

Výkonový tranzistorový zesilovač pro 144 MHz

ING. TOMÁŠ KAVALÍR, Ph.D., OK1GTH, kavalir.t@seznam.cz

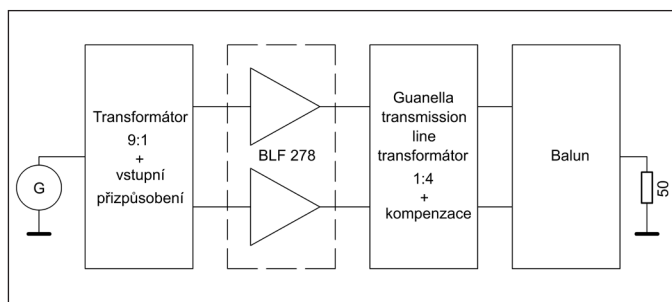
Uvedený článek se zabývá realizací výkonového LDMOS tranzistorového zesilovače pro radioamatérské pásmo 144 MHz s 50 V napájením o výstupním výkonu okolo 300 W. Vzhledem k širokopásmovému impedančnímu přizpůsobení je zesilovač funkční v širším kmitočtovém rozsahu. Jedná se opět o volné pokračování předešlého článku, který pojednával o výkonových LDMOS tranzistorech a jejich chlazení [1].

Úvod

V případě 50 V zesilovače pro 144 MHz byl použit opět cenově dostupný tranzistor BLF 278 od firmy NXP. Celková výkonová ztráta pouzdra je 500 W a tranzistor je doporučen pro výstupní výkony cca 300 W.

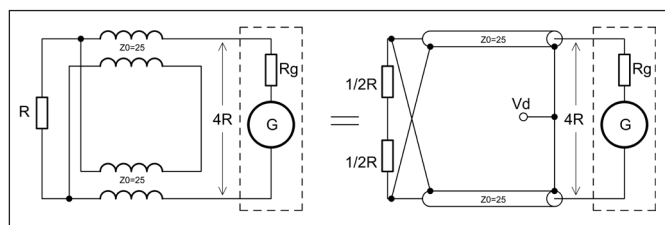
zapojení byl proveden za pomoci znalostí práce se Smithovým diagramem.

Po předběžném teoretickém návrhu a odhadu realizovatelnosti vstupních a výstupních přizpůsobovacích obvodů bylo přistoupeno k ověření zapojení pomocí RF simulátoru. Byl vytvořen zjednodušený elektrický model hlav-



Obr. 1 – Blokové schéma zesilovače.

Obr. 2 – Principiální schéma zesilovače.



Vstupní – zatěžovací (výstupní) impedance LDMOS tranzistoru byla pro uvažované kmitočtové pásmo stanovena extrapolací hodnot z katalogového listu. Podařilo se určit, že pro kmitočet 144 MHz, pro výstupní výkon 300 W při napájecím napětí 50 V a pro pracovní třídu

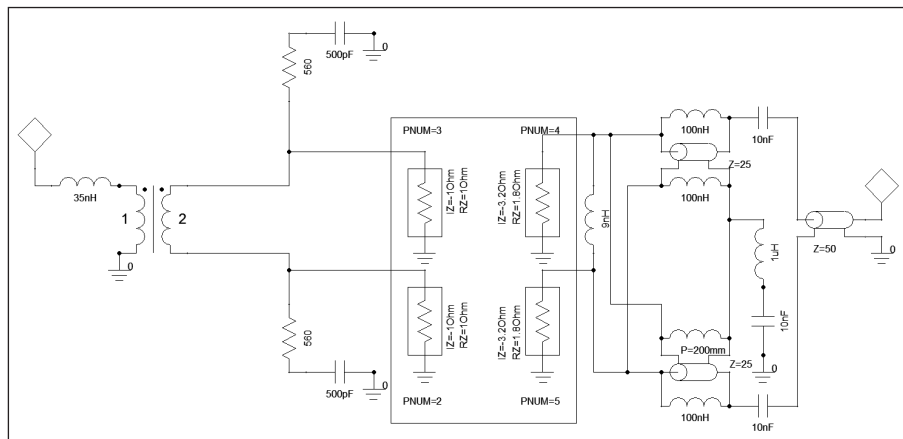
ních částí zesilovače a byla provedena analýza. Vzhledem k omezením SV verze Ansoft designer nebylo možné provést podrobnou nelineární analýzu a simulaci stability. Praktické

výsledky ale naznačují, že zapojení je po aplikaci několika pravidel pro zlepšení stability dostatečně stabilní i pro komplexní hodnoty zátěže atd.

Praktická realizace zesilovače

Zesilovač je realizován na oboustranném plošném spoji tvořeném materiálem FR4 tloušťky 1,5 mm a plošný spoj má stejný rozměr 70 x 140 mm, jako dříve publikovaný širokopásmový KV zesilovač [3]. Na desce plošného spoje je opět implementováno ovládání PTT a zároveň obvod teplotní stabilizace pro řízení klidového proudu založeného na termistoru NTC.

Klíčovou součástí je opět výstupní transformátor s transformačním poměrem 1:4, který je tvořen dvěma úseky vhodně zapojeného 25 Ω koaxiálního PTFE kabelu. Délka těchto úseků je cca 2x150 mm a je měřena včetně odizolovaných částí, tj. jedná se o celkovou délku. Koaxiální kabely následně upravíme odizolováním konců a připájením na vhodná místa



Obr. 3 – Zjednodušený lineární model zesilovače.

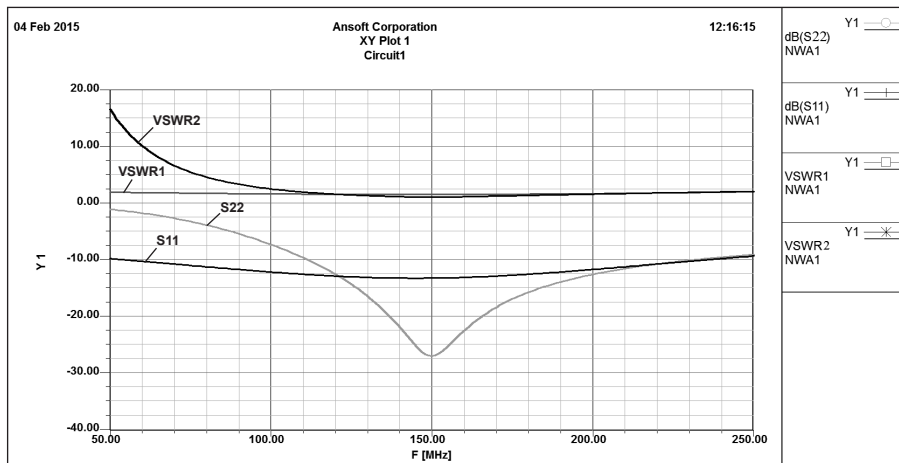
AB je vstupní impedance přibližně $Z_{in} = 1 - 1j \Omega$ a zatěžovací $Z_{out} = Z_{load} = 1,8 + 3,2j \Omega$. Hodnota zatěžovací impedance je již komplexně sdružená.

Vstupní část zesilovače je tvořena transformátorem s transformačním poměrem 9:1 a přizpůsobovacím obvodem. Takto je možné kompromisně dosáhnout relativně dobré hodnoty činitele přizpůsobení ($PSV \leq 1,5$). Na vstupu je dále integrován útlumový člen 3 dB, díky kterému je zajištěna potřebná hodnota buzení do 10 W. Výstupní obvod je realizován experimentálním „Guanella transmission line transformátorem“ [2] tvořeným úseky koaxiálního vedení o vlnové impedanci $Z_0 = 25 \Omega$ a transformačním poměrem 1:4. Dále je zde provedena kompenzace reaktance pomocí indukčnosti. Vlastní návrh experimentálního

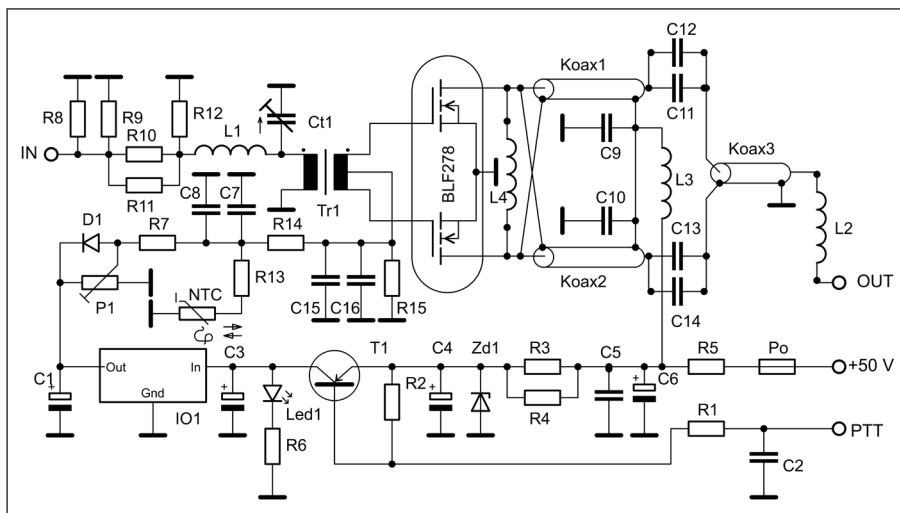
na DPS. Na této pozici byl použit speciální teflonový koaxiální kabel pro vysoké zatížení KTR141 s vlnovou impedancí 25 Ω určený pro aplikace až do 18 GHz. Zapojení tohoto transformátoru je patrné ze schématu.

Další důležitou součástí je vstupní transformátor Tr1 a napájecí tlumivka. Vstupní transformátor je realizován identicky jako v případě KV širokopásmového zesilovače a má transformační poměr 1:9. Je tvořen jedním závitem měděného drátu průměru 1 mm a třemi závitů měděného lanka s PTFE izolací o průřezu cca 0,14 – 0,25 mm² na dvouotvorovém feritovém jádře BN-61-202. Pro výkonovou napájecí tlumivku L3 je možné použít jádro BN-61-202 i BN-43-202, případně jejich ekvivalent. Tato tlumivka je tvořena jedním závitem měděného drátu s PVC izolací o průřezu 1,5 mm².

Na vstupu zesilovače je umístěn útlumový článek s hodnotou 3 dB a obvod pro lepší impedanční přizpůsobení vstupní brány realizovaný PTFE kapacitním trimrem Ct1 o kapacitě



Obr. 4 – Výsledky simulace pro 144 MHz.



Obr. 5 – Celkové schéma zesilovače.

2–18 pF [4] a cívkou L1 tvořenou 6 závitů lakovaného měděného drátu o průměru 0,8 mm. Tato cívka je navinuta na trnu o průměru 8 mm.

Na výstupu zesilovače je umístěn jednoduchý balun tvořený PTFE koaxiálním kabelem o průměru cca 5 mm o vlnové impedanci 50 Ω a délce 180 mm. Délka je opět měřena jako celková bez odizolovaných částí. Na této pozici bez problémů vyhoví například koaxiální kabel RG142.

Na výstupu zesilovače je umístěna cívka L2, která je tvořena dvěma závitů postříbreného měděného CuAg drátu o průměru 1,5 mm a tato cívka je navinuta na průměru 8 mm. Stlačováním, případně roztahováním této cívky nastavíme zesilovač na maximální výstupní výkon.

Důležitou součástí zesilovače je i cívka L4, která je tvořena stejným CuAg vodičem o průměru 1,5 mm. Tato cívka je tvořena jedním závitem ve tvaru U naletovaným přímo na výstupu obou tranzistorů. Délka vodiče je 32 mm.

U popisovaného zesilovače je zvolena opět 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 proleptované.

Výstupní kondenzátory a některé blokové kondenzátory je nutné použít kvalitní výkonové „vícevrstvé“ označované jako MLCC, které dodávají například firmy ATC, Kemet, AVX atd. Tyto součástky jsou označeny v seznamu součástek.

Oživení zesilovače

Následující pasáž, která se zabývá oživením zesilova-

če, je prakticky identická, jako u zesilovače širokopásmového pro KV, který byl popsán v minulém čísle. Přesto je vhodné ji opět uvést.

Jak bylo řečeno v úvodu, zesilovač je osazen LDMOS tranzistorem BLF278, který je citlivý na poškození například statickou elektřinou. Tento tranzistor osazujeme jako poslední a dbáme pravidel pro osazování elektrostaticky citlivých součástek.

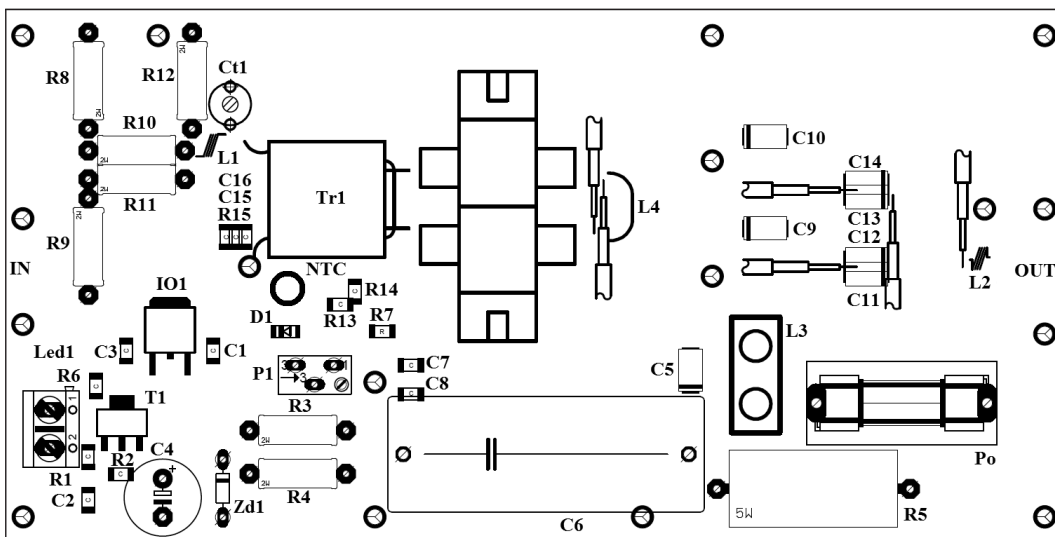
Oživování zesilovače začneme s odpoje-

ným 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 vykoušení nezapomeneme nastavit napětí blízké 0 V.

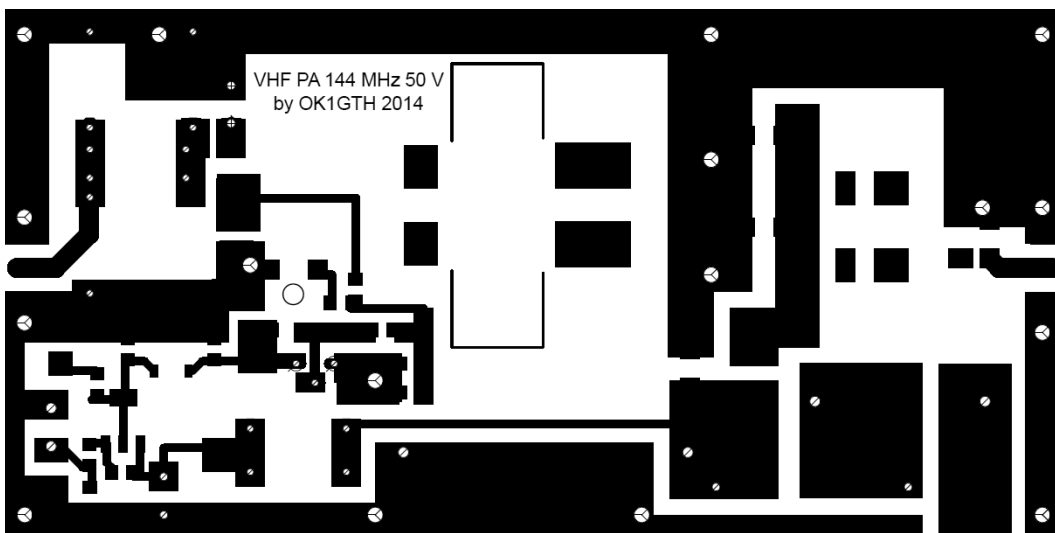
Nyní přiletujeme vlastní tranzistor a celou desku přimontujeme na dobře dimenzovaný chladič s měděnou teplovodnou sběrnici. Tranzistor je nutné potříť dosedací plochou rovnoměrnou tenkou vrstvou tepelné vodivé pasty a utáhnout doporučeným momentem. Dáme pozor, aby tranzistor nebyl mechanicky namáhán 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 víceotáčkového trimru P1 a sledujeme napájecí proud. Zesilovač je nutné mít při ožiování připojený k umělé zátěži, aby nedošlo k případnému samovolnému kmitání. Klidový proud nastavíme na hodnotu přibližně 2x300 mA. Zesilovač celou dobu máme v režimu zapnutého PTT.

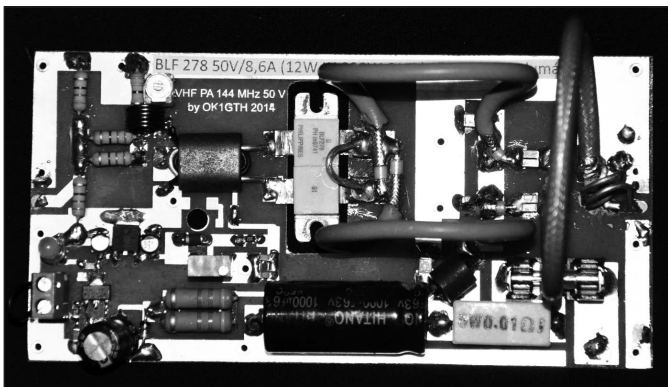
Po stejnosměrném nastavení zesilovače připojíme na vstup radiostanice s regulací výkonu 0,5–10 W připojenou přes PSV-metr a na výstup připojíme vhodně dimenzovanou umělou zátěž s druhým PSV/W-metrem.



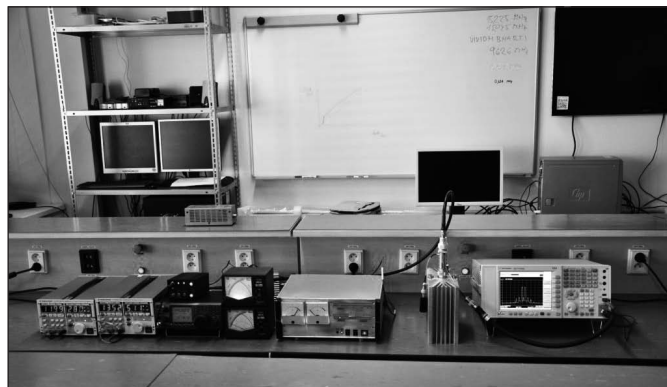
Obr. 6 – Osazovací plán DPS.



Obr. 7 – Provedení DPS o rozměru 70x140 mm.



Obr. 8 – Finální provedení zesilovače.



Obr. 9 – Měřicí pracoviště pro testování PA.

Vyzkoušíme, zda zesilovač funguje a vykazuje podobné parametry, jakou jsou uvedené v tabulce 1. Nepřekračujeme budící výkon nad cca 12 W a napájecí proud cca 10 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 a 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 například 600 W nebo při použití 4 modulů až okolo 1,2 kW trvale.

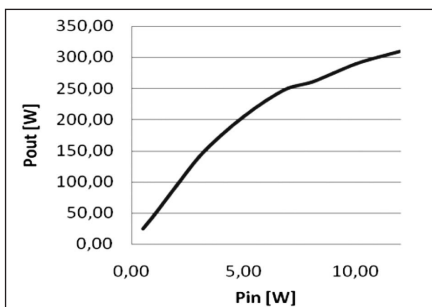
Měření na zesilovači

Bylo provedeno následující měření:

1. Maximální dosažitelný výkon

Max výkon byl naměřen 310 W při trvalé nosné (key-down režim) při 12 W buzení (včetně 3 dB útlumového členu).

P_{in} [W]	P_{out} [W]	I_d [A]	U_{cc} [V]	Příkon [W]	Účinnost [%]	Zisk [dB]
0,5	24	3,00	50	150	16,00	16,81
1,0	47	4,10	50	205	22,93	16,72
2,0	95	4,80	50	240	39,58	16,77
3,0	140	5,40	50	270	51,85	16,69
4,0	175	5,90	50	295	59,32	16,41
5,0	205	6,40	50	320	64,06	16,13
6,0	230	6,80	50	340	67,65	15,84
7,0	250	7,20	50	360	69,44	15,53
8,0	260	7,40	50	370	70,27	15,12
9,0	275	7,80	50	390	70,51	14,85
10,0	290	8,10	50	405	71,60	14,62
11,0	300	8,35	50	417,5	71,86	14,36
12,0	310	8,60	50	430	72,09	14,12



Obr. 10 – Závislost výstupního výkonu na vstupním.

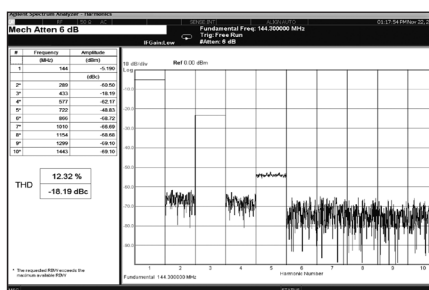
2. Bod 1 dB komprese zisku

Komprese zisku nastává přibližně při 250 W.

3. Měření harmonického zkreslení THD

Celkové harmonické zkreslení při výstupním výkonu 250 W = 12 % (bez výstupního filtru) a klidového proudu 2x300 mA.

Nosná 250 W	2. harm.	3. harm.	4. harm.
0 dB	-55 dB	-13 dB	-57 dB

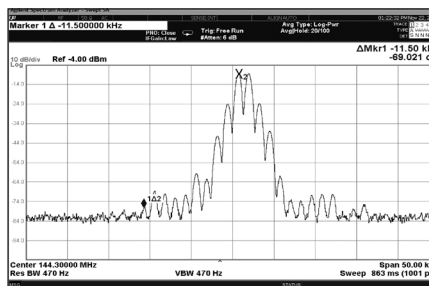


Obr. 11 – Měření THD při výstupním výkonu 250 W a klidovém proudu 2x300 mA.

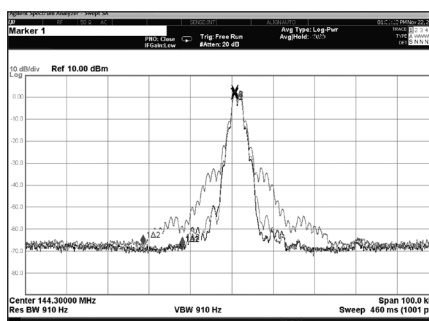
4. Měření intermodulačního (IMD) zkreslení dvojtónovou zkouškou (odstup dvou kmitočtů 2,4 kHz)

Jako budič byla použita radiostanice IC-7000 buzená na cca 8 W, výstupní výkon PA nastaven na 250 W. Bylo naměřeno:

- IMD3 = 32 dBc a IMD5 = 60 dBc (při klidovém proudu 2x300 mA)



Obr. 12 – Měření IMD při 250 W a klidovém proudu 2x300 mA pro 50 kHz šířku pásma.



Obr. 13 – Graf poklesu nežádoucích IMD produktů pro různé hodnoty klidového proudu.

- Šířka pásma pro potlačení intermodulačních produktů o 70 dB je ± 20 kHz (při 2x100 mA)
- Šířka pásma pro potlačení intermodulačních produktů o 70 dB je ± 13 kHz (při 2x300 mA)
- Šířka pásma pro potlačení intermodulačních produktů o 70 dB je ± 13 kHz (při 2x500 mA)

5. Měření celkové účinnosti

Celková dosažitelná účinnost, včetně započítání klidového proudu (2x300 mA), je přibližně 72 % při maximálním výkonu (310 W).

Závěr

Jedním z cílů článku bylo i prostudovat vliv klidového proudu na nelineární intermodulační zkreslení zesilovače. Výsledky jsou znázorněny v následujícím grafu poklesu trendu nežádoucích IMD produktů. Pro nízké hodnoty klidového proudu (2x100 mA) je patrně výrazně vyšší IMD zkreslení než pro hodnoty 300 a 500 mA. Rozdíl mezi 2x300 a 2x500 mA je téměř zanedbatelný, tudíž nemá smysl volit vyšší hodnoty klidového proudu.

Z hlediska potlačení vyšších harmonických produktů vykazuje tento typ zesilovače s obvodem typu výstupní transformátor výrazně horší hodnoty a je bezpodmínečně nutné na výstup

Seznam součástek

R1, R2	5k6 velikost 1206
R3, R4	4k7 / 2 W
R5	0,01 Ω / 5 W
R6, R7, R14	1k velikost 1206
R8, R9	680 Ω / 2 W
R10, R11	33 Ω / 2 W
R12	330 Ω / 2 W
R13	6k8 velikost 1206
R15	1k5 velikost 1206
C1, C3	1 uF / 50 V SMD
C2	100n / 50 V SMD
C4	470 uF / 35 V
C5, C10	100n / 1 kV MLCC
C6	1000 uF / 63 V
C7, C15	10n / 50 V SMD
C8, C16	100n / 50 V SMD
C9	10n / 1 kV MLCC
C11-C14	4x500 pF / 1 kV MLCC
Ct1	Trimr 2–18 pF / PTFE
Po	Pojistka 16 A/T
Zd1	Zenerova dioda 12 V / 1,3 W
Led	Nízkopříkonová LED
IO1	78M05 DPACK
T1	BCP52-16 SMD
P1	50k – víceotáčkový trimr
D1	1N4007 SMD
NTC	Varistor NTC 10k
DPS	GTH VHF PA 2014 70x140 mm

umístit kvalitní víceobvodovou dolní propust. Problematický je především třetí harmonický produkt, který je potlačen jen o 13–15 dB oproti nosné (!).

Z hlediska IMD zkreslení vykazuje tento typ zesilovače velmi dobré výsledky a je patrné, že je výhodnější používat vyšší hladiny napájecího napětí (50 V). Zároveň platí, co již bylo uvedeno v minulém článku, tj. zesilovač je při provozu vhodné chránit proti vyšším hodnotám nepřizpůsobení, sledovat maximální hodnotu napájecího proudu a teplotu aktivního prvku a především zajistit, aby budicí výkon za žádných okolností i na krátkou dobu nepřesáhnul cca 12 W. Pozor tedy především u 100 W TRX, aby neprodukoval při přechodu RX-TX krátkou výkonovou špičku, nebo aby operátor neopomněl stáhnout budicí výkon.

Všem, kdo se pustí do stavby, přeji hodně úspěchů a radosti při realizaci. V případě zájmu je možné dodat hotový a nastavený modul podle uvedeného popisu.

Literatura:

- [1] KAVALÍR, T., Výkonové LDMOS tranzistory. Radioamatér 3/2015, ISSN: 1212-9100
- [2] GUANELLA, G., New Method of Impedance Matching in Radio-Frequency Circuits, The Brown Boveri Review, September 1944, pp. 327-329.
- [3] KAVALÍR, T., Výkonový tranzistorový zesilovač pro 1,8–50 MHz. Radioamatér 4/2015, ISSN: 1212-9100
- [4] <http://www.farnell.com/datasheets/415438.pdf>