

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

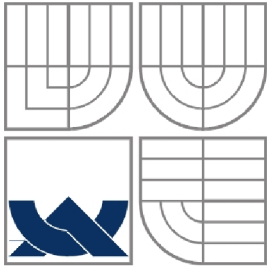
AMPLITUDOVÝ MODULÁTOR A ZESLABOVAČ S DIODOU PIN – LABORATORNÍ ÚLOHA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

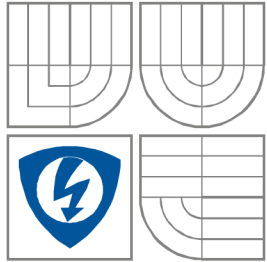
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ KALLER

BRNO 2008



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

AMPLITUDOVÝ MODULÁTOR A ZESLABOVAČ S DIODOU PIN – LABORATORNÍ ÚLOHA

PIN MODULATOR AND ATTENUATOR – LABORATORY EXPERIMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ondřej Kaller

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Jiří Svačina, CSc.

KALLER, O. *Amplitudový modulátor a zeslabovač s diodou PIN - laboratorní úloha.*
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 45 s.
Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jiří Svačina, CSc.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan

Jméno a příjmení: Ondřej Kaller
Bytem: Komenského 1149, Frýdlant n. O. , 739 11
Narozen (datum a místo): 13. dubna 1986 ve Frýdku-Místku
(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: Amplitudový modulátor a zesilovač s diodou PIN - laboratorní úloha

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Ing. Jiří Svačina, CSc.

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: 6. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Amplitudový modulátor a zeslabovač s diodou PIN - laboratorní úloha jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 6. června 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Jiřímu Svačinovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Abstrakt

Účelem této bakalářské práce je vytvoření koncepce laboratorní úlohy Amplitudový modulátor a zeslabovač s diodou PIN, jež by byla alternativou úlohy měřené v předmětu BSES na jiném vzorku. Pro tuto laboratorní práci byl zvolen amplitudový modulátor firmy Hewlett Packard HP-8732A pro své výhodné vlastnosti, zejména jednoduchou manipulaci vzhledem ke koaxiálnímu připojení mikrovlnného signálu.

Práce obsahuje jednak teoretické shrnutí principů činnosti diody PIN, jednak seznamuje s jejich aplikacemi, zejména v amplitudových modulátorech a řízených odporových zeslabovačích.

Dále jsou zde zdokumentovány výsledky jednotlivých měření sloužící pro zjištění, případně ověření vlastností modulátoru HP-8732A.

Nejpodstatnější částí je vlastní návrh několika bodů měření spolu s pokyny pro ovládání přístrojů, návrh formuláře protokolu o měření a jeho vzorově vyplněná verze.

Posledním bodem této práce je idea demonstrace možného využití daného modulátoru ve stabilizátoru výkonu.

Abstract

Purpose of this bachelor's thesis is making conception of laboratory work "Amplitude modulator and attenuator with diode PIN", what was alternative work measure in subject BSES on other sample. For this laboratory work was chosen amplitude modulator of company Hewlett Packard HP - 8732A for its advantage properties, especially easy manipulation with respect to coaxial connection of microwave signal.

Work contains partly theoretical summary principles activity of diode PIN, partly it informs about their applications, especially in amplitude modulators and directed reflex reducers.

Next there are documented results of single measures servant for ensure check needed properties modulator HP – 8732A.

The main part of this work is proposal several points of measure together with instructions for operating devices, proposal form of measure protocol and it's example.

Final point is idea of possibility usage this modulator in power stabilizer.

Klíčová slova

PIN dioda, amplitudový modulátor, PIN modulátor, PIN atenuátor, řízený atenuátor, řízený zeslabovač, modulační charakteristika, stabilizátor výkonu

Key words

PIN diode, amplitude modulator, PIN modulator, PIN attenuator, directed attenuator, modulation characteristic, power stabilizer

Úvod – diskuze zadání

Bakalářská práce staví na teoretických základech semestrálního projektu 1 a zahrnuje v sobě i východiska semestrálního projektu 2. Obsahuje stručný popis obecné struktury a vlastností diod PIN, nástin principů jejich funkce a definici jejich důležitých, pro další práci potřebných, parametrů.

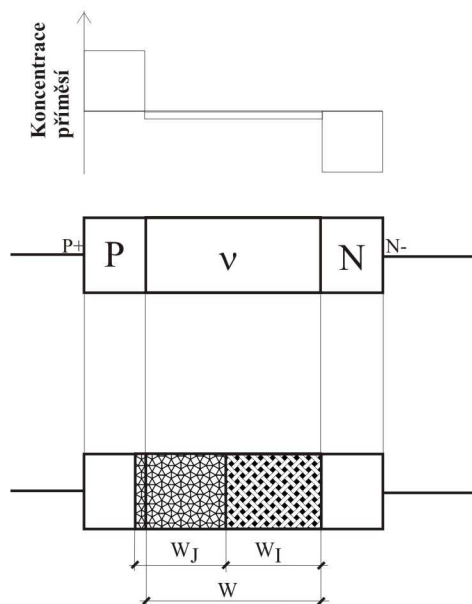
Dále jsou v projektu prezentovány výsledky měření základních parametrů amplitudového modulátoru HP-8732A s PIN diodami. Vzhledem k nedostupnosti dokumentace vnitřní struktury a parametrů jednotlivých diod nebylo možné spočítat například šířku intrinzické vrstvy jednotlivých diod případně její změnu. U části měřených hodnot nastává problém s ověřením výpočtem, většinu nelze ověřit v katalogových údajích výrobce [6] (nebo se odlišují).

Vlastní laboratorní úloha, jež je hlavním výstupem této práce, vychází ze zavedeného konceptu laboratorních úloh pro laboratoř mikrovlnné techniky. Laboratorní úloha se skládá z teoretického úvodu, kterým lze nazvat výše uvedené shrnutí teorie, dále z vlastních úkolů měření a podrobných pokynů obsluhy laboratorních techniky. Podstatnou částí je též návrh formuláře protokolu, který lze s výhodou doplňovat při měření. Následné dopracování je poté již časově nenáročné. Jednotný systém formulářů zajišťuje obecnou přehlednost a porovnatelnost. V tomto konceptu je vše podřízeno snadnému pochopení a efektivnímu změření dané úlohy. Proto jsou například schémata kreslena pomocí intuitivních blokových značek, které sice neodpovídají dané normě, ale umožňují snadnou orientaci v přístrojovém vybavení pracoviště. Pro možnost dodatečného srovnání byl vytvořen i vzorově vyplněný formulář z hodnot pro tento účel přeměřených. Při jeho zhotovení byl zároveň ověřen postup udaný v návodu na měření.

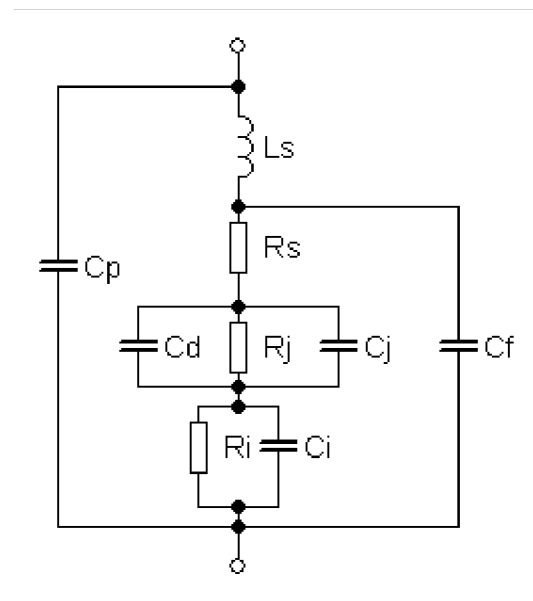
Principy činnosti diod PIN

Diody PIN byly původně vyvinuty jako usměrňovací diody pro zvýšení účinnosti usměrnění při vysokých závěrných napětích. Vložení intrinzické (ve skutečnosti pouze ochuzené v, π) vrstvy mezi silně dotované polovodiče P^+ a N bylo zajištěno zvýšení průrazného napětí v závěrném směru. Se snižujícím se počtem volných nosičů vzrůstá při konstantní šířce I vrstvy průrazné napětí. Zároveň se však prodlužuje doba nutná k odsátí volných nosičů z vrstvy I . Pro technické kmitočty je tato struktura vhodná, avšak se zvyšující se frekvencí účinnost usměrňování klesá. Od kmitočtu v řádu stovek megahertzů již může doba nutná k odsátí nainjizovaných nosičů z I vrstvy přesáhnout celou půlperiodu usměrňovaného proudu a dioda přestává usměrňovat zcela.

Dioda bez jakéhokoli signálu



Obr.1: Struktura diody PIN



Obr.2: Úplné náhradní schéma diody PIN

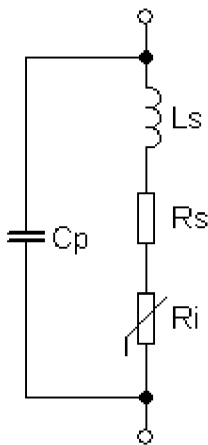
U idealizované diody by v případě nulového předpětí byla celá vrstva I v tomto modelu homogenní bez nosičů náboje. V diodě PvN (obr.1) se však navenek jeví bez volného náboje pouze oblast prostorového náboje tj. na přechodu vrstev Pv , případně πN , v obrázku označená šířkou w_j . Šířku této části v vrstvy lze roztáhnout na celou šířku intrinzické vrstvy w pomocí záporného předpětí.

Z daného modelu diody vyplývá i její nejobecnější náhradní schéma (obr.2). Z technologických vlastností diody jako součástky se do schématu promítá jednak parazitní kapacita pouzdra C_p , jednak indukčnost L_s a odpor R_s přívodů, z vlastní konstrukce čipu (elektrody) pak parazitní kapacita C_f . Zmíněný model diody reprezentují v náhradním schématu zbylé součástky. R_j a C_j jsou vlastnosti ochuzené části vrstvy, C_d je difúzní kapacita a R_i příp. C_i jsou vlastnostmi zbylé části vrstvy v (π).

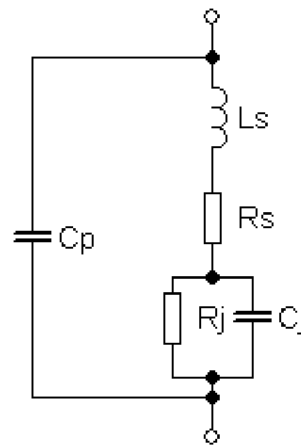
Dioda se stejnosměrným předpětím v propustném/závěrném směru

Při zavedení ss předpětí v propustném směru se začne oblast prostorového náboje vlivem působícího elektrického pole zmenšovat, což se v náhradním modelu projeví jako zmenšení hodnoty R_j až na nulu při úplném zániku oblasti prostorového náboje. V tomto okamžiku začne velká injekce nosičů (děr a elektronů) z oblastí P a N a tyto v oblasti I rekombinují. Odpor diody se v tomto režimu snižuje díky zvyšujícímu se počtu nosičů v I vrstvě se zvyšujícím se stejnosměrným proudem. Tento stav popisuje zjednodušené náhradní schéma (obr.3). Vlivem zániku oblasti prostorového náboje se vypustí části, které ji popisovaly. Dále vzhledem k výraznému snížení odporu R_i lze vypustit i kapacitu C_i .

Jak již bylo popsáno, při jisté velikosti předpětí v závěrném směru se z vrstvy v (π) odsají volné náboje a oblast prostorového náboje se rozšíří přes celou vrstvu. Náhradní schéma přijde o prvky popisující část vrstvy N s volným nábojem $w_1 = 0$. (obr.4)



Obr.3: Náhradní schéma PIN diody při předpětí v propustném směru



Obr.4: Náhradní schéma PIN diody při předpětí v závěrném směru

Dioda ve vysokofrekvenčním poli

Z dosud popsaného plyne fakt, že odpor daného typu diody v propustném směru je říditelný proudem diodou. Díky nízké změně hodnoty akumulovaného náboje při provozu na vysokých kmitočtech mohou být diody použity pro řízení až o dva řády vyšších mikrovlnných proudů než jsou stejnosměrné nebo NF proudy předpětí, aniž by docházelo k výraznější změně odporu. Maximální VF proudy nezpůsobující změnu odporu (detekci signálu) rostou s kmitočtem a s šířkou intrinzické vrstvy.

Pro mikrovlnné aplikace představuje PIN dioda při záporném předpětí teoreticky konstantní kapacitu (za předpokladu čistě intrinzické I vrstvy konstantní) paralelně s odporem řádově desítky kilohmů, kterýžto je nezávislý na přiloženém předpětí. Dioda v tomto stavu zůstává i při přivedení mikrovlnného signálu, jehož maximální hodnota je i řádově vyšší než hodnota stejnosměrného předpětí. Součet těchto hodnot však nesmí překročit průrazné napětí daného přechodu.

Bez stejnosměrného předpětí se dioda používá při vyšších úrovních mikrovlnného signálu, kde se již její odpor mění, a to tak, aby úbytek napětí na ní byl od jisté hodnoty přibližně konstantní. Změna odporu je způsobena pohybem náboje na hraně vrstvy I, který způsobí v závislosti na šířce vrstvy, frekvenci a amplitudě vysokofrekvenčního proudu změnu

odporu diody. Jako omezovače lze použít PIN diodu až od výkonů řádově nízkých desítek wattů.

Základní parametry diod PIN

Nejnižší pracovní kmitočet

Je nejnižším kmitočtem, při němž již nedochází na diodě PIN k detekci signálu, tj. z vrstvy I se nestačí v záporné půlperiodě mikrovlnného signálu odsát všechny nosiče zde nainjikované v kladné půlperiodě. Pro mikrovlnný signál je minimální hodnota tohoto kmitočtu omezena dobou života nosičů náboje ve vrstvě I označenou τ (tj. časem od vstříknutí k rekombinaci). Pro nejnižší pracovní kmitočet PIN modulátoru proto platí:

$$f_{\min} \gg \frac{1}{2\tau} \quad [4] \quad (1)$$

Činitel jakosti (jakost) diody PIN

Charakterizuje použití PIN diody jako přepínače.

$$K = \frac{R_-}{R_+} \quad [4] \quad (2)$$

R_+ vyjadřuje odpor diody PIN při jejím předpětí v propustném směru, tj. nejnižší předpětím dosažitelný odpor. R_- je odpor při záporném předpětí respektive nulovém. Vzhledem k faktu, že odpor intrinzické vrstvy v závěrném směru je většinou větší než $1k\Omega$, uplatňuje se při zvyšování frekvence modulačního signálu již nezanedbatelně kapacita této vrstvy, C_j . Proto na vyšších kmitočtech ($\omega C_j R_j \gg 1$) již nelze K považovat za konstantní, ale tento klesá s druhou mocninou pracovního kmitočtu.

Zde bude činitel jakosti modulátoru určen jako poměr maximální a minimální hodnoty odporu náhradního modelu diody zjištěný z měřeného útlumu. A to vzhledem k použitému vybavení pouze pro stejnosměrné předpětí.

Mezní kmitočet diody PIN

Je definován jako kmitočet, při němž činitel jakosti PIN diody klesne na hodnotu 1.

$$\omega_{kr} = \frac{1}{C_j \sqrt{R_i R_j}} \quad [4] \quad (3)$$

Na vysokých kmitočtech “přepínacího” - klíčovacího signálu tedy dioda přestává pracovat jako přepínač. To ukazuje i následující vztah pro vyšší kmitočty:

$$K = \left(\frac{f_{kr}}{f} \right)^2 \quad [4] \quad (4)$$

Dioda PIN paralelně na VF vedení

Útlum modulátoru

Je-li dioda zapojena paralelně k VF vedení (obr.3) o charakteristické impedanci Z_0 , lze pro útlum takto vzniklého průchozího atenuátoru, případně modulátoru pro kmitočet, na něž je dioda vyladěna, psát následující vztah:

$$L = 10 \log \left(1 + \frac{Z_0}{2R_D} \right)^2 \quad [4] \quad (5)$$

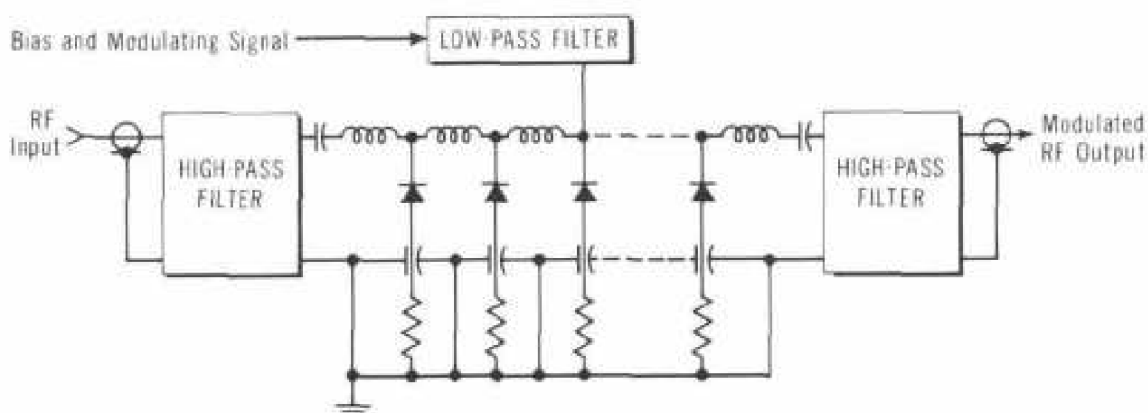
Modul činitele odrazu na vstupu modulátoru

$$|\rho_{VST}| \approx 10 \log \left(1 + \frac{2R_D}{Z_0} \right)^{-1} \quad [1] \quad (4)$$

R_D je odpor diody řízený proudem, jak útlum tak činitel odrazu jsou v dB.

Zjednodušující model přípravku

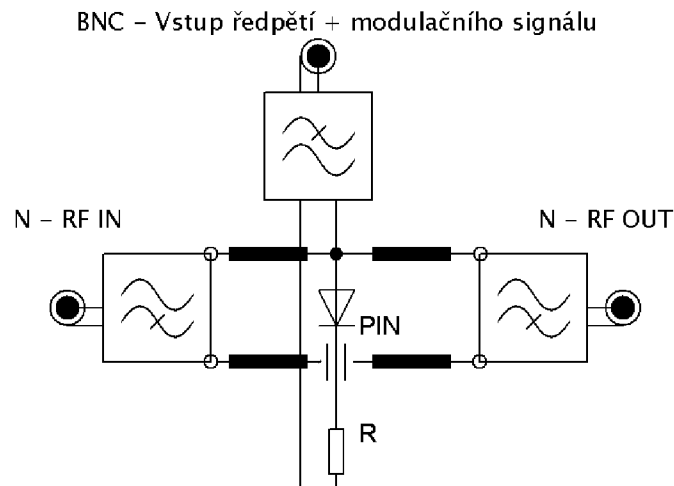
Modulátor 8732A byl vyráběn firmou Hewlett-Packard do konce šedesátých let. Tento fakt má za následek těžkosti shánění dokumentace. V oficiálním veřejném věstníku [6] je uvedeno pouze ideové schéma s nspecifikovaným typem polovodičových i pasivních součástek. (obr.5) I při vědomí, že se jedná o přípravek symetrický vůči RF svorkám, z čehož lze předpokládat, že až na první a osmou diodu (jež se volí záměrně jiné kvůli zvýšení přizpůsobení) je zbývajících šest diod totožných. Jelikož se však nepodařilo určit typ či parametry těchto, nebylo možné než zavést zjednodušující model pro laboratorní úlohy.



Obr. 5 Schéma zapojení - Ideové schéma PIN modulátorů HP [6]

Model (obr.6) se skládá z jedné PIN diody neznámých vlastností, předřadného rezistoru neznámé hodnoty, vstupního/výstupního filtru, jež propustí pouze signál nosné

s případnou amplitudovou modulací a to bez útlumu a dolní propusti, jež dokonale propouští celý modulační signál a zabraňuje nežádoucímu úniku mikrovlnného signálu.



Obr. 6 Schéma zapojení - zjednodušující model přípravku

Pro tento model mohou studenti změřit a vypočítat například odpor rezistoru R, proudovou závislost odporu diody PIN, činitel jakosti diody PIN, závislost útlumu na předpětí, frekvenční závislost útlumu, či modulu napěťového odrazu při daném předpětí a jiné.

Později se však ukazuje, že při takto výrazném zjednodušení reálného bloku ani odpor předřadného rezistoru není konstantní, ale má s rostoucím proudem později specifikovanou klesající charakteristiku.

Obvyklé užití diod PIN X Možnosti použití modulátoru HP-8732A

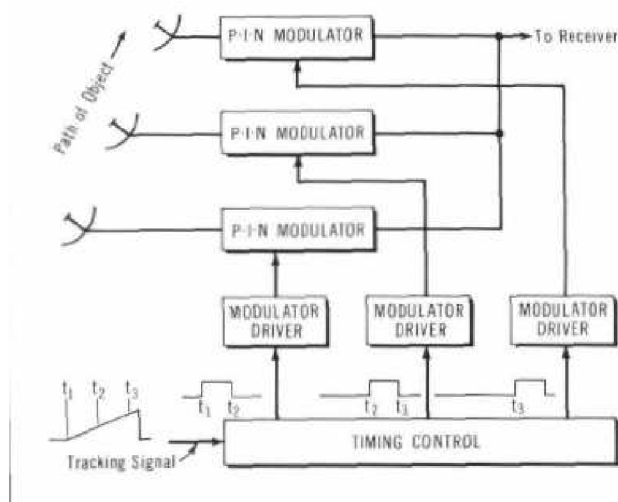
Obecně lze u diod PIN vysledovat následující 3 způsoby aplikace:

- Spínače
- Pasivní omezovače výkonu
- Atenuátory / modulátory

První skupinu tvoří jedna nebo několik PIN diod zapojených sériově, paralelně nebo kombinovaně do různých typů mikrovlnného vedení. Dopadající mikrovlnný signál je buď prostě spínán (spínače) nebo směřován do požadované cesty (přepínače). Zvláštním použitím přepínačů pro směřování signálu různě dlouhými úseky vedení vznikají fázovače s diskretní změnou fáze. Dioda je využívána v krajních stavech (vysoká/nízká impedance).

X

Výrobce modulátoru ve svém věstníku [6] navrhuje použití sady modulátorů z této rodiny jako spínačů pro sekvenční přepínání antén ke vstupu přijímače například pro sledování pohybujícího se objektu.



Obr. 7 Ideové schéma – použití sady atenuátorů jako přepínače antén [6]

Druhou aplikační skupinu PIN diod tvoří pasivní amplitudové omezovače výkonu. Jejich funkce využívá částečné detekce mikrovlnného signálu na hranách vrstvy I PIN diody, kdy detekovaným signálem je zpětně řízena velikost odporu diody.

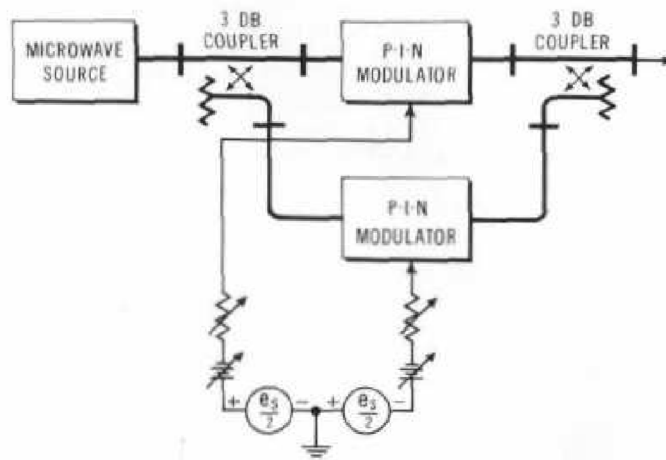
X

Tento princip je používán pro vyšší výkonové hladiny. Výrobce modulátoru udává maximální dopadající výklon 1W, kdy ještě jev detekce není aktuální.

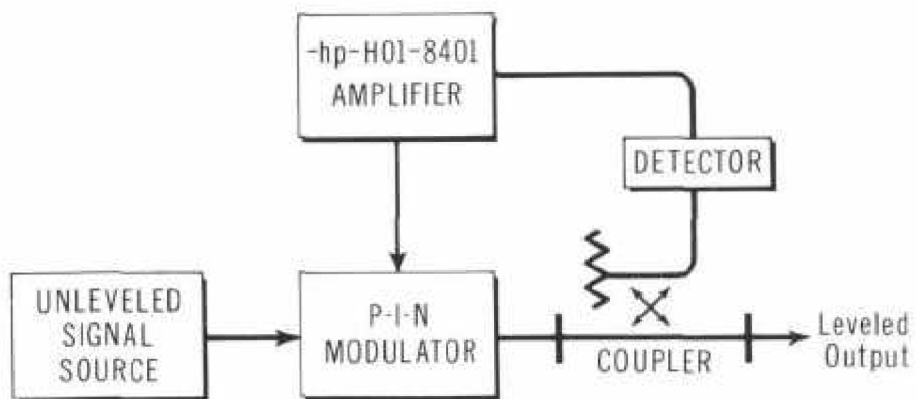
Třetí aplikační skupina je realizovatelná dvěma způsoby. Jednak jako odrazový zeslabovač (modulátor), kdy se paralelně k mikrovlnnému vedení v roztečích čtvrtiny vlnové délky umístí PIN diody. Výhodou je jednoduchost a velký dynamický rozsah. Toto je také příklad koncepce modulátoru 8732A. Kromě těchto existují takzvané odrazové zeslabovače, kde se používá směrových odbočnic a výstupem je signál, který se od diody odrazil. V případě vysokého útlumu je dioda ve stavu vysokého odporu a mikrovlnný signál postupuje k terminátoru, kde je pohlcen. Výhodou této koncepce je možnost kvalitního přizpůsobení, hlavně vstupu.

X

Pro námi popisovaný modulátor HP navrhuje výrobce ve věstníku [6] různá použití. Pomocí dvou za sebou připojených kusů modulátorů dané řady, které jsou řízeny dvěma spřaženými kusy premodulátorů HP 8403A, lze realizovat generátor velmi krátkých pulzů (nízké desítky ns). Při vhodném buzení lze dva modulátory spojené paralelně přes vazební odbočnice použít jako vyvážený amplitudový modulátor. (obr.8) Výrobce dále uvádí možné použití atenuátoru ve zpětnovazební smyčce stabilizace výkonu. Pro použití ve zpětné vazbě této smyčky byl také designován zesilovač HP H-01 8401. Stabilizace výkonu a jeho případné dostavení je možná při jeho použití v celém dynamickém rozsahu modulátoru, tj. 30 dB u popisovaného vzorku, případně 80dB u sesterské B řady modulátorů. (obr.9)



Obr. 8 Ideové schéma – použití dvou modulátorů pro modulaci DSB [6]



Obr. 9 Ideové schéma – omezení a stabilizace mikrovlnného výkonu [6]

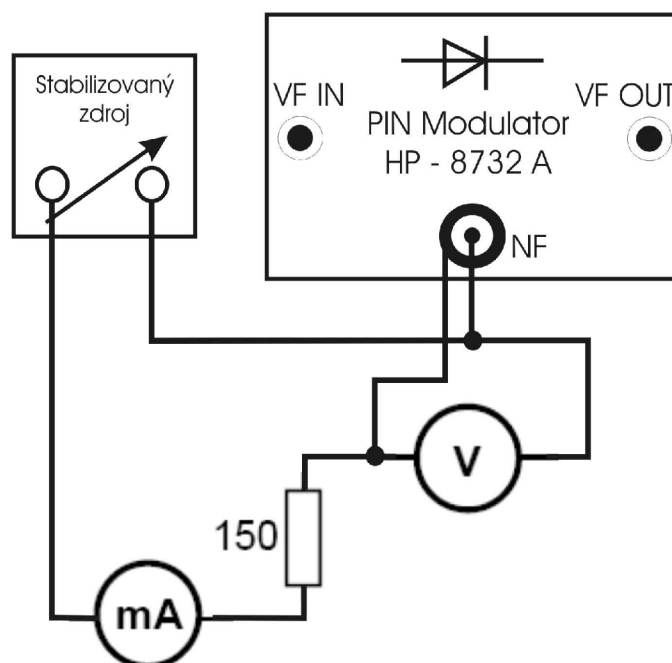
Parametry modulátoru HP-8732A

Měření stejnosměrných parametrů mikrovlnného modulátoru

V první fázi byly měřeny pouze stejnosměrné charakteristiky daného přípravku, a to na vstupu modulačního signálu.

Měření bylo prováděno standardně A-V metodou. Byly použity digitální multimetry. (viz. tabulka 1). Nejistota přístrojů je nižší než chyba způsobená nedokonalým nastavením měřených hodnot. Chyba metody způsobená konečným vnitřním odporem voltmetru $R_{IN} = 10 \text{ M}\Omega$ je ještě řádově nižší. Nebyla proto prováděna korekce chyby metody ani měřicích přístrojů.

Po zjištění vnitřní struktury bylo toto měření ponecháno pouze pro možnost sestavení zjednodušujícího modelu přípravku.



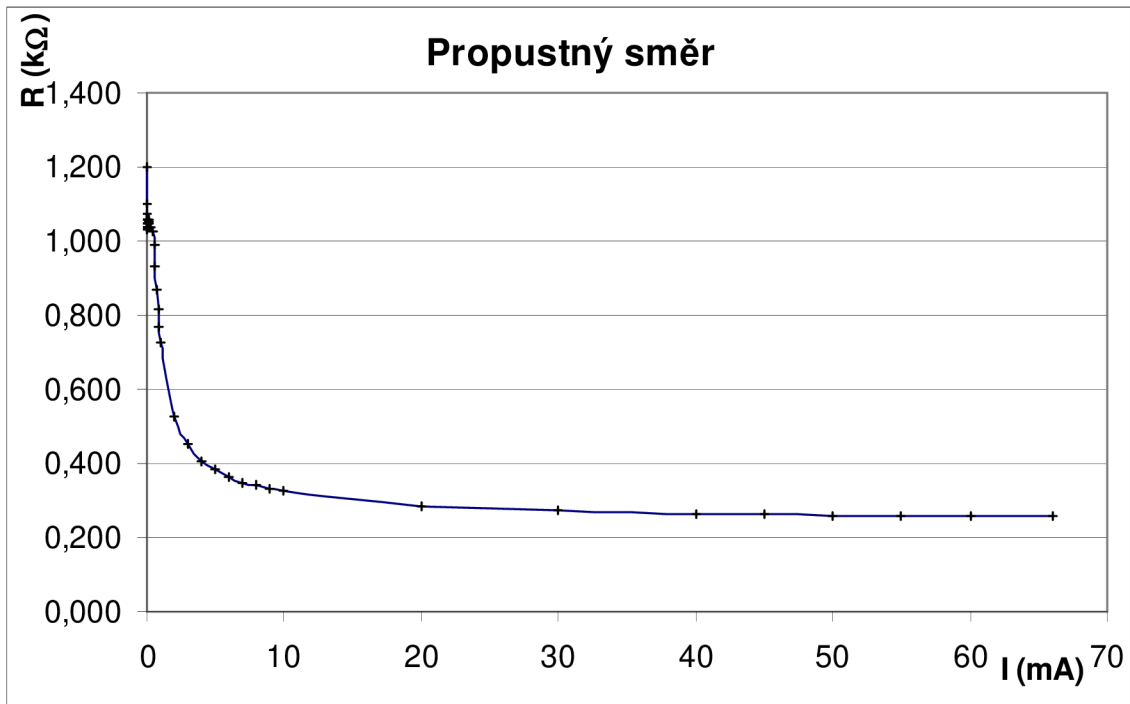
Obr. 10 Schéma zapojení - měření stejnosměrných charakteristik

Použité přístroje a přípravky

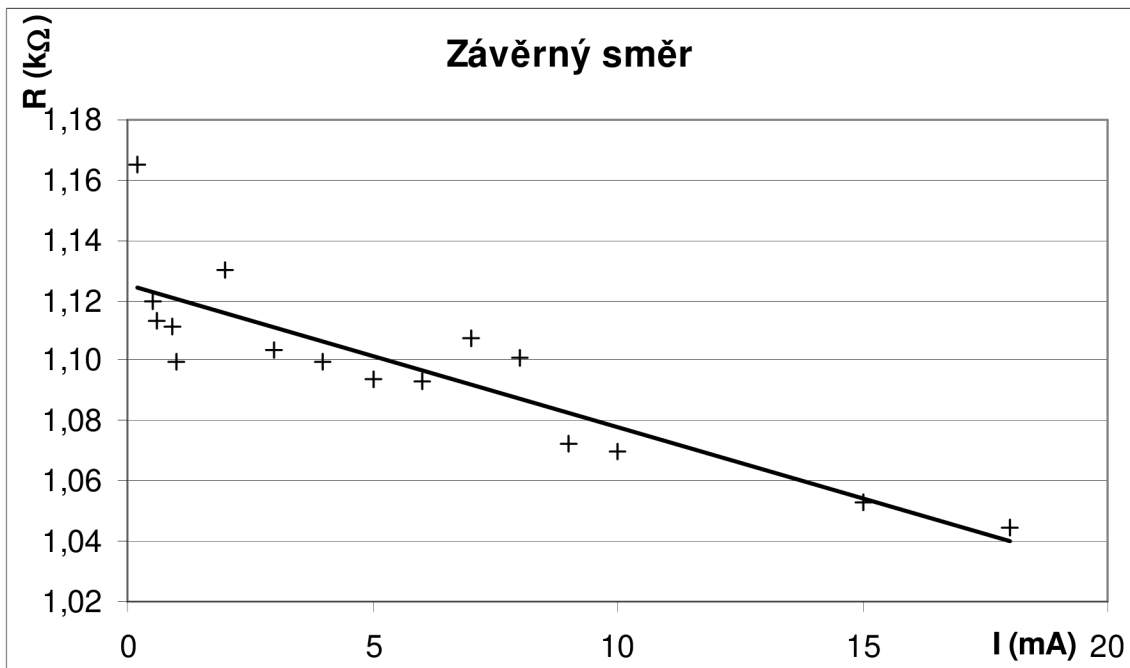
Přístroj		Výrobce	V.Č.
Ampérmetr	Digimer 10	Iskra	ZP 6962
Voltmetr	UT 70A	Unit	3030106151
Zdroj	BS 554	Tesla	306891
Ochranný rezistor			

Tab. 1 Použité přístroje – měření stejnosměrných parametrů

Hodnoty proudů, napětí i vypočítané hodnoty odporů jsou uvedeny v příloze. V tomto měření jak se později ukázalo jsou ve skutečnosti měřeny závislosti $R_+ + R = f(I)$, případně $R_- + R = f(I)$ kde $R_{+(-)}$ je odpor modelu diody v propustném (závěrném) směru závislý na hodnotě stejnosměrného proudu I a R je odpor sériového odporu.



Graf 1: Propustný směr modulatoru: závislost $R_+ + R = f(I_F)$

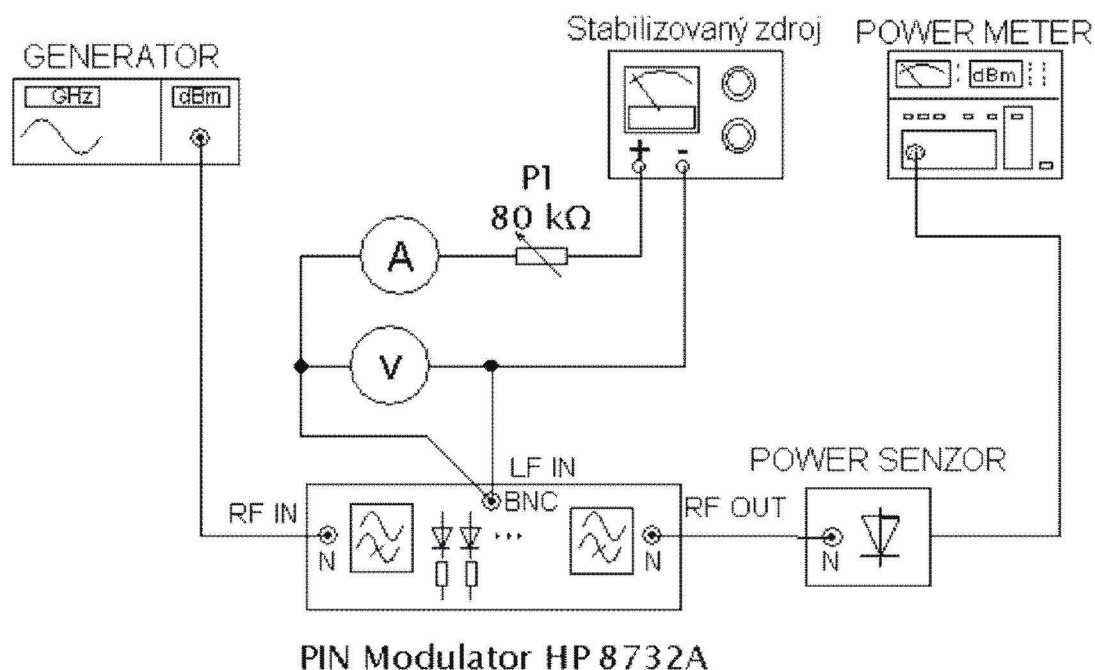


Graf 2: Závěrný směr modulatoru: závislost $R_- + R = f(I_R)$

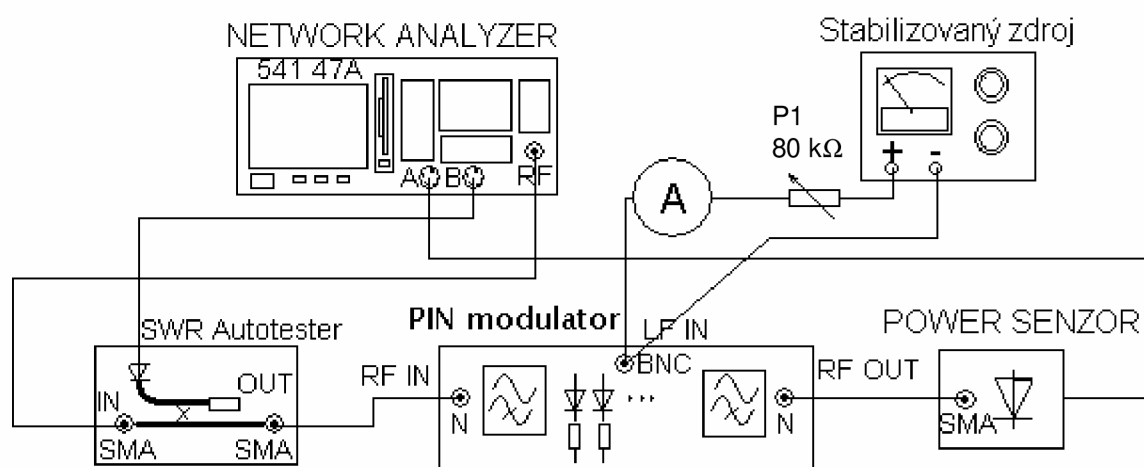
Měření statických parametrů modulátoru

V tomto bodě bylo požadováno měření závislosti útlumu a modulu činitele odrazu na vstupu modulátoru na stejnosměrném předpětí v propustném směru. Prvé bylo prováděno na střední frekvenci pracovního pásma modulátoru tj. na 3 GHz a to dvěma metodami.

Jednak "klasicky" pomocí mikrovlnného generátoru a měřiče výkonu (obr.11), jednak pomocí mikrovlnného skalárního analyzátoru, kterým byl zároveň měřen modul činitele odrazu. (obr.12).



Obr. 11 Schéma zapojení – pracoviště pro měření statických parametrů PIN modulátoru

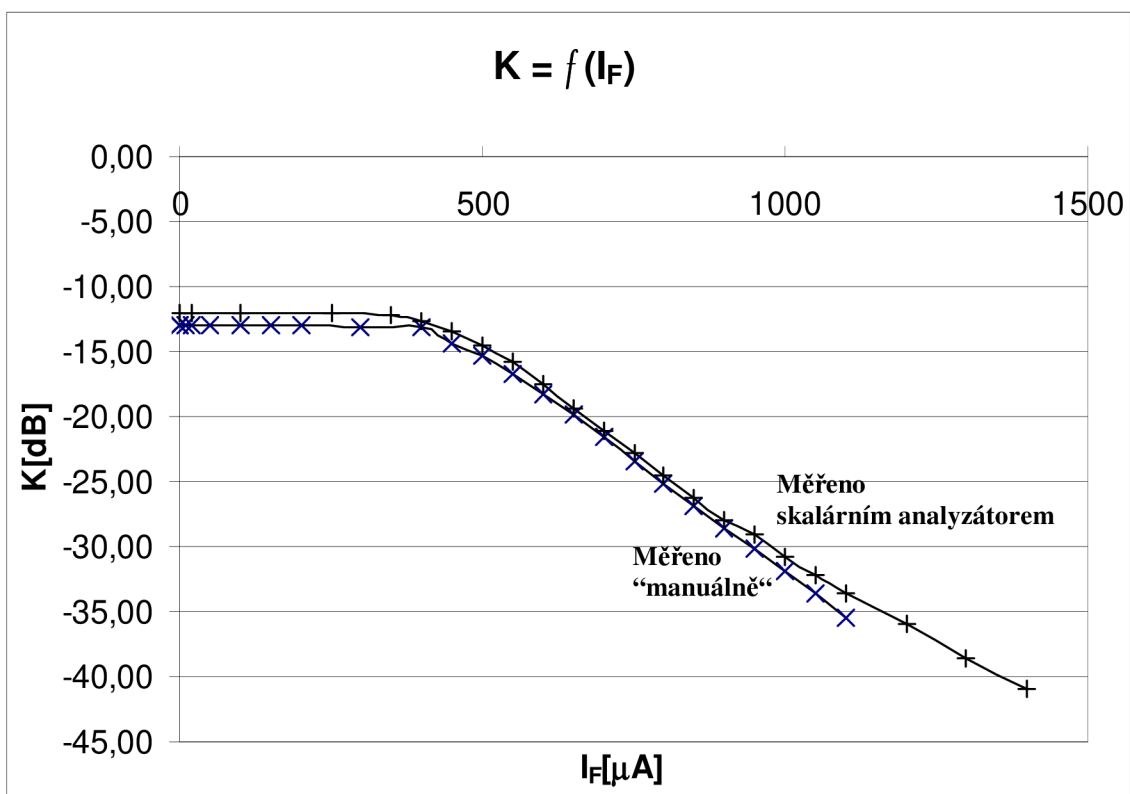


Obr. 12 Schéma zapojení – pracoviště pro měření statických parametrů PIN modulátoru pomocí skalárního analyzátoru

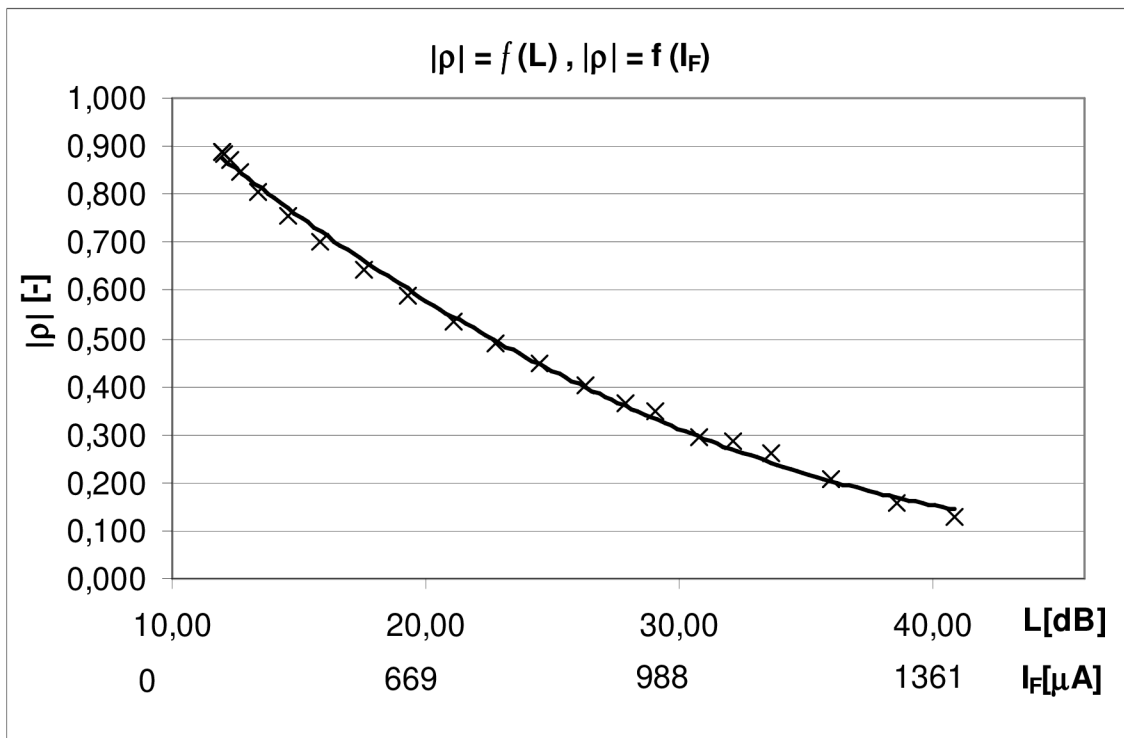
Použité přístroje a přípravky

Přístroj		Výrobce	V.Č.
Ampérmetr	Digimer 10	Iskra	ZP 6962
Voltmetr	UT 70A	Unit	3030106151
Stab. zdroj	BK 127	Tesla	613004
Měřič výkonu	436 A	HP	2347A17730
Generátor RF	8350B	HP	
+ zás. jednotka	83595A	HP	2749A0510
Skalární analyzátor	54147A	Anritsu	K454001
SWR Autotester			
RF Detector			

Tab. 2 Použité přístroje – měření statických parametrů



Graf 3: Závislost výkonového přenosu modulátoru na stejnosměrném řídicím proudu v propustném směru $K = f(I_F) | f_{RF} = 3 \text{ GHz}$



Graf 4: Závislost modulu činitele odrazu na vstupu modulátoru na útlumu, jež je nastaven stejnosměrným řídicím proudem v propustném směru
 $|\rho| = f(L), |\rho| = f(I_F) | f_{RF} = 3 \text{ GHz}$

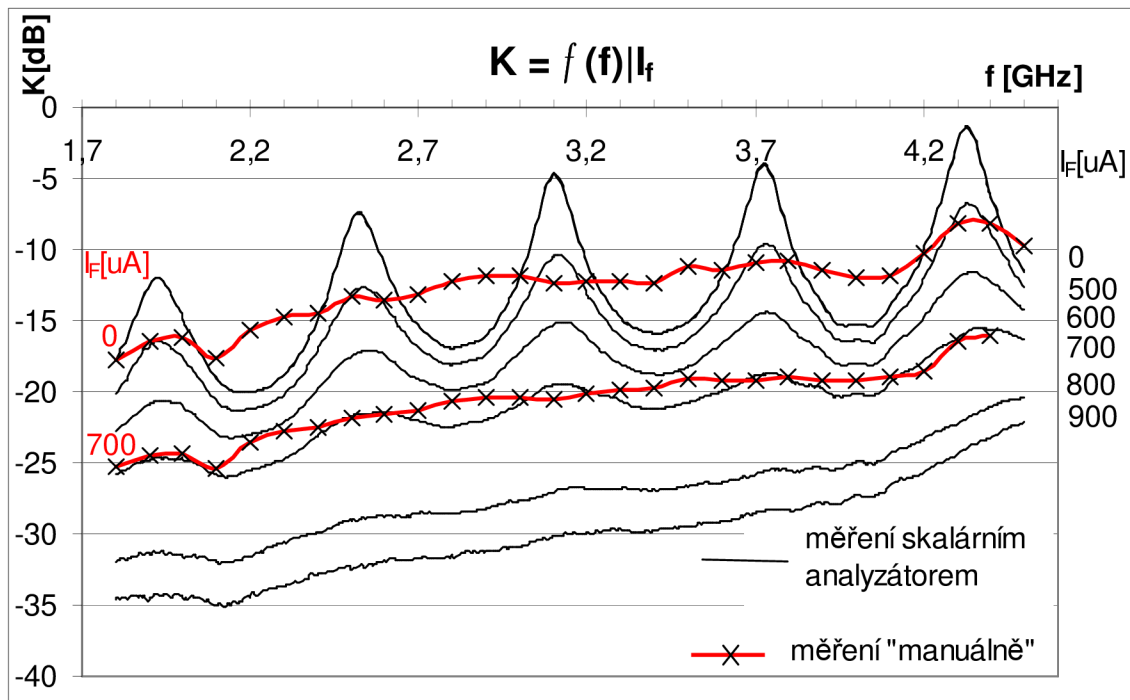
Naměřené hodnoty útlumů oběma metodami měření, zpracování, podmínky měření i měřené hodnoty modulu činitele odrazu jsou uvedeny v příloze 2.

Naměřené charakteristiky byly výrazně odlišné od výrobcem udávaných hodnot. Minimální průchozí útlum stanovený výrobcem při $I_+ = 0 \text{ mA}$ je dle [6] menší než 2 dB, naměřený neklesl pod 11 dB, PSV pro otevřenou diodu je podle výrobce při minimálním útlumu 1,5, měřený větší než 17. Popsanou výraznou nesrovnalost lze přičítat jednak poruše modulátoru, jednak nepřizpůsobení způsobeném špatným koaxiálním kabelem mezi generátorem a PIN modulátorem. Této úvaze nasvědčoval například vyšší útlum kabelu, který byl na tomto kmitočtu (3 GHz) roven 4,1 dB pro kabel kratší než 1 metr. Byl proto vyměněn za typ s neměřitelným útlumem a z důvodu získání většího přehledu bylo další měření prováděno v celém kmitočtovém pásmu modulátoru tj. od 1,8 GHz do 4,5 GHz. Vzniklé frekvenční závislosti útlumu a modulu činitele odrazu na vstupu při různých konstantních hodnotách stejnosměrného předpětí ukázaly na problém s přizpůsobením.

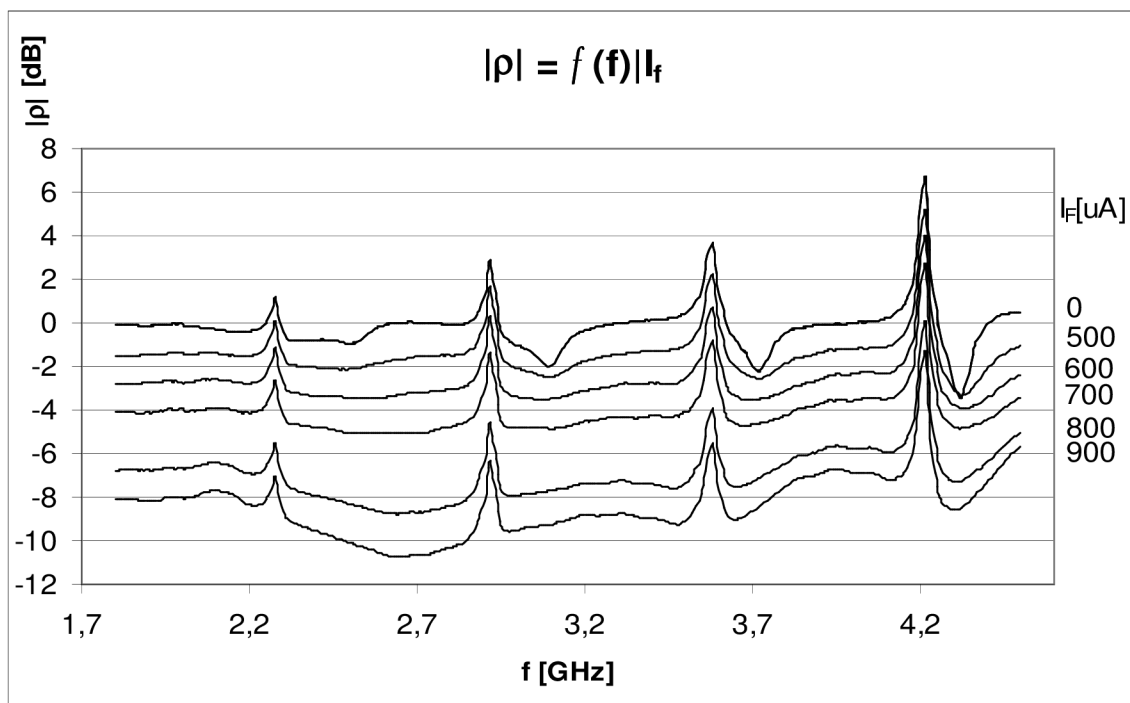
Možnosti odstranění odrazů (stojatého vlnění) na kabelu

Třebaže podle dostupných údajů výrobce [6] je možno zapojit PIN modulátor HP 8732A na libovolný zdroj mikrovlnného signálu přímo, tudíž bylo usuzováno, že přizpůsobení je již provedeno uvnitř součástky ve vstupních a výstupních blocích, z průběhů frekvenční závislosti modulu činitele odrazu je vidět, že na kabelu vlivem hrubého nepřizpůsobení nastává stojaté vlnění, jehož kmitny a uzly se změnou frekvence šoupají po kabelu a způsobují výrazná maxima a minima v dané charakteristice. Zmíněnou představu podporuje i fakt, že při výměně kabelu za kratší se tato charakteristika výrazně změnila. Vzhledem k později zjištěnému poměru stojatých vln na výstupu generátoru udávaného

výrobce, jež má pro daný kmitočet generovaného signálu hodnotu až 2 bylo možno pozorovaný jev předpokládat.



Graf 5: Kmitočtová závislost výkonového přenosu modulátoru při různých konstantních hodnotách stejnosměrného řídicího proudu v propustném směru
 $K = f(f_{RF}) | I_F$.



Graf 6: Kmitočtová závislost modulu činitele odrazu na vstupu modulátoru při různých konstantních hodnotách stejnosměrného řídicího proudu v propustném směru
 $|\rho| = f(f_{RF}) | I_F$.

Jako možné řešení se jeví použití například feritového izolátoru. Vzhledem k nedostupnosti tohoto v provedení s koaxiálním zakončením, bylo zvoleno jednoduché, jak se však ukázalo účinné oddělení modulátoru od generátoru atenuátorem s útlumem 6 dB.

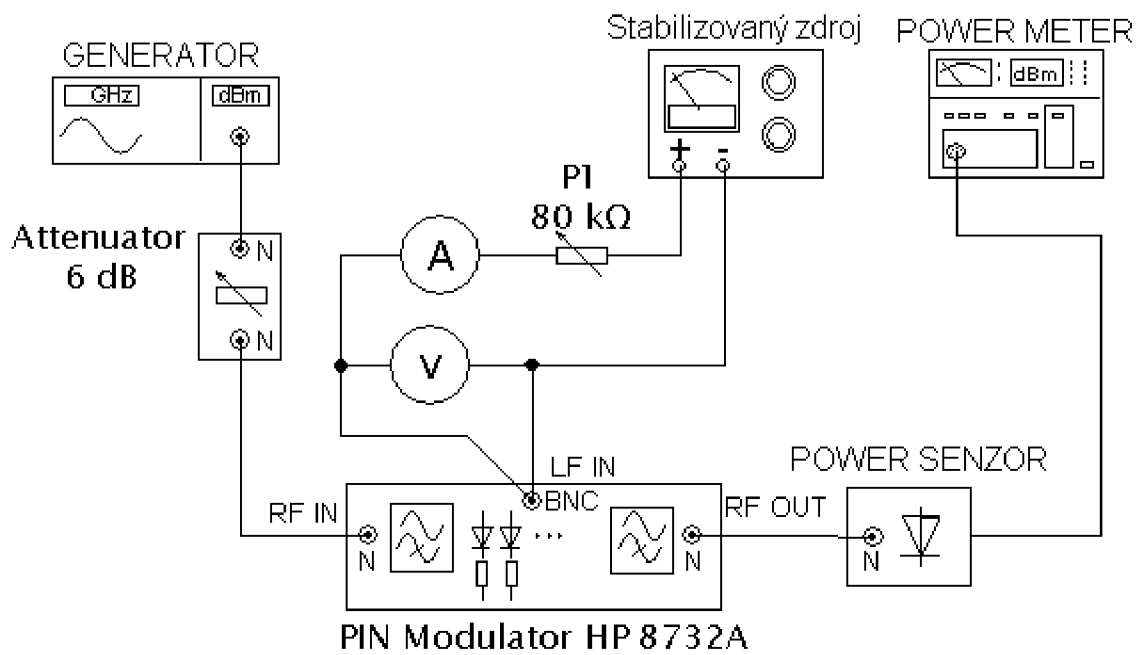
Schéματα zapojení pracovišť po této úpravě jsou na obrázcích (obr. 13, 14) .
Použité přístroje jsou shodné jako při předchozích měřeních. (tab.2), pouze je vložen atenuátor WEINSCHEL ENGINEERING model 973-10 v.č: K454001, jež byl přesně nastaven na 6 dB.

Nové měření statických modulačních parametrů modulátoru

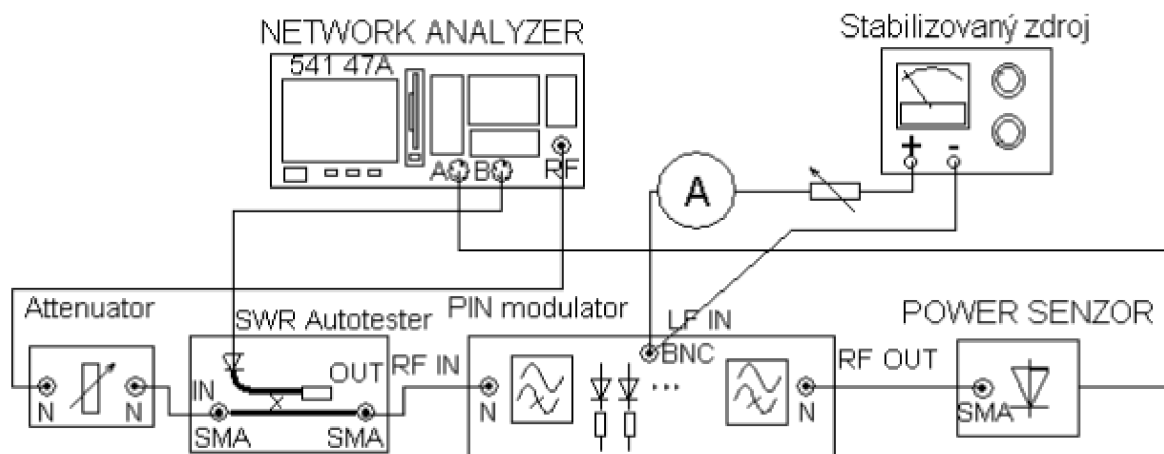
Po výše popsané úpravě byly na pracovišti se skalárním analyzátozem přeměřeny statická modulační charakteristika, dále závislost modulu činitele odrazu na útlumu, případně na proudu modulátorem, vše na středním kmitočtu pásma modulátoru (3GHz). Dále byly měřeny frekvenční charakteristiky jak výkonového přenosu, tak i modulu činitele odrazu na vstupu modulátoru při různých konstantních stejnosměrných proudech modulátorem . Pro srovnání byla na pracovišti pro “klasické“ měření změřena frekvenční charakteristika útlumu modulátoru. Ukázalo se však, že toto není možno provést absolutně s požadovanou přesností.

Relativní měření výkonu

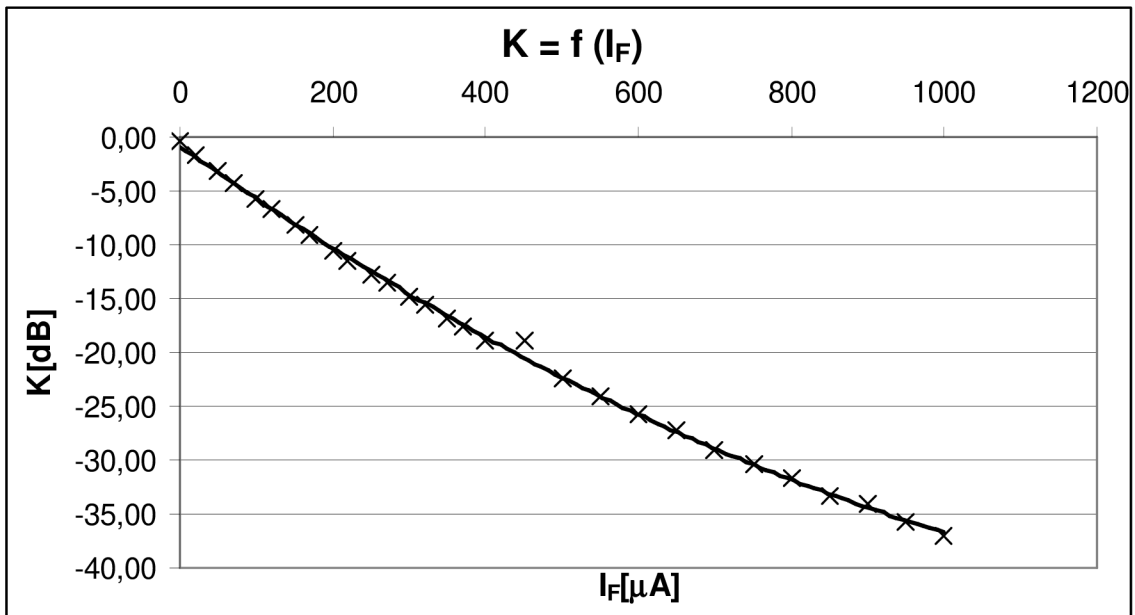
Po připojení výstupu výše specifikovaného generátoru HP k měřiči výkonu HP byl při konstantním výkonu generátoru krokován v měřeném pásmu kmitočtů a bylo zjištěno, že i při korektním nastavení kalibračního faktoru byl rozdíl mezi měřenou a nastavenou hodnotou několikanásobně větší než je výrobcem udávaná nejistota nastavení výkonu (v daném pásmu <0,5 dB). Vzhledem k tomuto a s přihlédnutím k faktu, že vložený atenuátor má také značně frekvenčně závislou chybu nastavení, byla zvolena metoda nepřímého měření rozdílu výkonů, tedy útlumu. Tato je popsána v bodě 4 POKYNY K MĚŘENÍ.



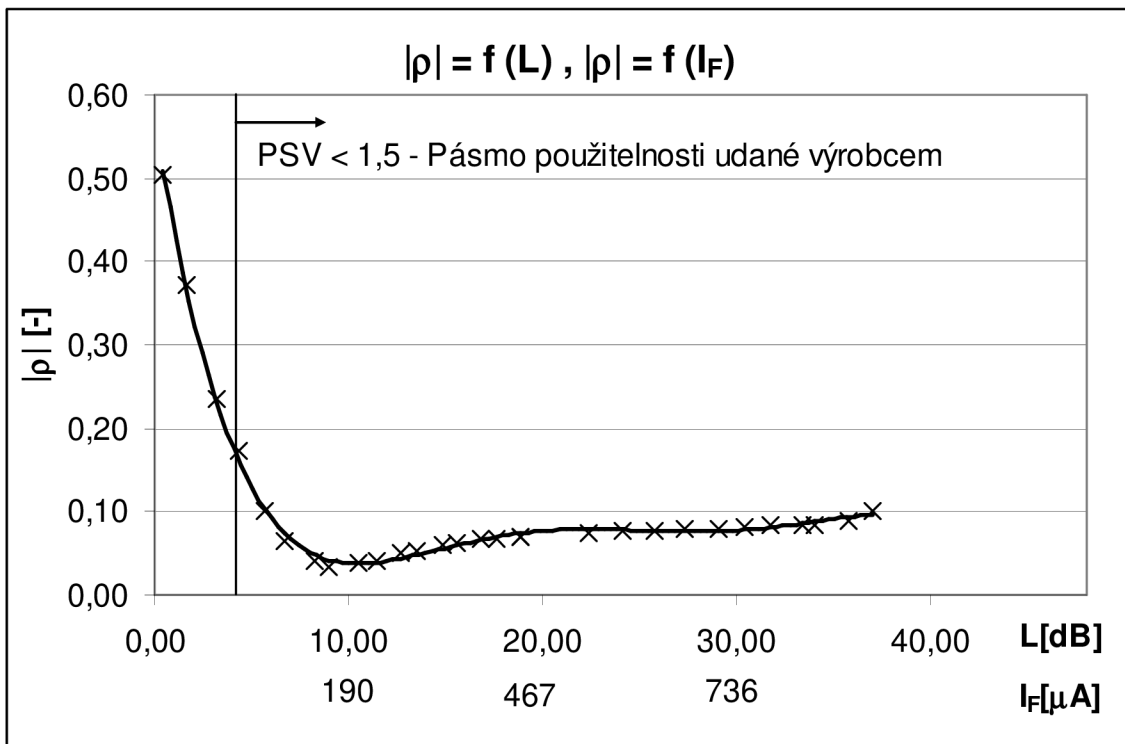
Obr. 13 Schéma zapojení – upravené pracoviště pro měření statických parametrů PIN modulátor



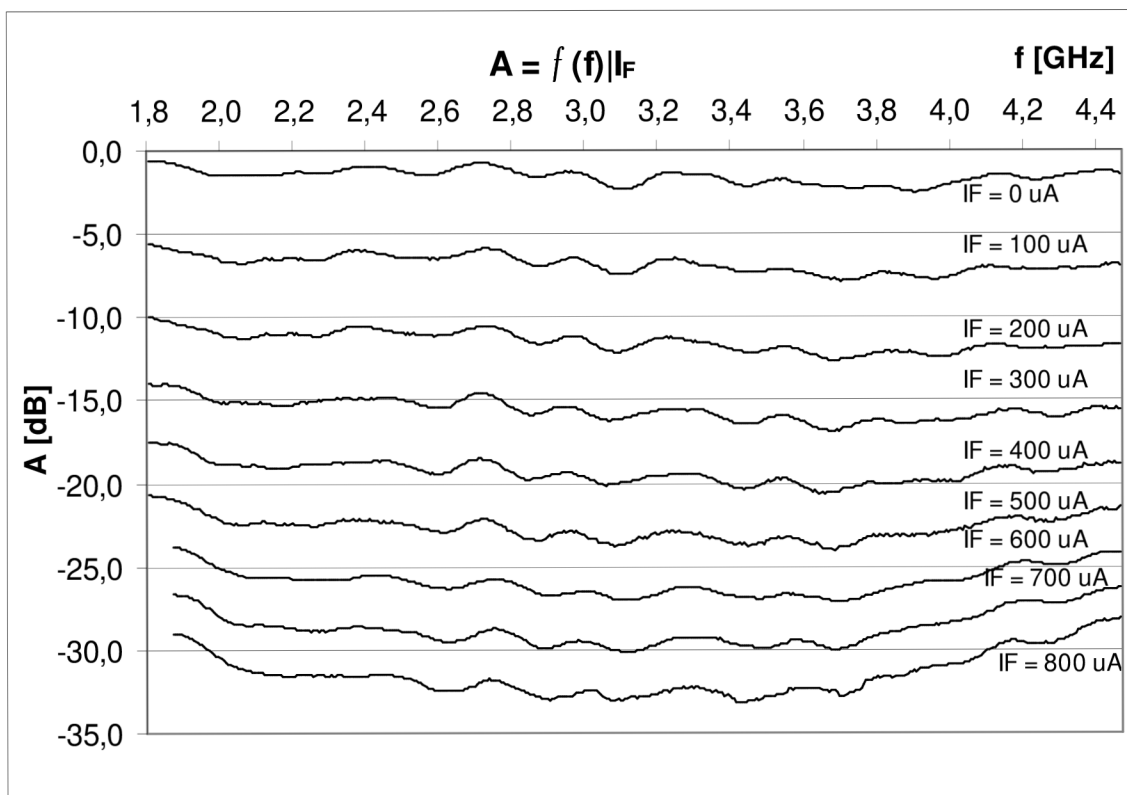
Obr. 14 Schéma zapojení – upravené pracoviště pro měření statických parametrů PIN modulátoru na mikrovlnném skalárním analyzátoru



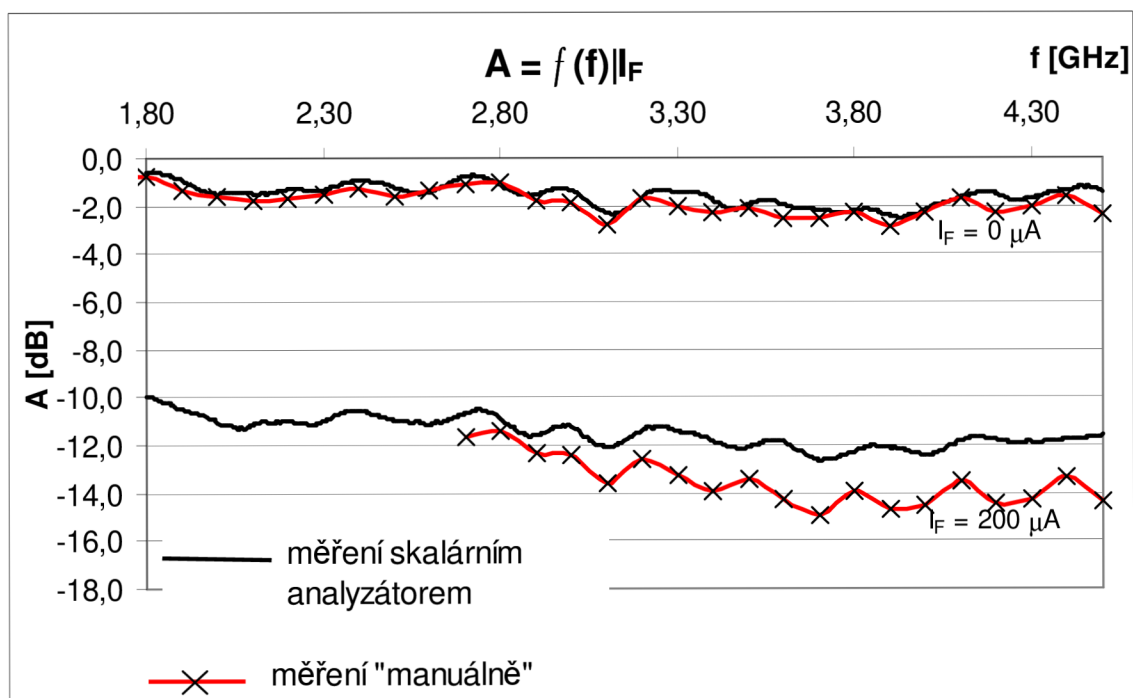
Graf 7: Závislost výkonového přenosu modulátoru na stejnosměrném řídicím proudu v propustném směru $K = f(I_F) | f_{RF} = 3 \text{ GHz}$ měřená pouze analyzátozem



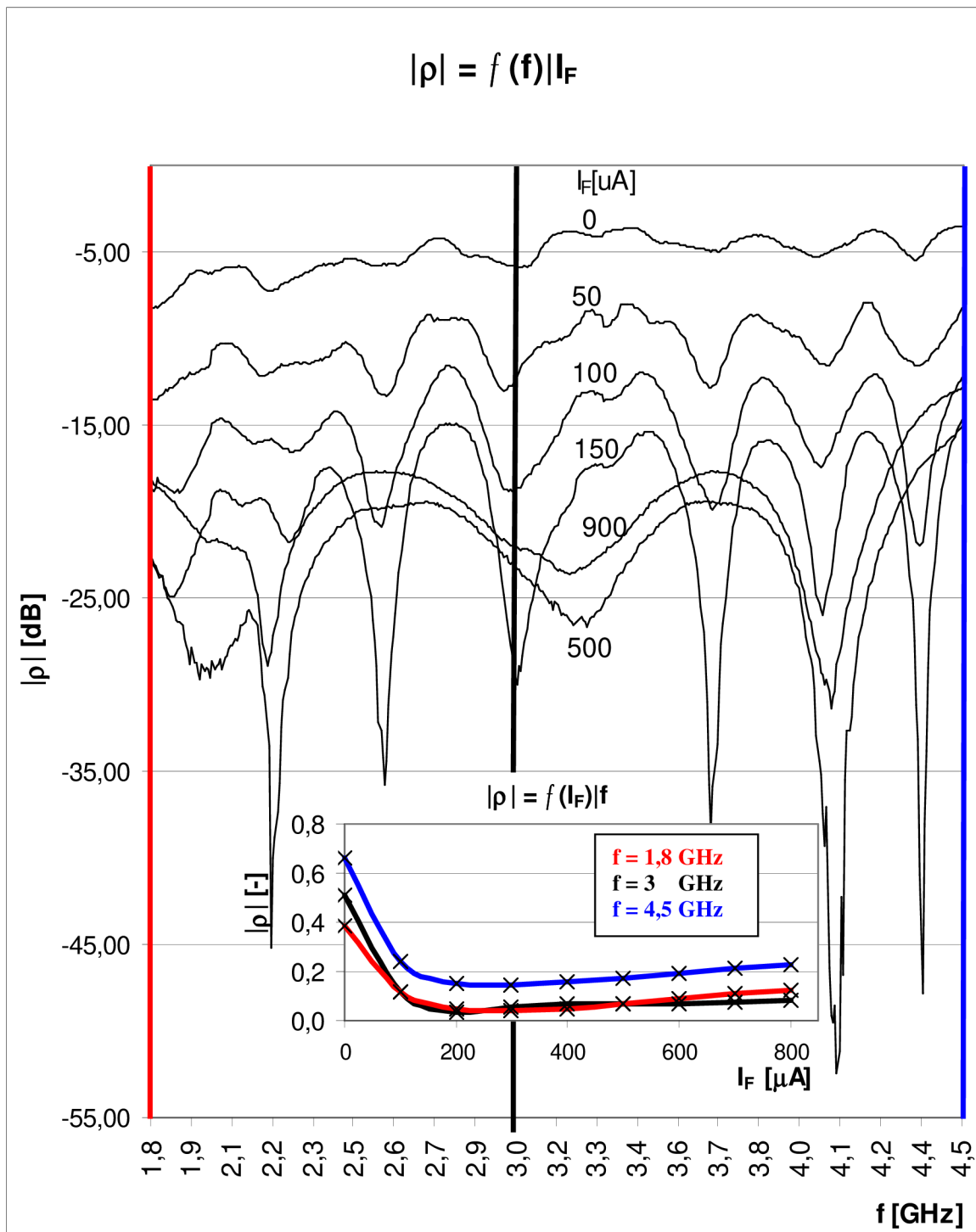
Graf 8: Závislost modulu činitele odrazu na vstupu modulátoru na útlumu, jež je nastaven stejnosměrným řídicím proudu v propustném směru $|\rho| = f(L), |\rho| = f(I_F) | f_{RF} = 3 \text{ GHz}$ s vyznačeným pásmem použití doporučeným výrobcem.



Graf 9: Kmitočtová závislost výkonového přenosu modulátoru při různých konstantních hodnotách stejnosměrného řídicího proudu v propustném směru
 $K = f(f_{RF}) | I_F$ měřena mikrovlnným skalárním analyzátozem



Graf 10: Kmitočtová závislost výkonového přenosu modulátoru při různých konstantních hodnotách stejnosměrného řídicího proudu v propustném směru
 $K = f(f_{RF}) | I_F$ – porovnání výsledků "manuálního" měření s analyzátozem



Graf 11: Kmitočtová závislost modulu činitele odrazu na vstupu modulátoru při různých konstantních hodnotách stejnosměrného řídicího proudu v propustném směru $|\rho| = f(f_{RF}) |I_F|$ + barevně zaznačeny průběhy $|\rho| = f(I_F)$ na 3 vybraných kmitočtech

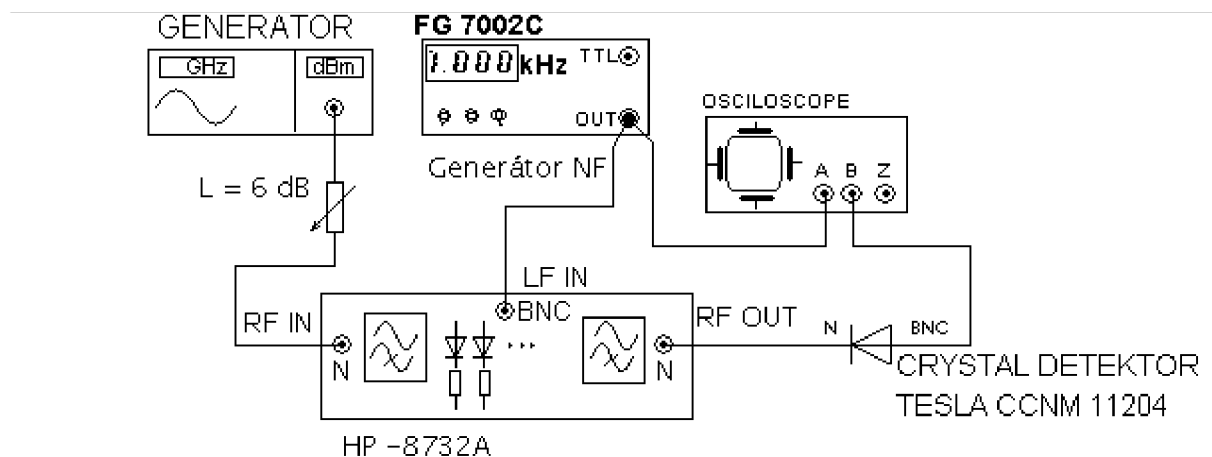
Aplikace modulátoru HP-8732A

Ověření funkce modulátoru

V této práci bylo provedeno pouze ověření funkce daného amplitudového modulátoru s PIN diodami, a to jak pro amplitudové klíčování, tak pro klasickou AM modulaci s oběma postranními pásmy a ponechanou nosnou. Pracoviště je zapojeno podle schématu na obrázku (obr.15). Pomocí osciloskopu byla nastavena podle stejnosměrné charakteristiky měřené na NF vstupu taková hodnota špička-špička obdélníkového průběhu modulačního napětí, aby maximální proud při nastavení offsetu na záporné pulzy nepřekročil 1mA. V takovémto případě je využit celý dynamický rozsah modulátoru, který činí podle katalogových údajů [6] až 35dB. Na druhý kanál osciloskopu máme přiveden signál z detektoru TESLA, jež v našem přiblížení představuje modulační obálku našeho klíčovaného signálu.

Při modulační frekvenci 1kHz se tato obálka viditelně neodlišuje od přiváděného modulačního signálu. Se zvyšující se frekvencí se modulátor chová stále více jako integrační členek. Při frekvenci 1MHz je již funkce modulátoru velmi diskutabilní. I když katalogové údaje udávají nejvyšší, daným modulátorem dosažitelnou délku pulzu 100ns při řízení originálním modulačním generátorem, což odpovídá frekvenci signálu cca 10MHz, v naší aplikaci se nepodařilo k této hodnotě ani přiblížit.

Kromě amplitudového klíčování byl jako modulační signál užit jednak harmonický, jednak trojúhelníkový signál. Vzhledem k nemožnosti měření skutečného zkreslení demodulovaného signálu nemá význam zde kvantifikovat ani ideální velikost stejnosměrného offsetu, ani amplitudu respektive maximální hodnotu signálu. Zde se nabízí možnost dalšího zlepšení, kdy by za předpokladu vhodné techniky bylo možno měřit například závislost zkreslení THD demodulovaného harmonického signálu na amplitudě modulačního signálu. Nakonec byla z důvodu jednoduchosti a dostupnosti pro vlastní laboratorní úlohu využita možnost zobrazení spektra na osciloskopu Agilent 54621A. Jako kritérium pro nastavení pracovního bodu je požadována nejvyšší hodnota modulačního signálu, která ještě nezhorší odstup vyšších harmonických v signálu detekovaném hrotovým detektorem Tesla.



Obr. 15 Schéma zapojení – demonstrace funkce modulátoru

Použité přístroje a přípravy

Přístroj		Výrobce	V.Č.
Ampérmetr	Digimer 10	Iskra	ZP 6962
Stab. zdroj	BK 127	Tesla	613004
Generátor RF	8350B	HP	
+ zás. jednotka	83595A	HP	2749A0510
Osciloskop	54603B	HP	US 39150629
Osciloskop	54621A	Agilent	
Atenuátor	973-10	WE	5761
Crystal detector	CCNM - 11204	Tesla	

Tab. 3 Použité přístroje – demonstrace funkce modulátoru

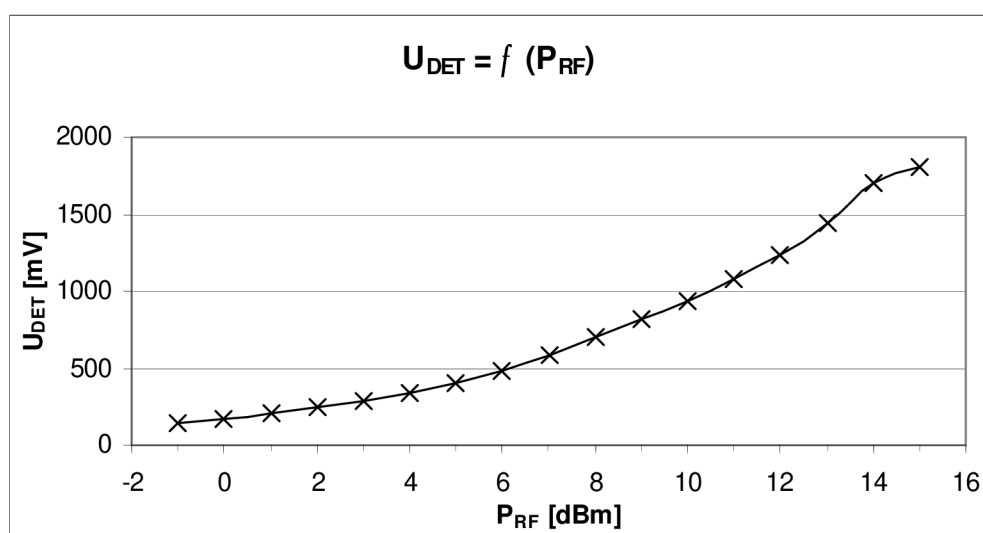
Vlastnosti hrotové detekční diody Tesla CCNM 11204

Pro detekci modulovaného mikrovlnného signálu je často používán tento detektor s hrotovou diodou. Proto bude věnována krátká poznámka jeho vlastnostem.

Kmitočtový rozsah		
GHz	0,85	12,4
Citlivost naprázdno		
mV/uW	0,1	-30 dBm
mV	300	10 dBm
VIDEO ODPOR		3 - 15 kΩ

Tab. 4 Vlastnosti detektoru Tesla

V rozsahu -1÷15 dBm byla změřena převodní charakteristika detektoru naprázdno. ($U_{DET} [mV] = f(P_{RF} [dBm])$) Změřené hodnoty jsou v příloze 3.



Graf 12: Převodní charakteristika detektoru Tesla CCNM 11204

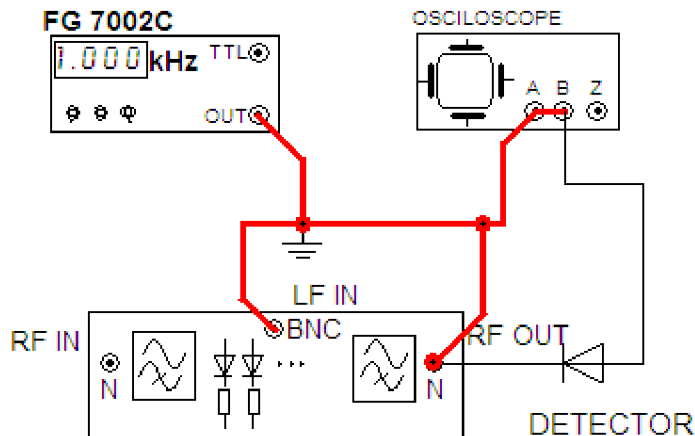
Možnosti osciloskopického zobrazení měřených charakteristik

Vedle klasického měření bod po bodu a poloautomatizovaného měření skalárním mikrovlnným analyzátozem poskytuje zobrazení měřených charakteristik na osciloskopu základní přehled o závislosti měřených veličin.

Z výše měřených charakteristik je nejjednodušeji realizovatelné zobrazení frekvenční charakteristiky útlumu při daném závěrném proudu ($L = f(f)|I_F$), respektive výkonu $P = f(f)|I_F$ při konstantním vstupním výkonu. Mikrovlnný generátor HP 8350B má možnost rozmítání kmitočtu externím napětím. Signál s časovým průběhem sinus nebo trojúhelník by byl z NF generátoru přiváděn jednak na tento vstup, jednak na horizontální osu osciloskopu. Na vertikální osu by byl přiváděn signál z mikrovlnného detektoru Tesla. Odhlédneme-li od faktu, že převodní charakteristika detektoru ($U_{DET} = f(P)$) není lineární (můžeme pro malou změnu výkonu která probíhá v závislosti na změně kmitočtu linearizovat), jediným možným problémem zůstává nenulová frekvenční závislost útlumu předřazeného atenuátoru. Ta má ale pro zobrazení na osciloskopu zanedbatelnou velikost (do 10%). Přes tuto zjevnou bezproblémovost v návodě na laboratorní úlohu postup zobrazení nepopisují obzvláště proto, že tyto závislosti jsou již mnohem uspokojivěji zobrazeny skalárním analyzátozem.

Zobrazení stejnosměrné závislosti odporu NF vstupu na proudu ($(R_D+R) = f(I_F)$) naráží na dva zásadní problémy. A to s měřením odporu a proudu (viz. dále). Pro toto měření je výrazně výhodnější použití řízeného zdroje ovládaného z PC a přídavného voltmetru, případně multimetru s výstupem dat do PC.

Jedinou, z hlediska zobrazení do jisté míry přínosnou závislostí, je statická modulační charakteristika. Vzhledem k faktu, že všechny přístroje mají nesymetrické vstupy (výstupy) proti společné zemi, jak je nakresleno na obrázku (obr.16), je nemožné jednoduše zjišťovat proud do modulátoru.

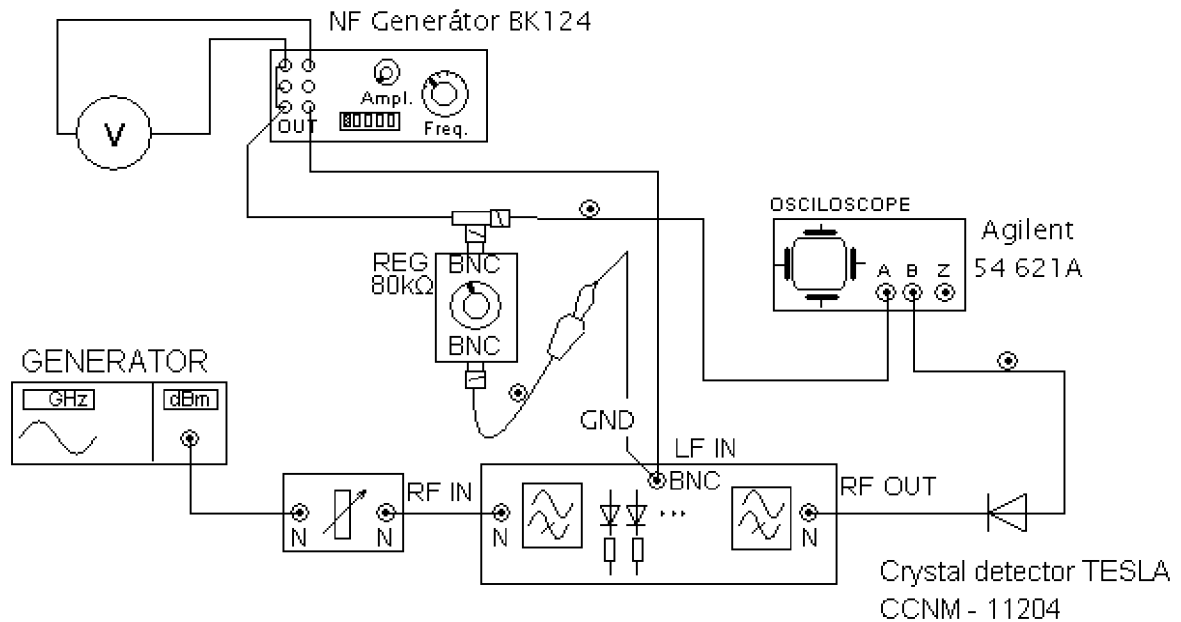


Obr. 16 Schéma problému – společná zem

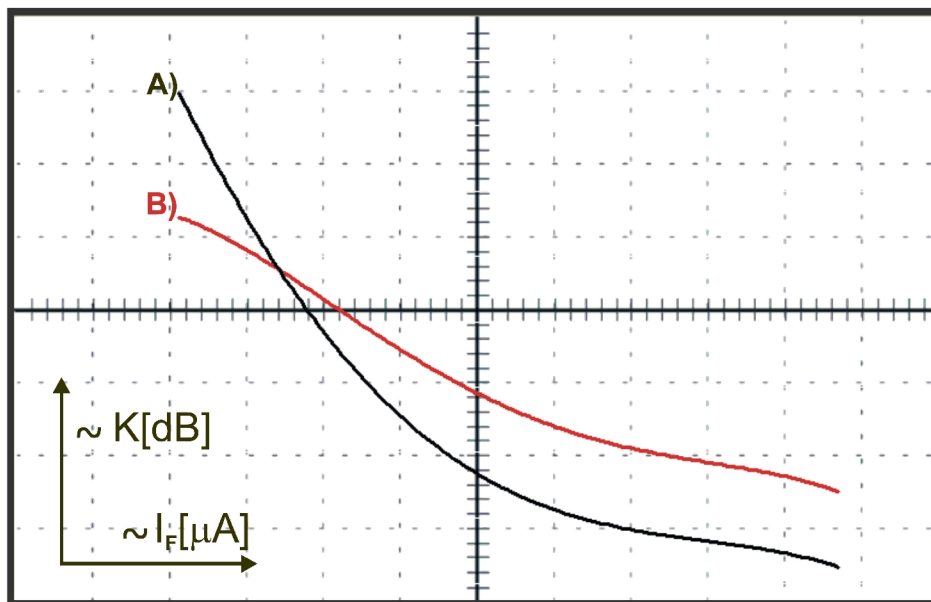
Jako nejjednodušší řešení se jeví použití komponentů s plovoucí zemí. Byl použit NF generátor Tesla BK 124. Schéma pracoviště je na obrázku (obr.17). Pro základní orientaci a případné oceňování oscilogramu by bylo vhodné potenciometrem REG nastavenou hodnotu "bočníku" změřit ohmmetrem.

Hlavní vadou zobrazené charakteristiky je, že neodpovídá závislosti změřené v předchozích bodech, jak můžeme vidět na obrázku (obr.18a). Za hlavní příčinu lze považovat nelineární převodní charakteristiku detektoru Tesla. (graf.12) Zobrazená charakteristika ve skutečnosti odpovídá závislosti detekovaného napětí na závěrném proudu ($U_{DET} = f(I_F)$), nikoli útlumu respektive výkonu na tomto. ($L = f(I_F)$, $P = f(I_F)$) Zohledníme-li část převodní charakteristiky detektoru Tesla, která odpovídá námi měřenému výkonu (Spolu

se započtením děliče napětí vzniklém z videoodporu diody a vstupní impedance osciloskopu), získává charakteristika tvar obdobný závislosti naměřené v předchozích bodech. (obr.18b) Cejchování os nebylo vzhledem k faktu že se jedná pouze o vizualizaci přesně měřené charakteristiky považováno za nutné. (Lze důvodně předpokládat že nepřesnost tohoto zobrazení je vyšší)



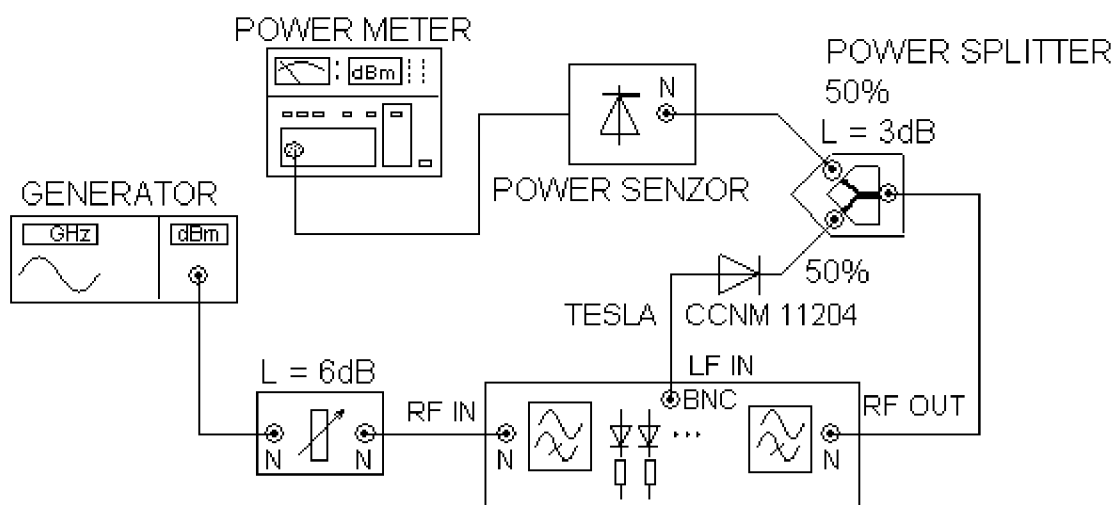
Obr. 17 Schéma zapojení – pracoviště pro vizualizaci statické modulační charakteristiky



Obr. 18 Oscilografické znázornění závislosti proudu modulátorem na útlumu
 A) Charakteristika sejmutá osciloskopem $U_{DET} = f(I_F)$
 B) Závislost po započtení převodní charakteristiky detektoru
 $P = f(I_F) | P_{GEN} = \text{konst.}$

Demonstrace praktického využití PIN modulátoru

Pro demonstraci praktického použití PIN atenuátoru bylo vybráno zapojení smyčky stabilizace výkonu. Pracoviště je zapojeno podle schématu na obrázku.(obr.19)



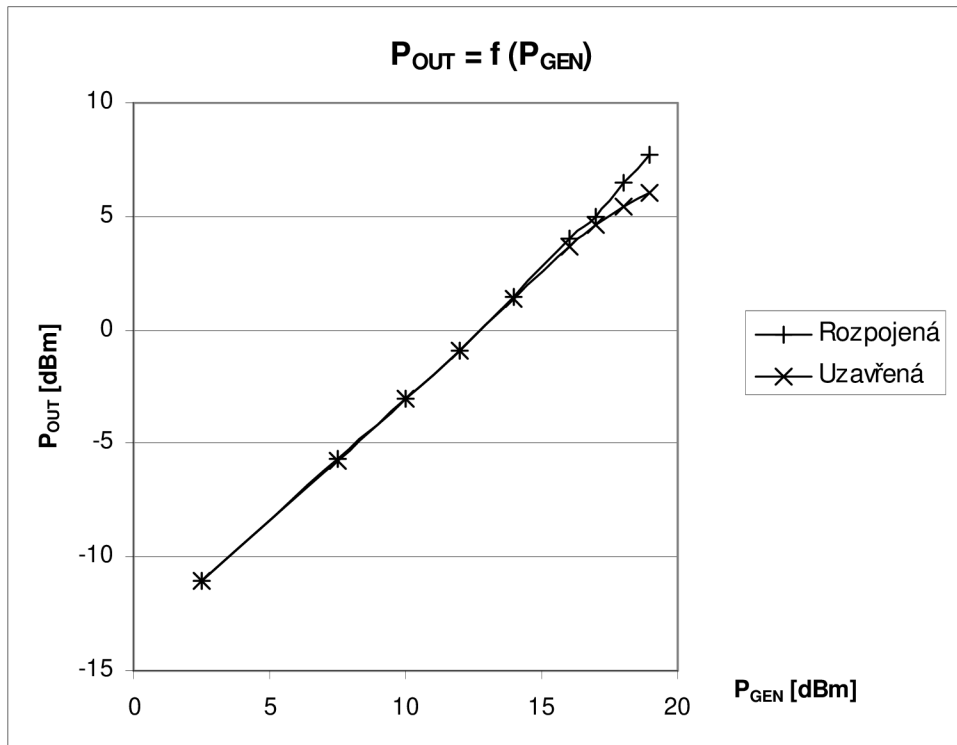
Obr. 19 Schéma zapojení – pracoviště pro demonstraci smyčky stabilizace výkonu

Jak vidíme z grafu přenosu této smyčky (graf 13), je vzhledem k vysokému videoodporu diody vůdčí odporu NF vstupu PIN atenuátoru toto zapojení pro praktickou stabilizaci výkonu nepoužitelné. (I s přihlédnutím k minimálnímu útlumu celého řetězce větším než 9dB.)

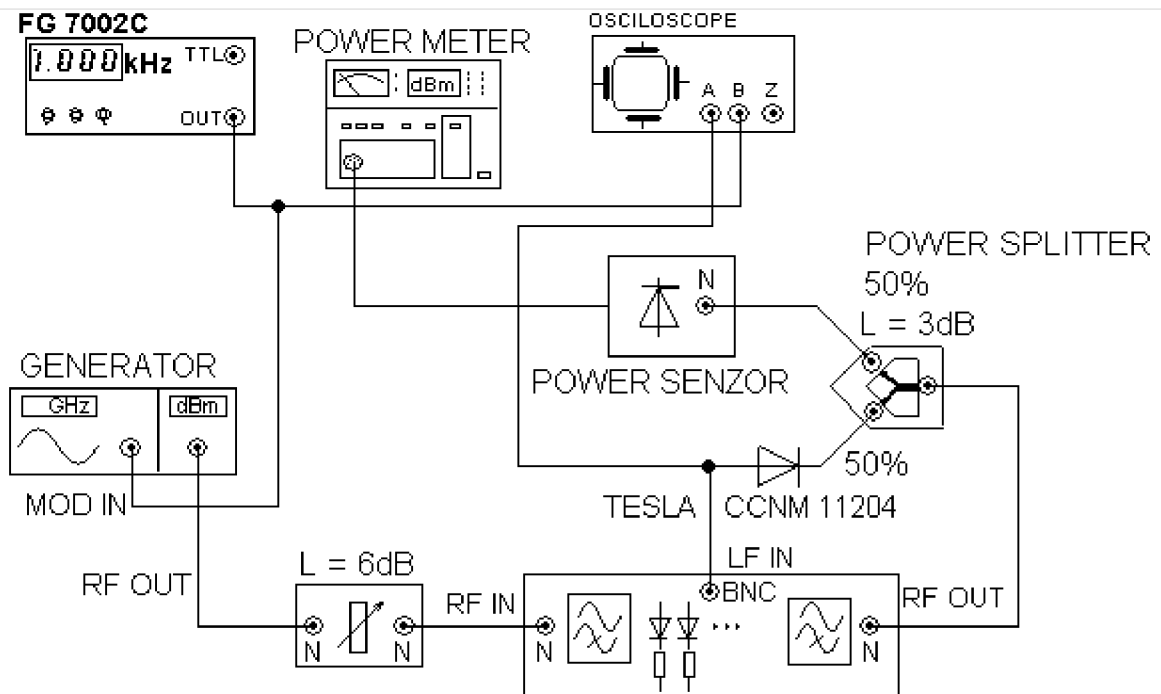
Vzhledem k velice nízké účinnosti “stabilizace“ výkonu je diskutabilní i použití takového zapojení k demonstraci stabilizace výkonu. Situaci by jistě výrazně zlepšil zesilovač ve větvi zpětné vazby mezi detektorem a NF vstupem modulátoru. Tento by musel mít vstupní odpor řádově vyšší než videoodpor detektoru, tj. řádově stovky $k\Omega$ a výstupní odpor řádově nižší než impedance NF vstupu atenuátoru. Vhodná by byla možnost regulace zesílení, nutnost pro dané pracoviště by byla DC vazba.

Jako alternativa k výše popsanému je osciloskopické zobrazení funkce smyčky stabilizace výkonu. Tato ovšem bez použití zesilovače přináší podobně neprůkazné výsledky. Schéma zapojení této varianty je na obrázku. (obr.20) Nejprve si při vypnuté NF modulaci pomocí měřiče výkonu ocejujeme vertikální osu oscilogramu (což můžeme udělat pouze v případě DC vazby případného zesilovače ve zpětné vazbě). Poté můžeme měřič odpojit a zapnout modulaci výkonu mikrovlnného generátoru HP. Frekvenci modulačního signálu s časovým průběhem sinus lze vhodně nastavit mezi 10 Hz a 100 Hz. Spodní mez ještě nevytváří stabilní obraz na stínítku osciloskopu, za horní hranicí již nastává problém s modulací výkonu generátoru. Signál musí mít pouze kladnou polaritu (sinus s ofsetem) a jeho maximální hodnota je 20 V. (hodnoty uváděné výrobcem generátoru HP)

Výsledný oscilogram má při daném zapojení obdobný charakter jako charakteristika měřená staticky. Výhodou této metody je možnost pro zlepšení výsledků použít zesilovač s obdobnými parametry jako výše popsaný, avšak s AC vazbou .



Graf 13: Přenos výkonu zpětnovazební smyčky stabilizace výkonu
Měřeno při $f_{GEN} = 3,5\text{GHz}$



Obr. 20 Schéma zapojení – smyčka stabilizace výkonu – oscilografická demonstrace funkce

Laboratorní úloha

ZADÁNÍ

- 1) Seznamte se s obsluhou a možnostmi číslicového měřiče výkonu HP 436A, skalárního mikrovlnného analyzátoru ANRITSU 54157A a se základní obsluhou mikrovlnného generátoru HP 8530B se zásuvnou jednotkou HP 83595A.
(K základnímu nastavení budou stačit pokyny v návodu)
- 2) Změřte stejnosměrnou charakteristiku modulátoru HP 8732A, tj. závislost odporu modulátoru na nízkofrekvenčním vstupu na stejnosměrném proudu v propustném směru. $(R_D+R) = f(I_F)$
- 3) S použitím měřiče výkonu HP 436A, generátoru HP 8530B změřte na střední frekvenci pracovního pásma modulátoru $f = 3\text{GHz}$ statickou modulační charakteristiku, což je závislost útlumu modulátoru na proudu nízkofrekvenčního vstupu. $L = f(I_F)$ Z naměřených útlumů vypočítejte proudovou závislost odporu PIN diody. Určete nelineární charakteristiku modelu předřadného rezistoru PIN diody a porovnejte ji s udanou linearizovanou charakteristikou.
- 4) Na stejném přístrojovém vybavení změřte několik frekvenčních charakteristik útlumu modulátoru při různých konstantních stejnosměrných proudech na nízkofrekvenčním vstupu v pracovním frekvenčním pásmu modulátoru. $L = f(f) \mid I_F = \text{konst.}$
- 5) Skalárním analyzátozem ANRITSU 54157A změřte a zaznamenejte frekvenční průběhy útlumu pro různé hodnoty proudu I_F . $L = f(f) \mid I_F = \text{konst.}$
Tyto charakteristiky porovnejte s předešlým způsobem naměřenými.
Pomocí kurzoru měřte při daném zmenšeném kroku proudu I_F statickou modulační charakteristiku. $L = f(I_F)$ Naměřené porovnejte s bodem 2. Určete maximální hodnotu PSV při minimálním / maximálním útlumu.
- 6) Uveďte PIN modulátor do režimu amplitudového klíčování (impulsní amplitudová modulace). Podle časových průběhů na osciloskopu nastavte optimální režim této modulace. Pozorujte a zakreslete průběhy jak modulačního obdélníkového signálu, tak i obálky detekovaného mikrovlnného signálu s touto modulací.
- 7) Experimentujte s PIN modulátorem při jeho činnosti v režimu klasické amplitudové modulace (DSB bez potlačení nosné) harmonickým případně trojúhelníkovým signálem. Naleznete optimální režim modulace harmonickým signálem, stanovte hodnotu klidového stejnosměrného předpětí, maximální amplitudu případně rozkmit modulačního napětí.
[6]
- 8) Na osciloskopu zobrazte statickou modulační charakteristiku.
Srovnajte ji s naměřenou v bodě 3. Uveďte možné příčiny deformace.

Laboratorní úloha

POKYNY K MĚŘENÍ

1) Před vlastním měřením je třeba měřič výkonu HP 436A včetně použité sensorové hlavičky nastavit do správného režimu.

Upozornění : Při manipulaci se senzorem dotahujte N konektor jemně a nekrčte tělem senzoru!

Zkontrolujte zda je výkonový senzor zapojený do měřiče výkonu. Připojte sensorovou hlavičku do referenčního výstupu **POWER REF OUTPUT**, zapněte přístroj hlavním vypínačem

LINE ON . Na přístroji nastavte podmínky kalibrace. Otočným voličem nastavte **CALL FACTOR** na 100%, referenční signál je odpojen: tlačítko **POWER REF** vycvaknuté, měřicí stupnici nastavíme **MODE** **WATT** , vypne se manuální přepínání rozsahu **RANGE HOLD** vycvaknuté. Pro vlastní kalibraci offsetu stiskněte **SENSOR ZERO**

a držíte dokud se na displeji nestabilizuje údaj na 0.00 ± 0.02 a než dioda **ZERO** zhasne.

Zapněte výkonovou referenci tlačítkem **POWER REF** , poté zkontrolujte, případně trimrem **CAL ADJ** nastavte na displeji hodnotu 1,000 mW. Vypněte referenci vycvaknutím **POWER REF** , odšroubujte se hlavičky, kterou si nyní můžete připojit na měřený výstup.

Nakonec se podle tabulky na senzoru určí kalibrační faktor pro frekvenci měřeného signálu a přepne se zobrazení na dBm. **MODE** **dBm**

Do inicializovaného stavu uveďte rovněž mikrovlnný generátor HP 8530B a to stisknutím zeleného tlačítka **INSTR PRESET** . Nastavte režim konstantního kmitočtu tlačítkem **CW** .

Hodnota frekvence je zobrazena na levém displeji **FREQUENCY** a lze ji nastavit jednak otočným ovladačem pod tímto displejem, jednak z klávesnice zadáním hodnoty a jednotky.

Nastavte střední kmitočet frekvenčního pásma modulátoru tj. 3 GHz. **3** **GHz**

Výstupní výkon, který lze číst na displeji **POWER** na zásuvné jednotce generátoru, je nastaven na 10 dBm. Generátor se nachází v režimu se zapnutou výkonovou stabilizací, což je indikováno svítkou na tlačítku **INT** ve skupině **ALC MODE** na panelu zásuvné jednotky.

2), 3) Měření v těchto dvou bodech se provede současně. Pracoviště je zapojeno podle schématu na obrázku (obr.13), pouze místo PIN modulátoru je osazena spojka. Na měřiči výkonu máme nastaven kalibrační faktor pro daný kmitočet. Z rozdílu výkonu indikovaného

generátorem a měřeného nastavte posuvný atenuátor na útlum 6 dB a zapojte PIN modulátor podle schématu.

Pomocný potenciometr **REG** nastavte na maximální hodnotu. Tímto potenciometrem nastavujte vzniklý dělič napětí tak, aby napětí na zdroji bylo vždy za polovinou rozsahu analogového měřidla. To vám umožní relativně pohodlně nastavit napětí na zdroji i při požadavku, aby proud diodou byl nastaven v toleranci $\pm 1 \mu\text{A}$ od zadaných hodnot po celou dobu měření.

Na vysokých hodnotách útlumu modulátoru, kde výkon je již pod citlivostí měřiče výkonu, můžete zvyšovat výkon generátoru až do chvíle, kdy se na zásuvné jednotce rozsvítí svítivka **UNLEVELED**, která signalizuje výpadek smyčky stabilizace výkonu, kdy výkon generátoru již neodpovídá výkonu nastavenému a na displeji zobrazenému. Po výpočtu závislosti odporu PIN diody na proudu v závěrném směru (I_F) z útlumu modulátoru určete proudovou závislost odporu předřadného rezistoru. ($I_F = f(R)$) Určete rozdíl této závislosti a linearizovaného modelu.

4) Bylo prokázáno, že senzor použitého měřiče výkonu má i při správném kalibračním faktoru jistou frekvenčně značně závislou chybu. Další podobně velkou nejistotu vnese do měření frekvenční závislost útlumu daného atenuátoru. Těmto chybám se lze vyhnout relativním měřením výkonu. Opět proto modulátor nahraďte propojkou. V kmitočtovém pracovním pásmu modulátoru (1,8 – 4,5 GHz) změřte frekvenční závislost “offsetu“ výkonu, jež v sobě zahrnuje obě výše jmenované nejistoty.

Pro rychlou volbu kmitočtu nastavte na generátoru krok 100 MHz.

CW **STEP SIZE** **1** **0** **0** **MHz** Kmitočet pak krokujete pomocí tlačítek **↑** a **↓**. Nezapomeňte přepínat na měřiči výkonu kalibrační faktor. Poté do obvodu znovu vložte modulátor a měřte ve stejném kmitočtovém pásmu při zadaných hodnotách stejnosměrného řídicího proudu.

5) Zkontrolujte, že pracoviště se skalárním analyzátozem je zapojeno podle schématu na obrázku (obr.14).

Nejprve proveďte nastavení a kalibraci přístroje. Postup nastavení je následující:

Analyzátozem zapněte tlačítkem **POWER**. Proveďte se úvodní test, na jehož konci se zobrazí **ALL TEST PASSED** případně číslo poruchy. Proveďte reset do továrního nastavení.

Stiskněte **SYSTEM MENU** na panelu SYSTEM FUNCTION a pomocí **↑** **↓** na panelu MENU. Vyberte položku **RESET** a potvrďte stiskem klávesy **SELECT**.

Na panelu SOURCE nastavte parametry mikrovlnného generátoru. Výstupní výkon signálu nastavíte stiskem **OUTPUT POWER** a z klávesnice nebo otočným knoflíkem přímo nastavíte požadovanou hodnotu **6 dBm** a potvrďte stiskem **ENTER**. Stiskem klávesy **FREQUENCY** se rozbalí menu, ze kterého vyberete položky START a STOP.

Zadejte požadovaný frekvenční rozsah stiskem **1** **.** **8** **ENTER** **↓** **4** **.** **5** **ENTER**.

Po resetu je přístroj přímo připraven na měření modulu přenosu – **KANÁL 1** a modulu činitele odrazu – **KANÁL 2**.

Postup kalibrace je následující:

Místo modulátoru našroubujte spojku a pro kalibraci stiskněte klávesu **CALIBRATION**.

V zobrazeném menu vyberte položku **START CAL** a potvrďte **SELECT**. Zobrazí se kalibrovaná veličina **TRANSMISSION** a nápis určující vstup přístroje. Potvrďte klávesou **SELECT**. Zobrazí se rovná přenosová přímka detektoru **TRANSMISSION** na úrovni 0 dB. SWR autotester je zapojen do vstupu B. Stiskněte klávesu **CALIBRATION**.

Odstraňte spojku nahrazující modulátor a na otevřený konec autotesteru nasadte podle příkazu na displeji zakončovací prvek stranou:

„naprázdno“ – OPEN – výzva: **CONNECT OPEN TO TEST PORT**

„nakrátko“ – SHORT – výzva: **CONNECT SHORT TO TEST PORT**

Po skončení kalibrace je na displeji rovná přenosová přímka autotesteru **RETURN LOSS** na úrovni 0 dB a displej vás zprávou **CALIBRATION COMPLETED – CONNECT TEST DEVICE – PRESS SELECT WHEN READY** informuje, že kalibrace proběhla úspěšně.

Nyní zapojíte modulátor do původního stavu a stiskem klávesy **SELECT** zahájíte měření.

Kurzory pro měření stacionární modulační charakteristiky se zapínají klávesou **ON/OFF** na panelu CURSOR. Na střed pásma je dostanete pomocí otočného knoflíku


DATA ENTRY. Body statické modulační charakteristiky se zapisují do tabulky 4. Průběhy frekvenčních závislostí útlumu porovnejte se závislostmi v bodě 4 a pro několik hodnot I_F tyto zakreslete.

Pozorujte frekvenční průběhy modulu činitele odrazu na vstupu PIN modulátoru a jejich závislost na I_F . Maximální hodnotu PSV vypočtete z modulu činitele odrazu jednak při minimálním útlumu ($I_F = 0 \mu A$), jednak při maximálním útlumu ($I_F = 900 - 1000 \mu A$). Na

frekvenční závislosti vyhledejte a kurzorem změřte vždy maximální hodnotu modulu činitele odrazu, poznamenejte také hodnotu frekvence a útlumu v daném bodě.

6) Modul je zapojen jako modulátor podle schématu na obrázku (obr.15).

Na nízkofrekvenčním generátoru nastavíte frekvenci 1kHz. Podle statické modulační charakteristiky měřené v bodě 3 a 5 nastavte optimální velikost modulačního napětí, jehož průběh je zobrazen jako průběh 1 na osciloskopu. Stejnosemernou složku modulačního signálu nastavíte regulátorem **DC OFFSET** tak, aby byly na diodu přiváděny pouze pulzy záporné polarity !! Případného snížení úrovně modulačního signálu dosáhneme vložením atenuátoru $L = 20 \text{ dB}$ stiskem tlačítka **ATT**. Po nastavení citlivosti 2. kanálu osciloskopu (např. tlačítkem **AUTOSCALE**) zde vidíte průběh obálky modulovaného signálu. Porovnejte tyto průběhy (velikost a stejnosměrná složka) s průběhy očekávanými ze statické modulační charakteristiky. Typické průběhy zakreslete. Zvyšujte kmitočet modulačního signálu a pozorujte deformaci obálky modulovaného signálu.

7) Nyní na NF generátoru přepněte průběh modulačního napětí na sinusoidu, případně trojúhelník, frekvenci snížíme na 50 Hz. Pokuste se nastavit co největší velikost tohoto napětí případně offsetu, dokud však není modulační signál viditelně zkreslený. Při nastavení můžete použít funkci pro zobrazení spektra **MATH**, virtuálním tlačítkem **FFT** se dostanete do menu rychlé Fourierovy transformace. Zde zvolíte zdrojem kanál 2, na kterém je přiveden demodulovaný signál. Virtuální tlačítko **SOURCE**, střední frekvenci nastavíte na námi modulovaných 50 Hz virtuálním tlačítkem **CENTER** a otočným prvkem  doladíte. Stejným způsobem se nastaví šířka pásma asi 2 kHz tlačítkem **SPAN** a v submenu **MORE FFT** nastavíte vhodnou velikost a polohu spektra na monitoru. Nyní máte ve středu horizontální osy požadovanou harmonickou 50 Hz a dále vpravo vyšší harmonické. Nastavte takový pracovní bod modulátoru, aby byl i při dostatečně velkém modulačním signálu odstup těchto nežádoucích spektrálních složek co nejvyšší. Nastavené hodnoty DC offsetu a amplitudy modulačního napětí zaznamenejte.

8) Pracoviště zapojte podle schématu. (obr.17) Frekvence je nastavena na 50 Hz. Nejprve se pomocí voltmetru nastaví amplituda modulačního signálu (voltmetr měří efektivní hodnotu) na hodnotu pro pracovní oblast modulátoru (amplituda nesmí překročit 10V !!), pak připojíme modulátor. Stiskem **MAIN/DELAYED**, dále virtuálního **X/Y** se dostanete do XY módu.

Aby zobrazená charakteristika měla alespoň orientaci os stejnou jako změřená statická modulační charakteristika, proveďte inverzi směru vertikální osy tlačítkem pro vstup **2** a virtuálním tlačítkem **INVERT**. Potenciometrem **REG** se doladí citlivost měření proudu.

Závěr

Bakalářská práce shrnuje i řešení předchozích semestrálních projektů. Obsahuje jednak základní poznatky o struktuře, principech funkce a užití PIN diod, které tvoří zároveň jistý teoretický úvod laboratorní práce.

Nemalá část práce je věnována měřením, jež byly nutné vzhledem k nedostatku informací o modulátoru. Z tohoto důvodu byla také obtížná možnost konfrontace naměřených hodnot s hodnotami vypočtenými, jelikož pro výpočty chybí počáteční hodnoty. Hodnoty vypočtené z naměřených jsou proto konfrontovány se mnou vytvořeným standardem.

Laboratorní úloha má kromě vlastního zadání navržen přehledný a kompletní pracovní postup, který byl ověřen nezávislým měřením a přehledný formulář pro tvorbu protokolů. Z tohoto pohledu laboratorní úloha, jež je hlavním výstupem této práce, splňuje požadavky zadání.

Seznam použité literatury

- [1] SVAČINA, Jiří. *Speciální elektronické součástky a jejich aplikace, Přednášky*. MJ Servis Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.
- [2] ROTHBAUER, Miloš; kol. *Mikrovlonné polovodičové součástky a jejich použití*. Praha: SNTL, 1985.
- [3] Kolektiv autorů; edited by WATSON, H, A. *Microwave Semiconductor Device and Their Circuit Applications*. McGraw-Hill Book Company: New York, 1969.
- [4] SVAČINA, Jiří. *Speciální elektronické součástky a jejich aplikace, Návody pro laboratorní experimenty*. FEKT VUT v Brně: dostupné jako elektronický text, 2004.
- [5] MUSIL, Vladislav; BRZOBOHATÝ, Jaromír; BOUŠEK, Jaroslav; PRCHALOVÁ, Ivana. *Elektronické součástky*. VUT v Brně: VUTIUM, 2005.
- [6] DOUGLAS, A. Gray. Absorbtion Modulators for Simple or Complex Microwave Modulation. *Hewlett-Packard journal*, November 1964, č.3, s. 1-7

Příloha 1: Naměřené hodnoty napětí a proudů vypočítané hodnoty odporů pro stejnosměrné parametry modulátoru měřené na NF vstupu

Propustný směr

I_F	U_D	R_+		I_F	U_D	R_+
μA	mV	k Ω		mA	V	k Ω
0,5	0,6	1,20		1	0,728	0,73
1	0,9	0,90		2	1,052	0,53
2	2,2	1,10		3	1,356	0,45
5	5,3	1,06		4	1,625	0,41
10	10,5	1,05		5	1,923	0,38
20	21,5	1,08		6	2,170	0,36
30	31,1	1,04		7	2,450	0,35
40	42,4	1,06		8	2,720	0,34
50	51,8	1,04		9	2,990	0,33
60	63,0	1,05		10	3,250	0,33
70	72,3	1,03		20	5,700	0,29
80	83,8	1,05		30	8,170	0,27
90	94,9	1,05		40	10,440	0,26
100	106,0	1,06		45	11,950	0,27
200	209,0	1,05		50	12,940	0,26
300	311,0	1,04		55	14,170	0,26
400	411,0	1,03		60	15,480	0,26
500	494,0	0,99		66	17,110	0,26
600	559,0	0,93				
700	607,0	0,87				
800	654,0	0,82				
900	692,0	0,77				

Závěrvý směr

I_F	U_D	R_-
μA	mV	k Ω
100	113	1,13
200	233	1,17
500	560	1,12
600	668	1,11
900	1	1,11
1	1,1	1,10
2	2,26	1,13
3	3,31	1,10
4	4,4	1,10
5	5,47	1,09
6	6,56	1,09
7	7,75	1,11
8	8,81	1,10
9	9,65	1,07
10	10,7	1,07
15	15,8	1,05
18	18,8	1,04

Příloha 2: Naměřené hodnoty útlumů oběma metodami měření, hodnoty modulu činitele odrazu na vstupu PIN modulátoru

f_0 3 GHz cal factor 99% Útlum
 Z_0 50 Ω kabelu 4,1 dB
 P_g 10 dBm $P = 10$ mW

Manuální měření útlumu

I_f	U_D	R	$P_{\text{měř}}$	L
μA	mV	k Ω	dBm	dB
0	0		-7,00	-12,90
1	1	1,00	-7,06	-12,96
10	10,5	1,05	-7,06	-12,96
20	21	1,05	-7,06	-12,96
50	53	1,06	-7,06	-12,96
100	105	1,05	-7,07	-12,97
150	157	1,05	-7,08	-12,98
200	205	1,03	-7,08	-12,98
300	313	1,04	-7,17	-13,07
400	411	1,03	-7,27	-13,17
450	443	0,98	-8,43	-14,33
500	490	0,98	-9,47	-15,37
550	520	0,95	-10,78	-16,68
600	546	0,91	-12,35	-18,25
650	572	0,88	-13,99	-19,89
700	594	0,85	-15,73	-21,63
750	615	0,82	-17,50	-23,40
800	633	0,79	-19,19	-25,09
850	652	0,77	-20,91	-26,81
900	669	0,74	-22,63	-28,53
950	685	0,72	-24,31	-30,21
1000	702	0,70	-26,00	-31,90
1050	718	0,68	-27,73	-33,63
1100	733	0,67	-29,58	-35,48

Měření útlumu a modulu činitele odrazu pomocí analyzátoru

fo 3GHz

IF	L	R.L.	ρ
uA	dB	dB	-
0	11,96	-1,02	0,889
20	11,96	-1,03	0,888
100	11,98	-1,04	0,887
250	12,03	-1,09	0,882
350	12,26	-1,21	0,870
400	12,68	-1,45	0,846
450	13,36	-1,89	0,804
500	14,56	-2,46	0,753
550	15,84	-3,10	0,700
600	17,56	-3,84	0,643
650	19,30	-4,62	0,587
700	21,10	-5,40	0,537
750	22,80	-6,20	0,490
800	24,50	-7,00	0,447
850	26,30	-7,90	0,403
900	27,90	-8,78	0,364
950	29,10	-9,16	0,348
1000	30,80	-10,60	0,295
1050	32,14	-10,90	0,285
1100	33,60	-11,70	0,260
1200	36,00	-13,60	0,209
1300	38,60	-16,00	0,158
1400	40,90	-17,90	0,127

Příloha 3: Naměřené hodnoty převodní charakteristiky hrotového detektoru Tesla CCNM – 11204

P _{RF} [dBm]	U _{DET} [mV]
-1	146
0	173
1	204
2	241
3	286
4	341
5	407
6	487
7	585
8	699
9	818
10	939
11	1075
12	1233
13	1438
14	1697
15	1809

Na výstupu detektoru je záporné napětí vůči BNC
Napětí měřeno naprázdno

F _{RF} [GHz]	1,8
-----------------------	-----

Chyba při vyšších frekvencích v daném pásmu do 5%

Obsah

Úvod – diskuze zadání	- 1 -
Principy činnosti diod PIN	- 2 -
Dioda bez jakéhokoli signálu	- 2 -
Dioda se stejnosměrným předpětím v propustném/závěrném směru	- 3 -
Dioda ve vysokofrekvenčním poli	- 3 -
Základní parametry diod PIN	- 4 -
Nejnižší pracovní kmitočet	- 4 -
Činitel jakosti (jakost) diody PIN	- 4 -
Mezní kmitočet diody PIN	- 4 -
Dioda PIN paralelně na VF vedení	- 5 -
Útlum modulátoru	- 5 -
Modul činitele odrazu na vstupu modulátoru	- 5 -
Zjednodušující model přípravku	- 5 -
Obvyklé užití diod PIN X Možnosti použití	- 6 -
modulátoru HP-8732A	- 6 -
Parametry modulátoru HP-8732A	- 9 -
Měření stejnosměrných parametrů mikrovlnného modulátoru	- 9 -
Měření statických parametrů modulátoru	- 11 -
Možnosti odstranění odrazů (stojatého vlnění) na kabelu	- 13 -
Nové měření statických modulačních parametrů modulátoru	- 15 -
Relativní měření výkonu	- 15 -
Aplikace modulátoru HP-8732A	- 20 -
Ověření funkce modulátoru	- 20 -
Vlastnosti hrotové detekční diody Tesla CCNM 11204	- 21 -
Možnosti osciloskopického zobrazení měřených charakteristik	- 22 -
Demonstrace praktického využití PIN modulátoru	- 24 -
Laboratorní úloha - ZADÁNÍ	- 26 -
Laboratorní úloha - POKYNY K MĚŘENÍ	- 27 -
Laboratorní úloha - FORMULÁŘ PROTOKOLU	- 27 -
Laboratorní úloha - PROTOKOL VZOROVÝ	- 27 -
Závěr	- 40 -

Seznam příloh

Příloha 1	Naměřené hodnoty napětí a proudů vypočítané hodnoty odporů pro stejnosměrné parametry modulátoru měřené na NF vstupu
Příloha 2	Naměřené hodnoty útlumů oběma metodami měření, hodnoty modulu činitele odrazu na vstupu PIN modulátoru
Příloha 3	Naměřené hodnoty převodní charakteristiky hrotového detektoru Tesla CCNM – 11204