



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

Osbáth Kristóf Máté

KEVERŐK VIZSGÁLATA MHZ TARTOMÁNYBAN

KONZULENS

Dr. Ladvánszky János

Cseh Tamás

BUDAPEST, 2015

Tartalomjegyzék

1 Kivonat.....	3
2 Abstract.....	4
3 A keverő áramkörök.....	5
4 A keverők működésének kvalitatív magyarázata.....	10
5 A félvezetők modelljei.....	20
6 A megépített áramkörök mérése.....	27
7 Mért és analizált értékek összehasonlítása.....	37
8 Összegzés.....	39
9 Köszönetnyilvánítás.....	40
10 Irodalomjegyzék.....	41

1 Kivonat

A keverő áramkörök nagyon fontosak, mert számos áramköri feladatra nélkülözhetetlenek. A dolgozat célja, hogy tizenkét különböző, 9 MHz középfrekvencián üzemelő keverő szimulációs- és mérési eredményeinek ismertetésével áttekintést nyújtson ezen áramkörökről. A dolgozat elkészítése során sor került a félvezető eszközök modellezésére, a modellparaméterek meghatározásához szükséges mérő áramkörök, valamint a szimulált áramkörök megépítésére is.

A dolgozatban ismertetem az összehasonlítás alapját képező különböző áramköri jellemzőket, melyek a konverziós veszteség, az LO-RF, valamint az LO-IF kapuk közti izolációk, illetve a harmadrendű intermodulációs torzítás. A munka során hat diódás, illetve hat tranzistoros áramkör vizsgálatát végeztem el, ehhez szükségem volt a félvezetők modellparamétereinek meghatározására, melyet a dolgozatban is ismertetek. A szimulációs eredmények bemutatása után a keverők mérési eredményei következnek.

A dolgozat fő célja egy mikrohullámú keverő tervezésének előkészítése, amelyet egy Radio over Fiber rendszerben fogunk használni, ezért fontos szempont, hogy az áramkör intermodulációs torzítása a lehető legkisebb legyen. Mikrohullámon különösen fontos a kis konverziós veszteség is. Az a koncepciónk, hogy előbb MHz tartományban megvizsgáljuk a keverők nagyjelű tulajdonságait, majd egy második lépésben a frekvenciafüggést. Így a nagyjelű és a frekvenciafüggő tulajdonságok vizsgálata valamennyire szét lesz választva.

Ezért a dolgozat három fő fejezetből áll: A tizenkét keverő mérési eredményeinek ismertetése, a mikrohullámú célra tervezett keverő kiválasztása és a kiválasztott keverő átalakítása mikrohullámon realizálható áramkörré. Ezeket a keverők kapcsolási rajzát és kvalitatív működését tartalmazó bevezető, valamint a mért és analizált eredmények összehasonlítását tartalmazó további fejezetek egészítik ki.

2 Abstract

Mixer circuits are indispensable in numerous circuit functions. The goal of this study is to give an overview of these circuits through the comparison of the simulation and measurement results of twelve different mixers that operate at 9 MHz intermediate frequency. During the work the semiconductors used, have been modelled, the breadboards for the semiconductor measurements and the simulated circuits have been assembled. The simulations have been made in AWR Microwave Office.

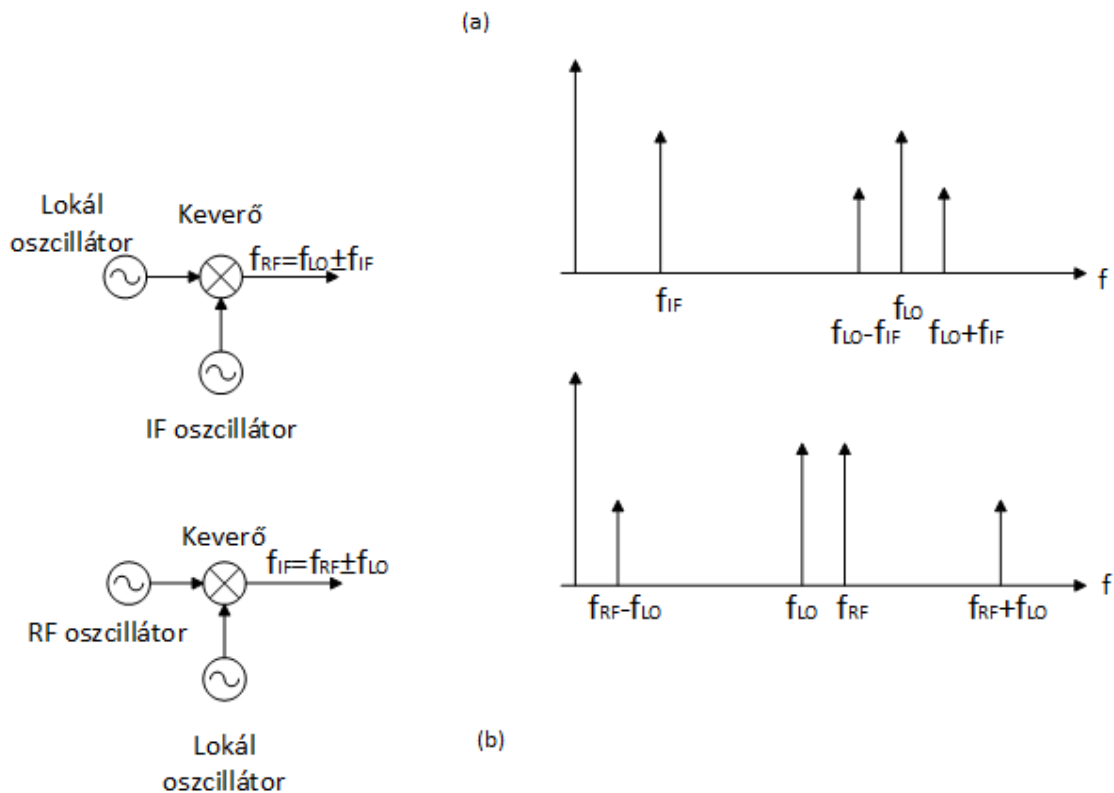
In this paper, mixer characteristics have been reviewed, that take part in the comparison. These characteristics are conversion loss, third order intermodulation distortion and isolations between the LO-RF and LO-IF ports. In my work six diode and six transistor mixers have been investigated, therefore it was necessary to measure the model parameters of the semiconductors used. After showing the simulation results I also present the measurement results.

This work is a preparatory work to design a microwave mixer that will be used in a Radio over Fiber system. This is the reason why it is important to achieve a low intermodulation distortion. At microwave frequencies conversion loss is also particularly important. Concept according to the Hungarian version.

Thus, this paper consists of three main chapters: the review of the measurement results of the twelve mixers, the selection of the mixer to be designed at microwave frequencies and the transformation of the selected mixer into one that can be realised at microwave frequencies. The main chapters are extended by further sessions that contain the schematics of the mixers, the qualitative theory of operation and the comparison of the analysis and measurement results.

3 A keverő áramkörök

A keverő egy kétbemenetű, egykimenetű áramkör, amely a frekvenciakonverzió megvalósításához egy nemlineáris, vagy lineáris idővariáns eszközt használ. A keverő bemenetei a lokál oszcillátor (LO)-, ill. a rádiófrekvenciás (RF) kapuk, a kimenete a középfrekvenciás (IF) kapu. Ideális esetben a keverő kimenetén a bemeneti jelek frekvenciáinak (ω_{LO} , ω_{RF}) összegénél, ill. különbségénél jelennek meg komponensek, a valóságban azonban a frekvenciakonverzió során elkerülhetetlen a kimeneti jel torzulása, azaz nem kívánt frekvenciájú összetevők megjelenése. Az ideális keverő működését az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. Az ideális keverő karakterisztikája Az ábra a Mikrohullámú keverő tervezése Radio over Fiber vevőhöz című szakdolgozatomból származik

Legyen a keverő bemeneti jele u_i , kimeneti jele u_o . Az LO-t a keverő részének tekintjük. A kimeneti jel felírható a bemeneti jel Taylor-sorba fejtett alakjával:

$$u_o = a_0 + a_1 u_i + a_2 u_i^2 + a_3 u_i^3 + \dots \quad (1)$$

ahol:

$$a_0 = u_o(0) \quad (2)$$

$$a_1 = \frac{du_o}{du_i} \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{d^2 u_o}{du_i^2} \quad (4)$$

$u_i=0$ az alsó két összefüggésben. A magasabbrendű Taylor-együtthatók a fentieknek megfelelően írhatók fel.

Ha a keverő bemenetén csak egy bemeneti frekvencia van, akkor ezen frekvencia többszöröseinél is jelennek meg komponensek a kimeneten. Ekkor harmonikus torzításról beszélünk. Ha a bemeneti jel frekvenciája ω_0 , akkor a kimeneten a harmonikus torzítás következtében megjelenő komponensek frekvenciái felírhatók az $n\omega_0$ alakban, ahol $n=0,1,2,\dots$. Ha ezek a komponensek a vizsgált áramkör sávszélességén kívül esnek, akkor nem okoznak problémát a keverő működésében.

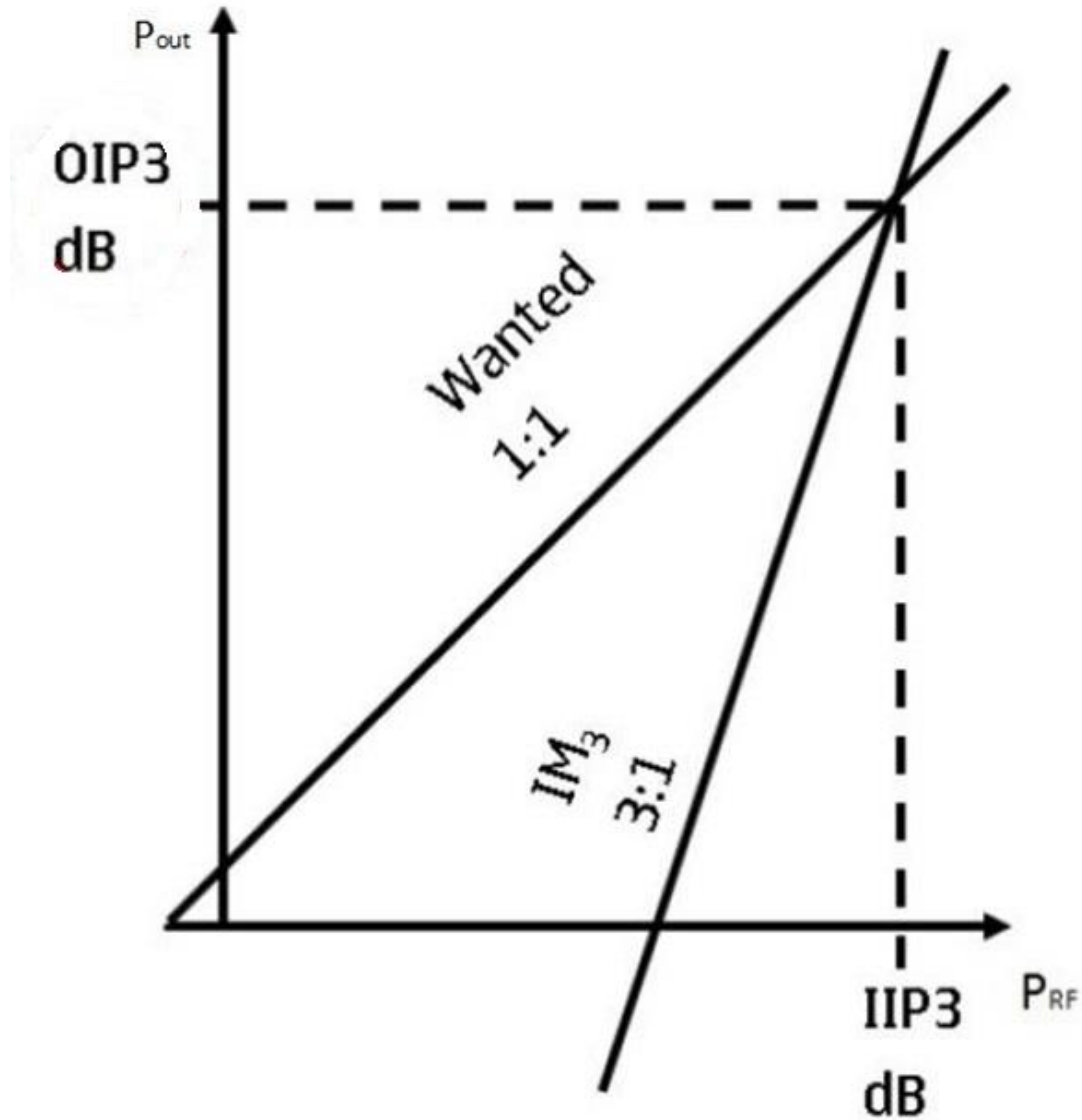
Ha a keverő bemenetén két, egymáshoz közel eső frekvenciájú jel van, más problémával szembesülünk. Legyen a bemeneti jel $u_i = U_i (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)$. Ha ezt behelyettesítjük a Taylor-sorral kifejezett képletbe, akkor a következő eredményt kapjuk a kimeneti jelre:

$$u_o = a_0 + a_1 U_0 (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) + a_2 2U_0^2 (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)^2 + a_3 U_0^3 (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)^3 + \dots \quad (5)$$

ahol $\omega_1 = \omega_{RF1} + \omega_{LO}$, $\omega_2 = \omega_{RF2} + \omega_{LO}$. A fenti összefüggést trigonometrikus azonosságokkal átírva azt kapnánk, hogy a kimeneti spektrum harmonikusai az $m\omega_1 + n\omega_2$ alakban írhatók fel, ahol $m, n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$, stb. A bemeneti frekvenciák és az LO ezen kombinációit intermodulációs termékeknek nevezzük. Azt hogy hányadrendű a termék az $|m|+|n|$ összefüggés adja meg.

A gyakorlatban a legnagyobb jelentősége a harmadrendű intermodulációs torzításnak van, mert ha a két RF jel frekvenciája csak kis mértékben tér el egymástól, akkor a kimeneten megjelenő nemkívánt komponensek beleeshetnek a keverő sávszélességébe. A harmadrendű

intermodulációs keresztezési pont (IP3) az áramkörök intermodulációs torzítását jellemző mennyiség. Megmutatja, hogy a kívánt keveredési termék jelszintje mekkora bemenő RF jelszint mellett lesz egyenlő a harmadrendű termékével. Az IP3 szemléltetése a 2. ábrán látható.



2. ábra. A harmadrendű keresztezési pont

A 2. ábrán megfigyelhető, hogy –elméletben– a harmadrendű intermodulációs termék jelszintjét a bemenő RF jelszint függvényében ábrázolva a kapott egyenes meredeksége háromszorosa a kívánt jelösszetevő hasonló módon kapott egyenesének. Ez alapján az IP3 kiszámolható a kívánt- és a harmadrendű termékek jelszintjei alapján a 6. képlet segítségével:

$$IP3 = P + \frac{\Delta P}{2} \quad (6)$$

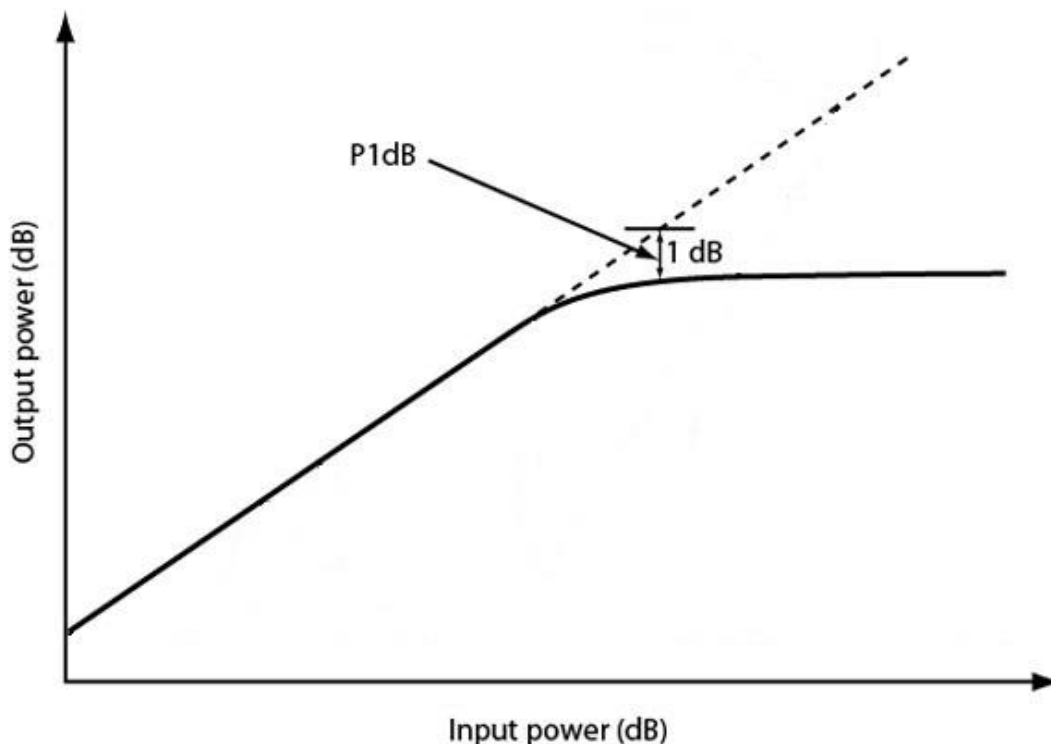
ahol P a kívánt keveredési termék teljesítménye, ΔP pedig a kívánt termék és a harmadrendű termék teljesítményei közötti különbség.

A keverő működésének jellemzésére alkalmas további paraméter a konverziós veszteség, amely a frekvenciakonverzió hatékonyságát jellemzi, az IF és az RF teljesítmény arányaként fejezhető ki. Decibelben megadva:

$$L_c = 10 \log \frac{\text{Bemeneti RF teljesítmény}}{\text{Kimeneti IF teljesítmény}} \quad (7)$$

A konverziós veszteség a keverőben lévő rezisztív elemekre, valamint a keverés során az RF-IF kapuk között létrejövő veszteségre vezethető vissza, hiszen a keverés során nemcsak a kívánt keveredési termék, hanem más frekvenciájú komponensek is megjelennek a kimeneten.

A keverő jellemzésére alkalmas továbbá az 1 dB-es kompressziós pont (P_{1dB}), amely megmutatja, hogy az elméleti, egyenes bemeneti teljesítmény- kimeneti teljesítmény karakterisztikától mekkora bemenő jelszint esetén tér el 1 dB-lel a valóságos karakterisztika. Az 1 dB-es kompressziós pont szemléltetése a 3. ábrán látható.



3. ábra. Az 1 dB-es kompressziós pont

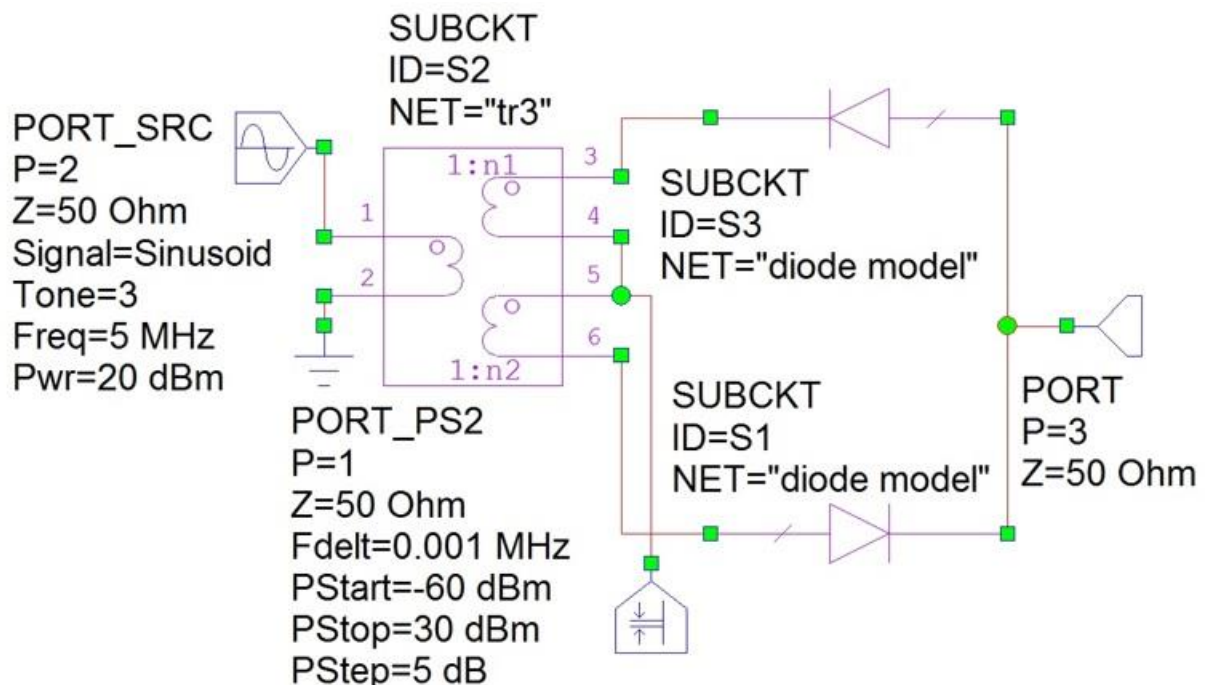
Az LO-RF, illetve az LO-IF kapuk közti izoláció szintén fontos jellemzői a keverőknek, melyek arról adnak információt, hogy az LO jel milyen jelszinttel jelenik meg az RF, valamint az IF kapun.

A dolgozatban az összehasonlítás során az intermodulációs torzítást, a konverziós veszteséget, valamint az izolációkat vizsgáltuk.

4 A keverők működésének kvalitatív magyarázata

A dolgozatban tizenkét különböző keverő kerül bemutatásra. A dolgozat célja, hogy a keverők paramétereit összehasonlítsuk, ennek megfelelően az egyes áramkörök eltérő felépítéséből eredően a működési tulajdonságaik is különbözőek. A dolgozat ezen fejezetében a keverők működése kerül ismertetésre.

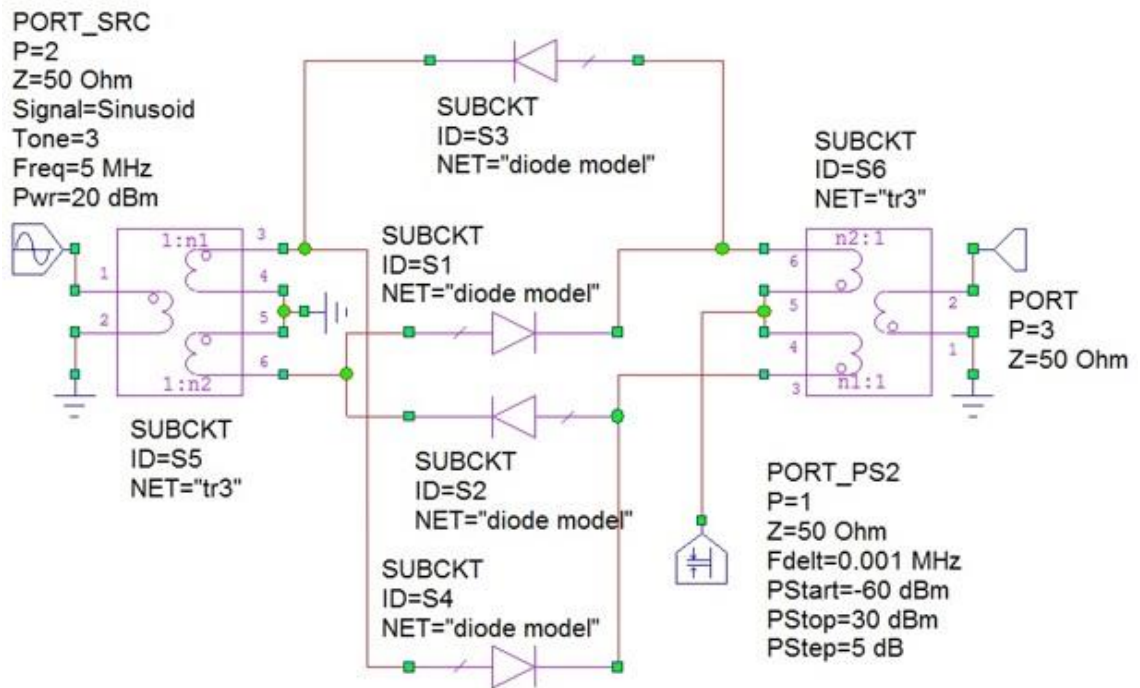
A vizsgált keverők közül a legegyszerűbb felépítésű a kétdiódás keverő. Az áramkör kapcsolási rajza a 4. ábrán látható.



4. ábra A kétdiódás keverő kapcsolási rajza

Az LO jel pozitív-, illetve negatív félperiódusában az egyik dióda nyitva van, a másik szakad. A kétdiódás keverő a többi vizsgált keverőhöz képest nagy konverziós veszteséggel működik. A kétdiódás keverő nagy előnye az egyszerű felépítésében rejlik.

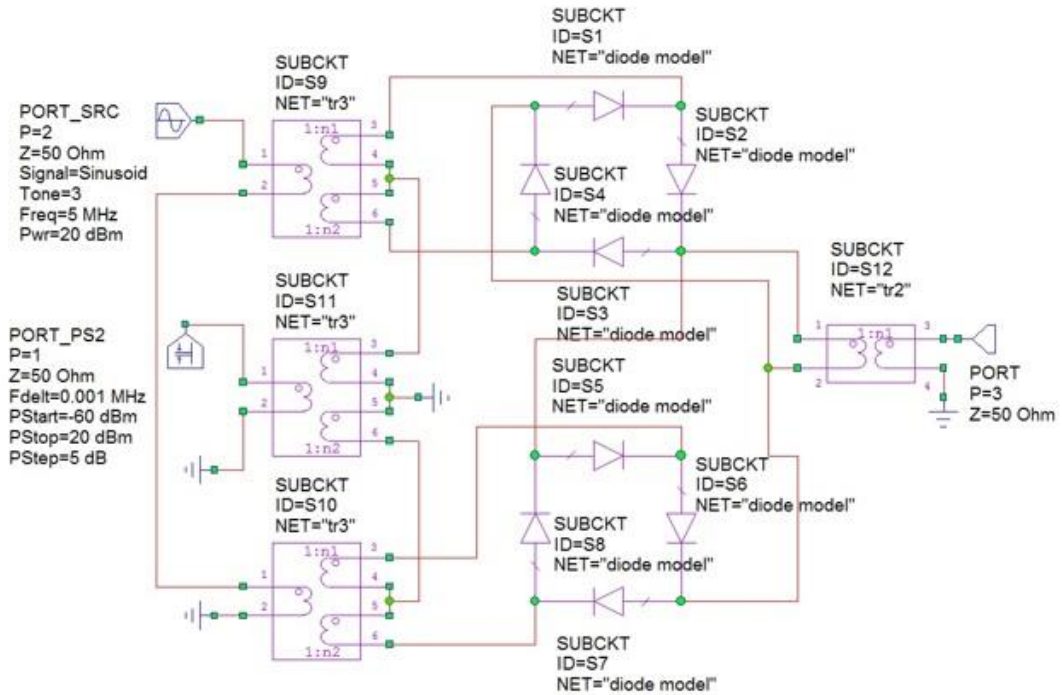
A négydiódás keverő felépíthető két kétdiódás keverőből. Az áramkör kapcsolási rajza az 5. ábrán látható.



5. ábra A négydiódás keverő kapcsolási rajza

Az LO jel pozitív félperiódusában az alsó-, a negatív félperiódusában a felső két dióda van nyitva, így az RF jel az IF kapun az LO jel negatív-, illetve pozitív félperiódusa változásának megfelelően jelenik meg. Mivel a két tekercs, amire az RF kapu van kötve ellenkező polaritással csatlakozik egymáshoz, a kimeneten az RF jel az LO jel fent leírt váltakozásának megfelelően váltja a pozitív-, illetve a negatív félperiódusát. Mivel ennél a keverőtípusnál az LO jel mindkét félperiódusa ki van használva, a konverziós veszteség csökkenését lehet megfigyelni a két diódás keverőhöz képest.

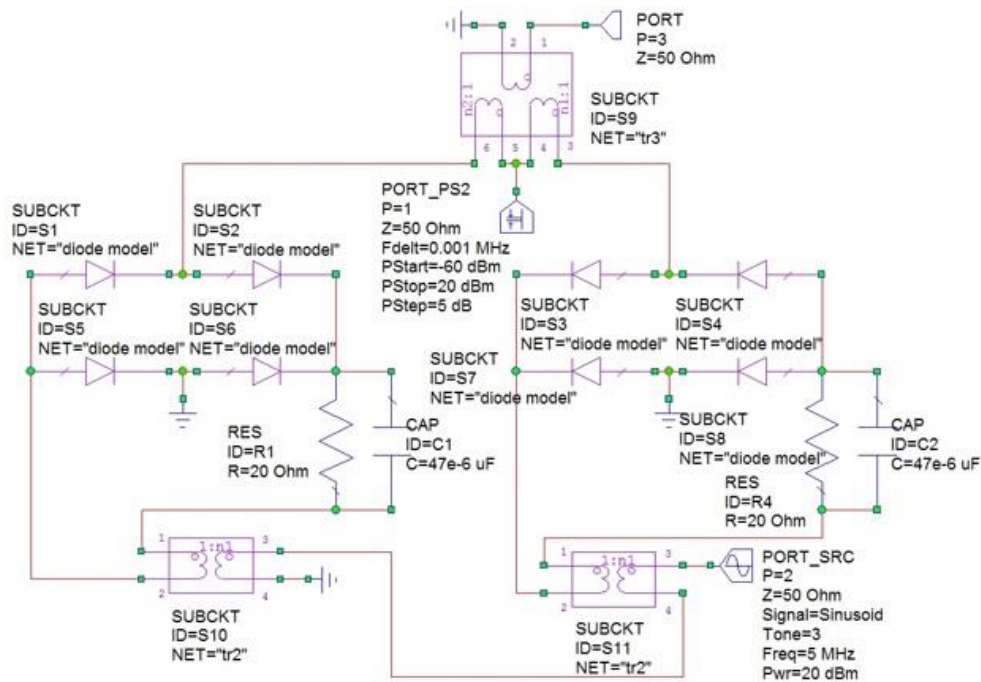
A nyolcdiódás keverő felépíthető két négydiódás keverőből. Az áramkör kapcsolási rajza a 6. ábrán látható.



6. ábra A nyolcdiódás triple balanced keverő kapcsolási rajza

Az LO jel pozitív félperiódusában a keverő felső négydiódás részében az S2-vel és az S3-mal, az alsó négydiódás részében az S6-tal és S7-tel jelölt diódák vezetnek, ezzel csatlakoztatva az RF jelet az IF kapura. A negatív félperiódusban a többi dióda van kinyitva, ekkor az RF jel ellenkező polaritással jelenik meg az IF kapun.

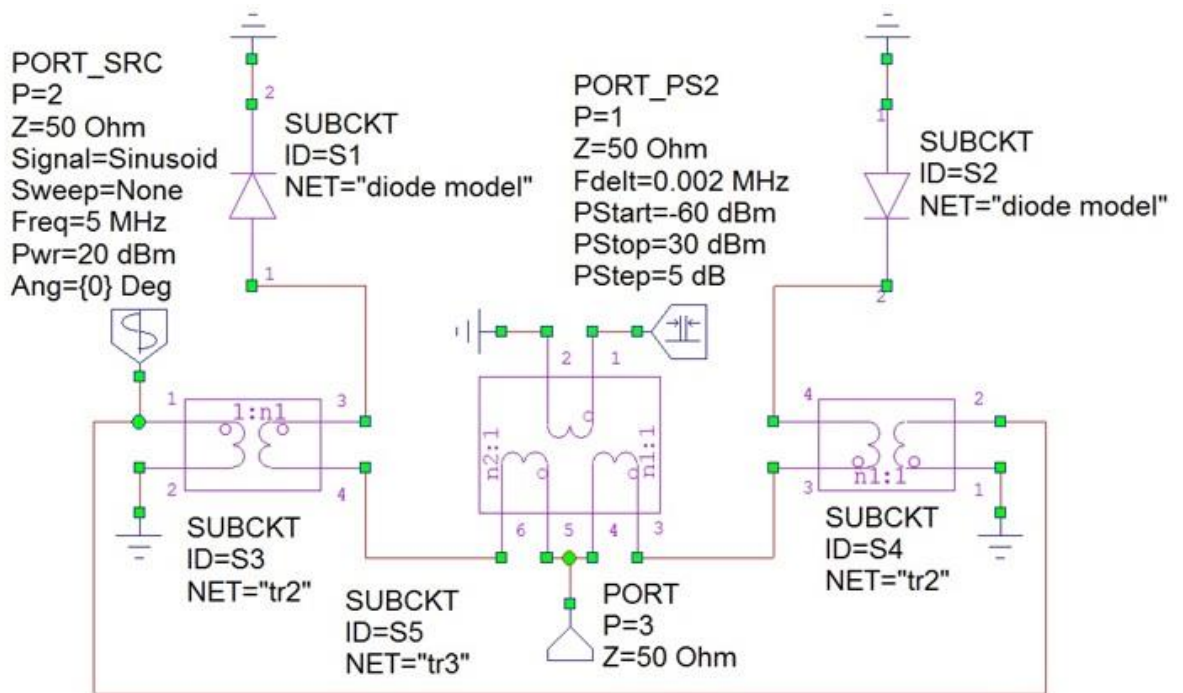
A nyolcdiódás rectifier típusú keverő neve a 7. ábrán megfigyelhető kapcsolási rajzon is látható, egyenirányítóhoz hasonló elrendezésből ered.



7. ábra A nyolcdiódás rectifier típusú keverő

Az LO jel pozitív félperiódusában az ábra jobb oldalán látható négy dióda nyit ki, ezzel az IF transzformátorra csatlakoztatva az RF kaput. A negatív félperiódusban a bal oldali négy dióda vezet. Ekkor az RF jel az IF transzformátor azon tekercsére csatlakozik, mely ellentétes polaritással van összekötve a pozitív félperiódus esetén említettel, így a kimeneten az RF jel polaritása megfordul. Az ellenállások a DC áramok csökkentésére, a kapacitások a nagy AC áramok biztosítására szolgálnak.

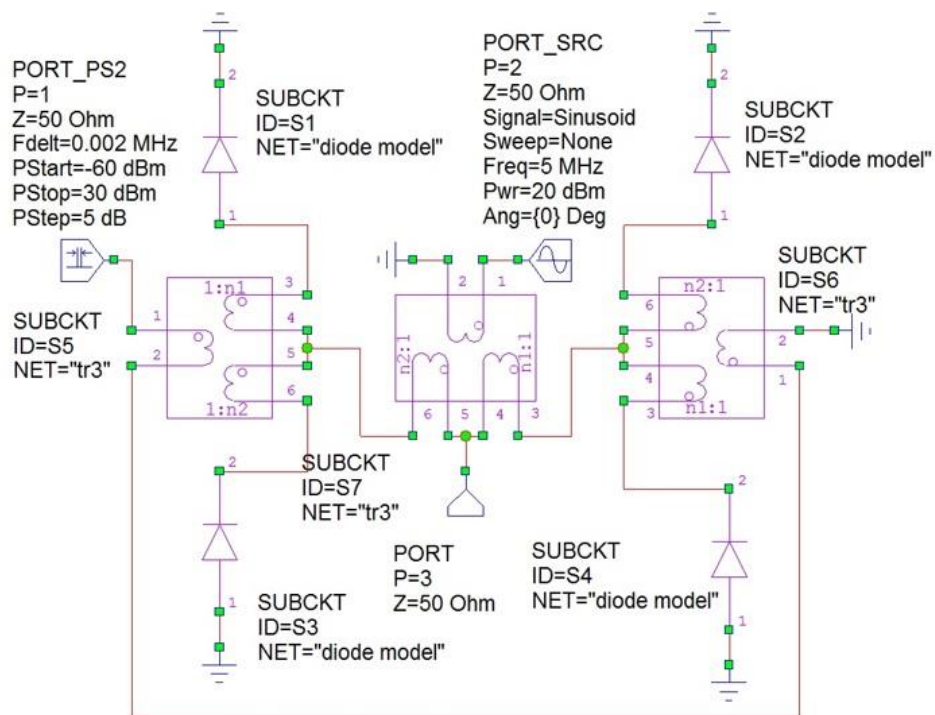
A diódás fél H keverő kapcsolási rajza a 8. ábrán látható.



8. ábra A diódás fél H keverő

Az LO jel pozitív félperiódusában a bal oldali dióda, a negatív félperiódusban a jobb oldali dióda vezet, ellenkező polaritással csatlakoztatva az IF kimenetre az RF jelet.

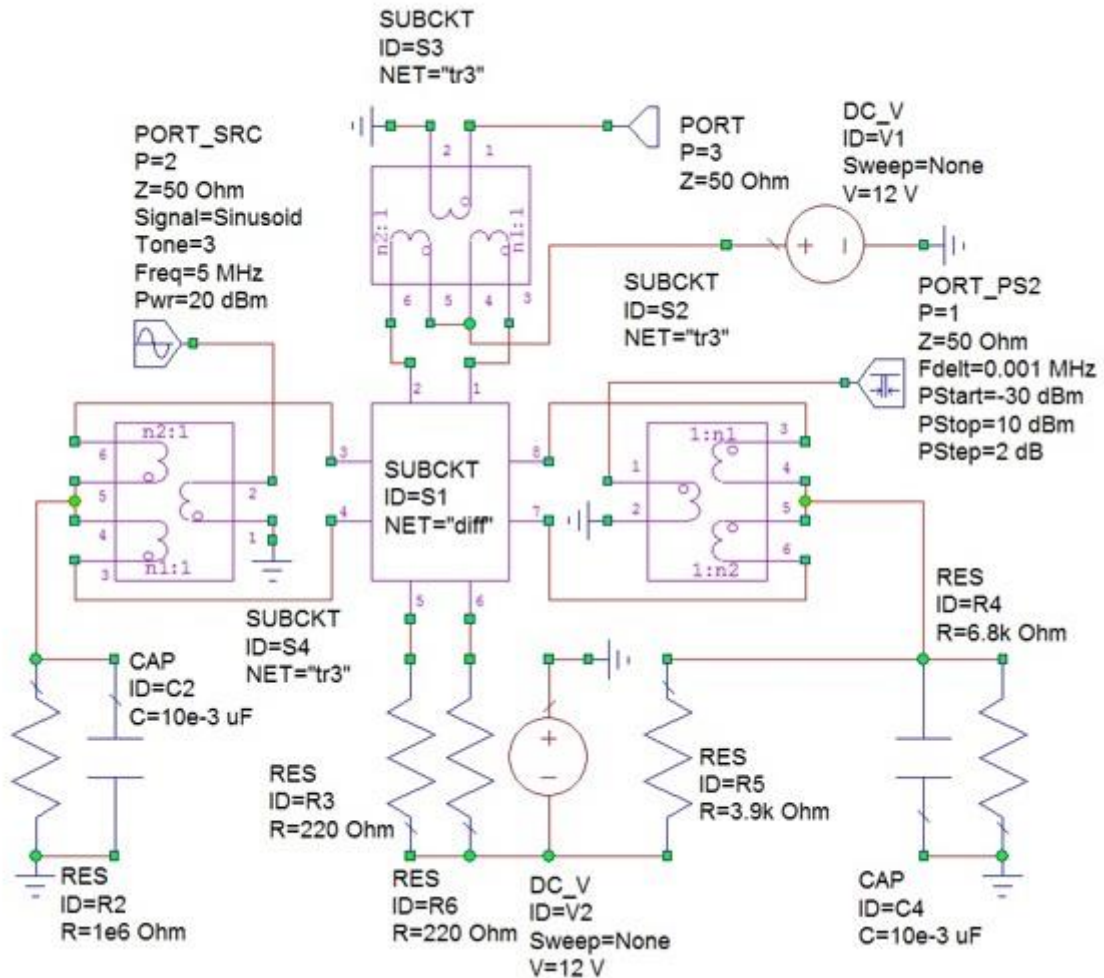
A diódás fél H keverő a H keverő egyszerűsített változata, melynek kapcsolási rajza a 9. ábrán látható.



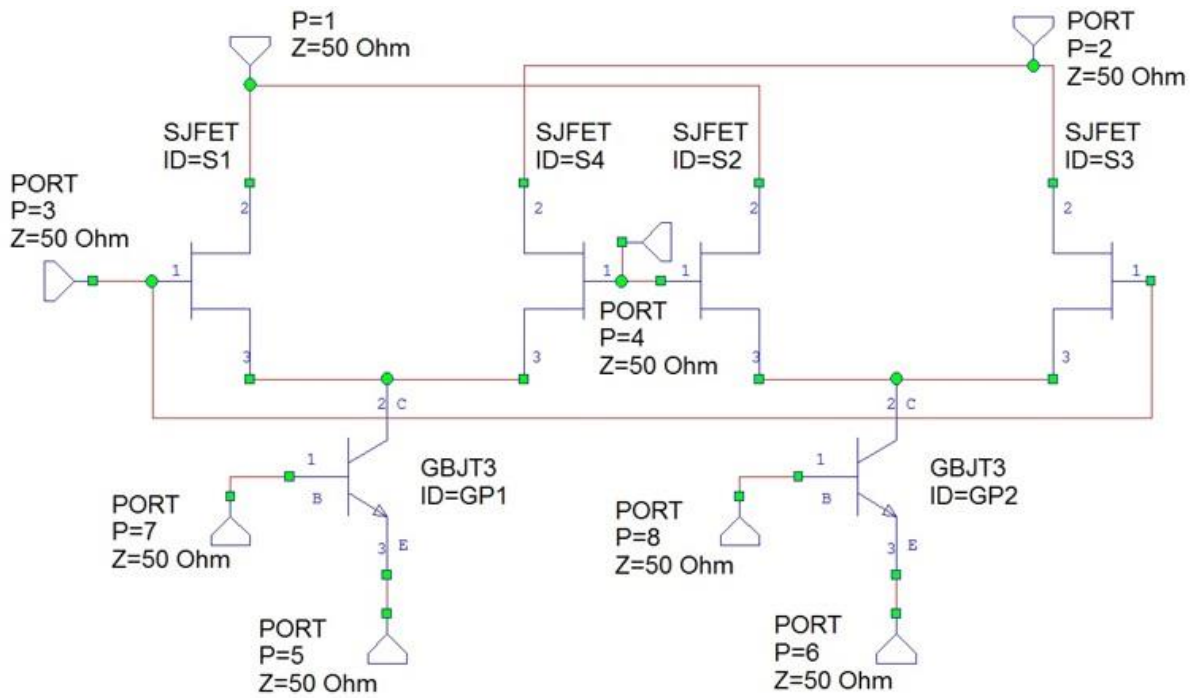
9. ábra A diódás H keverő kapcsolási rajza

Az LO jel megfelelő félperiódusaiban vagy a bal felső és a jobb alsó, vagy a jobb felső és a bal alsó diódák nyitnak ki, ezzel csatlakoztatva az RF jelet a kimenetre.

A négynegyedes szorzó kapcsolási rajza a 10. és 11. ábrákon látható.



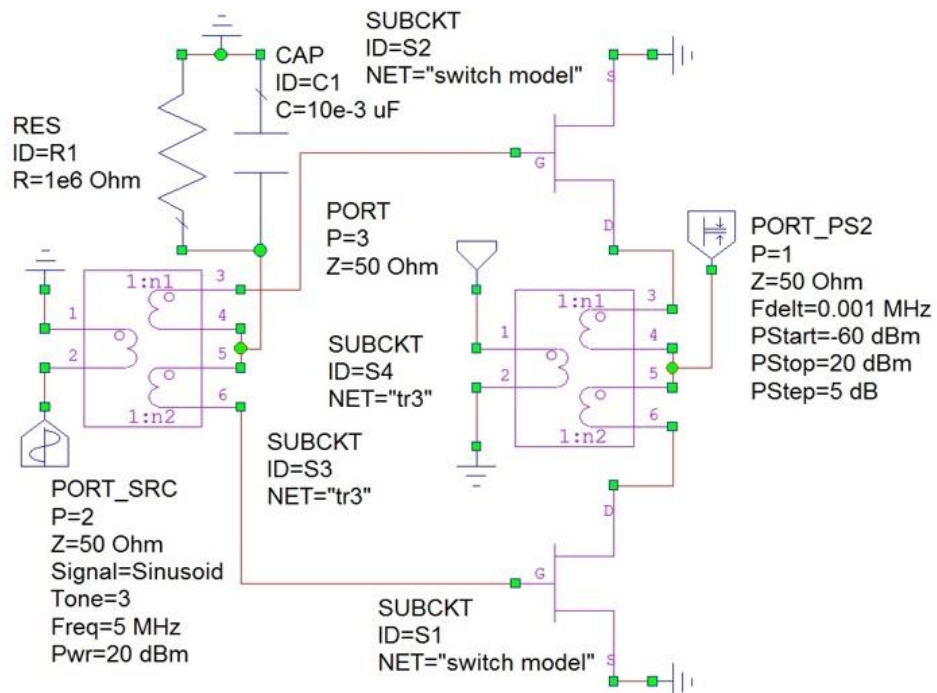
10. ábra A négynegyedes szorzóval megvalósított keverő kapcsolási rajza



11. ábra A négynegyedes szorzó kapcsolási rajza

Az LO kapcsolóelemek jFET-ekkel lettek megvalósítva, az erősítő bipoláris tranzisztorokból lett felépítve. A nagy linearitás miatt ezen keverővel jó nagyjelű paramétereket lehet elérni.

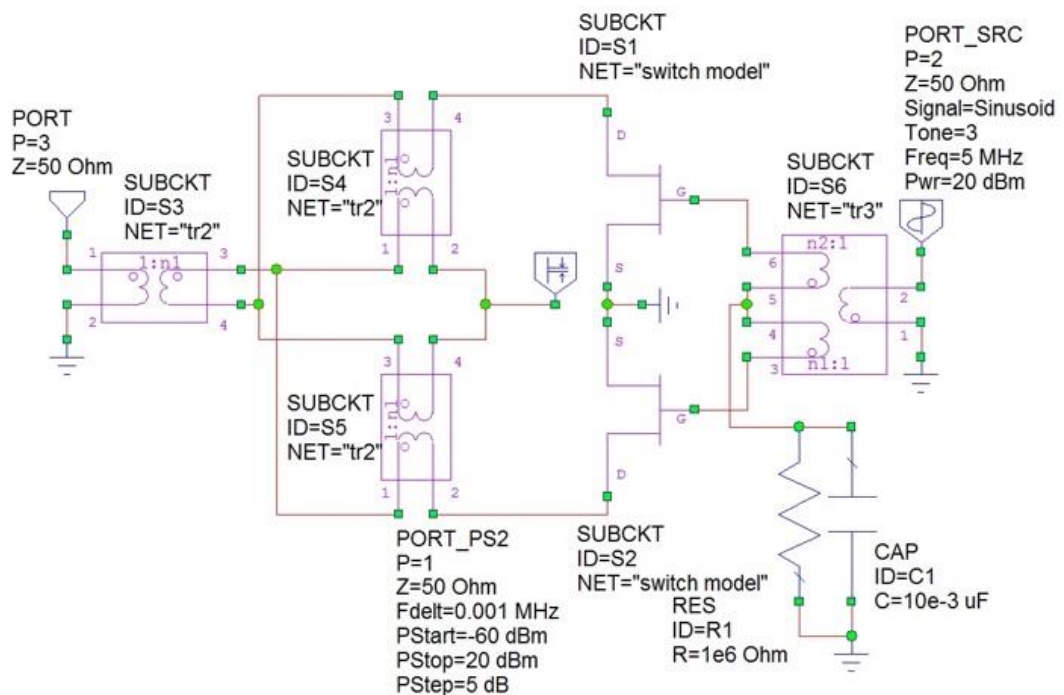
A 12. ábrán a tranzisztoros fél H keverő kapcsolási rajza látható.



12. ábra A tranzisztoros fél H keverő kapcsolási rajza

Az LO jel pozitív félperiódusában a jobb oldalon látható transzformátor felső tekercsének egyik vége a FET-en keresztül földpotenciálra kerül. A negatív félperiódusban az előbb említett FET lezár, míg az ábra jobb alsó sarkában levő tranzisztor kinyit, ezzel földelve a fenti transzformátor másik tekercsének kivezetését, így a transzformátor harmadik, IF kapura kapcsolódó tekercsében indukálódó, az RF jellel arányos feszültség az LO jellel együtt változtatja a polaritását.

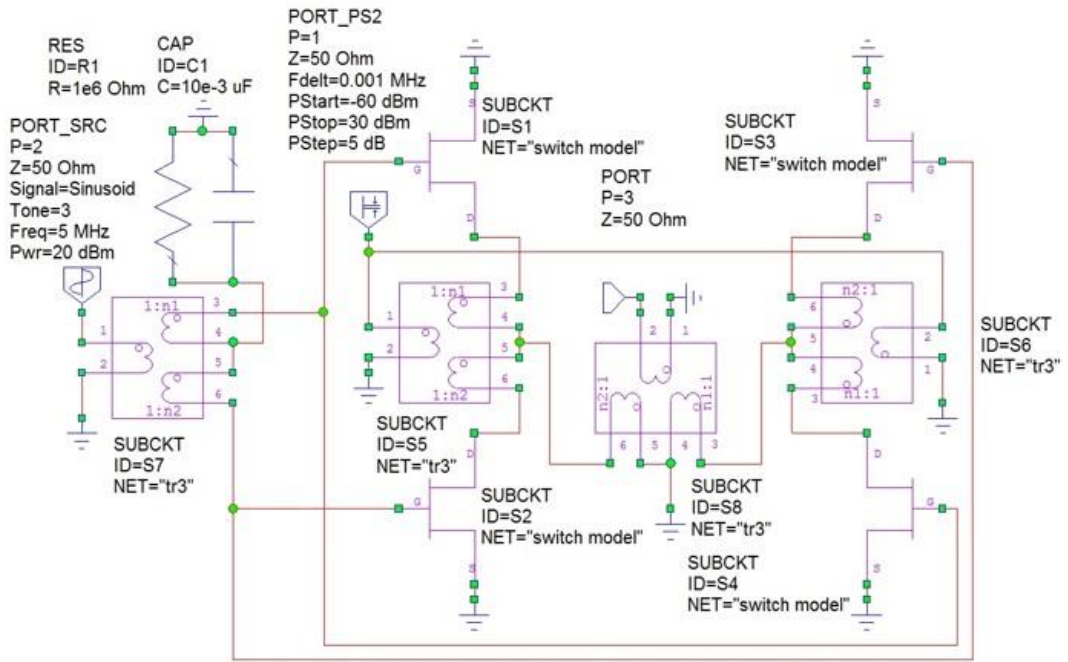
A tranzistoros fél H keverő módosított változata egy orosz típusú fél H keverő, melynek kapcsolási rajza a 13. ábrán látható.



13. ábra Az orosz típusú tranzistoros fél H keverő kapcsolási rajza

Az LO jel pozitív félperiódusában az ábrán felül látható FET kinyit, az alsó lezár. Ekkor az RF jel a felső bifiláris tekercselésű transzformátoron keresztül jut a kimenetre. Az LO jel negatív félperiódusában a folyamat fordítva játszódik le, az alsó tranzisztor nyit ki, a felső lezár, az RF jel pedig az alsó kéttekercses transzformátoron keresztül jut a kimenetre. Az RF jel a kimeneten tehát így is az LO jelnek megfelelően váltja a polaritását az IF kapun.

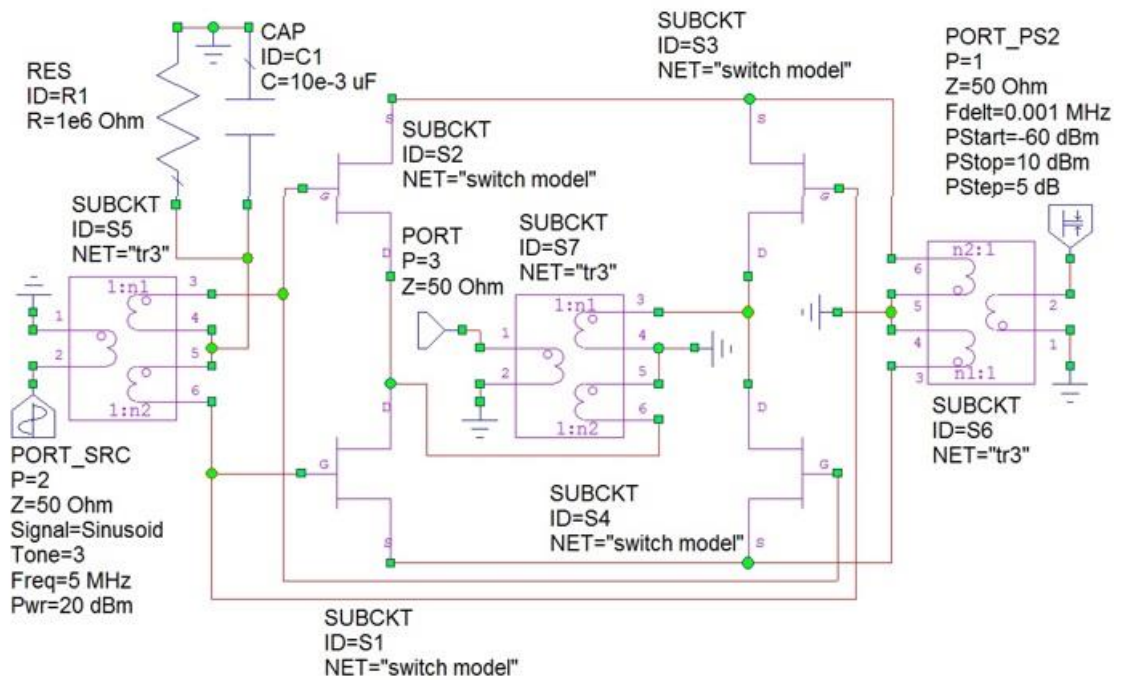
A tranzistoros H keverő kapcsolási rajza a 14. ábrán látható.



14. ábra A tranzistoros H keverő kapcsolási rajza

Az LO jel pozitív félperiódusában az ábra bal felső és jobb alsó tranzisztora nyit ki, a másik kettő zárva van. A negatív félperiódusban a másik jobb felső és a bal alsó félvezetők nyitnak ki, így a kiemeneti transzformátort az RF jel az LO jel váltakozásának megfelelően félperiódusonként polaritást váltva éri el.

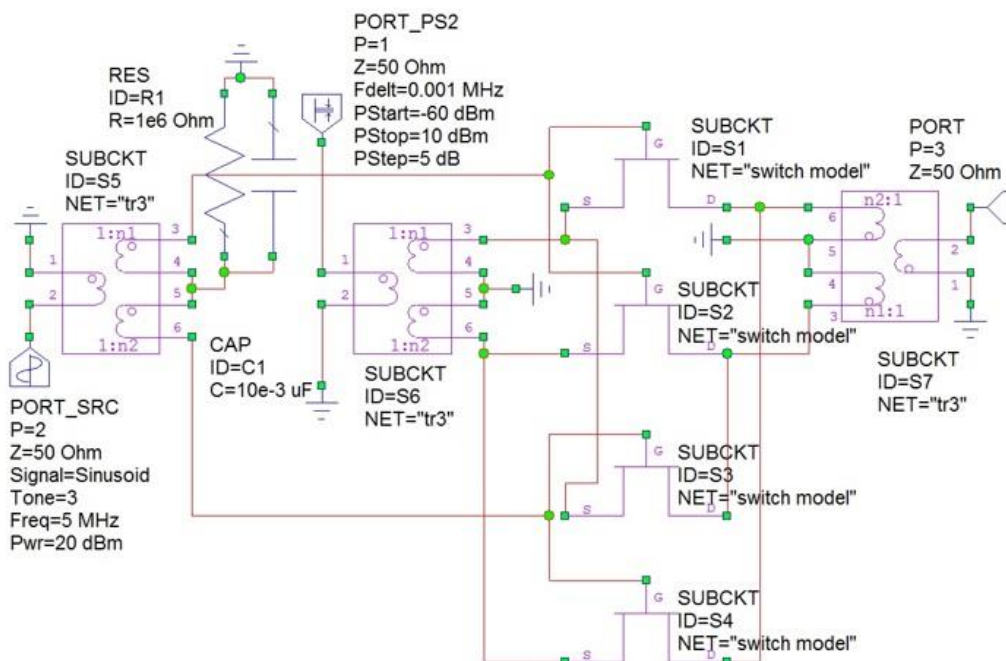
A H keverő egyszerűsített változata a 15. ábrán látható.



15. ábra Az egyszerűsített H keverő kapcsolási rajza

Megfigyelhető, hogy a H keverőhöz képest ennél az áramkörnél csak három transzformátor került felhasználásra. A H keverőnél ismertetett működéshez hasonlóan a pozitív LO félperiódusban a 15. ábra bal felső és jobb alsó tranzisztora nyit ki, míg a másik kettő lezár. A negatív félperiódusban a jobb felső és bal alsó FET nyit ki, a bal felső és jobb alsó tranzisztorok pedig lezárnak, így az RF jel a kimeneten a polaritását minden LO félperiódusban változtatva jelenik meg.

A 16. ábrán látható FET-es ring keverő működése hasonló a négydiódás keverőéhez, a FET-ek ki-be kapcsolását azonban itt a G-S feszültséggel lehet vezérelni.



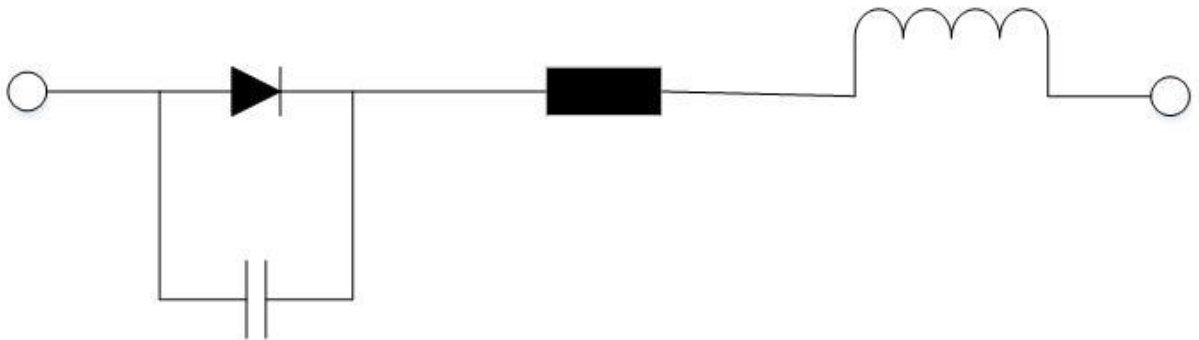
16. ábra A FET-es ring keverő kapcsolási rajza

5 A félvezetők modelljei

Az áramkörök analíziseinek elvégzéséhez először a felhasznált félvezetők modelljeit kellett meghatározni.

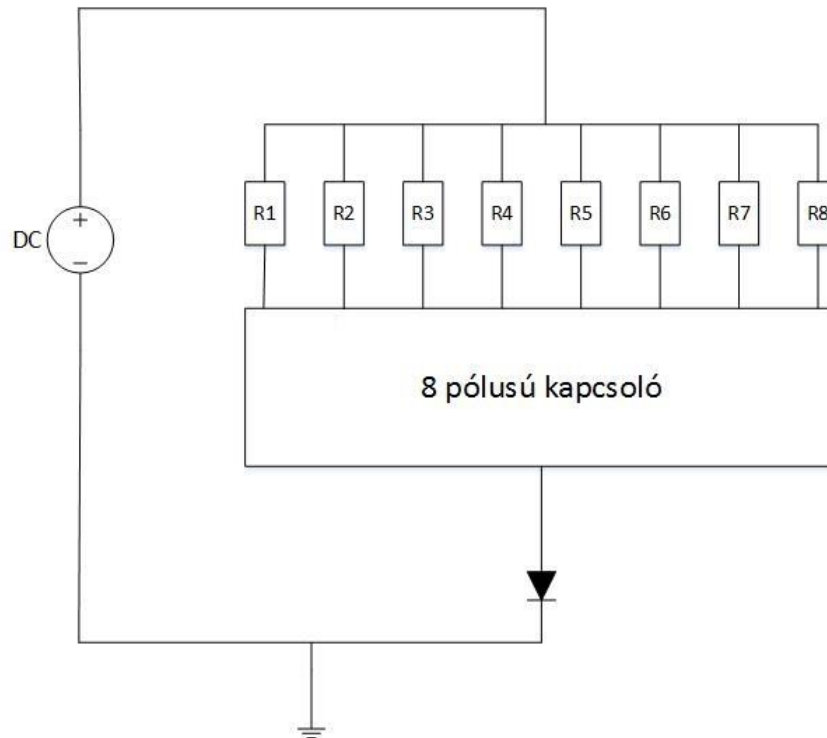
A dióda modellje

A dióda modellezéséhez meghatározandó paraméterek a szaturációs áram, a dióda termikus feszültsége, a dióda idealitási faktora, a párhuzamos kapacitás, valamint a parazita induktivitás. A dióda helyettesítő képe a 17. ábrán látható.



17. ábra. A dióda helyettesítő képe

A modellparaméterek meghatározásához szükséges volt egy mérőpanel felépítése. A mérő áramkör felépítése a 18. ábrán látható.



18. ábra. A dióda mérőpaneljének blokkvázlata

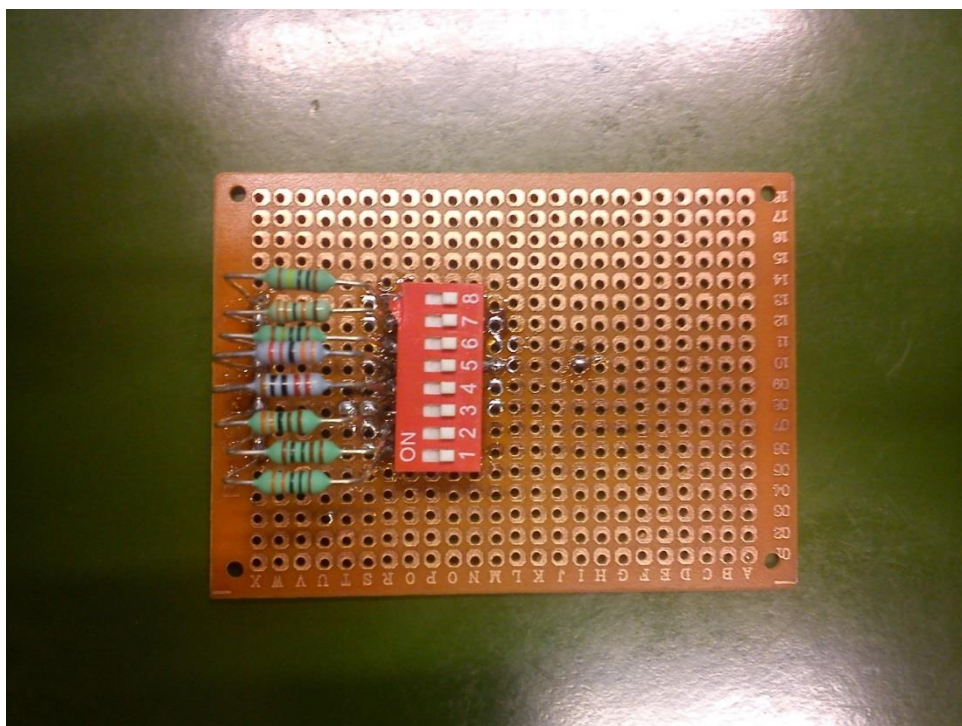
Az említett paraméterek meghatározásához a dióda egyenáramú karakterisztikáját kellett megmérni. Ehhez az 18. ábrán látható módon nyolc ellenállásra volt szükség, amely ellenállások egy nyolcpólusú kapcsolóhoz csatlakoznak. A csatlakozó másik végére a dióda anódja csatlakozik, az ellenállások azon végét, amelyek nem kapcsolódnak a kapcsolóhoz, összeforrasztottam. Az így kapott pont és a dióda katódja közé a méréshez 10 V-os tápfeszültséget kellett kapcsolni. A mérés során a használt ellenállást a megfelelő kapcsoló bekapcsolásával választottuk ki, így beállítva egy áramkorlátot a diódán. A mért érték a diódán eső feszültség volt az egyes ellenállásértékek esetén, ezeket az adatokat kellett egy Mathcad fájlba bevinnem, amely a dióda modellparamétereit kiszámolta. A fájlt Ladvánszky János készítette. A felhasznált ellenállások értékei: valamint az egyes esetekben mért feszültségértékek az 1. táblázatban láthatók.

Ellenállás jelölése	Az ellenállás értéke [kΩ]	Mért feszültség [V]
R1	0,33	0,8
R2	1	0,741
R3	3,3	0,679

R4	10	0,624
R5	33	0,565
R6	100	0,51
R7	330	0,453
R8	1000	0,4

1. táblázat. A dióda egyenáramú karakterisztikájának mérése

A mérési adatokból meghatározott modellparaméterek: $I_0=2,918$ nA, $N=1,9058$, $R_s=0,352$ Ω . Az induktivitást a kivezetés hossza alapján megbecsültük, $L_s= 10$ nH, a kapacitást előfeszítetlen állapotban, kapacitás-mérővel megmértük, $C_0=1,57$ pF. A felhasznált diódák 1N4148 típusúak voltak, az áramkörökbe való beépítés előtt az eszközöket úgy kellett kiválasztani, hogy minél kisebb termikus feszültségük (VT) legyen, és ezek minél kevésbé térjenek el egymástól. A megépített mérőpanel a 19. ábrán látható.

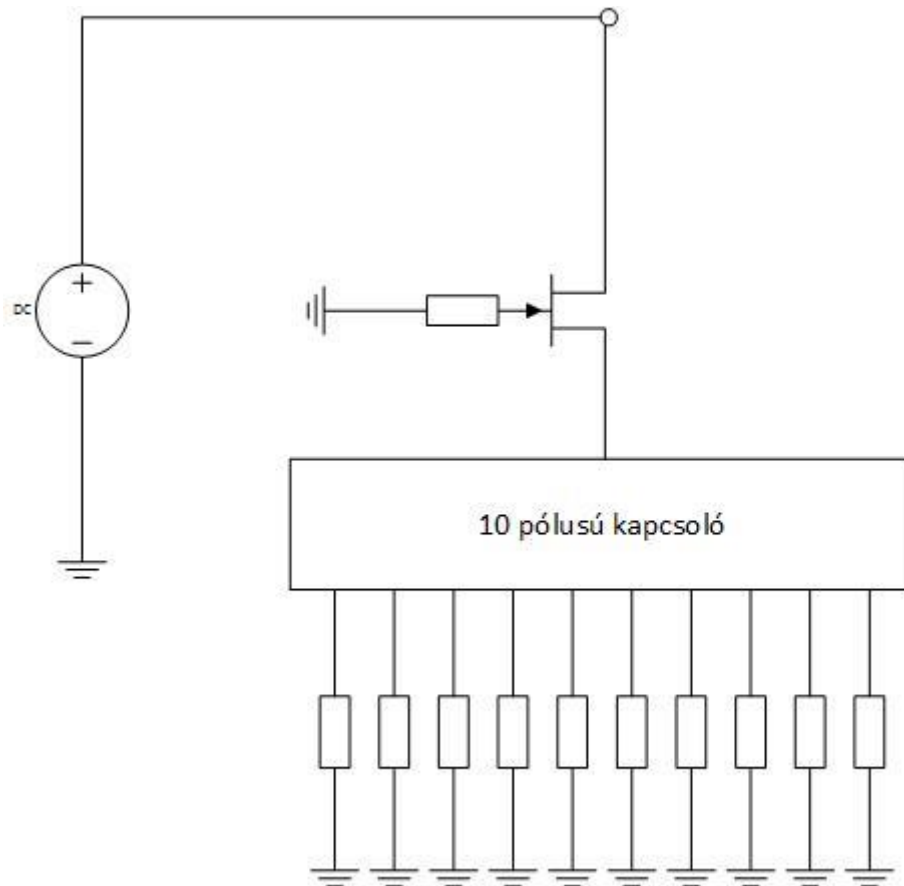


19. ábra. A dióda mérőpanel

A tranzisztorok modelljei

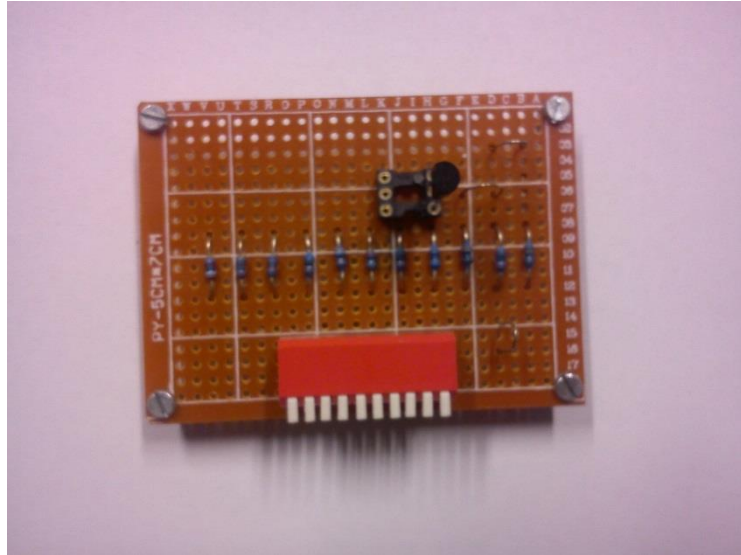
A tranzisztoros keverők megépítése előtt a megfelelő tranzisztorok kiválasztását nagy körültekintéssel kellett elvégezni. Ügyelni kellett arra, hogy a FET-ek minél kisebb kapacitásúak legyenek, gyors kapcsolóeszközöknek kellett lenniük, valamint nem lehetett túl

nagy az elzáródási feszültségük, mivel ebben az esetben az LO jel negatív félperiódusában a tranzisztor nem kapcsolt volna ki, megnövelve ezzel a konverziós veszteséget. Az áramkörök összeépítését megelőzően ennek megfelelően többféle FET-et is kipróbáltunk, ezek közül a legmegfelelőbbnek a J108-as kapcsoló JFET bizonyult. A jFET-ek modellezéséhez szükséges mérőpanel blokkvázlata a 20. ábrán látható.



20. ábra A FET mérőpanel kapcsolási rajza

Az áramkör egy tízpólusú kapcsolóból, tizenegy ellenállásból, valamint egy DIP 6-os csatlakozóból áll, amelybe helyezve az egyes FET-eket meg tudjuk mérni a kívánt paramétereket. Ebben az esetben a mérendő érték a jFET-ek gate-source feszültsége volt, az ellenállások változtatása mellett. A mért értékekből a diódák méréséhez hasonlóan egy Mathcad fájl számította ki az elzáródási feszültséget, valamint a szaturációs áramot. A mérések során tízenöt J108-as tranzisztort vizsgáltam, ezek közül kellett azt a négyet kiválasztani, amelyeknek a legkisebb (abszolút értékben) az elzáródási feszültsége. A megépített FET mérőpanel a 21. ábrán látható.



21. ábra A megépített FET mérőpanel

A Microwave Office-ban történő analízis során a FET-modellbe ezen négy elzáródási feszültség, valamint a hozzájuk tartozó I_{DSS} áramok átlaga került. A tranzisztormodell meghatározásához szükséges volt a gate-source és a gate-drain kapacitások meghatározására is, ezt kapacitás-mérő segítségével végeztük el. Az AWR Microwave Office tranzisztormodelljébe bekerült továbbá egy 300Ω -os ellenállás is, amely a gate kör frekvenciafüggését egyenlíti ki. A FET-ek modellparaméterei az 2. táblázatban láthatók.

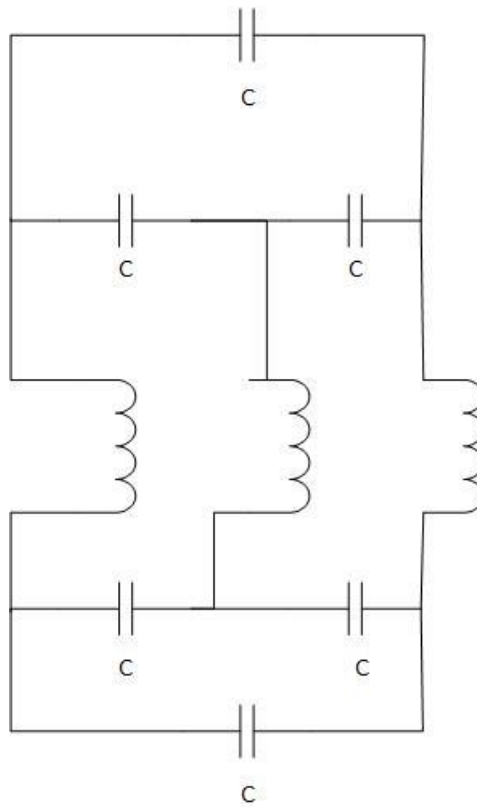
A J108 modellparaméterei	
V_P	-6,11 V
I_{DSS}	693,5 mA
C_{GS}	18pF
C_{GD}	18 pF

2. táblázat. A J108 modellparaméterei

A négynegyedes szorzó megépítéséhez a FET-eken kívül szükség volt két bipoláris tranzisztorra. Ezen eszközök modellezéséhez a tranzisztorok kisjelű áramerősítési tényezőjét (β) kellett multiméterrel megmérni, majd ezek közül a két legnagyobb β -jú tranzisztort kellett kiválasztani. A mérések alapján a $\beta=505$ értéket adtuk meg az AWR Microwave Office-ban.

A transzformátorok modelljei

A pontos mérésekhez elengedhetetlen volt a hibrid transzformátorok helyes modelljének megalkotása, mivel az IP3 nagyon érzékeny ezen modell pontatlanságaira. A modellnek tartalmaznia kell az egyes menetek közti parazitakapacitásokat (C), a tekercsek veszteségi ellenállását (R), a tekercsek induktivitásait (L), valamint a csatolási tényezőt (k). Az analízis lefuttatásakor ügyelni kell arra, hogy az általunk használt vasmag felső határfrekvenciája 30 MHz, így az analízist négy harmonikusra állítottuk be. A transzformátor modellje a 22. ábrán látható.



22. ábra A háromtekercses transzformátor modellje. A kéttekercses transzformátor modellje hasonlóan adható meg.

A transzformátorhoz Amidon T68-2 vasmag került felhasználásra, a tekercsek 28 meneteseek. A modellparaméterek a 3. táblázatban láthatók. A csatolási tényezőt és a parazita kapacitást egy impedancia analizátorral mértem meg. A csatolási tényező meghatározásához

két mérést kellett elvégezni. A transzformátor egyik tekercsének induktivitását egy másik tekercs szakadt és rövidre zárt állapotában is meg kellett mérni. Az

$$U_1 = \omega L_1 * I_1 + \omega M * I_2 \quad (8)$$

$$U_2 = \omega M * I_1 + \omega L_2 * I_2 \quad (9)$$

egyenletekből, ahol M a kölcsönös induktivitás, valamint a csatolási tényező

$$M = k\sqrt{(L_1 * L_2)} \quad (10)$$

deifiníciójából levezethető, hogy a fent említett két mérés eredményének hányadosa $1-k^2$ -tel egyenlő. Ebből a csatolási tényező számolható. Az ellenállás meghatározásához egy multimétert használtam.

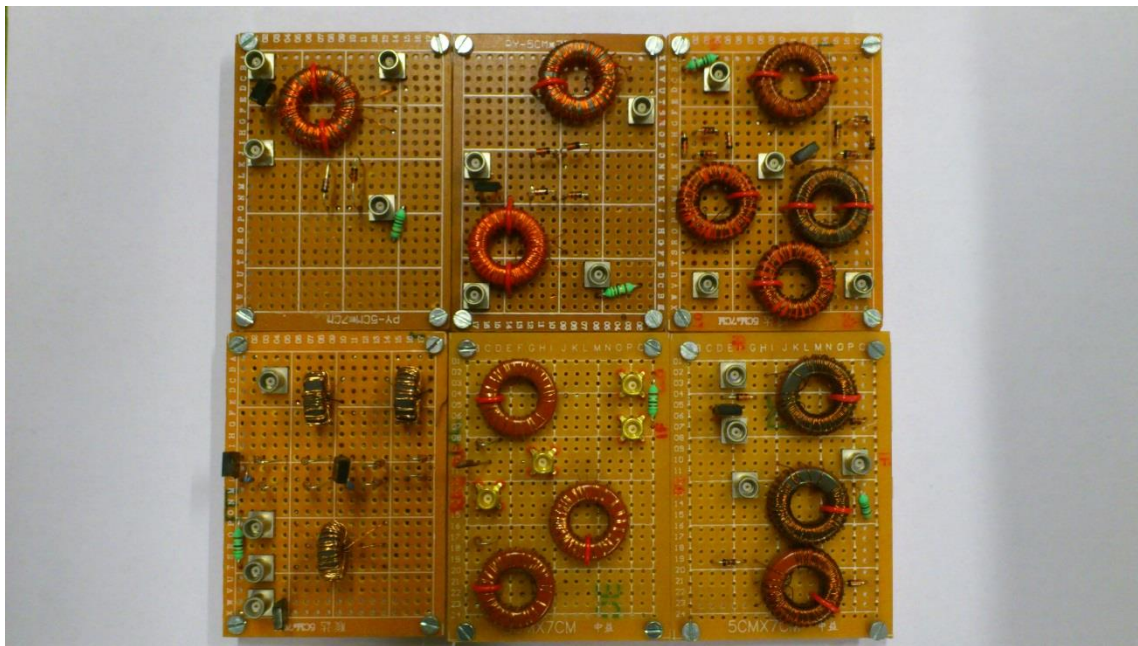
A harmadik tekercs elhanyagolható volt, mert abban a mérés alatt nem folyt áram.

A transzformátor modellparaméterei	
L	5 μ H
C	9 pF
k	0,954
R	0,47 Ω

3. táblázat. A transzformátor modellparaméterei

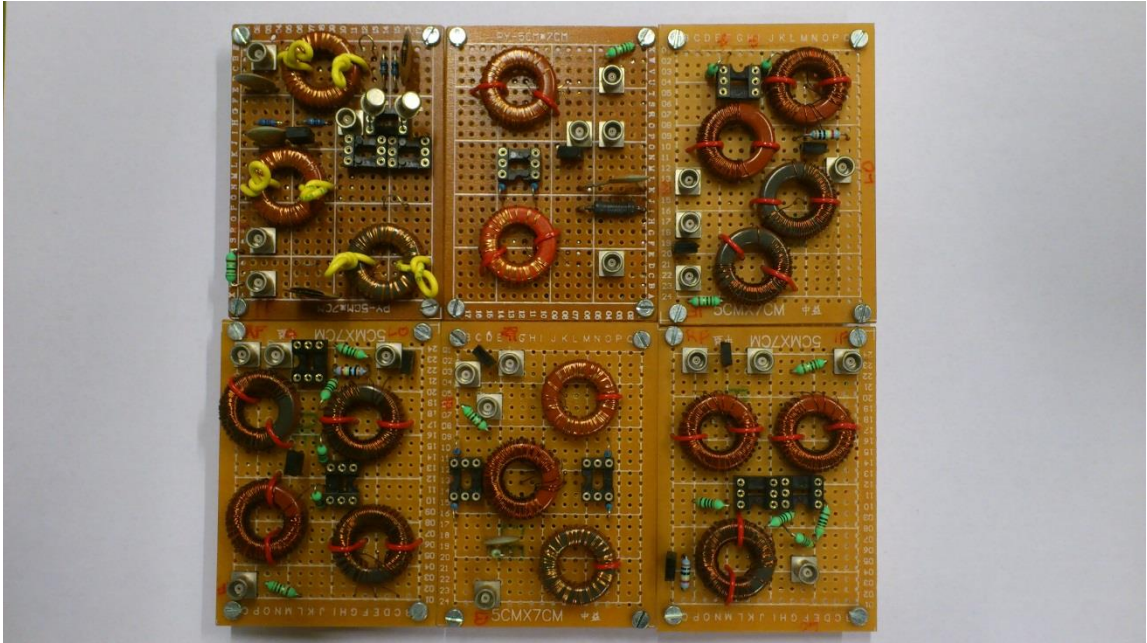
6 A megépített áramkörök mérése

A keverő áramkörök szimulációja után a megépített keverők mérése következett. Az áramköröket 50x70 mm-es próbapanelre építettem, a diódás keverők esetén a félvezetők 1N4148 típusúak voltak, a tranzisztoros keverőknél J108-as FET-ek, illetve BC109C típusú bipoláris tranzisztorok kerültek felhasználásra. A transzformátorok trifiláris, illetve bifiláris tekercselésűek voltak. A diódás keverők a 23. ábrán láthatók.



23. ábra. A diódás keverők. Balról jobbra, a felső sorból indulva: a két diódás keverő, a négy diódás keverő, a nyolc diódás triple balanced keverő, a rectifier típusú keverő, a diódás fél H keverő, valamint a diódás H keverő

A tranzisztoros keverők a 24. ábrán láthatók.

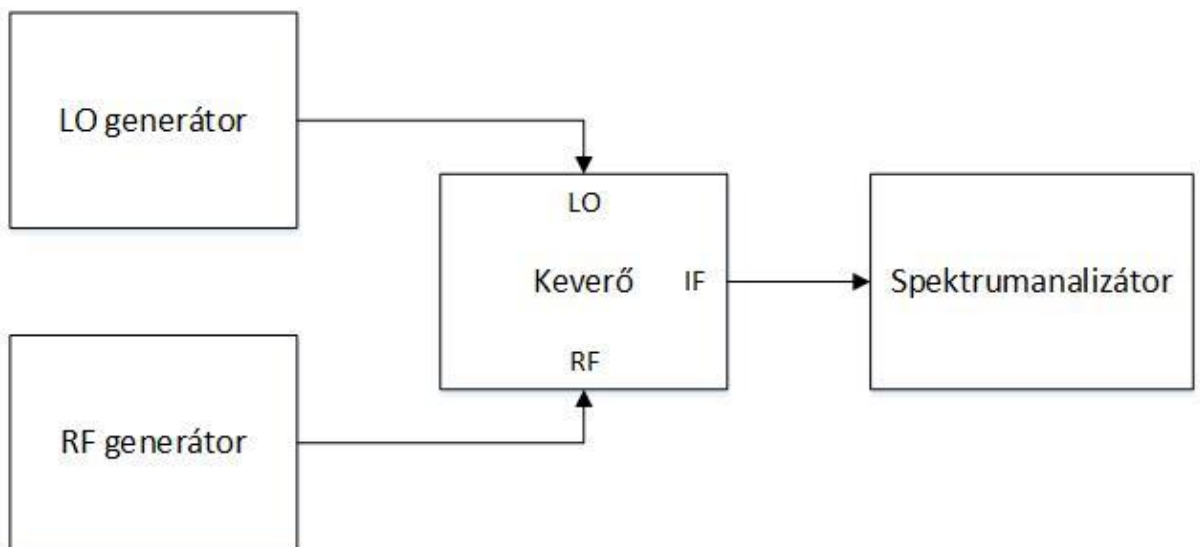


24. ábra. A tranzistoros keverők. A felső sorból indulva balról jobbra: a négynegyedes szorzó, a fél H keverő, az orosz típusú fél H keverő, a tranzistoros H keverő, az egyszerűsített tranzistoros H keverő, valamint a FET ring keverő

A mért paraméterek az IP3, a konverziós veszteség, illetve az LO-RF és az LO-IF kapuk közötti izolációk voltak.

Az IP3 mérése

Az IP3 méréséhez szükséges mérési összeállítás a 25. ábrán látható.



25. ábra. IP3 mérési összeállítás

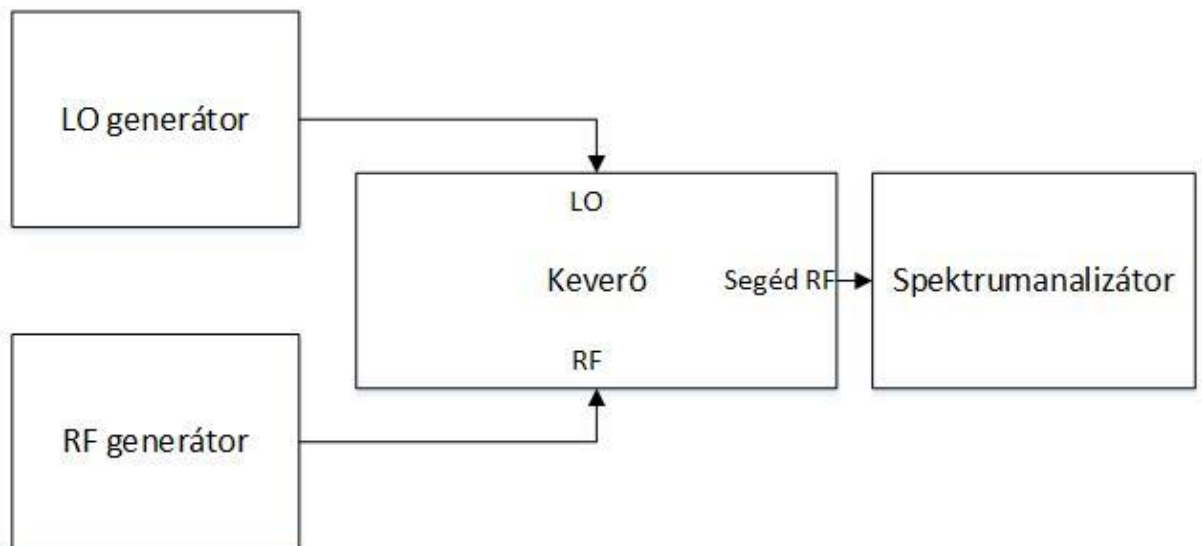
A mérés során az LO jel 5 MHz frekvenciájú, +20 dBm jelszintű volt. A keverő RF bemenetére egy kéthangú RF jelet kapcsoltunk, melynél a két jelösszetevő frekvenciája 3,9995 MHz, illetve 4,0005 MHz volt. A mérés során az RF jelszintet 0 dBm és +10 dBm között változtattam, 2 dBm-es osztással. A keverő IF kimenetét egy spektrumanalizátorral vizsgáltam. A mért értékekből az IP3 számítása a 6. képlet segítségével történt.

A konverziós veszteség mérése

A konverziós veszteség méréséhez szükséges mérési összeállítás megegyezik a 25. ábrán látható elrendezéssel. A konverziós veszteség a 7. képlet alapján megadható a dBm-ben mért IF, illetve RF jelszintek különbségként.

Az izolációk mérése

Az izolációk mérése során a mérendő érték a dBm-ben megadott LO jelszint az adott kapun (IF, RF). Az LO-IF izoláció méréséhez felhasznált mérési összeállítás megegyezik a 25. ábrán bemutatottal. A mérés során a keverő IF kimenetét spektrumanalizátorral vizsgálva, az 5 MHz-es LO frekvencián megjelenő jel jelszintjét mértem. Az LO-RF izoláció méréséhez szükséges volt a próbanyákra forrasztani egy segéd RF kaput, amelyet a spektrumanalizátorra kötve mérhető volt az LO jel jelszintje. A mérési elrendezés a 26. ábrán látható.



26. ábra Az LO-RF mérési összeállítás

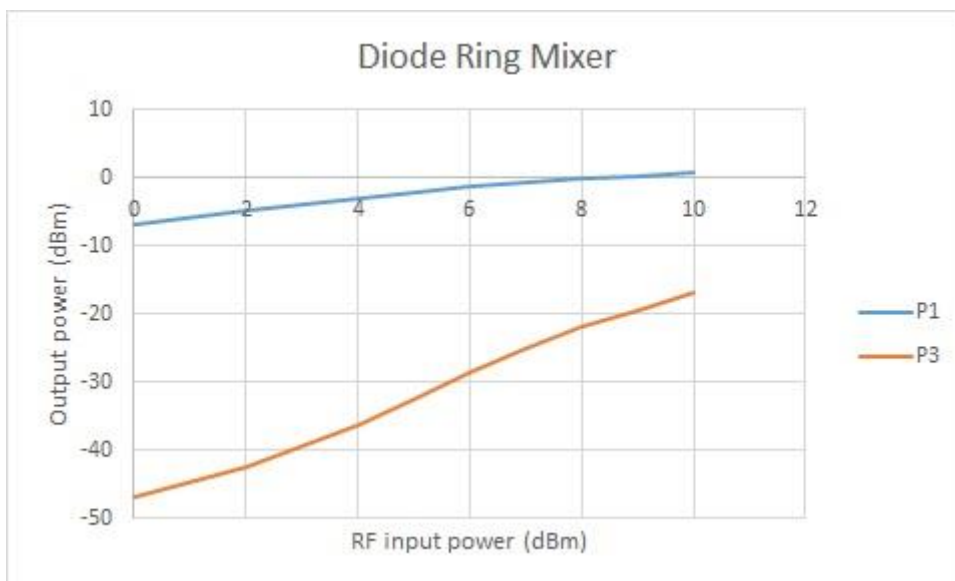
A mérési eredmények

A két-diódás keverőn végzett mérések alapján az IP3 7,02 dBm, a konverziós veszteség 11,76 dB, az LO jelszint az IF kapun -37,04 dBm, az LO jelszint az RF kapun -44,36 dBm voltak. Az IP3 mérésről készített kép a 27. ábrán látható, a jelölések a továbbiakban ismertetett keverők esetén megegyeznek.



27. ábra. A két-diódás keverő IP3 méréséről készített ábra. A kék görbe a kívánt keveredési termék bemeneti teljesítmény-kimeneti teljesítmény karakterisztikáját, a narancs görbe a harmadrendű intermodulációs termék ugyanezen karakterisztikáját jelöli.

A négy-diódás keverő esetén az IP3 13,41 dBm-nek, a konverziós veszteség 7,08 dB-nek adódott. Az LO jelszint az IF kapun -62,36 dBm, az LO jelszint az RF kapun -24,99 dBm volt. Az IP3-ról készített diagram a 28. ábrán látható.



28. ábra. A négydiódás keverő IP3 mérésekor kapott karakterisztikák

A nyolcdiódás triple balanced keverő mérésekor az IP3 10,87 dBm-nek, a konverziós veszteség 7,01 dB-nek adódott. Az LO frekvenciás jel jelszintje az IF kapun -70,9 dBm, az RF kapun pedig -10,16 dBm volt. Az első-, valamint a harmadrendű termék bemeneti teljesítmény- kimeneti teljesítmény karakterisztikája a 29. ábrán látható.



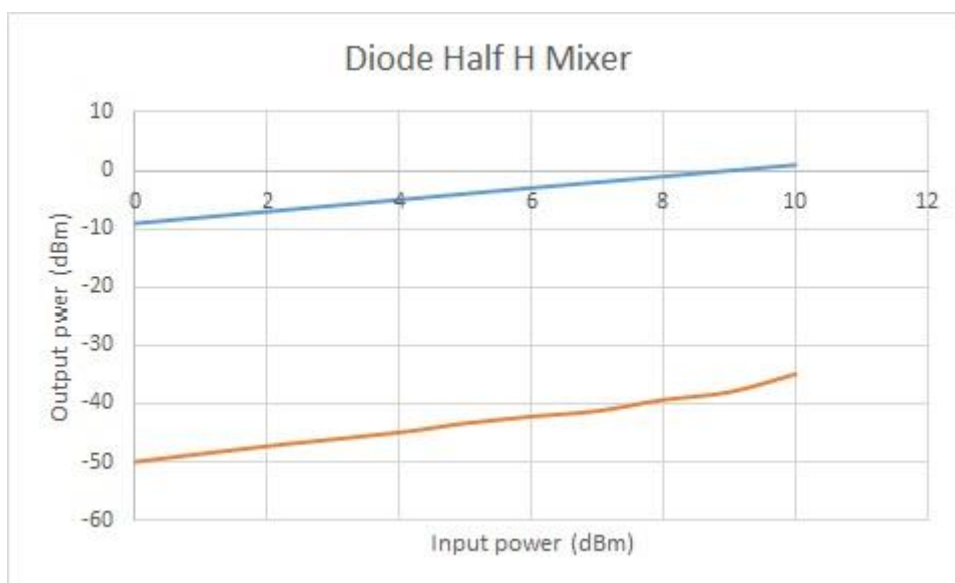
29. ábra. A 8 diódás triple balanced IP3 méréséről készített ábra.

A 8 diódás rectifier típusú keverő mérése 15,29 dBm IP3-at, valamint 7,73 dB konverziós veszteséget adott eredményül. Az LO jelszint mérése az IF kapun -48,51 dBm-et, az RF kapun -22,27 dBm-et eredményezett. A keverő bemenő RF teljesítmény- kimeneti teljesítmény karakterisztikája a 30. ábrán látható.



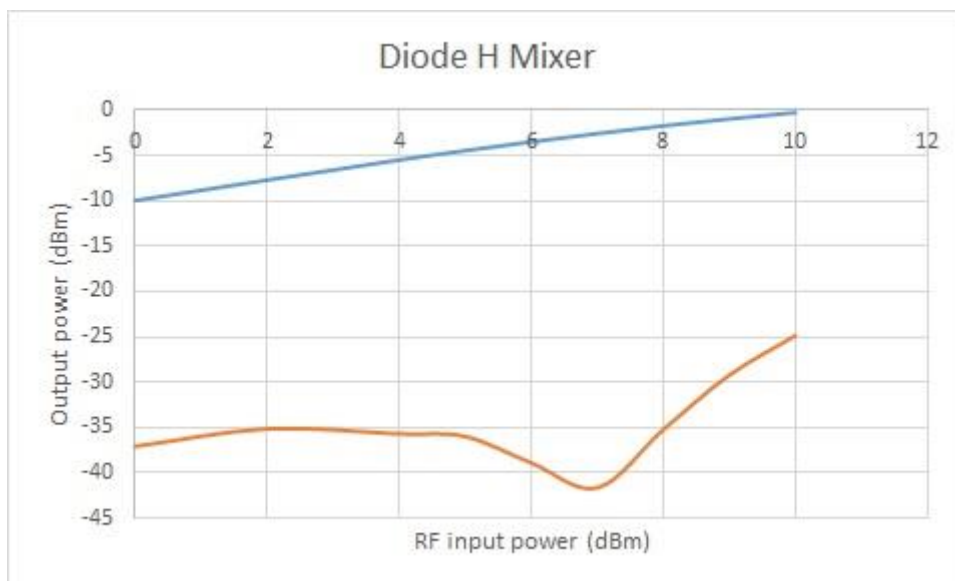
30. ábra. A rectifier típusú keverő bemenő RF teljesítmény- kimeneti teljesítmény karakterisztikája

A diódás half H keverőnél a mért IP3 értéke 11,68 dBm volt, a konverziós veszteség értéke 9,02 dB. Az LO jelszint IF-, illetve RF kapukon történő mérésekor rendre 18,01 dBm-et, valamint -17,02 dBm-et mértem. A half H keverő mérésekor készített diagram a 31. ábrán látható.



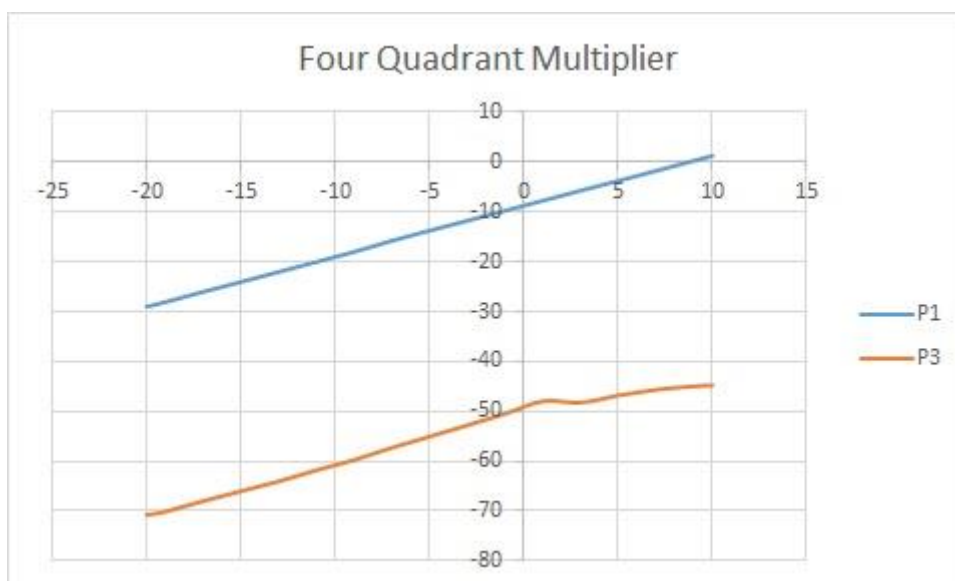
31. ábra. A diódás half H keverő IP3 méréshez készített diagramok

A diódás H keverő mérésekor az IP3 értéke 11,41 dBm, a konverziós veszteség 5,93 dBm volt. Az LO jel az IF kapun -45,54 dBm, az RF kapun -29,9 dBm jelszinttel jelent meg. A bemeneti RF jelszint- kimeneti jelszint karakterisztika a 32. ábrán látható.



32. ábra. A Diódás H keverő IP3 méréséről készített diagram

A négyzetes szorzó mérésekor kapott IP3 érték 12,32 dBm, a konverziós veszteség 5,62 dB volt. Az izolációk mérésekor az IF kapun -42,14 dBm-et, az RF kapun -25,4 dBm-et mértem. Az elsőrendű, valamint a harmadrendű termék bemeneti teljesítmény-kimeneti teljesítmény karakterisztikája a 33. ábrán látható.



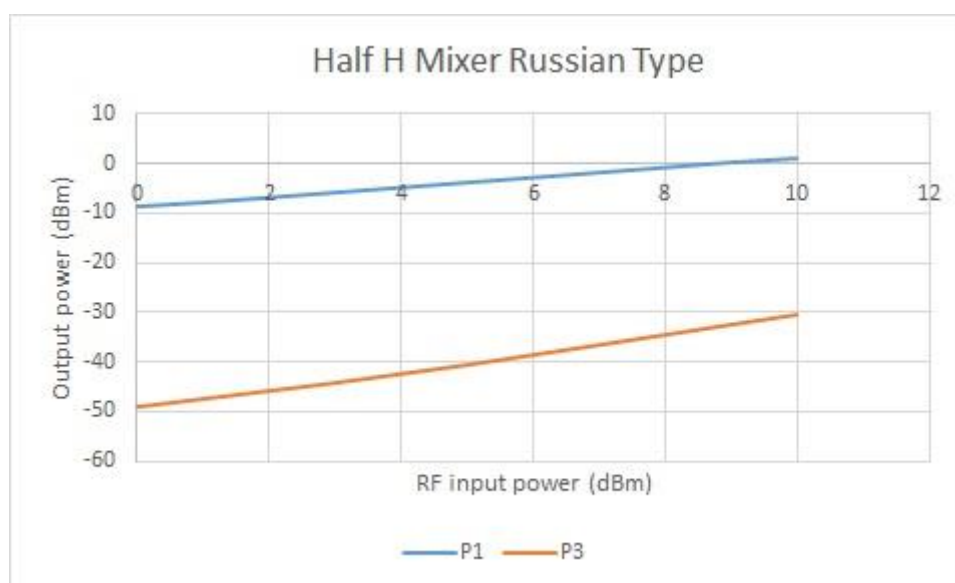
33. ábra. A négyzetes szorzó IP3 méréskor felvett karakterisztikája

A tranzistoros half H keverő mérésekor az IP3 értéke 11,89 dBm, a konverziós veszteség 5,59 dB volt. Az LO jel az IF kapun -29,88 dBm, az RF kapun -32,91 dBm jelszinttel jelent meg. Az elsőrendű termék, valamint a harmadrendű intermodulációs termék bemenő RF teljesítmény függvényében felvett karakterisztikája a 34. ábrán látható.



34. ábra. A tranzisztoros half H keverő IP3 mérésakor készített diagramja

Az orosz típusú half H keverőnél az IP3 11,59 dBm, a konverziós veszteség 5,46 dB volt. Az izolációk mérésekor az LO jel az IF kapun -31,11 dBm, -18,63 dBm teljesítménnyel volt jelen. A keverő elsőrendű, valamint harmadrendű kimeneti teljesítményének karakterisztikája a bemeneti RF teljesítmény függvényében a 35. ábrán látható.



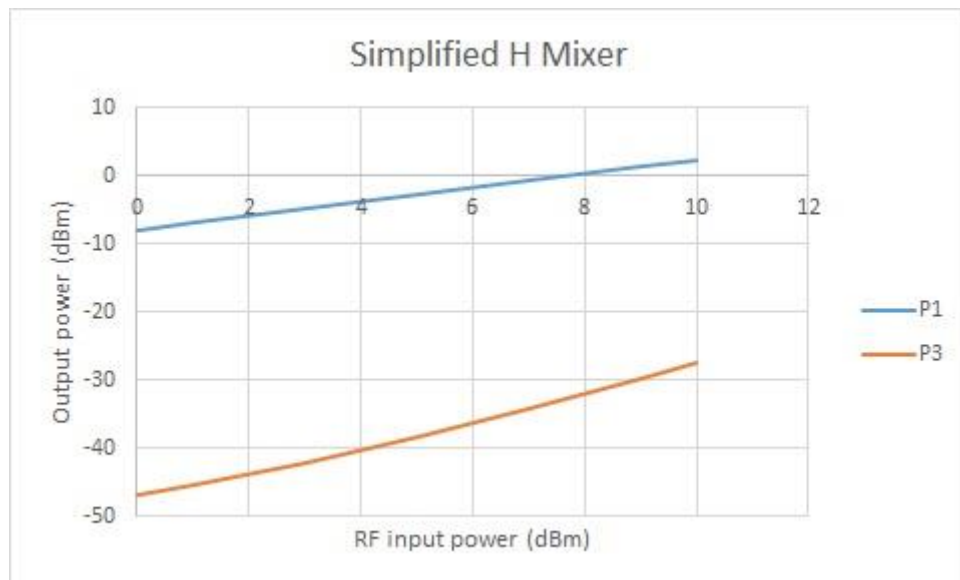
35. ábra. Az orosz half H keverő bemeneti RF- kimeneti teljesítmény karakterisztikái

A tranzisztoros H keverő IP3 mérésekor a kapott mérési eredmény 12,67 dBm, a konverziós veszteség 4,09 dBm volt. Az LO jel az IF kapun -54,62 dBm jelszinttel, az RF kapun -53,95 dBm jelszinttel jelent meg. A H keverő első-, ill. harmadrendű termékének karakterisztikája az RF teljesítmény függvényében a 36. ábrán látható.



36. ábra. A tranzisztoros H keverő elsőrendű és harmadrendű intermodulációs termékeinek karakterisztikája a bemeneti RF teljesítmény függvényében

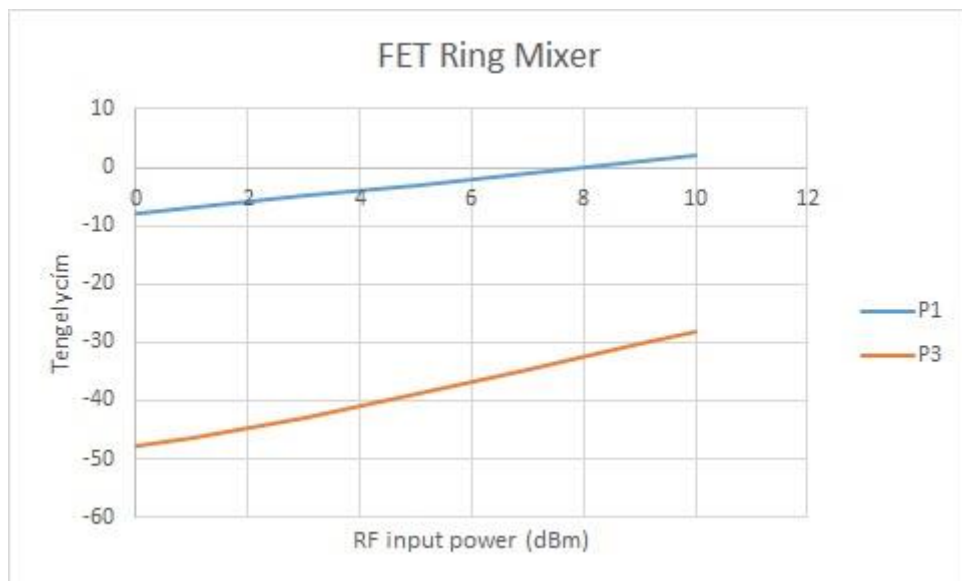
Az egyszerűsített tranzisztoros H keverő esetén az IP3 11,68 dBm, a konverziós veszteség 4,73 dB volt. Az LO jel 0 dBm RF teljesítmény mellett az IF kapun -67,99 dBm, az RF kapun -44,37 dBm jelszinttel jelenik meg. Az egyszerűsített H keverő elsőrendű-, valamint harmadrendű terméke a bemeneti RF teljesítmény függvényében a 37. ábrán látható.



37. ábra. Az egyszerűsített tranzisztoros H keverő elsőrendű-, valamint harmadrendű intermodulációs terméke a bemeneti RF teljesítmény függvényében

A FET ring keverő mérésekor az IP3-ra, valamint a konverziós vesztségre kapott értékek 11,85 dBm, illetve 4,87 dBm voltak. Az LO jel 0 dBm RF bemeneti teljesítmény mellett az IF kapun -76,65, az RF kapun -46,4 dBm jelszinttel jelent meg. Az elsőrendű-,

valamint a harmadrendű intermodulációs termék a bemeneti teljesítmény függvényében a 38. ábrán látható.



38. ábra. A FET ring keverő IP3 mérése során az elsőrendű-, illetve a harmadrendű intermodulációs termékhez készített diagramok

7 A mért és analizált értékek összehasonlítása

A keverők szimulációja az AWR Microwave Office szoftver segítségével történt, a szimulációkat Ladvánszky János végezte el. Az analízis során 4 MHz-es kéthangú RF gerjesztő jel volt beállítva, 1 kHz-es frekvenciakülönbséggel a két jel között. Az LO bemenetre 5 MHz-es, 20 dBm jelszintű jel került, a kimenet 9 MHz frekvenciánál volt vizsgálva.

A mért és analizált értékek összehasonlítása a 4. táblázatban látható.

A mért és analizált értékek összehasonlítása								
	Konverziós veszteség 0 dBm RF esetén		OIP3 0 dBm RF esetén		LO jelszint az IF kapun 0 dBm RF esetén		LO jelszint az RF kapun 0 dBm RF esetén	
	analizált	mért	analizált	mért	analizált	mért	analizált	mért
	dB	dB	dBm	dBm	dBm	dBm	dBm	dBm
Kétdiódás keverő	11,2	11,76	6,73	7,02	-15,8	-44,36	-28,1	-37,4
Négydiódás keverő	4,45	7,08	12,18	13,41	-23,28	-24,99	-55,83	-62,36
Nyolcdiódás triple balanced keverő	6,74	7,007	10,29	10,87	-22,99	-10,16	-65,62	-70,9
Nyolcdiódás rectifier keverő	5,24	7,726	13,84	15,29	-22,27	-22,27	-32,29	-48,51
Diódás fél H keverő	7,97	9,02	13,49	11,68	-21,38	-17,02	16,63	18,01
Diódás H keverő	7,76	5,93	12,27	11,41	-33,59	-29,9	-152,3	-45,54
Négynegyedes szorzó	5,48	5,59	13,5	12,45	-294,9	-25,4	-93,23	-42,14
Tranzisztoros fél H keverő	5,4	5,02	16	11,89	-58,11	-32,91	-19,33	-29,88

Orosz típusú fél H keverő	6,56	5,46	14,1	11,59	-58,79	-18,63	-19,6	-31,11
Tranzisztoros H keverő	4,86	4,09	11,84	12,67	-35,5	-53,95	-49,48	-54,62
Egyszerűsített H keverő	5,4	4,73	12,4	11,68	-58,05	-44,37	-71,24	-67,99
FET ring keverő	5,36	4,87	12,5	11,85	-55,82	-46,4	-71,32	-76,65

4. táblázat. A mért és analizált értékek összehasonlítása

Látható, hogy a mért és az analizált értékek között jó egyezés tapasztalható, az izolációkat kivéve. Ezeknél a paramétereknél az eltérést a félvezetők és a transzformátorok aszimmetriái okozzák.

8 Összegzés

A TDK dolgozatban tizenkét keverő került bemutatásra. A dolgozatban az áramkörök bemutatása után ismertettem a keverők működését, a felhasznált félvezető eszközök, valamint transzformátorok modellezéséhez szükséges mérő áramkörök felépítését, a mérendő modellparamétereket, valamint a mérési eredményeket, végezetül összehasonlítottam a mért és az analizált értékeket, melyek a konverziós veszteség és az IP3 esetében kis mértékben térnek el egymástól. Az izolációk mérése során tapasztalt nagyobb eltérések oka az egyes félvezetők és a modell közötti eltérések, valamint a transzformátorok aszimmetriái.

A keverőkön végzett mérések során a konverziós veszteség, az IP3, valamint az LO-IF és LO-RF kapuk közötti izolációkat vizsgáltam. A mért értékek azt mutatták, hogy a legkisebb konverziós veszteséggel a tranzisztoros H keverő, a legjobb IP3 értékkel pedig a rectifier típusú diódás keverő rendelkezik.

A munka célja egy olyan keverő keresése volt, amely megfelelő paraméterekkel rendelkezik ahhoz, hogy egy Radio over Fiber rendszerbe lehessen építeni. Mivel többcsatornás rendszerben szeretnénk használni a keverőt, ezért a fő szempont az összehasonlítás során az IP3 nagysága volt, ezért az általunk kiválasztott keverő a rectifier típusú nyolcdiódás keverő.

A munka folytatásaként a keverő mikrohullámon való megvalósítása következik.

9 Köszönetnyilvánítás

Köszönöm konzulenseimnek, Ladvánszky Jánosnak és Cseh Tamásnak a munka során nyújtott segítséget, mely nélkül a dolgozat nem készülhetett volna el.

10 Irodalomjegyzék

[1] David M Pozar: Microwave Engineering, Wiley, 2012

[2] Stephen A. Maas: Nonlinear Microwave and RF circuits, Artech House, 2003

[3] J. Ladvánszky, K. Osbáth: “Comparison of Semiconductor Mixers With High IP3”, submitted for revision at IEEE Transactions on Circuits and Systems, Part I