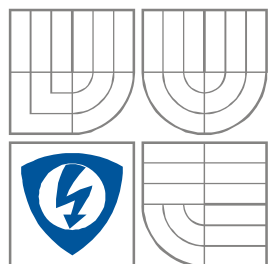


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DVOJITĚ VYVÁŽENÝ SMĚŠOVAČ – LABORATORNÍ PŘÍPRAVEK

DOUBLE-BALANCED MIXER – LABORATORY EQUIPMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Libor Dušek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Petr Vágner

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Libor Dušek
Bytem: Pražská 462, Jičín, 506 01
Narozen/a (datum a místo): 3. dubna 1984 v Jičíně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
 - ☒ diplomová práce
 - ☐ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Dvojitě vyvážený směšovač – laboratorní přípravek

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Petr Vágner

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. května 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Cílem této práce byla realizace dvojité vyváženého směřovače, který poslouží jako přípravek do laboratorní. Je zde podrobný popis dvojité vyváženého směřovače od teoretických základů, až po praktickou realizaci laboratorního přípravku. K realizaci byl použit integrovaný dvojitě vyvážený směšovač SA612A s možností použití maximálního vstupního signálu do kmitočtu až 500 MHz. Dále vnější krystalový oscilátor pracující na kmitočtu 32 MHz a dolní propust 5. řádu, která byla vložena mezi směšovač a oscilátor z důvodu odfiltrování vyšších harmonických složek. Práce je taktéž zaměřena na určení dvou základních parametrů dvojité vyvážených směšovačů, kterými jsou P_{-1dB} a $IP3$. Pro určení $IP3$ bylo zapotřebí realizovat další přípravek složený ze slučovače, pro sloučení dvou blízkých vstupních signálů a pásmového filtru 3. řádu, který slouží k výběru pouze zadaného rozsahu kmitočtů. Nakonec byl laboratorní přípravek sestaven a jeho parametry proměřeny.

ABSTRACT

The aim of this work was double-balanced mixer implementation, which will be used like laboratory equipment. This thesis deals with design of the double-balanced mixer from first theoretical principles to a practical design of a laboratory equipment. For the practical design the integrated mixer SA612 was used. Input signal to the mixer up to 500 MHz frequency can be used. For required operation external oscillator and fifth-order low pass filter were constructed. Oscillator was designed for fixed frequency 32 MHz. Fifth-order low pass filter was inserted between the mixer and the oscillator, because of filtering higher harmonics. The second aim of the work was measuring double-balanced mixer basic parameters, such as Compression Point (P_{-1dB}) and Intercept Point ($IP3$). For the $IP3$ measurement, another one device was required. It consists of the power combiner for mixing two frequency close signals and third-order bandpass filter, which selects required frequency band. Finally, the laboratory equipment was fabricated and its real parameters were measured.

KLÍČOVÁ SLOVA

Dvojitě vyvážený směšovač, oscilátor, propust, harmonické složky, směšovací produkt, dynamický rozsah, kompresní bod (P_{-1dB}), bod zahrazení ($IP3$), komprese, slučovač.

KEY WORDS

Double-balanced mixer, oscillator, filter, harmonics, mixer product, dynamic range, 1 dB Compression Point (P_{-1dB}), Third-Order Intercept Point ($IP3$), compression, power combiner.

DUŠEK, L. *Dvojitě vyvážený směšovač – laboratorní přípravek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 46 s., 5 příl.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Dvojitě vyvážený směšovač – laboratorní přípravek jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. května 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Vágnerovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 30. května 2008

.....
podpis autora

Obsah

Úvod.....	2
1 Teoretický rozbor a základní parametry směšovačů.....	3
1.1 Teoretické základy směšovačů.....	3
1.2 Klasifikace směšovačů.....	3
1.3 Základní parametry směšovačů.....	4
1.3.1 Směšovací dvojbranové a šumové parametry.....	4
1.3.2 Rušivé směšovací produkty a dynamický rozsah.....	5
1.3.3 Vzájemná izolace bran.....	6
1.4 Aditivní směšovače.....	7
1.5 Multiplikativní směšovače.....	8
1.6 Vyvážené směšovače.....	9
1.7 Směšovače s potlačením zrcadlového signálu.....	12
2 Detailní obvodové řešení laboratorního přípravku s integrovaným dvojité vyváženým směšovačem.....	13
3 Způsob měření důležitých parametrů dvojité vyváženého směšovače.....	17
3.1 Zobrazení spektra dvojité vyváženého směšovače.....	17
3.2 Určení P_{-1dB}	18
3.3 Určení $IP3$	19
4 Konstrukce přípravků.....	22
5 Měření na realizovaném přípravku.....	26
5.1 Proměření spektra dvojité vyváženého směšovače.....	26
5.2 Měřením určený bod P_{-1dB}	29
5.3 Měřením určený bod $IP3$	31
5.4 Shrnutí naměřených parametrů.....	35
6 Postup měření laboratorní úlohy.....	35
7 Závěr.....	36
Literatura.....	37
Seznam zkratk, symbolů a příloh.....	38
Přílohy.....	39

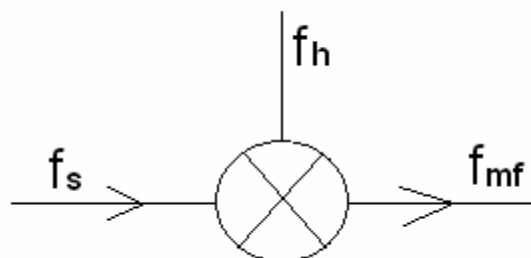
Úvod

Směšovačem je nazýván obvod, pomocí kterého se uskutečňuje přeměna kmitočtu vysokofrekvenčního signálu na jinou hodnotu, beze změny časového průběhu modulačního signálu a charakteru modulace. Této vlastnosti se využívá hlavně u rádiových vysílačů a přijímačů. Podle použitého směšovacího prvku je možné rozlišovat diodové směšovače, směšovače s diskrétními bipolárními tranzistory nebo s tranzistory FET a směšovače s integrovanými obvody. Z hlediska symetrie obvodové konfigurace se směšovače dále dělí na asymetrické směšovače (unbalanced), vyvážené směšovače (single balanced) a na dvojité vyvážené směšovače (double-balanced). Vyvážená zapojení jsou výhodná v tom, že na mezifrekvenčním výstupu mají potlačeny určité nežádoucí produkty směšování a u některých variant i parazitní amplitudový šum oscilátoru, který se jinak transponuje do mezifrekvenčního pásma. Jejich výhodou je i zlepšená izolace mezi jednotlivými branami. Nejjednodušší z nich je směšovač tvořený diferenčním zesilovačem (ze dvou nebo čtyř tranzistorů) se společným proudovým zdrojem. K realizaci byl vybrán integrovaný dvojitě vyvážený směšovač SA612A firmy Philips, jehož vnitřní obvodové zapojení je na principu Gilbertovy buňky, která přináší řadu výhod, jakými jsou např. snadná integrovatelnost a velká izolace signálů mezi branami. U tohoto typu směšovače lze použít vstupní signál do kmitočtu až 500 MHz, výstupní spektrum je velmi blízké směšovači ideálnímu a na našem trhu je tento typ snadno k dostání. Pro svou činnost potřebuje směšovač pomocný signál z oscilátoru. V důsledku směšování vzniká ve spektru obvodu také mnoho nežádoucích složek. To je možno minimalizovat použitím filtrů, které se umísťují na vstupní i výstupní brány směšovače. Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat dvojitě vyvážený směšovač, který poslouží jako přípravek do laboratorní. Je zde popsána teoretická část o směšovačích, dále návrh zapojení, jeho realizace a popsán způsob měření důležitých parametrů, jakými jsou např. $P_{-1\text{dB}}$ nebo $IP3$. K tomu bylo potřeba vytvořit další přípravek určený speciálně pro měření $IP3$. Jedná se o jednoduchý slučovač signálu a pásmovou propust k filtraci pouze požadovaného kmitočtového pásma. V další části práce jsou zaznamenány výsledky měření na realizovaném přípravku. Na závěr byl vytvořen postup měření, který slouží jako podklad pro laboratorní úlohu.

1 Teoretický rozbor a základní parametry směšovačů

1.1 Teoretické základy směšovačů

Směšovač je obvod, pomocí kterého se uskutečňuje přeměna (transpozice) kmitočtu vysokofrekvenčního signálu f_s na jinou hodnotu f_{mf} , beze změny časového průběhu modulačního signálu a charakteru modulace. Pro svoji činnost potřebuje směšovač pomocný signál z oscilátoru (heterodynu) f_h , se kterým tvoří měnič kmitočtu. Součástí směšovače je i výstupní pasivní filtr, potlačující nežádoucí směšovací produkty, případně i další filtry umístěné ve zbývajících branách. Pro vstupní signál se běžně používá zkratka *RF* (Radio Frequency), pro signál lokálního oscilátoru zkratka *LO* (Local Oscillator) a pro mezifrekvenční signál zkratka *IF* (Intermediate Frequency). Typický symbol pro směšovač je znázorněn na Obr. 1.



Obr. 1. Typický symbol pro směšovač [2].

Pro výstupní signál platí

$$f_{mf} = kf_h + lf_s, \quad (1)$$

kde k a l jsou koeficienty, které mohou nabývat hodnot celých čísel. Jestliže například $k = 1$ a $l = -1$, potom vztah (1) bude vypadat takto: $f_{mf} = f_h - f_s$. Je to případ, který se označuje jako rozdílový směšovací produkt. Jestliže sečteme absolutní hodnoty koeficientů k a l dostaneme řád směšovacího produktu. Seřadíme-li koeficienty k , l i se znaménkem, dostáváme vid směšovacího produktu. Uvedený rozdílový směšovací produkt je tedy druhého řádu a vidu 1, -1. Používá se především v přijímačové technice, protože vytváří nízký kmitočet f_{mf} a dobře se v následujících obvodech přijímače zpracovává. Tam kde je zapotřebí ze signálu s nízkým kmitočtem vytvořit signál s vysokým kmitočtem se používá produkt součtový. Je tomu tak například ve vysílací technice.

1.2 Klasifikace směšovačů

Směšovače používané v radioelektronice lze dělit podle různých hledisek. Podle použitého směšovacího prvku rozeznáváme diodové směšovače, směšovače s diskretními

bipolárními tranzistory nebo s tranzistory FET a směšovače s integrovanými obvody. Diodové směšovače se používají především v oblasti kmitočtů nad několik desítek GHz, kterou pomocí tranzistorů zatím nebylo možné zcela zvládnout. Často se však uplatňují i při nižších kmitočtech, kde se využívají některé jejich specifické přednosti, jako je velký dynamický rozsah apod. Směšovače s bipolárními tranzistory patřily v první fázi rozvoje polovodičové techniky mezi nejrozšířenější. Od začátku sedmdesátých let se však začaly ve funkci směšovačů používat také tranzistory FET, které se v porovnání s bipolárními tranzistory vyznačují především lepší linearitou a tím i menším obsahem parazitních produktů směšování. Kvalitním pokrokem je využití monolitických tranzistorových vyvážených směšovačů a dvojitých vyvážených směšovačů.

Podle fyzikálního principu, který se při směšování uplatňuje, je možné dělit směšovače do dvou skupin. Do první patří směšovače s nelineárním odporem, tj. variátorem, na který se přivádí součet vstupního signálu a signálu z oscilátoru. Do této kategorie, nazývané aditivní směšovače, patří směšovače s jedinou diodou, směšovače s jediným bipolárním tranzistorem a směšovače s tranzistorem FET. Tyto směšovače mají výstupní spektrum velmi bohaté na nežádoucí směšovací produkty a proto se používají pouze u jednoduchých přijímačů. Do druhé skupiny patří multiplikativní směšovače, tvořené prostým analogovým násobičem. Nejjednodušší směšovače tohoto typu využívají jako směšovací „násobící“ prvek např. dvojhradlový tranzistor FET. K multiplikativním směšovačům potom náleží většina směšovačů s monolitickými integrovanými obvody.

Z hlediska symetrie obvodové konfigurace se směšovače dělí na asymetrické směšovače (unbalanced), dále na vyvážené směšovače (single balanced) a na dvojité vyvážené směšovače (double balanced). Vyvážená zapojení jsou výhodná v tom, že na mezifrekvenčním výstupu mají potlačeny určité nežádoucí produkty směšování a u některých variant i parazitní amplitudový šum oscilátoru, který se jinak transponuje do mezifrekvenčního pásma. Jejich výhodou je i zlepšená izolace mezi jednotlivými branami.

1.3 Základní parametry směšovačů

1.3.1 Směšovací dvojbranové a šumové parametry

Jakýkoliv směšovač je možné popsat malosignálovými dvojbranovými parametry, nazývanými směšovací parametry. Tyto parametry se definují jako u zesilovačů, s tím rozdílem, že na vstupu směšovače se uvažuje signál se vstupním kmitočtem f_s a na mezifrekvenčním výstupu signál s kmitočtem f_{mf} . Známe-li směšovací čtyřpólové parametry směšovače, je možné pomocí nich vyjádřit jeho základní parametry. Jsou to směšovací (konverzní) zesílení A_{pc} (nebo směšovací ztráty $L_c = 1/A_{pc}$), vstupní a výstupní admitance (nebo činitel odrazu), přenosová admitance apod. Definice těchto veličin mají formálně stejný tvar jako u běžných lineárních dvojbranů, s tím rozdílem, že signály na vstupu mají vstupní kmitočet f_s a signály na výstupu se uvažují v mezifrekvenčním pásmu f_{mf} .

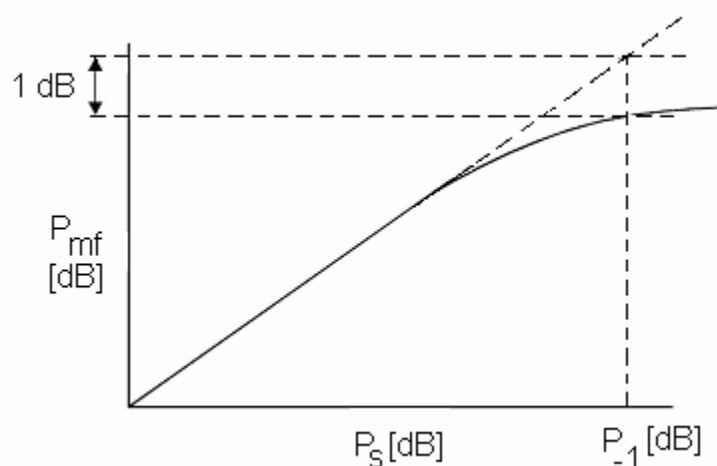
Šumové vlastnosti směšovačů jsou popsány soustavou jejich čtyř šumových parametrů, obdobně jako šumové parametry lineárních dvojbranů. Ty jsou závislé na parametrech směšovače a na úrovni oscilačního signálu. Pomocí těchto parametrů lze vyjádřit směšovací šumový činitel směšovačů F_c . Z něho se může dále stanovit směšovací šumové číslo F_c [dB], efektivní směšovací šumová teplota T_{ef} , směšovací míra šumu M_c atd. Šum

zdroje signálu může vnikat do mezifrekvenčního zesilovače kanálem užitečného signálu f_s , ale i parazitními kanály odpovídajícími zrcadlovému kmitočtu f_z . Kvůli tomu rozlišujeme u směšovačů jednokanálové šumové číslo F_{SSB} a dvoukanálové šumové číslo F_{DSB} .

1.3.2 Rušivé směšovací produkty a dynamický rozsah

Rušivé směšovací produkty jsou nežádoucí produkty směšování, které se vytvářejí spolu s požadovaným mezifrekvenčním signálem. Ty vznikají z harmonických vstupních signálů f_s , které nemusejí ležet v pásmu užitečných vstupních signálů a z harmonických oscilátorů f_h . Jejich potlačení se uskutečňuje pomocí filtrů zařazených v branách směšovače. Zásadní předností dvojité vyvážených směšovačů je jejich schopnost potlačit automaticky rušivé směšovací produkty vznikající podle relace (1), v případě, že číslo k , nebo l (nebo obě) jsou sudé. U jednoduše vyvážených směšovačů dochází k potlačení jenom některých těchto produktů. Teoreticky je možné realizovat také směšovače, potlačující rušivé směšovací produkty pro lichá čísla k resp. l , přitom však obvykle současně dochází i k potlačení užitečné mezifrekvenční odezvy, takže pro praxi se tato zapojení nehodí.

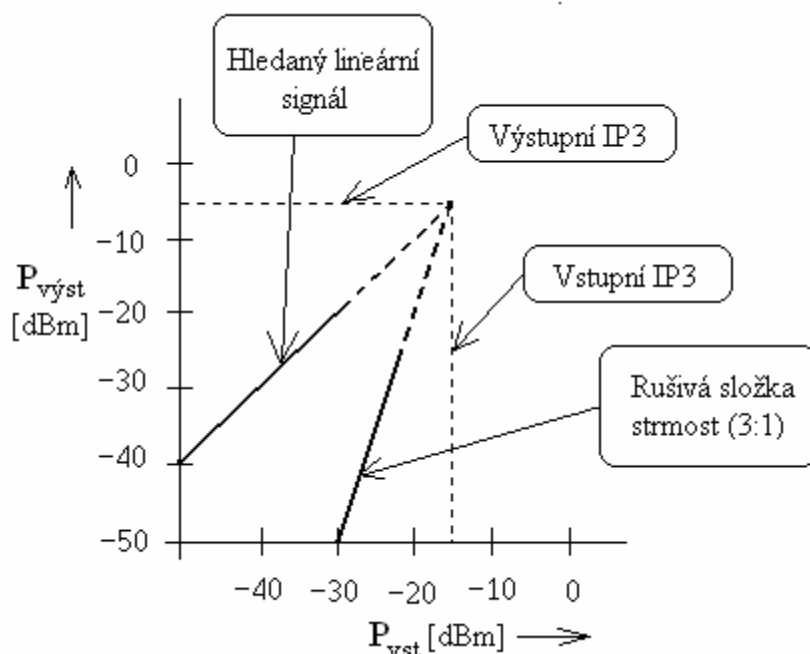
Důležitou charakteristikou každého směšovače je jeho dynamický rozsah. Nejlépe se popisuje pomocí grafu, který je znázorněn na Obr. 2. Na vodorovnou osu se vynáší úroveň vstupního vysokofrekvenčního výkonu P_s a na svislou osu úroveň mezifrekvenčního výkonu P_{mf} . V grafu je zobrazena především užitečná mezifrekvenční složka f_{mf} , vznikající z požadovaného vstupního signálu f_s a signálu z oscilátoru f_h . Ta je při nižších vstupních úrovních vyjádřena lineární závislostí, avšak při vyšších úrovních se začíná od lineárního průběhu odchylovat. Hranice mezi oběma oblastmi udává výkon P_{-1} , při němž dochází ke zvětšování konverzí ztrát o 1 dB oproti hodnotě při malých signálech. Výkon P_{-1} ohraničuje dynamický rozsah směšovače, DR_c shora. Do diagramu lze zakreslit i šumové pozadí směšovače, tj. jeho šumový výkon v mezifrekvenčním pásmu, který potom ohraničuje dynamický rozsah směšovače DR_c zdola.



Obr. 2. Dynamický rozsah směšovače [2].

Je-li na vstupu směšovače přítomen kromě užitečného signálu f_s ještě rušivý signál f_r , vytváří se ve směšovači nežádoucí směšovací produkt třetího řádu, určený relací $f_h \pm (2f_s \pm f_r)$. Jestliže je rušivý signál s kmitočtem f_r v blízkosti užitečného kmitočtu f_s , pak uvažovaná dvojtónová složka třetího řádu padne těsně vedle jmenovité mezifrekvence f_{mf} a působí rušení.

Je možné ji znázornit do grafu, a to v závislosti na úrovni obou výchozích vysokofrekvenčních signálů f_s a f_r , při specifikované úrovni oscilačního signálu. Průsečík idealizovaného přímkového průběhu dané rušivé složky (se strmostí 3:1) se základní složkou, určuje bod zahrazení směšovače $IP3$, který je znázorněn na Obr. 3. Pomocí tohoto průběhu je možné stanovit horní hranici dynamického rozsahu směšovače bez rušivých složek $SFDR_c$ (tato hranice je tedy definována bodem, kde uvažované rušivé složky 3. řádu právě vystupují nad šumové pozadí).



Obr. 3. Bod zahrazení směšovače [2].

Bod zahrazení může být definován buď jako vstupní nebo jako výstupní. Tady budeme uvažovat vstupní bod zahrazení. Intermodulační úroveň zkreslení je tedy:

$$P_{im} = P_{IP3} - 3(P_{IP3} - P_{RF}) , \quad (2)$$

kde P_{IP3} je úroveň pro vstupní bod zahrazení a P_{RF} je úroveň vstupního signálu.

Rozdíl mezi vstupní (RF) úrovní a úrovní zkreslení je tedy:

$$P_{RF} - P_{im} = 2(P_{IP3} - P_{RF}) . \quad (3)$$

1.3.3 Vzájemná izolace bran

Mezi dvěma branami se vzájemná izolace směšovače určí jako v decibelech vyjádřený poměr výkonu na jedné bráně, ku výkonu o témže kmitočtu, který je na jiné bráně. V praxi je důležité dosáhnout co možná nejlepší izolace mezi oscilátorovou bránou a mezifrekvenční bránou. Je to proto, aby relativně velký oscilační signál co nejméně zatěžoval následující mezifrekvenční zesilovače. Dobrá izolace mezi oscilátorovou bránou a vstupní bránou potom zabraňuje oscilačnímu signálu pronikat do vstupního zesilovače zařazeného před směšovačem, nebo dokonce do antény (takto vznikající vyzařování oscilátoru do antény je jedním z nejdůležitějších parametrů, sledovaných u rádiových přijímačů).

Označuje se LO/RF, kde LO je signál lokálního oscilátoru s kmitočtem f_h a RF je vstupní signál s kmitočtem f_s .

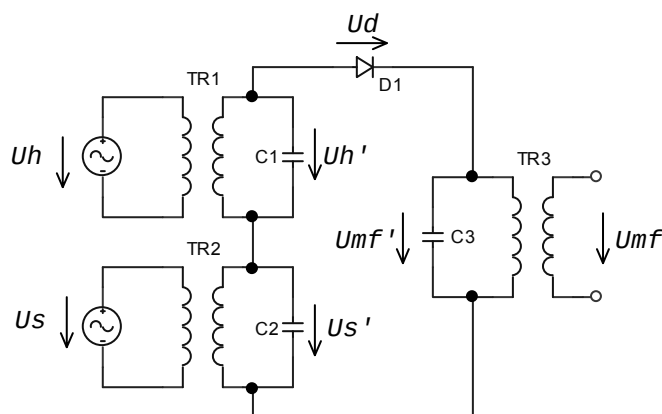
1.4 Aditivní směšovače

Název je odvozen podle toho, že na vhodný nelineární prvek působí součet obou napětí. Tedy napětí s kmitočtem f_s a napětí s kmitočtem f_h . Aditivní směšovače jsou výhodné svojí obvodovou jednoduchostí, ale mají i spoustu nevýhodných vlastností. Hlavní z nich je, že výstupní spektrum má spoustu nežádoucích směšovacích produktů. Podmínkou pro vytvoření užitečného produktu je, že směšovací prvek musí mít zakřivení charakteristiky alespoň druhého stupně. Na výstupu směšovače musí být zařazen filtr pro potlačení nežádoucích produktů, které při směšování vznikly. Nejjednodušším prvkem, který se pro aditivní směšování používá, je polovodičová dioda. Aditivní směšovač s polovodičovou diodou je zobrazen na Obr. 4. Na diodu D působí napětí

$$u_d(t) = u_s'(t) + u_h'(t) - u_{mf}'(t) = U_s \cos(\omega_s t) + U_h \cos(\omega_s t) - U_{mf} \cos(\omega_s \pm \omega_h t). \quad (4)$$

Jestliže je výstupní kmitavý okruh LC₃ směšovače naladěn na mezifrekvenční úhlový kmitočet $\omega_{mf} = \omega_h - \omega_s$, pak pro tento kmitočet vykazuje kmitavý okruh reálnou hodnotu odporu R . Pro všechny ostatní kmitočtové složky představuje zkrat.

Diodové směšovače se uplatňují především při kmitočtech vyšších jak 100 GHz. Používají se ale i na nižších kmitočtech a to z důvodu dosažení největšího dynamického rozsahu, což diodové směšovače umožňují. Naproti tomu mají malý přenos, který je menší než 1.



Obr. 4. Zjednodušené zapojení diodového aditivního směšovače [1].

Aditivní směšovače s bipolárními a unipolárními tranzistory se používají tam, kde je potřeba dosáhnout určitého směšovacího zisku. Nevýhodou je, že kvůli exponenciální charakteristice přechodu PN mezi bází a emitorem dochází ke vzniku nekonečně mnoha parazitních směšovacích produktů. Proto se moc nepoužívají. Při použití tranzistorů JFET dochází ke zlepšení, jelikož vzniká minimum nežádoucích složek díky kvadratické převodní charakteristice tranzistoru.

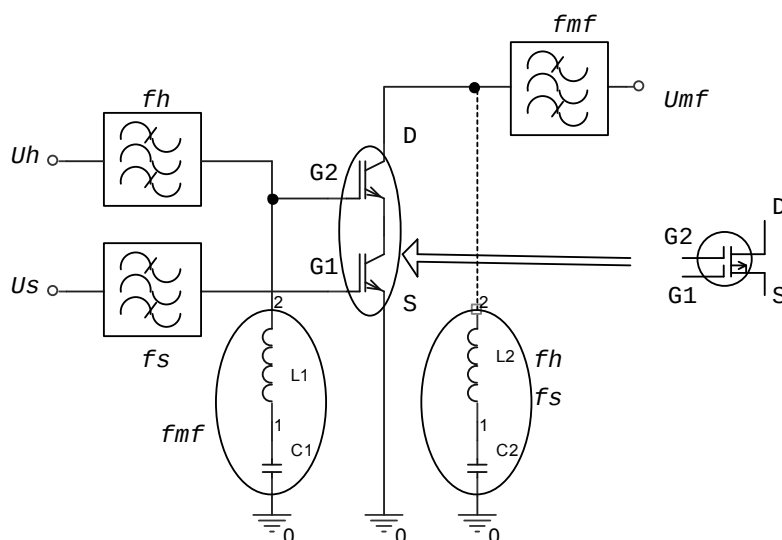
1.5 Multiplikativní směšovače

Jedná se o směšovače, kde výsledný směšovací produkt je roven součinu napětí signálu f_s a signálu heterodynu f_h . Dostáváme tím výstupní napětí

$$u_{mf}(t) = u_s(t)u_h(t) = \frac{U_s U_h}{2} [\cos(\omega_s t + \omega_h t) + \cos(\omega_s t - \omega_h t)], \quad (5)$$

kde U_s a U_h jsou amplitudy násobených napětí a ω_s resp. ω_h jsou jejich úhlové kmitočty. Vznikají opět parazitní směšovací produkty, které jsou způsobeny vlastnostmi násobícího prvku. Těchto nežádoucích produktů je ale podstatně méně než je tomu u směšovačů aditivních. Jedním z možných směšovacích prvků je například tranzistor MOSFET. Činnost směšovače se dá vysvětlit podle Obr. 5, na kterém je vidět, že se tranzistor MOSFET nahradí dvěma pomyslnými kaskádně spojenými tranzistory. Horní z nich přenáší signál heterodynu o kmitočtu f_h na kolektor D dolního tranzistoru. Jedná se tedy o emitorový sledovač. Dolní tranzistor potom provádí vlastní směšování. Působí jako kolektorově buzený směšovač. Vznikne tedy mezifrekvenční signál, který je ještě dále zesílen. To provádí ještě horní tranzistor a to v zapojení SG. Jeho hradlo G pro tento signál musí být důkladně uzemněno, což realizuje filtr (sériový rezonanční obvod), laděný na mezifrekvenci f_{mf} . Pro dosažení dokonalé izolace mezi vstupní a oscilační bránou a bránou mezifrekvenční se pro signály f_h a f_s filtrem uzemní kolektor D .

Multiplikativní směšovače se používají na nízkých, středních i vysokých kmitočtech. Dají se vytvořit i s bipolárními tranzistory. Pak se jedná o tzv. složená zapojení.

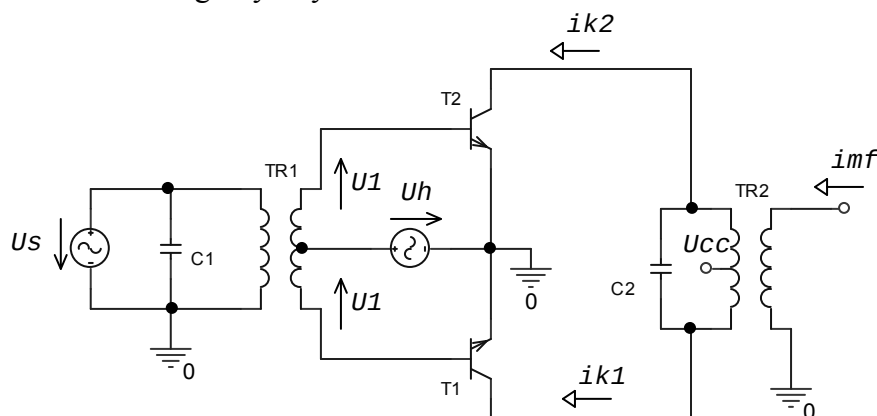


Obr. 5. Podstata činnosti multiplikativního směšovače s tranzistorem MOSFET [1].

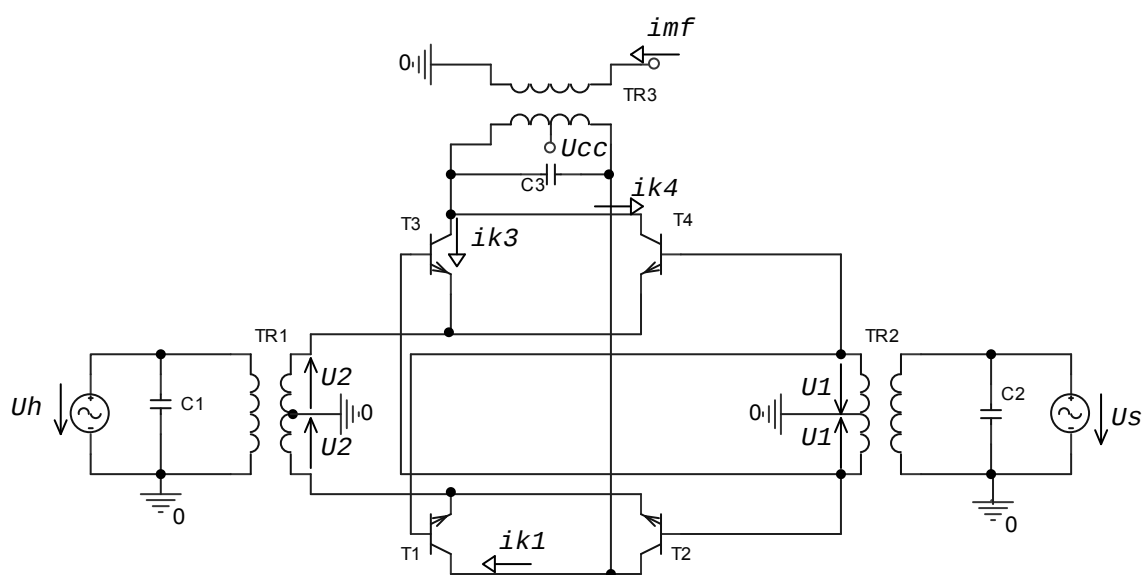
1.6 Vyvážené směšovače

Tyto směšovače mají tu výhodu, že potlačují na mezifrekvenčním výstupu určité nežádoucí produkty směšování a u některých variant i parazitní amplitudový šum oscilátoru, který se jinak transponuje do mezifrekvenčního pásma. Jejich výhodou je i zlepšená izolace mezi jednotlivými branami. Vzhledem k tomu, že u všech směšovačů odpovídají směšovací produkty druhé, třetí, čtvrté, atd. mocnině napětí podle toho, zda ten daný produkt vznikl následkem nelinearity druhého, třetího, čtvrtého, atd. řádu, dochází k tomu, že čím vyšší úroveň napětí se na směšovači objeví, tím větší bude nebezpečí vzniku parazitních směšovacích produktů vyšších řádů. Proto se tento typ směšovačů jeví jako nejvýhodnější, jelikož některé tyto nežádoucí produkty směšování potlačí. Dvojitě vyvážené směšovače potlačí těchto nežádoucích produktů ještě více.

Příklady vyvážených směšovačů jsou vidět na Obr. 6 a Obr. 7. U dvojitě vyváženého tranzistorového směšovače z Obr. 7 je nevýhodou to, že potřebujeme čtyři tranzistory, které musí mít shodné parametry v celém dynamickém rozsahu (což je těžko splnitelné) a především dva symetrické transformátory. Proto se vyrábějí směšovače monolitické, kde je symetrie zaručena technologií výroby.

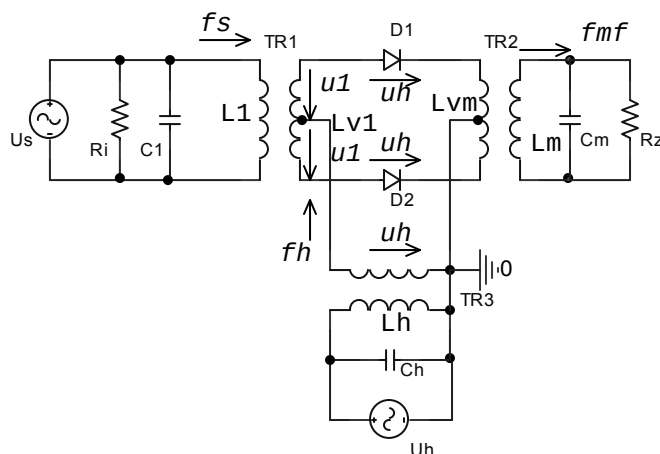


Obr. 6. Principiální zapojení vyváženého tranzistorového směšovače [1].



Obr. 7. Principiální zapojení dvojitě vyváženého tranzistorového směšovače [1].

Používají se i diodové vyvážené směšovače, které mají velký dynamický rozsah, což znamená, že např. signál kolem 1V ještě nezpůsobuje nelineární zkreslení. Tato vlastnost je u těchto typů směšovačů jejich dominantou. Nevýhodou těchto směšovačů je však požadavek velké úrovně napětí heterodynu, což znamená možnost jeho pronikání do ostatních částí přijímače. Např. u vyváženého diodového směšovače zobrazeného na Obr. 8 je to způsobeno tím, že signálové napětí je přiváděno na diody v protifázi a oscilátorové ve fázi. Výsledný produkt je z obou diod odváděn rovněž v protifázi, z čehož vyplývá, že uvedený směšovač potlačuje signál heterodynu na výstupu i vstupu. Potlačení napětí heterodynu je podle dosažené symetrie zapojení $30 \div 40$ dB.



Obr. 8. Vyvážený diodový směšovač [1].

Pro vyvážený diodový směšovač na Obr. 8 platí, že transformátory TR_1 a TR_2 mají sekundární vinutí vinuta bifilárně. TR_1 transformuje odpor zdroje signálu R_i na potřebnou velikost R_1 , podobně TR_2 transformuje R_z na R_z' . Při tom R_1 a R_z' závisí na odporech diod přibližně podle vztahu

$$R_1 = R_z' = \sqrt{R_p R_{zp}}, \quad (6)$$

kde R_p je odpor diody v propustném směru a R_{zp} je odpor diody v závěrném směru. Protože $R_p \approx 50 \Omega$ a $R_{zp} \approx 50 \text{ k}\Omega$ a protože obvykle R_i i R_z jsou rezistory o odporu asi $1,5 \text{ k}\Omega$, musí mít převody vzestupný poměr. Výstupní spektrum tohoto směšovače neobsahuje sudé harmonické vstupního signálu ani s nimi vázané intermodulační produkty. Dále neobsahuje liché harmonické kmitočtu f_h .

Podle podmínky (6), která je dána pro stav výkonového přizpůsobení dostaneme tzv. směšovací účinnost, což je poměr výkonu žádaného směšovacího produktu k výkonu, který směšovač odebírá ze zdroje signálu. Platí pro ni vztah

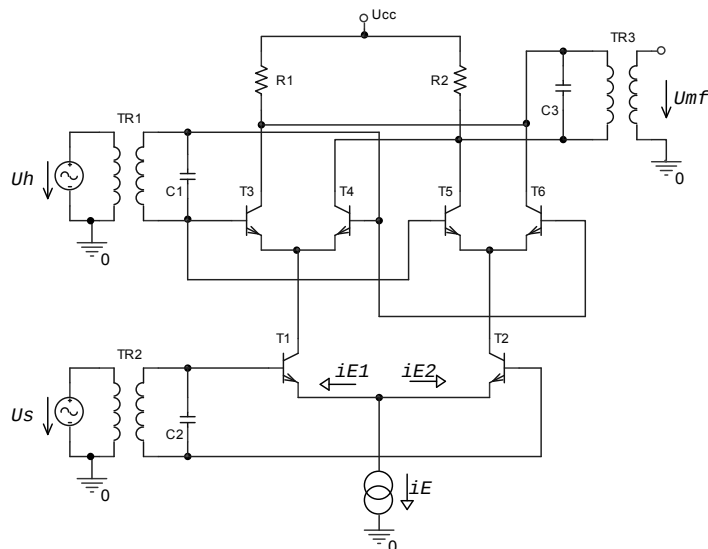
$$\eta_{sm} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\frac{R_{zp}}{R_p} - 1}{\frac{R_{zp}}{R_p} + 1}} \quad (7)$$

Optimální směšovací účinnost je $\eta_{sm} = \frac{1}{\pi} = 0.318$. To je tehdy, když bude hodně velký poměr R_{zp}/R_p .

Vyvážené a dvojité vyvážené monolitické směšovače nazýváme složené. Jsou to především směšovače multiplikativní. Nejjednodušší z nich je směšovač tvořený diferenčním zesilovačem (ze dvou nebo čtyř tranzistorů) se společným proudovým zdrojem. Tranzistory diferenčního zesilovače zesilují signálové napětí, přičemž strmost jejich převodních charakteristik je řízena proudovým zdrojem, který je ovládán napětím heterodynu. Dvojitě vyvážený směšovač z Obr. 10, nazývaný Gilbertova buňka, bývá součástí složitějších integrovaných obvodů nebo bývá realizován jako samostatný směšovač. Typickými představiteli jsou SO42P (SIEMENS) nebo SA612 (PHILIPS). Funkci obvodu lze popsat následovně. Přivedeme-li signál na bázi tranzistoru T_1 , tak vzhledem k tomu, že báze T_2 je uzemněná, poteče střídavý proud kolektorem tranzistoru T_1 . Kvůli zdroji konstantního proudu I_E musí být při zanedbání proudů bází součet kolektorových proudů tranzistorů T_1 a T_2 v libovolném časovém okamžiku konstantní, takže kolektorový proud tranzistoru T_2 musí být stejně velký jako proud tranzistoru T_1 , ale musí být v protifázi. Díky tomu může být vstup pro signál symetrický i nesymetrický. Rovněž výstup může být zapojen jako symetrický i nesymetrický. Celé zapojení pracuje jako dvojitá symetrická soustava. Kvůli tomu, že dvojice tranzistorů T_3/T_6 a T_4/T_5 pracují do společné zátěže R_1 resp. R_2 a přitom jsou buzeny protifázově jak proudy tekoucí z kolektorů T_1 a T_2 , tak proudy tekoucí z heterodynu, se napětí U_h ani U_s neuplatní na výstupu směšovače. Tam se objeví pouze kmitočtové složky $|xf_s \pm yf_h|$, kde x a y jsou celá lichá čísla.

11

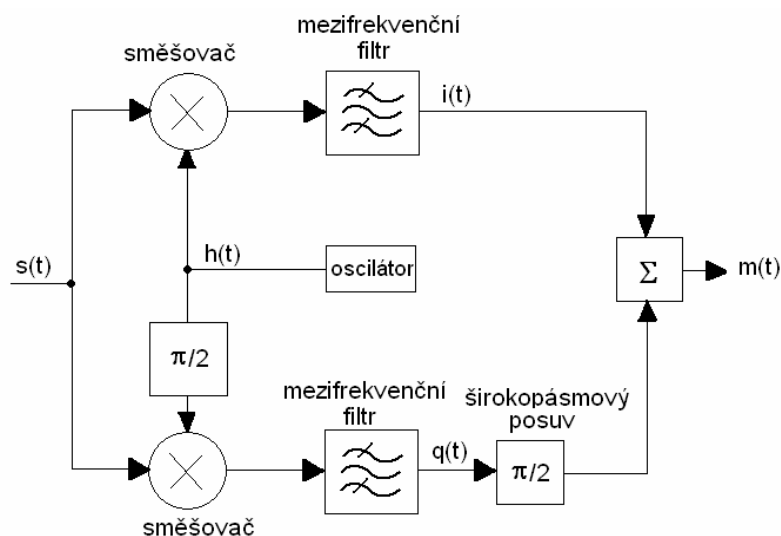
snadná integrovatelnost a velká izolace signálů mezi branami. Nevýhodou je nižší dynamický rozsah a nižší pracovní kmitočet.



Obr. 10. Dvojitě vyvážený složený multiplikativní směšovač se symetrickými vstupy [1].

1.7 Směšovače s potlačením zrcadlového signálu

Při směšování se směšovací produkt o kmitočtu f_{mf} vytváří nejen z užitečného vstupního signálu s kmitočtem f_s , ale i ze zrcadlového signálu s kmitočtem f_z . K potlačení zrcadlového signálu dochází obvykle v preselektoru, ale pokud je mezifrekvenční kmitočet nízký a kmitočty f_s a f_z blízké tak, že zrcadlový signál nelze potlačit v preselektoru, používá se k potlačení zrcadlového signálu směšovač se samočinným potlačením zrcadlového produktu *IRM* (Image Reject Mixer), který je vidět na Obr. 11. Ten vznikne vhodným zapojením dvou běžných směšovačů.



Obr. 11. Směšovač se samočinným potlačením zrcadlového signálu [1].

2 Detailní obvodové řešení laboratorního přípravku s integrovaným dvojítě vyváženým směšovačem

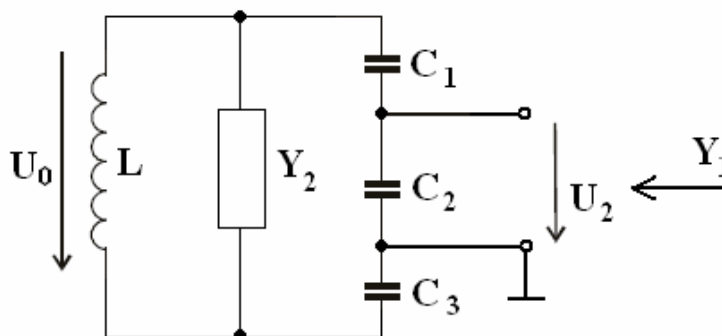
Pro jeho realizaci byl vybrán integrovaný dvojítě vyvážený směšovač SA612A firmy Philips, který je na našem trhu snadno k dostání a u něhož je možné použít vstupní signál do kmitočtu až 500 MHz. Jeho blokové schéma je znázorněno na Obr. 13. Vstupy 1 a 2 můžou být použity zaměnitelně, ale neměly by být ovlivňovány vnějším stejnosměrným napětím. Jelikož vstupní impedance směšovače je 1,5 kΩ, je provedena transformace impedance 50 Ω na 1500 Ω z důvodu impedanceho přizpůsobení k harmonickému generátoru na vstupu. Je využito transformačních vlastností rezonančních obvodů. Na Obr. 12 je do rezonančního obvodu, který je vyladěn do rezonance, připojena admitance Y_2 . Na vstupní odbočce obvodu se tato admitance jeví jako admitance Y_1 , přičemž platí transformační vztah

$$Y_1 = \frac{Y_2}{p^2}. \quad (8)$$

Transformační činitel p , v našem případě pro kapacitní vazbu, byl odvozen z poměru napětí U_2 a napětí U_0 a lze ho určit ze vztahu

$$p = \frac{C_1 \cdot C_3}{C_1 \cdot C_2 + C_1 \cdot C_3 + C_2 \cdot C_3} \cong \frac{U_2}{U_0} < 1. \quad (9)$$

Rezonanční obvod je konstruován tak, že umožňuje přesné doladění rezonančního kmitočtu změnou polohy jádra cívky, případně roztažením nebo stlačením závitů u samonosné cívky. Výstupy směšovače 4 a 5 jsou připojeny k napájecímu napětí směšovače přes 1,5 kΩ rezistory. Jsou přizpůsobeny tedy stejně jako vstupy.



Obr. 12. Transformace admitance [8].

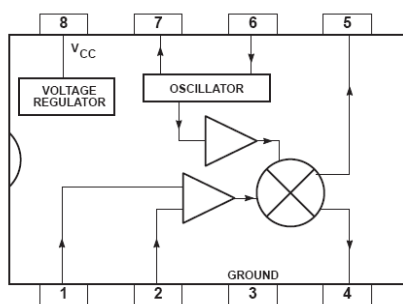
Dále je použito k realizaci směšovače vnějšího oscilátoru, který je zobrazen na Obr. 15. Jedná se o krystalový oscilátor s uzemněnou bází, nazývaný též 1/2 Butler, pracujícím na kmitočtu 32 MHz. Krystal tedy pracuje na 3. harmonické. Je to oscilátor pro sériovou rezonanci krystalové jednotky. Použitý tranzistor by měl mít mnohem vyšší tranzitní kmitočet než je pracovní kmitočet oscilátoru, kvůli dobré stabilitě. Dále by měl mít malé vstupní a výstupní kapacity, kvůli minimalizaci vlivu parazitních reaktancí na obvod krystalové jednotky. Byl vybrán tranzistor BFR92A, který má vhodný tranzitní kmitočet $f_T = 5$ GHz a malé vstupní a výstupní kapacity. Tento typ oscilátoru je náchylný na parazitní oscilace, zvláště při ladění. Z těchto důvodů vyžaduje velice dobře navržený a optimalizovaný

krystal a také dobrou stabilizaci kolektorového proudu. Do rezonance se oscilátor vyladí kapacitním trimrem C_{11} a induktorem L_3 .

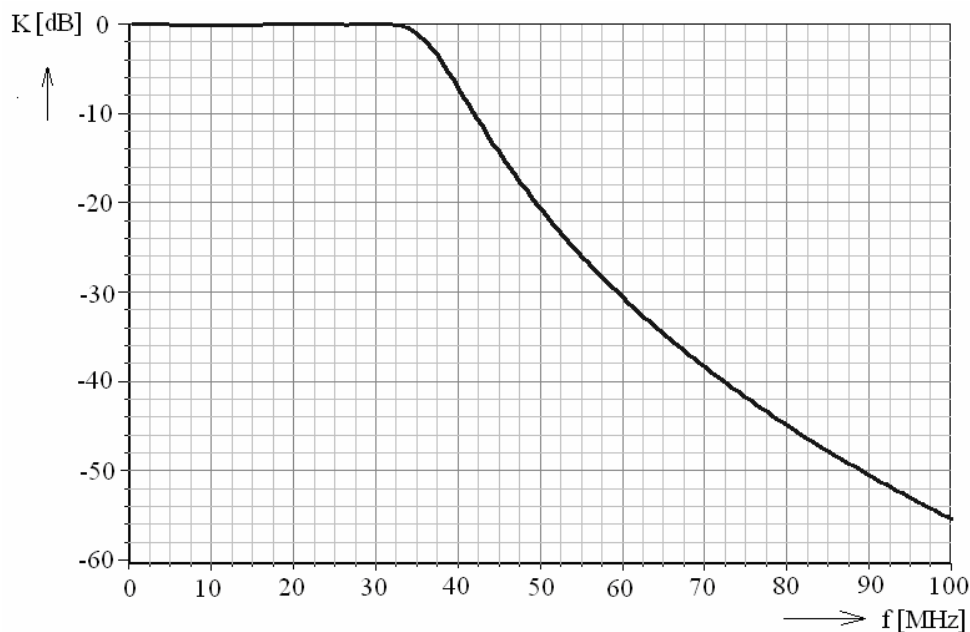
Signál oscilátoru je přiveden na *Pin 6* směšovače přes kondenzátor C_8 , který nepropustí stejnosměrnou složku. Dále přes dolní propust, aby se odfiltrovaly vyšší harmonické a aby bylo výsledné spektrum na výstupu směšovače přehlednější. Dolní propust je 5. řádu, navržena Čebyševovou aproximací jako π -článek s dolním kmitočtem $f_d = 32$ MHz a je tvořena prvky L_1, L_2, C_5, C_6, C_7 . Jeho frekvenční charakteristika je zobrazena na Obr. 14.

Integrovaný směšovač SA612A musí být pro správnou funkci napájen stejnosměrným napětím v rozsahu $U_{ss} = 4,5-9$ V. Je tedy použito pro jeho napájení zdroje napětí $U_{ss} = 12$ V a toto napětí je stabilizováno pomocí integrovaného stabilizátoru 78L08 na 8V. Přímě na vstupu napájení je ještě v sérii umístěna ochranná dioda proti přepólování. Součástky C_{15}, C_{16}, C_{19} a TL_2 tvoří obvod, který zabraňuje pronikání VF složek do napájecího zdroje napětí.

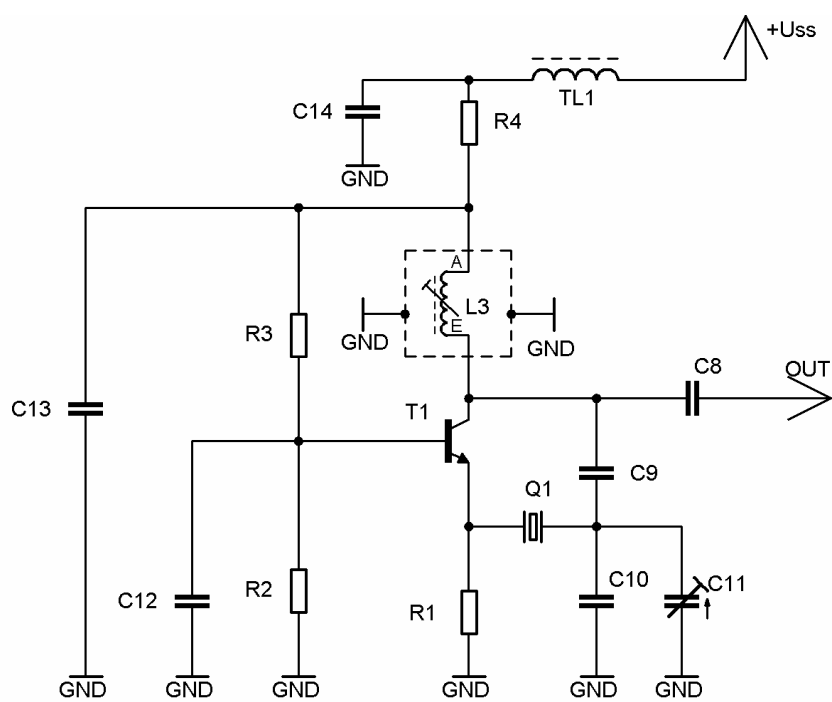
Celkové schéma zapojení dvojité vyvážené směšovače je zobrazeno na Obr. 16.



Obr. 13. Blokové schéma SA612A [6].



Obr. 14. Frekvenční charakteristika dolní propusti.



Obr. 15. Krystalový oscilátor [7].

3 Způsob měření důležitých parametrů dvojité vyváženého směšovače

Kromě zobrazení spektra dvojité vyváženého směšovače se budou určovat dva jeho základní parametry, kterými jsou P_{-1dB} a $IP3$.

3.1 Zobrazení spektra dvojité vyváženého směšovače

Pro vlastní zobrazení spektra je použito spektrálního analyzátoru např. R&S FSL3, který je připojen na výstup dvojité vyváženého směšovače (IF). Ze zobrazeného spektra je změřeno i potlačení jednotlivých nedokonale potlačených složek.

Spektrum je možné vypočítat i teoreticky podle rovnice (1), tedy $f = |m \cdot RF + n \cdot LO|$. Pro vstupní kmitočet $RF = 42,7$ MHz, oscilační kmitočet $LO = 32$ MHz je $IF = 10,7$ MHz a pro $m, n = -2, -1, 0, 1, 2$ vyjdou složky na těchto kmitočtech:

$$f_1 = |0 \cdot RF + 1 \cdot LO| = 32 \text{ MHz}$$

$$f_2 = |0 \cdot RF + 2 \cdot LO| = 64 \text{ MHz}$$

$$f_3 = |1 \cdot RF + (-2) \cdot LO| = 21,3 \text{ MHz}$$

$$f_4 = |1 \cdot RF + (-1) \cdot LO| = 10,7 \text{ MHz}$$

$$f_5 = |1 \cdot RF + 0 \cdot LO| = 42,7 \text{ MHz}$$

$$f_6 = |1 \cdot RF + 1 \cdot LO| = 74,7 \text{ MHz}$$

$$f_7 = |1 \cdot RF + 2 \cdot LO| = 106,7 \text{ MHz}$$

$$f_8 = |2 \cdot RF + (-2) \cdot LO| = 21,4 \text{ MHz}$$

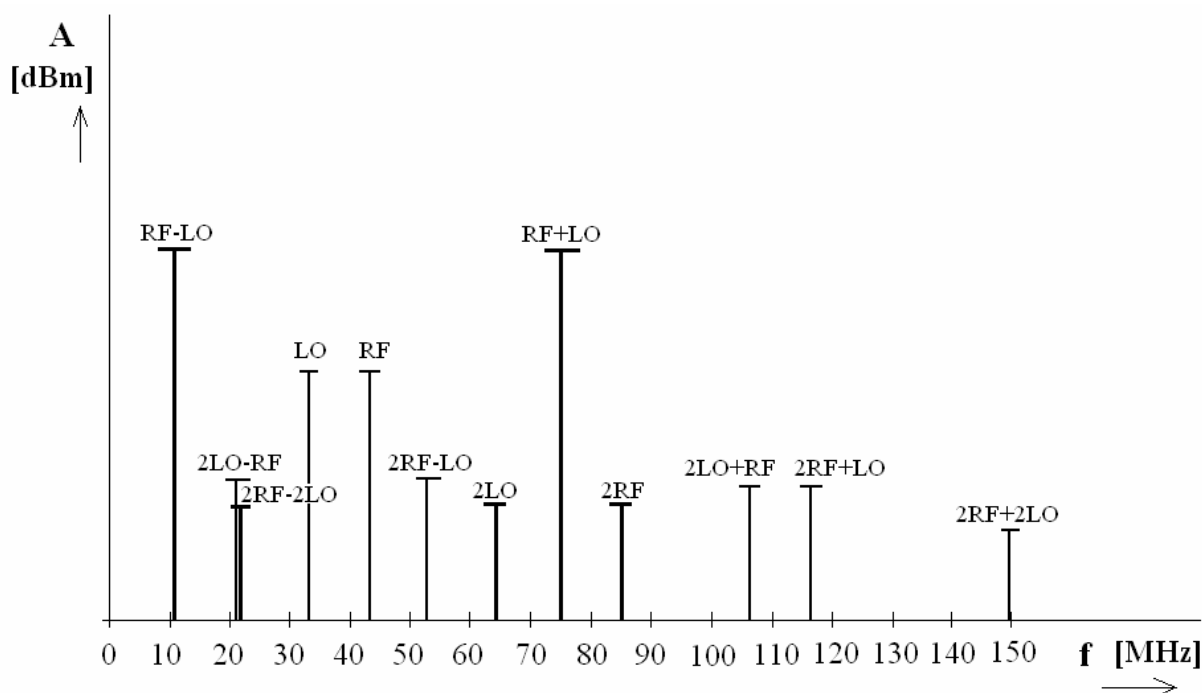
$$f_9 = |2 \cdot RF + (-1) \cdot LO| = 53,4 \text{ MHz}$$

$$f_{10} = |2 \cdot RF + 0 \cdot LO| = 85,4 \text{ MHz}$$

$$f_{11} = |2 \cdot RF + 1 \cdot LO| = 117,4 \text{ MHz}$$

$$f_{12} = |2 \cdot RF + 2 \cdot LO| = 149,4 \text{ MHz}$$

Vypočítané spektrum je zobrazeno na Obr. 17.



Obr. 17. Vypočítané spektrum směšovače pro $RF = 42,7$ MHz a $LO = 32$ MHz.

Pokud se toto spektrum zobrazí pomocí spektrálního analyzátoru, tak by měly být u dvojité vyváženého směšovače potlačeny základní a všechny vyšší harmonické složky jak vstupního, tak i oscilačního signálu. Dále jsou potlačeny intermodulační produkty vázané na sudé harmonické vstupního signálu a rovněž na sudé harmonické oscilačního signálu.

3.2 Určení P_{-1dB}

Základem pro určení P_{-1dB} je proměření charakteristiky $P_{out} = f(P_{in})$, z níž je odečten následně tento bod. Hodnoty kmitočtů jsou ponechány stejné jako v předchozím bodě měření, tedy $RF = 42,7$ MHz, $LO = 32$ MHz, $IF = 10,7$ MHz. Na mikrovlnném generátoru např. Agilent 83752A je nastaveno P_{in} přímo v dBm a spektrálním analyzátozem např. R&S FSL3 je na výstupu odečítáno P_{out} v dBm. Dále je z těchto hodnot spočítána komprese podle rovnice (10) a zobrazena závislost $COMP. = f(P_{in})$. Tato závislost určuje kdy je závislost $P_{out} = f(P_{in})$ lineární, jelikož v lineárním úseku je zisk konstantní a je nezávislý na hladině výkonu. Když se zisk začne snižovat, jedná se o kompresi (zkreslení amplitudy signálu). V této nelineární části není už dále výstup sinusový. Odečtení P_{-1dB} ze sestrojené závislosti $P_{out} = f(P_{in})$ je patrné z Obr. 2. Závislost $COMP. = f(P_{in})$ je zobrazena na Obr. 18.

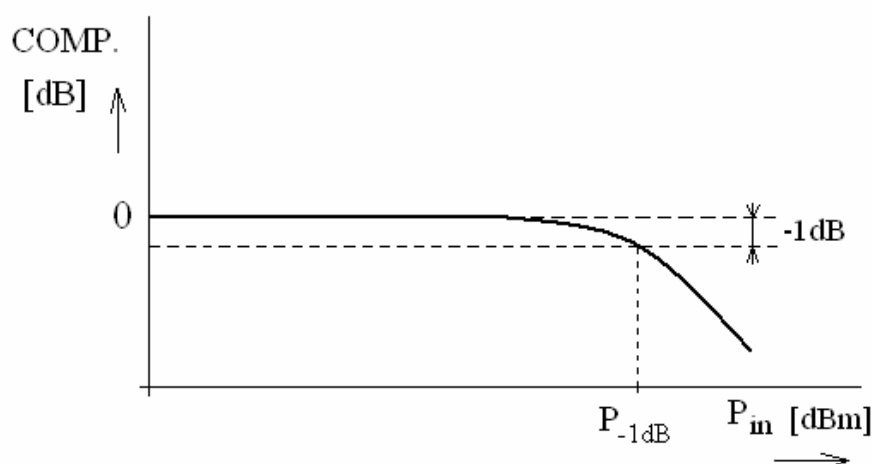
$$COMP. = [P_{out} - P_{in}] - G \quad [\text{dB}], \quad (10)$$

kde G je konverzní zisk měřený v lineární oblasti.

Tabulka pro měření tedy vypadá následovně:

P_{in} [dBm]	...	...	...	...	...	...
P_{out} [dBm]	...	...	...	...	...	...
$COMP.$ [dB]	...	...	...	...	...	...

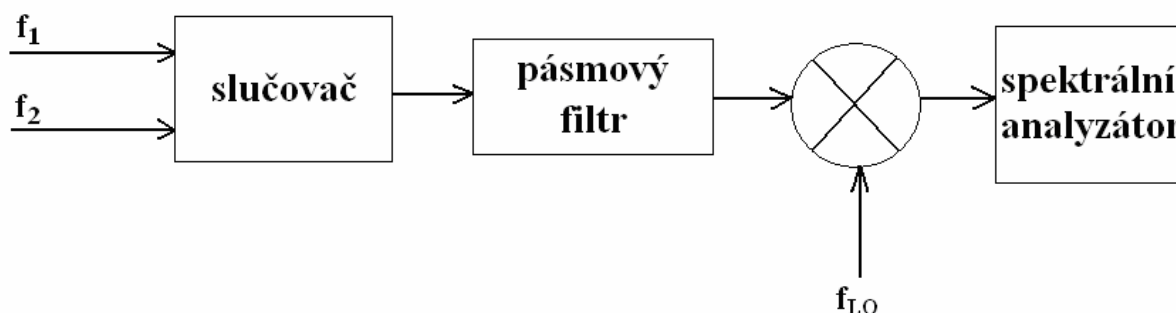
Tab. 1. Hodnoty k sestrojení charakteristik $P_{out} = f(P_{in})$ a $COMP. = f(P_{in})$.



Obr. 18. Graf závislosti komprese na vstupním výkonu.

3.3 Určení $IP3$

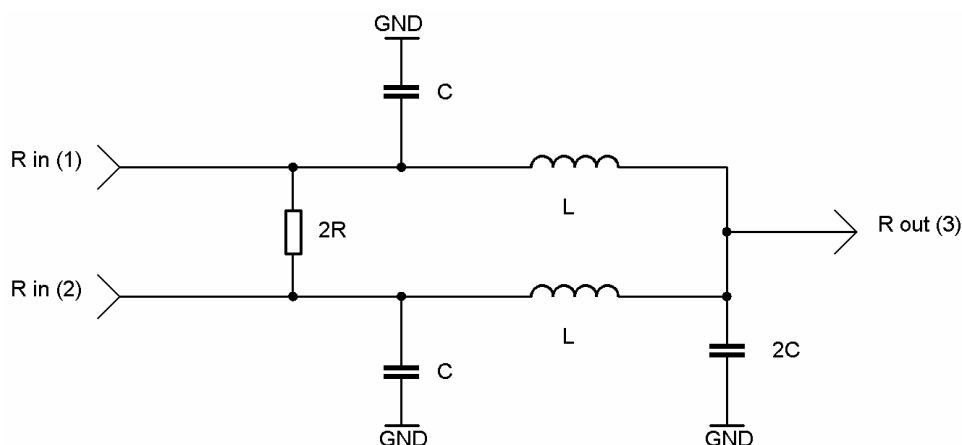
Bod zahrazení směšovače $IP3$ se určuje, jestliže je na vstupu přítomen kromě užitečného signálu f_s ještě rušivý signál f_r , který je blízký užitečnému signálu f_s . Proto je potřeba na vstup dostat dva kmitočtově blízké signály. Použity jsou signály o kmitočtech $RF_1 = 42$ MHz a $RF_2 = 43$ MHz. Schéma zapojení pro měření $IP3$ je znázorněno na Obr. 19.



Obr. 19. Blokové schéma zapojení pro měření $IP3$ [3].

Pomocí slučovače, který je znázorněn na Obr. 20 se sloučí dva vstupní signály. Za slučovačem je umístěn pásmový filtr 3.řádu, který slouží k výběru pouze zadaného rozsahu kmitočtů. Jedná se o pásmovou propust navrženou pomocí Čebyševovy aproximace v programu Serenade na střední kmitočet $f_{str} = 42,5$ MHz s šířkou pásma 5 MHz. Cívky jsou navinuty na feritovém jádře, aby bylo dosaženo velkého činitele jakosti. Schéma pásmové propusti je znázorněno na Obr. 22 a na Obr. 23 jeho frekvenční charakteristika.

Při měření se zobrazí spektrum na výstupu směšovače a z něho se bude následně pro různé hodnoty vstupního výkonu odečítat velikost spektrálních složek 3. řádu označených A_3 , jak je to patrné na Obr. 24. Měření musí probíhat v lineární oblasti směšovače. Z těchto hodnot se následně sestrojí grafická závislost dané rušivé složky 3. řádu v závislosti na vstupním výkonu. Průsečík idealizovaného přímkového průběhu dané rušivé složky se základní složkou, určuje bod zahrazení směšovače $IP3$.



Obr. 20. Schéma slučovače [3].

Hodnoty pasivních prvků slučovače se vypočítají podle vztahů

$$L = \frac{R}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f} [H], \quad (11)$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot R} [F], \quad (12)$$

kde R je impedance na všech třech portech (50Ω) a f je střední hodnota kmitočtu dvou vstupních signálů ($f = \frac{RF_1 + RF_2}{2} = \frac{42 + 43}{2} [MHz] = 42,5 MHz$).

Podle rovnice (11) se vypočítají hodnoty cívek

$$L = \frac{R}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f} = \frac{50}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 42,5 \cdot 10^6} [H] = 0,265 [\mu H].$$

Podle rovnice (12) se vypočítají hodnoty kondenzátorů

$$C = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot R} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot 42,5 \cdot 10^6 \cdot 50} [F] = 52,96 [pF].$$

Podle řady E12 byla vybrána hodnota kondenzátoru $C = 56 pF$.

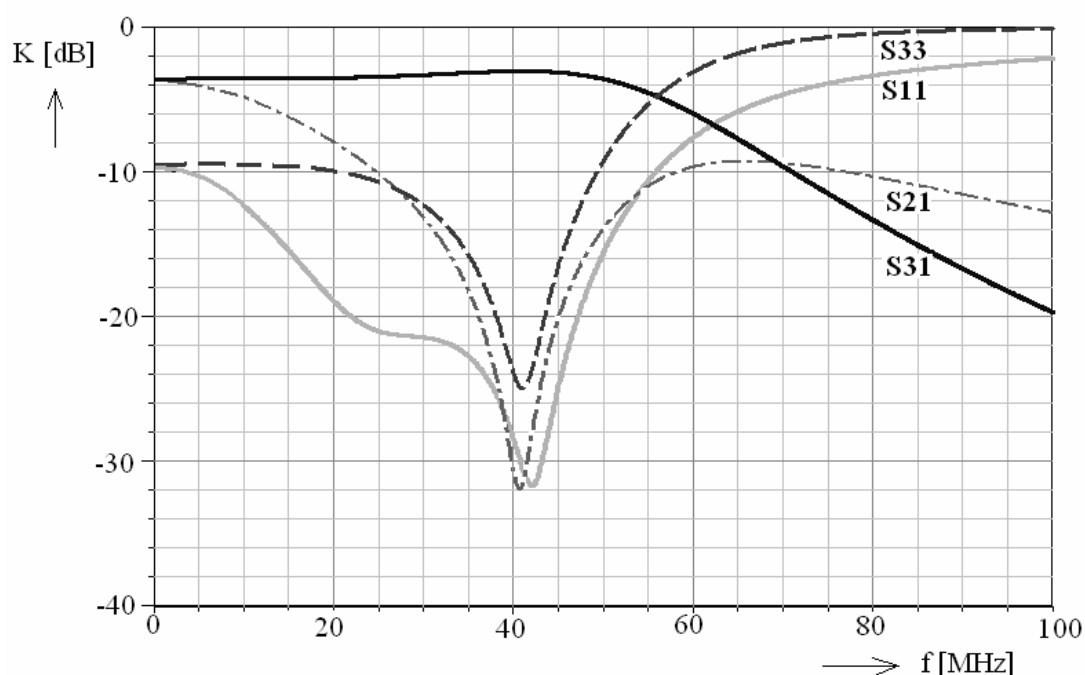
Na Obr. 21 je zobrazena frekvenční charakteristika slučovače, kde jednotlivé průběhy znamenají:

$S11$činitel odrazu na vstupu označeném R in(1), stejný průběh i pro R in(2)

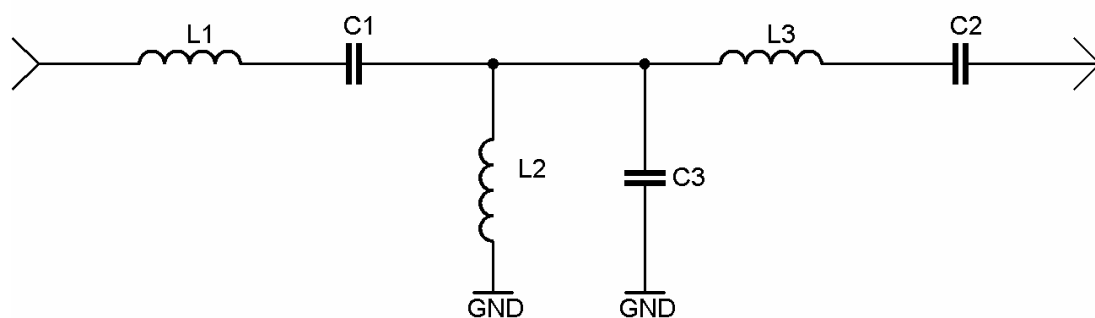
$S21$izolace mezi vstupy označenými R in(1) a R in(2)

$S31$přenos ze vstupu R in(1) na výstup R out(3), stejné i pro přenos z R in(2) na R out(3)

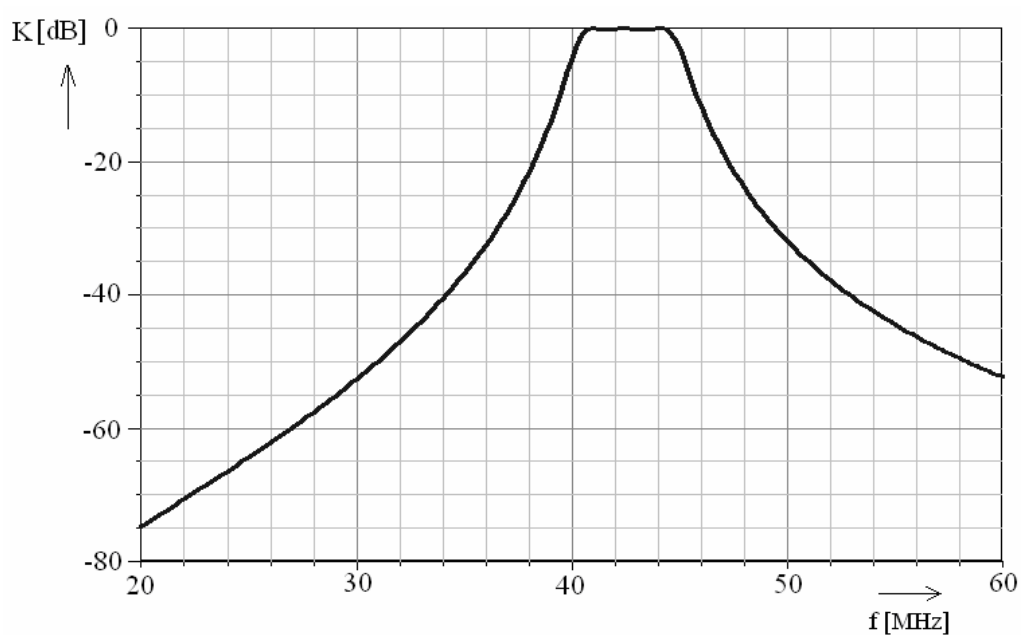
$S33$činitel odrazu na výstupu označeném R out(3)



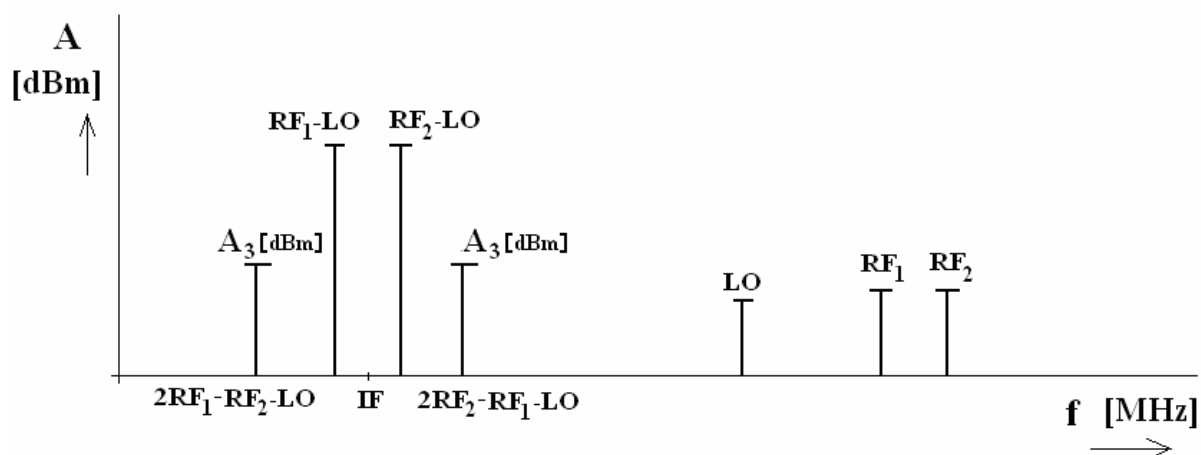
Obr. 21. Frekvenční charakteristika slučovače.



Obr. 22. Pásmová propust.



Obr. 23. Frekvenční charakteristika pásmové propusti.



Obr. 24. Spektrum dvou kmitočtově blízkých signálu na výstupu směšovače.

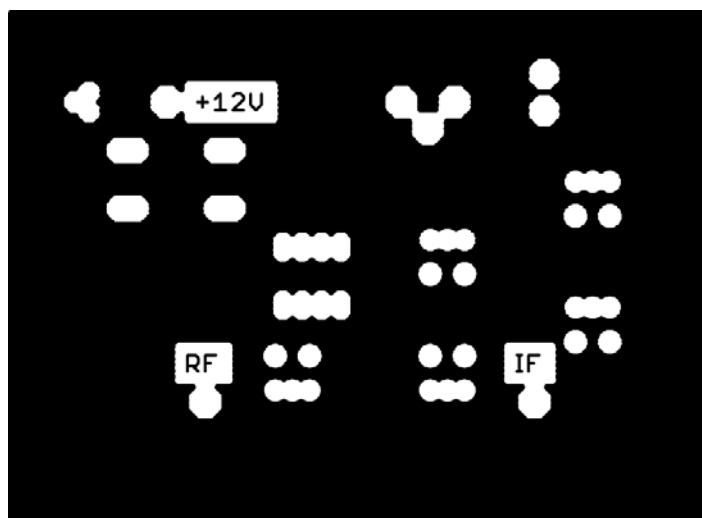
4 Konstrukce přípravků

Navržené obvody jsou realizovány jako laboratorní přípravky s rozměry směšovače 92 x 67 x 25 mm a přípravku určeného k měření $IP3$ s rozměry 67 x 46 x 25 mm. K přívodu a odvodu signálů jsou použity BNC konektory s impedancí 50 Ω . Napájení přípravku je provedeno přes průchodkové kondenzátory, u kterých rozložením kapacity v přímé blízkosti procházejícího vodiče se podstatně zvětšuje účinnost na vyšších kmitočtech, protože se zmenšuje impedance přívodů mezi odrušovaným vodičem a vlastní kapacitou. Cívky byly navinuty drátem o průměru 0,16 mm na konstrukční cívkové sady s vloženým feritovým jádrem pro zvýšení činitele jakosti cívky. K výpočtu počtu závitů cívek byl použit vztah

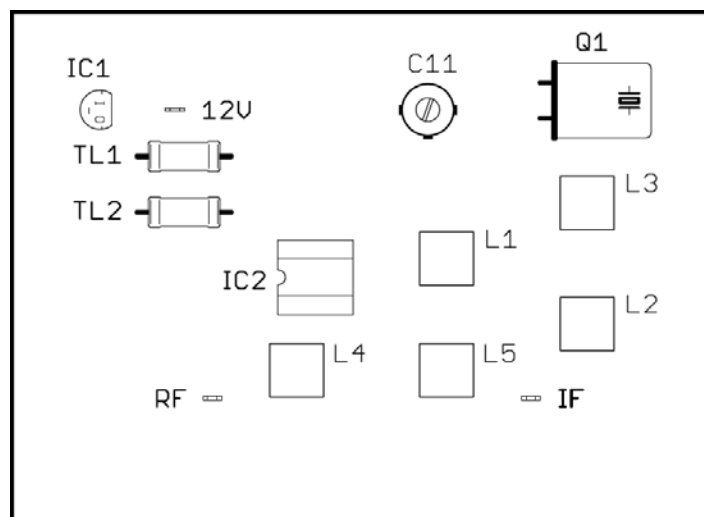
$$N = \sqrt{\frac{L [nH]}{Al [nH]}} [závitů], \quad (13)$$

kde L je požadovaná indukce a Al je konstanta vloženého feritového jádra.

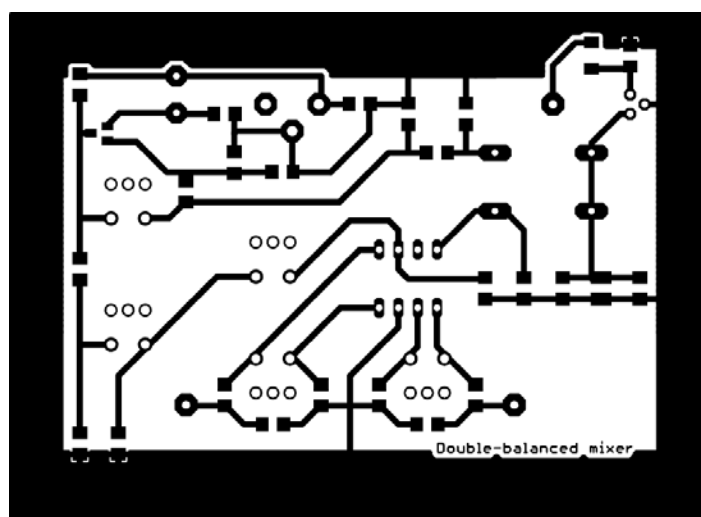
Desky plošných spojů jsou oboustranně pokoveny vrstvou mědi a umístěny v přístrojových krabičkách z pocínovaného plechu z důvodu stínění. Vodivé motivy na deskách plošných spojů a rozmístění součástek na těchto deskách jsou znázorněny na Obr. 25 až Obr. 32. Na Obr. 33 až Obr. 35 jsou fotografie realizovaných přípravků. K návrhu desek plošných spojů bylo použito návrhového systému EAGLE 4.13r1 Light Edition.



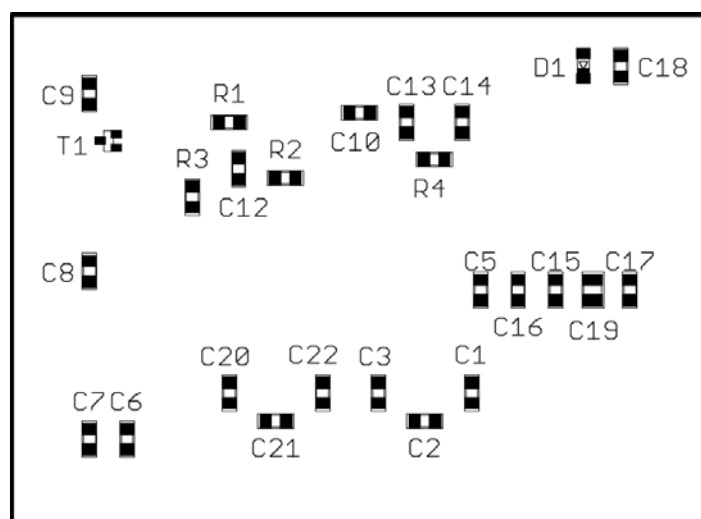
Obr. 25. Horní strana desky dvojité vyváženého směšovače (1:1).



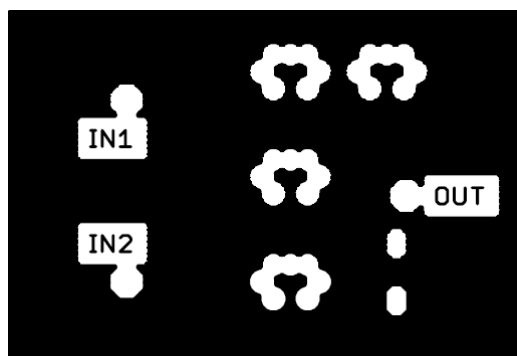
Obr. 26. Osazovací plán součástek horní strany desky dvojité vyváženého směřovače (1:1).



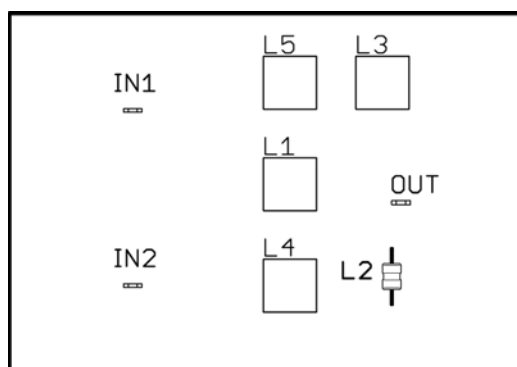
Obr. 27. Spodní strana desky dvojité vyváženého směřovače (1:1).



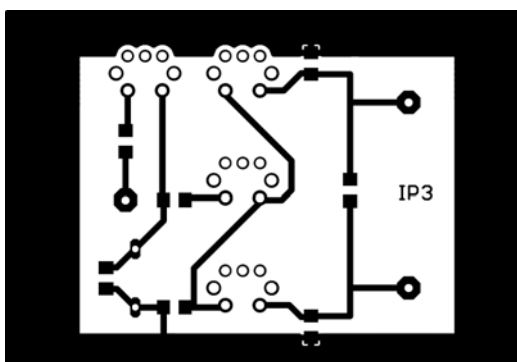
Obr. 28. Osazovací plán součástek spodní strany desky dvojité vyváženého směřovače (1:1).



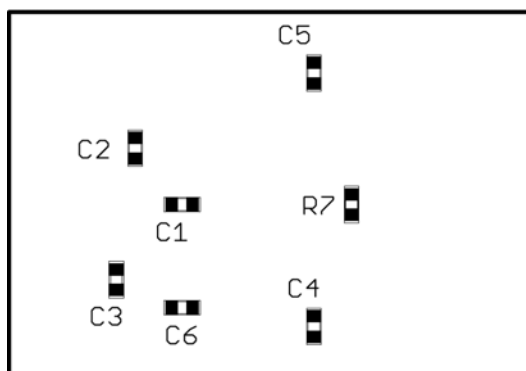
Obr. 29. Horní strana desky přípravku pro měření IP_3 (1:1).



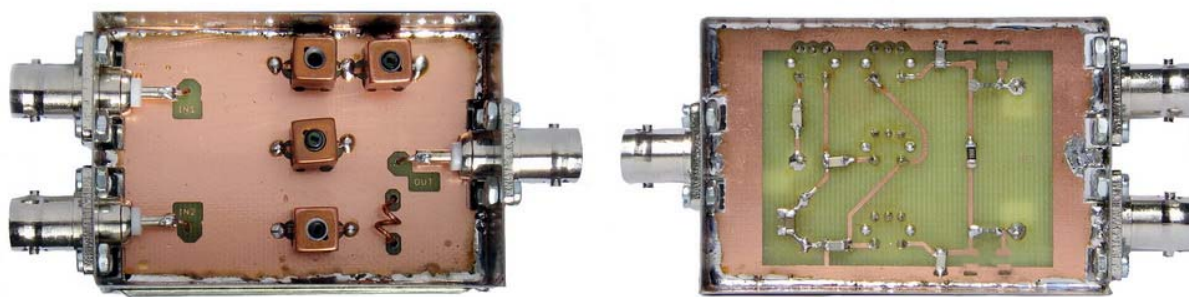
Obr. 30. Osazovací plán součástek horní strany desky přípravku pro měření IP_3 (1:1).



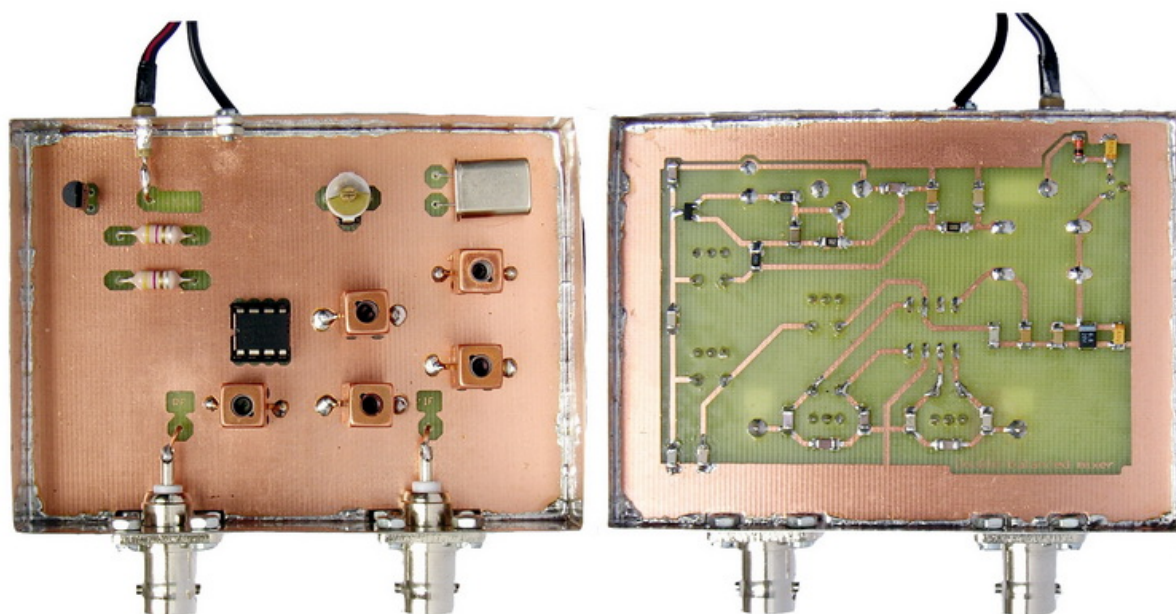
Obr. 31. Spodní strana desky přípravku pro měření IP_3 (1:1).



Obr. 32. Osazovací plán součástek spodní strany desky přípravku pro měření IP_3 (1:1).



Obr. 33. Fotografie realizovaného $IP3$ přípravku.



Obr. 34. Fotografie realizovaného dvojité vyváženého směšovače.



Obr. 35. Fotografie realizovaných laboratorních přípravků.

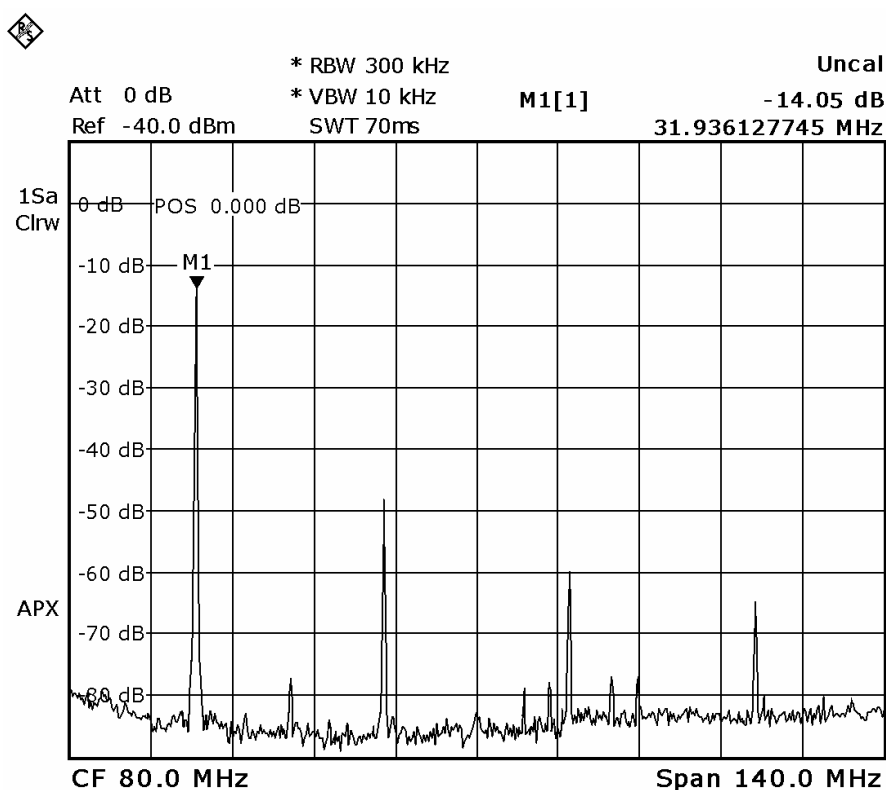
5 Měření na realizovaném přípravku

Měření bylo uskutečněno v laboratoři PA-624 a byly použity tyto měřicí přístroje:

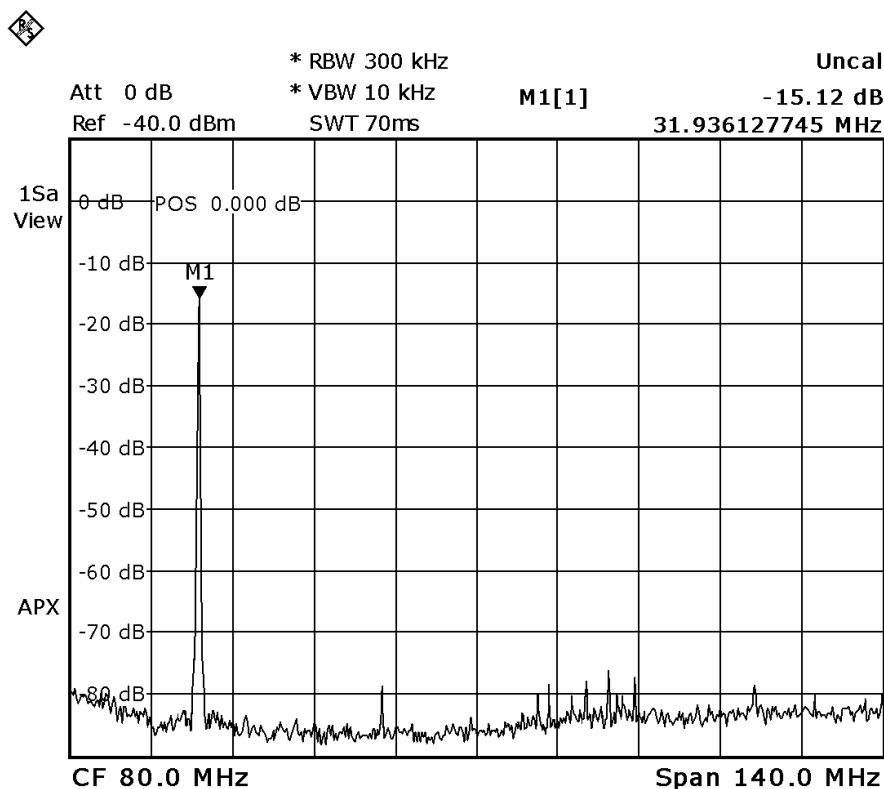
- Generátor signálu ELSY SG2000
- Spektrální analyzátor R&S FSL3
- Zdroj napětí MW 9115GS

5.1 Proměření spektra dvojité vyváženého směšovače

Nejdříve bylo potřeba vyladit DP, aby se odfiltrovaly vyšší harmonické z oscilátoru a výsledné spektrum na výstupu směšovače bylo přehlednější. Spektrum před a za DP je vidět na Obr. 36 a Obr. 37.



Obr. 36. Spektrum na výstupu oscilátoru (před DP).

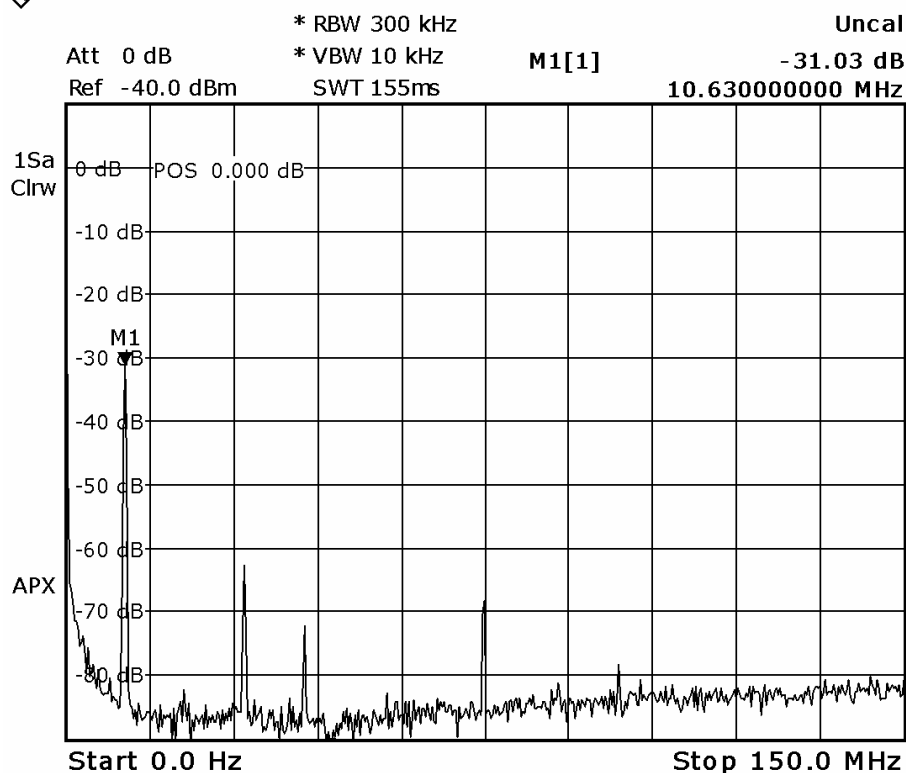


Obr. 37. Spektrum za DP.

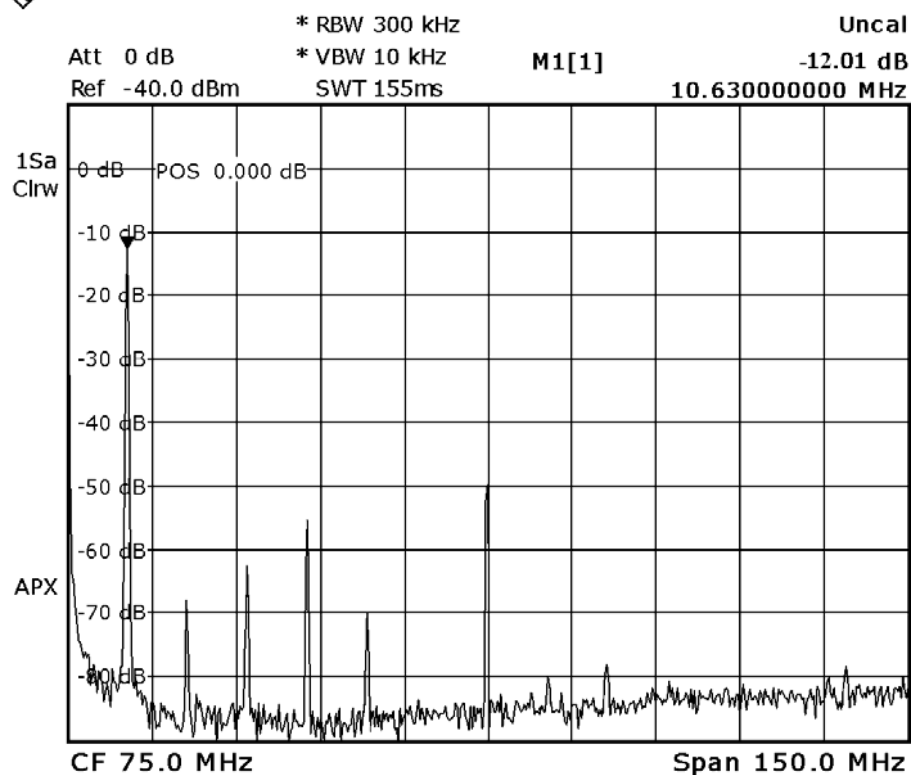
Spektrum bylo proměřeno v kmitočtovém rozsahu $f = 0\text{--}150\text{ MHz}$, referenční úroveň spektrálního analyzátoru byla nastavena na $R_{\text{ef}} = -40\text{ dBm}$, atenuátory na hodnotu $A_{\text{tt}} = 0\text{ dB}$ a rozlišovací šířka pásma na $RBW = 300\text{ kHz}$. Kmitočet místního oscilátoru je $LO = 32\text{ MHz}$, vstupní kmitočet byl nastaven na $RF = 42,7\text{ MHz}$. Spektrum bylo proměřeno pro 3 výkonové úrovně nastavované na generátoru signálu. Nejdříve pro $P_{\text{in}} = -45\text{ dBm}$, tedy v lineárním úseku převodní charakteristiky, poté pro $P_{\text{in}} = -25\text{ dBm}$, což odpovídá začátku nelineárního úseku a v poslední řadě pro $P_{\text{in}} = -10\text{ dBm}$, při němž se nacházíme mimo dynamický rozsah směšovače. Hodnota A určuje výkonovou úroveň jednotlivých spektrálních složek a hodnota L označuje potlačení těchto produktů vzhledem k výkonu mezifrekvenčního signálu (tedy k výkonu spektrální složky $RF\text{--}LO$). Naměřené úrovně jsou zobrazeny v Tab. 2. Spektra jsou znázorněna na Obr. 38 až Obr. 40. Vstupní signál RF je ve výstupním spektru potlačen o 30 dB . Potlačení signálu lokálního oscilátoru LO nelze určit, jelikož není znám výstupní výkon oscilátoru.

Spektrální složky		RF-LO	2LO-RF	2RF-2LO	LO	RF	2RF-LO	2LO	RF+LO	2RF	2LO+RF	2RF+LO	2RF+2LO
$P_{\text{in}} -45\text{dBm}$	A [dBm]	-31,0	< -82,0	< -82,0	-62,1	-72,0	< -82,0	< -82	-69,2	< -82	< -82	< -82	< -82
	L [dB]	0	> 51,0	> 51,0	31,1	41,0	> 51,0	> 51	38,2	> 51	> 51	> 51	> 51
$P_{\text{in}} -25\text{dBm}$	A [dBm]	-12,0	< -82,0	-68,1	-62,2	-55,1	-70,0	< -82	-50,0	-80,1	< -82	< -82	-79,1
	L [dB]	0	> 70,0	56,1	50,2	43,1	58,0	> 70	38,0	68,1	> 70	> 70	67,1
$P_{\text{in}} -10\text{dBm}$	A [dBm]	-10,0	< -82,0	-65,8	-55,1	-42,4	-69,9	< -82	-47,4	-65,1	< -82	< -82	-79,3
	L [dB]	0	> 72,0	55,8	45,1	32,4	59,9	> 72	37,4	55,1	> 72	> 72	69,3

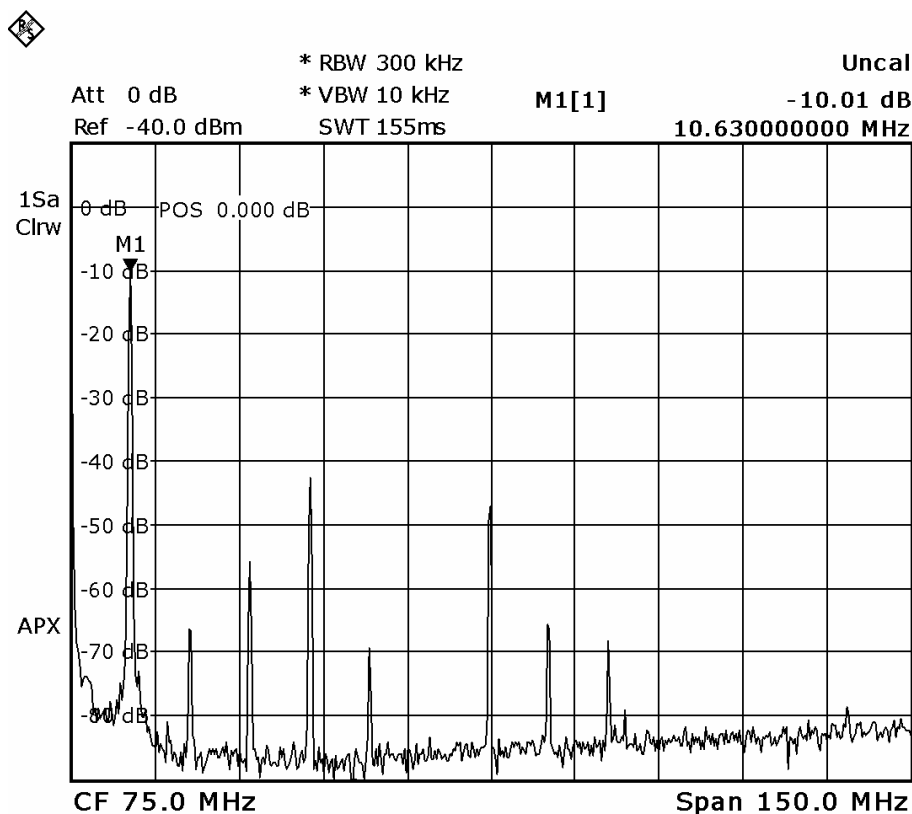
Tab. 2. Naměřené výkonové úrovně jednotlivých spektrálních složek pro 3 různá P_{in} .



Obr. 38. Spektrum dvojité vyváženého směšovače pro $P_{in} = -45$ dBm.



Obr. 39. Spektrum dvojité vyváženého směšovače pro $P_{in} = -25$ dBm.



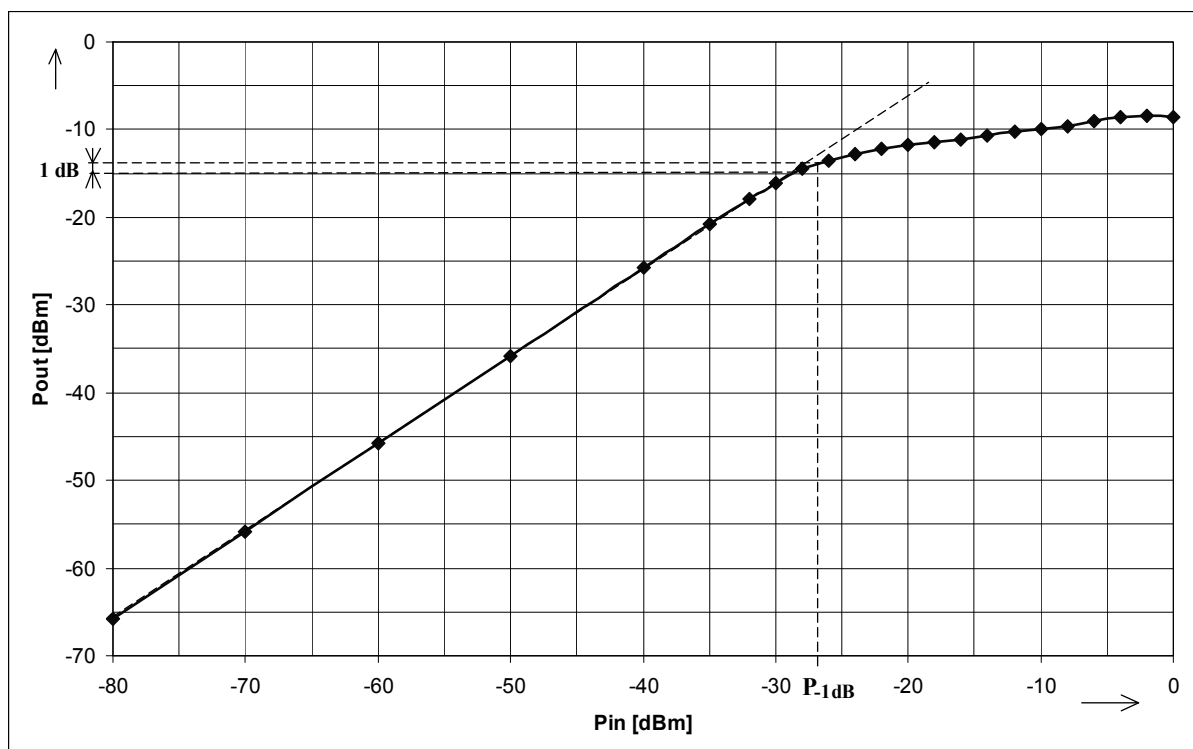
Obr. 40. Spektrum dvojité vyváženého směšovače pro $P_{in} = -10$ dBm.

5.2 Měřením určený bod P_{-1dB}

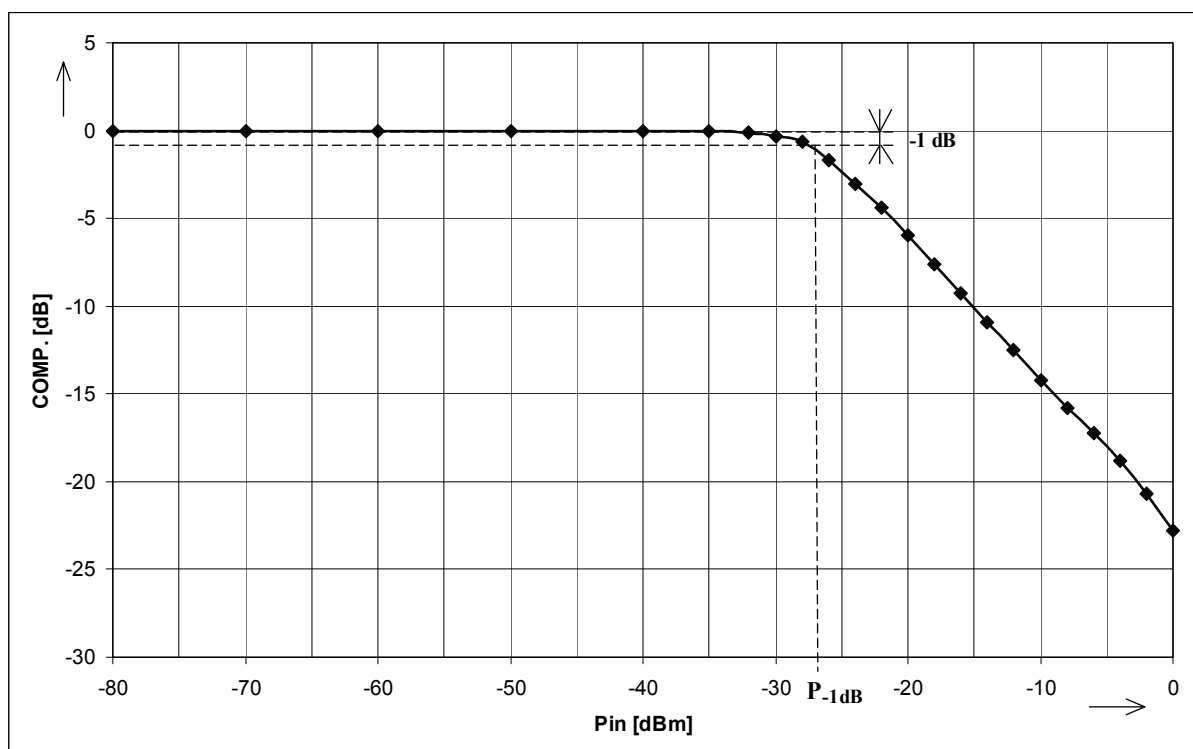
Pro jeho určení je potřeba proměřit charakteristiku $P_{out} = f(P_{in})$. Na generátoru signálu ELSY SG2000 bylo při kmitočtu $RF = 42,7$ MHz nastavováno P_{in} v rozsahu -80 dBm až 0 dBm a spektrálním analyzátozem R&S FSL3 bylo na výstupu odečítáno P_{out} v dBm. Dále byla z těchto hodnot spočítána komprese podle rovnice (10), která určuje zkreslení amplitudy signálu. Naměřené hodnoty jsou vidět v Tab. 3, graf závislosti $P_{out} = f(P_{in})$ na Obr. 41 a graf závislosti $COMP. = f(P_{in})$ na Obr. 42.

P_{in} [dBm]	P_{out} [dBm]	COMP. [dB]
-80	-65,8	0
-70	-55,8	0
-60	-45,8	0
-50	-35,8	0
-40	-25,8	0
-35	-20,8	0
-32	-17,9	-0,1
-30	-16,1	-0,3
-28	-14,4	-0,6
-26	-13,5	-1,7
-24	-12,8	-3,0
-22	-12,2	-4,4
-20	-11,8	-6,0
-18	-11,4	-7,6
-16	-11,1	-9,3
-14	-10,7	-10,9
-12	-10,3	-12,5
-10	-10,0	-14,2
-8	-9,6	-15,8
-6	-9,0	-17,2
-4	-8,6	-18,8
-2	-8,5	-20,7
0	-8,6	-22,8

Tab. 3. Naměřené hodnoty



Obr. 41. Graf závislosti $P_{out} = f(P_{in})$ a odečtení bodu P_{-1dB} .



Obr. 42. Graf závislosti $COMP. = f(P_{in})$ a odečtení bodu P_{-1dB} .

Z naměřených hodnot i z Obr. 41 lze odvodit, že dvojité vyvážený směšovač v lineární oblasti má konverzní zisk $G = (P_{out} - P_{in}) = 14,2$ dB. Z Obr. 41 a Obr. 42 byl odečten, při odchylce od lineárního průběhu o 1 dB, bod P_{-1dB} . Jeho hodnota činí $P_{-1dB} = -27$ dBm.

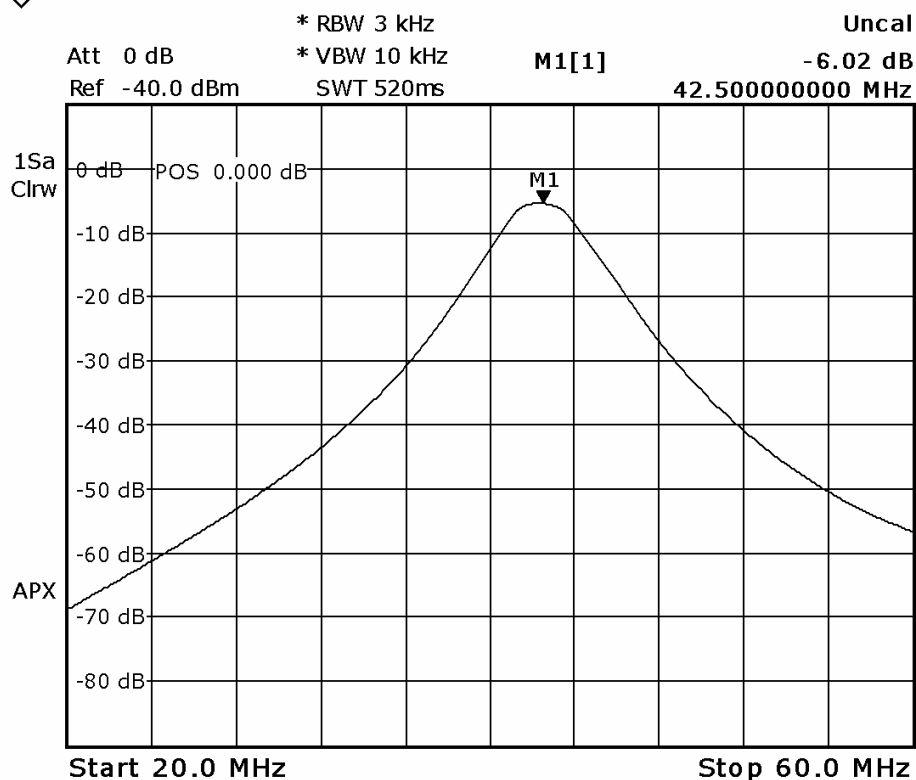
5.3 Měřením určený bod $IP3$

Nejdříve byla vyladěna pásmová propust z důvodu odfiltrování vyšších harmonických složek z oscilátoru. Ta má ale v propustném pásmu útlum $L_{pp} = 6$ dB a proto při určování bodu zahrazení byla provedena korekce tímto útlumem. Tedy od výkonu generátoru P_{gen} byl odečten ještě útlum pásmové propusti L_{pp} , takže vstupní výkon do směšovače P_{in} má hodnotu

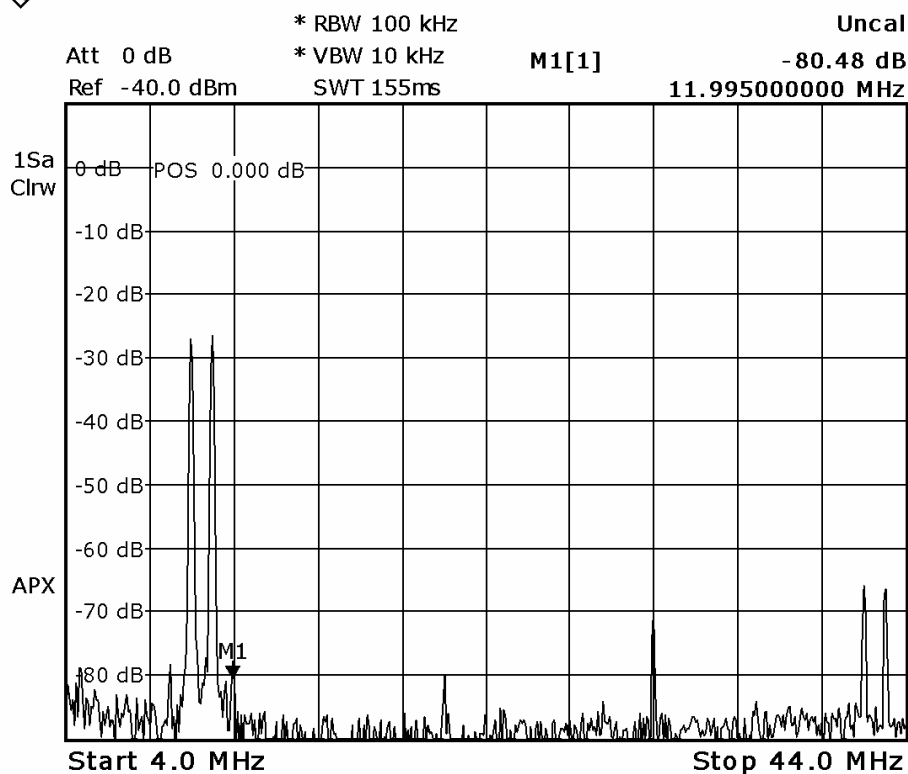
$$P_{in} = P_{gen} - L_{pp} \text{ [dBm]}. \quad (14)$$

Na Obr. 43 je zobrazena frekvenční charakteristika pásmové propusti. Na Obr. 44 až Obr. 46 jsou zobrazena spektra na výstupu směšovače pro 3 různé hodnoty vstupního výkonu P_{in} . Nejdříve pro $P_{in} = -35$ dBm, tedy v lineárním úseku převodní charakteristiky, poté pro $P_{in} = -25$ dBm, což odpovídá začátku nelineárního úseku a v poslední řadě pro $P_{in} = -15$ dBm, při němž se nacházíme mimo dynamický rozsah směšovače. Kmitočty vstupních signálů jsou $RF_1 = 42$ MHz a $RF_2 = 43$ MHz. V Tab. 4 jsou zaznamenány výkonové úrovně produktů 3. řádu na výstupu směšovače v závislosti na vstupním výkonu P_{in} , který byl snížen o útlum pásmové propusti podle vztahu (14). Na Obr. 47 je zobrazena grafická závislost $P_{out} = f(P_{in})$, v níž je vidět průběh základní spektrální složky a průběh produktů 3. řádu. Následně byl v místě průsečíku těchto dvou průběhů odečten bod zahrazení $IP3$. Jeho hodnota odečtená

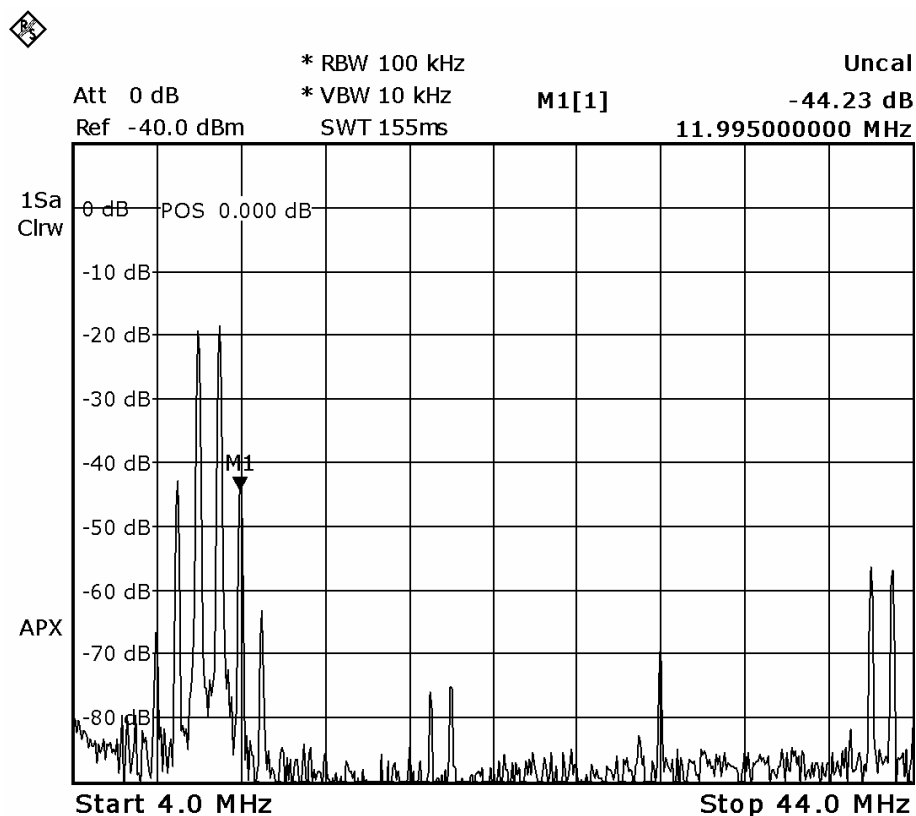
z grafu na Obr. 47 činí $IP3 = -14$ dBm. Na Obr. 48 je pro porovnání tato závislost převzata i z katalogového listu SA612A.



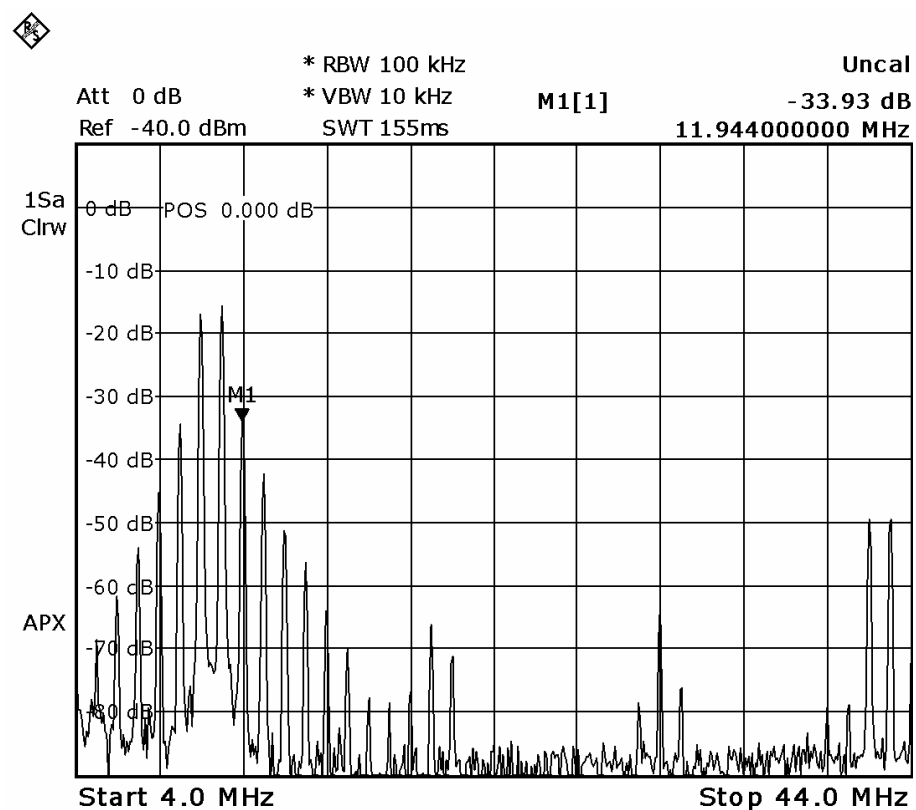
Obr. 43. Frekvenční charakteristika pásmové propusti.



Obr. 44. Spektrum na výstupu směřovače pro dva blízké vstupní signály při $P_{in} = -35$ dBm.



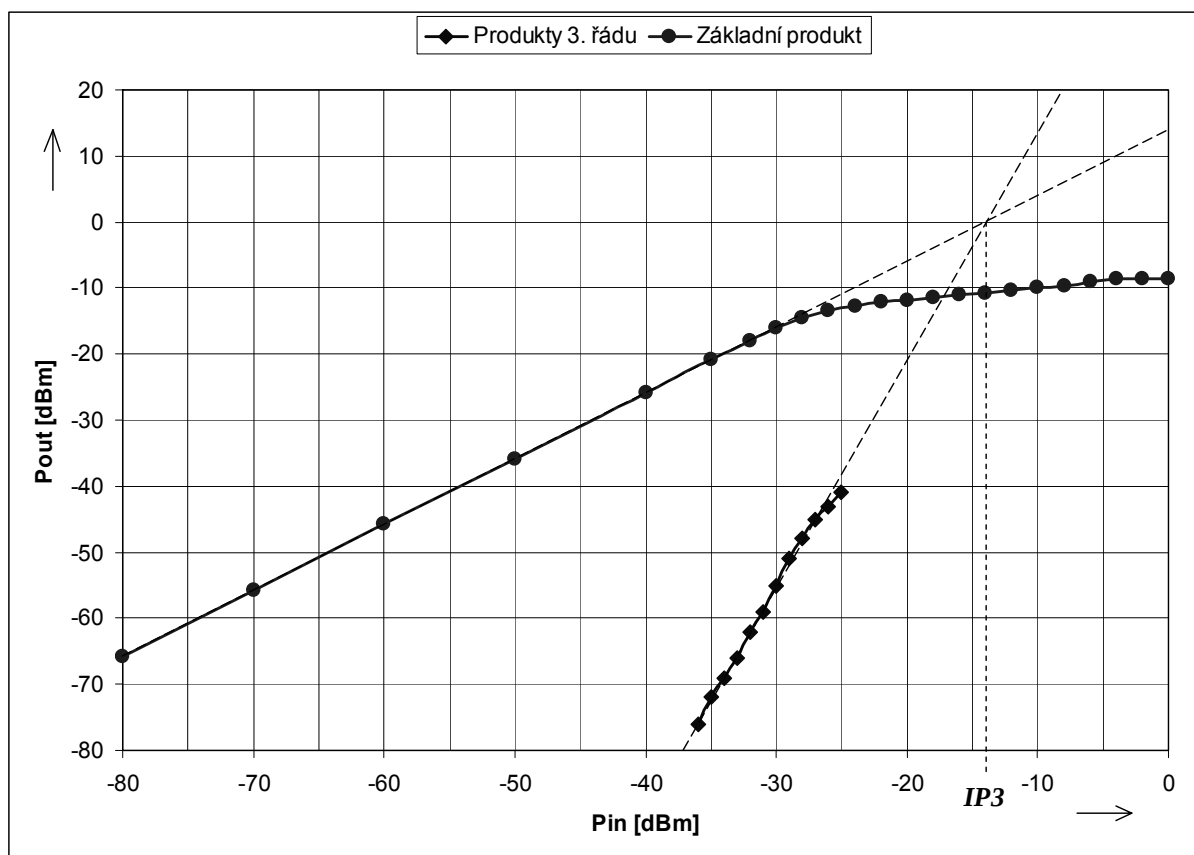
Obr. 45. Spektrum na výstupu směřovače pro dva blízké vstupní signály při $P_{in} = -25$ dBm.



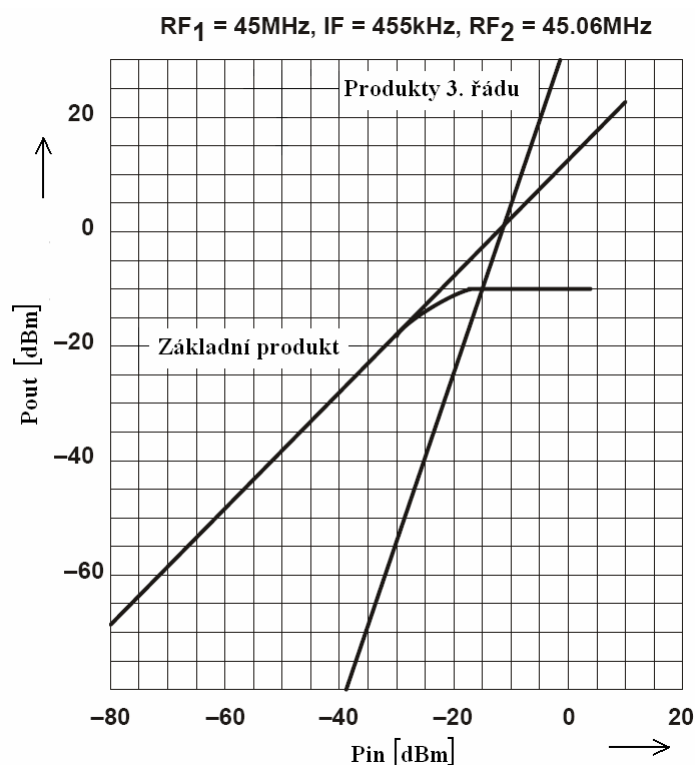
Obr. 46. Spektrum na výstupu směřovače pro dva blízké vstupní signály při $P_{in} = -15$ dBm.

P_{gen} [dBm]	-30	-29	-28	-27	-26	-25	-24	-23	-22	-21	-20	-19
P_{in} [dBm]	-36	-35	-34	-33	-32	-31	-30	-29	-28	-27	-26	-25
$P_{3\text{rd}}$ [dBm]	-76	-72	-69	-66	-62	-59	-55	-51	-48	-45	-43	-41

Tab. 4. Naměřené výkonové úrovně produktů 3. řádu $P_{3\text{rd}}$ na výstupu směšovače v závislosti na vstupním výkonu.



Obr. 47. Graf závislosti $P_{\text{out}} = f(P_{\text{in}})$ pro základní mezifrekvenční produkt a pro produkty 3. řádu s odečtením bodu $IP3$.



Obr. 48. Graf závislosti $P_{\text{out}} = f(P_{\text{in}})$ z katalogového listu SA612A [6].

5.4 Shrnutí naměřených parametrů

Všechny naměřené parametry zkonstruovaného přípravku jsou shrnuty v Tab. 5. Potlačení RF signálu činí $L_{RF} = -30$ dB, konverzní zisk směšovače je $G = 14,2$ dB, kompresní bod $P_{-1\text{dB}} = -27$ dBm a hodnota bodu zahrazení směšovače je $IP3 = -14$ dBm.

L_{RF} [dB]	G [dB]	$P_{-1\text{dB}}$ [dBm]	$IP3$ [dBm]
-30	14,2	-27	-14

Tab. 5. Parametry realizovaného směšovače.

6 Postup měření laboratorní úlohy

Laboratorní návod, který je umístěn v příloze D, je sestaven pro měření na přípravcích realizovaných podle této práce. Laboratorní úloha je zaměřena na praktické ověření principu dvojité vyváženého směšovače a k proměření jeho základních parametrů.

7 Závěr

Začátek této diplomové práce je věnován teoretické stránce směšovačů. Jejich rozdělením, popsáním jejich parametrů a základních vlastností. Pokračuje detailním obvodovým řešením dvojité vyváženého směšovače a obvodů potřebných k měření jeho základních parametrů, kterými jsou například P_{-1dB} nebo $IP3$. K realizaci byl použit obvod SA612A. Jedná se o monolitický dvojité vyvážený tranzistorový směšovač, který je výhodný v tom, že je jednoduchý, má výborné šumové parametry, malou spotřebu napájecího proudu a vyžaduje minimální počet vnějších součástek. Pomocí kapacitní odbočky rezonančního obvodu byla přizpůsobena vstupní a výstupní impedance směšovače k připojeným obvodům. Kmitočet lokálního oscilátoru byl generován pomocí vnějšího oscilátoru 1/2 Butler, pracujícím na kmitočtu 32 MHz. S přihlédnutím k tomu, že se jedná o přípravek, který se bude používat v laboratořích, je u zapojení směšovače doplněna ochrana před připojením nevhodně velkých, případně přepólovaných napájecích napětí. Takto navržený dvojité vyvážený směšovač byl realizován a umístěn do přístrojových krabiček z pocínovaného plechu z důvodu stínění. Na něm pak bylo provedeno měření. Na zobrazeném spektru byly odečteny výkonové úrovně jednotlivých nedokonale potlačených složek pro tři různé vstupní výkony. Dále byla proměřena charakteristika závislosti výstupního výkonu na vstupním a v poslední řadě, sloučením dvou kmitočtově blízkých signálů, byl určen bod zahrazení $IP3$. Nakonec byl vytvořen postup měření, který slouží jako podklad pro laboratorní úlohu.

Literatura

- [1] PROKEŠ, A. *Rádiové přijímače a vysílače*. Brno: Skripta FEKT VUT v Brně, 2005. 174 s. ISBN 80-214-2263-7.
- [2] EVERARD, J. *Fundamentals of RF Circuit Design with Low Noise Oscillators*. New York: John Wiley & Sons, 2001. 288 p. ISBN 0-470-84175-3.
- [3] VIZMULLER, P. *RF Design Guide: Systems, Circuits and Equations*. ARTECH HOUSE, Norwood 1995. 281 p. ISBN 0-89006-754-6.
- [4] MYER, R. & BALLO, D. *Overcoming Mixer: Measurement Challenges*. AGILENT TECHNOLOGIES, 2002.
- [5] ŽALUD, V. *Moderní radioelektronika*. BEN, technická literatura, Praha 2000. 656 s. ISBN 80-86056-47-3.
- [6] PHILIPS SEMICONDUCTORS. *Double-balanced mixer and oscillator SA612 - Datasheet*. Nov. 97.
- [7] PAVLOVEC, J. *Krystalové jednotky a oscilátory*. ARADIO, 1996.
- [8] HANUS, S.; SVAČINA, J. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika*. Brno: Skripta FEKT VUT v Brně, 2002. 210 s. ISBN 80-214-2222-X.

Seznam zkratek, symbolů a příloh

f_{mf}	-	mezifrekvenční kmitočet směřovače
f_s	-	kmitočet vstupního vysokofrekvenčního signálu směřovače
f_r	-	kmitočet vstupního rušivého signálu směřovače
f_h	-	kmitočet pomocného signálu lokálního oscilátoru
P_{-1dB}	-	kompresní bod
P_{in}	-	vstupní výkon
P_{out}	-	výstupní výkon
P_{gen}	-	výkon z generátoru
P_{3rd}	-	výkonová úroveň produktů 3. řádu
A_{tt}	-	hodnota nastaveného atenuátoru
R_{ef}	-	referenční úroveň
U_{ss}	-	napájecí napětí směřovače

RF	-	vstupní signál směřovače (Radio Frequency)
LO	-	oscilační signál směřovače (Local Oscillator)
IF	-	mezifrekvenční signál směřovače (Intermediate Frequency)
DR	-	dynamický rozsah směřovače (Dynamic Range)
IP3	-	bod zahrazení (Intercept Point)
SFDR	-	dynamický rozsah bez intermodulačních produktů 3. řádu
SA612A	-	integrováný dvojité vyvážený směřovač od firmy Philips
IRM	-	potlačení zrcadlového produktu (Image Reject Mixer)
FET	-	tranzistor řízený elektrickým polem
MOSFET	-	unipolární tranzistor s izolovaným hradlem
BFR92A	-	použitý tranzistor u oscilátoru
78L08	-	integrováný stabilizátor napětí
COMP.	-	komprese (Compression)
BNC	-	konektor (Bayonette Neil-Concelman)
DP	-	dolní propust
RBW	-	rozlišovací šířka pásma (Resolution Bandwidth)

Příloha A	-	seznam součástek dvojité vyváženého směřovače
Příloha B	-	seznam součástek slučovače a pásmové propusti
Příloha C	-	vnitřní obvodové zapojení SA612A
Příloha D	-	laboratorní úloha
Příloha E	-	obsah přiloženého CD-ROM

Přílohy

Příloha A

Dvojitě vyvážený směšovač – seznam součástek

Součástka	Hodnota	Pouzdro
R1	330	SMD 1206
R2	1k	SMD 1206
R3	6k8	SMD 1206
R4	100	SMD 1206
C1	47p	SMD 1206
C2	120p	SMD 1206
C3	47p	SMD 1206
C5	5,6p	SMD 1206
C6	10p	SMD 1206
C7	5,6p	SMD 1206
C8	22p	SMD 1206
C9	100p	SMD 1206
C10	100p	SMD 1206
C11	3 - 50p	kapacitní trimr
C12	1n	SMD 1206
C13	10n	SMD 1206
C14	100n	SMD 1206
C15	100n	SMD 1206
C16	10n	SMD 1206
C17	0,1 μ	SMD-A/35V
C18	0,33 μ	SMD-A/35V
C19	6,8 μ	SMD-B/20V
C20	150p	SMD 1206
C21	330p	SMD 1206
C22	120p	SMD 1206
L1	6,5 μ	kostra cívky – stíněná
L2	6,5 μ	
L3	6 závitů na ferit. jádru (Al=5,5nH)	
L4	707n	axiální tlumivka axiální tlumivka
L5	4 μ	
TL1	4,7 μ	
TL2	4,7 μ	
T1	BFR92A	SOT23
IC1	78L08	TO92
IC2	SA612AN	DIP8
D1	1N 4148	SOD80
Q1	32MHz	HC-49/U

Příloha B

Slučovač – seznam součástek

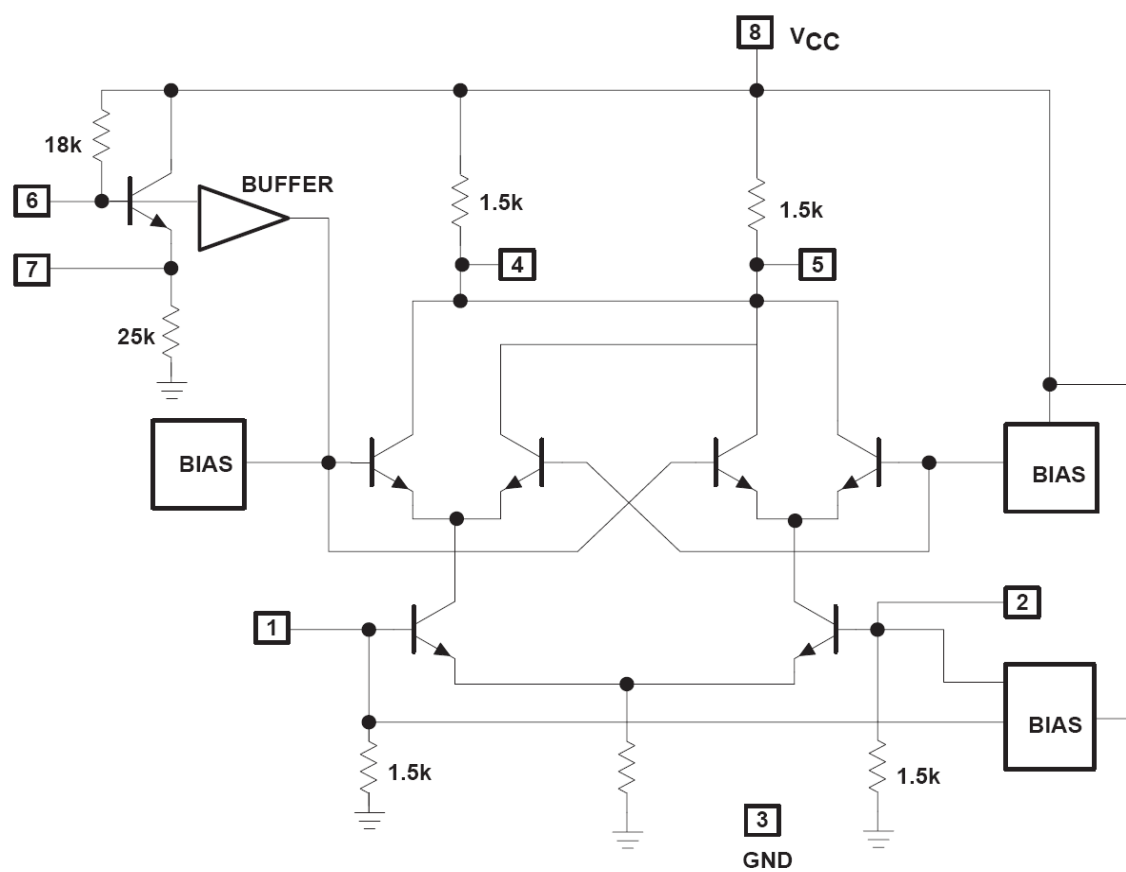
Součástka	Hodnota	Pouzdro
L	265n	
C	5,6p	SMD 1206
R	50	SMD 1206

Pásmová propust – seznam součástek

Součástka	Hodnota	Pouzdro
C1	8,2p	SMD 1206
C2	8,2p	SMD 1206
C3	1n	SMD 1206
L1	2505n	
L2	16n	
L3	2505n	

Příloha C

SA612A – vnitřní obvodové zapojení



Obr. C1. Vnitřní obvodové zapojení SA612A [6].

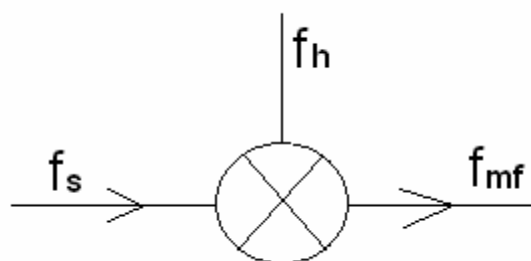
Příloha D

Název úlohy:

Dvojitě vyvážený směšovač

Teoretický úvod:

Směšovač je obvod, pomocí kterého se uskutečňuje přeměna (transpozice) kmitočtu vysokofrekvenčního signálu f_s na jinou hodnotu f_{mf} , beze změny časového průběhu modulačního signálu a charakteru modulace. Pro svoji činnost potřebuje směšovač pomocný signál z oscilátoru (heterodynu) f_h , se kterým tvoří měnič kmitočtu. Součástí směšovače je i výstupní pasivní filtr, potlačující nežádoucí směšovací produkty, případně i další filtry umístěné ve zbývajících branách. Pro vstupní signál se běžně používá zkratka *RF* (Radio Frequency), pro signál lokálního oscilátoru zkratka *LO* (Local Oscillator) a pro mezifrekvenční signál zkratka *IF* (Intermediate Frequency). Typický symbol pro směšovač je znázorněn na Obr. D1.



Obr. D1. Typický symbol pro směšovač.

Pro výstupní signál platí

$$f_{mf} = kf_h + lf_s, \quad (1)$$

kde k a l jsou koeficienty, které mohou nabývat hodnot celých čísel. Jestliže například $k = 1$ a $l = -1$, potom vztah (1) bude vypadat takto: $f_{mf} = f_h - f_s$. Je to případ, který se označuje jako rozdílový směšovací produkt. Jestliže sečteme absolutní hodnoty koeficientů k a l dostaneme řád směšovacího produktu. Seřadíme-li koeficienty k , l i se znaménkem, dostáváme vid směšovacího produktu. Uvedený rozdílový směšovací produkt je tedy druhého řádu a vidu 1, -1. Používá se především v přijímačové technice, protože vytváří nízký kmitočet f_{mf} a dobře se v následujících obvodech přijímače zpracovává. Tam kde je zapotřebí ze signálu s nízkým kmitočtem vytvořit signál s vysokým kmitočtem se používá produkt součtový. Je tomu tak například ve vysílací technice.

Zásadní předností dvojitě vyvážených směšovačů je jejich schopnost potlačit automaticky rušivé směšovací produkty vznikající podle relace (1), v případě, že číslo k , nebo l (nebo obě) jsou sudé. Dále umí u některých variant potlačit i parazitní amplitudový šum oscilátoru, který se jinak transponuje do mezifrekvenčního pásma. Jejich výhodou je i zlepšená izolace mezi jednotlivými branami. Tento typ směšovače, co se týče výstupního spektra, je velmi blízký směšovači ideálnímu.

Cíle měření:

Prakticky ověřit princip dvojitě vyváženého směšovače zobrazením jeho spektra a určit dva jeho základní parametry, kterými jsou P_{-1dB} a $IP3$.

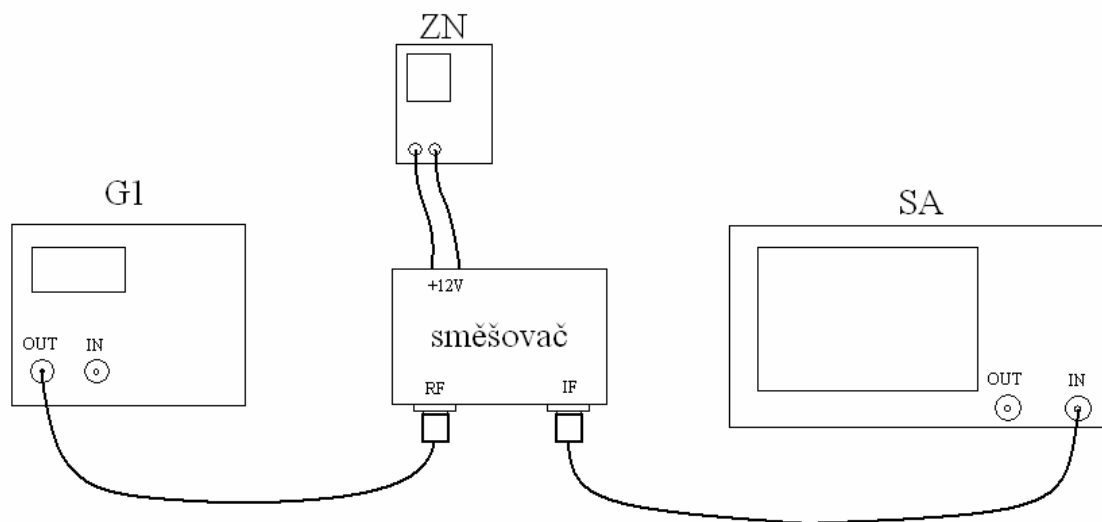
Zadání:

1. Pomocí generátoru sinusového signálu a spektrálního analyzátoru zobrazte spektrum na výstupu dvojité vyváženého směšovače a změřte výkonové úrovně jednotlivých nedokonale potlačených složek. Dále určete potlačení RF signálu.
2. Proměřte a graficky vynesete závislost $P_{out} = f(P_{in})$, z níž následně zjistíte hodnotu P_{-1dB} . Dále sestrojte grafickou závislost $COMP. = f(P_{in})$.
3. Použitím druhého generátoru sinusového signálu a přípravku určeného pro měření $IP3$ sestrojte grafickou závislost rušivé složky 3. řádu v závislosti na vstupním výkonu a určete bod zahrazení směšovače $IP3$.

Postup měření:

Ad 1. G1 je libovolný generátor harmonického signálu s možností plynulého nastavení výstupního výkonu. SA je spektrální analyzátor R&S FSL3 s kmitočtovým rozsahem 3kHz-3GHz. Pod zkratkou ZN je označen 12V zdroj napětí.

Signál z G1 přiveďte na vstup RF směšovače, výstup směšovače označený IF připojte k SA, jak je to znázorněno na Obr. D2. SA nastavte následovně: kmitočtový rozsah $f = 0 - 150$ MHz, referenční úroveň $R_{ef} = -40$ dBm, atenuátory na hodnotu $A_{tt} = 0$ dB a rozlišovací šířku pásma na $RBW = 300$ kHz. Na G1 nastavte výkonovou úroveň na $P_{in} = -30$ dBm a kmitočet $RF = 42,7$ MHz, který s lokálním oscilátorem v přípravku směšovače o kmitočtu $LO = 32$ MHz, vytvoří mezifrekvenční kmitočet $IF = 10,7$ MHz. Na zobrazeném spektru změřte potlačení jednotlivých nedokonale potlačených složek a určete potlačení vstupního signálu RF .



Obr. D2. Zapojení pro měření spektra.

Ad 2. Nastavení SA, hodnoty kmitočtů i zapojení ponechte stejné jako v bodu 1. Na G1 teď měňte výkonovou úroveň v rozsahu $P_{in} = -80$ až 0 dBm a sledujte jak se mění výstupní spektrum směšovače. Zároveň si zapisujte výkonovou úroveň mezifrekvenční složky. Dále z těchto hodnot spočítejte kompresi podle rovnice (2), která určuje kdy je závislost $P_{out} = f(P_{in})$ lineární. Když se zisk začne snižovat, jedná se o kompresi (zkreslení amplitudy signálu). V této nelineární části není už dále výstup sinusový. Sestrojte grafické závislosti $P_{out} = f(P_{in})$ a $COMP. = f(P_{in})$ a odečtěte z nich bod P_{-1dB} .

$$COMP. = [P_{out} - P_{in}] - G \quad [dB], \quad (2)$$

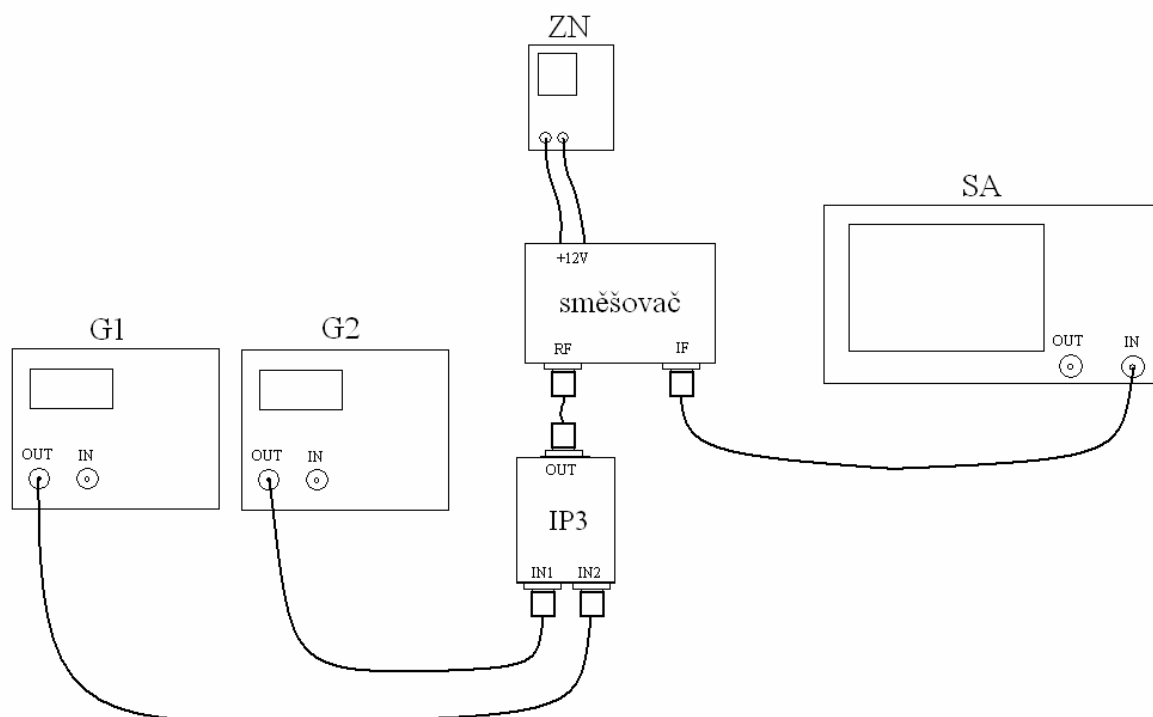
kde G je konverzní zisk měřený v lineární oblasti.

Tabulka pro měření může tedy vypadat např. následovně:

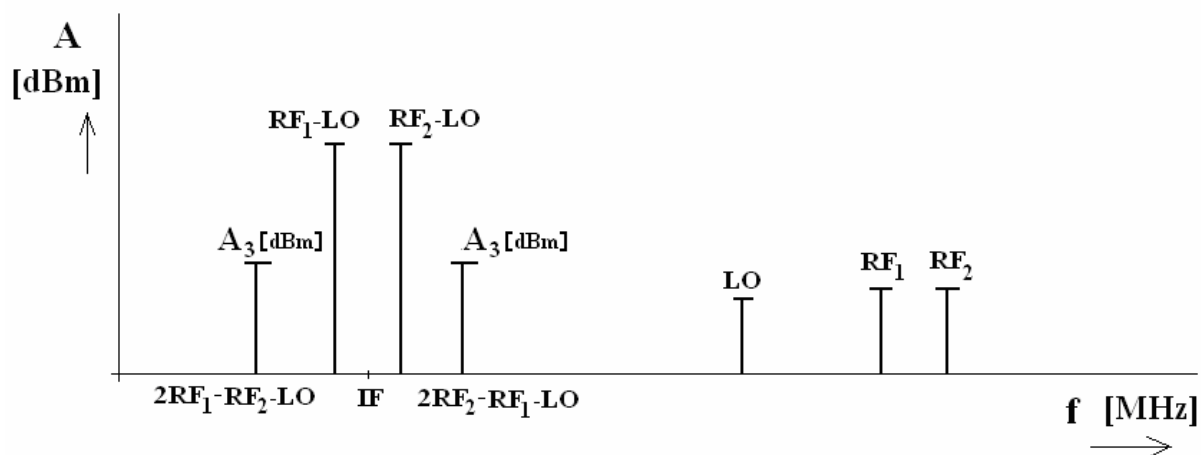
$P_{in} [dBm]$	...	...	...	...	...	...
$P_{out} [dBm]$	...	...	...	...	...	...
$COMP. [dB]$	...	...	...	...	...	...

Tab. D1. Tabulka pro naměřené hodnoty.

- Ad 3. K změření bodu zahrazení směřovače, označovaného jako $IP3$, budeme potřebovat na vstupu kromě užitečného signálu ještě rušivý signál, který je blízký užitečnému signálu. K tomuto účelu použijeme druhý generátor $G2$, na kterém nastavíme kmitočet $RF_2 = 43$ MHz. Kmitočet $G1$ změníme na $RF_1 = 42$ MHz. Dále k tomuto měření použijeme přípravek označený jako $IP3$, který je složen se slučovače signálu a pásmové propusti k výběru pouze zadaného rozsahu kmitočtů. Tím dostáváme na vstupu směšovače dva požadované blízké signály. Zapojení je znázorněno na Obr. D3. Zobrazte spektrum na výstupu směšovače a z něho následně odečítejte pro různé hodnoty vstupního výkonu velikost spektrálních složek 3. řádu označených A_3 , jak je to patrné na Obr. D4. Měření musí probíhat v lineární oblasti směšovače. Z těchto hodnot se následně sestaví grafická závislost dané rušivé složky 3. řádu v závislosti na vstupním výkonu. Průsečík idealizovaného přímkového průběhu dané rušivé složky se základní složkou, určuje bod zahrazení směšovače $IP3$.



Obr. D3. Zapojení pro měření $IP3$.



Obr. D4. Spektrum dvou kmitočtově blízkých signálu na výstupu směšovače.

Použité přístroje:

- Generátor signálu ELSY SG2000
- Spektrální analyzátor R&S FSL3
- Zdroj napětí AUL 310

Příloha E

Obsah přiloženého CD-ROM

/DP		text diplomové práce ve formátu *.doc a *.pdf
/Data		kompletní datalisty použitých polovodičových součástek
/Spec		obrázky z měření na realizovaném přípravku ve formátu *.bmp
/Foto		fotografie realizovaných přípravků
/Eagle		podklady pro výrobu desek plošných spojů a rozmístění součástek
/Meta		soubor metadat

