

NEMESSZEGHY GYÖRGY
Bánki Donát Műszaki Főiskola

FEN áramkörök

ETO 621.372.54.011.733

A FEN (frequency emphasizing network) áramkörök, amelyeket Moschytz-féle áramköröknek is neveznek, aktív frekvencia kiemelők [1].

A FEN áramkörök többféle alkalmazásai közül most a FEN áramkörös aktív szűrőkkel kívánunk foglalkozni, amelyeket a passzív LC áramköröket utánzó aktív áramkörök közé sorolhatunk [2].

A FEN áramkörös aktív szűrők felépítése

Az aktív RC szűrők mintájára a FEN áramkörös szűrőket is felbonthatjuk másodfokú FEN áramkörös szűrők lánckapcsolására. Ezen másodfokú áramkör feszültségátvitelét jelöljük A -val: $A = u_2/u_1$.

Azt kívánjuk elérni, hogy az A feszültségátvitel frekvenciafüggése olyan legyen, mintha LC kapcsolást használtunk volna. Az 1a ábrán másodfokú LC kapcsolás feszültség-amplitúdó karakterisztikát rajzolunk fel. Az ω_0 körfrekvencián a kiemelést az önindukciós tekercs és a kondenzátor rezonanciája okozza. A passzív RC kapcsolásoknál ilyen frekvencia-kiemelés nincs, ezért ezt FEN áramkörrel lehet megvalósítani. A passzív LC négy-pólus karakterisztikáját a passzív RC és FEN áramkör lánckapcsolásával kapott karakterisztikával utánozhatjuk (1. ábra).

Az RC négy-pólus és a FEN áramkör között folyó áramot jelöljük i -vel és bővítsük ezzel az u_2/u_1 törtet:

$$A = \frac{u_2}{u_1} = \frac{i}{u_1} \cdot \frac{u_2}{i}$$

Látjuk:

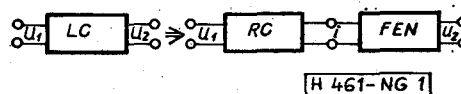
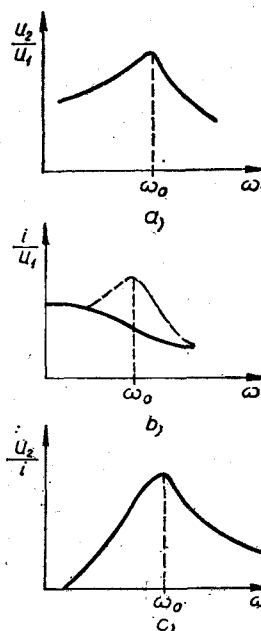
$$A = Y_{1t} \cdot Z_{2t}, \quad (1)$$

ahol Y_{1t} a passzív RC négy-pólus transzfer admittanciája a Z_{2t} pedig a FEN áramkör transzfer impedanciája.

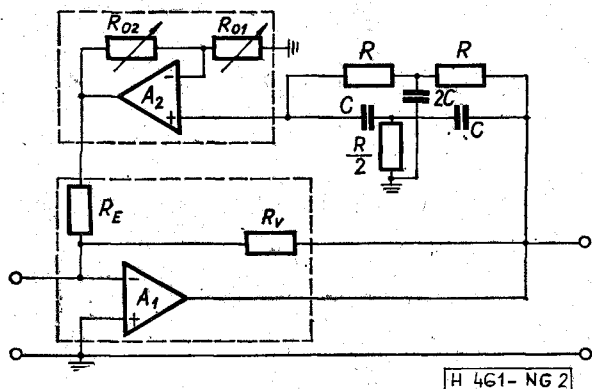
Az LC szűrő u_2/u_1 amplitúdó-karakterisztikáját megfelelő transzfer admittanciájú RC kapcsolással közelítjük, majd láncba kapcsolt megfelelő transzfer impedanciájú FEN áramkörrel elvégezzük a kiemelést.

A FEN áramkör

A FEN áramkört a 2. ábrán vázoltuk fel. Az áramkör két műveleti erősítőt tartalmaz. Az A_1 erősítő invertáló, az A_2 erősítő pedig nem invertáló. A_2 az A_1 visszacsatoló ágában van a kettős T hídval együtt. Tudjuk, hogy a kihangolt RC kettős T négy-pólus adott frekvencián elvileg végtelen nagy csillapítást ad, vagyis sávzáró négy-pólus. Ezen a frekvencián csak az R_v és az $R_E + R_0$ ohmos feszültségosztó miatt lép fel negatív visszacsatolás. A FEN áramkör tehát azon a frekvencián, amelyen a kettős T tag szakadás-ként viselkedik, frekvencia-kiemelést végez, mivel ezen a frekvencián minimális a negatív visszacsatolás.



1. ábra



H 461-NG 2

2. ábra

Az A_1 és A_2 feszültségerősítésekbe számítsuk be a 2. ábrán látható frekvenciafüggetlen negatív visszacsatolásokat, így a FEN áramkör jósági tényezője egyszerűen megadható:

$$Q = (1 + A_2 A_1) q, \quad (2)$$

ahol q a kettős T híd jósági tényezője, amely szimmetrikus esetben: $1/4$.

Amennyiben az R_E mellett az R_0 elhanyagolható, $A_1 = R_V/R_E$ és $A_2 = R_{01}/R_{02}$. A negatív visszacsatoló ágban levő osztó: $R_0 = R_{01} + R_{02}$.

A FEN áramkörben szimmetrikus felépítésű, nulla-kiegyenlített kettős T hidat használtunk, amelynek tulajdonságairól a következő fejezetben lesz szó.

A FEN áramkör származtatása a kettős T hidas szelektív erősítőkből

A kettős T szűrők tulajdonságait részletesen ismerteti a [3] irodalom. Ha azt kívánjuk, hogy a 3. ábrán felvázolt kettős T hidunk a kihangolási frekvencián szakadésként viselkedjen, akkor az alábbi feltételt kell teljesítenünk:

$$2C/C_p = R/2R_p = n,$$

ahol n tetszőleges pozitív értéket vehet fel.

Ha teljesül a fenti egyenlőség, akkor a kiegyenlítés frekvenciája:

$$f_0 = \sqrt{n}/2\pi RC.$$

A jósági tényező a kapcsolási elemek viszonyától függ:

$$q = \frac{\sqrt{n}}{2(1+n)}. \quad (3)$$

A fenti függvényt differenciálva adódik, hogy a szimmetrikus hídnak maximális a jósági tényezője $n=1$ esetében. Látható, ez az eset szerepel a 2. ábrán: $R_p = R/2$, $C_p = 2C$, $q = 1/4$.

A kettős T hidakat régóta használják szelektív erősítőkben a 4. ábrán felvázolt tömbvázlat szerint. Ha K -val jelöljük a kettős T híd feszültségátviteli tényezőjét, a visszacsatolt erősítő erősítése:

$$A = \frac{A_1}{1 + A_1 K}. \quad (4)$$

Feltételezve, hogy az erősítő kimeneti ellenállása kicsi, bemeneti ellenállása pedig nagy, K helyébe az üresjárásban dolgozó kettős T híd átviteli tényezőjét helyettesíthetjük. Ilyenkor az f_0 környezetében, kis elhangolásokra, az erősítő amplitúdó-karakterisztikája olyan lesz, mint a párhuzamos LC rezgőkör karakterisztikája:

$$\left| \frac{A}{A_1} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \eta^2 q_e^2}},$$

ahol $\eta = (f/f_0) - (f_0/f)$, a relatív elhangolás.

Az equivalens jósági tényező:

$$q_e = q\sqrt{(1 + A_1)^2 - 1} \approx (1 + A_1)q.$$

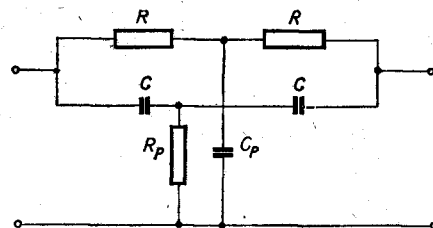
A FEN áramkört ezek után úgy kapjuk meg, hogy a visszacsatoló ágba is beiktatunk egy erősítőt (A_2), és az A_1 erősítést negatív visszacsatolással (R_V és R_E ellenállások beépítésével) csökkentjük. Ekkor az erősítés és a jósági tényező:

$$A = \frac{A_1}{1 + A_1 A_2 K}, \quad Q = (1 + A_1 A_2) q.$$

Látjuk, hogy változatlan maximális A_1 erősítés esetén a Q -t, és a sáv szélességet változtathatjuk A_2 változtatásával.

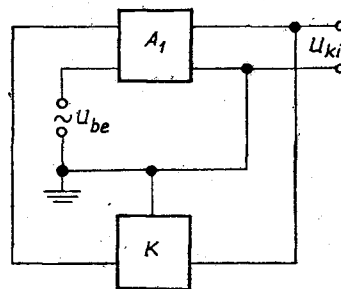
A FEN áramkör érzékenysége

Először a kettős T híd $K(s)$ hálózatfüggvényének az érzékenységét fogjuk megvizsgálni a híd kapcsolási elemeire vonatkoztatva. A híd kapcsolási elemeinek a pontatlansága miatt ugyanis nem teljesül a nulla kiegyenlített feltétele, így nem lesz olyan f_0 frekvencia, amelyen $K=0$. K -nak az új minimum helyét jelöljük f_{ou} -val és $f_0 - f_{ou}$ -t, Δf -tél. A szimmetrikus híd bármelyik kapcsolási elemét relatíve azonos mér-



H 461-NG 3

3. ábra



H 461-NG 4

4. ábra

tétkben megváltoztatva, a legrosszabb esetre számított eredő relatív frekvenciaváltozás:

$$\left| \frac{\Delta f}{f_0} \right| = 2 \left| \frac{\Delta R}{R} \right| = 2 \left| \frac{\Delta C}{C} \right|. \quad (5)$$

Az új minimumhelyhez, f_{ou} -hoz tartozó minimális érték a legrosszabb esetre számolva:

$$K_{ou} = \frac{1}{2} \left| \frac{\Delta R}{R} \right|. \quad (6)$$

A (6) egyenlőség alapján áttérhetünk az egész FEN áramkör amplitúdó-karakteristikájának, a híd kapcsolási elemeire vonatkoztatott érzékenységre:

$$\left| \frac{\Delta}{A_1} \right| \approx \frac{A_1 A_2}{2} \left| \frac{\Delta R}{R} \right|.$$

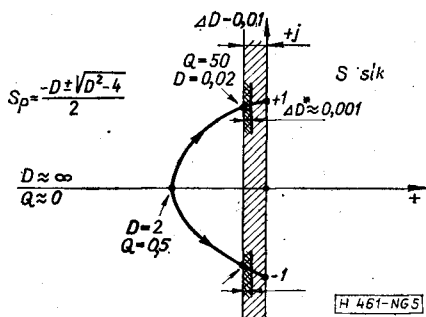
Behelyettesítve a fenti egyenlőségbe a (2) összefüggés alapján a jósági tényezőt, kapjuk:

$$\left| \frac{\Delta A}{A_1} \right| = \frac{4Q-1}{2} \left| \frac{\Delta R}{R} \right|$$

Látjuk, hogy a jósági tényező növelésének (a sáv szélesség csökkentésének) az amplitúdó-karakteristika érzékenysége szab határt. Az általunk ismert FEN áramkör esetében a jósági tényezőt $Q=5$ és $Q=50$ között célszerű megválasztani. Amennyiben az amplitúdó-karakteristikát 10%-os túréssal adjuk meg, ennek realizálásához $Q=5$ esetében a híd kapcsolási elemeit 1%-os pontossággal kell megépítenünk. Viszont ugyanilyen feltételek mellett $Q=50$ esetében a híd kapcsolási elemeivel szemben igen komoly 0,1%-os túrési követelmény lép fel.

Szerencsére az aktív szűrőknél az erősítés abszolút értékének a nagysága nem elsőrendű fontosságú. A sávközép elhangolódása $Q=50$ -nél 2% és $Q=5$ -nél már csak 0,2%, ha a híd kapcsolási elemeinek a túrése 1%-os. Hasonlóan jobb a helyzet a sáv szélesség érzékenységgel kapcsolatban is.

Igen fontos azonban az, hogy FEN áramkörünk ne legyen gerjedékeny. Éppen ezért mielőtt a FEN áramkör szintéziséhez hozzá fogtunk volna, a [3] irodalomból átvettük és átalakítottuk a szimmetrikus kettős T híd feszültségátviteli tényezőjét, felírtuk a hurokerősítést. A gyökhelygörcbét az 5. ábrán láthatjuk. A gyökhelygörbe paramétere a $Q=1/D$. Látjuk $Q=0,5$ -nél konjugált komplex pólusok jelennek meg az S síkon. $Q=50$ -nél még mindig $\Delta D=0,01$ széles biztonsági sáv választ el a gerjedéstől. Mivel



5. ábra

a híd jósági tényezőjének a híd kapcsolási elemeire vonatkoztatott érzékenysége $n=1$ esetben a (3) összefüggésből számítva zérusnak adódik, ezért a jósági tényező relatív változása:

$$\left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| = \left| \frac{\Delta A_1}{A_1} + \frac{\Delta A_2}{A_1} \right| \frac{4Q-1}{4Q}.$$

$A_1=R_V/R_E$ és $A_2=R_0/R_{01}$ a frekvenciafüggetlen negatív visszacsatolások miatt. Így $\left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| \approx 4 \left| \frac{\Delta R}{R} \right|$.

Feltételezzük, hogy mindegyik ellenállás relatív megváltozása azonos. A bevezetett közelítések ellen-súlyozására kerekítjük fel a jósági tényező relatív megváltozását, és akkor a mérésekkel összhangban megkapjuk azt az eredményt, hogy $Q=50$ -nél, 1%-os ellenállás túrések mellett, a Q jósági tényező stabilitása 5%:

$$\left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| \approx 5 \left| \frac{\Delta R}{R} \right|$$

Az 5. ábrán láthatjuk, hogy ez a változás a $\Delta D=0,01$ széles biztonsági sávból csupán $\Delta D=0,001$ szélességű sávot használ el, felfelé kerekítve.

A FEN áramkört azonban láncba kapcsoljuk az 1. ábra szerinti passzív RC négy-pólussal, amely meghatározza az így kapott aktív szűrő jellegét (alul-, felüláteresztő vagy sávszűrő jellegét). Ezért a következő fejezetben a FEN áramkör és az RC négy-pólus lánckapcsolásából összeállított aktív szűrő érzékenységgel foglalkozunk.

FEN áramkörös aktív szűrő érzékenysége

Mivel sávszűrőt kívánunk építeni, a 6. ábráról átmásoljuk a megfelelő admittancia függvényt:

$$Y_{II} = K_r \frac{s}{s^2 + \frac{\omega_p}{q} s + \omega_p^2},$$

ahol $K_r = \frac{1}{R_1 R_4 C_3}$, $\omega_p = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_4 C_2 C_3}}$,

$$q = \frac{\sqrt{R_1 R_4 C_2 C_3}}{(R_1 + R_4) C_2 + R_4 C_3}.$$

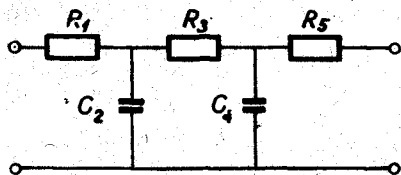
A FEN áramkör transzfer impedanciája:

$$Z_{21} = K_k \frac{s^2 + \frac{\omega_0}{q} s + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2},$$

ahol $K_k = \frac{q}{Q} R_V$, $\omega_0 = \frac{1}{RC}$, $q=1/4$, Q a FEN áramkör jósági tényezője.

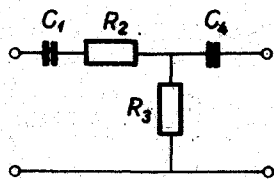
A 7. ábrán felvázolt kapcsolat szerint (1) az eredő feszültség-erősítés az $\omega_p = \omega_0$ és $q_r = q$ feltételek teljesülése esetén:

$$A(s) = K_r K_k \frac{s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2}. \quad (7)$$



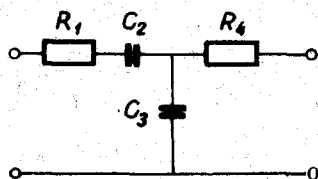
Aluláteresztő:

$$Y_{tt} = K_r \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_r} s + \omega_p^2}$$



Felüláteresztő:

$$Y_{tt} = K_r \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_r} s + \omega_p^2}$$



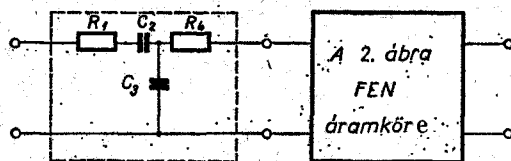
Sávszűrő:

$$Y_{tt} = K_r \frac{s}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_r} s + \omega_p^2}$$

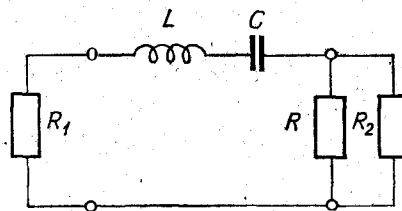
s - a komplex frekvencia,
 Q_r - a jósági tényező,
 ω_p - a pólusfrekvencia.

H 461-N66

6. ábra



7. ábra



8. ábra

Ez az átviteli függvény megegyezik a 8. ábrán látható LC kapcsolás $A(s)$ átviteli függvényével.

A maximum helye: $\omega = \omega_0$.

A maximális feszültség-erősítés: $|A(j\omega)|_{\max} = K_k K_r Q$.

Vezessük be a következő jelölést: $P_1 = \omega_0$, $P_2 = Q$, $P_3 = K_r K_k$. Mivel a hálózati függvényünk $A(s) = A(P_j; s)$ alakban van megadva, a [4] irodalom alapján felírhatjuk aktív szűrőnk érzékenységi mátrixát, P_i az X elemértékek függvénye. $X_1 = R_1$, $X_2 = C_2$, $X_3 = C_3$, $X_4 = R_4$, $X_5 = R_V$, $X_6 = R_E$, $X_7 = R$, $X_8 = C$, $X_9 = R_{01}$, $X_{10} = R_0$.

Definiálhatjuk a P paraméterfüggvények érzékenységét a kapcsolási elemekre vonatkoztatva:

$$S_{X_i}^{P_j} = \frac{\partial \ln P_j}{\partial \ln X_i} = \frac{\partial P_j}{\partial X_i} \frac{X_i}{P_j}$$

Ennek alapján a j -edik paraméter teljes megváltozása:

$$\frac{\Delta P_j}{P_j} = \sum_{i=1}^{10} S_{X_i}^{P_j} \frac{\Delta X_i}{X_i}$$

A fenti egyenletrendszer mátrix alakban felírva:

$$p = Sx$$

ahol p a $\frac{\Delta P_j}{P_j}$ komponensekből képzett oszlopvektor, x szintén oszlopvektor, amelynek komponensei $\frac{\Delta X_i}{X_i}$.

Az S érzékenységi mátrix elemeit az ábránkon található jelölésekkel írjuk fel, bevezetve a $K = K_r K_k$ jelölést is:

$$\begin{bmatrix} S_{R_1}^{\omega_0} & S_{C_2}^{\omega_0} & S_{C_3}^{\omega_0} & S_{R_4}^{\omega_0} & S_{R_V}^{\omega_0} & S_{R_E}^{\omega_0} & S_{R_0}^{\omega_0} & S_C^{\omega_0} & S_{R_{01}}^{\omega_0} & S_{R_0}^{\omega_0} \\ S_{R_1}^Q & S_{C_2}^Q & S_{C_3}^Q & S_{R_4}^Q & S_{R_V}^Q & S_{R_E}^Q & S_{R_0}^Q & S_C^Q & S_{R_{01}}^Q & S_{R_0}^Q \\ S_{R_1}^K & S_{C_2}^K & S_{C_3}^K & S_{R_4}^K & S_{R_V}^K & S_{R_E}^K & S_{R_0}^K & S_C^K & S_{R_{01}}^K & S_{R_0}^K \end{bmatrix}$$

Az érzékenységi mátrix első sorának megfelelő sorvektor:

$$[0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]$$

Összegezve a sort látjuk, hogy az (5) képletnek megfelelően a FEN áramkör 2-es értéket ad, és ehhez adódik a passzív RC négy-pólus 1,5-ös értéke. Tehát:

$$\left| \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \right| = \left| \frac{\Delta f}{f_0} \right| = 3,5 \left| \frac{\Delta R}{R} \right|$$

Az érzékenységi mátrix első sorának a kiszámításához csupán azon feltételek teljesülését vettük figyelembe, amelyekkel a (7) átviteli függvényt is kaptuk, és így ezek értéke minden FEN áramkörös aktív szűrőnél ugyanaz.

Az érzékenységi mátrix második sora már a konkrét aktív szűrőtől függ. Mivel Q érzékenysége aktív szűrőknél alapvető fontosságú és a szintézis során adódnak szabadon megválasztható paraméterek, lehetséges az első négy érzékenységi tényező összegét minimalizálni. Abban az esetben adódik a legkisebb érzékenység, amikor passzív LC-t utánzunk, az eredő maximális erősítés egyszeres. A második sor 5., 6., 9. és 10. eleme, az előző fejezetben elmondottakkal egybehangzóan a jósági tényezőtől függ. Az általunk megépített aktív szűrő érzékenységi mátrixának második sora:

$$\left[0,34; 0,34; 0,34; 0,34; \frac{4Q-1}{4Q}; \frac{4Q-1}{4Q}; 0, 0, \frac{4Q-1}{4Q}; \frac{4Q-i}{4Q} \right]$$

Látjuk, hogy $Q=50$ -nél, $\left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| = 5,3 \left| \frac{\Delta R}{R} \right|$.

Az érzékenységi mátrix harmadik sorával, kisebb jelentősége miatt, nem foglalkozunk.

Megépített közepes Q-jú FEN áramkörös aktív szűrő

A 2. és 7. ábrán látható kapcsolásokat építettük meg. A kapcsolási paraméterek értékeit számítógéppel számítottuk ki. Az ALGOL nyelven írt számítógép-programunk bemenő adatai a következők:

az aktív sávszűrőt terhelő be és kimeneti ellenállások értéke,

az a frekvencia, ahol a maximális kiemelést kell végrehajtani,

a sáv szélesség,

az ellenállás egység, amelyet úgy választhatunk meg, hogy kényelmesen realizálható paraméterértékeket kapjunk,

az eredő feszültségerősítés a sávközépen, amelyet mi érzékenységi és passzív LC áramkört utánzó megfontolásból egységnyiinek választottunk.

Programunk alapján a számítógép kiszámította: a realizálandó átviteli függvény együtthatóit, a megfelelő passzív LC áramkör kapcsolási paramétereit,

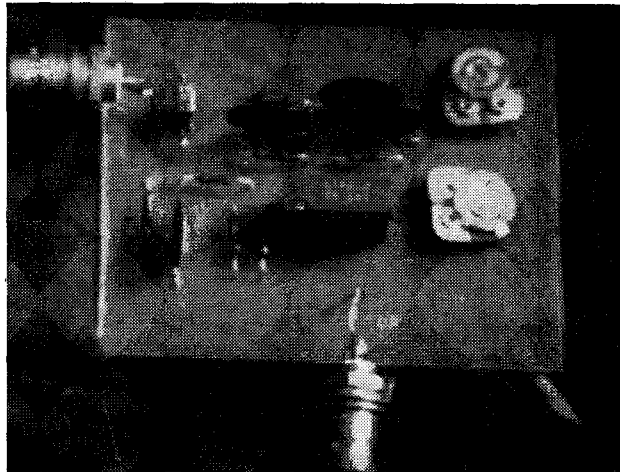
aktív szűrőnk kapcsolási paramétereinek relatív értékét.

Megfelelő kulcs lenyomásával beadható az ellenállás egység, és ezután a számítógép kinyomtatja a kapcsolási paraméterek táblázatát.

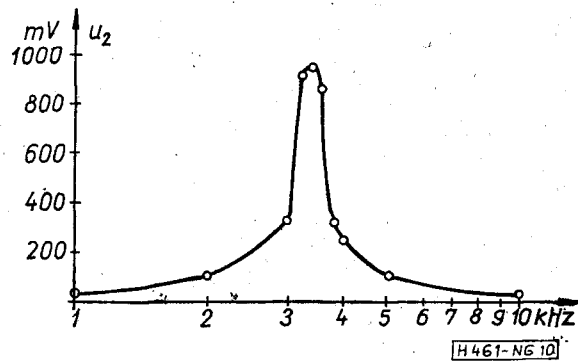
Az adatszagról bevitt bemenő adatokat és a számítógép által kinyomtatott értékeket az 1. táblázat tartalmazza.

A programunk által számítógép segítségével szintetizált aktív szűrőt Galambos András, a Közlekedési és Távközlési Műszaki Főiskola hallgatója építette meg és mérte be. A megépített aktív szűrőt a 9. ábrán láthatjuk.

A mérési eredmények a számított tűréshatárokon belül jól egyeztek az előírt értékekkel. A 10. ábrán



9. ábra



10. ábra

Adatszagról bevitt bemenő adatok

1. táblázat

Jelölése az ALGOL progr.-ban	Sávközép Hz F	Sáv szélesség Hz SAV	Primer ell. ohm R ₁	Szek. ell. ohm R ₂	Erősítés A
Beírt érték	3,500	300	5	10 ⁶	1

Kiszámított paraméterek

Jelölése	R _V	R _E	R ₁	R ₄	C ₂	C ₃	R	C
Kinyomtatott értékek	3,5 k	2,45 k	1,75 k	1,3 k	51,99 n	17,33 n	1,5 k	30,02 n

Ellenállás egysége 3,5 kohm, R₀ = 500 ohm.

Kinyomtatásra került még: érzékenységi mátrix, gerjedési biztonsági tényező.

Beépített paraméterek

2. táblázat

Jelölése	R _V	R _E	R ₁	R ₄	C ₂	C ₃	R	C
Beépített érték	3,6 k	2,5 k	1,8 k	1,2 k	47,0 n	15,0 n	1,5 k	30,0 n

Integrált áramkör: μA 747, telepfeszültség: ± 12 V.

Bemenő feszültség effektív értéke: 1 V.

A sávközép mért frekvenciája: 3,400 Hz.

A 3 dB-es pontok frekvenciája: 3,23 KHz, illetve 3,53 kHz.

Jósaági tényező: 11,6, maximális erősítés 3,4 kHz-en: 0,95. Az R₀ 500 ohmos potenciométer, amelyen beállítottuk a számított R₀₁-et.

a kimért karakterisztikát láthatjuk. A beépített paraméterek értékét valamint a mérési értékeket a 2. táblázat tartalmazza.

A mérések alapján összefoglalhatjuk a FEN áramkörös szűrők előnyeit:

kis csmérzékenységű, stabil, nem gerjedékeny szűrők építhetők a FEN áramkörök segítségével,

ugyanazon FEN áramkör alul-, felüláteresztő vagy sávszűrő RC négyfólussal kombinálva különböző jellegű aktív szűrőket ad. Ezek az áramkörök jól felhasználhatók aktív hangszínszabályozóként, amplitúdó-korrektorként,

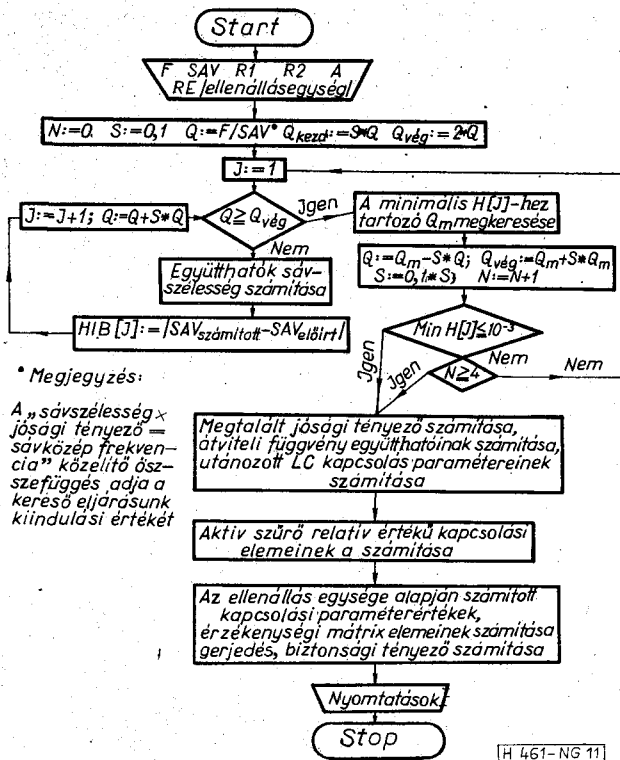
a FEN áramkörös szűrők tervezése egyszerű, könnyű számítógép-programot készíteni, amelynek futása kis gépen is maximum pár perc,

a megtervezett aktív szűrő megépítése nem kíván különös gondosságot. A kettős T tag elemeit 1%-os, a többi kapcsolási elemet a kereskedelemben kapható 2-3%-os ellenállásokból és kondenzátorokból építettük meg. A felhasznált integrált áramkörrel szemben nem kell különleges követelményeket támasztani.

Az ALGOL program

A programunkat QDRA 1024 számítógépen futtattuk. A program folyamatábráját a 11. ábrán látjuk.

A program két részből áll. Az első rész iterációs eljárás, amely a beolvasott adatok alapján kiszámítja az aktív szűrő átviteli függvényének az együtthatóit.



11. ábra

Megépített áramkörünknel:

$$u_2/u_1 = K \frac{0,0843s}{s^2 + 0,0843s + 1}$$

Ezután a számítógép kinyomtatja a 8. ábrán látható LC áramkör kapcsolási paramétereit, amelynek karakterisztikáját szimulálni akarjuk a FEN áramkörös aktív szűrővel. Megépített aktív szűrők esetében:

$$L = 2,69 \text{ mH}, \quad C = 0,76 \text{ } \mu\text{F},$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \approx 5 \Omega.$$

A program második része az aktív szűrő kapcsolási paramétereit számítja ki.

Az 1. táblázatban feltüntetett bemenő adatok esetén az aktív szűrő kapcsolási paramétereinek relatív értékei: $R_V = 1$ (ellenállásegység), $R_E = 0,7$, $R_1 = 0,5$, $C_2 = 4$, $C_3 = 1,333$, $R_4 = 0,375$, $R = 0,433$, $C = 2,309$, $Q = 11,86$, $A_1 A_2 = 46,44$, $K_k = 0,021$, $K_r = 4$, $A_0 = 1$ (maximális eredő feszültség erősítés).

Mivel a passzív RC négyfólus szekunder oldali terhelése jó közelítéssel R_E , ezért az R_E értéke megadja az RC passzív négyfólus csillapítását az f_0 frekvencián, $A_{0RC} = K_r q R_E$. Példánkban $A_{0RC} = 0,7$, $A_{0FEN} = 1/0,7 = 1,41$. Mivel $A_1 = A_{0FEN}$, ezért $A_2 = 32,93$. Az $A_2 = R_0/R_{01}$ összefüggés alapján beállítható a fenti A_2 érték: $R_0 = 0,14$, $R_{01} = 0,0043$.

Az ellenállás egységét 3,5 kohmra választva kapjuk a számítógép által kinyomtatott eredményeket (1. táblázat).

Programunk általában az LC kapcsolást utánozó legkisebb érzékenységű aktív szűrőt szintetizálja, ilyenkor a bemenő adatok között szereplő „erősítés a sávközépen” egységnyi.

Programunk alapján a számítógép az érzékenységi mátrixot is kiszámítja, és a gyökhelygörbe alapján közli a gerjedési biztonságot is (5. ábra).

Természetesen szintetizálhatunk olyan FEN áramkörös aktív szűrőt is, amelynek erősítése a sávközépen nem egységnyi. Ezen megépített második változatnál $A_0 = 2,8$, $A_1 = 8,33$, $A_2 = 5,57$, $A_{0RC} = 0,34$. A sávközép 3,3 kHz, $Q = 11,86$. Ebben az esetben $R_V = 30,0$ kohm, $R_E = 3,6$ kohm és $R_0 = 1$ kohm.

Az érzékenységi viszonyok kifokú, nem számottevő romlása mellett ez az aktív szűrőnk is stabil, nem gerjedékeny.

I R O D A L O M

[1] Moschytz G. S.: FEN Filter Design Using Tantalum and Silicon Integrated Circuits. Proc. IEEE, Apr. 1970
 [2] Nemesszeghy Gy.: LC négyfólusok szimulálása aktív áramkörökkel. Híradástechnika, 1975. augusztus, XXVI. évf. 8.
 [3] Andrejev—Kobak: Szelektív erősítők kettős T szűrőkkel. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
 [4] Kovács O.: Beállítási módszerek bikvadratikus aktív RC alaptagok sorozatgyártásnál. Híradástechnika, 1976. október, XXVII. évi. 10.