

DESIGN AND OPTIMIZATION OF SPECIAL LOW-LEVEL AMPLIFIER FOR MEASUREMENT OF AIR IONS

Lukáš Zdražil

Master Degree Programme (2), FEEC BUT

E-mail: xzdraz07@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Zdeněk Roubal

E-mail: roubalz@feec.vutbr.cz

Abstract: This paper deals with low-current measurement in order of picoamps up to a few dozens of femtoamps. Such low currents measuring is necessary for determination of air ions concentration. Disturbances, which are otherwise negligible for ordinary measurements must be considered. For example, leakage currents and noise generated in measuring device circuit. The choice of a precise operation amplifier with low input bias current is as important as the selection of low noise passive components.

Keywords: low level measurements, air ions, aspiration condenser, electrometric amplifiers

1 ÚVOD

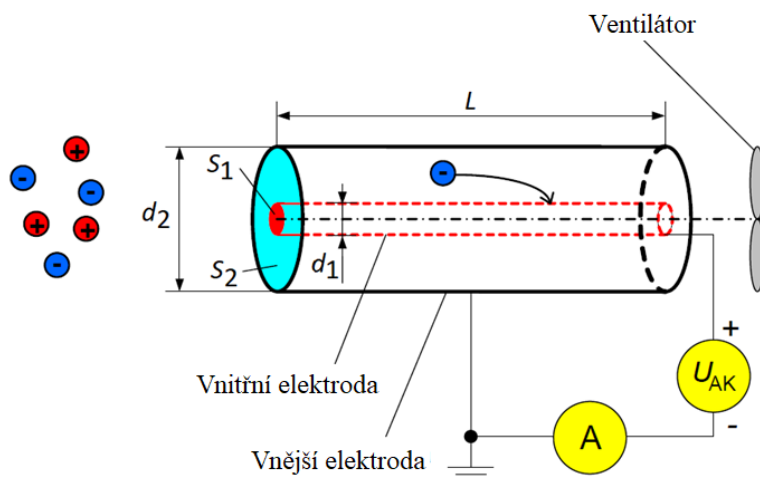
Měření koncentrace vzdušných iontů se provádí hned z několika důvodů. Prvním a nejdůležitějším důvodem je zjišťování kvality ovzduší. Dalším důvodem je například zkoumání elektrických dějů v atmosféře. Měření se provádí pomocí aspiračního kondenzátoru, kdy jsou ionty vtaženy pomocí ventilátoru do prostoru uvnitř aspiračního kondenzátoru a elektrickým polem jsou vychýleny na sběrnou elektrodu, na které generují velmi malý proud v řádu jednotek pikoampérů až několik desítek femtoampérů [1]. Při měření takto malých proudů existuje spousta omezení, na které je potřeba brát ohled. Jedná se například o svodové proudy, proto je důležitá volba správného izolačního materiálu [2]. Chybu způsobují i šумы vznikající v obvodu měřicího přístroje na pasivních i aktivních součástkách. Jedná se zejména o bílý Johnsonův tepelný šum a blikavý šum s kmitočtovou závislostí $1/f$.

Hlavním cílem je návrh přesného nízkourovňového zesilovače s dobrou časovou a teplotní stabilitou. Pro navržený nízkourovňový zesilovač by měla být změřena jeho převodní charakteristika, šum a další důležité parametry pomocí přesného femtoampérového zdroje proudu. Dále by mělo být pomocí navrženého zesilovače provedeno měření koncentrace vzdušných iontů měřicí metodou s aspiračním kondenzátorem [3] v podmínkách speleoterapeutických jeskyní [2].

2 ROZBOR A REALIZACE

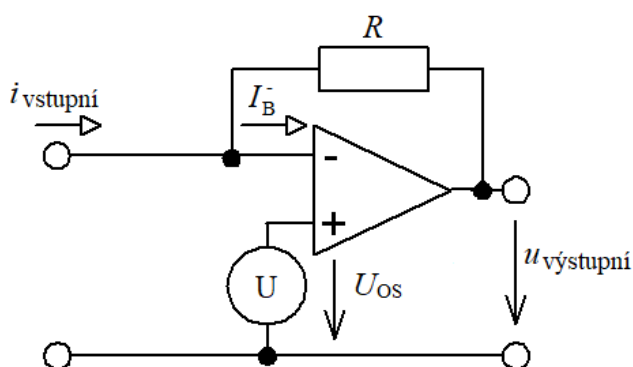
Nízkourovňový zesilovač se připojuje do série se zdrojem polarizačního napětí mezi dvě elektrody aspiračního kondenzátoru podle obrázku 1. Od sběrné elektrody je vyvedena teflonová průchodka skrz druhou elektrodu aspiračního kondenzátoru. Jako zdroj polarizačního napětí se použije kondenzátor nabíjený z odděleného zdroje. Nejjednodušším konstrukčním řešením je umístit polarizační kondenzátor na společnou desku plošných spojů se zesilovačem. Pro oddělení nabíjení kondenzátoru a měření koncentrace vzdušných iontů budou použity jazýčkové relé. Protože jsou připojeny na nízkourovňový vstup, je potřeba brát na jejich návrh zvláštní ohled. Jazýčkové relé budou od spínací cívky odděleny teflonovým obalem. Relé, které bude aktivní během měření bude navíc kromě teflonového obalu stíněno aktivně. Mezi spínací cívkou a teflonovým obalem bude měděná páska připojená na stejný potenciál jako stíněné relé. Kromě relé je také potřeba zamezit svodovým proudům na spojích. Všechny součástky na vstupu budou umístěny na teflonových

opěrných bodech a spoje budou vzdušné. Okolo teflonových opěrných bodů budou na desce plošných spojů prstence, které budou také připojeny na aktivní stínění.



Obrázek 1: Princip a zapojení aspiračního kondenzátoru [1]

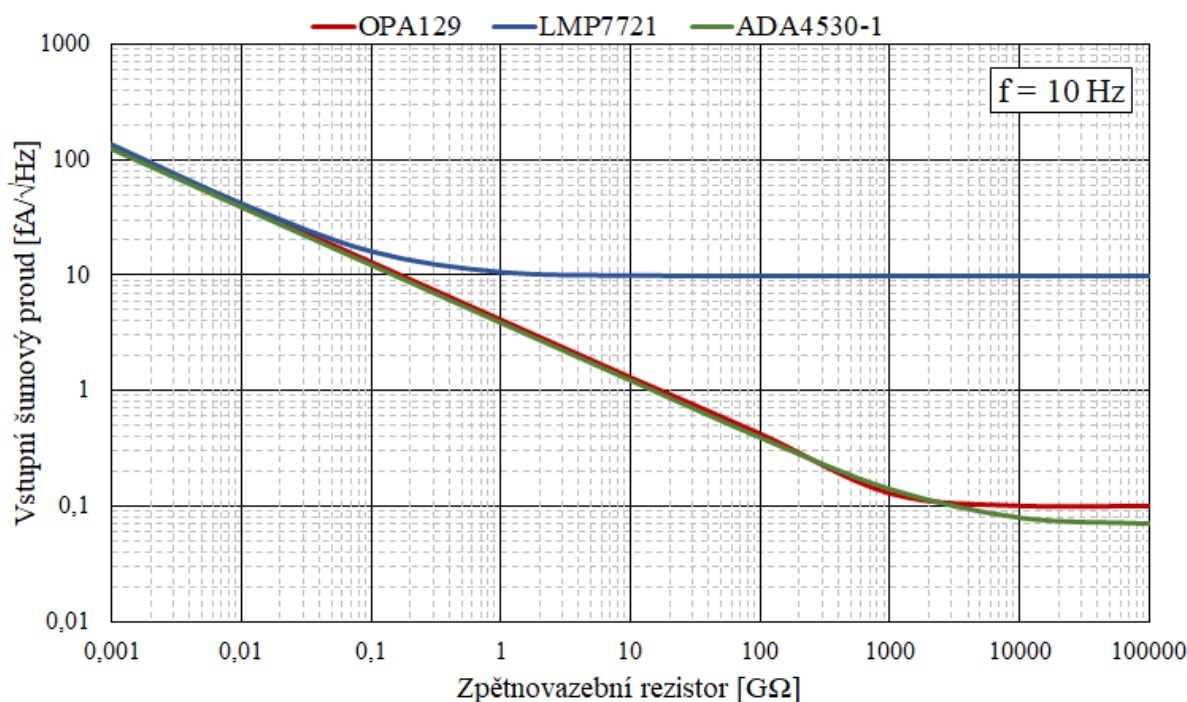
Největší důraz je kladen na výběr přesného operačního zesilovače. Pro nízkourovňová měření obvykle vyžadujeme operační zesilovače s velkým zesílením (typicky 10^6), malou vstupní proudovou a napětovou nesymetrii a s malým teplotním a napájecím driftem, velmi malým vstupním klidovým a šumovým proudem a s velkým vstupním odporem [4]. Takovéto operační zesilovače jsou označovány jako elektrometrické, protože se používají v elektrometrech, tedy přístrojích určených k nízkourovňovému měření. Z dostupných elektrometrických zesilovačů byl vybrán ADA4530-1 [5] od společnosti Analog Devices. Typická hodnota vstupního klidového proudu je menší než 1 fA a typická hodnota vstupního šumového proudu na kmitočtu 0,1 Hz je 0,07 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Tento operační zesilovač tedy neprodukuje nízkofrekvenční blikavý šum s kmitočtovou závislostí $1/f$. Vstupní napětová a proudová nesymetrie bude kompenzována externě. Další jeho velkou výhodou je integrovaný stínící buffer, kterým je možné aktivně stínit vstup. Právě na výstupní pin tohoto bufferu se připojí aktivní stínění relé a teflonových opěrných bodů.



Obrázek 2: Obvodové zapojení převodníku proudu na napětí [4]

Z dostupných možných zapojení operačního zesilovače bylo vybráno zapojení převodníku proudu na napětí zakreslené na obrázku 2. Toto zapojení je vlastnostmi blízko ideálnímu ampérmetru. Jeho citlivost je určena především zpětnovazebním rezistorem, na kterém se vytváří Johnsonův tepelný šum a blikavý šum $1/f$. Při návrhu je tedy důležitá volba přesného vysokoohmového rezistoru. Zde nastává problém s dostupností přesných stabilních vysokoohmových rezistorů, které produkují málo šumu. Většina vysokoohmových rezistorů se totiž vyrábí tlustovrstvou technologií. Rezistory vyrobené tlustovrstvou technologií generují blikavý šum s úrovní výrazně vyšší než rezistory

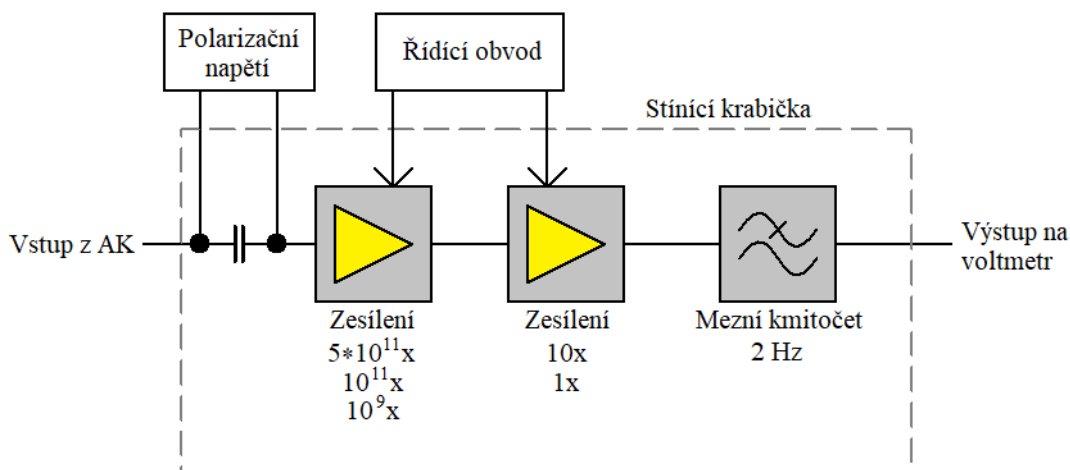
vyrobené tenkovrstvou technologií. Důvodem vzniku tohoto šumu jsou poruchy v krystalové mřížce. Na trhu jsou ovšem dostupné také vysokohmové rezistory na bázi oxidu kovu od společnosti Ohmite [6]. Jejich cena výrazně převyšuje cenu rezistorů vyrobených tlustovrstvou technologií, ale úroveň generovaného blikavého šumu je velmi nízká. V současné době se na světovém trhu dají sehnat hodnoty od 1 M Ω do 500 G Ω . V zesilovači budou použity hodnoty 1 G Ω , 100 G Ω a 500 G Ω . Při takto vysokých hodnotách zpětnovazebního rezistoru bude úroveň vstupního šumového proudu velmi malá. Efektivní hodnota vstupního šumového proudu je totiž nepřímo úměrná velikosti zpětnovazebního rezistoru. Teoretickým výpočtem lze zjistit velikosti efektivních hodnot vstupního šumového proudu 3,9 fA pro 1 G Ω , 0,39 fA pro 100 G Ω a 0,14 fA pro 500 G Ω . Výpočty vycházejí ze simulace v programu PSpice, Tina a LTSpice a pro porovnání uvažovaných operačních zesilovačů jsou zobrazeny na obrázku 3. V reálném řešení lze očekávat vyšší hodnoty vlivem různých svodových proudů, proto budou rezistory také umístěny na teflonových opěrných bodech, na přepínání rozsahů se použijí relé s aktivním stíněním a veškeré spoje budou vzdušné.



Obrázek 3: Závislost vstupního šumového proudu na zpětnovazebním rezistoru

Za elektrometrickým operačním zesilovačem bude druhý zesilovací stupeň pro dodatečné zesílení. Zesilovat bude 1x nebo 10x, aby se v kombinaci s prvním stupněm dosáhlo všech rozsahů. U tohoto stupně už nebudou teflonové opěrné body, spoje nebudou vzdušné a rezistory budou běžně dostupné vývodové. Při volbě operačního zesilovače už není důležitým parametrem vstupní klidový proud a vstupní šumový proud, ale vstupní šumové napětí. Byl vybrán OPA211 [7] od společnosti Texas Instruments. Tento operační zesilovač má spektrální hustotu vstupního šumového napětí 2 nV/√Hz na kmitočtu 10 Hz a 1,1 nV/√Hz na kmitočtu 1 kHz. Posledním blokem v zesilovači je filtr typu dolní propust čtvrtého řádu s Butterworthovou aproximací a mezním kmitočtem 2 Hz. Filtr je složen ze dvou stupňů topologií Sallen-Key. Použitým operačním zesilovačem v obou stupních je OP27 od společnosti Analog Devices.

Celý nízkourovňový zesilovač musí být uzavřen ve stínící krabici kvůli odstínění vnějších rušivých signálů. Kvůli výšce některých součástí se krabice připájí na horní stranu desky plošných spojů a všechny součástky budou také připájeny pouze na horní stranu. Na spodní straně desky bude rozlita souvislá vrstva mědi, která nahradí spodní víko stínící krabice a bude s ní spojena prokovy.



Obrázek 4: Blokové schéma nízkourovňového zesilovače

3 ZÁVĚR

Tento článek byl zaměřen na návrh nízkourovňového zesilovače pro měření vzdušných iontů. Při návrhu byl kladen důraz na výběr přesného elektrometrického operačního zesilovače a kvalitních nízkoušumových rezistorů. Konstrukční řešení zesilovače vychází z konstrukčních řešení elektrometrů. Využívá například aktivního stínění jazýčkových relé a teflonových opěrných bodů.

V současné době probíhá výroba desky plošných spojů nízkourovňového zesilovače. Je připraven také přesný vysokoohmový drátový rezistor, který bude sloužit jako zdroj nízkých proudů k proměření převodní charakteristiky, šumu a dalších důležitých parametrů zesilovače. Aspirační kondenzátor pro měření vzdušných iontů je také k dispozici včetně řídicí desky a desky pro nabíjení polarizačního kondenzátoru.

REFERENCE

- [1] Roubal, Z. Nízkourovňová měření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 95 s. Vedoucí disertační práce: doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.
- [2] Roubal, Z.; Bartušek, K.; Szabó, Z.; Drexler, P.; Überhuberová, J. Measuring Light Air Ions in a Speleotherapeutic Cave. *Measurement Science Review*, 2017, vol. 17, no. 1, p. 27-36. ISSN: 1335-8871.
- [3] Steinbauer, M.; Fiala, P.; Bartušek, K.; Szabó, Z. Experiments with Accuracy of Air Ion Field Measurement. In *PIERS 2008 Hangzhou*. Cambridge: The Electromagnetic academy, 2008. p. 1001-1005. ISBN: 978-1-934142-00-4.
- [4] Dostál, J. Operační zesilovače. Praha: BEN-technická literatura, 2005. 536 s. ISBN 80-7300-049-0.
- [5] Analog Devices. ADA4530-1: Femtoampere Input Bias Current Electrometer Amplifier [online]. 2015, [cit. 2020-2-2]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4530-1.pdf>.
- [6] Ohmite. RX-1M Hi-Meg [online]. 2015, [cit. 2020-2-2]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/303/res_rx1m-1317429.pdf.
- [7] Texas Instruments. OPAx211: 1.1-nv/ $\sqrt{\text{Hz}}$ Noise, Low Power, Precision Operational Amplifiers [online]. 2006, [cit. 2020-2-2]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa211.pdf>.