

	96 MHz-es kapacitív csatolású sávszűrő optimalizálása spirális induktivitásokkal
POLLAK School of Electronics	<i>Optimizing a Band Pass Filter for 96 MHz Using Rectangular Inductors</i>

Nagy Gyula

HA8ET@pollak.sulinet.hu



Az alábbiakban röviden bemutatjuk az [ANSOFT SERENADE 8.0](#)-ás verzió számú programcsomagjának alkalmazását, egy felső kapacitív csatolású sávszűrő optimalizálásánál. A könnyebb érthetőség érdekében először hagyományos módon, az [ACCEL TECHNOLOGY TANGO SCH](#) programjával rajzoltuk meg a kapcsolási rajzot. Ezután ugyanezt a szűrőt megrajzoltuk a SERENADE programban is. A program a nagyfrekvenciás gyakorlatnak megfelelően, úgy veszi figyelembe az alkatrészeket összekötő legrövidebb vezetősávokat is, mint egy-egy tápvonal szakaszt.

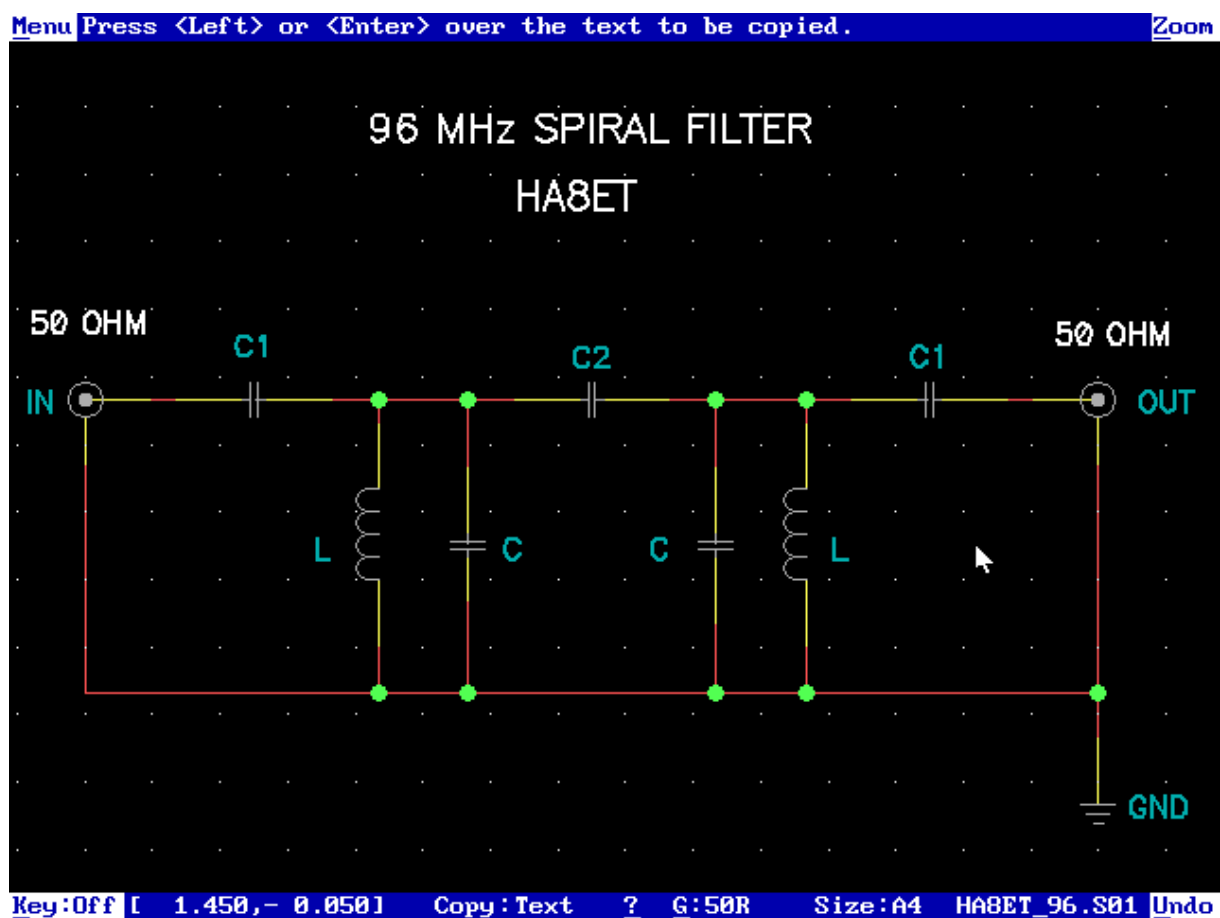
A szűrő valamennyi kondenzátora SMD kondenzátor. A két induktivitást microstrip technikával, úgynevezett „*rectangular spiral*” elemekből alakítottuk ki, hagyományos **FR-4** típusú üvegszálas panelon. Részletesen kitérünk ezeknek a viszonylag nehezen kezelhető, spirális induktivitásoknak az bemutatására. A szűrő ki- és bemeneteire egyaránt 50 Ω -os tápvonalakkal csatlakozunk. A csatlakozásoknál, a viszonylag alacsony frekvencia ellenére is alkalmaztuk, az úgynevezett **MS STEP** elemet azért, hogy bemutathassuk ennek hatását is.

Kiindulási értékeként a 96 MHz-es rezonancia frekvenciának megfelelően, $N=3$ menetes induktivitásokat vettünk alapul, $S=30$ MIL menetek közötti térközzel (1 MIL= 0,025 mm). Az összes többi értéket a szimulátorral számoltattuk ki, a kitűzött céloknak megfelelően. Az analízis során bemutatjuk a legjellemzőbb párbeszédés ablakokat, és azok javasolt kitöltési módját. Az optimalizált elemekről áttérünk a szabványos értékű kondenzátorokra (E-24-es sor), és megvizsgáljuk ennek hatásait a szűrő legfontosabb jellemzőire. Azután e kondenzátorokhoz

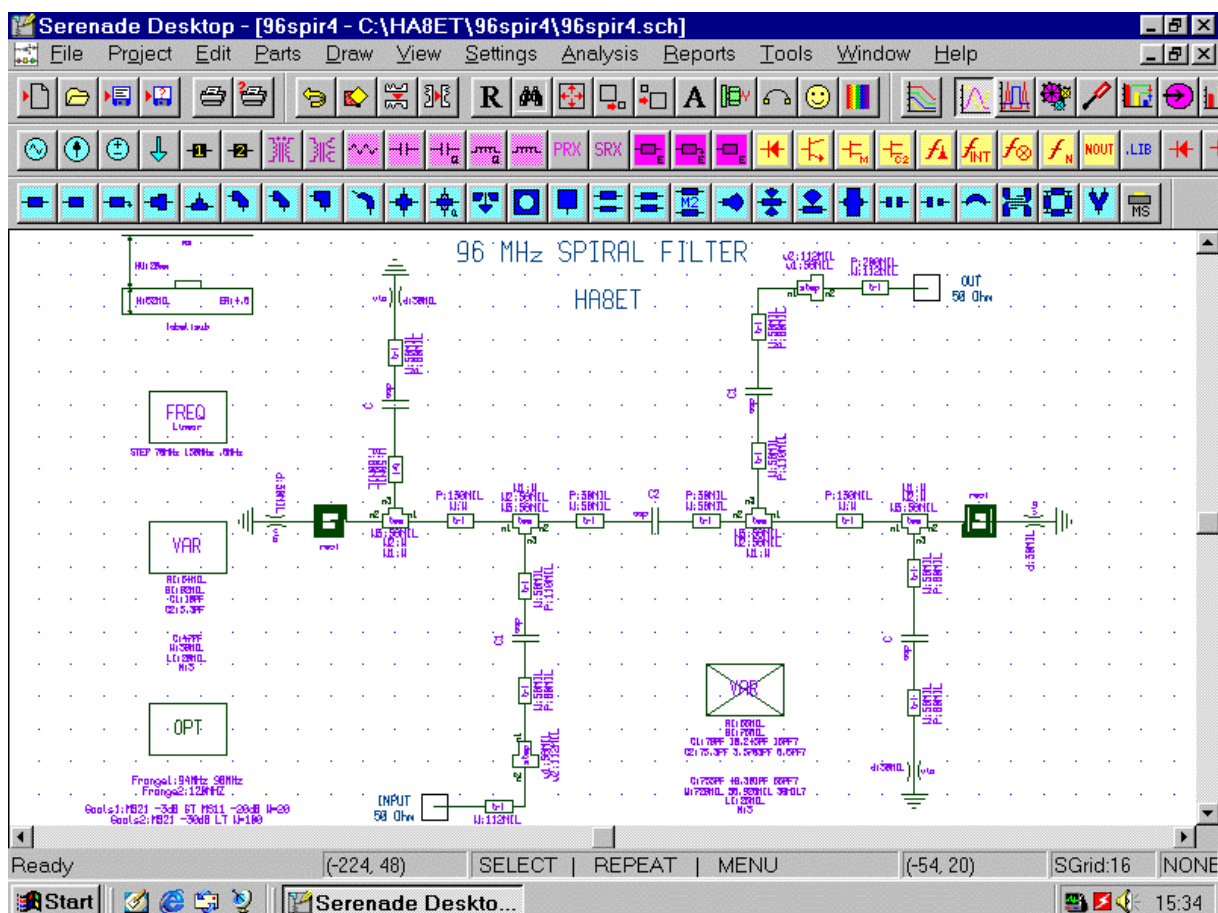
optimalizáljuk a nyomtatott induktivitásokat. A kész áramkör nyomtatási képét megtekinthetjük a szimulátor S2A LAYOUT tervezőjében.

A program egy további nagyon hasznos alkalmazási területe az utolsó példán látható. Megváltottuk az induktivitások meneti közötti "S" távolságát, és ismételt analízis után, egy pillanat múlva már láthatóvá válnak a változások a szűrő vizsgált jellemzőiben.

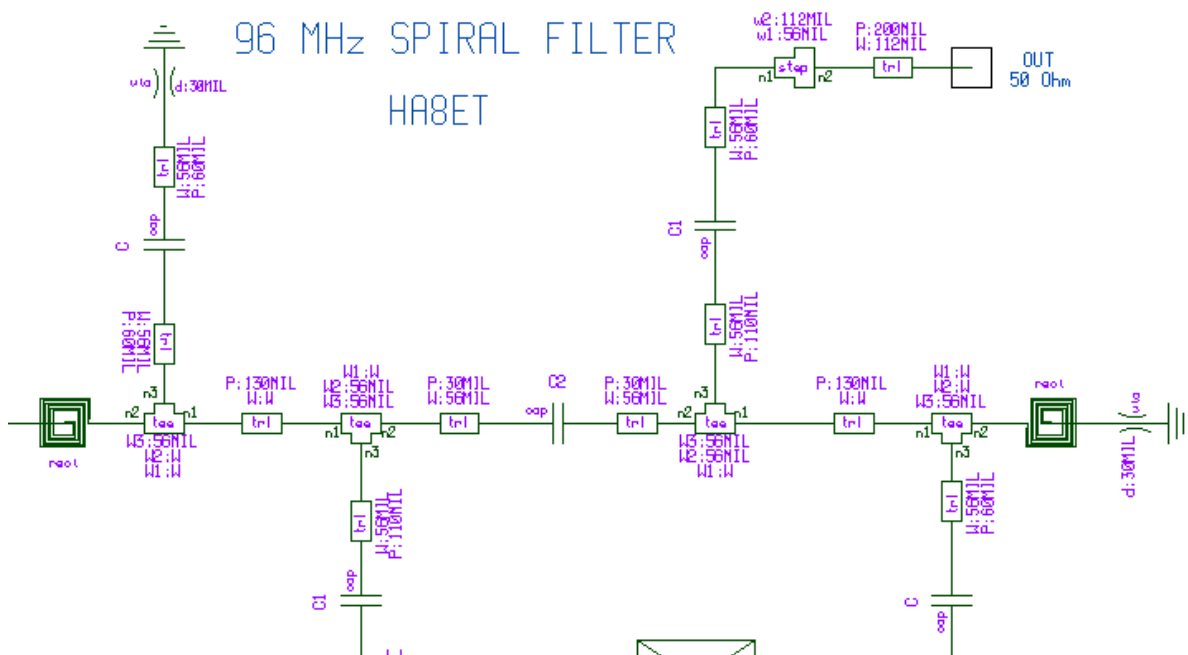
Ez az oktatási anyag a szerző hozzájárulása nélkül, csak „*non profit jelleggel*”, oktatási vagy rádióamatőr célra használható fel. A behatóbb tanulmányozás érdekében mellékeljük a NET-listát és a pontos anyagjegyzéket is. A teljes project ingyenesen letölthető a [Pollák Antal Műszaki Szakközépiskola](#) WEB-lapjáról a **SERENADE DESIGN ENVIRONMENT** legális (regisztrált) felhasználói számára.



A szűrő kapcsolási rajza az [ACCEL TECHNOLOGY TANGO SCH](#) programjában megrajzolva.



A spirális induktivitásokból kialakított szűrő SCH rajzának ernyőképe **SERENADE 8.0**-ás programban megrajzolva



A kapcsolási rajz egy részlete kinagyítva. Jól megfigyelhetők a nagyfrekvenciás technikában használatos microstrip vonalszakaszok (**TRL**), elágazások (**TEE**), átmenetek (**MS STEP**), földelések (**VIA**), spirális induktivitások (**RECI**), és azok méreteinek megadási módjai.

Valamennyi kondenzátor $Q=300$ -as jósági tényezőjű, $F=100$ MHz-en.

Spiral Inductor (Rectangular)

	Property	Value
1	li	LI
2	ai	AI
3	bi	BI
4	n	N
5	w	W
6	s	30MIL
7	t	
8	rb	
9	ground	YES
10	label	SUB
11		

Attributes:

Size:

Visible:

Orientation:

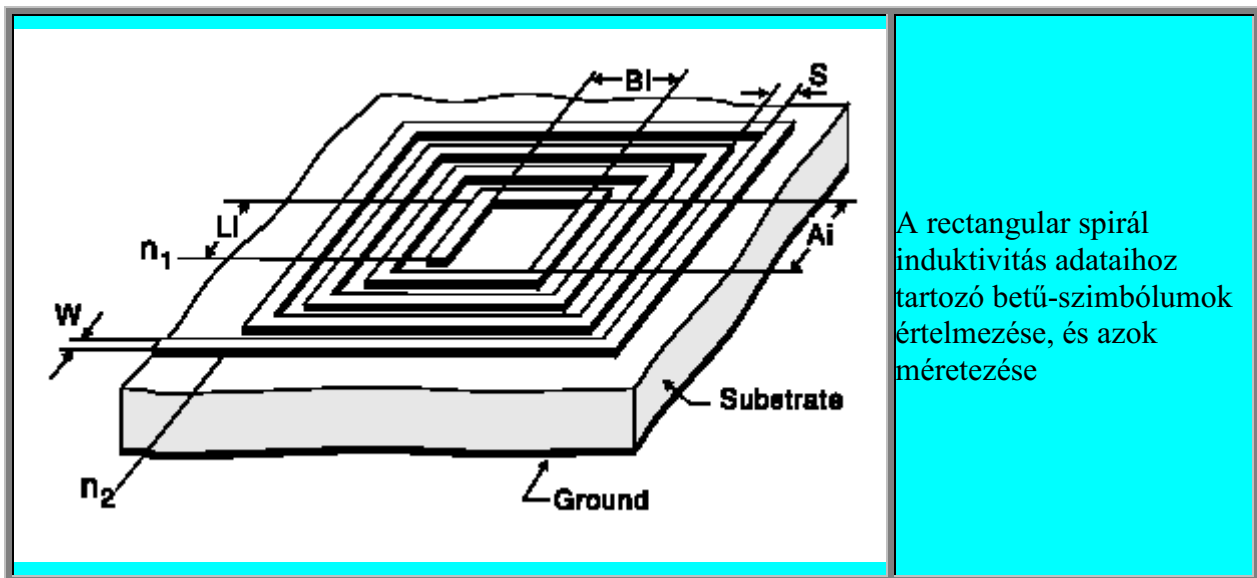
Justification:

Horizontal:

Vertical:

☐ Required

A négyszögletes spirál induktivitás párbeszédés ablaka. Egyetlen párbeszédés ablakban sem szabad az adatok beírásakor, a számérték és a mértékegység között szóközt hagyni! Az *AI*, *BI*, *LI*, *N* és *W* változóként szerepelnek, ezért nincs konkrét érték hozzájuk rendelve. Optimális értékeiket a későbbiekben a VAR blokkban megadott értékhatárok között, az OPT (Linear Optimization) blokk segítségével kell meghatároznunk.



Variable Block

	Property	Value
1	AI	56MIL
2	BI	76MIL
3	C	?33PF 48.301PF 56PF?
4	C1	?8PF 10.243PF 15PF?
5	C2	?3.3PF 3.3703PF 5.6PF?
6	LI	25MIL
7	N	3
8	W	?28MIL 35.925MIL 38MIL?
9		

Attributes:

Size: 50

Visible: All

Orientation: Normal

Justification:

Horizontal: Center

Vertical: Base

Required

OK Cancel Delete Move Info

A változó paraméterek párbeszédos ablaka. Itt találhatók az előző ábrán bemutatott spirális induktivitás egyes adatai is. A kérdőjelek közé tett határok között keresi meg a program az optimalizálás során, a megadott feltételeknek leginkább megfelelőbb kapacitás értéket, valamint az induktivitás vezetőjének szélességét. A középső számértékek már az optimalizálás eredményét mutatják.

Linear Frequency

	Property	Value
1	Freq	STEP 70MHz 130MHz .3MHz
2	gd	off
3	pert	*opt*
4	option	S
5	Freq1	
6	Freq2	
7	Freq3	
8	Freq4	
9	Freq5	
10	Freq6	
11	Freq7	
12	Freq8	
13	Freq9	

Attributes:

Size: 50

Visible: Value

Orientation: Normal

Justification:

Horizontal: Center

Vertical: Center

Required

OK Cancel Delete Move Info

A lineáris frekvencia blokk párbeszédos ablaka. Utasításaira a program 70 MHz és 130 MHz között, 0,3 MHz-es lépésekben végzi el az analízist. Az analízis és az optimalizálás gyorsítása érdekében először célszerű a 0,3 MHz-es érték helyett 1 MHz-et, vagy még ennél is nagyobb értéket beírni. Ekkor azonban a megjelenő görbe kissé „szálkás” lesz a törtvonalas közelítés miatt. A végleges görbe értékelése és elmentése előtt célszerű egy, az ábrán látható, kisebb lépésközt alkalmazni. Ekkor a szimulátor már megfelelően finom rajzolatú görbét eredményez. A tizedes törtet az amerikai írásmódnak megfelelően mindenütt „tizedes ponttal” kell beírni. A tizedesvesszőt nem fogadja el a program (szintaktikai hibát jelez).

Linear Optimization

	Property	Value
1	Frange1	94MHz 98MHz
2	Frange2	120MHz
3	Frange3	
4	Goals1	MS21 -3dB GT MS11 -20dB W=20
5	Goals2	MS21 -30dB LT W=100
6	Goals3	
7		

Attributes:

Size: 60

Visible: All

Orientation: Normal

Justification:

Horizontal: Center

Vertical: Base

☐ Required

OK Cancel Delete Move Info

Az optimalizáló blokk párbeszédés ablakában tetszőleges szempontok szerint optimalizálhatjuk a vizsgált áramkört. Elsődleges követelmény, hogy az átviteli sáv felett minél meredekebben vágjon a szűrő. Erre utal a W=100 az S21 paraméter megadása után. Az INFO ablakra kattintva, részletes magyarázatot kapunk az **LT**, **GT** és az = jelek használatára. (PDF fájl)

Substrate Media (Microstrip)

	Property	Value
1	H	62MIL
2	ER	4.5
3	HU	20mm
4	Tanm	
5	RGH	
6	Msat	
7	label	sub
8	Met1	Cu 35um
9	Met2	
10	Met3	
11	Mrem	
12	TAND	0.015
13	Pc	

Attributes:

Size: 50

Visible: All

Orientation: Normal

Justification:

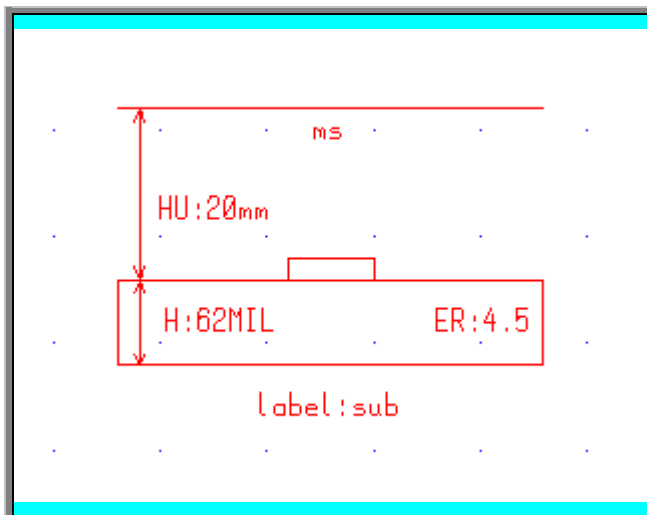
Horizontal: Left

Vertical: Center

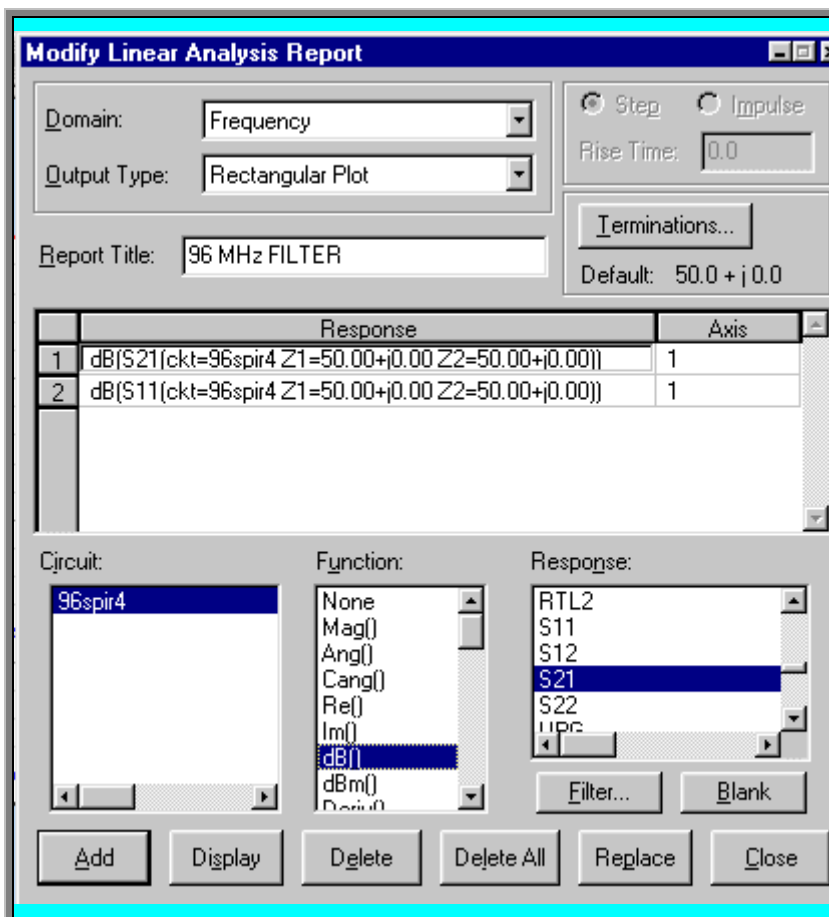
☐ Required

OK Cancel Delete Move Info

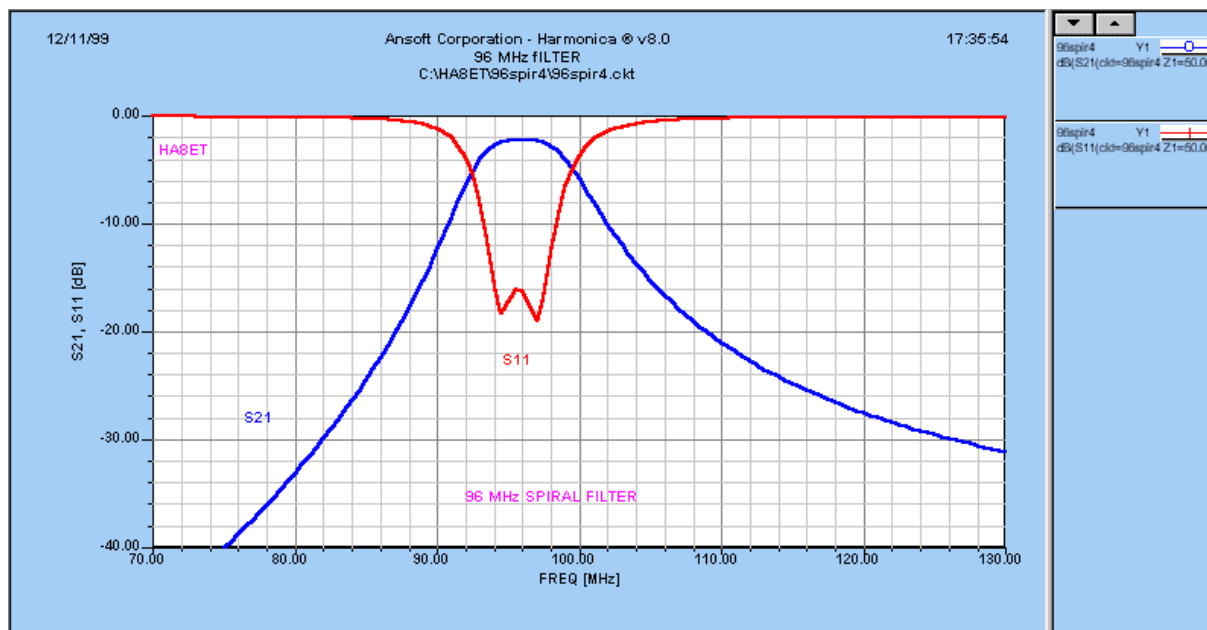
Ebben az ablakban adjuk meg a hordozónak választott FR-4 típusú üvegszálás PCB adatait. A mechanikai méretek: H=62 MIL (kb. 1,575 mm), a vezetősáv 35 μ m vastag vörösréz, a doboz teteje 20 mm-re van a vezető felett. A hordozó elektromos jellemzői f~100 MHz-en: Er=4,5, a dielektromos veszteség TAND=0,015. Magasabb frekvenciákon az Er csökken, a dielektromos veszteség pedig növekszik. Az adatok vegyesen is megadhatók, metrikus mértékegységben és MIL-ben egyaránt.



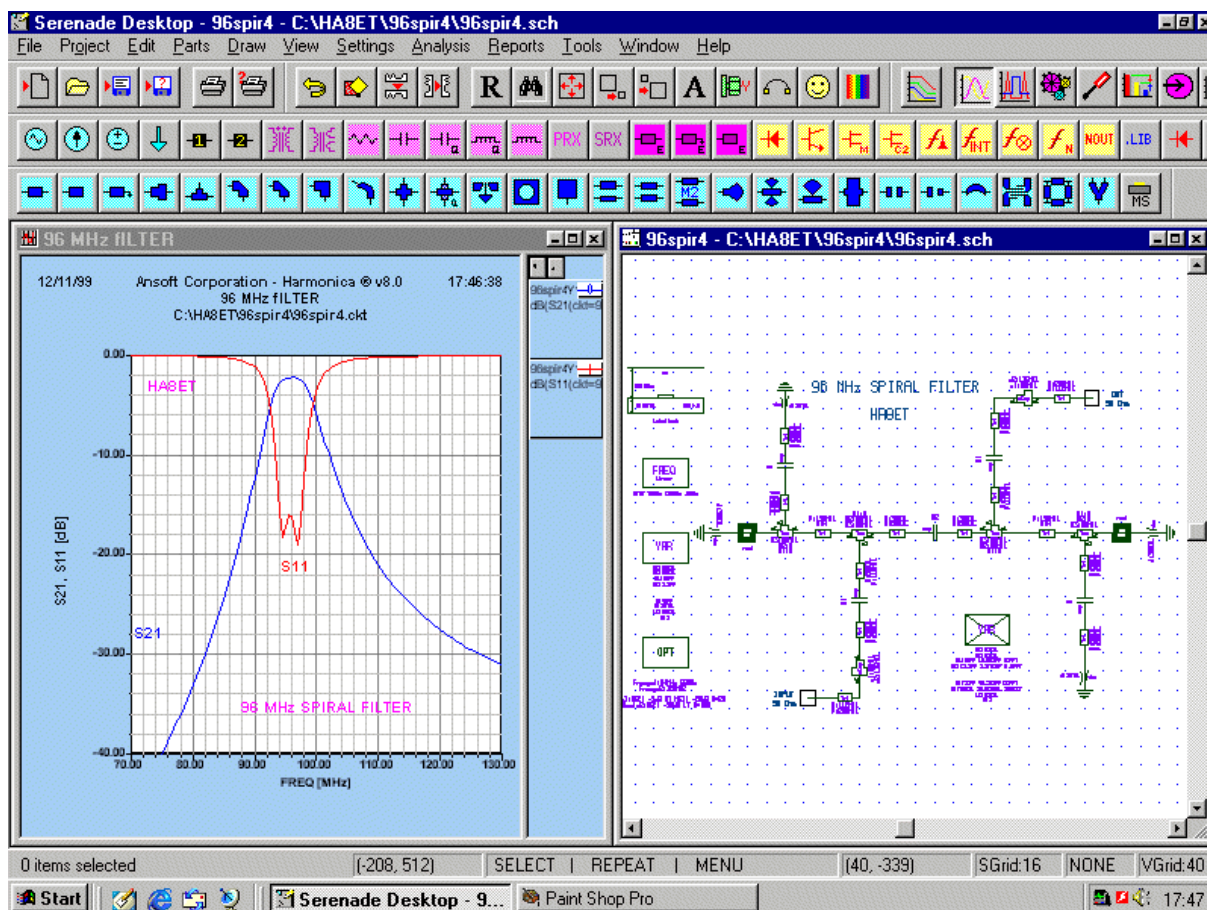
A substrate blokk képe a kapcsolási rajzon (A piros szín az aktív -szerkesztési- állapotra utal) A H nem a panel, csupán a dielektrikum vastagságát jelöli. A HU a dobozfedél távolsága a paneltől.



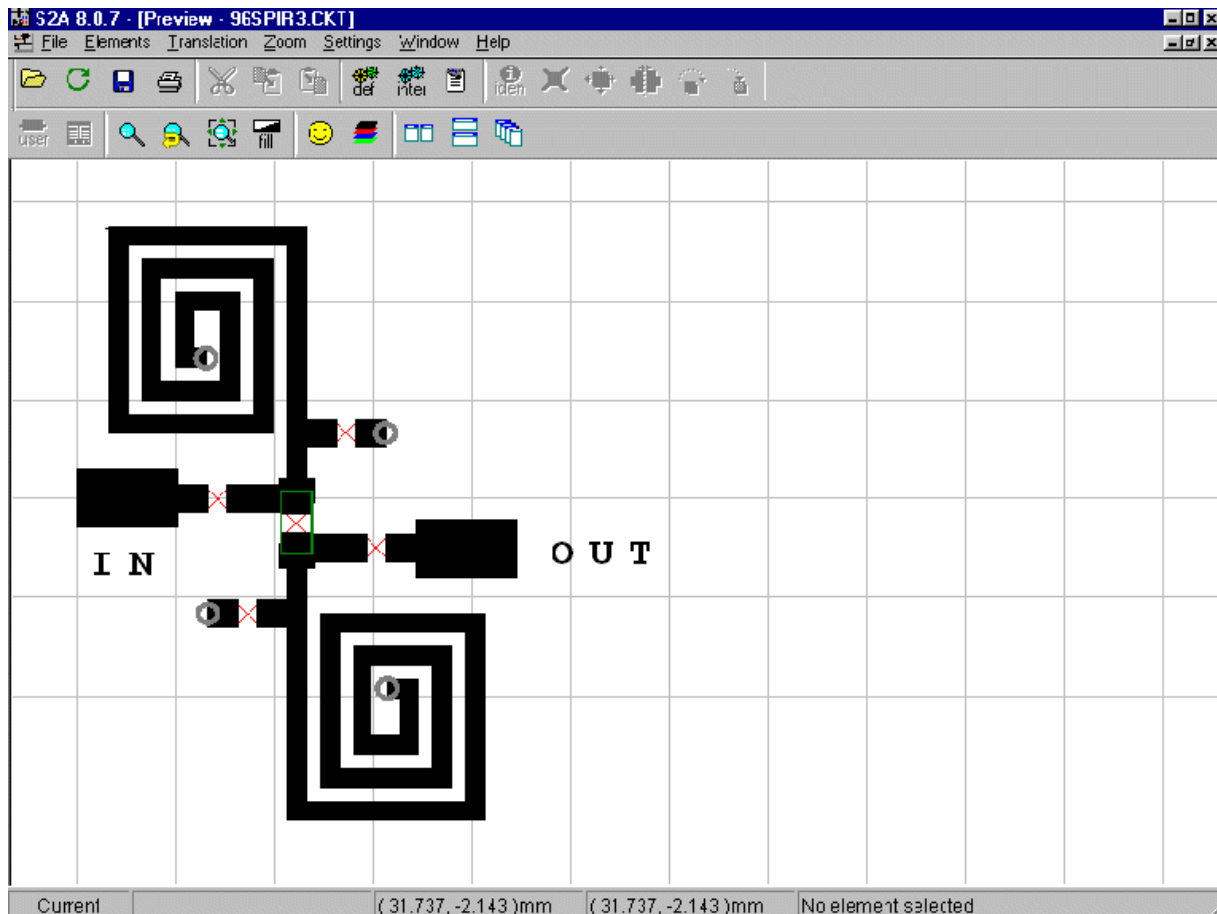
A vizsgált áramkör megjelenítendő jelleggörbéinek beállítását, illetve módosítását szolgáló párbeszédés ablak. Ebben a beállításban az S11 és S21 szórás paramétereket dB-ben ábrázoljuk, derékszögű koordináta rendszerben. Az OUTPUT TYPE ablakból azonban választhatjuk a poláris koordináta rendszert, vagy a táblázatos formát egyaránt.



Az optimalizált szűrő két legfontosabb jelleggörbéje: az S11 és az S21 szórás paraméterek a FREQ blokkban meghatározott frekvencia tartományban ábrázolva. A feliratok a jobb egérgomb megnyomása után megjelenő ablakból az ADD LABEL parancs kiválasztásával helyezhetők el. A program automatikusan skálázza a megjelentett diagram mindkét tengelyét. Ha az egérrel az X, vagy az Y tengelyre kattintunk, akkor a megjelenő párbeszédés ablak RESCALE parancsával mindkét tengelyt tetszőleges újra skálázhatjuk, vagy feliratokat helyezhetünk el a tengelyeken.



A kapcsolási rajz és a szimulátor közös ernyőképe. Az analízis után a TOOLS legördülő menüből elindítható az S2A LAYOUT, a Serenade nyákrajzolója.



A szűrő rajza az S2A LAYOUT programban. Innen DXF fájlban lehetőség van további feldolgozásra, vagy közvetlenül konvertálható a fájl a legtöbb ismert PCB rajzoló programba. A piros X-ek az SMD kondenzátorok helyét jelölik. A zöld téglalappal, egy 1206 méretű kondenzátort jelöltünk a rajzon. A raszter 5 x 5 mm-es. A kerek furatok pedig furatgalván VIA-k (födelések az alsó -bottom- oldalhoz). A fenti elrendezéssel sikerült minimálisra csökkenteni a két spirális induktivitás közötti csatolási tényezőt, amelynek értékét nem vettünk figyelembe az analízis során.

Variable Block

	Property	Value	
1	AI	56MIL	All
2	BI	76MIL	All
3	C	47PF	All
4	C1	10PF	All
5	C2	3.3PF	All
6	LI	25MIL	All
7	N	3	All
8	W	36MIL	All
9			

Attributes:

Size: 50

Visible: All

Orientation: Normal

Justification:

Horizontal: Center

Vertical: Base

OK Cancel Delete Move Info ☐ Required

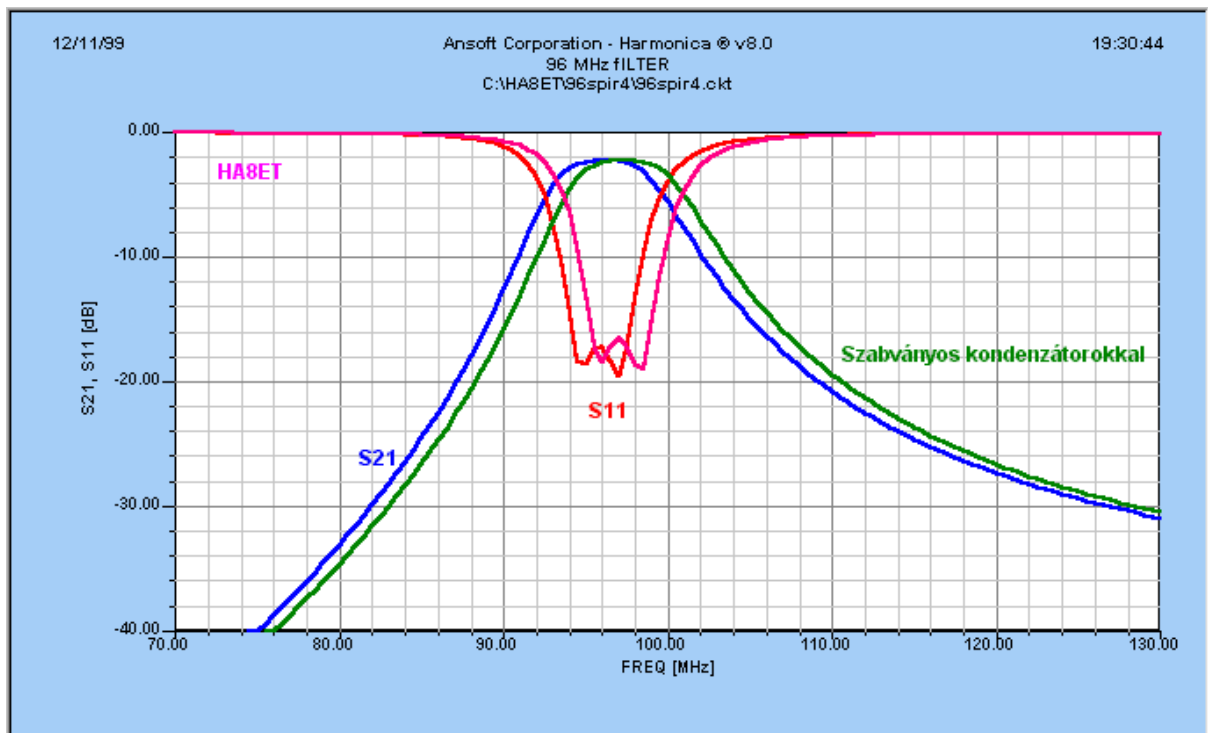
A régi VAR blokkot a DEACTIVATE paranccsal érvénytelenítjük (nem töröljük le) és az ábrán látható, új VAR blokkban az optimalizált kondenzátorokat, a hozzájuk legközelebbi értékű, szabványos kondenzátorokra cseréljük. Ezután ismét elvégezzük a szimulációt (F10). Optimalizálni ilyenkor nem lehet, mert nincs változó érték az új, aktuális VAR blokkban.



AI:56MIL
BI:76MIL
C1:78PF 10.243PF 15PF?
C2:73.3PF 3.3703PF 5.6PF?

C:733PF 48.301PF 56PF?
W:728MIL 35.925MIL 38MIL?
LI:25MIL
N:3

A deaktivált régi VAR blokk a kapcsolási rajzon. Az X-alakú áthúzás jelenti a deaktivizálást. A jobb egérgomb megnyomására előtűnő párbeszédészablak segítségével bármikor ismét aktivizálhatjuk ezt a beállítást is. Egy rajzra több VAR blokk is felhelyezhető különböző beállításokkal, de egyszerre csak egy lehet közülük aktív. Ez egy jelentős újdonság a SERENADE 8.0-ban a 7.5-ös verzióhoz képest.



Az ACCUMULATE parancs segítségével összehasonlíthatjuk a két esetet. Az optimalizált esethez képest (S21 kék görbe) a szabványos kondenzátor értékek kissé feljebb tolták a rezonancia frekvenciát (zöld görbe).

[top](#)

Variable Block

	Property	Value	
1	AI	?50MIL 56MIL 62MIL?	All
2	BI	?70MIL 80MIL 86MIL?	All
3	C	47PF	All
4	C1	10PF	All
5	C2	3.3PF	All
6	LI	20MIL	All
7	N	3	All
8	W	38MIL	All
9			

Attributes:

Size: 50

Visible: All

Orientation: Normal

Justification:

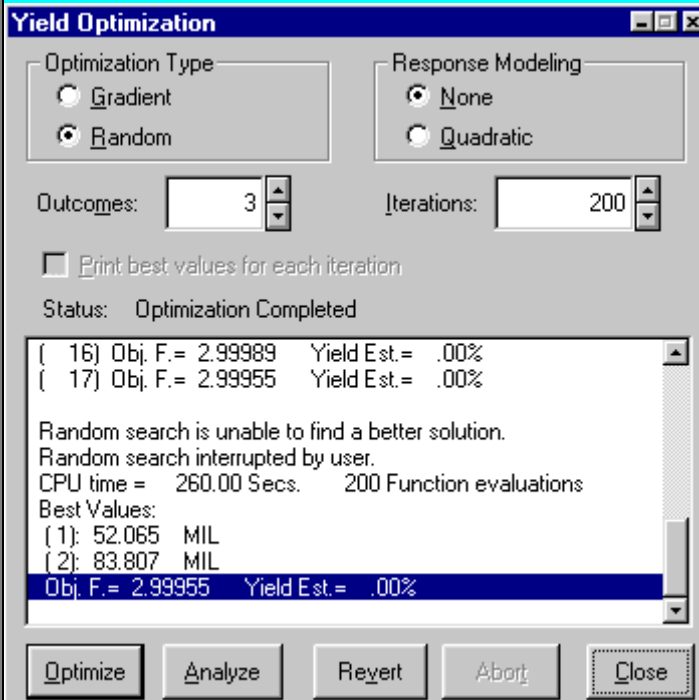
Horizontal: Center

Vertical: Base

☐ Required

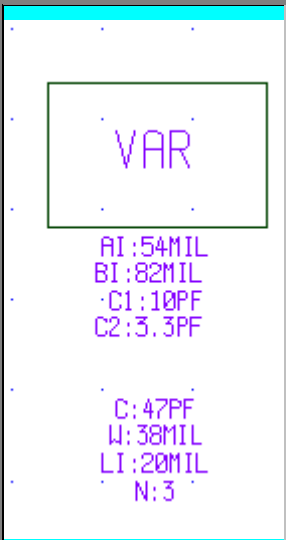
OK Cancel Delete Move Info

Ezután a spirális induktivitás adatait optimalizáljuk az új VAR blokk segítségével a szabványos kondenzátorokhoz. A RECI spirál induktivitás egyes geometriai méretei szorosan összefüggenek egymással, ezért csak nagy körültekintéssel szabad megváltoztatni őket. Az eredeti VAR blokk segítségével bármikor összehasonlíthatjuk a két eredményt.



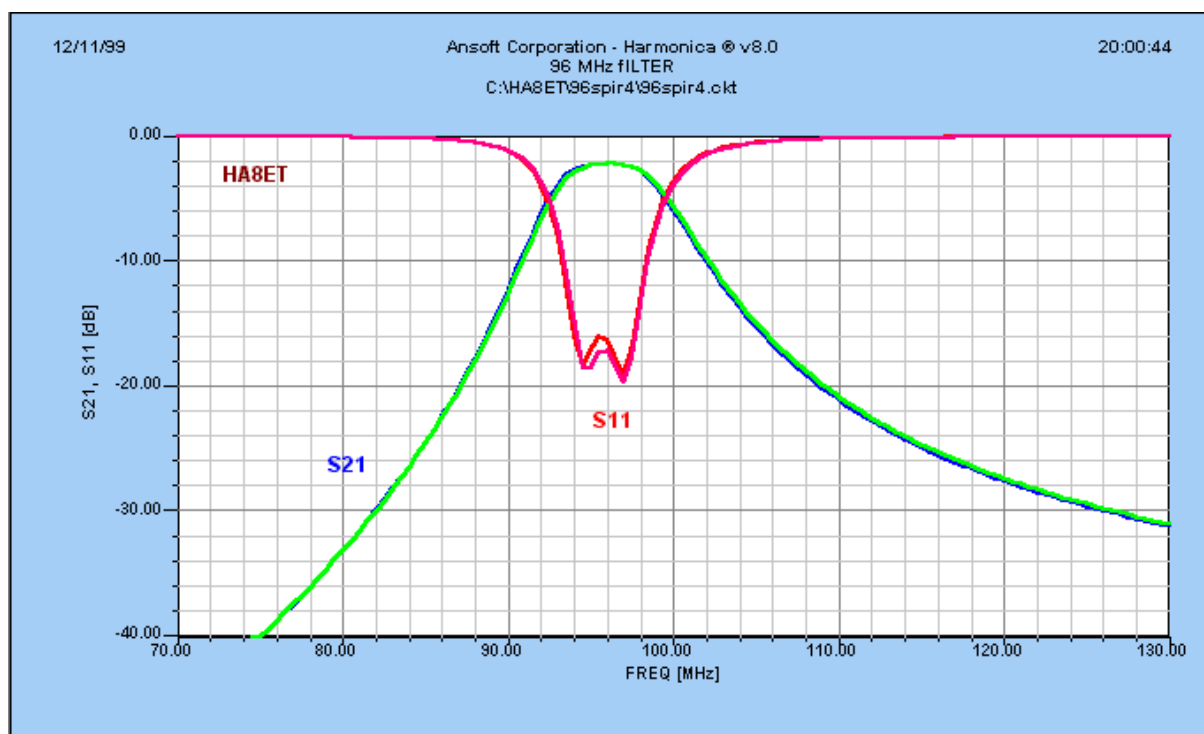
A gyorsabb optimalizálás érdekében a **FREQ** ablakban, a finom rajzolatú görbéhez választott 0,3 MHz-es **STEP** értéket megnöveltük 1 MHz-re, és a lineáris optimalizálás helyett a gyorsabb **YIELD OPT** ablakot választottuk a fenti beállításokkal. (**RANDOM**, **OUTCOMES=3**) Az egy ezred **MIL** pontosságú adatokat célszerű kerekíteni, mert a gyártás ennél úgyszólván sokkal pontatlanabb értékeket eredményez.

Ezután ellenőrizni kell az **S2A**-ban a rajzolatot, mert gyakran előfordul, hogy egyes fólia szakaszok túl közel kerülnek egymáshoz, vagy pedig a szimulátor segítségével kialakított elrendezés nem megfelelő, az adott áramkörhöz. Ilyenkor a lehetőség van a **BEND** (sarok) elemek tükrözésével új elrendezés kialakítására, vagy pedig a **W** (a vezető szélessége) és az **S** (a vezetők közötti térköz) kismértékű módosítására. Az analízist minden változtatás után ismételtelen el kell végezni, és szükség esetén valamelyik paramétert optimalizálni is kell.



A kapcsolási rajz új (aktív) **VAR** blokkjába már a kerekített értékeket írtuk be, az ellenőrző szimulációhoz. A vezetők szélességénél azért kerekítettünk mindenütt páros számra, mert a **TANGO PCB** legutolsó DOS alatt futó verziója csak páros számokat fogad el, illetve ettől eltérő érték esetében így módon kerekít. Ezen a frekvencián 1 MIL = 0,0254 mm-es eltérés még nem okoz észrevehető eltérést a szűrő jellemzőiben. Az FR-4 típusjelű hordozó pontatlanságai, és a gyártási szórások hatásainak kiküszöbölése érdekében az **OPT** ablakban eleve, a szükségesnél kissé nagyobb sáv- szélességet adtunk meg.

A 30 MIL-es **VIA**-k gyártási követelményei miatt az **LI** értékét 22-ről 20 MIL-re csökkentettük. Erre a **W** értékének növelése miatt volt szükség. A **W** értékét a magasabb **Q**-érték által biztosítható, nagyobb oldalmeredkségek miatt növeltük meg.



Az optimalizált értékek kerekítése után gyakorlatilag fedti egymást a kék és a zöld görbe, tehát a kitűzött célt sikerült megvalósítani.

A kész áramkör mérési eredményei 5 %-nál kisebb eltéréseket mutatnak a szimulációs értékekhez képest.



[top](#)

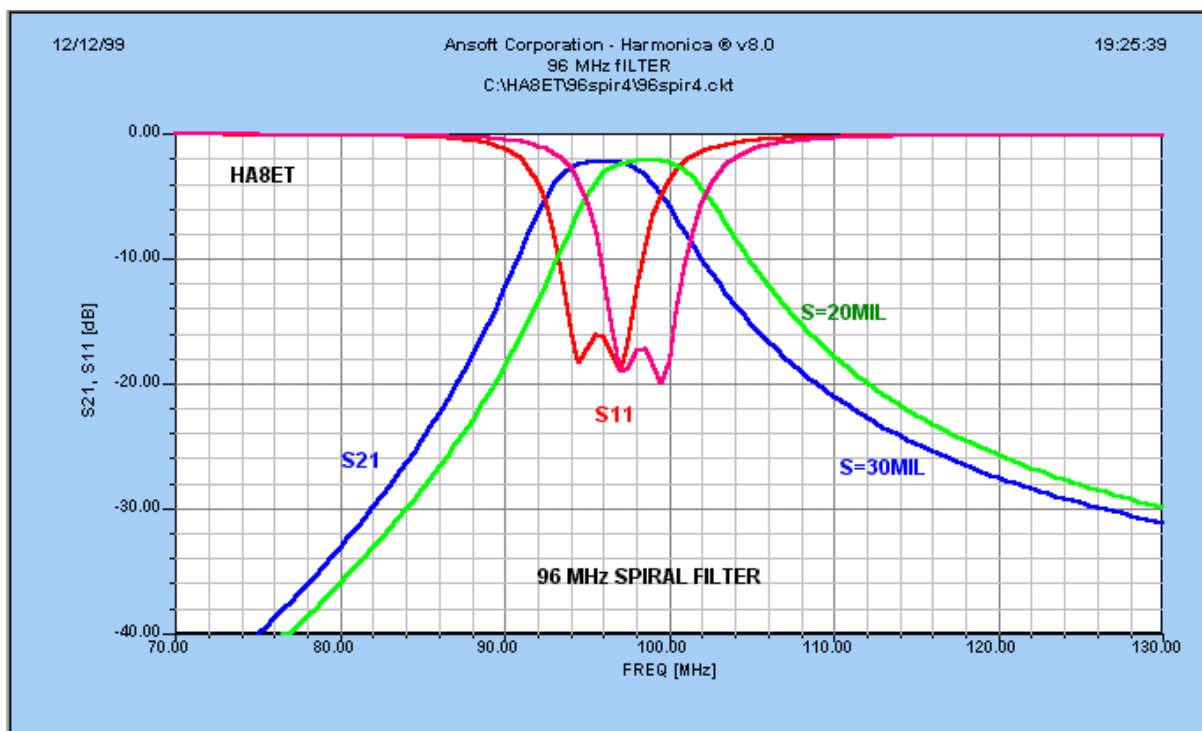
<i>A szűrő adatai:</i>	
Rezonancia frekvencia:	$F_0=96$ MHz
Beiktatási csillapítás:	$A_0=2,14$ dB
Sávszélesség (-3dB):	$B=92,5$ MHz...99,5 MHz
Sávszélesség (-20dB):	$B=85,1$ MHz...110,9 MHz
Visszalógás:	nem tapasztalható
NET-lista:	C:\HA8ET\96spir4\96spir4.ckt

Anyagjegyzék:

Szimbólum	Érték	Megjegyzés
C	47 pF	SMD 1206 Q=300 F=100 MHz-en
C1	10 pF	SMD 1206 Q=300 F=100 MHz-en
C2	3,3 pF	SMD 1206 Q=300 F=100 MHz-en
AI	54 MIL	„Rectangular spiral” induktivitás
BI	82 MIL	„
LI	20 MIL	„
W	38 MIL	„
S	30 MIL	„
N	3	„

PCB: kétoldalas **FR-4** (üvegszálás). A dielektrikum vastagsága 62 MIL, a vezetősáv: 35 μm Cu.

Egy további példa az optimalizálásra:



A szűrő jellemzőinek változása, ha a spirál induktivitás menetei között lévő S térközt 30 MIL-ről 20 MIL-re csökkentjük. A rezonancia frekvencia kb. 2,3 MHz-cel növekedett, a bemeneti reflexió pedig közelítőleg 2 dB-lel javult.

A SPIR96 szűrő NET-listája:

```
* Circuit file: C:\HA8ET\96spir4\96spir4.ckt
* anatype: linear
* This file is generated by Serenade Schematic Netlister, sch2mh
* -- Release 4.0.

*AI :56MIL ;mhvar#866
*BI :76MIL ;mhvar#866
*C :?33PF 48.301PF 56PF? ;mhvar#866
*C1 :?8PF 10.243PF 15PF? ;mhvar#866
*C2 :?3.3PF 3.3703PF 5.6PF? ;mhvar#866
*LI :25MIL ;mhvar#866
*N :3 ;mhvar#866
*W :?28MIL 35.925MIL 38MIL? ;mhvar#866
AI :54MIL ;mhvar#850
BI :82MIL ;mhvar#850
C :47PF ;mhvar#850
C1 :10PF ;mhvar#850
C2 :3.3PF ;mhvar#850
LI :20MIL ;mhvar#850
N :3 ;mhvar#850
W :38MIL ;mhvar#850
BLK
tee 812 813 808 w1 = W w2 = W w3 = 56MIL sub
* mhtee#865 layout 0
tee 824 823 828 w1 = W w2 = W w3 = 56MIL sub
* mhtee#864 layout 2
tee 829 830 821 w1 = W w2 = 56MIL w3 = 56MIL sub
* mhtee#863 layout 0
tee 807 815 801 w1 = W w2 = 56MIL w3 = 56MIL sub
* mhtee#862 layout 2
reci 814 813 li = LI ai = AI bi = BI n = N w = W s = 30MIL g SUB
* mhreci#861 layout 0
reci 822 823 li = LI ai = AI bi = BI n = N w = W s = 30MIL g SUB
* mhreci#860 layout 2
step 805 806 w1 = 56MIL w2 = 112MIL sub
* mhstep#859 layout 7
step 818 817 w1 = 56MIL w2 = 112MIL sub
* mhstep#858 layout 3
cap 804 802 c = C1 q2 = 300 f = 100MHZ
* mhcap3#857 layout 5
cap 811 810 c = C q2 = 300 f = 100MHZ
* mhcap3#856 layout 3
cap 819 820 c = C1 q2 = 300 f = 100MHZ
* mhcap3#855 layout 1
cap 825 826 c = C q2 = 300 f = 100MHZ
* mhcap3#854 layout 1
cap 800 799 c = C2 q2 = 300 f = 100MHZ
* mhcap3#853 layout 2
trl 801 802 w = 56MIL p = 110MIL sub
* mhtrl1#849 layout 1
trl 803 806 w = 112MIL p = 200MIL sub
* mhtrl1#848 layout 5
trl 805 804 w = 56MIL p = 60MIL sub
```

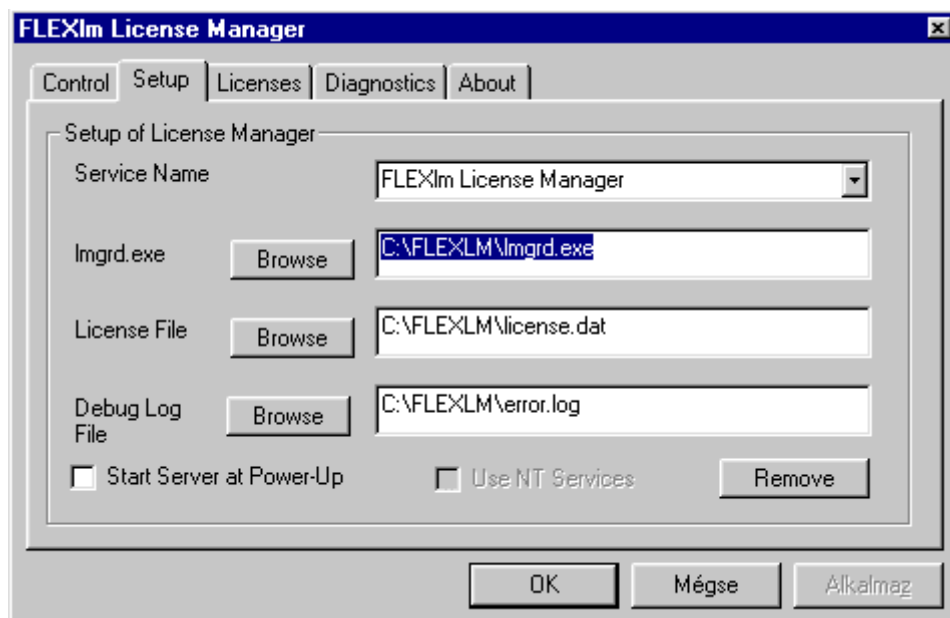
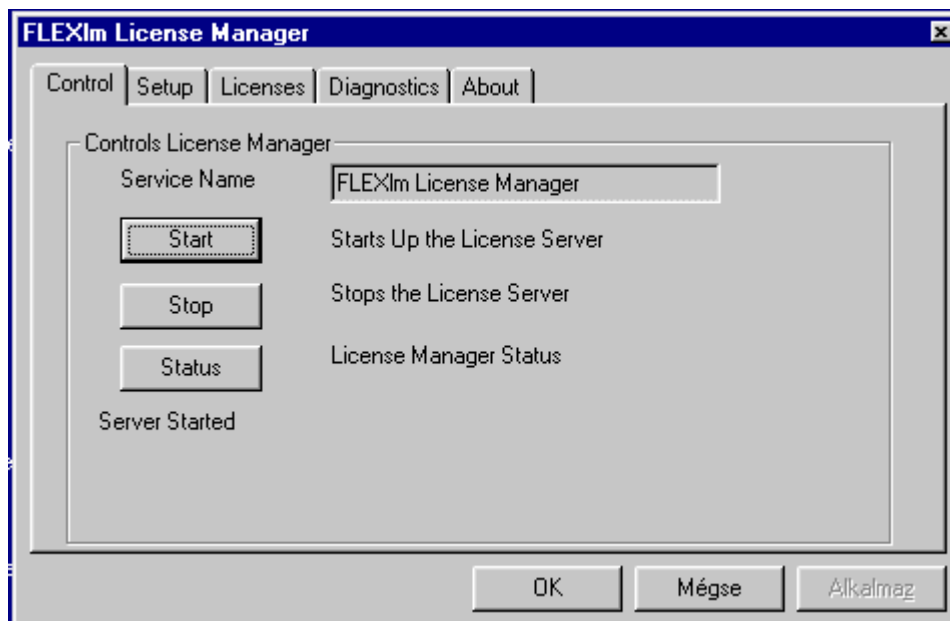
```

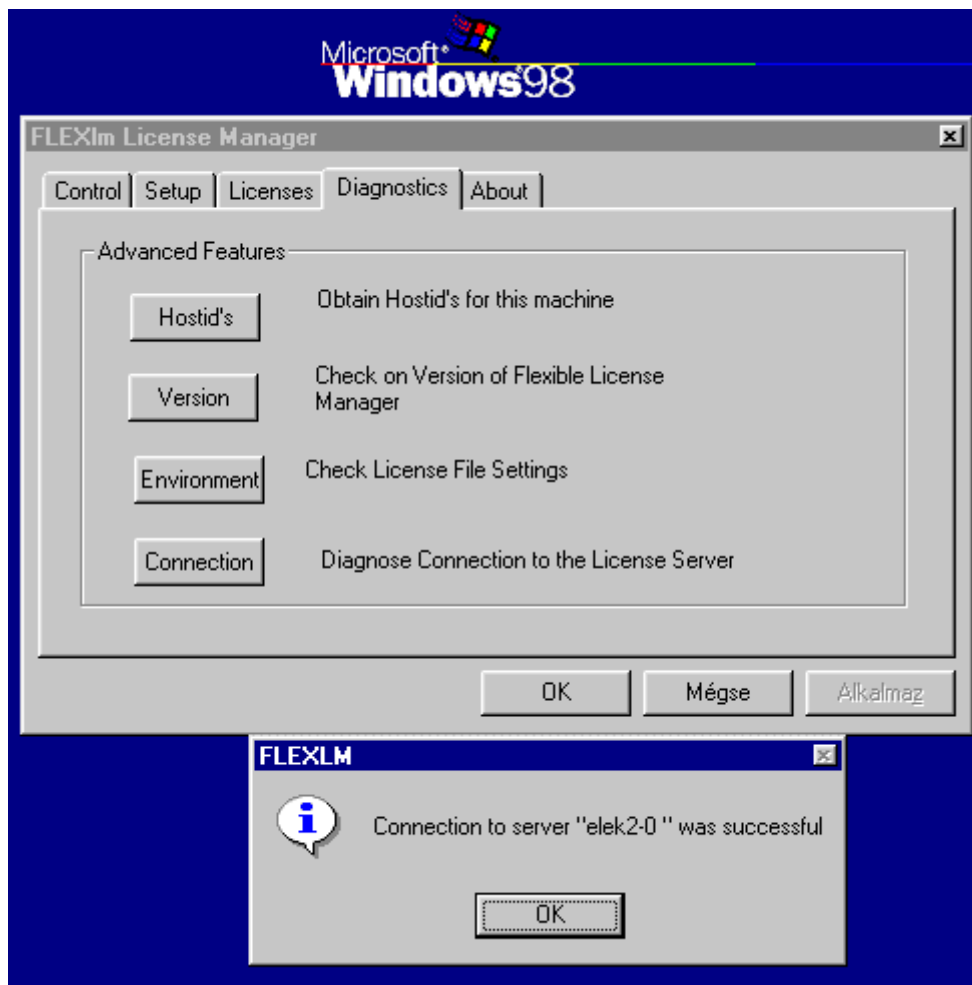
* mhtrl1#847 layout 5
trl 807 812 w = W p = 130MIL sub
* mhtrl1#846 layout 0
trl 809 810 w = 56MIL p = 60MIL sub
* mhtrl1#845 layout 1
trl 811 808 w = 56MIL p = 60MIL sub
* mhtrl1#844 layout 1
trl 816 817 w = 112MIL p = 200MIL sub
* mhtrl1#843 layout 1
trl 818 819 w = 56MIL p = 60MIL sub
* mhtrl1#842 layout 1
trl 820 821 w = 56MIL p = 110MIL sub
* mhtrl1#841 layout 1
trl 829 824 w = W p = 130MIL sub
* mhtrl1#840 layout 2
trl 827 826 w = 56MIL p = 60MIL sub
* mhtrl1#839 layout 3
trl 825 828 w = 56MIL p = 60MIL sub
* mhtrl1#838 layout 3
trl 799 830 w = 56MIL p = 30MIL sub
* mhtrl1#837 layout 2
trl 815 800 w = 56MIL p = 30MIL sub
* mhtrl1#836 layout 2
via 814 d = 30MIL sub
* mhvia#834 layout 1
via 822 d = 30MIL sub
* mhvia#833 layout 3
via 809 d = 30MIL sub
* mhvia#832 layout 0
via 827 d = 30MIL sub
* mhvia#831 layout 2
96spir4: 2POR 816 803
END
* Ports      1=816 2=803
FREQ
STEP 70MHz 130MHz .5MHz ;mhfreqln#851
END
NOUT
R1 = 50 R2 = 50
END
OPT
96spir4 R1 = 50 R2 = 50 ;mhoptgl#868
F 94MHz 98MHz MS21 -3dB GT MS11 -20dB W=20
F 120MHZ MS21 -30dB LT W=100
END
NOPT
R1 = 50 R2 = 50
END
DATA
sub:ms H = 62MIL HU = 20mm ER = 4.5 TAND = 0.015 Met1 = Cu 35um ;mhms#852
END

```

[top](#)

Appendix (FLEXlm License Manager):





A **FLEXlm** license manager program ablakai, a WIN-98-as szerver elindítása után. A SERENADE 8.0 programot a szerveren, mint munkaállomáson futtattuk.