig $A_{uvo} = k$. Ebben az esetben a szűrő átviteli függvénye:

$$A_{uv} = k \cdot \frac{j \cdot \omega \cdot R \cdot C}{1 + (3-k) \cdot j \cdot \omega \cdot R \cdot C + (j \cdot \omega \cdot R \cdot C)^2}$$

A sávközép frekvencia értéke:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Következik, hogy a szűrő erősítése f_0 frekvencián:

$$A_r = \frac{k}{3-k}$$

Ha $k = 3$, akkor az erősítés végtelen nagy, azaz gerjedés lép fel. A belső k erősítés beállításának pontosságára annál érzékenyebb az áramkör, minél közelebb van k értéke a 3-hoz.

4.3 Aktív sávzáró szűrők

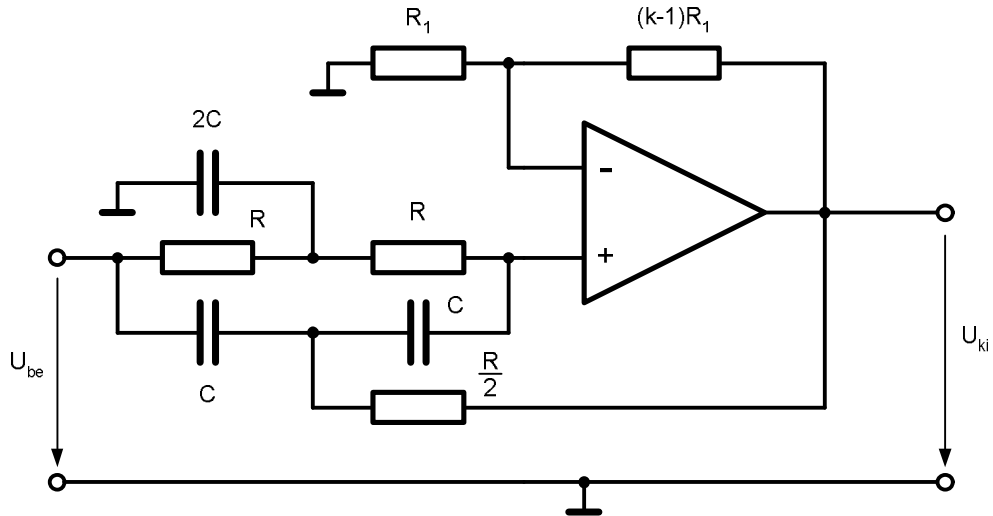
Egy megoldást az aktív sávzáró szűrő kapcsolására a 4.14 ábra szemléltet. Ez a típusú szűrő az átviteli tartományán kívül eső jeleket erősen csillapítja. Megfigyelhető hogy a kettős T elrendezésű sávzáró karakterisztikájú passzív szűrőt a műveleti erősítő visszacsatoló ágába helyeztük. Nagy és kis frekvencián a kettős T szűrő változatlanul átviszi a bemenő jelet. Az áramkör erősítése ilyenkor

$$A_{uv} = k$$

A sávközép frekvencia:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Rezonanciafrekvencián a kimeneti feszültség 0. Ekkor a kettős T szűrő úgy működik, mintha az $R/2$ ellenállást a földre kötöttük volna.

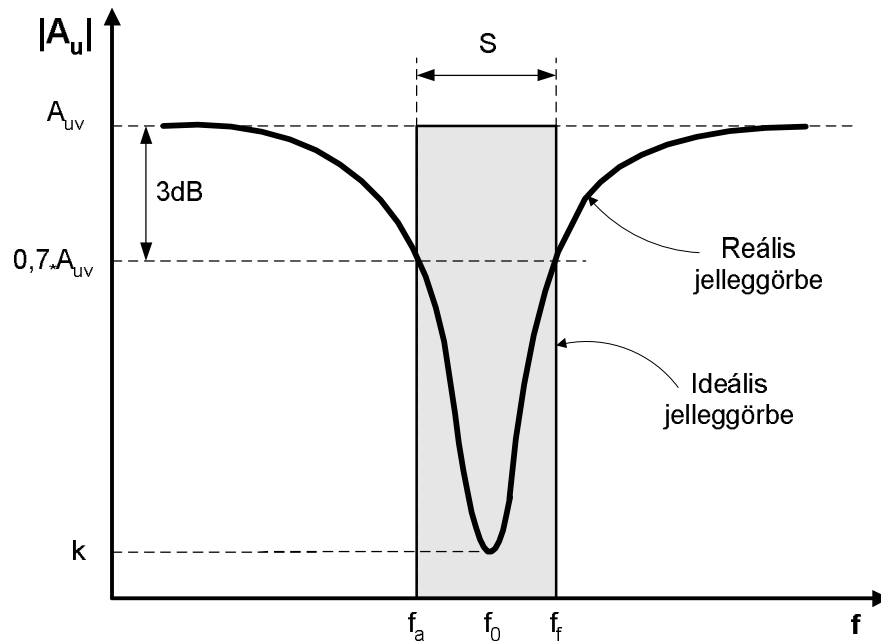


4.14 ábra Aktív kettős T sávközép szűrőkapcsolás

A szűrő átviteli karakterisztikája, a 4.14 ábrán megadott ellenállás és kapacitásértékekkel a következő:

$$A_{uv} = k \cdot \frac{1 + (j \cdot \omega \cdot R \cdot C)^2}{1 + 2 \cdot (2 - k) \cdot j \cdot \omega \cdot R \cdot C + (j \cdot \omega \cdot R \cdot C)^2}$$

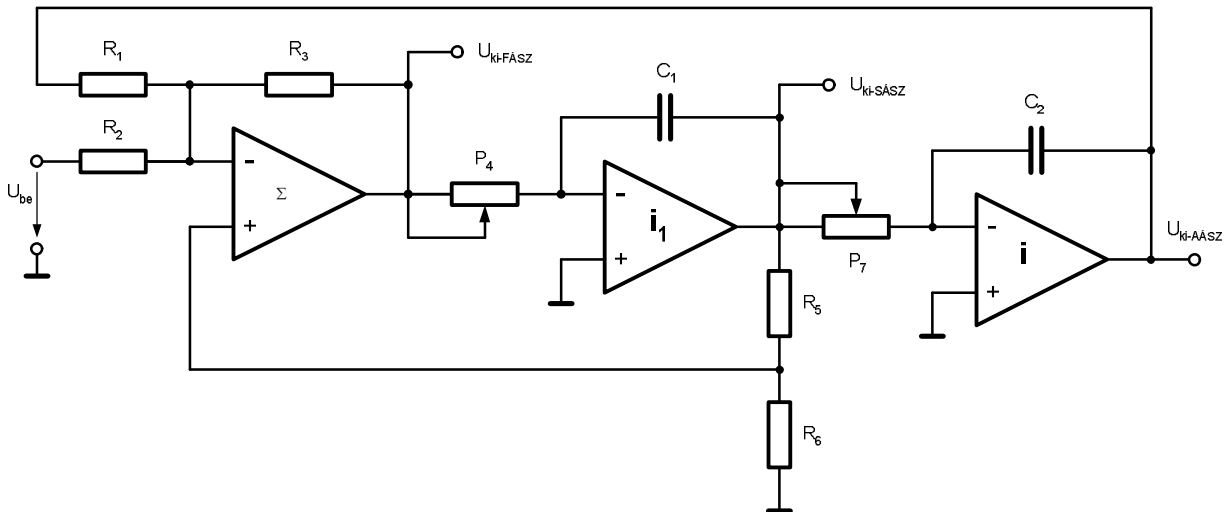
A sávközép szűrő átviteli jelleggörbéjét a 4.15 ábra szemlélteti.



4.15 ábra Sávközép szűrő átviteli jelleggörbéje

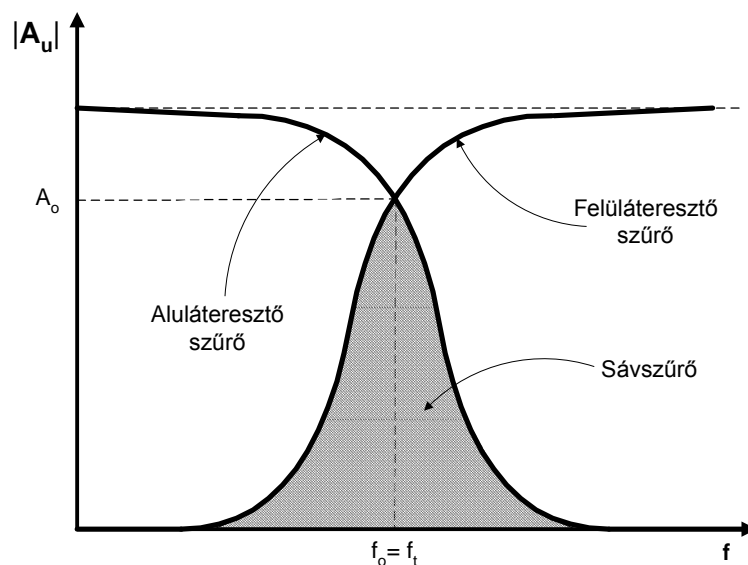
4.5 Hangolható aktív szűrők

A hangolható aktív szűrőket széles körben alkalmazzák olyan helyzetekben ahol az átviteli frekvenciasáv módosítása szükséges. A 4.16 ábrán egy hangolható aktív szűrőkapcsolás látható. Az áramkör egy összegező erősítő és két integráló (aluláteresztő) erősítő visszacsatolásos sorbakapcsolásából áll. Általában az áramkört sáváteresztő szűrőként alkalmazzák, ennek ellenére rendelkezik aluláteresztő, illetve felüláteresztő szűrőkimenetekkel is. A két integrátor törésponti frekvenciáját általában egyformára állítják be, meghatározva ezzel a sáváteresztő szűrő sávközép frekvenciáját (f_0).



4.16 ábra Hangolható aktív sáváteresztő szűrő

Az f_0 -nál kisebb frekvenciákon a bemeneti jel áthalad a két integrátoron és 180° -os fáziseltolódással csatolódik vissza (vonódik ki) a bemenetre, semlegesítve a bemeneti jelet. A törésponti frekvencia közelében a visszacsatoló jel erőssége csökken és a bemeneti jel eljut a sávszűrő kimenetére. Az f_0 -nál nagyobb frekvenciákon a bemeneti jel már el sem jut az első integrátor kimenetéig. A szűrés eredménye a 4.17 ábrán látható átviteli jelleggörbe. Ha a két töréspont változtatása egyszerre történik, (a potenciométerek mozgása szinkronizálva van), a jelleggörbe csúcspontja (A_0) nem fog csökkenni.



4.17 ábra Hangolható sáváteresztő szűrő átviteli jelleggörbéje