

Výkonový útlumový člen DC – 500 MHz / 10 dB

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

Karel Nekula – OK1ELE, ok1ele@seznam.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. Článek je volný pokračováním starší publikace „Průchozí útlumový člen 20dB/1kW pro kmitočtové pásmo DC – 300 MHz“ zveřejněné zde [1], kdy se podařilo vylepšit dosažitelné parametry tak, aby bylo možné tento člen úspěšně použít i v pásmu 432 MHz.

Úkolem útlumového členu (atenuátoru) je absorbovat definovanou část výkonu, kterou přemění na teplo. Na jeho výstupu se tedy objeví přesný vzorek vstupního signálu, ale s mnohem menší výkonovou úrovní – v tomto případě 10x nižší. Následuje zpravidla zařazení druhého útlumového členu (20-30 dB) se ztrátovým výkonem cca 100 W, pomocí kterého již ponížíme uvažovaný signál na bezpečnou úroveň, který již můžeme přivést na vstup měřicího zařízení (detektor, měřič výkonu, spektrální analyzátor atd.). Nezanedbatelnou výhodou výkonového útlumového členu také je, že zároveň nahrazuje funkci umělé zátěže. Útlumový člen se ztrátovým výkonem cca 100 W je možné relativně snadno zakoupit v různých výprodejích, případně v zahraničí (například z Číny). Problém nastává, pokud chceme zpracovávat výkony vyšší, než právě uvažovaných 100 W. V zahraničí se občas vyskytují tzv. „Flange“ čipová provedení útlumových členů s páskovými vývody, ale mezní ztrátové výkony se pohybují maximálně na hranici okolo 250 W. Vyšší výkony se vyskytují velmi výjimečně a cena nových finálních zařízení například od firmy Spinner (ale za to se špičkovými parametry s použitelností i nad 1 GHz) dosahují ceny zpravidla mnoho tisíc eur. Tyto profesionální útlumové členy jsou řešeny zpravidla nanosením odporových vrstev (napařováním a dalšími složitými postupy) se složitými kompenzovanými motivy (úseky vedení s rozprostřenými parametry) na vysoce teplotně vodivé materiály, které zároveň dosahují perfektních vysokofrekvenčních vlastností- tj. zpravidla na beryliové keramice (BeO). Tento materiál vykazuje výborné vlastnosti ve všech ohledech, ale značnou nevýhodou je komplikované zpracování (tvrdost, toxicita) a s tím související velmi vysoká cena. Po provedení první verze útlumového členu s použitelností do cca 200 MHz, kterou jsem navrhnul někdy v roce 2010, jsem se dále pokoušel vylepšit dosažitelné parametry (především toleranční pole a mezní kmitočet, aby bylo možné úspěšně použít i v pásmu 70 cm) za použití dostupných vysokofrekvenčních odporů. Tento úkol se nakonec ukázal být značně složitý a trvalo mi to nakonec přes 10 let, tj. stovky pokusů, vyzkoušení všech možných topologií, zakoupení desítek kusů RF odporů různých parametrů a provedení, mnoho omylů a slepých cest a k tomu stovky hodin práce a nespočet simulací různých zapojení, než se povedlo najít vhodnou cestu ☺. Vzhledem k velkému stupni volnosti a možných kombinací, tak není zaručeno, že tato cesta je nejlepší možná a třeba se někomu povede parametry ještě vylepšit. Hlavní nevýhodou je, že jsou k dispozici jen omezené hodnoty odporů 50 nebo 100 Ω a velmi výjimečně se lze setkat například s 35, 75 nebo 150 Ω a zbytek lze v omezené míře poskládat při respektování VF vlastností různou kombinací.

Největším problémem všech RF výkonových odporů jsou rozptylové parametry, tj. především parazitní kapacita (jednotky pF) a zároveň indukčnost přívodů. Zároveň platí, že čím větší výkonová ztráta (omezující použitelnost atenuátoru), tím větší pouzdro a tím horší rozptylové parametry. Z tohoto důvodu není až tak velký problém realizovat útlumový člen například pro uvažovaný

ztrátový výkon 100 W, ale dimenzování na 1 kW je již úplně jiná liga. Všechny mé cesty uvažovaly kompenzací parazitní kapacity pomocí indukčnosti a to ideálně rovnou na vstupu a zároveň minimalizací rozměrů provedením tzv. „na pětníku“, tj. co nejkratší přívody, vhodné rozmístění součástek, složité konstrukce s využitím 3D konstrukcí podpořené výpočty odvodu ztrátového tepla atd. Pomocnou ruku podal Karel OK1ELE, kterého jsem nahloval při dlouhých technických rozpravách u láhve dobrého pití u nás na společném radiovém QTH (nejvyšší hustota výskytu radioamatérů na m2 v Plzeňském kraji - v našem případě 2500 m2 země na 4x OK + 2x SWL, hi). Karel ochotně pomohl především s realizací mechaniky, výkresů, 3D modelů a následně s výrobou na CNC. Bohužel i přes vysokou výrobní přesnost, komplikovanost zapojení i mechaniky konstrukce, se nedařilo dostat výrazně nad cca 300 MHz. Jak se ukazuje, tak udělat širokopásmovou kompenzaci je z fyzikálních důvodů problém a vždy je něco za něco. Sice se podařilo například zlepšit chování na vyšších kmitočtech, ale zároveň se výrazně zhoršil přenos členu, tj. jeho zvlnění mimo akceptovatelné hranice. Opět jsem tedy usednul k simulátoru a zkoušel různé způsoby kompenzací. Ukázalo se, že možná cesta by mohla být se více přiblížit rozprostřeným parametrů vedení, tj. postupná kompenzace parazitních parametrů v každém bodě pomocí různě velikých indukčností. Na experimentální destičce se nakonec povedlo u vzdušného provedení postupnou kompenzací dosáhnout šířky pásma přes 750 MHz při dimenzování na 1000 W ztrátového výkonu pro +/- 0,2 dB a při použití menších prvků (tj. menší celkový ztrátový výkon) by se pravděpodobně dosáhlo i šířky pásma 1 GHz (!!!). Tento článek tak ukazuje zároveň jednu z možností, jak přistoupit ke kompenzacím při sérioparalelním spojování RF odporů pro zlepšení jejich vlastností a může to být užitečné například při realizaci umělých zátěží s velkou šířkou pásma pro velké výkony za použití RF odporů 250, 500 nebo 800 W.

Vzhledem k nutnému vysokému odvodu tepla z malé plochy prakticky nepřipadá v úvahu použití jen samotného hliníku, ale je nutné použít měděné desky (komory) v pozici teplovodné sběrnice. Z tohoto důvodu jsem zakoupil nové měděné desky tloušťky 20 mm a z těchto desek postupně vzniklo několik variant, kdy se nakonec povedlo vše přenést z experimentální desky do finální konstrukce. I zde se objevilo několik úskalí, kdy tím, že je celá konstrukce obklopena relativně blízko masivní mědi s dobrou vodivostí, tak dochází k výraznému poklesu kompenzační indukčnosti a tím ke zhoršení parametrů. Proto nakonec bylo potřeba vyrobít postupně několik komor, kdy až poslední dosahuje akceptovatelných parametrů a je to vhodný kompromis mezi odvodem tepla na obě strany chladiče, akceptovatelným ovlivněním kompenzačních indukčností a cenou vlastní mědi (a její dostupností).

Dosažitelné parametry a rozdíl oproti předchozí konstrukci z roku 2010:

- Výrazné zjednodušení a zlevnění konstrukce oproti předchozímu provedení
- Plně symetrické „Bi-directional“ provedení (vstup – výstup 50 Ω) – opět rozdíl oproti předchozí konstrukci, kdy musel být dodržen vstup – výstup.
- Zachování nízkého zvlnění propustného útlumu v tolerančním poli cca +/-0,4 dB nebo méně
- Dobré impedanční přizpůsobení v celém rozsahu na obou branách (PSV pod cca 1,5)
- Dobré dimenzování z hlediska ztrátového výkonu (až 1 kW po omezený čas, 500 W trvale)
- Nevýhodou je nižší útlum 10 dB, který klade vyšší výkonové nároky na další stupeň atenuátoru – ale to lze snadno „vylepšit“ vložením čipového útlumového členu 10-30 dB / 100-250 W přímo do konstrukce a nutnost použití obtížně sehnatelných zakázkových 150 Ω odporů (lze nahradit kombinací odporů)

Praktická realizace:

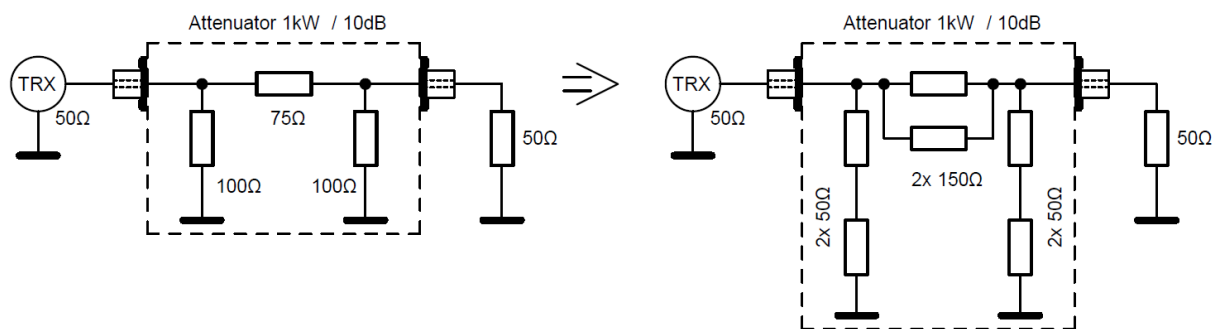
Jak bylo řečeno v předchozím odstavci, tak je velmi důležité správné výkonové dimenzování RF odporů, také zajistit dobrý odvod tepla a kompenzaci rozptylových parametrů. Po mnoha pokusech nakonec byla zvolena topologie ve tvaru π -článku, kdy na první sekci π -článku je výkonová ztráta cca 52 %, na prostřední cca 33 % a na poslední sekci okolo 5 % vstupního výkonu. Byly použity dva kusy sériově spojených 50 Ω (250 W) odporů na obě krajní větve (s parazitní kapacitou přibližně 4 pF) a na prostřední sekci byly použity dva zakázkové odpory - paralelně spojené 150 Ω (150 W) s parazitní kapacitou cca 3 pF. Kompenzační indukčnosti v prostřední sekci jsou tvořené úsekem vedení délky cca 20 mm a v paralelních sekcích jsou umístěny indukčnosti tvořené 3 závitů na průměru 5,5 mm a 2 závitů na průměru 4,5 mm - vše z 1,5 mm CuAg drátu. Více je patrné z následujících obrázků.

Chlazení:

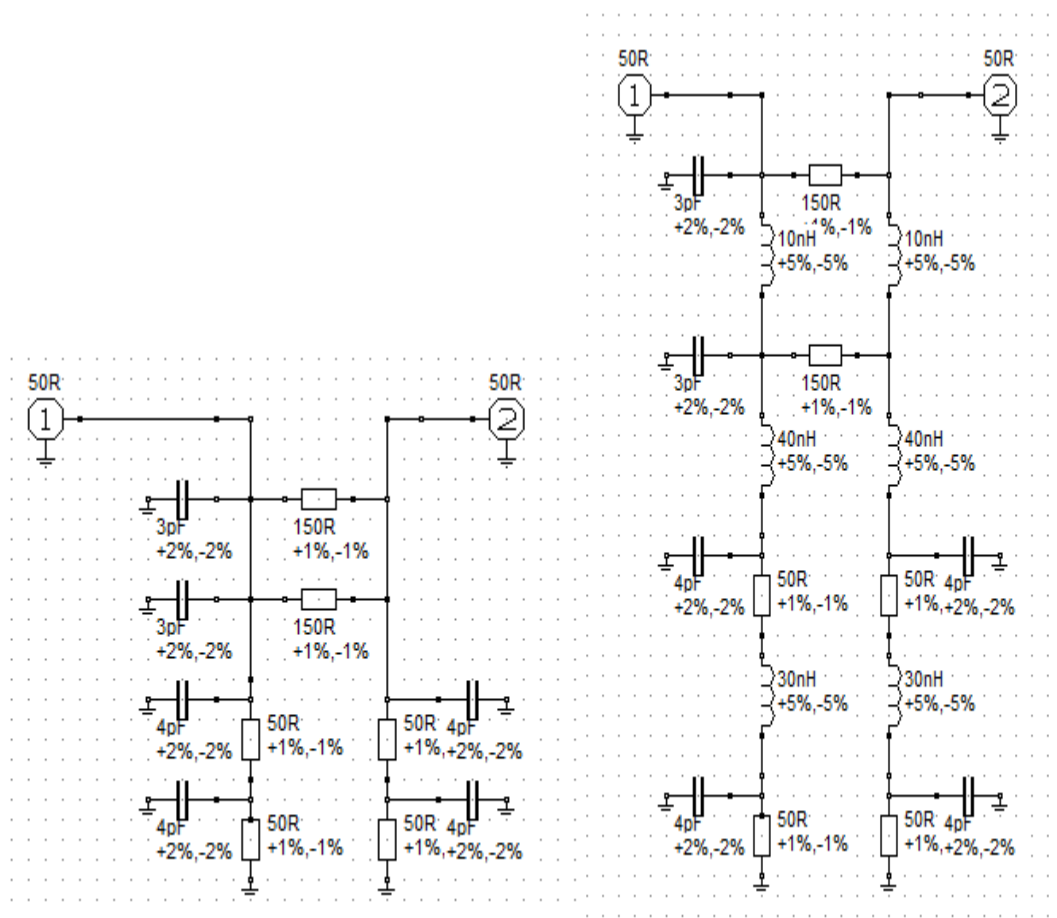
Z důvodu dostatečného chlazení byly použity měděné bloky tloušťky cca 20 mm o rozměru cca 100 x 60 mm a zbytek směrem ke konektorům na šířku chladiče je tvořen duralovými bloky, které zaručují dobrý přestup tepla a mechanickou pevnost. Přes tuto kombinaci obou bloků a z obou stran je provedeno „svrtání“ na přesný průměr, do kterého je vložen vnitřní vodič s izolací z kvalitního teflonového koaxiálního kabelu a na obou stranách je zakončeno vhodnými konektory (N, 7/16) s potřebnými komůrkami a odsazením. Celková konstrukce je tvořena dvěma chladiči vhodného rozměru, které jsou sešroubovány pevnostními imbus šrouby a tvoří mechanicky ucelený celek. Vhodnou povrchovou úpravou především měděného bloku (lapování, rovinné frézování), kdy jeho výška je o cca desetinu vyšší, než zbytek duralových bloků, je po dostatečném utažení obou chladičů k sobě zajištěn dobrý přestup tepla do obou částí chladiče a to symetricky. Toto bylo ověřeno jednoduchým testem, kdy pomocí termokamery bylo zjištěno teplotní rozvržení a zároveň byla kontaktně pomocí termočlánku měřena teplota měděného bloku. V případě, kdy nebyl použit druhý chladič a nebylo tlakově zajištěno dobré teplotní spojení měděné desky a chladiče, tak po přivedení 0-250V / 50 Hz z regulovatelného transformátoru (napětí odpovídající ztrátovému výkonu 1000 W na 50 Ω zátěži) došlo k oteplení měděné desky nad 80 $^{\circ}\text{C}$ během 15 sec, kdy povrchová teplota výkonových RF rezistorů již překročila povolenou provozní teplotu (nad 120 $^{\circ}\text{C}$). Při použití druhé poloviny chladiče a zároveň dobrému oboustrannému přitlaku s měděnou deskou byla teplota měděné desky po 1 min cca 48 $^{\circ}\text{C}$ a po dvou minutách byla cca 52 $^{\circ}\text{C}$, což je značný rozdíl oproti prvnímu případu. Zároveň na obou polovinách chladiče byla teplota prakticky stejná, což značí dobrý a symetrický přestup tepla. Dá se předpokládat, že teplota čipů nepřekročí výrazně 100 $^{\circ}\text{C}$ ani v případě 2 minutového měření s plným výkonem. Pro zlepšení tepelného přechodového odporu odporů i desek byla použita teplovodivá pasta. Všem, kdo se pustí do stavby, přejeme hodně úspěchů. V případě zájmu je možné dodat klíčové komponenty pro stavbu, případně i hotový útlumový člen včetně změřených parametrů podle popisu. 73! de OK1GTH a OK1ELE



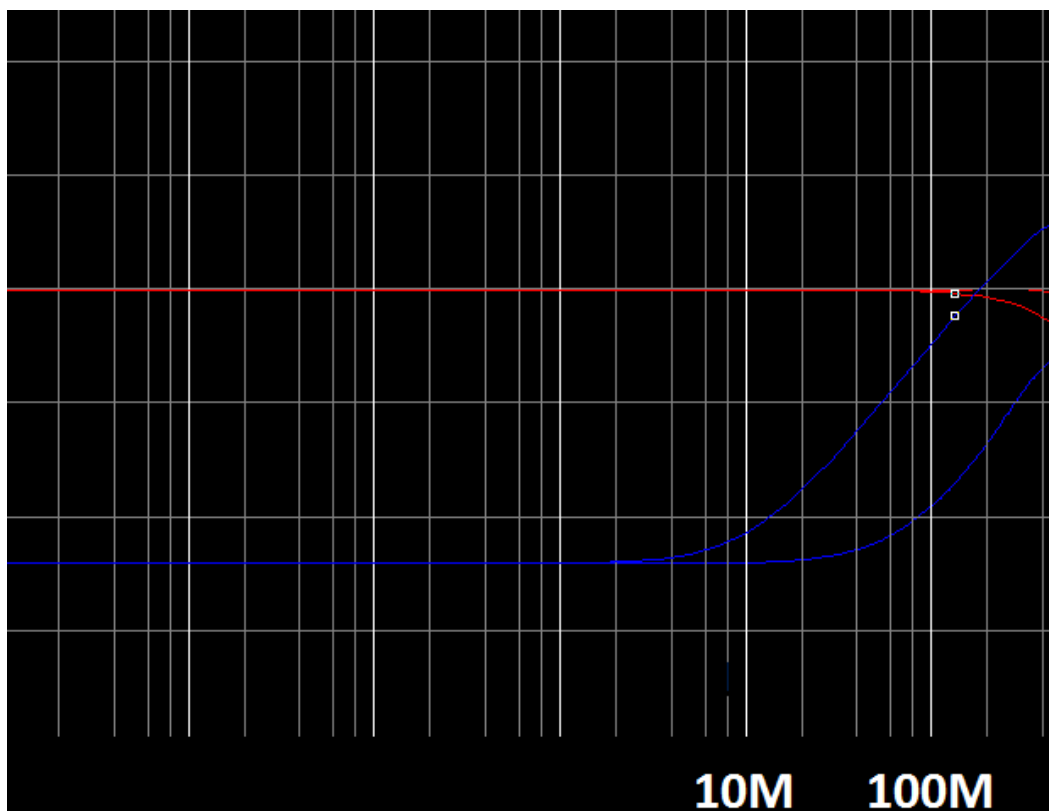
Obr. 1 Blokové schéma použití útlumového členu



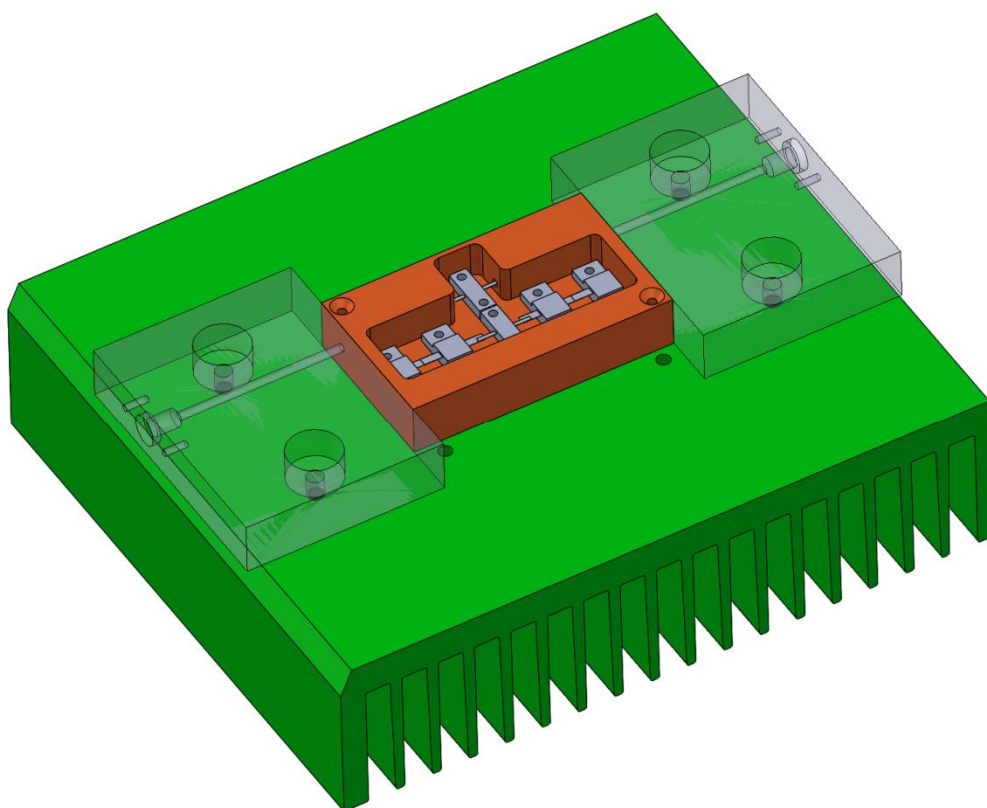
Obr. 2 Principiální schéma útlumového členu zapojeného jako π článek



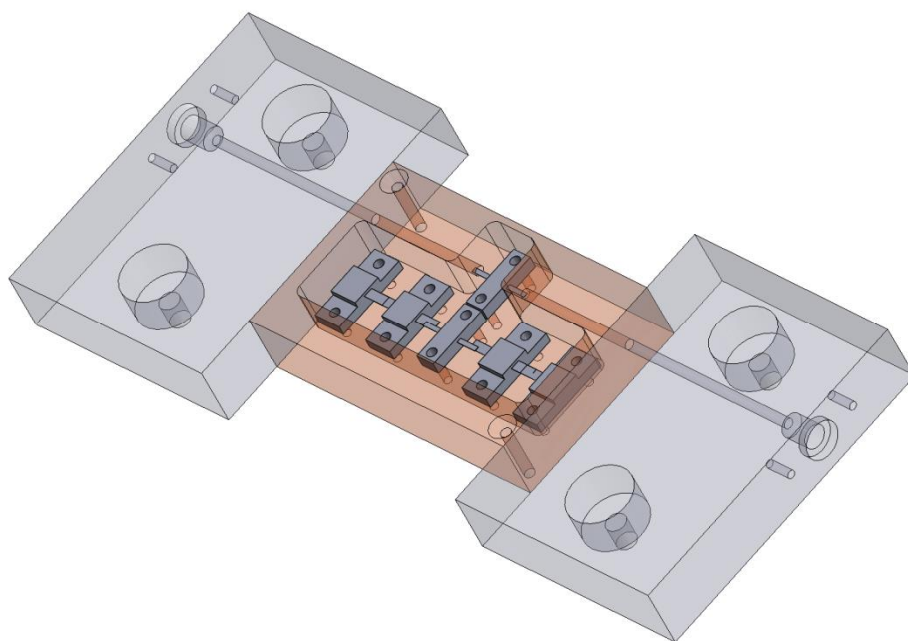
Obr. 3 Finální zapojení útlumového členu s uvažováním parazitních kapacit a jejich kompenzace



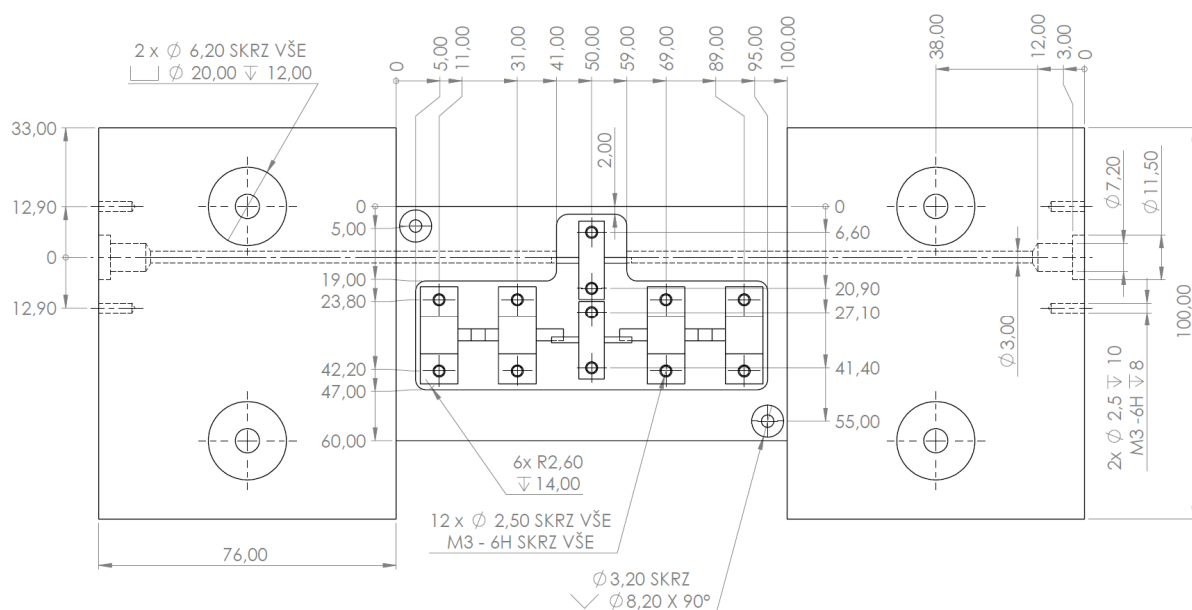
Obr. 4 Porovnání mezního kmitočtu verze bez kompenzace a s kompenzací



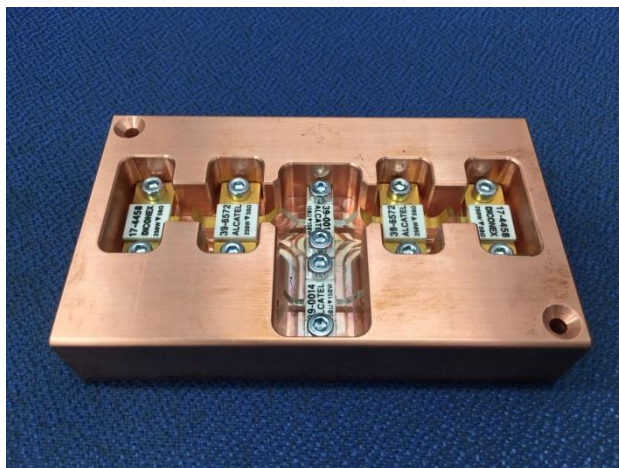
Obr. 5 3D náhled sesazení útlumového členu



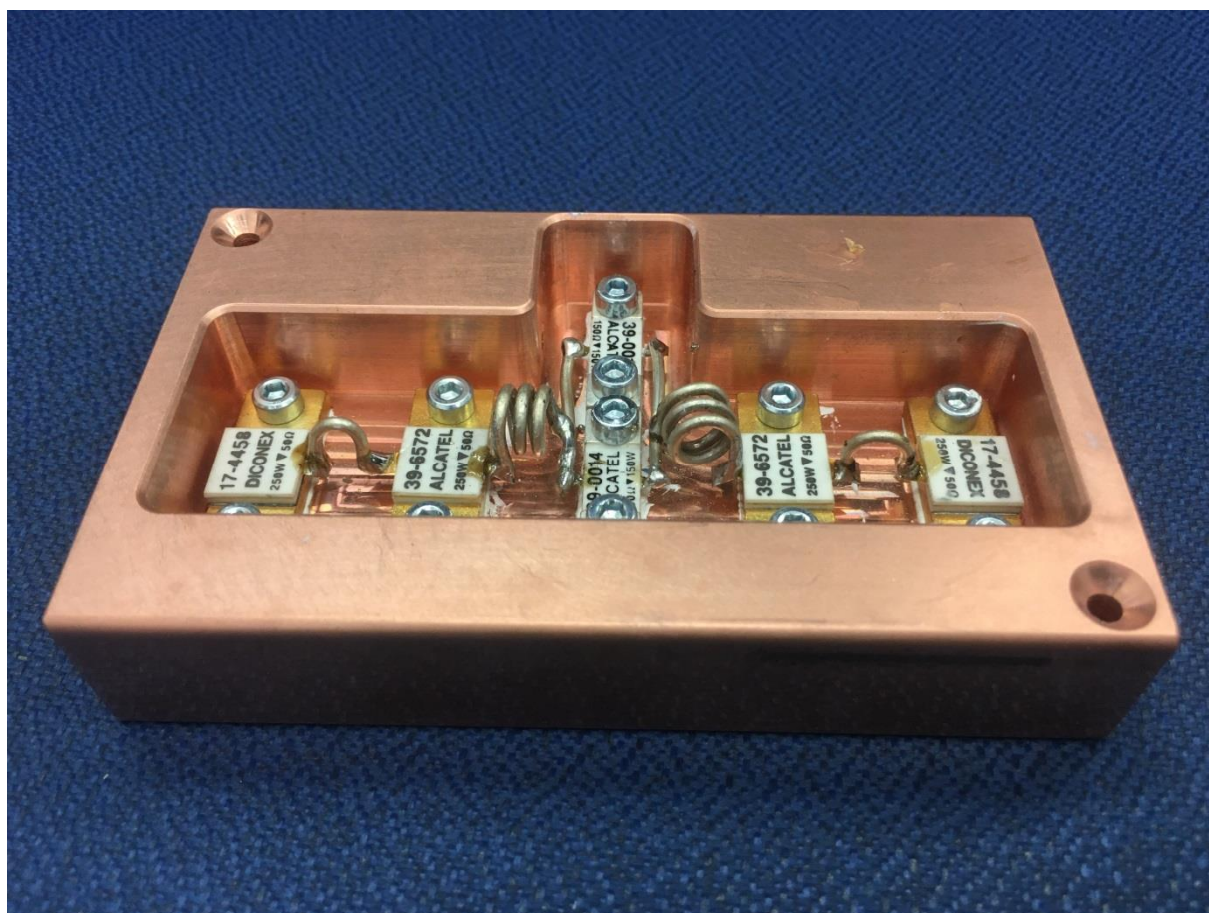
Obr. 6 – Detail sesazení měděného bloku a pomocných duralových bloků



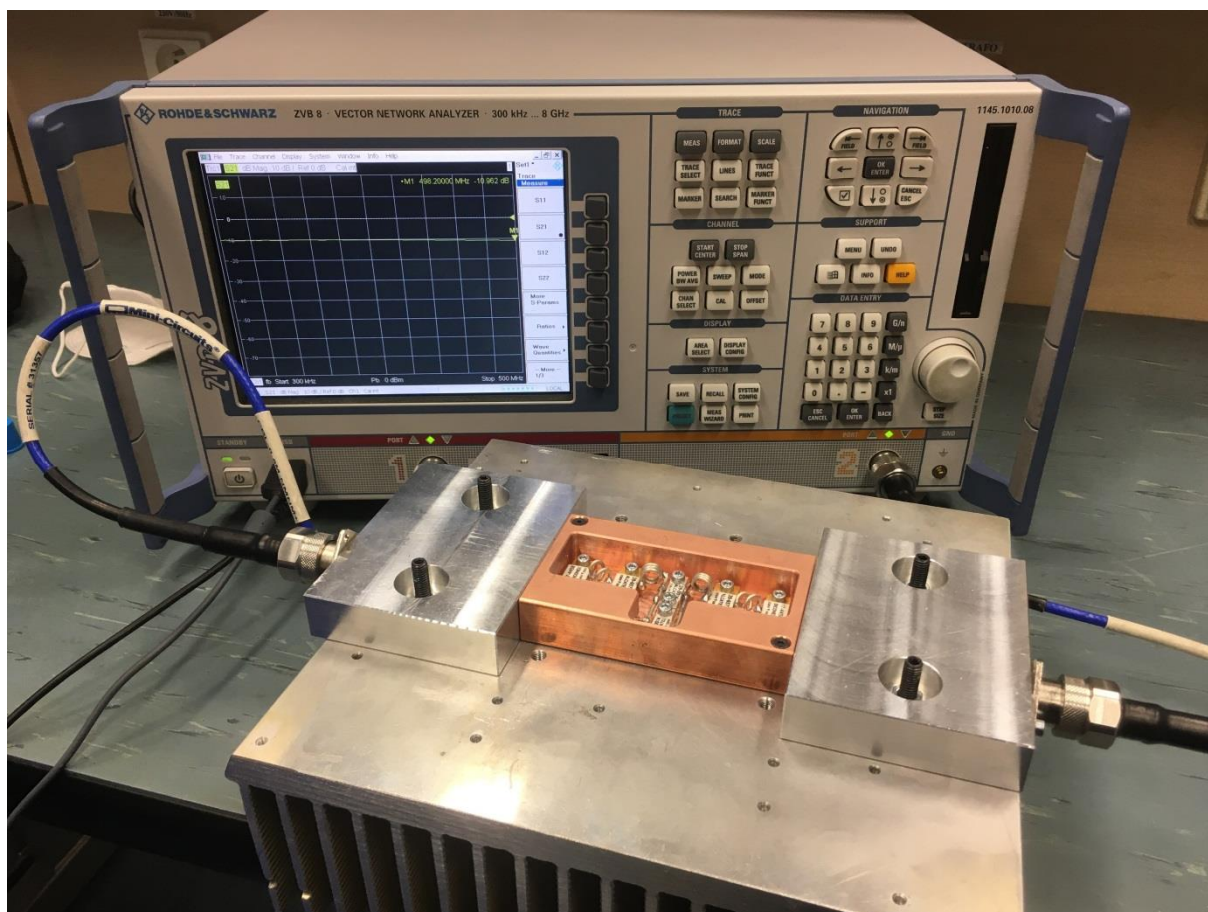
Obr. 7 – Finální výkres rozložení a provedení útlumového členu



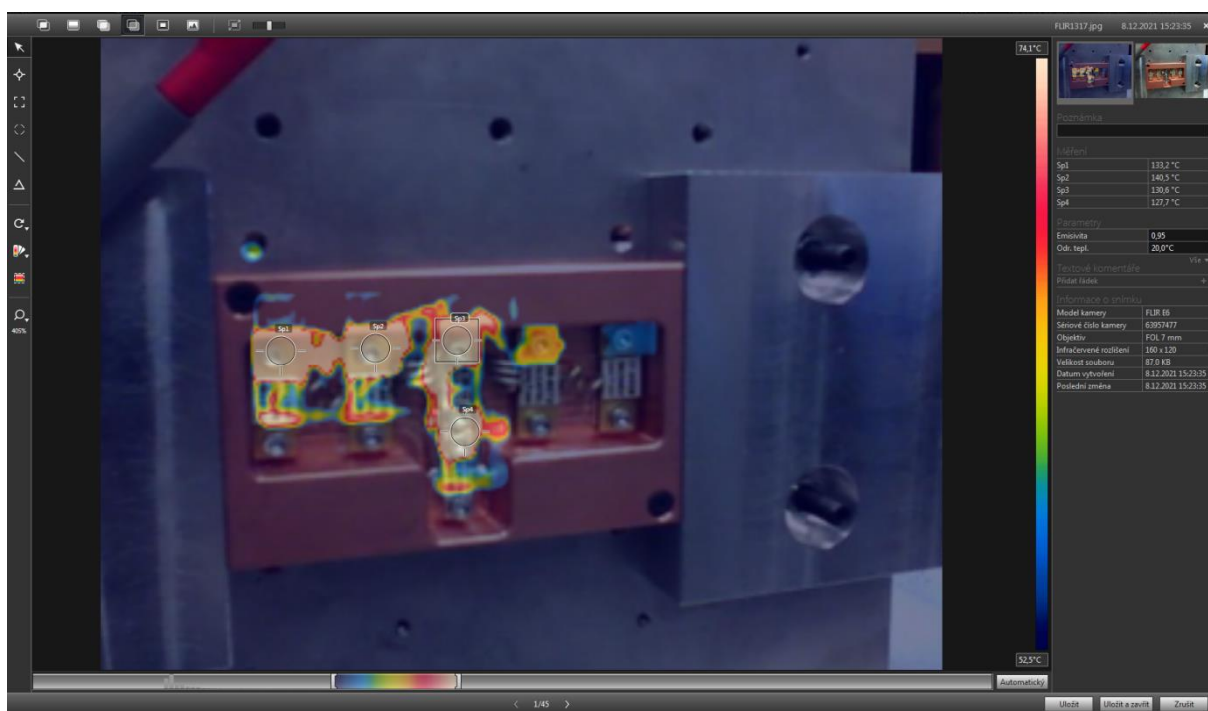
Obr. 8 První dva prototypy, kde se nepodařilo dosáhnout vyšší šířky pásma, než 200 MHz



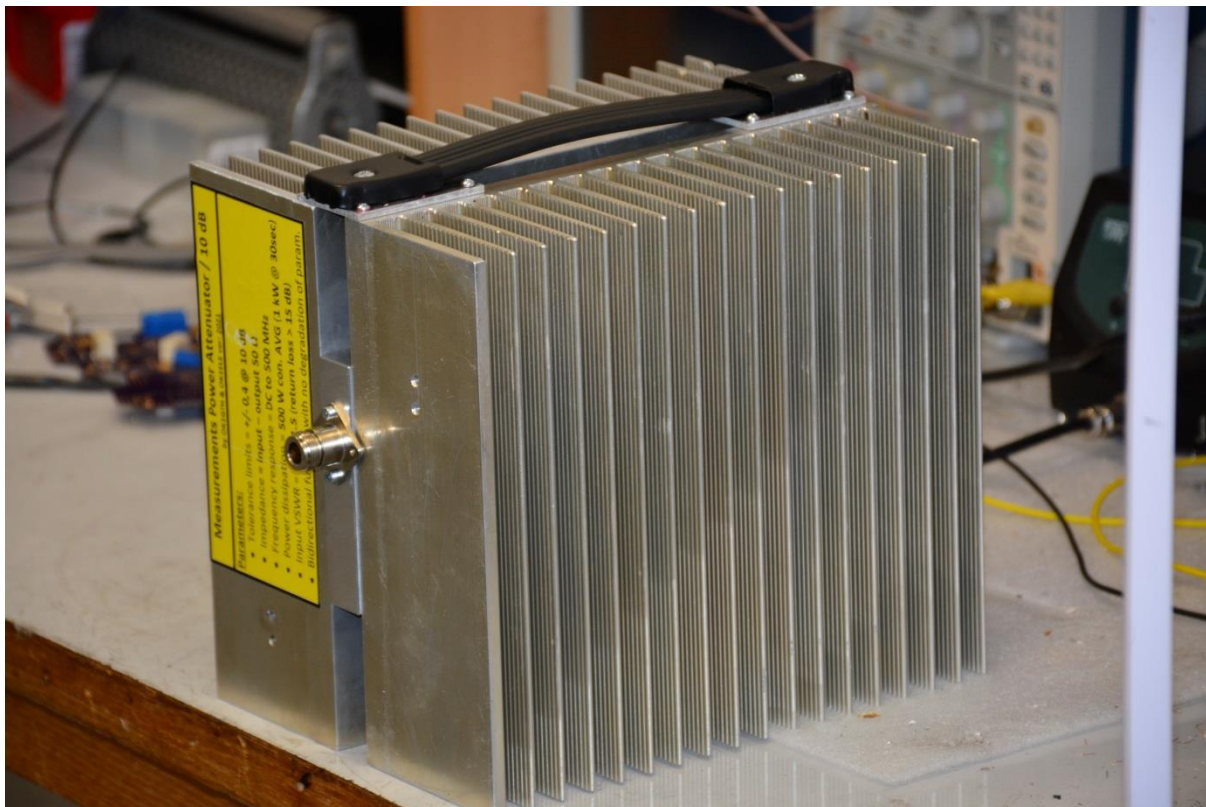
Obr. 9 Ukázka provedení útlumového členu v měděné komoře



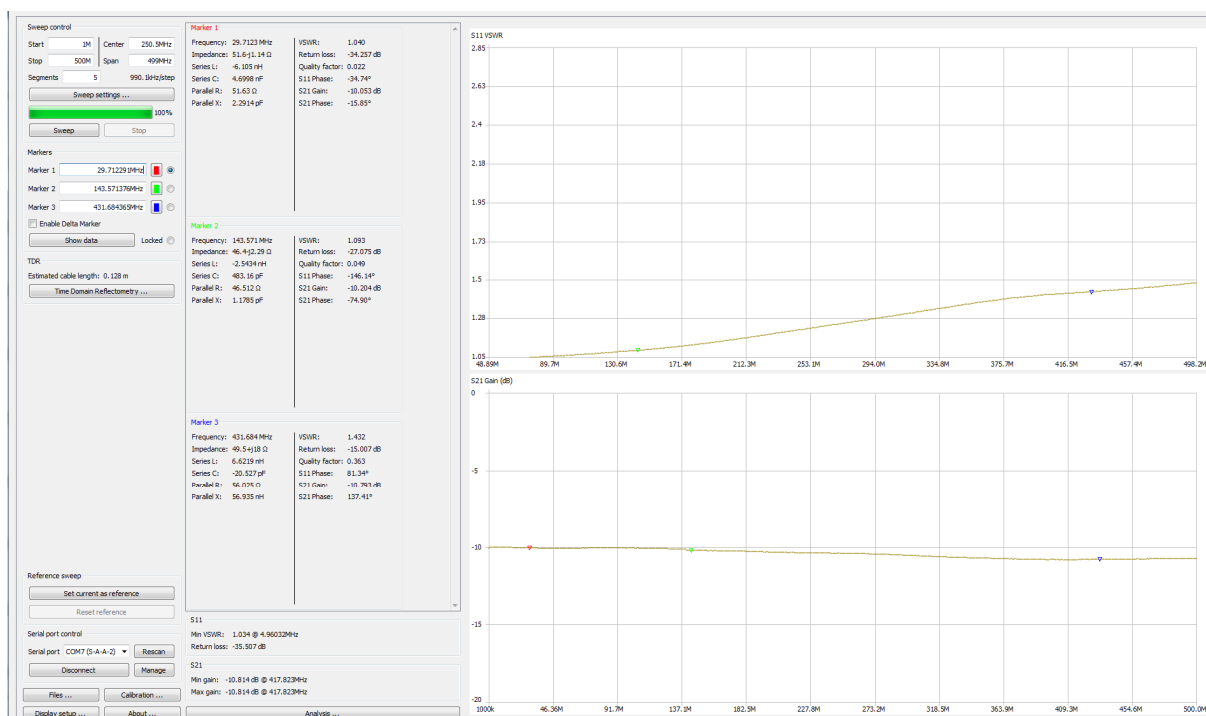
Obr. 10 Finální provedení útlumového členu bez druhé poloviny chladiče



Obr. 11 – rozložení teplotního pole bez dostatečného odvodu tepla z měděného bloku



Obr. 12 – finální provedení průchozího útlumového členu



Obr. 13 Změřený průběh impedančního přizpůsobení a průchozího útlumu v pásmu DC – 500 MHz