

Průchozí útlumový člen 20dB/1kW pro kmitočtové pásmo DC – 300MHz

Ing. Tomáš Kavalír, OK1GTH kavalir.t@seznam.cz, <http://ok1gth.nagano.cz>

Uvedené zařízení má velmi široké uplatnění především v oblasti měření ve výkonové radiotechnice a patří mezi základní vybavení každé laboratoře, která se zabývá měřením v této oblasti. Jedná se o tzv. útlumový člen, jehož úkolem je absorbovat definovanou část výkonu, kterou přemění na teplo. Na jeho výstupu se tak objeví vzorek vstupního signálu, ale s mnohem menší výkonovou úrovní (v našem případě tedy o cca 20dB méně). Tento „vzorek“ o 100-krát menší výkonové úrovni již lze snadno přivést (případně přes další útlumový člen s malým ztrátovým výkonem) na vstup citlivých zařízení, jako je například měřič výkonu nebo spektrální analyzátor. Dalším důležitým úkolem průchozího útlumu je zároveň zajistit dobré impedanční přizpůsobení především na vstupní bráně, aby nedocházelo k odrazům a následnému ovlivnění například výkonového zesilovače. Útlumový člen tak zároveň nahrazuje funkci umělé zátěže.

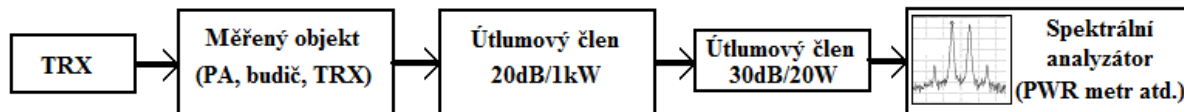
Navrhnout a vyrobit útlumový člen pro výkony řádově jednotek Wattů je jednoduchou záležitostí. Pokud chceme utlumit řádově okolo 100W, tak stále je řešení poměrně snadné a pravděpodobně se poohlédneme po nějakém profesionálním čipovém provedení útlumového členu. Tento člen pouze přišroubujeme k chladiči a zajistíme vhodné propojení s koaxiálními konektory. Problém nastane v případě, že chceme vyrobit útlumový člen se ztrátovým výkonem několik stovek až tisíců Wattů. Takovéto útlumové členy s dobře definovanými parametry až do kmitočtů cca 3GHz nejsme schopni v amatérských podmínkách prakticky vyrobit a na světě to umí použitím speciálních výrobních technologií (zpravidla vytvořením strip-line optimalizovaných odporových motivů přímo na beriliové keramice) jen „pár“ velkých výrobců. Tito výrobci si za to samozřejmě nechají odpovídajícím způsobem zaplatit – viz například cena profesionálního útlumového členu Spinner BN531675 do 3GHz se ztrátovým výkonem 1kW/30dB za cenu téměř sto tisíc korun. V případě amatérské konstrukce narazíme především na problém rozptylových parazitních parametrů běžně použitelných výkonových součástek. Tyto parametry souvisí s fyzickými rozměry součástek, provedením a tím dochází k problému nedokonalé vstupní impedance (špatného VSWR) a velkého zvlnění útlumu v přenášeném pásmu.

Jako východisko z této situace se ukázalo, že by tento útlumový člen šel pravděpodobně realizovat s určitým kompromisem z hlediska mezního kmitočtu za použití speciálních výkonových vysokofrekvenčních rezistorů od firmy Johanson. Tyto rezistory jsou vyrobeny jako strip-line úsek vedení s definovanou vlnovou impedancí na beriliové keramice s dobrým odvodem tepla a relativně vysokou provozní teplotou (pozor na velkou toxicitu beriliové keramiky v případě mechanického poškození, broušení atd.). Bohužel nevýhodou je především nízká dostupnost těchto speciálních prvků a s tím související poměrně vysoká cena. Dále omezená nabídka prakticky jen na hodnoty 50 a 100 ohmů a nezanedbatelná kapacita proti zemi (cca 4pF u 500W provedení), která nás limituje především na horních kmitočtech při sério-paralelním řazení. Klasické provedení útlumového členu jako PI-článek jsem zavrhnul rovnou, protože by toto nebylo realizovatelné z odporů řady 50 a 100Ω. Poměrně dlouho jsem si lámal hlavu, jakou strukturu zvolit a jak najít vhodný kompromis. Hodnotícím kritériem byla především vstupní impedance blízka 50Ω, dále dobrý přenos s nízkým zvlněním, dobrý dělicí poměr (20, 30 nebo 40dB), dobré přizpůsobení i z hlediska výstupní brány a ztrátový výkon více než 500W. Po několika týdnech experimentů a simulací se povedlo najít celkem vhodnou strukturu, která by tyto parametry splňovala. Nakonec padla volba na strukturu podobnou dvojitému napěťovému děliči, jejíž výhodou bylo postupné

snížení výkonu a tím i méně kmitočtově závislému přenosu. Dále vstupní brána nebyla tak moc ovlivněna následným postupným dělením a především parazitní kapacita prvků se při simulaci neprojevila tak negativně. Simulace ukázala, že by tento dělič šel pravděpodobně realizovat až do kmitočtu cca 250MHz z dostupných hodnot 50 a 100ohmů. Větší dělicí poměr než 20dB jsem po několika desítkách simulací a modelů zavrhnul, protože by to vedlo na mnohem větší zvlnění z hlediska přenosu a ve výsledku není problém za tento útlumový člen zařadit ještě jeden menší snadno realizovatelný útlumový člen s malým ztrátovým výkonem (například 20W/20-30dB).

Využití útlumového členu:

Základní měřicí sestava s využitím výkonového útlumového členu 1kW/20dB je na obr.1. Tímto způsobem za použití spektrálního analyzátoru je možné měřit všechny základní parametry z oblasti radiotechniky (zisk, dosažitelný výkon, harmonické a intermodulační zkreslení, kompresi, potlačení produktů, spektrum atd.). Výhodou tohoto uspořádání je, že nepotřebujeme umělou zátěž (nahrazuje jí útlumový člen 1kW) a je konstantní přenos v celém pásmu na rozdíl od použití například směrové odbočnice (která je zpravidla navíc použitelná až od cca 100MHz výše). Tímto způsobem za použití popisovaného útlumového členu je možné měřit v celém rozsahu od KV do VKV. Další možností využití je například možnost relativně přesného měření výstupního výkonu zesilovačů pomocí modulu měřiče výkonu – digital wattmetr dle OZ2CPU [1] s AD8307. Tento W-metr má základní rozsah měření do 1W (30dBm), ale umožňuje zadat vhodnou násobící konstantu a tím rozšířit měřicí rozsah s popisovaným útlumovým členem až do 1kW (případně 2kW krátkodobě PEP).

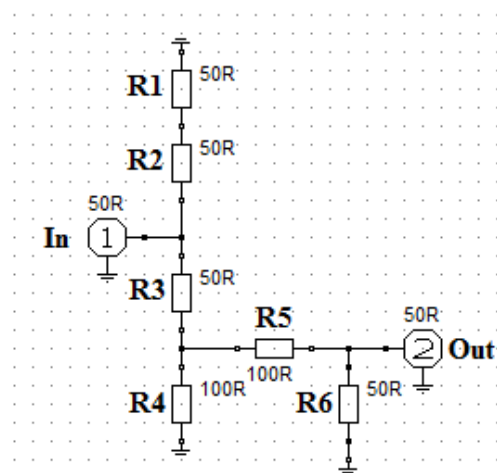


Obr.1 Měřicí sestava s využitím útlumového členu.

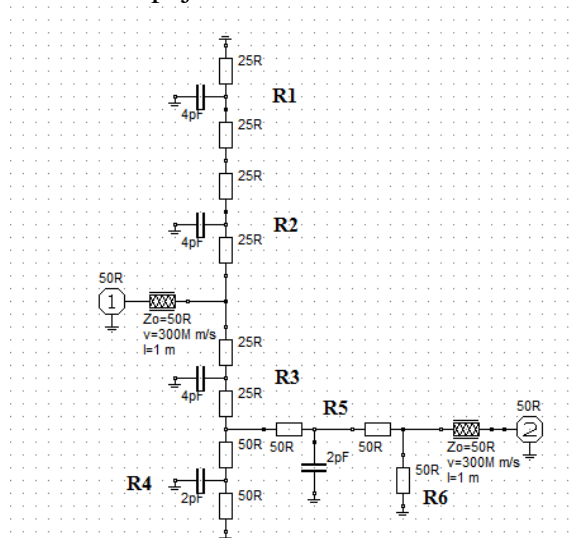
Simulace provedení útlumového členu:

Po předběžném návrhu útlumového členu pomocí výpočtů na papíře jsem jako další krok zvolil simulaci pomocí vhodného programu. Na obr.2 je vidět základní provedení útlumového členu a na obr.3 je již model, který bere v úvahu i paralelní kapacitu pouzdra proti zemi, která se dominantně projevuje na vstupní impedanci a i na přenosu. Ostatní rozptylové parametry se již takovou měrou neprojeví a v tomto modelu jsem je tudíž zanedbal. Na obr.4 je vidět výsledek simulace útlumového členu 1kW, kdy S11 je vstupní RL (útlum odrazu) a S21 je přenos ze vstupu na výstup. Celkem jsem vyrobil a odsimuloval dvě provedení útlumových členů se ztrátovým výkonem 1kW a 1,6kW. Větší z nich využíval čipové strip-line odpory na vstupu se ztrátovým výkonem 800W, které mají bohužel i výrazně vyšší kapacitu. To se projevilo na vstupní impedanci a tento větší útlumový člen je použitelný maximálně do 100MHz. Výše již není vstupní impedance reálná a je patrná výrazná kapacitní reaktance a vstupní VSWR bylo na 144MHz okolo 1,7. Menší útlumový člen se ztrátovým výkonem 1kW má tyto kapacity výrazně menší a proto je použitelný až do 300MHz. Výkonová ztráta jednotlivých odporů R1 – R6 je vyjádřena v procentuální míře v následující tabulce.

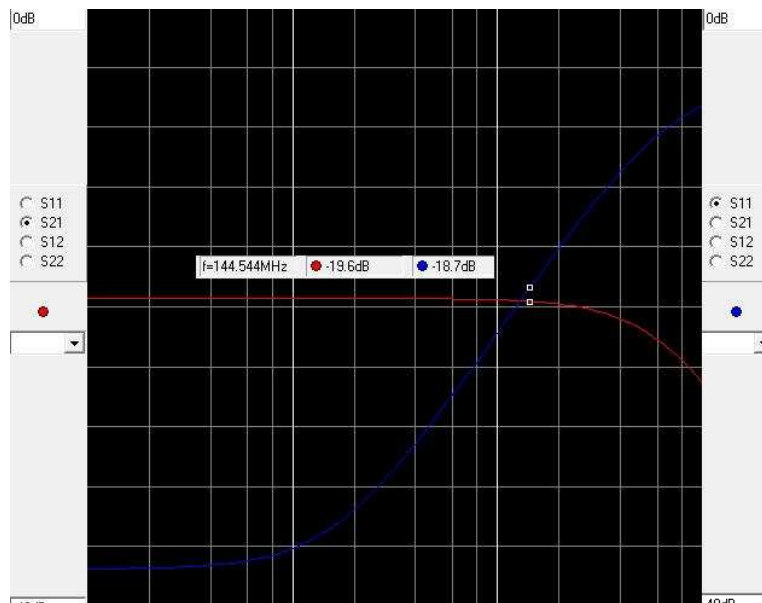
Výkonové dimenzování jednotlivých odporů:
R1, R2, R3 = 25% celkového výkonu
R4 = 14% celkového výkonu
R5 = 9% celkového výkonu
R6 = 1% celkového výkonu
Pout = 1%



Obr.2 Zapojení útlumového členu 20dB.



Obr.3 Model útlumového členu 20dB včetně parazitních kapacit.



Obr.4 Výsledek simulace v pásmu 1MHz – 1GHz („marker“ je na 144MHz).

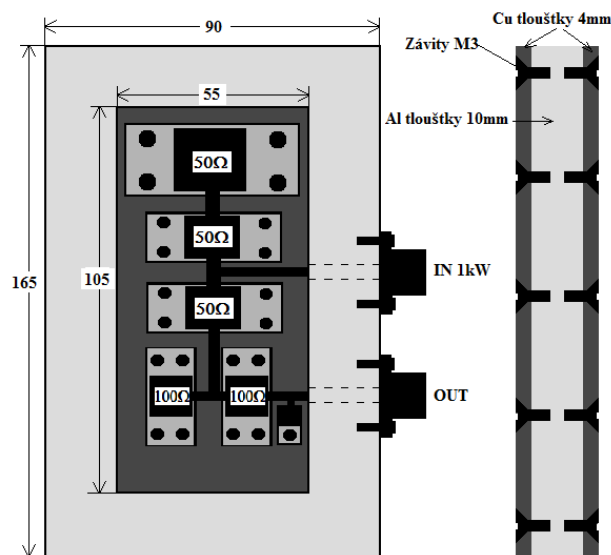
Praktická realizace útlumového členu:

Vzhledem k poměrně velikému ztrátovému výkonu byl i celý systém konstruován tak, aby bylo možné co nejefektivnější chlazení. Celý útlumový člen byl řešen jako kapsle složené ze dvou měděných desek a hliníkové vložky, kdy tak tvoří kompaktní mechanický celek, který je následně vložen mezi dva robustní stromečkové chladiče a svorníky pevně utažen. Je to kvalitní řešení běžné i v profesionální praxi při chlazení vysoce tepelně namáhaných prvků (například výkonové měniče). Toto řešení umožňuje oboustranné efektivní chlazení a díky velké teplo-směnné ploše i minimální tepelné přechodové odpory. Vlastní měděná deska navíc lépe pomáhá rovnoměrnému tepelnému rozložení a dobrému tepelnému přechodu z výkonových součástí. Tloušťka měděných desek je 4mm a tloušťka hliníkové vložky je 10mm. Odporové čipové odpory jsou k měděné desce přišroubovány pomocí šroubků M4 a M3, kdy v měděné desce je vyříznut závit. Dbáme na to, aby na druhé straně nic nevyčnívalo, docházelo by k horšímu chlazení. Pod jednotlivé součástky je nanášena vrstva teplovodivé pasty. Celá tato konstrukce je vzájemně z obou stran sešroubována pomocí zápustných šroubků M3. Jako vstupní konektor je možné použít konektor N nebo 7/16 a jako výstupní například N-ko. Konektor vhodně upravíme, případně umístíme do kosočtverce a připevníme k hliníkové distanci opět pomocí šroubků M3. Jako přívod použijeme střední žílu nejlépe teflonového koaxiálního kabelu, kdy v hliníkové distanci vyvrtáme vhodný otvor o stejném průměru. Více je patrné z přiložených obrázků a výkresu. Na vlastní chlazení je použit stromečkový chladič s označením 2838 o rozměru 100x100x200 s podélnou drážkou pro utáhnutí svorníky. Tento chladič je možné objednat například zde [2]. Jako svorníky jsem použil šrouby M6 délky 40mm. Na každý šroub navlékneme čtyři podložky a tři maticky M6. Dvě maticky utáhneme uprostřed šroubu „kontra“ pomocí dvou klíčů. Tím získáme na šroubu pevný bod, kde můžeme pomocí klíče otáčet a tím stahovat oba chladiče a vložený útlumový člen k sobě. Nezapomeneme správně vložit podložky, aby se nám mohl šroub v drážce na chladiči otáčet. Matku v druhé drážce zajistíme například klínkem v podobě šroubováku. Po důkladném utažení všech čtyřech šroubů můžeme matky uprostřed opět povolit a utáhnout k obou stranám chladičů. Vznikne nám tak velmi kompaktní a robustní celek s dobrým chlazením. Pro zlepšení přenosu tepla mezi měděnou deskou a chladičem můžeme opět potříit slabou vrstvou teplo-vodivou pastou (zde ale není nutné). Jak dále ve výpočtu oteplení ukáži,

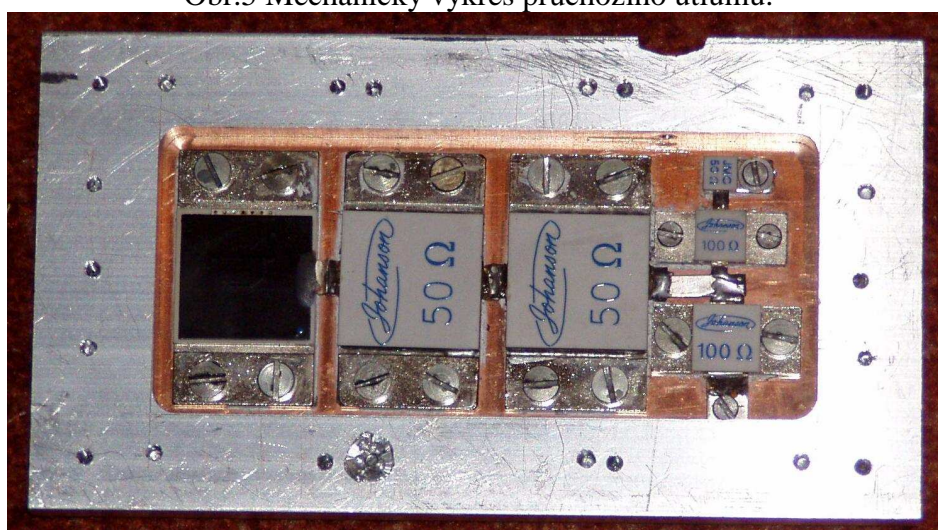
tak v případě delších měření a za využití plného ztrátového výkonu ani tento způsob chlazení není dostačující a je nutné ještě přidat aktivní chlazení. Toto realizujeme pomocí čtyř kusů ventilátorů, které profukují vzduch skrz chladiče (dva vzduch vysávají a dva tlačí). Samozřejmě je nutné zhotovit z hliníkového plechu kolem chladičů vhodný vzduchový kanál, aby bylo chlazení efektivní.

Na pozici jednotlivých čipových strip-line rezistorů jsem použil tyto prvky od firmy Johanson, které je možné v ČR zakoupit například u firmy Farnell [3]. Veškeré prvky jsou předimenzované a teoretický trvalý ztrátový výkon u tohoto menšího provedení útlumového členu je až kolem 2000W (případně 3200W u většího do 100MHz).

R1 = TF800BB14 (500W verze je momentálně vyprodaná)
R2, R3 = RF500BB15-040 (rezistor)
R4 = RF400BA13 (rezistor)
R5 = RF250BA12 (rezistor)
R6 = TF100BB3R (terminátor)



Obr.5 Mechanický výkres průchozího útlumu.



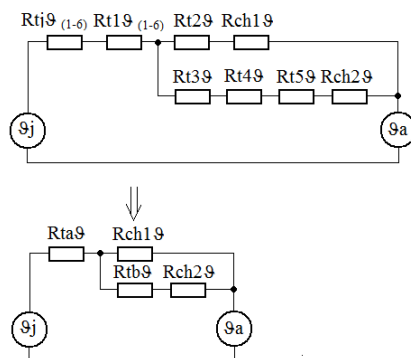
Obr.6 Vnitřní provedení průchozího útlumu – varianta 1,6kW.



Obr.7 Finální provedení „kapsle“.

Výpočet oteplení a chlazení:

Pro potřeby kompletního návrhu průchozího útlumu jsem provedl i přibližný tepelný výpočet a výpočet chlazení. Bylo sestaveno přibližné náhradní tepelné schéma (obr.8), které bylo pro další analýzu zjednodušeno sečtením dílčích tepelných odporů. Velmi výhodné bylo rozložení tepelné ztráty mezi více prvků, kdy tyto prvky vlastně pracují paralelně a snižují tak jednotlivé tepelné odpory především mezi přechody čip-pouzdro a pouzdro-čip. V případě doplnění tepelného schématu o tepelné kapacity (především chladičů, měděných desek a pouzder součástek) by následně bylo možné (obdobně jako v elektrotechnickém obvodu) sestavit diferenciální rovnici a tu následně řešit včetně časových konstant. Bylo by tak možné vypočítat jednotlivé teploty konkrétních tepelných přechodů ve zvoleném čase a například i teploty v ustáleném stavu. Ale to je nad rámec tohoto článku 😊



Obr.8 Náhradní tepelné schéma.

Použité zkratky v tepelném schématu:

ϑ_j – teplota čipu
 ϑ_{chl} – teplota chladiče
 ϑ_a – teplota okolí
 $R_{tj(1-6)}$ – tepelný odpor čip – pouzdro (1-6 prvek)
 $R_{t1(1-6)}$ – tepelný odpor pouzdro – měděná deska (1-6 prvek)
 R_{t2} – tepelný odpor měď – chladič1
 R_{t3} – tepelný odpor měď – hliníková distance
 R_{t4} – tepelný odpor hliníková distance – měď
 R_{t5} – tepelný odpor měď – chladič2
 R_{ta} – sečtený tepelný odpor jednotlivých přechodů součástek
 R_{tb} – sečtený tepelný odpor přechodu na druhý chladič
 R_{tch1} – tepelný odpor chladič1 – okolí
 R_{tch2} – tepelný odpor chladič2 – okolí
 P_z – ztrátový výkon

Z náhradního tepelného schématu byla odvozena rovnice pro výpočet ztrátového výkonu pro danou teplotu chladiče a dále rovnice pro výpočet teploty čipu pro daný ztrátový výkon.

$$P_z = \vartheta_{chl} - \vartheta_a \times \left[\frac{R_{tch1} + R_{tch2} + R_{tb}}{R_{tch1} \times (R_{tch2} + R_{tb})} \right]$$

$$\vartheta_j = \vartheta_a + \left[\left[R_{ta} + \left[\frac{R_{tch1} \times (R_{tch2} + R_{tb})}{R_{tch1} + R_{tch2} + R_{tb}} \right] \right] \times P_z \right]$$

K použitému chladiči byl interpolací jeho tabulkových hodnot zjištěn jeho konkrétní tepelný odpor pro přirozené a pro nucené chlazení:

- přirozené chlazení: $R_{tch1} = R_{tch2} = 0,6 \text{ K/W}$
- nucené chlazení: $R_{tch1} = R_{tch2} = 0,16 \text{ K/W}$

Pro zjednodušení výpočtu bylo zjištěno, že celkový tepelný odpor R_{ta} jednotlivých přechodů součástek bude menší než cca $0,05 \text{ K/W}$ a sečtený tepelný odpor R_{tb} přes distanci na druhý chladič menší než $0,02 \text{ K/W}$. Po dosazení do vzorce pro teplotu okolí $\vartheta_a = 20\text{C}^\circ$ a mezní teplotu chladiče 120C° je trvalý ztrátový výkon 328W při přirozeném chlazení a 1180W při nuceném chlazení vzduchem o rychlosti cca 6m/s . Teplota čipu pro trvalé zatížení pro první případ (330W , přirozené chlazení) by byla cca 137C° a pro druhý případ (1180W , nucené chlazení) by byla 181C° , což už je na hranici maximální provozní teploty součástek. Ale toto je limitní případ, který by platil pro dlouhodobý trvalý střední výkon v ustáleném stavu. Běžná měření trvají maximálně několik desítek sekund.

Naměřené parametry:

Uvedený útlumový člen jsem proměřil pomocí vektorového analyzátoru RS ZVB8. Výsledky jsou velmi dobré a blíží se profesionálnímu výrobku. Vstupní VSWR je ještě na 144MHz menší než $1,2$. Toleranční pole průchozího útlumu v pásmu $1 - 200\text{MHz}$ je maximálně $\pm 0,2\text{dB}$. Nad cca 250MHz již padá o cca 1dB a také je patrný nárůst VSWR až na hodnotu $1,5$

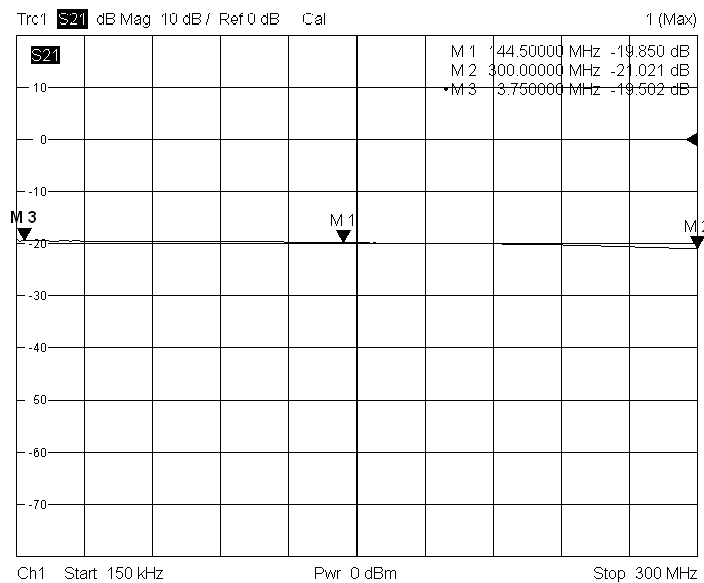
na kmitočtu 300MHz. Celková hmotnost útlumového členu je cca 10kg. Pokud bychom se spokojili s menším ztrátovým výkonem cca 500W (1kW dimenzování součástek) a při dodržení zásad vysokofrekvenční techniky, mohli bychom se pravděpodobně dostat až na kmitočty okolo 500MHz a útlumový člen by se tak dal používat i v pásmu 432MHz. V případě zájmu mohu dodat kompletní hotový útlumový člen včetně měřícího protokolu. Jakákoliv další výroba tohoto zařízení podle tohoto popisu za účelem zisku je bez předchozí písemné domluvy s autorem zakázána.

Odkazy:

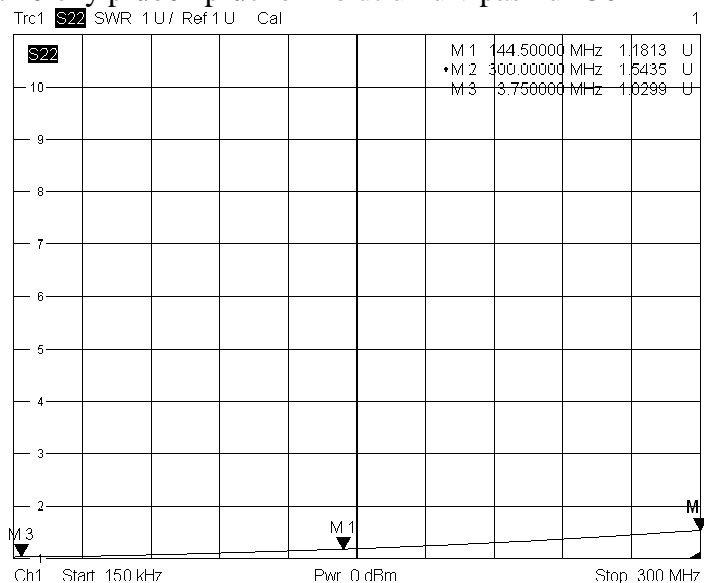
[1] <http://www.webx.dk/oz2cpu/radios/miliwatt.htm>

[2] <http://www.alupa.cz/>

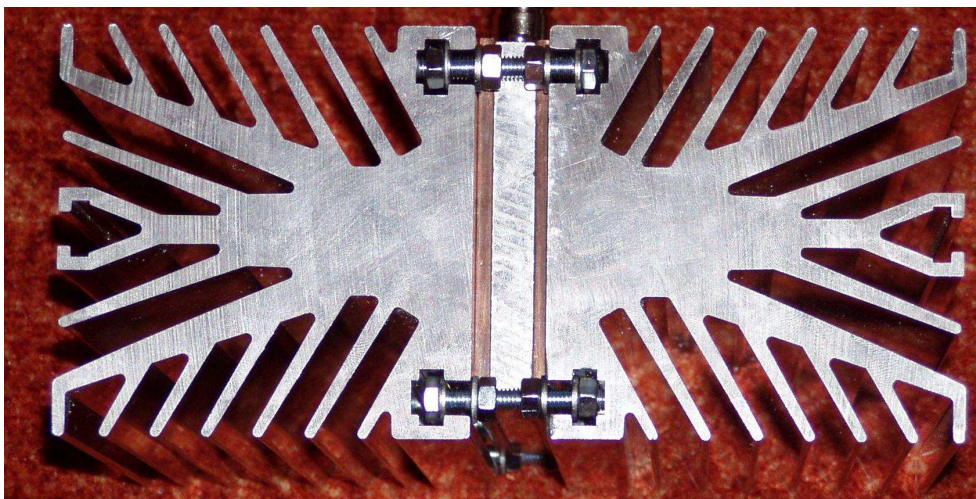
[3] <http://cz.farnell.com/>



Obr.9 Naměřený průběh průchozího útlumu v pásmu 150kHz – 300MHz.



Obr.10 Naměřený průběh VSWR v pásmu 150kHz – 300MHz.



Obr.11 Provedení utahovacích kleštín.



Obr.12 Finální provedení útlumového členu 20dB/1kW.