

Kapitola 8: Návrh mikrofonního transformátoru

V minulých kapitolách jsme poznali, že mikrofonní transformátor je nutný, nemá-li být vstupní zesilovač chlazený vodou. Chlazení vzduchem můžeme kvůli hlučnosti předem vyloučit.

Transformátor s klasickým převodem 1:37 nám umožňuje zvýšit šumový odpor prvního stupně s druhou mocninou převodu, tedy tisíc čtyřístakrát, což je již na úrovni předzesilovačů běžné konstrukce. Kolektorová ztráta prvního stupně bude pak jen 50 miliwattů (na místo sedmdesáti wattů, které by rád dissipoval stupeň beztransformátorový)*. Mikrofonní transformátor je však na prvním místě zesilovače a tudíž dokáže citelně zhoršit jeho šumové vlastnosti.

Literatura, zabývající se návrhem transformátorů^{/8/} se dokazuje, že nejmenší šumové číslo má transformátor s úplně zaplněným okénkem a stejným příspěvkem odporů primárního a sekundárního vinutí. Šum jádra (Barkhausenův) se neuvažuje.

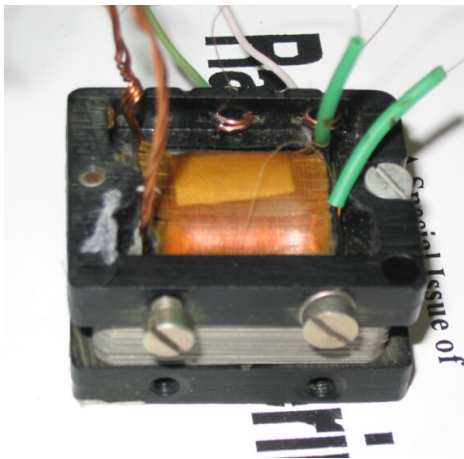
Vztahy pro výpočet vlastností vinutí transformátoru vždy obsahují konstanty, dané technologickým zpracováním. Jako alternativa je většinou uváděno použití modelových měření. Modelové vztahy však nejsou běžně uvedeny. Autor této práce se rozhodl jít cestou modelových měření včetně odvození vlastních přepočtových vztahů.

První model byl proveden na jádře z vysokopermeabilního materiálu (PY80).

Primární vinutí vyplňovalo okénko do 2/3 výšky. Převod lze spočítat ze vztahu:

$$N = \frac{\sqrt{L_s}}{\sqrt{L_p}} \quad /8.1/$$

kde L_s je indukčnost sekundárního, L_p indukčnost primárního vinutí.



V našem případě byla sekundární indukčnost 7,5 H a primární indukčnost 29 mH, tedy převod $N=16,5$. Ohmický odpor sekundárního vinutí byl 63 ohmů, odpor primárního 55 miliohmů, což po přepočtu na sekundární stranu dávalo 15 ohmů.

Z naměřených dat bylo zřejmé, že model neodpovídá podmínce rovnosti přepočítaných odporů vinutí, a tudíž není šumově optimální.

Cílem je tedy stanovit rozvržení plochy okénka pro transformátor vinutý stejnou technikou tak, aby hodnoty odporů vinutí byly optimální. K tomu je třeba odvodit vztahy, svazující parametry modelu a díla.

*) To by platilo, pokud nezapočítáváme šumové číslo transformátoru. Proto většinou používáme méně součástek paralelně, než druhá mocnina převodu příslušného transformátoru..

Velikost odporu vinutí o stejném počtu závitů je nepřímo úměrná jím spotřebované ploše okénka^{*}, tedy pro primární i sekundární vinutí platí:

$$R_x \cong \frac{1}{X} \qquad R_y \cong \frac{1}{Y} \qquad /8.2/$$

Protože plocha celkového okénka je konstantní, platí lineární vztah:

$$X = 1 - Y \qquad /8.3/$$

Protože jednotlivá vinutí se mohou lišit jednak polohou a jednak provedením, liší se jistým koeficientem též oba vztahy /8.2/. Koeficient pojmenujme „diferenciálním koeficientem plnění mědi“. Dáme-li vztahy /8.2/ a /8.3/ do poměru, dostaneme:

$$\frac{Yk_d}{1 - Y} = \frac{R_x}{R_y} \qquad /8.4/$$

kde R_y je odpor sekundárního vinutí, R_x je odpor primárního vinutí přepočtený na sekundární stranu, Y je plocha okénka sekundárního vinutí. Ze vztahu dostáváme hledaný koeficient plnění k_d .

Vztah /8.4/ lze také použít pro určení rozměrů díla, známe-li k_d modelu a použijeme-li stejnou techniku vinutí. Potom jistě pravá strana /8.4/ přejde v jedničku a dostaneme přímo hledanou plochu sekundárního vinutí:

$$Y = \frac{1}{k_d + 1} \qquad /8.5/$$

V případě díla našeho transformátoru vyšla plocha okénka využitá pro sekundární vinutí 0,68. Protože z dříve provedených měření bylo zřejmé, že není velká primární indukčnost potřebná, bylo dílo realizováno na běžném permalloyi (PY50). Pro měření jeho šumového čísla byla zvolena metoda proměnného vstupního odporu podle Čermáka.^{/6/}

Při této metodě se k primárnímu vinutí transformátoru připojí proměnný odpor a měří se závislost velikosti naměřeného šumového výkonu ve středním kmitočtovém pásmu na vstupním odporu. Z tvaru naměřené křivky lze usoudit na velikost příspěvku šumu transformátoru.

Předpokládejme, že transformátor ve středním kmitočtovém pásmu je možné popsat odporovým T- článkem^{/17/}, kde seriové odpory jsou přepočtené odpory vinutí. Paralelní odpor je projev vlastností jádra (Barkhausenův šum) a bývá poměrně velký, avšak ne zanedbatelný.

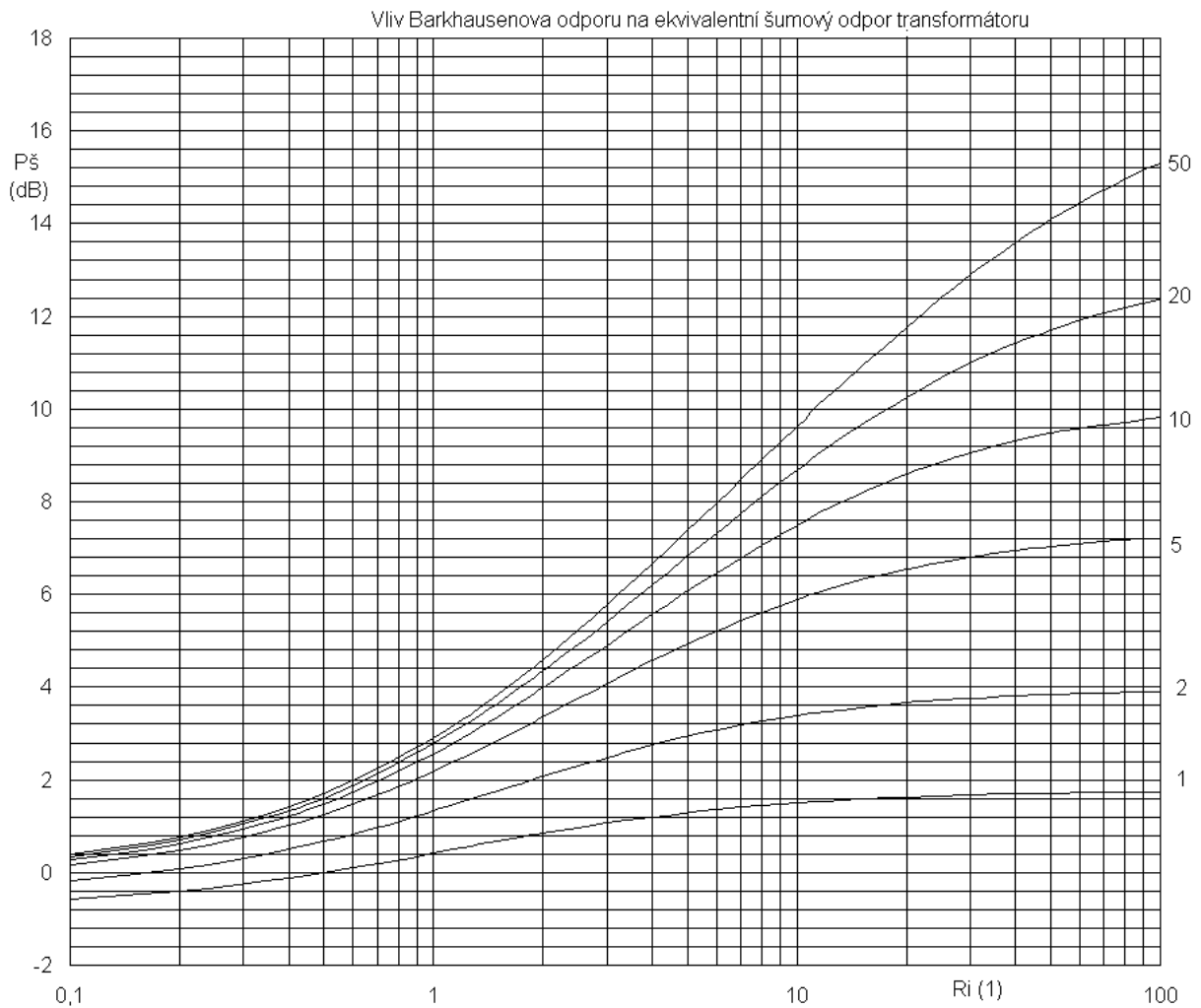
^{*}) Všimněme si, že šumové vlastnosti závisejí jen na využití ploše okénka a ne na počtu závitů a transformačním poměru. Další podstatná vlastnost – širokopásmovost – naopak na transformačním poměru závisí.; Šumově optimální poměr závitů je určen normovanou řadou průřezů drátu a technikou vinutí.

Vstupní šumový odpor zesilovače včetně transformátoru při měření proměnným odporem bude:

$$R_{\dot{s}c} = R_{\dot{s}fet} + R_{\dot{s}sek} + (R'_{\dot{s}inp} + R'_{\dot{s}prim}) | R'_{\dot{s}bark} \quad /8.6/$$

Vzorec /8.6/ byl vyčíslen jako šablona pro speciální případ normovaného vstupního transformátoru.

Zde je hodnota přepočtených odporů obou vinutí 0,5, šumový odpor zesilovače zanedbatelný a Barkhausenův odpor udán v násobcích odporů vinutí jako parametr křivek.



Šablona může být použita k odhadu Barkhausenova odporu i odporů vinutí transformátoru. Odlišnému odporu vinutí odpovídá posuv horizontální, odlišnému zisku zesilovače posuv vertikální a odlišnému Barkhausenovu odporu konečně jednotlivá křivka.

Dalším úskalím návrhu transformátoru je konstrukce vinutí. Protože šířka pásma transformátoru je dána poměrem nízkofrekvenční a rozptylové kapacity, měli bychom se snažit právě o zmenšení rozptylové indukčnosti.

Konstrukci z hlediska malé rozptylové indukčnosti se věnovala početná literatura, většinou v době, kdy dominantní výstupní kapacitou transformátoru byla kapacita montáže. Pozdější výzkumy O'Meara,^{/22/} dokázaly, že snížením rozptylové indukčnosti se současně zvýší parazitní kapacita. Pokud je d výška a w šířka okénka transformátoru, pak jsou parazitní prvky dány homogenními funkcemi:

$$L_l = \mathcal{F}\left(\frac{d}{w}\right) \qquad C_0 = \mathcal{G}\left(\frac{w}{d}\right) \qquad /8.7/$$

O'Meara definoval charakteristickou impedanci transformátoru klasickým vzorcem:

$$Z = \sqrt{\frac{L_l}{C_0}}$$

a měření na modelech zjistil, že jakákoliv změna v konfiguraci vinutí může ovlivnit charakteristickou impedanci transformátoru jen maximálně o 50 %. Přímou ji však ovlivňuje lineární rozměr transformátoru (ten v /8.7/ nefiguruje).

O'Meara odvodil také další vztahy, mající dopad na modelová měření a konstrukci transformátorů. Především jde o vliv převodu transformátoru na šířku jeho pásma:

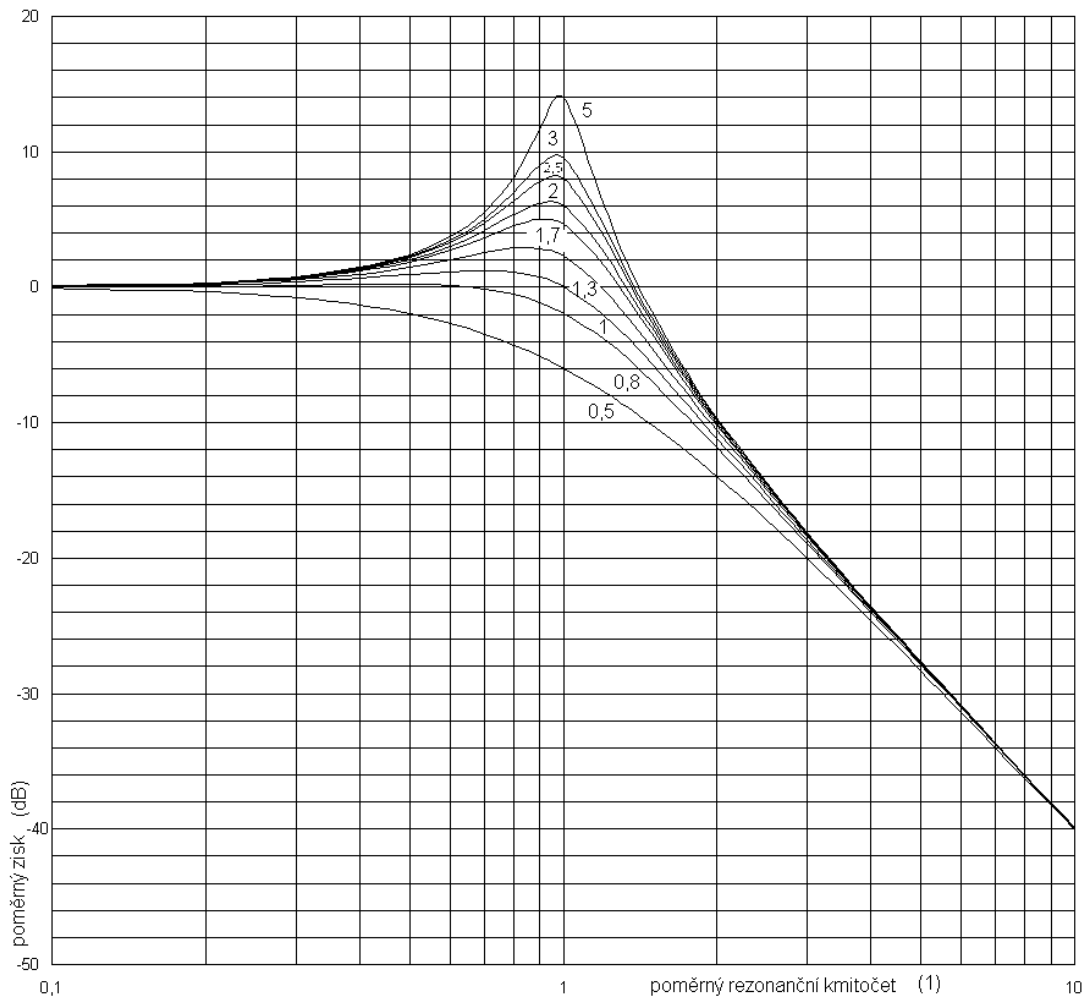
$$M_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{1}{n} - n\right)^2}{2}}} \qquad /8.8/$$

Ze vztahu /8.8/ vyplývá, že šířka pásma transformátoru vyrobeného stejnou technikou na stejném jádře musí být menší tím více, čím více se převod liší od jednotkového převodu. Nahlédneme-li do firemní literatury výrobců transformátorů, můžeme si platnost vztahu /8.8/ potvrdit.*

*) Vztah platí jen pro malé převody transformátoru. Nelze jím srovnávat transformátor 1:1 s transformátorem 1:30.

Někdy je potřeba dotlumit již navinutý transformátor sériovou kombinací odporu a kondenzátoru. Zejména je to potřeba u transformátorů na běžných jádrech. Výhodou této kombinace je, že nezvyšuje útlum transformátoru ve středním kmitočtovém pásmu. Pro její návrh však potřebujeme znát parametry modelu transformátoru na vysokých kmitočtech. Ty lze zjistit srovnáním naměřené frekvenční charakteristiky s normovaným transformátorem, tzv. Reichovou šablonou /32/, jež je dána vzorcem:

$$A = 20 \log \left(\text{abs} \left(\frac{1}{\frac{j\omega}{Q} - \omega^2 + 1} \right) \right) = 20 \log \left(\frac{Q}{\sqrt{Q^2 \omega^4 - 2Q^2 \omega^2 + Q^2 + \omega^2}} \right) \quad /8.9/$$



Zde je rezonanční kmitočet normován k:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_l C_0}}$$

a jakost je:

$$Q = \frac{\omega_r L_l}{R_l}$$

*) Alternativní postup bez použití šablony, jen z převýšení, viz. Cykin, /8/

Protože tlumicí rezistor známe:

$$R_t = p^2(R_{inp} + R_{prim}) + R_{sec} \quad /8.10/$$

jsme schopni vypočítat všechny parametry náhradního obvodu.

V případě našeho díla bylo $R_h=1,56$ kiloohmů, Rezonanční kmitočet byl 66 kHz, korigován šablonou na 70 kHz. Z toho plyne rozptylová indukčnost 14,2 mH a paralelní kapacita 364 pF. Protože indukčnost sekundárního vinutí je 11 H, je součinitel rozptylové indukčnosti 0,0013 ; což odpovídá použití jádra z PY50 a vinutí bez sekcí. Ke stanovení tlumícího obvodu R+C použijeme metodu Monte Carlo.

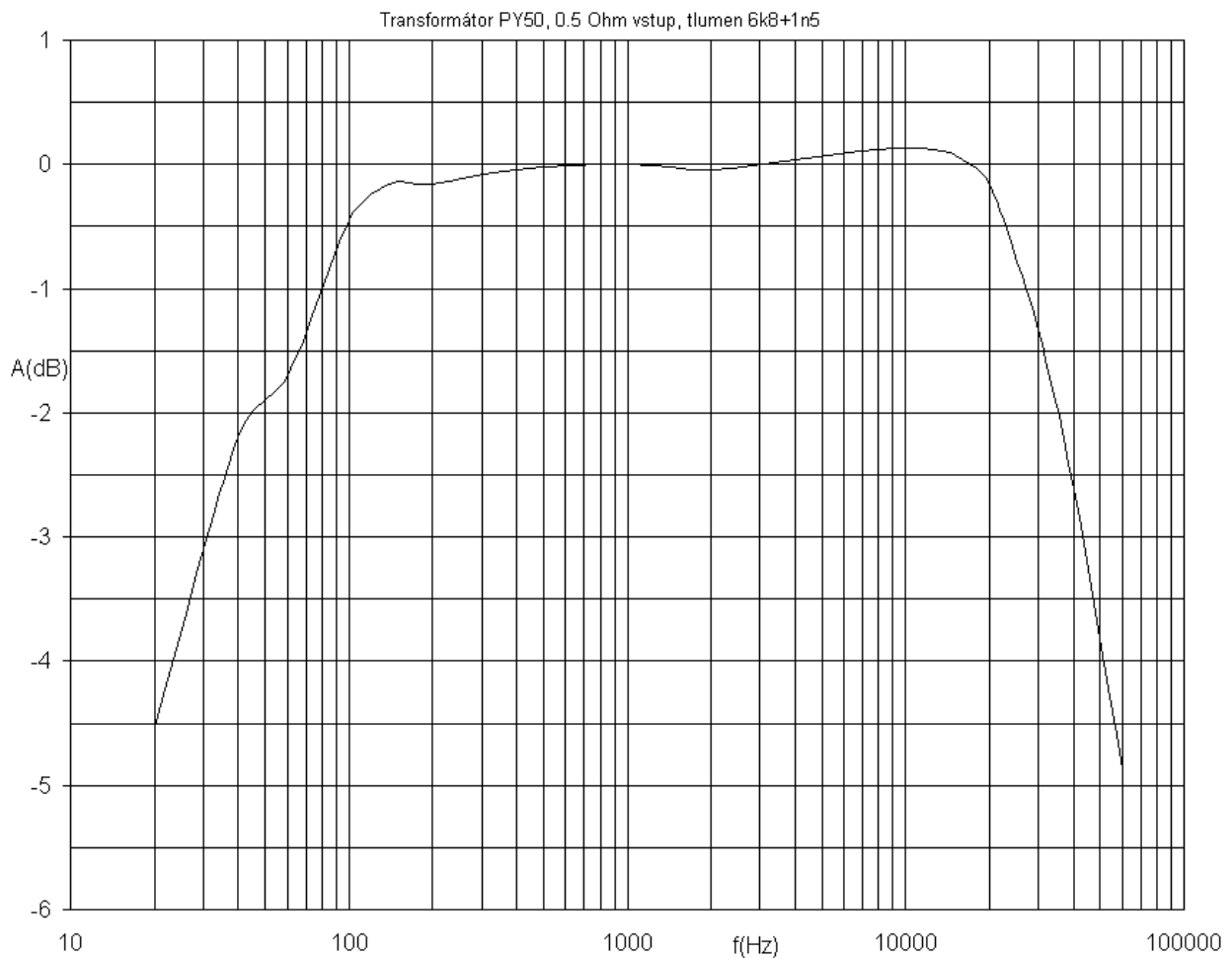
Vyčíslením (provedeným v maple souboru v příloze) byly stanoveny koeficienty K_r a k_c , kterými se přenásobí hodnoty prvků modelu:

$K_r=4$; $k_c=4$

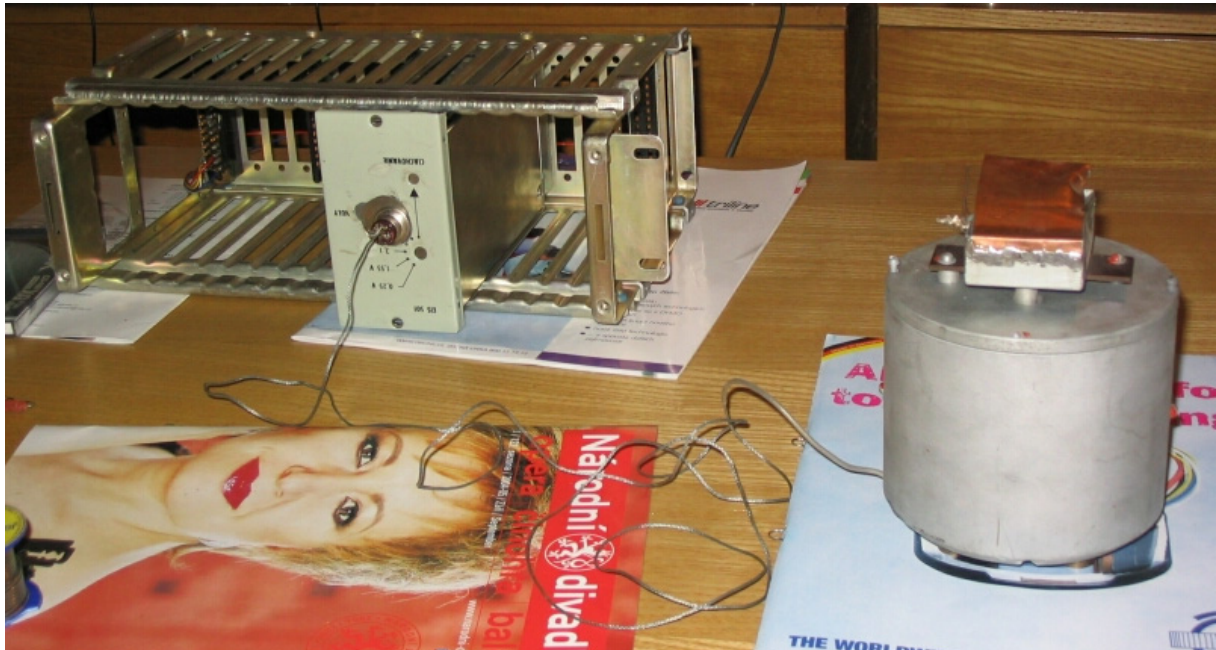
Hodnoty zatěžovacího R+C členu jsou tedy:

$R=6,2$ kiloohmů; $C=1,5$ nF.

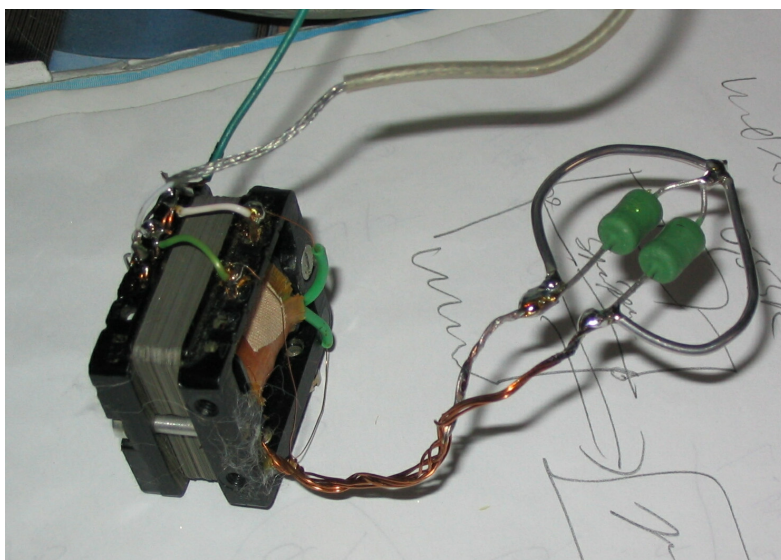
Použitím odporu standardní řady 6k8 a kondenzátoru (japonského) 1k5 se poměry o mnoho nezhorší. Naměřená kmitočtová charakteristika transformátoru s odporovým buzením a navrženým tlumením je na následujícím obrázku (Připomínám, že páskový mikrofon odpovídá kapacitnímu buzení a proto budou vlastnosti transformátoru na nízkých kmitočtech poněkud lepší.):



Šumové číslo zesilovače včetně transformátoru bylo měřeno metodou proměnného vstupního odporu. Bylo použito jak navrhovaného transformátoru, tak referenčního transformátoru, navinutého na vysokopermeabilním materiálu. K předzesílení byl použit CA2 umístěný v malé vaně URS, k záznamu pak CD rekordér SONY RCD-W3:



Měřený transformátor byl umístěn v kombinovaném stínícím krytu. Protože nízkohmové reostaty nebyly shledány jako výhodné (kontaktní potenciály způsobovaly mikrofoničnost a jejich přechodové odpory převyšovaly řádově odpor vlastní spirály – hodí se pravděpodobně jen pro výkonové obvody), bylo použito dvou rezistorů přemostěných měkkou pájkou. Ta se v průběhu měření prostříhávala. Pohled na vzorek transformátoru na vysokopermeabilním jádře před měřením (včetně prvního stupně zesilovače) je na dalším obrázku:



Aby nedošlo k ovlivnění měření rušivými signály, byla při vyhodnocení použita horní propust s mezním kmitočtem 1 kHz.

Naměřené výsledky včetně parametrů transformátorů:

Vzorek PY50:

$L_o=4,5$ mH; $R_p=0,08$ Ohm; $R_s=170$ Ohm; $N=1:49$; tlumen

Rin	Uš (dB)	delta(dB)	Ršiekv.
0,0	-42,4		
0,22	-40,6	1,8	0,44
0,44	-39,5	1,1	0,22

Vzorek PY80:

$L_o=5,35$ mH; $R_p=0,025$ Ohm; $R_s=29,6$ Ohm; $N=1:34,9$; netlumen

Rin	Uš(dB)	delta(dB)	Ršiekv.
0,0	-52,4		
0,22	-49	3,4	0,18
0,44	-46,6	2,4	0,15

Vzorek PY76

$L_o=3,44$ mH; $R_p=...$, $R_s=33,3$ Ohm, $N=1:34,6$; netlumen

Rin	Uš(dB)	delta(dB)	Ršiekv.
0	-49,4		
0,22	-46,3	3,1	0,2
0,44	-44,2	5,2-3,1	0,18
0,88	-42,2	7,2-5,2	0,19

Barkhausenův odpor transformátoru způsobuje, že ekvivalentní vstupní šumový odpor se mění pro různé vstupní odpory (U zesilovače s FETem tomu tak není). Z výsledků plyne, že permalloye s vysokou permeabilitou jsou výhodnější z hlediska Barkhausenova odporu. Nemůžeme proto PY50 použít, ač jinak jsou jeho parametry postačující. Na tomto místě ještě připomínám, že Olson^[21] ve svých pracích považoval Barkhausenův odpor za nezajímavý. Nejvýhodnější vůbec je PY76, dodaný firmou MG servis a navrhovaný pro minimální zkreslení. Umožňuje konstrukci menšího transformátoru než PY80. Přestože hlavním kritériem pro výrobu tohoto materiálu bylo minimální zkreslení, materiál vyhovuje i pro nízkošumové aplikace. Zřejmě je zdroj zkreslení v jádře transformátoru stejný, jako zdroj šumu.