



Kondenzátorový mikrofon jinak

Michal Vlček

ČVUT–FEL, Technická 2, 166 27 Praha 6

v1km3@fel.cvut.cz

Abstract Noise of system pressure condenser microphone - preamplifier in mode with D.C. polarization is discussed. Backgrounds from electric filter theory are introduced and equivalent electric scheme in the non-standard technology is analyzed. This analogy was originally developed for transducer with functional nonlinearity - high frequency condenser microphones for study its large-signal parameters (i.e. stability and parametric gain) and here is used for study of noise parameters via time-domain simulation.

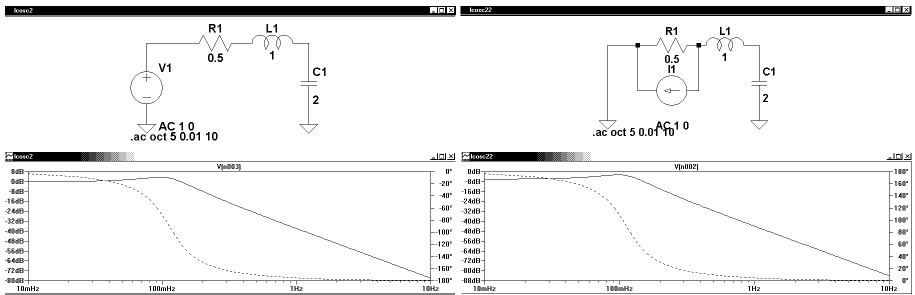
1 MOTIVACE

Jen zřítkačky se v časopisech objevují články zabývající se šumem elektroakustických soustav - speciálně mikrofonů. Důvod je zřejmý. Na nižších kmitočtech dominuje šum vznikající na elektrické straně a měření čehokoliv s pomocí výkonové spektrální hustoty výstupního napětí začíná být irelevantní - zejména s ohledem na fraktální povahu $1/f$ šumu. [1] Možná proto se objevují články typu „ $1/f$ šum v membráně mikrofonu etc...“ [2] a odpovědi na ně ve stylu, že jde o zanedbání některé části náhradního obvodu [3]. Objevují se ovšem i referáty, ve kterých je náhradní obvod na první pohled mylně sestaven, a přesto nepůsobí žádná pobouření. Jeden takový zazněl přímo na konferenci Acoustics2008 v Paříži [4] a přiměl mne k pokusu o řešení problému.

2 PODOBENSTVÍ

Jako příklad si ukažme jednoduchý LC filtr druhého řádu, jeho zisk a vlastní šum. Vlastní šum je zde simulován harmonickým proudovým zdrojem, připojeným paralelně k šumícímu rezistoru. Prvním důvodem k tomuto kroku je fakt, že šumová analýza obvodů není v některých verzích simulačních programů podporována. Druhým důvodem je omezená dynamika řešiče, tedy nemožnost provedení šumové analýzy v časové oblasti s dynamickým rozsahem odpovídajícím skutečnosti. Pokud dodržíme podmínku, aby velikost proudu byla nepřímou úměrnou odmocnině velikosti

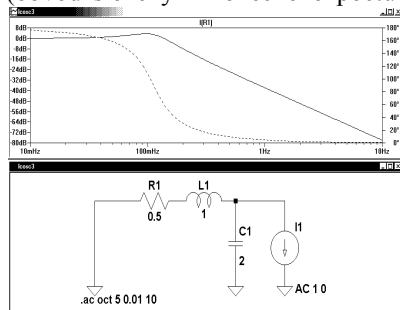
rezistoru, dostaneme relativní výsledky, které jsou pro analýzu dostačující. První verze filtru byla navržena jako jednostranně zakončený LC filtr.



Obr. 1: dolní propust

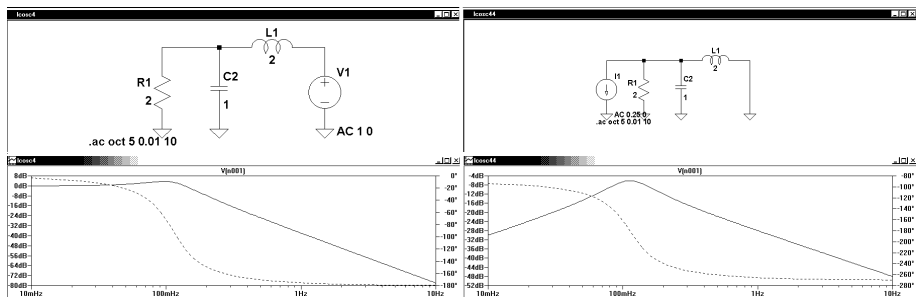
Na obr. 1 vlevo je napěťový a fázový přenos filtru a vpravo relativní kmitočtová úroveň vlastního šumu (vypočítaný fázový přenos pochopitelně nemá smysl).

Úpravou filtru - adjunkcí, získáme zapojení s proudovým vstupem i výstupem. Úprava spočívá v záměně vstupu a výstupu a v záměně napěťových/proudových zdrojů a výstupů. Přenos se samozřejmě nezmění, protože jde o reciprokový obvod (obvod složený z konečného počtu nesingulárních jednobranů). U tohoto obvodu



záměrně neprovádím šumovou analýzu, neboť jde o zapojení nesouměřitelné z hlediska vstupně výstupních veličin se zapojením na obr. 1 (napětí/proud). Pokud ovšem vytvoříme duální obvod k obvodu z obr. 2, bude to opět obvod v napěťovém módu a stejným přenosem, jako na obr. 1 i obr 2.

<<Obr. 2: obvod získaný adjunkcí Obr. 1

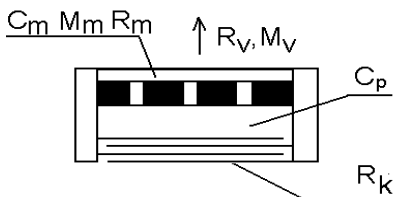


Obr.3: Duální obvod k Obr.. 2

Srovnáním obr. 1 s obr. 3 zjistíme, že obvody, které mají stejnou kmitočtovou charakteristiku přenosu, nemusí mít stejnou spektrální hustotu vlastního šumu. Proto pro korektní šumovou simulaci musíme znát korektní topologii náhradního obvodu.

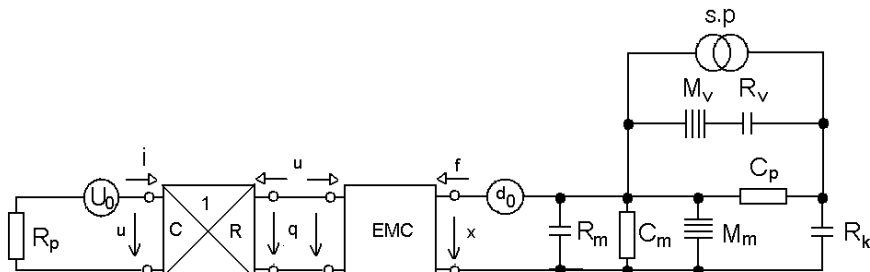
3 TLAKOVÝ KONDENZÁTOROVÝ MIKROFON

Na základě náčrtku můžeme stanovit náhradní elektromechanické schéma.



Obr.4: Mechanické řešení kapsle

Náhradní schéma je poněkud neobvyklé, protože vychází z analogií navržených autorem původně k jinému účelu [6][7]. Dále předpokládá vynulování tlakové citlivosti mikrofону kapilárou na velmi nízkých kmitočtech. Tato podmínka znemožňuje například elektrostatičnou kalibraci mikrofónu na infrasonických kmitočtech [8] a bývá v náhradních schématech někdy opomíjena.



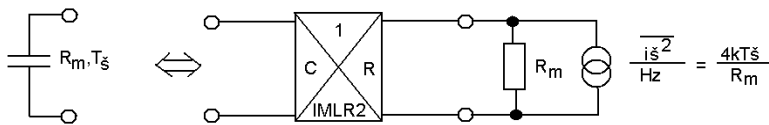
Obr. 5: Náhradní schéma systému z obr.4

Ještě připomínám význam jednotlivých prvků v náhradním obvodu: M_v je hmotnostní složka vyařovací impedance, R_v je disipační složka vyařovací impedance, $s.p.$ je síla způsobená tlakem působícím na membránu, C_p je poddajnost prostoru za membránou, R_k je odpor kapiláry, M_m je hmota membrány, C_m je poddajnost membrány, R_m je odpor tlumení membrány, R_p je polarizační rezistor, U_0 je polarizační napětí a d_0 je montážní vzdálenost membrány. Parametr nelineární

elektromechanické konverze je $1/(\epsilon A_{ef})$ [7] je $5 \cdot 10^{14}$. Hodnoty prvků byly zvoleny tak, aby zhruba odpovídaly situaci v nízkošumovém jednopalcovém mikrofону. [10]

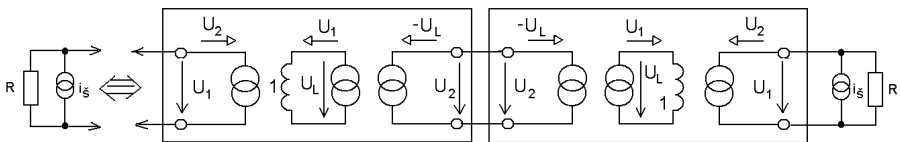
4 ŠUMOVÁ ANALÝZA

Šum vzniká v disipačních prvcích obvodu, tedy jen na činných rezistorech. Protože jsou činné rezistory v navrhované analogii modelovány kapacitorem, nemůžeme použít přímo šumovou analýzu v programu SPICE (tu bychom nemohli použít i proto, že jde o silně nelineární obvod [5]). Naštěstí existuje trik: Simulovat kapacitu pomocí ideálního mutátoru zatíženého rezistorem, ke kterému je připojen paralelně proudový zdroj harmonického signálu o velikosti příslušné spektrální výkonové hustoty šumového proudu.



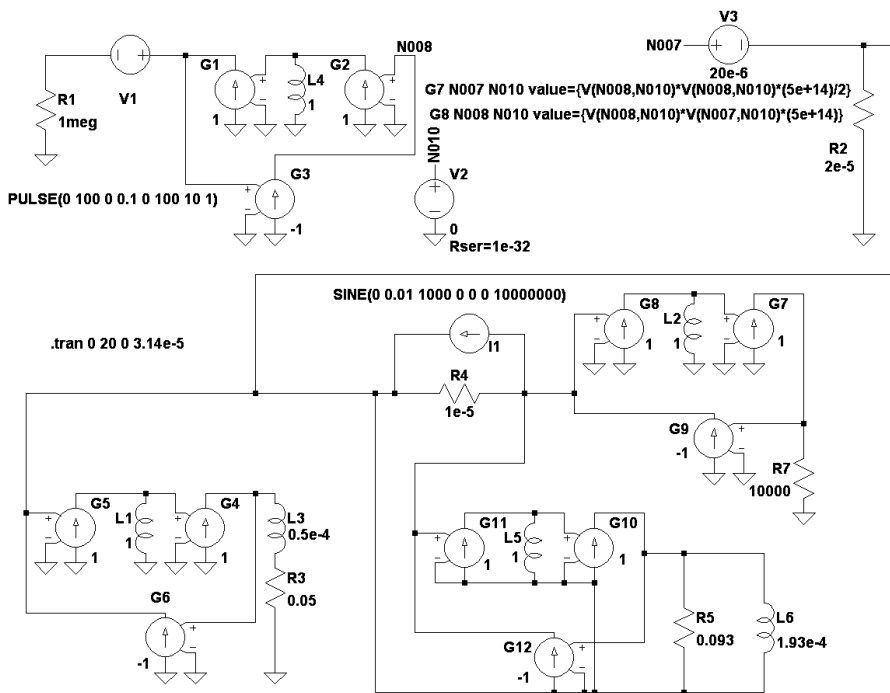
Obr.6: Realizace šumícího kondenzátoru

Je tedy zřejmé, že máme-li srovnávat spektrální výkonové úrovně, kterými přispívají jednotlivé zdroje (disipační prvky v náhradním schématu), stačí, aby se úroveň harmonického proudu zmenšovala nepřímo úměrně s odmocninou velikosti odporu disipačního prvku. Simulaci je nutné provést na relativně vysokých úrovních signálu, aby nedošlo ke zkreslení výpočtu zaokrouhlovacími chybami řešiče. Ovšem za předpokladu dodržení realizovací podmínky na zapojení kaskády mutátorů v systému. Vlastnosti mutátoru jako transformátoru impedance odpovídají vlastnostem gyrátoru, tedy transformace impedance zůstává i po prohození vstupních a výstupních svorek. Přenos se však mění, je-li mutátor asymetrický, a tak, chceme-li realizovat simulaci odporu pomocí kaskády mutátorů, musíme zachovat symetrii analyzovaného systému. Tedy ač je mutátor realizovaný nesymetricky, kaskáda dvou mutátorů musí být symetrická.



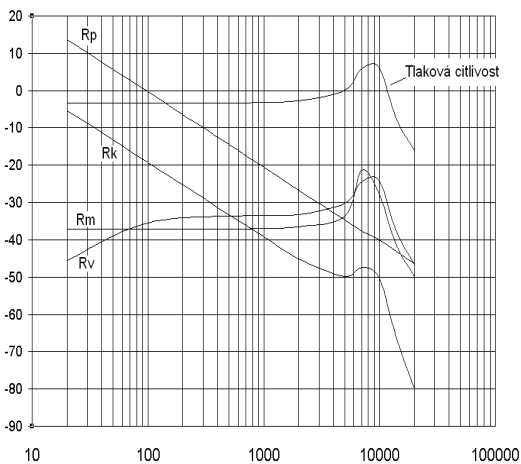
Obr.7 Podmínka symetrie dvojice mutátorů

Celkové náhradní schéma (zapojené pro analýzu přenosu) je na obr. 8



Obr.8: Náhradní schéma pro analýzu celého systému

5 VÝSLEDKY SIMULACE A JEJICH ZHODNOCENÍ



Simulace byly provedeny v časové oblasti pro přenos harmonických signálů ze všech disipačních prvků. Výsledné spektrální výkonové hustoty uvádím v grafu. Připomínám, že osa úrovní v dB má jen relativní charakter a není normována ve smyslu absolutní úrovně šumu ani tlakové citlivosti.

<<Obr.9: Relativní vliv jednotlivých disipačních prvků na šum systému (kmitočet je v Hertzech)

6 ZÁVĚR

Výsledky simulace se v podstatě shodují s teoretickou předpovědí [9],[10]. Pouze ve středním kmitočtovém pásmu přechází vliv vyzařovacího odporu v šum rovnoměrný, ač je obecně funkcí rostoucí směrem k vyšším kmitočtům. Zajímavý je vliv kapiláry, která s danými hodnotami dominuje akustickému šumu v oblasti nižších kmitočtů. Vyšší už je jen šum polarizačního rezistoru. Proto by u vysokofrekvenčních mikrofonů, které polarizační rezistor z principu nepotřebují [11], měla být kapilára provedena obzvláště pečlivě. Její odpor z hlediska minimalizace vlastního šumu může být o několik řádů větší, než je potřeba z hlediska kmitočtové charakteristiky. Jako příklad můžeme vzít původní Neumannův tlakový měnič [12], kde je kapilára provedena relativně složitě - jako spirálová drážka na zadní straně kapsle. Za zamyšlení stojí fakt, že vyzařovací odpor dominuje šumu mikrofonu v oblasti středních a vyšších kmitočtů. Jeho hodnotu lze ovlivnit jen průměrem membrány [3]. Proto bude při miniaturizaci mikrofonů jejich vlastní šum narůstat, neboť mikroelektronické technologie vyžadují pro snížení ceny zvyšování hustoty integrace a tím snižování plochy membrány.

REFERENCE

- [1] Wornell, G.: *Signal Processing with Fractals: Wavelett-Based Approach*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996.
- [2] Zuckerwar, A. J., Kuhn, T. R., Serbyn, R. M.: Background noise in piezoresistive, electret condenser, and ceramic microphones, *J. Acoust. Soc. Am.* **113**, 3179 (2003)
- [3] Brander, R.: Comment on "Background noise in piezoresistive, electret condenser, and ceramic microphones", *J. Acoust. Soc. Am.* **115**, 465 (2004)
- [4] Lee, S.B., Schafer, D.E., Loeppert, P.V.: Overcoming Scaling Problems in Miniaturized Silicon Microphones, Prezentace na konferenci *Acoustics 2008*, Paříž 29.6-4.7 2008
- [5] Dobeš, J. : Ústní sdělení
- [6] Vlk, M.: A Novel Analogy for Time-Domain Simulation of the Nonlinear Electrostatic Transducer, *Sborník konference Poster 2008*, Praha, 15.5.2008
- [7] Vlk, M.: Condenser microphone as parametric electroacoustic system and its time-domain modelling via equivalent electrical circuit in SPICE software *Acoustics 2008*, Paříž 29.6-4.7 2008
- [8] Boleslav, A.: *Nizkofrekvenční a elektroakustická měření*, SNTL, Praha, 1961
- [9] Tarnow, V.: Thermal noise in microphones and preamplifiers, *Bruel & Kjaer Tech. Rev.* **3**, 1972, str. 3-14
- [10] Frederiksen, E.: Microphone system for extremely low sound levels *Bruel & Kjaer Tech. Rev.* **3**, 1984, str. 16-22
- [11] Vlk, M.: Přihláška vynálezu PV2007-759
- [12] Neumann, G.: Anglický patent GB420390 (vydaný 30.11.1934)
- [13] Merhaut, J. : *Teoretické Základy elektroakustiky*, Academia, Praha 1985