

Výkonový tranzistorový zesilovač pro 1,8 – 50 MHz

Ing. Tomáš Kavalír, Ph.D. - OK1GTH, kavalir.t@seznam.cz

Uvedený článek je volný pokračováním předešlého článku, který pojednával o výkonových LDMOS tranzistorech a jejich chlazení [1]. V tomto prakticky zaměřeném pokračování bych rád čtenáře seznámil s konstrukcí širokopásmového výkonového zesilovače určeného pro kmitočtový rozsah 1,8 – 50 MHz a výstupním výkonu okolo 300 W.

Úvod

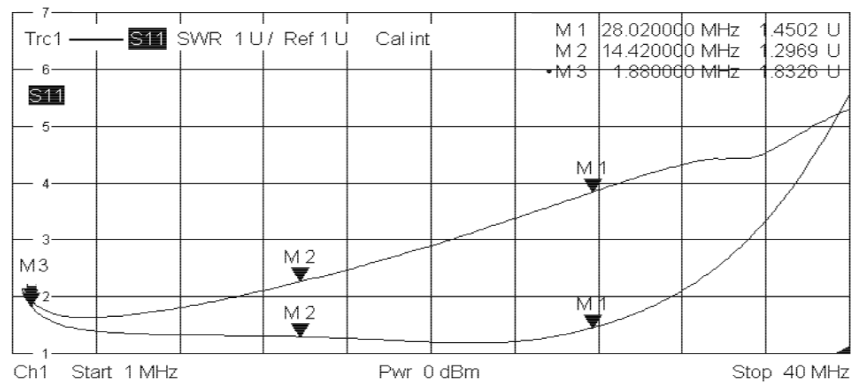
Zesilovač je osazen známým a cenově dostupným výkonovým LDMOS tranzistorem BLF 278 [2], jehož základní parametry jsou uvedeny zde:

- výrobce NXP , doporučený pro VKV push-pull aplikace
- pouzdro SOT262, doporučený pro 50 V napájení
- $P_{tot} = 500 \text{ W}$, $V_{ds_{max}} = 125 \text{ V}$, $I_{d_{max}} = 18 \text{ A}$, $R_{thj-mb} = 0,35 \text{ K/W}$

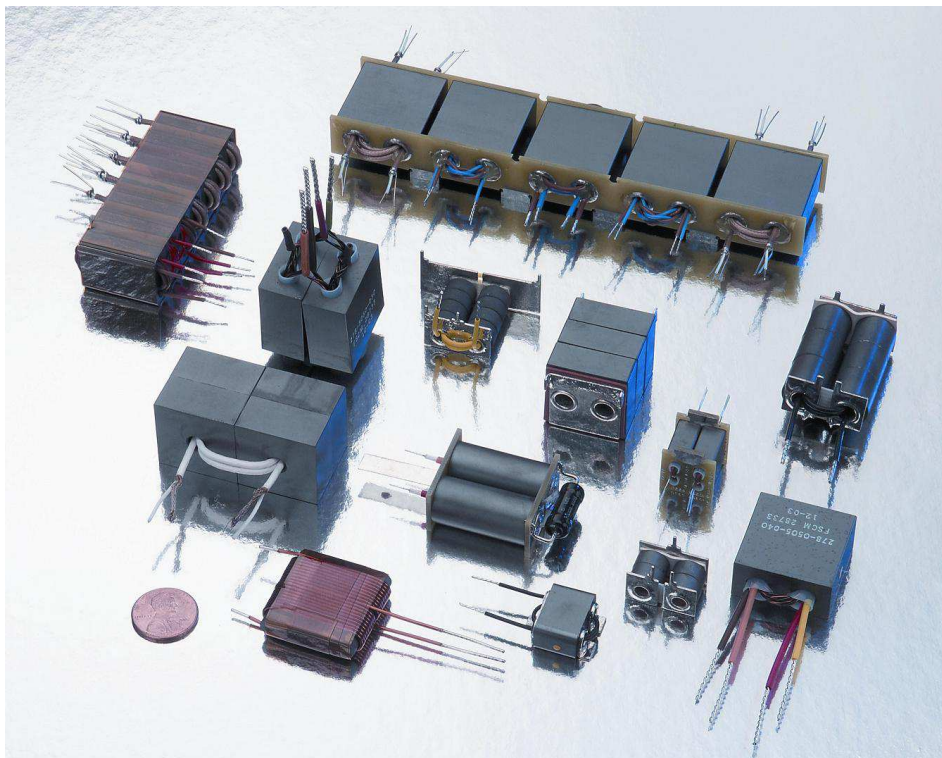
Tranzistor je prioritně určen pro aplikace v pásmu VKV, ale jak praxe ukázala, je možné s jeho pomocí realizovat širokopásmový zesilovač v pásmu KV, který vykazuje velmi dobré parametry a u kterého nebyly pozorovány žádné náznaky nestability v celém kmitočtovém rozsahu i v limitních případech odpojené zátěže. Při vlastním návrhu bylo důležité stanovit přibližné vstupní – zatěžovací (výstupní) impedance. Vzhledem k tomu, že se nepředpokládá využití tranzistoru BLF 278 v kmitočtovém segmentu 1 – 50 MHz, tak výrobce tyto impedance neuvádí a ani nebylo možné je přímo získat. V předchozím článku proto byly tyto impedance stanoveny přibližným analytickým výpočtem a následně byl podle nich vytvořen model zesilovače ve specializovaném simulačním prostředí. Vypočítané hodnoty jsou jen orientační (zvláště hodnota zisku), protože vycházejí z přibližného lineárního modelu, ale jak se nakonec ukázalo, bylo pomocí nich možné realizovat vlastní širokopásmový zesilovač s šířkou pásma necelé dvě dekády.

Zesilovač je klasické koncepce, kdy na svém výstupu používá inovativní způsob řešení výstupního transformátoru, který vykazuje větší širokopásmovost, lépe definovanou impedanci, jednodušší konstrukci a ve výsledku i nižší cenu výroby. Běžné širokopásmové LDMOS zesilovače určené pro oblast KV jsou zpravidla realizovány formou hybridních širokopásmových transformátorů s definovaným transformačním poměrem realizovaných na

speciálních jádrech z feritového materiálu. Tyto řešení vykazují zpravidla vyšší rozptylovou indukčnost, která zásadním způsobem ovlivňuje širokopásmovost transformátoru. Určitého zlepšení je možné dosáhnout kompenzací rozptylové indukčnosti.



Obr. 1: Konvenční širokopásmový transformátor s kompenzací a bez kompenzace rozptylové indukčnosti.

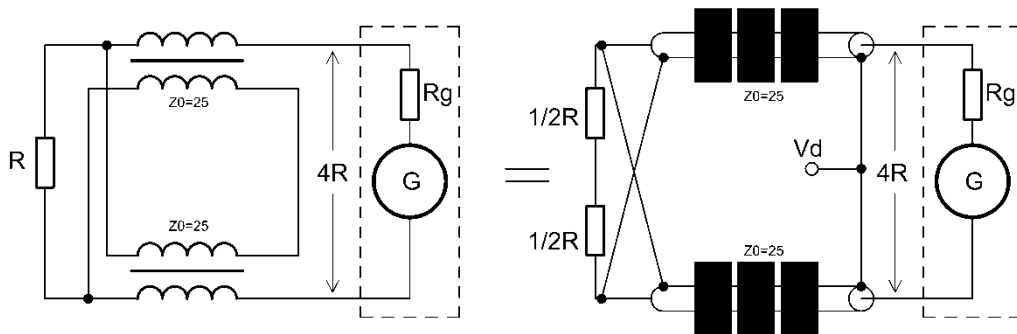


Obr. 2: Ukázka konvenčních širokopásmových transformátorů firmy CMI Ferrite.

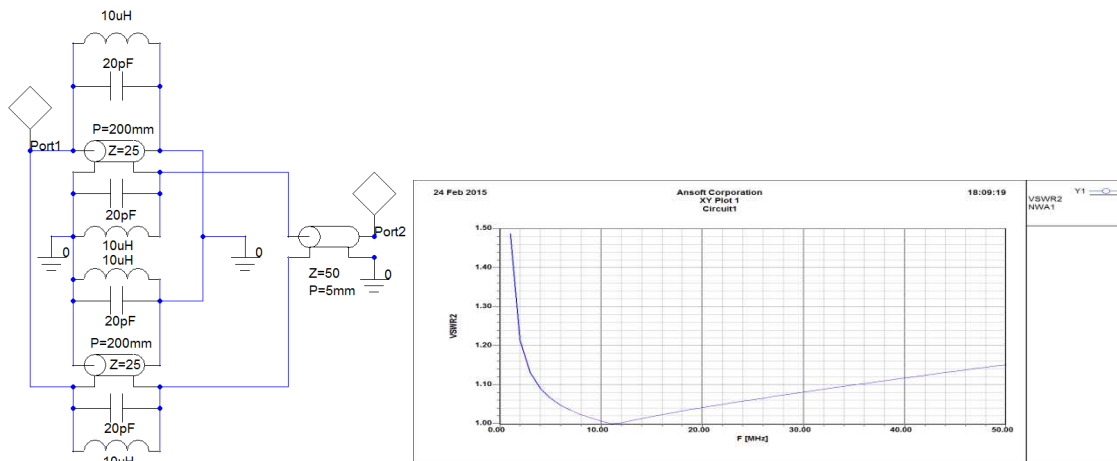
Výstupní obvod je realizován „Guanella transmission line“ transformátorem [3], tvořeným úseky koaxiálního vedení o vlnové impedanci $Z_0 = 25 \Omega$ a transformačním poměrem 1:4. Optimální vlnová impedance koaxiálního vedení je dána:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{in} Z_{out}}$$

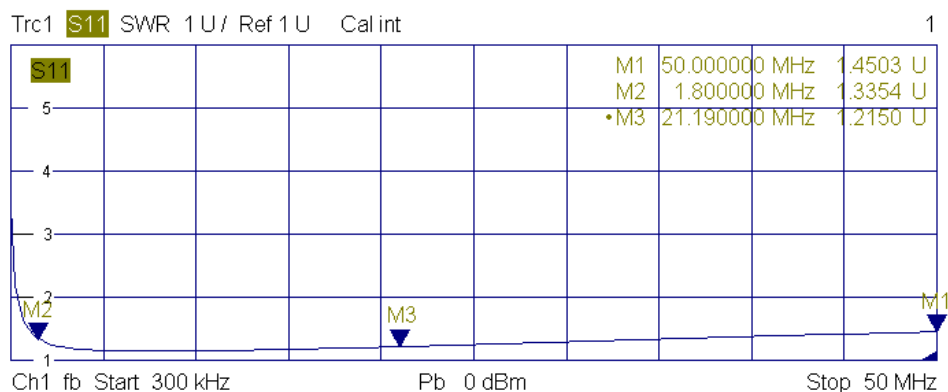
Tento širokopásmový transformátor je řešen netradičním způsobem, kdy vlastní koaxiální vedení o vlnové impedanci 25Ω je navinuto na toroidním jádře. Tímto řešením vznikl širokopásmový transformátor s minimální rozptylovou indukčností o šířce pásma téměř dvě dekády. Vzhledem k velmi malému rozptylu nebylo potřeba kompenzačního kondenzátoru. Vstupní část zesilovače je tvořena transformátorem s transformačním poměrem 9:1, který zajišťuje přizpůsobení v celém rozsahu 1- 50 MHz. Takto je možné kompromisně dosáhnout relativně dobré hodnoty činitele přizpůsobení ($PSV \leq 1,6$). Na vstupu je dále integrován útlumový člen 6 dB, díky kterému je zajištěna potřebná hodnota buzení a dobré impedanční přizpůsobení vstupu.



Obr. 3: Experimentální širokopásmový transformátor.



Obr. 4: Zjednodušený model širokopásmového transformátoru a výsledek simulace jako S11 pro transformační poměr impedancí 1:4.



Obr. 5: Změřený průběh SWR pro zatěžovací impedanci 12,5 Ω v pásmu 0,3 - 50 MHz.

Praktická realizace zesilovače

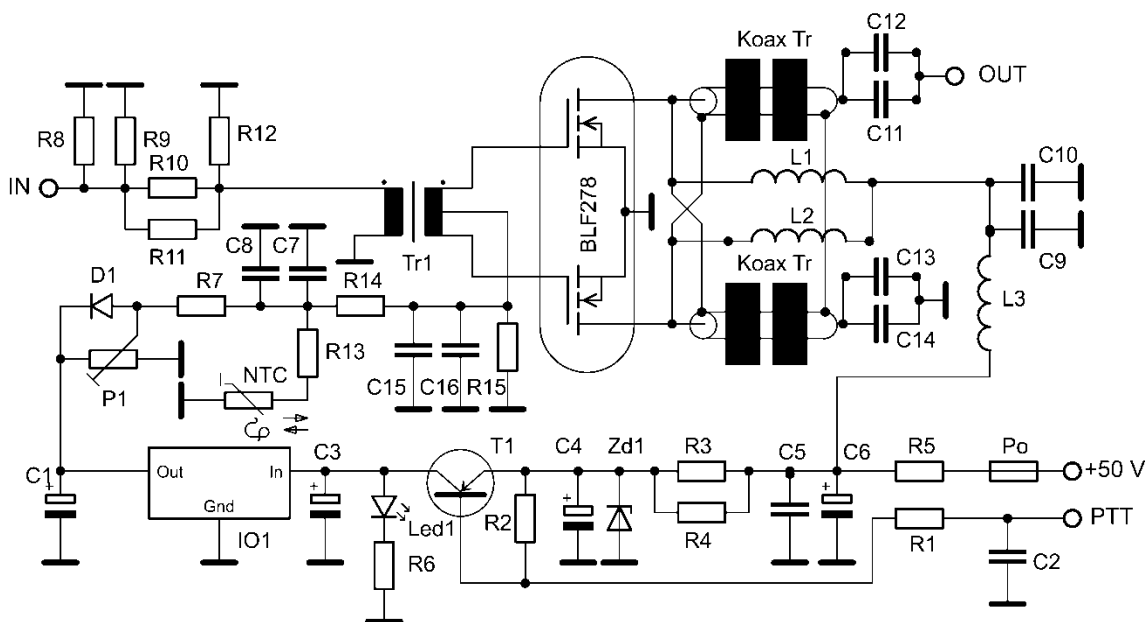
Zesilovač je realizován na oboustranném plošném spoji tvořeném materiálem FR4 tloušťky 1,5 mm a plošný spoj má rozměr 70x140mm. Na desce plošného spoje je implementováno ovládání PTT a zároveň obvod teplotní stabilizace pro řízení klidového proudu založeného na termistoru NTC. Klíčovou součástí je výstupní transformátor s poměrem 1:4, který je tvořen 11 závitů 25 Ω koaxiálního PTFE kabelu na jádře TN23/14/7 z hmoty 4C65 od firmy Ferroxcube[4]. Zapojení je patrné ze schématu. Problematické může být sehnání 25 Ω koaxiálního PTFE kabelu, který není běžně dostupný. V zahraničí je možné sehnat například koaxiální kabel RG316-25 ve verzi 25 Ω . Další důležitou součástí je vstupní transformátor Tr1 a napájecí tlumivka. Vstupní transformátor má transformační poměr 1:9 a je tvořen jedním závitkem měděného drátu průměru 1mm a třemi závitky měděného lanka s PTFE izolací o průřezu cca 0,14 - 0,25mm² na dvou-otvorovém feritovém jádře BN-43-202. Stejně jádro je použito i pro výkonovou napájecí tlumivku L3, která je tvořena jedním závitkem měděného drátu s PVC izolací o průřezu 1,5 mm². Druhá napájecí tlumivka je tvořena 8 závitky bifilárního vinutí na jádře FT114-43 vinutá drátem s lakovanou izolací o vnějším průměru 0,85 mm. Tato tlumivka vykazuje dobrou izolaci mezi oběma výstupy a její elektrické zapojení je patrné z následujícího obrázku.



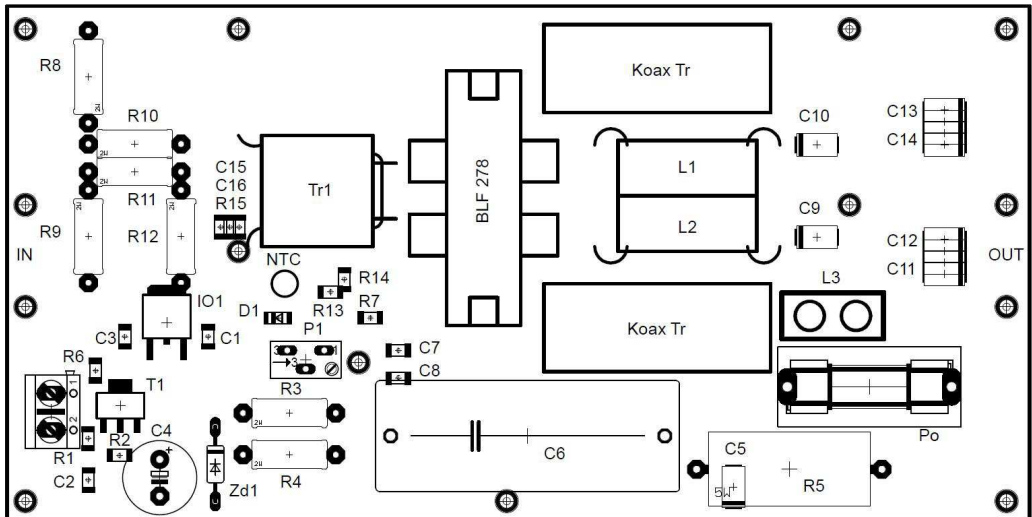
Obr. 6: Napájecí dvojitá tlumivka.

Na vstupu zesilovače je umístěný 6 dB útlumový člunek, který zajistí dostatečné impedanční přizpůsobení vstupu a je tvořen 2 W bezindukčními odpory. U popisovaného zesilovače je zvolena kombinovaná montáž, kdy jsou použity jak klasické vývodové součástky, tak i součástky určené pro montáž technologií SMT. V označených místech na plošném spoji jsou umístěny kvalitní „prokovky“ tvořené dutými měděnými nýtky o průměru 2 mm, které mohou být ve finální montáži i proletované. Výstupní kondenzátory a některé blokové kondenzátory je nutné použít kvalitní výkonové „vícevrstvé“ označované jako MLCC, které dodávají například ATC, Kemet, AVX atd. Tyto součástky jsou označeny v seznamu součástek. Jak bylo uvedeno v úvodu, zesilovač je osazen LDMOS tranzistorem BLF 278, který je citlivý na poškození například statickou elektřinou. Tento tranzistor osazujeme jako poslední a dbáme pravidel pro osazování elektrostaticky citlivých součástek. Ožívání zesilovače začneme s odpojeným tranzistorem, kdy připojíme regulovatelný zdroj s proudovou pojistkou a vyzkoušíme spínání PTT, které je indikováno LED diodou. Zároveň vyzkoušíme, jestli je možné regulovat napětí na vstupní bráně tranzistoru v rozmezí cca 0-5 V a po vyzkoušení nezapomeneme nastavit napětí blízké 0 V. Nyní přiletujeme vlastní tranzistor a celou desku přimontujeme na dobře dimenzovaný chladič s měděnou teplovodnou sběrnicí. Tranzistor je nutné potříť dosedací plochou rovnoměrnou tenkou vrstvou tepelně vodivé pasty a utáhnout doporučeným momentem. Dáme pozor, aby tranzistor nebyl mechanicky namáhán a nedošlo k jeho poškození při utahování. Je proto často výhodnější letovat tranzistor až u finálního mechanického provedení a umístění desky zesilovače na chladič. Po připojení napájecího napětí postupně pomalu zvyšujeme hladinu napětí na vstupní bráně pomocí více-

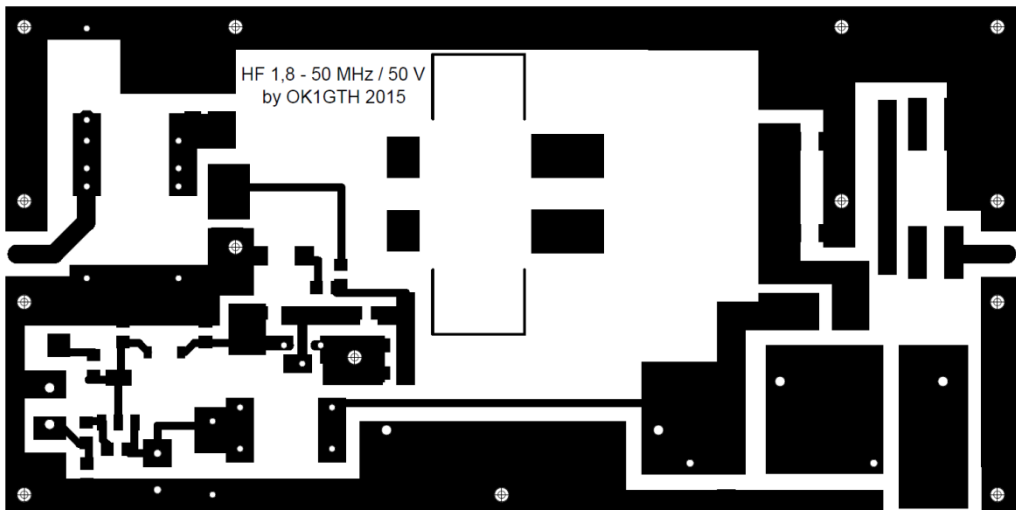
otáčkového trimru P1 a sledujeme napájecí proud. Zesilovač je nutné mít při ožívání připojený k umělé zátěži, aby nedošlo k případnému samovolnému kmitání. Klidový proud nastavíme na hodnotu přibližně $2 \times 300 \text{ mA}$. Zesilovač celou dobu máme v režimu zapnutého PTT. Po stejnosměrném nastavení zesilovače připojíme na vstup radiostanici s regulací výkonu 0,5-10 W připojenou přes PSV metr a na výstup připojíme vhodně dimenzovanou umělou zátěž s druhým PSV/W-metrem. Vyzkoušíme, zda zesilovač funguje a vykazuje podobné parametry, jakou jsou uvedené v následující tabulce. Nepřekračujeme budící výkon 10 W a napájecí proud cca 14 A max. a zároveň kontrolujeme, zda nedochází k nadměrnému oteplení všech výkonových součástek. Zesilovač spolehlivě pracuje v rozmezí napájecího napětí cca 40 – 52 V při výstupním výkonu cca 300 W v celém rozsahu 1,8 – 50 MHz, kdy vstupní činitel nepřizpůsobení nepřekračuje hodnotu cca 1,5. Pro dosažení vyššího výstupního výkonu je možné moduly řadit paralelně za pomoci dělicích a slučovacích obvodů s izolovanými porty a získat tak zesilovač o výstupním výkonu trvale například 500 W nebo při použití 4 modulů až okolo 1 kW.



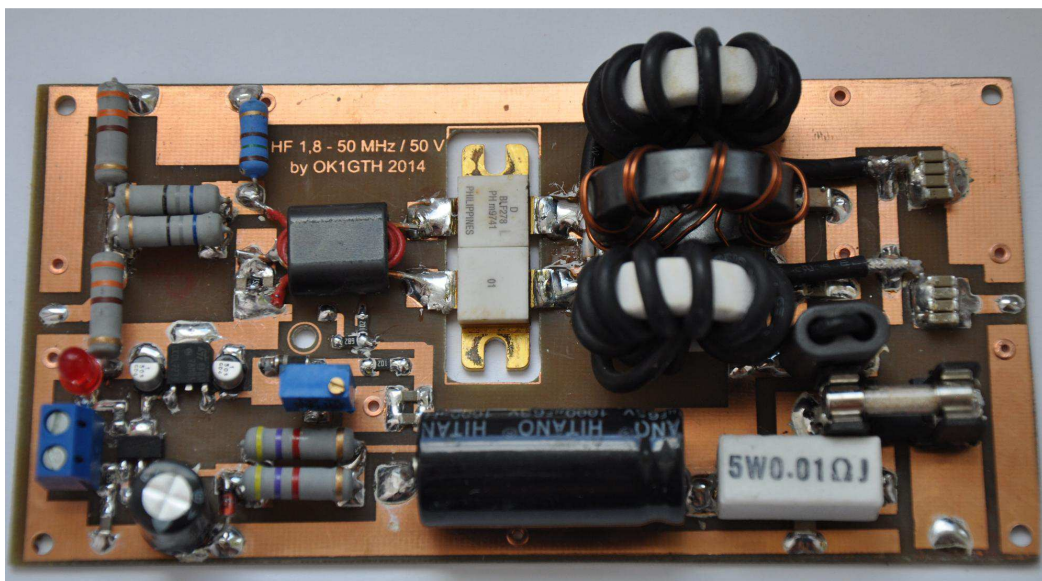
Obr. 7: Celkové schéma zesilovače.



Obr. 8: Osazovací plán desky plošných spojů.



Obr. 9: Deska plošných spojů.



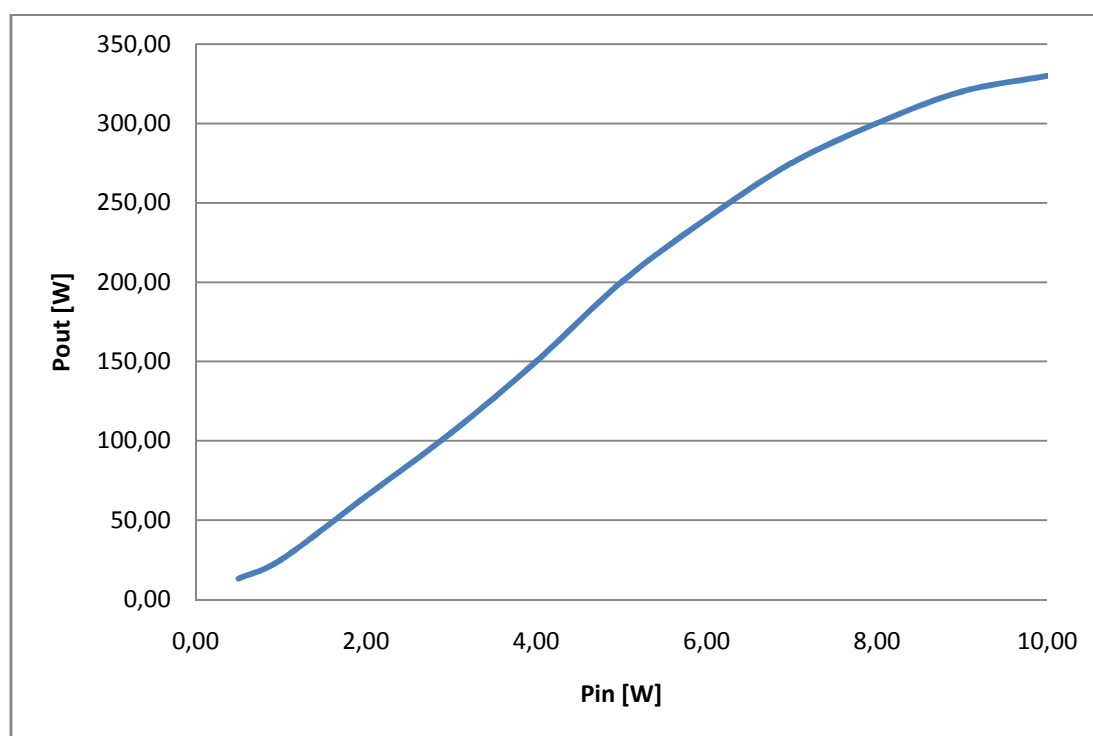
Obr. 10: Finální provedení širokopásmového zesilovače.

Měření na širokopásmovém zesilovači

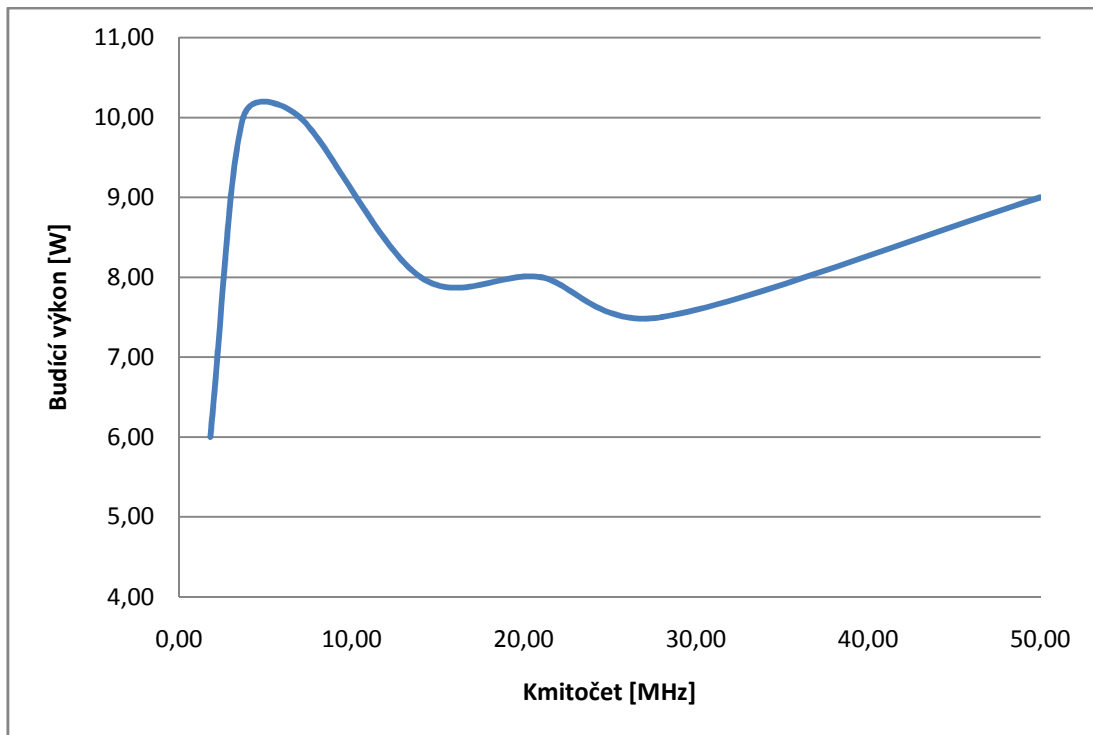
U zesilovače bylo provedeno následující měření:

1. maximální dosažitelný výkon: 330 W při trvalé nosné (key-down režim) při 12 W buzení (včetně 6 dB vstupního útlumového členu v pásmu 14 MHz)

P_{in} (W)	P_{out} (W)	I_d (A)	U_{cc} (V)	Príkonn (W)	Účinnost (%)	zisk (dB)
0,50	13,00	3,00	50,00	150,00	8,67	14,15
1,00	25,00	4,00	50,00	200,00	12,50	13,98
2,00	65,00	6,10	50,00	305,00	21,31	15,12
3,00	105,00	7,20	50,00	360,00	29,17	15,44
4,00	150,00	8,40	50,00	420,00	35,71	15,74
5,00	200,00	9,50	50,00	475,00	42,11	16,02
6,00	240,00	10,50	50,00	525,00	45,71	16,02
7,00	275,00	11,50	50,00	575,00	47,83	15,94
8,00	300,00	12,40	50,00	620,00	48,39	15,74
9,00	320,00	12,70	50,00	635,00	50,39	15,51
10,00	330,00	12,90	50,00	645,00	51,16	15,19



Obr. 11: Závislost budícího výkonu na výstupním.

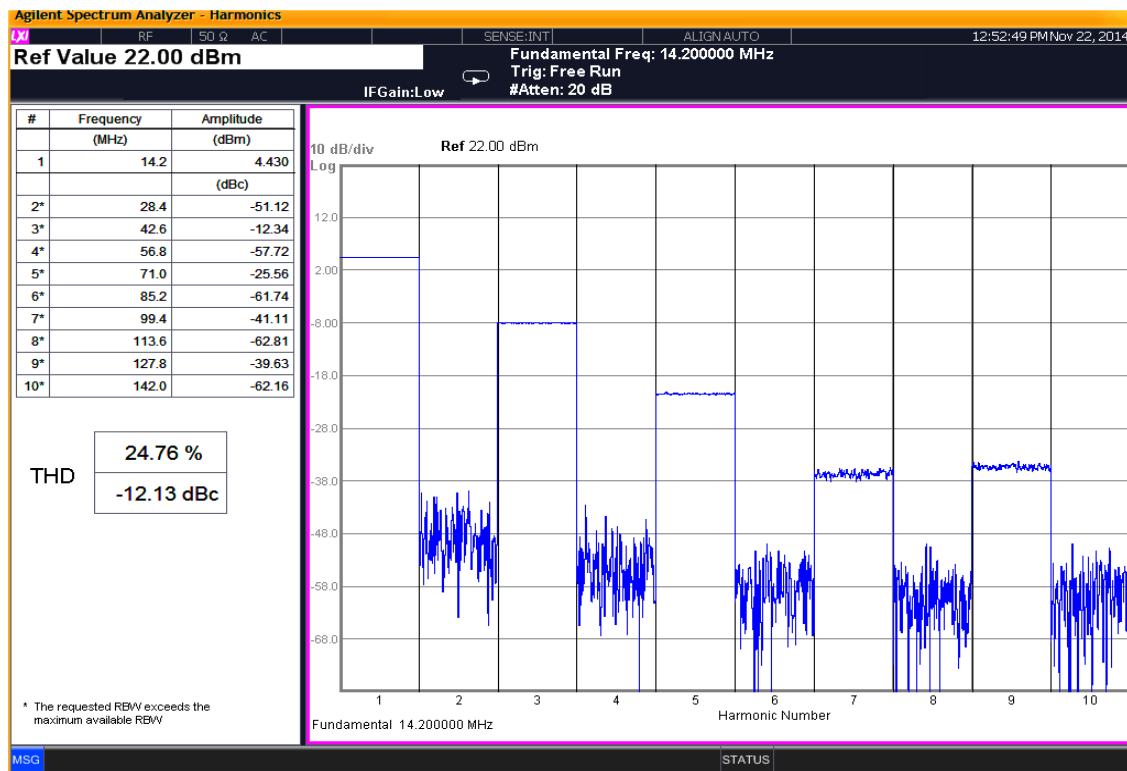


Obr. 12: Průběh budícího výkonu pro 300 W out.

2. bod 1 dB komprese zisku: komprese zisku nastává přibližně při 270 W (platí pro kmitočtové pásmo 14 MHz)

3. měření harmonického zkreslení THD: celkové harmonické zkreslení při výstupním výkonu 250 W = 25 % (bez výstupního filtru) v pásmu 14 MHz.

Nosná 250 W (dB)	2.harm. (dB)	3.harm.(dB)	4.harm. (dB)	5.harm. (dB)
0	-55	-17	-62	-30

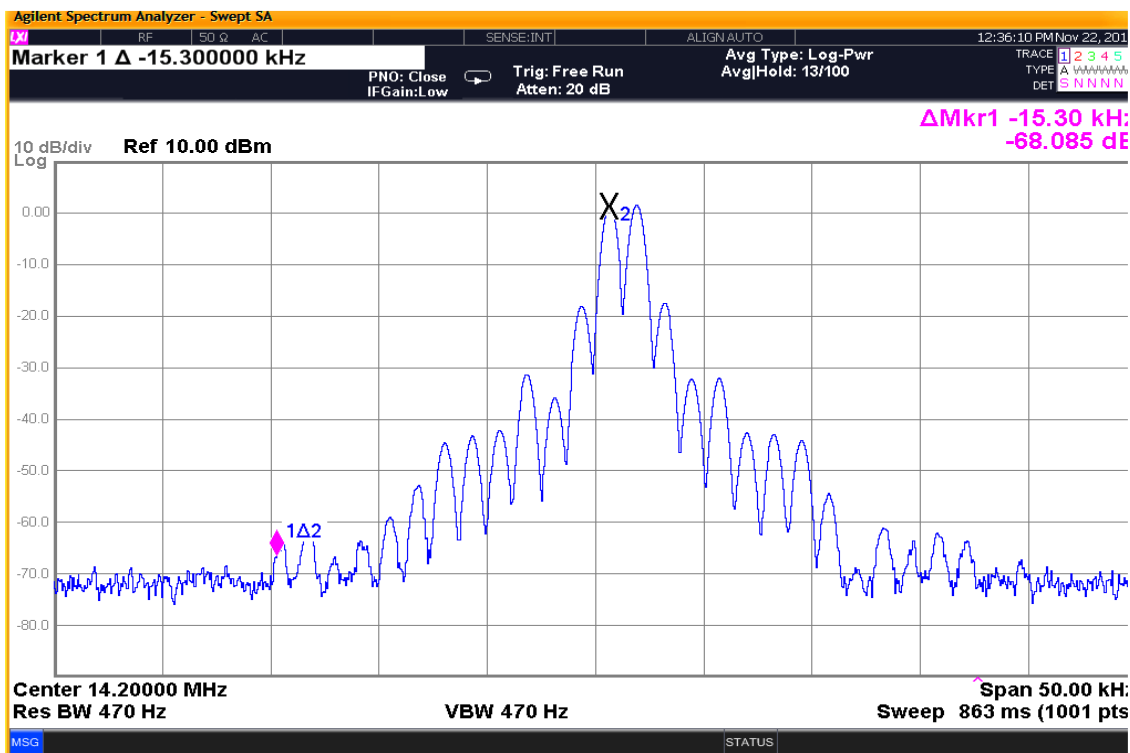


Obr. 13: Měření harmonického zkreslení při výstupním výkonu 250 W.

4. Měření intermodulačního (IMD) zkreslení dvojtónovou zkouškou (odstup dvou kmitočtů 2,4 kHz):

Jako budič byla použita radiostanice IC7000 buzená na cca 7 W, výstupní výkon PA nastaven na 250 W. Bylo zvoleno pásmo 14 MHz a bylo naměřeno:

- IMD 3 = 35 dBc a IMD 5 = 44 dBc
- Šířka pásma pro potlačení intermodulačních produktů o 70 dB je cca +/- 16 kHz

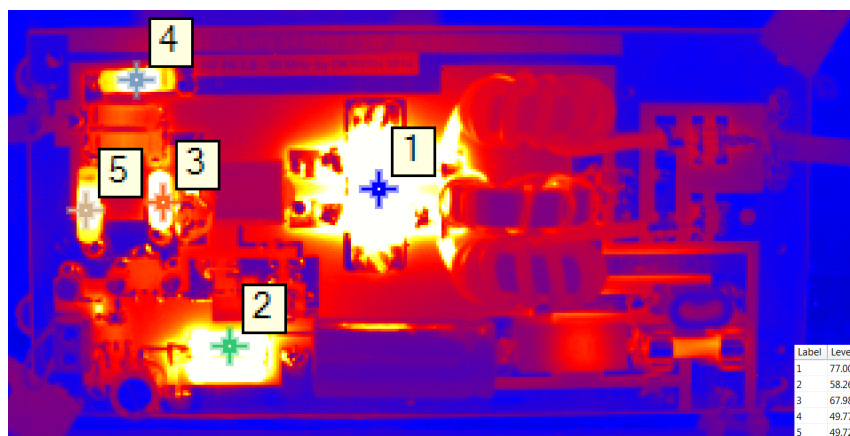


Obr. 14: Měření IMD zkreslení v pásmu 14 MHz při výstupním výkonu 250 W pro klidový proud 2x 300 mA.

5. Měření celkové účinnosti:

Celková dosažitelná účinnost včetně započítání klidového proudu v závislosti na kmitočtu je vyjádřena v následující tabulce.

Pásmo (MHz)	P_{in} pro 300W	I_{d2} (A)	Zisk (dB)	Účinnost pro 300W (%)
1,80	6,00	12,00	16,99	50,00
3,70	10,00	13,60	14,77	44,12
7,00	10,00	13,60	14,77	44,12
14,00	8,00	12,50	15,74	48,00
21,00	8,00	12,50	15,74	48,00
28,00	7,50	12,70	16,02	47,24
50,00	9,00	12,40	15,23	48,39



Obr. 15: Ukázka oteplení zesilovače v infračervené oblasti.

Závěr

Zesilovač vykazuje poměrně dobré vlastnosti z hlediska IMD zkreslení, kdy je patrný kvalitativní posun oproti nižším hladinám napájecího napětí. Vyšší hodnoty klidového proudu nepřinášejí výrazné zlepšení. Zesilovač je při provozu vhodné chránit proti vyšším hodnotám nepřizpůsobení, sledovat maximální hodnotu napájecího proudu a teplotu aktivního prvku a především zajistit, aby budící výkon za žádných okolností i na krátkou dobu nepřesáhnul cca 10 W. Pozor tedy především u 100 W TRX, aby neprodukoval při přechodu RX-TX krátkou výkonovou špičku, nebo aby operátor neopomněl stáhnout výstupní výkon. Zároveň, jak se při měření ukázalo, tak díky širokopásmovému transformátoru zesilovač vykazuje nízké potlačení vyšších harmonických produktů (především 3 harmonická), která je v limitních případech potlačena jen okolo 12-13 dB oproti nosné (!!!). Nutnou součástí při provozu takového zesilovače je tak banka DP výstupních filtrů, které je nutné za provozu přepínat a zabezpečit tak dodatečné potlačení vyšších harmonických produktů na jednotlivých pásmech. Technická realizace takovýchto filtrů a ovládací jednotky se systémem ochran, případně popis hybridních slučovačů a děličů výkonu, bude námětem některého z budoucích článků. V případě zájmu je možné dodat hotový a nastavený modul podle uvedeného popisu. Všem, kdo se pustí do stavby, přeji hodně úspěchů a radosti při realizaci.

Literatura:

- [1]KAVALÍR, T. Výkonové LDMOS tranzistory. Radioamatér 3/2015, ISSN: 1212-9100
- [2]<http://www.farnell.com/datasheets/60528.pdf>
- [3] SEVIC, J. A SimplifiedAnalysisoftheBroadbandTransmission Line Transformer. High Frequency Electronics. Summit Technical Media 2004.
- [4]<http://cz.farnell.com/ferroxcube/tn23-14-7-4c65/ferrite-core-toroid-4c65/dp/180009>

Seznam součástek:

R1, R2	5k6 velikost 1206
R3, R4	4k7/2W
R5	0,01 Ω /5W
R6, R7, R14	1k velikost 1206
R8, R9	300 Ω /2W
R10, R11	68 Ω /2W
R12	150 Ω /2W
R13	6k8 velikost 1206
R15	1k5 velikost 1206
C1, C3	1 μ F/50V SMD
C2, C10	100N/50V SMD
C4	470 μ F/35V
C5	100N/1kV MLCC
C6	1000 μ F/63V
C7, C15	10N/50V SMD
C8, C16	100N/50V SMD
C9	10 N/1kV MLCC
C11-C14	8x47nF/1kV MLCC
Po	Pojistka 16A/T
Zd1	Zenerova dioda 12V/1,3W
Led	Nízkopříkonová LED
IO1	78M05 DPACK
T1	BCP52-16 SMD
P1	50K - víceotáčkový trimr
D1	1N4007 SMD
NTC	Varistor NTC 10k
DPS	GTH HF PA 2015 70x140mm