



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH A OPTIMALIZACE SPECIÁLNÍHO NÍZKOUROVNĚHOVÉHO ZESILOVAČE PRO MĚŘENÍ VZDUŠNÝCH IONTŮ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Zdražil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Roubal, Ph.D.

BRNO 2020

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Lukáš Zdražil

ID: 186600

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a optimalizace speciálního nízkoúrovňového zesilovače pro měření vzdušných iontů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s měřením velmi malých proudů v řádu jednotek pikoampérů až několik desítek femtoampérů. Měření takto malých proudů je nutné pro měření koncentrace záporných vzdušných iontů. Jejich vliv na lidský organismus byl zkoumán mnoha studiemi a měřicí aparatura aspiračního kondenzátoru je na našem pracovišti k dispozici. Cílem práce je ji vylepšit návrhem vstupního elektrometrického zesilovače s nižším šumem a lepší stabilitou nuly. Prostudujte varianty zapojení elektrometrických zesilovačů a vyberte několik nejvýhodnějších. Tato zapojení simulujte v prostředí Pspice a Matlab. Při optimalizaci elektrometrického zesilovače upravte modely použitých prvků, aby správně uvažovaly šum $1/f$. Je důležité se zaměřit i na pasivní prvky.

Pro navržené měřicí principy navrhnete nejlepší elektrometrický zesilovač. Uvažujte vliv zesilovače na chybu při měření koncentrace vzdušných iontů. Změřte jeho převodní charakteristiku, šum a další důležité parametry. Vyčíslete nejistoty měření u navržené varianty elektrometrického zesilovače. Zhodnoťte změřené hodnoty. Porovnejte Vámi získané výsledky s běžnými standardy v literatuře a dostupnými řešeními.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Low Level Measurement Handbook [online] - [cit. 15.5. 2019]. Dostupné na WWW: <http://www.keithley.com>.
- [2] BARTUSEK, K. Měření spektrálních charakteristik iontových polí [online]. Elektrevue, 2001 - [cit. 10.5. 2011], Dostupné na WWW: <http://www.elektrevue.cz/clanky/01038/index.html>.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 6.8.2020

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Roubal, Ph.D.

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá měřením velmi malých proudů v řádu jednotek pikoampérů až několik desítek femtoampérů. Měření takto malých proudů je nezbytné při určování koncentrace vzdušných iontů. Je potřeba brát ohled na rušivé vlivy, které jsou při běžném měření zanedbatelné. Jedná se například o svodové proudy a šumy vznikající v obvodu měřicího přístroje. Důležitá je volba přesného operačního zesilovače s nízkým vstupním klidovým proudem a správný výběr nízkošumových pasivních součástek. Cílem práce je návrh a realizace přesného nízkourovňového zesilovače pro účely měření koncentrace vzdušných iontů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nízkourovňová měření, operační zesilovače, šum, elektrometry, svodové proudy, izolanty, vzdušné ionty, aspirační kondenzátor.

ABSTRACT

This Master thesis deals with low-current measurement in order of picoamps up to a few tens 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. The aim of the thesis is to design and implement a precise low-level amplifier for the purposes of air ions concentration measurements.

KEYWORDS

Low level measurements, operational amplifiers, noise, electrometers, leakage currents, insulators, air ions, aspiration condenser.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZDRAŽIL, Lukáš. *Návrh a optimalizace speciálního nízkoúrovňového zesilovače pro měření vzdušných iontů*. Brno, 2020. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126121>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Zdeněk Roubal.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Návrh a optimalizace speciálního nízkourovňového zesilovače pro měření vzdušných iontů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

Bc. Lukáš Zdražil

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Roubalovi Ph.D. za účinnou pedagogickou a odbornou pomoc a také za cenné rady, které mi poskytl při zpracování mé diplomové práce.

OBSAH

Seznam zkratk a symbolů.....	viii
Seznam obrázků.....	x
Seznam tabulek.....	xiii
Úvod	1
1 Měření koncentrace vzdušných iontů.....	2
1.1 Vznik vzdušných iontů.....	2
1.2 Koncentrace vzdušných iontů	4
1.3 Měřicí metoda s aspiračním kondenzátorem.....	4
2 Měření zdrojů s velkým vnitřním odporem.....	9
2.1 Svodové proudy a aktivní stínění	9
2.2 Izolanty.....	11
2.3 Generované chybové proudy.....	13
2.4 Šumy	15
3 Přístroje k měření zdrojů s velkým vnitřním odporem.....	18
3.1 Elektrometr.....	18
3.2 Pikoampérmetr	20
3.3 Coulombmetr.....	21
3.4 Specifikace měřících přístrojů.....	21
4 Operační zesilovače	22
4.1 Výběr elektrometrického operačního zesilovače	24
4.2 Přístrojové zesilovače.....	27
5 Metody měření šumu rezistorů a operačních zesilovačů.....	28
6 Elektrometrické zesilovače velmi malých proudů.....	32
6.1 Elektrometrický zesilovač s bočníkovým ampérmetrem	32
6.2 Elektrometrický zesilovač se zpětnovazebním ampérmetrem	33
6.3 Elektrometrický zesilovač se zpětnovazebním coulombmetrem	35
6.4 Schéma aspiračního kondenzátoru s elektrometrickým zesilovačem	36
7 Počítačové simulace.....	37
7.1 Vstupní šumový proud zpětnovazebního ampérmetru.....	37

7.2	Vstupní šumový proud zpětnovazebního coulombmetru.....	41
8	Konstrukční provedení zesilovače	43
9	Naměřené hodnoty a průběhy	49
9.1	Vstupní šumové napětí operačního zesilovače LMP7721	49
9.2	Vstupní šumový a klidový proud operačního zesilovače LMC6001A	51
9.3	Termoelektrické napětí a svodový proud jazýčkových relé.....	53
9.4	Přesnost hodnoty odporu a šum vysokoohmových rezistorů	57
9.5	Převodní charakteristika a vstupní šumový proud zesilovače.....	61
9.6	Stanovení nejistot měření	69
10	Závěr.....	71
	Literatura	73
	Seznam příloh.....	77

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky:

AD	Analog Devices
AK	aspirační kondenzátor
DMM	digitální multimetr
OZ	operační zesilovač
TI	Texas Instruments
UTEE	ústav teoretické a experimentální elektrotechniky
^{40}K	draslík
^{222}Rn	radon
^{238}Th	thorium
^{238}U	uran

Symboly:

A_u	napětíové zesílení operačního zesilovače	[-]
B	šířka pásma užitečného signálu	[Hz]
B_N	šumová šířka pásma	[Hz]
C_{AK}	kapacita válcového AK	[F]
C_E	kapacita přívodů k elektrometrickému zesilovači	[F]
C_U	kapacita zdroje polarizačního napětí	[F]
d	průměr iontů	[m]
E	intenzita elektrického pole	[V·m ⁻¹]
f	kmitočet	[Hz]
I	ionizační energie	[eV]
I_B	vstupní klidový proud operačního zesilovače	[A]
I_{iont}	proud AK úměrný koncentraci iontů	[A]
I_N	vstupní šumový proud operačního zesilovače	[A]
I_{NS}	spektrální hustota vstupního šumového proudu	[A/√Hz]
I_{N_T}	šumový proud způsobený tepelným šumem	[A]
I_{OS}	vstupní proudová nesymetrie operačního zesilovače	[A]
I_R	vstupní rušivý proud operačního zesilovače	[A]
k	pohyblivost iontů	[m ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹]
k_B	Boltzmannova konstanta ($k_B = 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)	[J·K ⁻¹]

k_m	mezní pohyblivost iontů	$[m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}]$
l	délka elektrod AK	$[m]$
M	objemový průtok vzduchu	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
n^+	koncentrace kladných iontů	$[iontů \cdot m^{-3}]$
n^-	koncentrace záporných iontů	$[iontů \cdot m^{-3}]$
P	koeficient unipolarity	$[-]$
q	elementární náboj ($q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)	$[C]$
R_{AK}	svodový odpor AK	$[\Omega]$
R_B	odpor bočníku	$[\Omega]$
R_E	odpor přívodů k elektrometrickému zesilovači	$[\Omega]$
R_I	vstupní odpor elektrometrického zesilovače	$[\Omega]$
R_P	odpor teflonové průchodky AK	$[\Omega]$
R_{REL}	svodový odpor nabíjecích relé	$[\Omega]$
R_U	vnitřní odpor zdroje polarizačního napětí	$[\Omega]$
r_1	poloměr vnitřní elektrody AK	$[m]$
r_2	poloměr vnější elektrody AK	$[m]$
T	absolutní teplota	$[K]$
$T_{nabíjení}$	doba nabíjení kondenzátoru	$[s]$
u_b	vložené napětí	$[V]$
U_{AK}	polarizační napětí AK	$[V]$
U_N	vstupní šumové napětí operačního zesilovače	$[V]$
U_{NS}	spektrální hustota vstupního šumového napětí	$[V/\sqrt{Hz}]$
U_{N_T}	šumové napětí způsobené tepelným šumem	$[V]$
U_{OS}	vstupní napěťová nesymetrie operačního zesilovače	$[V]$
U_R	vstupní rušivé napětí operačního zesilovače	$[V]$
v	průměrná rychlost proudění vzduchu v AK	$[m \cdot s^{-1}]$
ϵ_0	permitivita vakua ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot m^{-1}$)	$[F \cdot m^{-1}]$
ϵ_r	relativní permitivita	$[-]$

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1	Proces vzniku iontů [8]	3
Obrázek 1.2	Schéma aspiračního kondenzátoru [5]	5
Obrázek 1.3	Zapojení aktivního stínění u druhé varianty AK [5]	6
Obrázek 1.4	Některé AK dostupné na UTEE [14]	8
Obrázek 2.1	Teoretické limity při měření napětí [15]	9
Obrázek 2.2	Svodový proud v koaxiálním vedení [15]	10
Obrázek 2.3	Připojení koaxiálního vedení na aktivní stínění [15]	10
Obrázek 2.4	Připojení AK na aktivní stínění a) a náhradní schéma b) [15]	11
Obrázek 2.5	Příčiny chybových proudů a jejich typická velikost [15]	13
Obrázek 2.6	Triboelektrický jev v koaxiálním kabelu [15]	14
Obrázek 2.7	Piezoelektrický jev [15]	14
Obrázek 2.8	Elektrochemický jev na desce plošných spojů [15]	15
Obrázek 2.9	Závislost tepelného šumového napětí a proudu na šířce pásma a velikosti rezistoru [15]	16
Obrázek 2.10	Určení šumové šířky pásma [17]	17
Obrázek 2.11	Spektrální hustota napětí blikavého šumu pro různé velikosti úbytku napětí na rezistoru [19]	17
Obrázek 3.1	Blokové schéma typického digitálního elektrometru [15]	18
Obrázek 3.2	Blokové schéma analogové části elektrometru Keithley 6517A [23]	19
Obrázek 3.3	Zadní panel elektrometru Keithley 6517A [21]	20
Obrázek 3.4	Obvodové zapojení typického pikoampérmetru [15]	20
Obrázek 4.1	Lineární model operačního zesilovače [25]	23
Obrázek 4.2	Spektrální hustota vstupního šumového napětí elektrometrických OZ ..	24
Obrázek 4.3	Rozvržení vývodů operačního zesilovače ADA4530-1 [28]	25
Obrázek 4.4	Stínění vstupů operačního zesilovače LMP7721 [29]	26
Obrázek 4.5	Doporučené rozvržení desky plošných spojů v okolí operačního zesilovače OPA129 [30]	26
Obrázek 4.6	Přístrojový zesilovač se třemi operačními zesilovači [33]	27
Obrázek 5.1	Uspořádání měřicího systému s Wheatstoneovým můstkem pro měření blikavého šumu rezistorů [19]	28
Obrázek 5.2	Obvodové zapojení k měření blikavého šumu rezistorů se dvěma stejnými rezistory [36]	29
Obrázek 5.3	Blokový diagram k měření šumu pomocí korelace dvou kanálů spektrálního analyzátoru [37]	30

Obrázek 5.4	Obvodové zapojení k měření blikavého šumu rezistorů se dvěma rezistory a dvěma kanály spektrálního analyzátoru	30
Obrázek 5.5	Uspořádání měřicího systému pro měření vstupního šumového napětí a proudu operačních zesilovačů [38]	31
Obrázek 6.1	Obvodové zapojení bočníkového ampérmetru [15].....	32
Obrázek 6.2	Obvodové zapojení zpětnovazebního ampérmetru [15]	33
Obrázek 6.3	Obvodové zapojení zpětnovazebního ampérmetru s T-článkem [15]	34
Obrázek 6.4	Obvodové zapojení zpětnovazebního coulombmetru [15]	35
Obrázek 6.5	Náhradní schéma aspiračního kondenzátoru s elektrometrickým zesilovačem [5]	36
Obrázek 7.1	Podíl U_n a I_n použitého operačního zesilovače na vstupním šumovém proudu zpětnovazebního ampérmetru.....	37
Obrázek 7.2	Zapojení zpětnovazebního ampérmetru s operačním zesilovačem ADA4530-1 v programu LTspice.....	38
Obrázek 7.3	Spektrální hustota vstupního šumového proudu zpětnovazebního ampérmetru s operačním zesilovačem ADA4530-1	39
Obrázek 7.4	Zapojení zpětnovazebního ampérmetru s operačním zesilovačem LMP7721 v programu Tina-TI	39
Obrázek 7.5	Spektrální hustota vstupního šumového proudu zpětnovazebního ampérmetru s operačním zesilovačem LMP7721	40
Obrázek 7.6	Závislost vstupního šumového proudu zpětnovazebního ampérmetru na velikosti zpětnovazebního rezistoru.....	41
Obrázek 7.7	Spektrální hustota vstupního šumového proudu zpětnovazebního coulombmetru s operačním zesilovačem ADA4530-1	42
Obrázek 7.8	Spektrální hustota vstupního šumového proudu zpětnovazebního coulombmetru s operačním zesilovačem LMP7721	42
Obrázek 8.1	Uspořádání vstupní části zesilovače elektrometru Keithley 617 [41]	43
Obrázek 8.2	Uspořádání vstupní části zesilovače elektrometru Keithley 6517 [42] ..	44
Obrázek 8.3	Frézování desky plošných spojů v kritických částech vstupního zesilovače elektrometru Keithley 6517 [43].....	44
Obrázek 8.4	Postup výroby aktivně stíněných relé navržených na UTEE.....	45
Obrázek 8.5	Teflonové opěrné body	46
Obrázek 8.6	Citlivostní analýza přenosu napětí navrženého filtru	48
Obrázek 8.7	Blokové schéma nízkoúrovňového zesilovače	48
Obrázek 9.1	Zapojení pracoviště pro měření vstupního šumového napětí operačního zesilovače LMP7721.....	49
Obrázek 9.2	Změřená spektrální hustota vstupního šumového napětí operačního zesilovače LMP7721	51

Obrázek 9.3	Zapojení pracoviště pro měření vstupního šumového a klidového proudu operačního zesilovače LMC6001A	52
Obrázek 9.4	Časová závislost výstupního napětí a napět'ové nesymetrie operačního zesilovače LMC6001A	53
Obrázek 9.5	Časová závislost termoelektrického napětí jazýčkových relé.....	54
Obrázek 9.6	Zapojení měřicího pracoviště s elektrometrem.....	55
Obrázek 9.7	Časová závislost svodových proudů prvního relé.....	55
Obrázek 9.8	Časová závislost svodových proudů druhého relé	56
Obrázek 9.9	Časová závislost svodových proudů třetího relé.....	57
Obrázek 9.10	Závislost odporu rezistoru o velikosti 1 G Ω na bázi oxidu kovu na úbytku napětí.....	58
Obrázek 9.11	Závislost odporu rezistoru o velikosti 1 G Ω , vyrobeném tlustovrstvou technologií, na úbytku napětí.....	58
Obrázek 9.12	Závislost odporu rezistoru o velikosti 100 G Ω na bázi oxidu kovu na úbytku napětí.....	59
Obrázek 9.13	Zapojení měřicího pracoviště pro měření šumu rezistorů	60
Obrázek 9.14	Změřená spektrální hustota šumu rezistorů	61
Obrázek 9.15	Nízkoúrovňový zesilovač ve stínící krabici	62
Obrázek 9.16	Zapojení měřicího uspořádání s nízkoúrovňovým zesilovačem.....	62
Obrázek 9.17	Zapojení měřicího pracoviště pro měření zesilovače	63
Obrázek 9.18	Převodní charakteristika zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 1 G Ω a zesílení druhého stupně 0,909x	64
Obrázek 9.19	Převodní charakteristika zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 1 G Ω a zesílení druhého stupně 10x	65
Obrázek 9.20	Převodní charakteristika zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 100 G Ω a zesílení druhého stupně 0,909x	65
Obrázek 9.21	Převodní charakteristika zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 100 G Ω a zesílení druhého stupně 10x	66
Obrázek 9.22	Přepočtený vstupní proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 1 G Ω a zesílení druhého stupně 0,909x	67
Obrázek 9.23	Přepočtený vstupní proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 1 G Ω a zesílení druhého stupně 10x	67
Obrázek 9.24	Přepočtený vstupní proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 100 G Ω a zesílení druhého stupně 0,909x	68
Obrázek 9.25	Přepočtený vstupní proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 100 G Ω a zesílení druhého stupně 10x	68

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Rozdělení vzdušných iontů podle doktora U. Hörraka [5], [6]	2
Tabulka 2	Používané varianty zapojení aspiračního kondenzátoru pro měření záporných iontů [5]	6
Tabulka 3	Izolační materiály, jejich rezistivita a vlastnosti [15]	12
Tabulka 4	Seznam elektrometrických operačních zesilovačů a jejich typické parametry	24
Tabulka 5	Maximální hodnoty relativní odchylky z rozsahu a chyby linearity pro všechny čtyři rozsahy nízkoúrovňového zesilovače	64
Tabulka 6	Statistické parametry vstupních šumových proudů pro všechny rozsahy zesilovače	69
Tabulka 7	Nejistoty měření pro všechny rozsahy zesilovače	70

ÚVOD

Pro měření koncentrace vzdušných iontů existuje několik důvodů. Jedním z nich je například zjišťování kvality ovzduší. Bylo prokázáno, že ionty v ovzduší mají vliv na lidský organismus. Tento vliv může být nejen pozitivní, ale i negativní. To záleží na složení iontů a na jejich koncentraci. Na základě tohoto zjištění byly vypracovány některé léčebné terapie využívající ionty. Jiným důvodem pro určování koncentrace vzdušných iontů je skutečnost, že ionty mají vliv na šíření elektromagnetických vln v atmosféře i na průběh všech elektrických dějů v ovzduší.

Pro měření vzdušných iontů existuje několik metod. V této práci je pozornost věnována převážně metodě s aspiračním kondenzátorem, kdy jsou ionty vtaženy do prostoru uvnitř aspiračního kondenzátoru a elektrickým polem jsou vychýleny na sběrnou elektrodu, kde generují velmi malý proud v řádu jednotek pikoampérů až několik desítek femtoampérů.

Při měření takto malých proudů existuje spousta omezení, na které je potřeba brát ohled. Jedná se například o svodové proudy po povrchu desek plošných spojů a po povrchu součástek. Důležitá je i správná volba izolačního materiálu. Parazitní vodivost izolantu a proudy vznikající v izolantu piezoelektrickým nebo triboelektrickým jevem mohou způsobit chybu. 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 této práce je návrh přesného nízkoúrovňového zesilovače. K navržení zesilovače je zapotřebí prostudovat lineární šumový model operačního zesilovače. Prostudovat různá zapojení operačního zesilovače, která jsou vhodná k měření velmi malých proudů a z dostupných operačních zesilovačů vybrat ten nejvhodnější. Důležitý je také výběr kvalitních nízkošumových pasivních součástek. Měřením by měly být ověřeny vlastnosti vybraného operačního zesilovače a vybraných pasivních součástek. Měly by také být ověřeny vlastnosti navrženého nízkoúrovňového zesilovače změřením jeho převodní charakteristiky a šumu.

1 MĚŘENÍ KONCENTRACE VZDUŠNÝCH IONTŮ

Koncentrace vzdušných iontů se monitoruje zejména pro zjištění míry znečištění ovzduší a při zkoumání elektrických dějů v atmosféře. Podle míry koncentrace vzdušných iontů lze předpovědět hrozící vznik zemětřesení nebo různých anomálií počasí [1]. Dále lze měření koncentrace vzdušných iontů využít při léčebné terapii. V literatuře [2] a [3] je potvrzeno, že vyšší koncentrace určitého typu vzdušných iontů má pozitivní vliv na lidský organismus.

Ionty rozlišujeme na kladné (kationty) a záporné (anionty) podle jejich elektrické polarity. Poměr koncentrace kladných a záporných iontů vyjadřuje koeficient unipolarity:

$$P = \frac{n^+}{n^-} \quad [-; \text{iontů} \cdot \text{m}^{-3}, \text{iontů} \cdot \text{m}^{-3}], \quad (1.1)$$

kde n^+ značí koncentraci kladných iontů a n^- značí koncentraci záporných iontů. Podle [4] se velikost koeficientu unipolarity pohybuje v rozmezí 1,15 až 1,25 v neznečištěných prostředích a 4 až 6 ve znečištěných prostředích.

V literatuře [5] a [6] je také uvedeno dělení iontů podle jejich velikosti (průměru d) a pohyblivosti k podle doktora U. Hörraka, které je znázorněno v tabulce 1.

Tabulka 1 Rozdělení vzdušných iontů podle doktora U. Hörraka [5], [6]

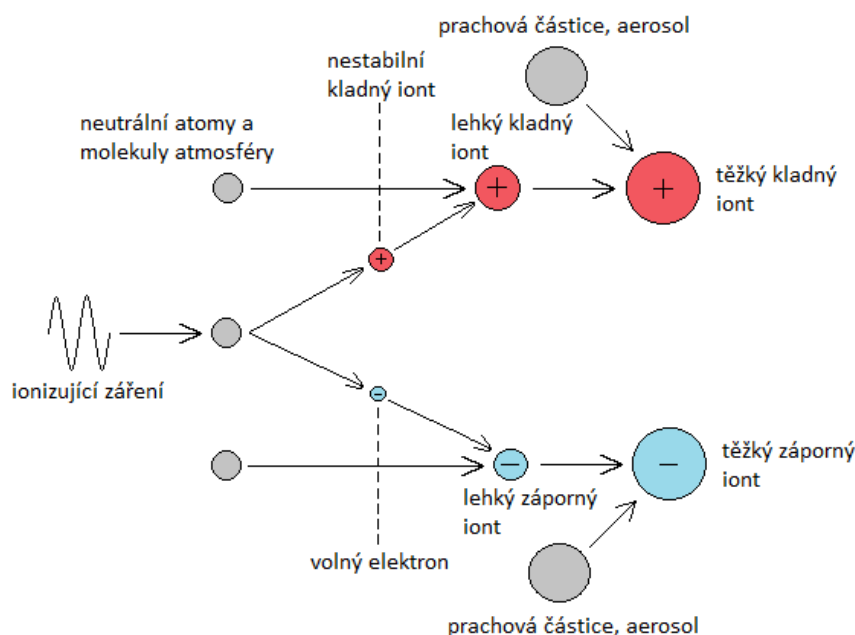
Druh iontů	$k [\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	$d [\text{nm}]$
Těžké velké ionty	$0,0042 > k \geq 0,00041$	$22,0 < d \leq 79,0$
Lehké velké ionty	$0,074 > k \geq 0,0042$	$4,80 < d \leq 22,0$
Střední ionty	$0,500 > k \geq 0,074$	$1,60 < d \leq 4,80$
Velká seskupení iontů	$1,280 > k \geq 0,500$	$0,85 < d \leq 1,60$
Lehké ionty	$3,200 > k \geq 1,280$	$0,36 < d \leq 0,85$

1.1 Vznik vzdušných iontů

Vzdušné ionty vznikají ionizací plynů v atmosféře. Ionizace je proces, při kterém vznikají dvojice kladně a záporně nabitých částic, takzvané iontové páry. Aby proces ionizace vznikl, je potřeba dodat neutrálnímu atomu nebo molekule plynu určitou energii, tato energie je nejčastěji dodávána formou ionizujícího záření. Ionizace plynů je v atmosféře způsobena převážně kosmickým zářením, radioaktivitou zemských hornin (radionuklidy) a radioaktivitou ovzduší (radon) [5]. Ionizace plynů může také částečně vznikat tříštícími se kapičkami vody v mracích nebo u vodopádů [7].

Ionizující záření předává svou energii okolním molekulám, dokud není veškerá energie spotřebována. Záření alfa má dosah pouze v řádu centimetrů, ale jeho ionizační účinky jsou velké. Dosah záření beta je několik metrů a dosah záření gama může být až stovky metrů, nedosahuje ovšem tak velkých ionizačních účinků jako předchozí dvě záření [4].

Kladný iont vzniká tak, že se z obalu neutrálního atomu nebo molekuly odtrhne záporný elektron a zůstane tak kladný zbytek atomu nebo molekuly ochuzený o záporný elektron. Záporný iont vzniká srážkou neutrálního atomu nebo molekuly se záporným elektronem a pohlcením tohoto elektronu do jejich obalu. Takto vzniklé částice se poté mohou spojovat s jinými atomy nebo molekulami (prachové částice nebo aerosoly) a růst (zvětšování průměru), což vede ke snížení jejich pohyblivosti. Ionty také mohou zaniknout rekombinací. Proces vzniku iontů je znázorněn na obrázku 1.1, který je převzat z literatury [8].



Obrázek 1.1 Proces vzniku iontů [8]

Životnost lehkých iontů je pouze několik vteřin. Životnost těžkých iontů může být v řádu několika minut až hodin [4].

Minimální hodnota energie, které je potřeba neutrální částici plynu dodat, aby vznikl proces ionizace se nazývá ionizační energie a značí se I [eV] [8]. Její hodnota je pro atomy různých prvků různá. Když budeme uvažovat pouze klasickou fyziku, tak hodnota ionizační energie závisí na kladném náboji atomového jádra a na nábojích takzvaných vnitřních elektronů, které částečně snižují účinek atomového jádra na uvažovaný elektron. Plyny lze ionizovat například zahřátím na vysokou teplotu, účinkem krátkovlnného elektromagnetického záření, elektrickými výboji a řadou dalších způsobů. Například vzduch je účinkem ultrafialového záření, kosmického záření, záření radioaktivních prvků přítomných v zemské kůře, případně i lidskou činností, vždy částečně ionizován. Ionizací uvolněné elektrony mohou náhodnými srážkami s neutrálními částicemi (atomy, molekuly) vytvářet záporné ionty (anionty). Nejsou ovšem vyloučeny ani srážky volných elektronů s kladnými ionty (kationty) a tím vytváření opět neutrálních částic. Tento proces byl nazván rekombinací. Aby došlo k ionizaci vzduchu, který odpovídá průměrnému chemickému složení zemské atmosféry, je potřeba dodat částicím ionizační energii o střední hodnotě 34,98 eV (část molekul se ionizuje a část excituje) [5], [9].

1.2 Koncentrace vzdušných iontů

Koncentrace vzdušných iontů je majoritně ovlivňována geografickou polohou, protože zdroje ionizujícího záření nejsou na Zemi rozloženy rovnoměrně. V litosféře je ionizující záření generováno především díky radioaktivním horninám, v nichž se vyskytují radioaktivní prvky, například ^{238}U (uran), ^{238}Th (thorium) a ^{40}K (draslík). Z těchto hornin se puklinami uvolňuje do atmosféry radioaktivní plyn ^{222}Rn (radon), který je zdrojem ionizujícího záření alfa [5], [10]. Nad velkými vodními plochami je koncentrace vzdušných iontů výrazně nižší, protože radioaktivní horniny zde téměř nepřispívají ke generaci ionizujícího záření [8].

Ve vyšších vrstvách atmosféry má majoritní podíl na generaci vzdušných iontů kosmické záření. Skládá se ze záření pocházejícího ze Slunce a ze záření pocházejícího ze zdrojů mimo naši Galaxii [5], [10]. Je tvořeno z 88 % protony, 10 % jádry hélia, 1 % elektrony a pozitrony, zbývající 1 % je tvořeno z těžších částic [8], [10]. Podíl kosmického záření na generaci ionizujícího záření klesá s klesající nadmořskou výškou. Na úrovni mořské hladiny vděčí za svůj vznik kosmickému záření pouze 20 % vzdušných iontů [10].

Koncentrace vzdušných iontů je také ovlivněna meteorologickými vlivy. Například teplotou, ročním obdobím, atmosférickým tlakem a vlhkostí vzduchu. Vlhkost má na koncentraci výrazný vliv. S rostoucí vlhkostí vzduchu klesá míra koncentrace vzdušných iontů. Například během mlhy je koncentrace iontů ve vzduchu velmi nízká [4].

O koncentraci vzdušných iontů rozhoduje také míra znečištění ovzduší [4]. V průmyslových oblastech a ve městech klesá koncentrace vzdušných iontů až pod 100 iontů na centimetr krychlový. Ve venkovských a v řídce osídlených oblastech se koncentrace vzdušných iontů pohybuje mezi 200 a 600 iontů na centimetr krychlový [8].

V budovách postavených pouze z cihel, dřeva nebo kamenů je koncentrace vzdušných iontů stejná jako v okolním prostředí. Budovy postavené ze železobetonu se naopak vyznačují velmi nízkou nebo žádnou koncentrací vzdušných iontů, protože železobetonová konstrukce působí podobně jako stíněná komora a odstíní většinu okolních iontů. Podobně je to i v dopravních prostředcích, které jsou tvořeny z oceli. V těchto případech se používají umělé zdroje ionizace, protože lidský organismus není na prostředí bez vzdušných iontů zvyklý [4].

Nejvyšší míru koncentrace vzdušných iontů je možné naměřit v jeskyních. Je to způsobeno obsahem radionuklidů ve stěnách, stálou teplotou a vlhkostí a malým pohybem vzduchu. Koncentrace vzdušných iontů v jeskyních mohou být až 20 000 iontů na centimetr krychlový [4].

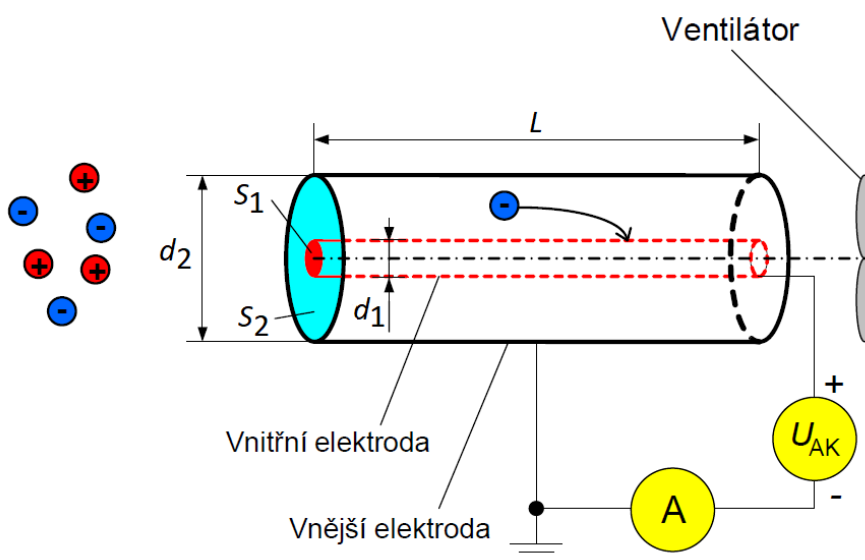
1.3 Měřicí metoda s aspiračním kondenzátorem

V literatuře [4] se uvádí celkem čtyři metody pro zjištění míry koncentrace vzdušných iontů. Jedná se o metodu nepohyblivého vzorku vzduchu (rozptylová metoda), metodu paralelních měření (iontospektrometr), metodu stíněné komory a metodu s aspiračním kondenzátorem. Protože nízkoúrovňový zesilovač, jehož návrh a optimalizace je hlavním tématem této práce, by měl sloužit k zesílení výstupního proudu aspiračního kondenzátoru, bude právě tato metoda detailně rozebrána v následujícím textu.

Podle literatury [4] a [11] je měření pomocí aspiračního kondenzátoru nej přesnější a nejčastěji používaná metoda z výše zmíněných metod pro zjištění míry koncentrace vzdušných iontů. Nevýhodou je, že v jednom okamžiku je možné měřit pouze kladné nebo pouze záporné ionty.

Aspirační kondenzátor (dále AK) je složen z vnitřní a z vnější elektrody, které mají nejčastěji tvar válce. Vnitřní elektrodu udržuje ve své poloze teflonový držák. Přívod k elektrodě je veden teflonovou průchodkou skrze vnější elektrodu. Teflon se používá kvůli jeho dobrým izolačním vlastnostem. Rozměry AK jsou dány poloměry vnější a vnitřní elektrody r_1 a r_2 a společnou délkou l obou elektrod. Čím jsou rozměry AK větší, tím je větší i jeho citlivost. Kolem vnější elektrody je vhodné přidat stínící obal, který bývá u ústí AK tvarován tak, aby pomáhal lepšímu proudění vzduchu dovnitř AK. Mezi elektrodami je přiložené napětí U_{AK} , které uvnitř AK vyvolává elektrické pole s intenzitou E . Jako zdroj polarizačního napětí se na ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky (dále jen UTEE) používá kondenzátor, který je nabíjen ze zdroje napětí. Na konci AK je sací ventilátor, který zajišťuje nasávání okolního vzduchu do prostoru mezi elektrodami. Ventilátor musí být magneticky stíněn, jinak by mohl ovlivňovat trajektorie iontů v AK [5].

Ionty jsou tedy pomocí ventilátoru vtaženy do prostoru mezi elektrodami a elektrickým polem jsou přitahovány k jedné z elektrod, tato elektroda je označována jako sběrná. Polarita iontů, které jsou přitahovány ke sběrné elektrodě, je dána polaritou elektrického pole uvnitř AK. Pokud ionty dopadají na sběrnou elektrodu, vytvářejí velmi malý elektrický proud I_{iont} , který je možné změřit citlivým elektrometrickým pikoampérmetrem. Tento pikoampérmetr je vhodné připojit na aktivní stínění (princip aktivního stínění je vysvětlen v kapitole 2.1). Na aktivní stínění se také připojují stínící kroužky u teflonového držáku a teflonové průchodky. Velikost proudu I_{iont} je úměrná koncentraci iontů příslušné polarit. Schéma aspiračního kondenzátoru je na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2 Schéma aspiračního kondenzátoru [5]

V literatuře [5] jsou uvedeny čtyři používané varianty zapojení AK pro měření záporných iontů. Tyto varianty jsou shrnuty v tabulce 2. Pro měření kladných iontů se

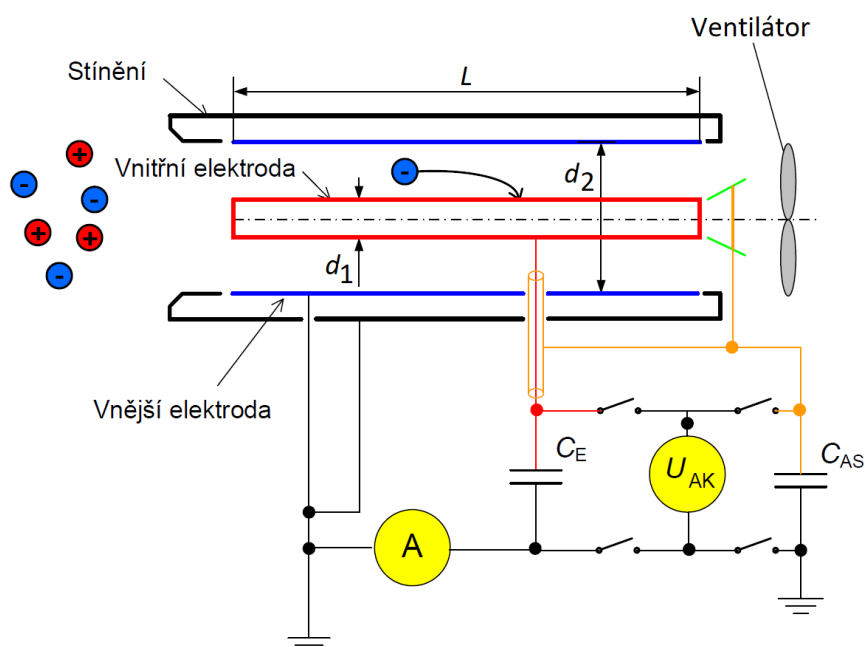
na elektrody přivádí napětí opačné polarity, než je uvedeno v tabulce, nulové napětí zůstává na stejné elektrodě. V tabulce je také u jednotlivých variant vypsána jejich vhodnost pro použití aktivního stínění.

Tabulka 2 Používané varianty zapojení aspiračního kondenzátoru pro měření záporných iontů [5]

Varianta	Sběrná elektroda	Vnitřní elektroda	Vnější elektroda	Vhodné pro aktivní stínění
1	Vnitřní	0 V	Záporná	Ano
2	Vnitřní	Kladná	0 V	Ne
3	Vnější	0 V	Kladná	Ne
4	Vnější	Záporná	0 V	Ano

Rozložení elektrického pole uvnitř AK není u všech variant stejné. Pokud by tedy bylo provedeno testovací měření se všemi čtyřmi variantami a byly by dodrženy shodné podmínky, výsledky by nebyly stejné. V praxi se používají varianty 1 [12], 2 [5] a 4 [13].

Na UTEE se používá druhá varianta, pro kterou doktor Z. Roubal v literatuře [5] navrhl speciální způsob zapojení aktivního stínění. Využívá pomocného kondenzátoru, který se nabije na napětí U_{AK} společně s polarizačním kondenzátorem. Jeden vývod pomocného kondenzátoru je připojen na zem a druhý vývod je připojen na stínicí kroužky u teflonového držáku a teflonové průchodky. Po odpojení zdroje aktivně stíní vnitřní elektrodu. Zapojení aktivního stínění u druhé varianty AK podle návrhu v literatuře [5] je zobrazeno na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3 Zapojení aktivního stínění u druhé varianty AK [5]

Počet iontů dopadajících na sběrnou elektrodu je závislý na jejich pohyblivosti k . Každý AK se vyznačuje parametrem mezní pohyblivosti k_m . Všechny ionty, které mají pohyblivost větší nebo stejnou než mezní pohyblivost k_m , dopadnou na sběrnou elektrodu. Ze všech iontů s pohyblivostí menší než mezní pohyblivost k_m , dopadne na sběrnou elektrodu pouze určitá část [5].

Uvažujme nyní rovnoměrné rozložení vzdušných iontů v jednotce objemu, spojitě spektrum pohyblivostí k a velikost elektrického náboje iontu rovnou velikosti elementárního náboje elektronu (uvažujeme tedy pouze lehké ionty, protože u nich je tato podmínka splněna). Při takto definovaných podmínkách můžeme odvodit velikost proudu generovaného vzdušnými ionty na sběrné elektrodě AK a následně také určit koncentraci vzdušných iontů.

Pro výpočet mezní pohyblivosti k_m je nutné nejprve zavést pojem objemový průtok vzduchu M :

$$M = (r_2^2 - r_1^2) \cdot \pi \cdot v \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}; \text{m}, \text{m}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}], \quad (1.2)$$

kde r_2 a r_1 jsou poloměry elektrod AK a v je průměrná rychlost proudění vzduchu v AK.

Dále použijeme vztah pro kapacitu válcového AK C_{AK} :

$$C_{AK} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [\text{F}; \text{F} \cdot \text{m}^{-1}, -, \text{m}, \text{m}, \text{m}], \quad (1.3)$$

kde ϵ_0 je permitivita vakua ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$), ϵ_r je relativní permitivita, l je délka elektrod AK a r_2 a r_1 jsou poloměry elektrod AK.

Nyní můžeme odvodit vztah pro mezní pohyblivost k_m :

$$k_m = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot M}{C_{AK} \cdot U_{AK}} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}; \text{F} \cdot \text{m}^{-1}, -, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}, \text{V}], \quad (1.4)$$

kde ϵ_0 je permitivita vakua, ϵ_r je relativní permitivita, M je objemový průtok vzduchu, C_{AK} je kapacita válcového AK a U_{AK} je polarizační napětí AK.

Proud generovaný vzdušnými ionty dopadajícími na sběrnou elektrodu AK můžeme určit podle vztahů pro $k < k_m$ a pro $k \geq k_m$:

$$I_{k < k_m} = \frac{k}{k_m} \cdot n \cdot q \cdot M \quad [\text{A}; \text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}, \text{iontů} \cdot \text{m}^{-3}, \text{C}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$I_{k \geq k_m} = n \cdot q \cdot M \quad [\text{A}; \text{iontů} \cdot \text{m}^{-3}, \text{C}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}], \quad (1.5)$$

kde k je pohyblivost iontů, k_m je mezní pohyblivost iontů, n je koncentrace iontů příslušné polarizace, q je velikost elementárního náboje ($q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) a M je objemový průtok vzduchu.

Celkový proud generovaný všemi vzdušnými ionty, které dopadnou na sběrnou elektrodu bez ohledu na jejich pohyblivost a mezní pohyblivost AK, je měřen přesným

elektrometrickým pikoampérmetrem. Koncentraci vzdušných iontů příslušné polarity potom vypočítáme:

$$n = \frac{1}{M \cdot q} \cdot \left(I_{iont} - U_{AK} \cdot \frac{dI_{iont}}{dU_{AK}} \right) \quad [\text{iontů} \cdot \text{m}^{-3}; \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{C}, \text{A}, \text{V}], \quad (1.6)$$

kde M je objemový průtok vzduchu, q je velikost elementárního náboje, I_{iont} je proud naměřený elektrometrickým pikoampérmetrem a U_{AK} je polarizační napětí.

Odečet měřeného celkového proudu I_{iont} se provádí v okamžiku, kdy proud dosáhne saturovaném stavu. Rovnice (1.6) potom přejde na tvar:

$$n = \frac{I_{iont}}{M \cdot q} \quad [\text{iontů} \cdot \text{m}^{-3}; \text{A}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{C}], \quad (1.7)$$

kde I_{iont} je proud naměřený elektrometrickým pikoampérmetrem, M je objemový průtok vzduchu a q je velikost elementárního náboje. Tato rovnice je stejná jako rovnice (1.5), ale proud I_{iont} zde nerozlišujeme na proud generovaný ionty s hybností menší než mezní hybnost AK a proud generovaný ionty s hybností větší než mezní hybnost AK.

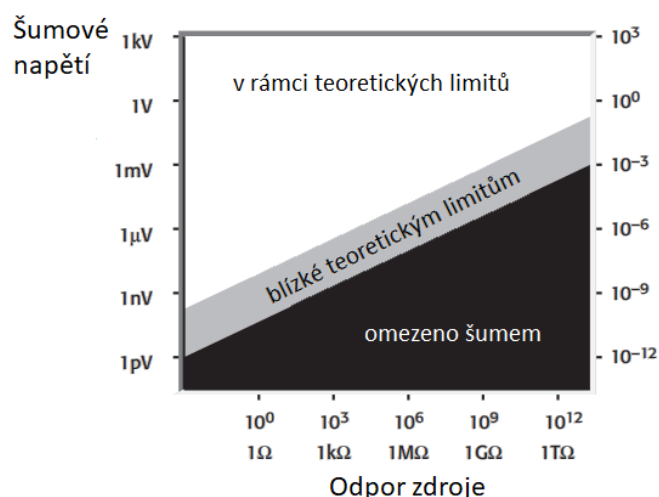
Na obrázku 1.4 jsou vyfotografovány některé z AK, které jsou v současné době dostupné na UTEE. Fotografie je převzata z literatury [14]. Jejich objemový průtok vzduchu M je $23000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Na výstupu elektrometrického zesilovače je pro následující šestnáctibitový A/D převodník potřebné napětí 10 V. Rozsahy vstupního proudu zesilovače jsou pak 10 pA, 100 pA, 1 nA a 10 nA.



Obrázek 1.4 Některé AK dostupné na UTEE [14]

2 MĚŘENÍ ZDROJŮ S VELKÝM VNITŘNÍM ODPOREM

Měřením zdrojů s velkým vnitřním odporem rozumíme měření proudů v řádu nA a menší, měření napětí ze zdrojů s velkým vnitřním odporem, měření odporů v řádu 1 G Ω a větší a měření náboje. Měřené hodnoty se pohybují v blízkosti teoretických limitů dosažitelné citlivosti, které jsou určeny velikostí Johnsonova tepelného šumu [15]. Velikost šumového napětí je úměrná odmocnině velikosti vnitřního odporu zdroje, uvažované šumové šířce pásma a absolutní teplotě v kelvinech. Johnsonův tepelný šum je detailněji probrán v kapitole 2.4. Při nižším vnitřním odporu zdroje jsme tedy schopni dosáhnout větší citlivosti než při vysokých hodnotách vnitřního odporu zdroje. Teoretické limity při měření napětí jsou zobrazeny na obrázku 2.1, který je převzat z literatury [15]. Při měření proudu platí podobné limity, jako při měření napětí.



Obrázek 2.1 Teoretické limity při měření napětí [15]

Kromě teoretických limitů je potřeba při měření zdrojů s velkým vnitřním odporem brát v úvahu i další omezení a rušivé vlivy, které mají při běžném měření zanedbatelný vliv.

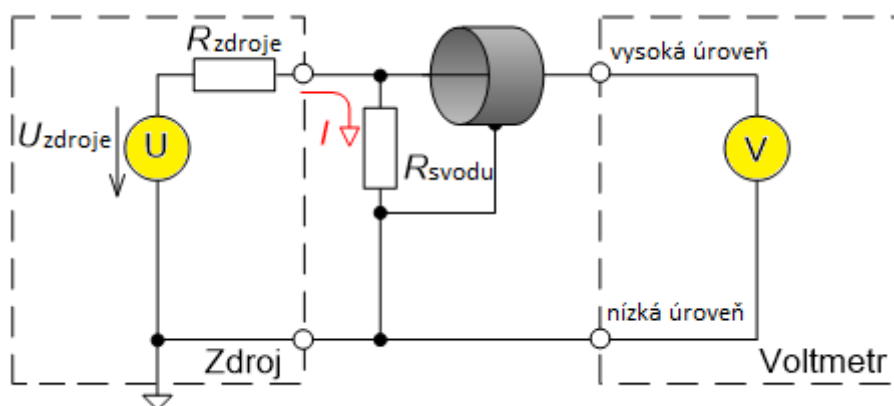
2.1 Svodové proudy a aktivní stínění

Svodové proudy vznikají převážně vlivem parazitní vodivosti v izolantech. Mohou vzniknout v izolační vrstvě koaxiálního vedení mezi vnitřním a vnějším stínícím vodičem [15]. Také vznikají na povrchu desek plošných spojů a na povrchu vysokoohmových rezistorů vlivem nečistot, otisků prstů a sraženou vodní párou [4]. Proto je velmi důležité udržovat použité součástky a desky plošných spojů v čistém stavu a měření provádět v prostředí s malou relativní vlhkostí vzduchu, případně použít pohlcovače vlhkosti.

Svodové proudy výrazně ovlivňují přesnost měření. Jejich velikost může v některých případech převýšit velikost vstupního klidového proudu operačních zesilovačů používaných v přístrojích pro měření zdrojů s velkým vstupním odporem. Některé

operační zesilovače mají speciální vývod, na který je připojeno kovové pouzdro operačního zesilovače, který se dá použít jako součást aktivní ochrany pro potlačení svodových proudů na povrchu součástek a desky plošného spoje [16].

Svodové proudy v koaxiálních vedeních vytvářejí na izolační vrstvě úbytek napětí, který způsobí pokles měřeného napětí [15]. Svodový proud v koaxiálním vedení je zobrazen na obrázku 2.2.

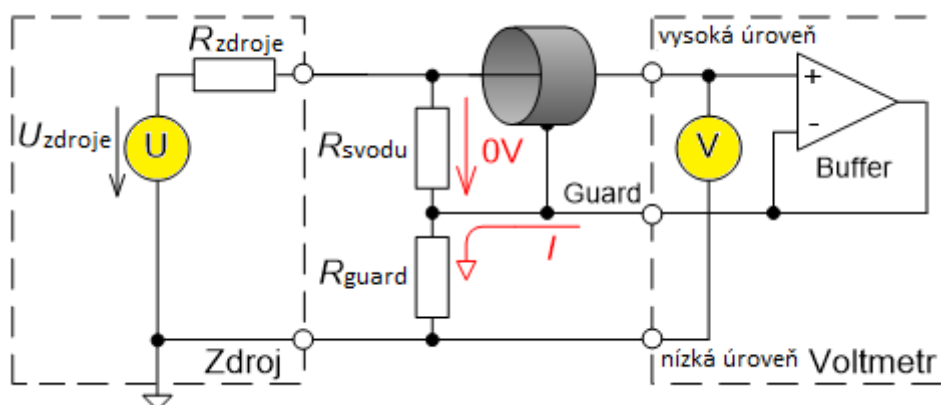


Obrázek 2.2 Svodový proud v koaxiálním vedení [15]

Měřené napětí je dané napěťovým děličem tvořeným vnitřním odporem zdroje a svodovým odporem vedení:

$$U_{\text{měřené}} = U_{\text{zdroje}} \cdot \left(\frac{R_{\text{svodu}}}{R_{\text{zdroje}} + R_{\text{svodu}}} \right) \quad [\text{V}; \text{V}, \Omega]. \quad (2.1)$$

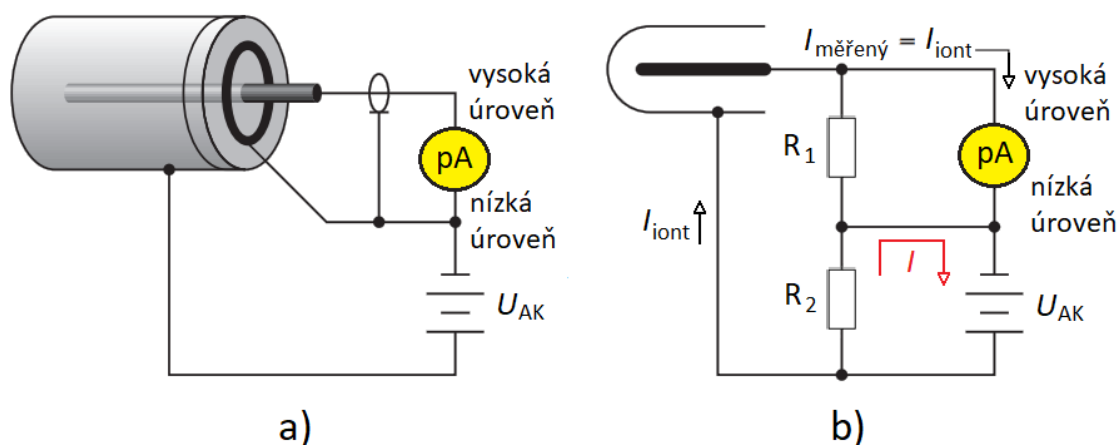
Chyba způsobená svodovým proudem ve vedení může být snížena při použití aktivního stínění. Aktivní stínění je podle definice připojení stínícího vodiče na stejný potenciál napětí se signálovým vodičem [15]. Vnější vodič koaxiálního vedení se připojí na stejný potenciál napětí s vnitřním vodičem podle obrázku 2.3.



Obrázek 2.3 Připojení koaxiálního vedení na aktivní stínění [15]

Vnější vodič koaxiálního vedení je připojen na výstup oddělovacího jednotkového zesilovače (bufferu) označovaný jako „guard“. R_{guard} zde představuje odpor mezi vnějším vodičem koaxiálního vedení a vstupem měřicího přístroje pro nízkou úroveň. Proud I tekoucí skrz R_{guard} je výsledkem připojení vnějšího vodiče na téměř stejný potenciál napětí s vnitřním vodičem [15]. Úbytek napětí na svodovém odporu vedení je při použití aktivního stínění velmi malý, v ideálním případě nulový. Další výhodou aktivního stínění je snížení parazitní kapacity vedení a zlepšení dynamických vlastností měřicího uspořádání [15].

Použití aktivního stínění u AK je podle tabulky 2 možné pouze u variant 1 a 4. Podle návrhu doktora Z. Roubala na obrázku 1.3 i u varianty číslo 2. Princip připojení AK na aktivní stínění je znázorněn na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4 Připojení AK na aktivní stínění a) a náhradní schéma b) [15]

Mezi vnitřní a vnější elektrodu AK je vložen stínící kovový kroužek. Nejčastější umístění stínícího kroužku je kolem teflonové průchodky přívodu k vnitřní elektrodě a teflonového držáku vnitřní elektrody. Kroužek má za následek rozdělení svodového odporu do dvou částí podle obrázku 2.4 b). Napětí na R_1 je dáno zatěžovacím napětím pikoampérmetru, které je obvykle menší než 1 mV [15]. Zbytek úbytku napětí je na R_2 a svodový proud zůstane uzavřen v této smyčce. Měřený proud je potom roven proudu generovanému vzdušnými ionty na sběrné elektrodě. Bez použití aktivního stínění by byl měřený proud dán součtem svodového proudu a proudu vzdušných iontů.

2.2 Izolanty

Důležitým faktorem redukce svodových proudů je volba správného izolačního materiálu. Rezistivita izolačního materiálu by měla být o několik dekád vyšší než vnitřní odpor měřeného zdroje [15]. V opačném případě hrozí vznik svodových proudů skrze izolační materiál a úbytek napětí diskutovaný v předchozí kapitole.

Rezistivita materiálu je popsána jako odpor materiálu o délce jednoho metru a průřezu jeden metr čtvereční. Její převrácená hodnota vyjadřuje schopnost materiálu vést elektrický proud. Mezi další důležité parametry izolantů patří povrchový odpor (šíření elektrického proudu po povrchu materiálu), absorpce vody (šíření elektrického proudu na

základě pohlčené vody v materiálu), triboelektrický jev (vytvoření elektrického náboje vlivem tření materiálu), piezoelektrický jev (vytvoření elektrického náboje vlivem mechanického namáhání materiálu) a dielektrická absorpce (nabíjení materiálu z okolního elektrického pole).

Za velmi dobrý izolační materiál je považován vzduch, ten je ovšem složité použít hlavně v případech, kdy je potřeba vodič mechanicky uchytit izolačním materiálem, nebo když by mohlo vlivem otřesů dojít k fyzickému spojení vodičů. V literatuře [15] se při měření zdrojů s velkým vnitřním odporem nedoporučuje používat izolační materiály jako PVC, vinyl a nylon.

V této literatuře naopak zmiňují teflon, jako jeden z nejlepších a nejčastěji používaných izolačních materiálů při měření proudů v řádu desítek fA a větších. Teflon má velkou rezistivitu a povrchový odpor, který si uchová i ve vlhku. Jeho chemické složení nemá škodlivý vliv na lidský organismus, je snadno zpracovatelný a snadno se čistí. Nevýhodou teflonu je vytvoření vnitřního náboje vlivem deformace, který způsobuje chybové proudy. Nicméně při měření proudů vyšších než 100 fA je tato nevýhoda zanedbatelná [15].

Dalším doporučovaným izolačním materiálem v literatuře [15] je polystyren. Má téměř stejně velkou rezistivitu jako teflon, ale ve vlhku velmi rychle klesá jeho povrchový odpor. U polystyrenu se také mohou objevovat vnitřní praskliny. Jeho výhodou je mnohem menší cena než u teflonu. Podobnou rezistivitu a povrchový odpor má i polyethylen, který je ovšem na rozdíl od polystyrenu ohebný, proto se používá jako dielektrikum v koaxiálních a triaxiálních kabelech.

Sklo a keramika mají velmi malý povrchový odpor ve vlhkých prostředích, proto se používají jenom v případech, kdy je nezbytné využít jejich mechanických vlastností.

Safír je podle literatury [15] jeden z nejlepších izolantů, protože piezoelektrický jev se u něj projevuje jen velmi málo. Používá se při měření proudů menších než 1 fA. Cena safíru je ovšem velmi vysoká a jeho zpracování náročné.

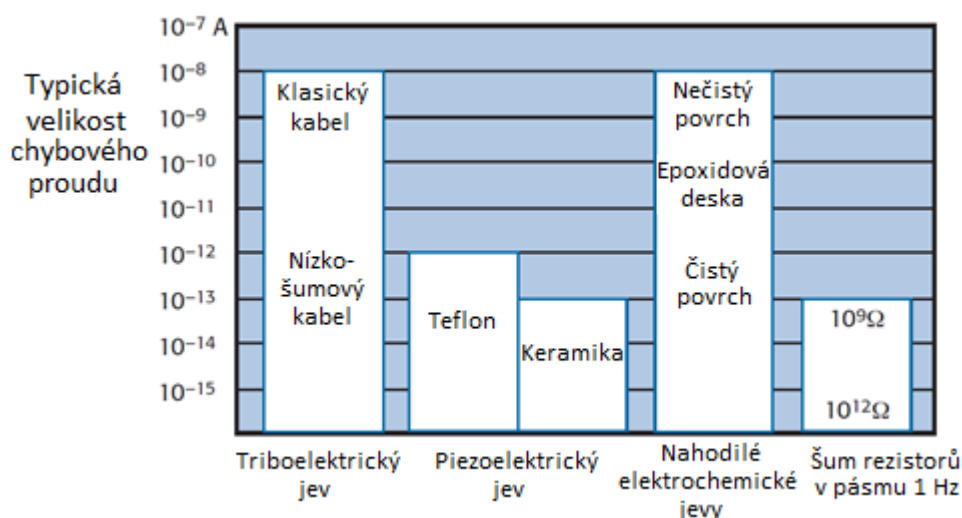
V tabulce 3 jsou vypsané různé izolační materiály, jejich rezistivita a jejich vlastnosti s ohledem na důležité parametry izolantů.

Tabulka 3 Izolační materiály, jejich rezistivita a vlastnosti [15]

Materiál	Rezistivita ($\Omega \cdot m^2 \cdot m^{-1}$)	Odolnost proti absorpci vody	Piezoelektrický jev	Triboelektrický jev	Dielektrická absorpce
Safír	$>10^{18}$	Dobrý	Dobrý	Průměrný	Dobrý
Teflon	$>10^{18}$	Dobrý	Slabý	Slabý	Dobrý
Polyethylen	10^{16}	Průměrný	Dobrý	Průměrný	Dobrý
Polystyren	$>10^{16}$	Průměrný	Průměrný	Slabý	Dobrý
Kel-F	$>10^{18}$	Dobrý	Průměrný	Slabý	Průměrný
Keramika	$10^{14} - 10^{15}$	Slabý	Průměrný	Dobrý	Dobrý
Nylon	$10^{13} - 10^{14}$	Slabý	Průměrný	Slabý	Slabý
Sklo	10^{13}	Slabý	Průměrný	Slabý	Slabý
PVC	$5 \cdot 10^{13}$	Dobrý	Průměrný	Průměrný	Slabý

2.3 Generované chybové proudy

V měřicím uspořádání se mohou vytvářet kromě svodových proudů i další proudy, které se přičítají k proudu z měřeného zdroje s velkým vnitřním odporem a způsobují chyby, které nelze zanedbávat. Jedním ze zdrojů chybových proudů je vstupní klidový proud operačního zesilovače v měřicím přístroji, o kterém je toho více v kapitole 4. Další důvody vzniku chybových proudů jsou způsobeny nedokonalostmi izolačních materiálů a kabelů. Část chybových proudů může také vznikat díky Johnsonovu tepelnému šumu. Příčiny vzniku chybových proudů i s typickou velikostí chybového proudu jsou na obrázku 2.5, který je převzat z literatury [15].

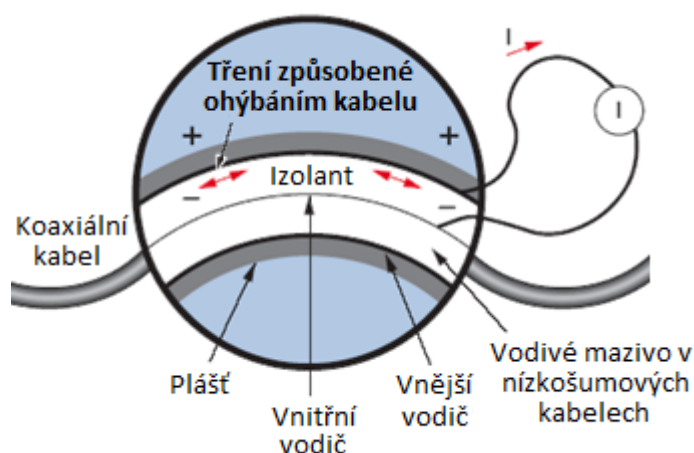


Obrázek 2.5 Příčiny chybových proudů a jejich typická velikost [15]

Proudy způsobené triboelektrickým jevem se vytvářejí díky nábojům, které jsou generovány mezi vodičem a izolantem vlivem jejich vzájemného tření při mechanickém namáhání kabelu. Volné elektrony ve vodiči jsou vlivem tření vytaženy z vodiče a vznikne nerovnováha elektrického náboje, která způsobuje chybový proud [15]. Triboelektrický jev v koaxiálním kabelu je znázorněn na obrázku 2.6.

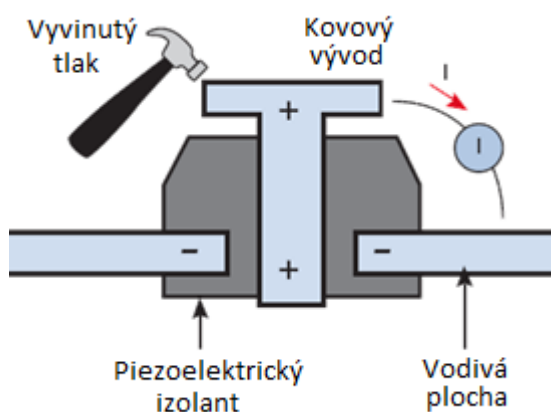
Triboelektrický jev lze výrazně snížit použitím nízkošumového kabelu. Běžné nízkošumové kabely používají jako dielektrikum polyethylen. Mezi vnějším vodičem a dielektrikem mají navíc vrstvu grafitu, která plní funkci maziva a minimalizuje tak tření izolantu a vodiče [15]. Chybové proudy vytvářené triboelektrickým jevem v klasických kabelech jsou podle obrázku 2.5 přibližně v řádu nA, v nízkošumových kabelech jsou zhruba v řádu pA. I při použití nízkošumových kabelů jsou hodnoty chybových proudů vysoké. Kabely by proto měly být co nejkratší a neměly by během měření být vystaveny žádnému mechanickému namáhání nebo vibracím.

Triboelektrický jev může kromě kabelů vznikat i na jiných místech v obvodu, kde se dotýká vodič s izolačním materiálem. Místa doteku by měla být co nejmenší a mělo by být zajištěno, že nebudou vystaveny mechanickému namáhání nebo vibracím stejně jako kabely.



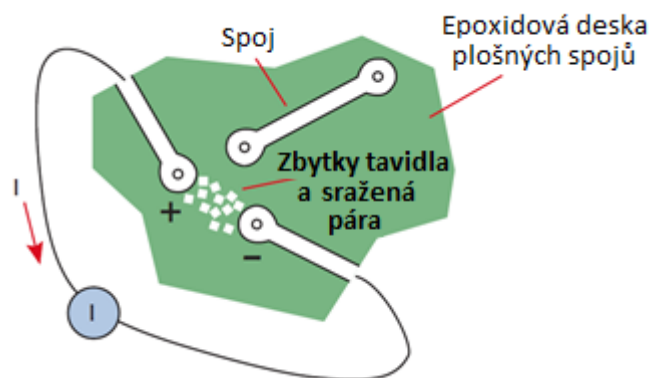
Obrázek 2.6 Triboelektrický jev v koaxiálním kabelu [15]

Piezoelektrickým jev vzniká při mechanickém namáhání určitých krystalických materiálů. Některé izolanty se částečně chovají jako piezoelektrické materiály a při mechanickém namáhání mohou generovat elektrické náboje a tím vytvářet chybové proudy. Slabou odolnost proti piezoelektrickému jevu má například teflon. Je důležité volit izolanty s minimálním piezoelektrickým jevem a nevystavovat je mechanickému tlaku. Piezoelektrický jev je zobrazen na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7 Piezoelektrický jev [15]

Elektrochemické jevy vytvářejí chybové proudy, pokud se na povrchu desky plošných spojů nacházejí určité chemikálie. Jedná se o různá tavidla, jako je například kalafuna. Chemikálie mezi dvěma spoji vytvoří jakýsi elektrochemický akumulátor, který může vytvářet chybové proudy v řádu nA [15]. Na desce plošných spojů by proto neměly být přebytečné stopy tavidla. Elektrochemický jev může být také způsoben sraženou vodní párou. Princip vzniku chybových proudů způsobených elektrochemickým jevem na desce plošných spojů je na obrázku 2.8. Aby se co nejvíce zamezilo vzniku chybových proudů elektrochemickým jevem, je důležité volit izolační materiál s velkou odolností proti absorpci vody. Izolanty by měly být udržovány v naprosté čistotě, k čištění je vhodné používat kvalitní methanolvý čisticí prostředek.



Obrázek 2.8 Elektrochemický jev na desce plošných spojů [15]

Dielektrická absorpce nastává, pokud je na izolant přiloženo delší dobu stejnosměrné napětí. Dochází k polarizaci molekul v izolantu a po odstranění přiloženého napětí se vlivem rekombinace polarizovaných molekul vytváří chybový proud, jehož velikost postupně klesá. V některých případech může trvat několik minut až hodin, než chybový proud úplně vymizí [15]. Proto je důležité na izolanty nepřikládat napětí vyšší než několik voltů.

2.4 Šumy

Pod pojmem šum lze obecně uvažovat jakýkoliv náhodný signál, který ruší zpracování užitečného signálu. Náhodnost šumového signálu se týká pouze jeho okamžité amplitudy, statistické vlastnosti šumu jsou časově nezávislé [17]. Šum vzniká ve všech elektronických obvodech bez ohledu na druhy použitých prvků a jejich zapojení. Šumy rozdělujeme na šumy vznikající mimo analyzovaný obvod (externí) a na šumy vznikající uvnitř analyzovaného obvodu (interní).

Kvůli náhodnosti šumových signálů se k jejich popisu používá nejčastěji středních šumových výkonů nebo středních kvadrátů napětí nebo proudů. Kvůli proměnlivosti šumového výkonu (napětí nebo proudu) při změně kmitočtového pásma byl zaveden pojem šumová spektrální hustota výkonu (napětí nebo proudu), která se vztahuje na šířku pásma 1 Hz [18].

V elektronických obvodech vznikají dva typy šumů, které rozlišujeme podle jejich kmitočtové závislosti. Bílé šumy se vyznačují rovnoměrným rozložením kmitočtových složek ve spektru. Druhým typem šumů jsou barevné šumy, které se naopak vyznačují nerovnoměrným spektrálním rozložením.

Z bílých šumů je pro nás nejvýznamnější Johnsonův tepelný šum. Vyskytuje se ve vodičích i v polovodičích a je generován aktivními i pasivními součástkami. Vzniká v důsledku pohybu elektronů při teplotě vyšší než 0 K. Jeho spektrální výkonovou úroveň lze považovat za konstantní až do kmitočtu 100 THz [18], při vyšších kmitočtech se začnou projevovat další typy šumů a spektrální výkonová hustota bude mít rostoucí průběh.

Přibližná efektivní hodnota šumového napětí na rezistoru způsobená Johnsonovým

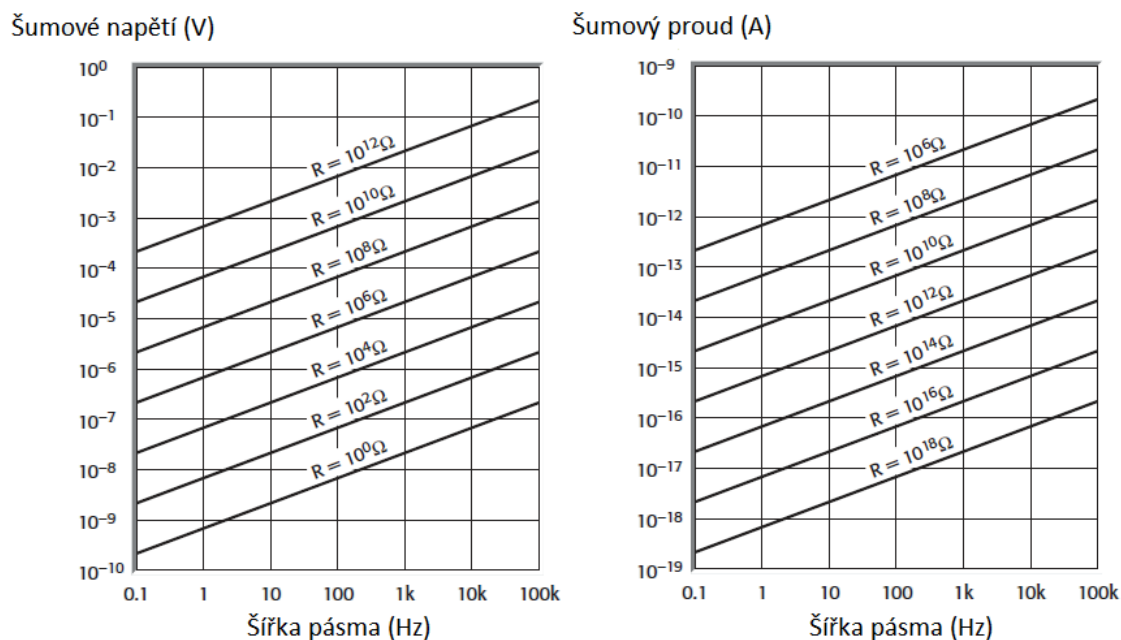
tepelným šumem je dána:

$$U_{N_T} = \sqrt{4 \cdot k_B \cdot T \cdot R \cdot B_N} \quad [\text{V}; \text{JK}^{-1}, \text{K}, \Omega, \text{Hz}] , \quad (2.2)$$

kde k_B je Boltzmannova konstanta ($k_B = 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$), T je absolutní teplota rezistoru v kelvinech, R je velikost rezistoru a B_N je uvažovaná šumová šířka pásma. Efektivní hodnotu šumového proudu je možné vyjádřit:

$$I_{N_T} = \frac{\sqrt{4 \cdot k_B \cdot T \cdot R \cdot B_N}}{R} \quad [\text{A}; \text{JK}^{-1}, \text{K}, \Omega, \text{Hz}] . \quad (2.3)$$

Ze vztahů (2.2) a (2.3) je patrné, že kvadrát šumového napětí roste s velikostí rezistoru, zatímco kvadrát šumového proudu klesá s velikostí rezistoru. Na obrázku 2.9, který je převzat z literatury [15], je zobrazena závislost tepelného šumového napětí a proudu na šířce pásma a velikosti rezistoru.

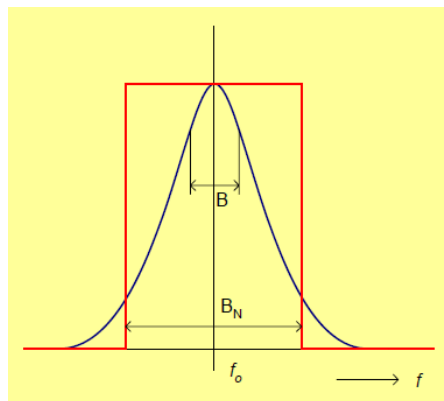


Obrázek 2.9 Závislost tepelného šumového napětí a proudu na šířce pásma a velikosti rezistoru [15]

Měřený zdroj s velkým vnitřním odporem je také zdrojem Johnsonova tepelného šumu. V obvodech se totiž projevuje tepelný šum reálných rezistivních částí všech druhů imitancí [17]. Při měření napětí je velikost Johnsonova tepelného šumu určena vnitřním odporem zdroje, zatímco při měření proudů je zapotřebí brát v úvahu vznik Johnsonova tepelného šumu vlivem vnitřního odporu měřeného zdroje i měřícího přístroje [15].

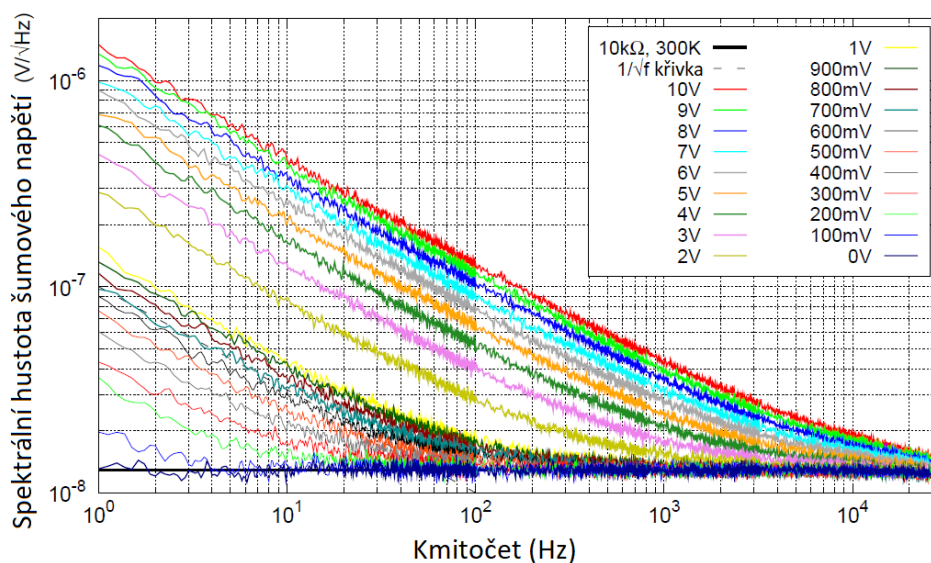
Snížení šumové šířky pásma B_N může efektivně snížit střední hodnotu šumového napětí nebo proudu. Šířka pásma B užitečných signálů je definována poklesem o 3 dB od maximální hodnoty napětí nebo proudu. Šumová šířka pásma je však definována jinak. Určí se na základě rovnosti celkového šumového výkonu na výstupu selektivního obvodu

a ekvivalentního šumového výkonu, který bychom získali na výstupu pásmové propusti s ideální obdélníkovou přenosovou charakteristikou [17]. Podle této definice je tedy na obrázku 2.10 plocha pod modrou křivkou rovna ploše červeného obdélníku a je zřejmé, že šumová šířka pásma je větší než šířka pásma pro pokles o 3 dB.



Obrázek 2.10 Určení šumové šířky pásma [17]

Dalším druhem šumu, který je potřeba brát v úvahu při měření proudu ze zdroje o velkém vnitřním odporu je blikavý šum. Vzniká na rezistorech v měřicím přístroji a také v polovodičích. Někdy je také označován jako plápolavý nebo růžový [17]. V některé literatuře [19],[20] je označován jako proudový šum, protože je úměrný protékajícímu proudu. Projevuje se zejména na nízkých kmitočtech, protože jeho spektrální hustota klesá s rostoucím kmitočtem podle závislosti $1/f$. Důvodem vzniku tohoto šumu jsou poruchy v krystalové mřížce. Rezistory vyrobené tlustovrstvou technologií generují blikavý šum s úrovní výrazně vyšší než rezistory vyrobené tenkovrstvou technologií. Spektrální hustota napětí blikavého šumu může být vyjádřena jako funkce úbytku napětí na rezistoru [19]. Při vyšším úbytku napětí vzroste i spektrální hustota napětí blikavého šumu, jak je znázorněno na obrázku 2.11, který je převzat z literatury [19].



Obrázek 2.11 Spektrální hustota napětí blikavého šumu pro různé velikosti úbytku napětí na rezistoru [19]

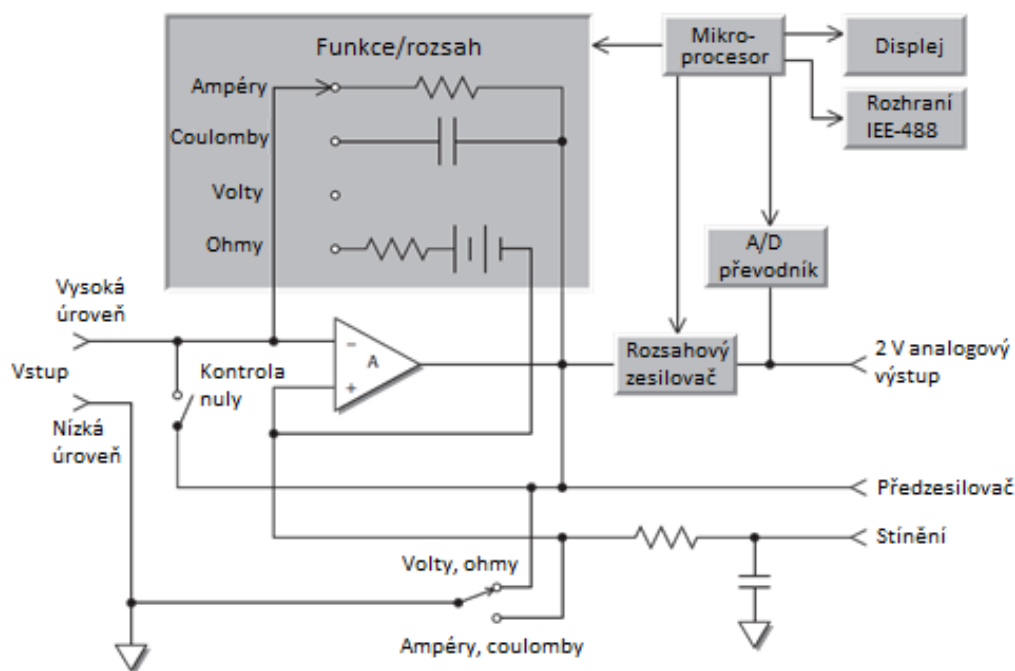
3 PŘÍSTROJE K MĚŘENÍ ZDROJŮ S VELKÝM VNITŘNÍM ODPOREM

Současné laboratorní digitální multimetry (DMM) se dají použít pro měření proudů řádově od $100\ \mu\text{A}$ do $10\ \text{A}$. Vstupní odpor digitálních multimetrů se pohybuje od $100\ \text{M}\Omega$ do $10\ \text{G}\Omega$ [15], což je o několik řádů menší hodnota, než bývá hodnota vnitřního odporu zdroje. Při měření proudů ze zdrojů, které mají vnitřní odpor o několik řádů vyšší, než je vstupní odpor digitálních multimetrů, nastává velký pokles vstupního napětí vlivem zatížení, který ovlivňuje měření napětí i nízkých proudů. Pro měření ze zdrojů s velkým vnitřním odporem se používají speciální přístroje s velmi velkým vstupním odporem.

3.1 Elektrometr

Elektrometr je velice přesný typ digitálního multimetru. Měří pouze stejnosměrné veličiny, ale dokáže změřit rozsahy, které jsou daleko za schopnostmi obyčejného laboratorního multimetru. Vstupní odpor elektrometru bývá větší než $100\ \text{T}\Omega$ ($10^{14}\ \Omega$) a klidový vstupní proud bývá menší než $3\ \text{fA}$ ($3 \cdot 10^{-15}\ \text{A}$) [15].

Elektrometr lze použít jako voltmetr, ampérmetr, ohmmetr i coulombmetr přepínáním zpětnovazební větve kvalitního napěťového zesilovače, který je základem elektrometru. Přepínáním zpětnovazební větve se mění také rozsah. Obvyklé rozsahy jsou pro měření napětí od $10\ \mu\text{V}$ do $200\ \text{V}$, pro měření proudu od $100\ \text{aA}$ ($10^{-16}\ \text{A}$) do $100\ \text{mA}$ a pro měření odporu od $1\ \Omega$ do $10\ \text{P}\Omega$ ($10^{16}\ \Omega$). Blokové schéma typického digitálního multimetru je na obrázku 3.1, který je převzat z literatury [15].

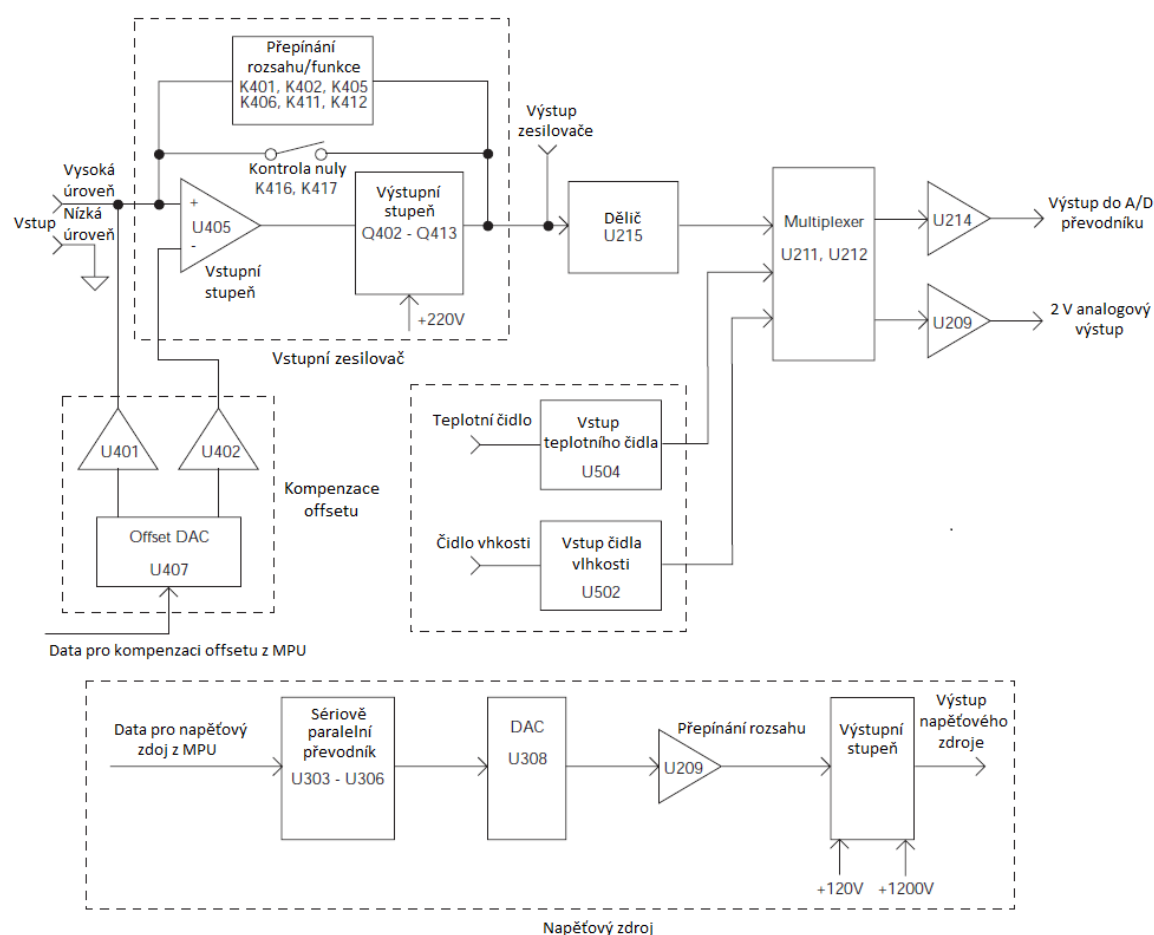


Obrázek 3.1 Blokové schéma typického digitálního elektrometru [15]

Elektrometr se používá místo klasického laboratorního multimetru při měření proudů menších než 10 nA, měření odporů větších než 1 G Ω , měření napětí ze zdroje, který má větší odpor než 100 M Ω , pokud vlivem zatížení obvodu nastane pokles vstupního napětí menší než několik stovek mV a při měření signálů s úrovní blízkou Johnsonovu tepelnému šumu [15].

Na UTEE je k dispozici elektrometr 6517A od společnosti Keithley Instruments. Podle katalogového listu od výrobce [21] má elektrometr vstupní odpor 200 T Ω a dokáže měřit stejnosměrné proudy od 1 fA do 20 mA. Díky plovoucímu zapojení napájení operačního zesilovače dokáže změřit stejnosměrná napětí od 10 μ V do 200 V s nízkým vstupním proudem 3 fA. Elektrometr je také schopný změřit elektrický náboj v rozsahu od 10 fC do 20 μ C a odpory až do 10¹⁶ Ω přes zabudovaný 1 kV zdroj napětí. Při měření na nejnižším rozsahu proudu by měl být pokles napětí vlivem zatížení menší než 20 μ V. Rozlišení elektrometru je 5½ digitu.

Přesný operační zesilovač, který je použitý v tomto elektrometru, by měl mít podle údajů od výrobce vstupní klidový proud menší než 3 fA a mezivrcholovou hodnotu vstupního šumového proudu menší než 0,75 fA. Výrobce bohužel neudává přesný typ použitého operačního zesilovače, pravděpodobně se jedná o LMC6001 [22]. V blokovém schématu analogové části na obrázku 3.2 je tento operační zesilovač označován jako U405, blokové schéma je převzato ze servisního manuálu [23].



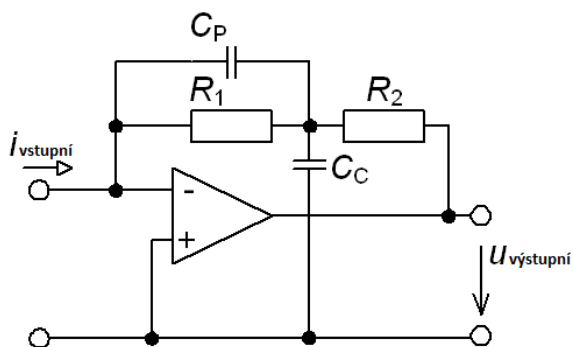
Obrázek 3.2 Blokové schéma analogové části elektrometru Keithley 6517A [23]



Obrázek 3.3 Zadní panel elektrometru Keithley 6517A [21]

3.2 Pikoampérmetr

Pikoampérmetr je speciální typ ampérmetru s velkou citlivostí, který je postavený na principu měření proudu elektrometrem. Pikoampérmetr má stejně jako elektrometr malý pokles vstupního napětí vlivem zatížení a malý klidový vstupní proud. Může mít vyšší rychlost měření než elektrometr, ale má menší citlivost a obvykle i nižší cenu. Některé pikoampérmetry mohou mít zabudovaný vnitřní zdroj napětí, který umožňuje měřit vysoké odpory. Rozsahy pro měření proudu bývají od 1 fA (10^{-15} A) do 100 mA a pro měření odporu od 10 Ω do 10 P Ω (10^{16} Ω) [15]. Obvodové zapojení typického pikoampérmetru je na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4 Obvodové zapojení typického pikoampérmetru [15]

Zpětnovazební rezistor R_1 má parazitní kapacitu C_p . Časová konstanta $R_1 C_p$ omezuje rychlost měření, proto se přidává kompenzační kapacita C_c . Pokud se časová konstanta $C_c R_2$ rovná časové konstantě $R_1 C_p$, vliv parazitní kapacity C_p se neprojeví a pikoampérmetr tak dosahuje lepších dynamických vlastností [15].

3.3 Coulombmetr

Coulombmetr bývá součástí elektrometru. Pro měření velmi malých proudů může být výhodné měřit elektrický náboj za jednotku času. Pokles vstupního napětí vlivem zatížení obvodu coulombmetrem bývá obvykle menší než $100 \mu\text{V}$. Při měření náboje se nepoužívá zpětnovazební vysokohomový rezistor, který je zdrojem Johnsonova tepelného šumu a blikavého šumu $1/f$. Teoreticky je tedy možné změřit pomocí coulombmetru menší proudy než pomocí pikoampérmetru. Coulombmetrem je možné detekovat náboje o velikosti 10 fC (10^{-14} C) a proudy v řádu 1 fA (10^{-15} A) [15].

3.4 Specifikace měřících přístrojů

Je důležité rozumět specifikacím měřícího přístroje a umět je správně interpretovat. Jeden z nejdůležitějších parametrů měřícího přístroje je jeho přesnost. Přesnost měření je ovlivněna mnoha vlivy, ale nejdůležitější je vliv samotného měřícího přístroje. Přesnost číslicového měřícího přístroje se nejčastěji udává jako relativní odchylka z měřené hodnoty plus relativní odchylka z rozsahu. Může být také udávána v jednotkách ppm (z anglického parts per milion) ve tvaru ppm z měřené hodnoty plus ppm z rozsahu [15].

Rozlišení číslicového měřícího přístroje je dáno počtem číslic, které mohou být zobrazeny na displeji. Rozlišení tedy závisí na počtu digitů číslicového měřícího přístroje. Výše zmíněný elektrometr 6517A od společnosti Keithley Instruments má rozlišení $5\frac{1}{2}$ digitu. Znamená to, že může zobrazit 5 číslic o hodnotě 0 až 9 a číslici na první pozici o hodnotě 0 nebo ± 1 .

Citlivost je nejmenší změna měřeného signálu, která může být zachycena měřícím přístrojem. Například měřící přístroj s citlivostí 100 fA zachytí pouze změny proudu, které jsou vyšší než 100 fA . Citlivost číslicového měřícího přístroje závisí jak na rozlišení, tak i na nejmenším měřícím rozsahu.

Teplota prostředí, ve kterém měření probíhá, může také ovlivnit přesnost měření. Výrobci měřících přístrojů proto udávají teplotní rozsah, ve kterém měřící přístroj splňuje jeho specifikace. Pro měření mimo tento teplotní rozsah je zaveden parametr označovaný jako teplotní koeficient, který udává změnu přesnosti měřícího přístroje na jednotku teploty.

Protože většina elektronických přístrojů podléhá degradaci jejich parametrů vlivem stárí, udávají výrobci časový interval, ve kterém by si měl měřící přístroj zachovat svoje původní parametry. Degradace parametrů vlivem stárí se označuje jako časový drift.

Rychlost měření měřícího přístroje se udává jako počet měření za sekundu při určitých pracovních podmínkách. Některé faktory jako doba integrace nebo míra filtrace mají vliv na rychlost měření měřícího přístroje. Změna těchto faktorů ovšem ovlivňuje přesnost a rozlišení měřícího přístroje, je tedy důležité volit kompromis mezi přesností a rychlostí měření.

Činitel potlačení nesouhlasného rušení (NMRR) označuje schopnost měřícího přístroje potlačit šum mezi signálovými vstupy přístroje. Činitel potlačení souhlasného rušení (CMRR) označuje schopnost potlačit šum mezi signálovým vstupem a zemí měřícího přístroje. Souhlasné rušení je většinou méně závažné než nesouhlasné rušení.

4 OPERAČNÍ ZESILOVAČE

Přístroje pro nízkoúrovňová měření obsahují kvalitní operační zesilovače (OZ). Jsou to stejnosměrné zesilovače založené na rozdílovém stupni s tranzistory. Vyrábí se jako integrované obvody v jednom pouzdře. Minimální délka spojů mezi prvky v pouzdře je výhodná z hlediska parazitních vazeb a kmitočtových vlastností [24]. Integrovaný obvod má dva vstupy, jeden vstup je neinvertující (kladný) a druhý je invertující (záporný), dále má jeden výstup. V některých případech může mít i druhý výstup, který je rozdílový. Musí mít dva vývody pro stejnosměrné napájení. Někdy je operační zesilovač vybaven i vývodem pro korekci vstupní napětěvé nesymetrie.

Rozdílový napětěvý zesilovač zesiluje rozdíl napětí mezi neinvertujícím a invertujícím vstupem. Ideální operační zesilovač má při nulovém vstupním rozdílovém napětí (spojení obou vstupů) i nulové výstupní napětí. Ideální operační zesilovač také nesmí ovlivňovat okolní obvody, proto jeho vstupní proudy musí být nulové. Nulové vstupní proudy zajistí nekonečně velké vstupní odpory. Napětěvé zesílení A_u ideálního operačního zesilovače je nekonečně velké a nezávislé na velikosti výstupního proudu. Aby velikost výstupního proudu neovlivňovala velikost výstupního napětí, musí být výstupní odpor ideálního operačního zesilovače nulový. Tyto vlastnosti by měly být platné na všech kmitočtech, ideální operační zesilovač by měl tedy mít nekonečnou šířku pásma [25]. Výstupní napětí ideálního operačního zesilovače se vypočítá:

$$u_{\text{výstupní}} = u_{\text{rozdílové}} \cdot A_u \quad [V; V, -]. \quad (4.1)$$

Vlastnosti reálného operačního zesilovače se ideálnímu pouze blíží. Napětěvé zesílení reálného operačního zesilovače se pohybuje v rozmezí od 10^4 do 10^7 . Velikost výstupního napětí nikdy nepřekročí velikost stejnosměrného napájecího napětí. Operační zesilovače mohou být založeny na bipolární nebo unipolární struktuře. Unipolární operační zesilovače mohou mít vstupní odpor v řádech $T\Omega$ a vstupní klidový proud v jednotkách pA. Bipolární operační zesilovače běžně mívají vstupní odpor v desítkách $M\Omega$ a vstupní klidový proud v desítkách až stovkách nA. Výstupní odpor bývá v jednotkách ohmů. Operační zesilovače s unipolární strukturou jsou schopny zesílit větší vstupní rozdílové napětí než operační zesilovače s bipolární strukturou [4].

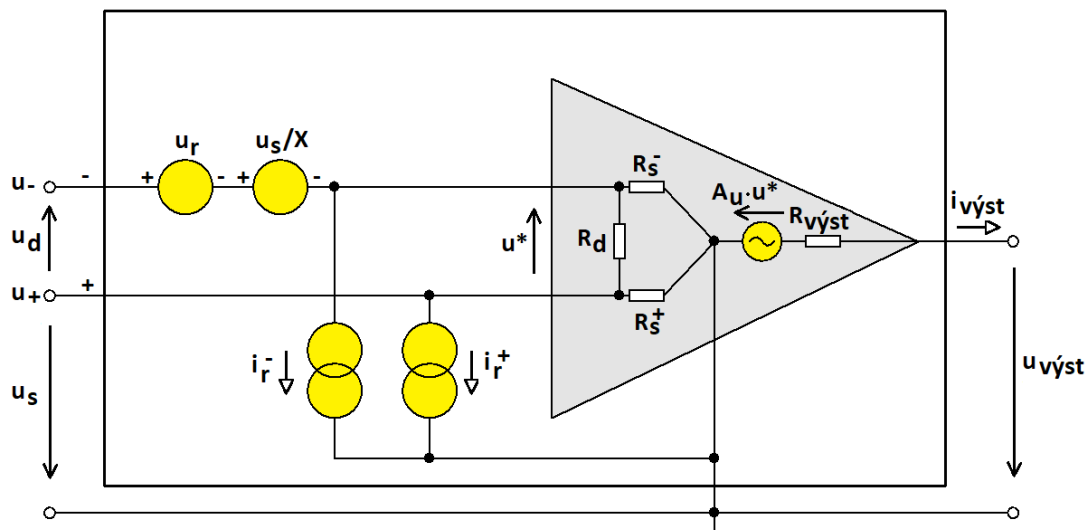
Jako ostatní aktivní prvky je i reálný operační zesilovač nelineární, všechny jeho charakteristiky lze linearizovat a lze sestavit lineární model operačního zesilovače, aniž bychom se dopustili výrazné chyby. Lineární model reálného operačního zesilovače je zobrazen na obrázku 4.1, který je převzat z literatury [25]. Vstupní rozdílové napětí je zde značeno u_d (diferenční), u_s je souhlasné napětí a X je činitel potlačení souhlasného napětí. Vztah u_s/X představuje vliv souhlasného napětí na vstupu. R_d je vstupní diferenční odpor a R_s vstupní souhlasný odpor. Napětí u^* je dáno vztahem:

$$u^* = u_d + u_r + \frac{u_s}{X} \quad [V; V, -]. \quad (4.2)$$

Vstupní rušivý zdroj napětí je zde značen u_r . Skládá se ze stejnosměrné a ze střídavé složky. Stejnosměrná složka je vstupní napětěvá nesymetrie U_{OS} , označovaná také jako vstupní zbytkové napětí nebo napětěvý offset. Udává velikost výstupního napětí, pokud bude vstupní rozdílové napětí nulové. Střídavá složka je vstupní šumové

napětí U_N .

Vstupní rušivé zdroje proudů i_R^+ a i_R^- se také skládají ze stejnosměrné a střídavé složky. Stejnosměrnou složku tvoří vstupní klidové proudy I_B^+ a I_B^- . Aritmetický průměr klidových proudů udává celkový klidový proud I_B , který je většinou uváděn výrobcem v katalogovém listu. Rozdíl klidových proudů udává vstupní proudová nesymetrie I_{OS} , která se také někdy označuje jako vstupní zbytkový proud nebo proudový offset. Střídavou složku rušivých zdrojů proudů tvoří šumové proudy I_N^+ a I_N^- [25].



Obrázek 4.1 Lineární model operačního zesilovače [25]

Vliv nesymetrie vstupů jsme obvykle schopni kompenzovat. Buď má operační zesilovač vývod určený k tomuto účelu, nebo můžeme nesymetrii kompenzovat zapojením externích součástek. Důležitější, než samotná nesymetrie je parametr, který označuje jejich změnu, takzvaný drift. Rozlišujeme změnu nesymetrie se změnou teploty okolí (teplotní drift proudové a napěťové nesymetrie), se změnou napájecího napětí (citlivost na změny napájecího napětí) a se stářím součástky (časová stabilita) [25]. U běžných operačních zesilovačů je teplotní drift řádově $10 \mu V/K$, časový drift je řádově $1 \mu V/měsíc$ a průnik napájecího napětí je řádově $100 \mu V/V$, jak je udáváno v literatuře [26]. Teplotní a napájecí drift způsobují změny vratné, výrobci operačních zesilovačů proto v katalogových listech udávají hodnoty nesymetrie vstupů pro konkrétní hodnoty teploty a napájecího napětí [4].

Pro nízkoúrovňová měření obvykle vyžadujeme operační zesilovače s velkým zesílením (typicky 10^6), malou vstupní proudovou a napěťovou nesymetrií a s malým teplotním a napájecím driftem, velmi malým vstupním klidovým a šumovým proudem a s velkým vstupním odporem. Většinou se volí operační zesilovače s unipolární strukturou s tranzistory typu JFET a v některých případech i s tranzistory typu MOSFET [27]. Takovéto operační zesilovače se označují jako elektrometrické, protože se jich nejčastěji používá v elektrometrech.

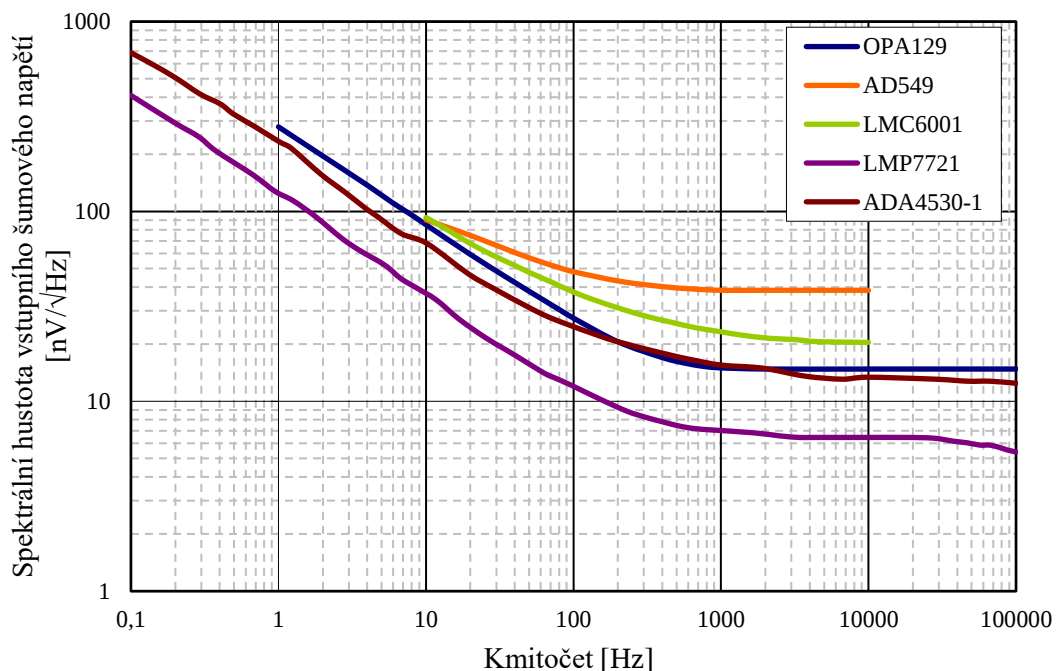
4.1 Výběr elektrometrického operačního zesilovače

Elektrometrických operačních zesilovačů není příliš mnoho. Celkově se jejich počet na trhu příliš nezvyšuje, protože výroba starších modelů bývá postupně nahrazena výrobou nových modelů. Tabulka 4 obsahuje seznam těchto operačních zesilovačů včetně jejich důležitých parametrů podle katalogových listů výrobců [28], [29], [30], [31], [32].

Tabulka 4 Seznam elektrometrických operačních zesilovačů a jejich typické parametry

Operační zesilovač	Výrobce	Vstupní klidový proud	Vstupní proudová nesymetrie	Vstupní napěťová nesymetrie	Tepelný drift	Vstupní šumový proud
ADA4530-1	AD	< 1 fA	< 1 fA	$\pm 8 \mu\text{V}$	$\pm 0,13 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0,07 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ při $f = 0,1 \text{ Hz}$
LMP7721	TI	$\pm 3 \text{ fA}$	$\pm 6 \text{ fA}$	$\pm 26 \mu\text{V}$	$\pm 1,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0,01 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ při $f = 1 \text{ kHz}$
OPA129	TI	$\pm 30 \text{ fA}$	$\pm 30 \text{ fA}$	$\pm 0,5 \text{ mV}$	$\pm 3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0,1 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ při $f = 10 \text{ kHz}$
AD549L	AD	$\pm 40 \text{ fA}$	$\pm 20 \text{ fA}$	$\pm 0,3 \text{ mV}$	$\pm 3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0,11 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ při $f = 1 \text{ kHz}$
LMC6001A	TI	$\pm 10 \text{ fA}$	$\pm 5 \text{ fA}$	$\pm 0,7 \text{ mV}$	$\pm 2,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0,13 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ při $f = 1 \text{ kHz}$

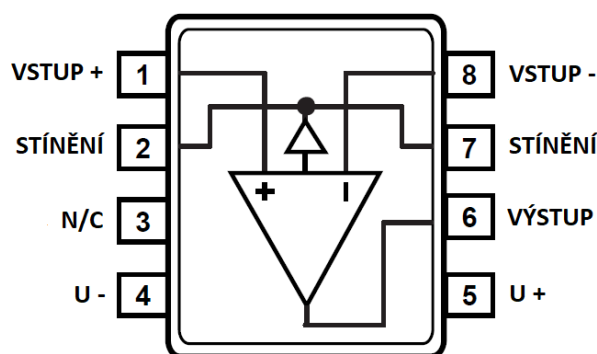
Na obrázku 4.2 je zobrazena spektrální hustota vstupního šumového napětí elektrometrických operačních zesilovačů. Křivky na obrázku jsou převzaty z grafů udávaných výrobcí v katalogových listech [28], [29], [30], [31], [32].



Obrázek 4.2 Spektrální hustota vstupního šumového napětí elektrometrických OZ

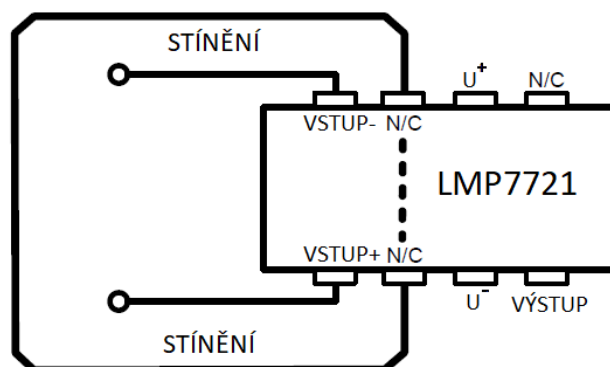
Z obrázku je patrné, že operační zesilovač LMP7721 je na tom z hlediska vstupního šumového napětí nejlépe. Při měření velmi malých proudů jsou ovšem důležitějšími parametry velikost vstupního klidového proudu a vstupního šumového proudu. Výhodou jsou také vývody pro aktivní nebo pasivní stínění vstupu. Vlastnosti a parametry jednotlivých operačních zesilovačů jsou probrány v následujícím textu.

Operační zesilovač ADA4530-1 vyrábí společnost Analog Devices. V katalogovém listu [28] jsou udávány hodnoty při teplotě 25 °C a napájecím napětí 10 V. Typická hodnota vstupního klidového proudu při vlhkosti menší než 50 % je zde udávána $I_B < 1$ fA a maximální hodnota je udávána $I_B = \pm 20$ fA. Typická hodnota vstupní proudové nesymetrie by měla být $I_{OS} < 1$ fA a maximální $I_{OS} = \pm 20$ fA. Typickou hodnotu vstupní napěťové nesymetrie udává výrobce $U_{OS} = \pm 8$ μ V a maximální $U_{OS} = \pm 40$ μ V. Typická hodnota tepelného driftu je $\pm 0,13$ μ V/°C. Kromě křivky na obrázku 4.2 výrobce specifikuje vstupní šumové napětí na několika kmitočtech. Na kmitočtu 10 Hz je výrobcem udávána hodnota $U_N = 80$ nV/√Hz a na kmitočtu 1 kHz výrobce udává hodnotu $U_N = 16$ nV/√Hz. Vstupní šumový proud je zde udáván pouze na kmitočtu 0,1 Hz. Hodnota na tomto kmitočtu je $I_N = 0,07$ fA/√Hz. Z tohoto údaje lze usuzovat, že operační zesilovač ADA4530-1 neprodukuje nízkofrekvenční blikavý šum. Šířku pásma výrobce udává 2 MHz a rychlost přeběhu 1,4 V/μs. Součástí tohoto operačního zesilovače je také integrovaný buffer, jehož vývody lze použít k aktivnímu stínění jednoho vstupního vývodu. Rozvržení vývodů je na obrázku 4.3. Výrobce v katalogovém listu také doporučuje použít kvalitní vysokohmové rezistory na bázi oxidu kovu, které produkují málo nízkofrekvenčního blikavého šumu 1/f.



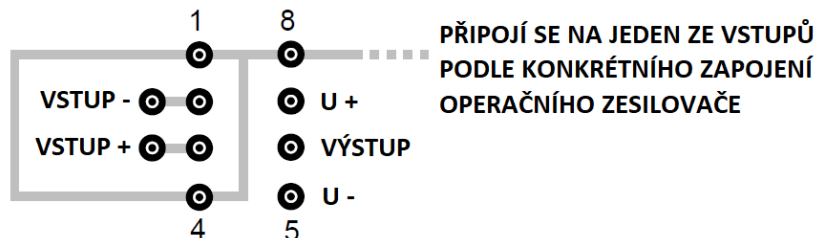
Obrázek 4.3 Rozvržení vývodů operačního zesilovače ADA4530-1 [28]

LMP7721 je další velmi přesný operační zesilovač. Tento model je od společnosti Texas Instruments. Výrobce udává v katalogovém listu [29] při teplotě 25 °C a napájecím napětí 5 V typickou hodnotu vstupního klidového proudu $I_B = \pm 3$ fA a maximální hodnotu $I_B = \pm 20$ fA. Typická vstupní proudová nesymetrie by pak měla být $I_{OS} = \pm 6$ fA a maximální $I_{OS} = \pm 40$ fA. Typická hodnota vstupní napěťové nesymetrie je udávána $U_{OS} = \pm 26$ μ V a typická hodnota tepelného driftu je $\pm 1,5$ μ V/°C. Vstupní šumové napětí a vstupní šumový proud jsou výrobcem specifikované na kmitočtu 1 kHz $U_N = 6,5$ nV/√Hz a $I_N = 0,01$ pA/√Hz. Dále výrobce udává šířku pásma 17 MHz a rychlost přeběhu 17,26 V/μs. Vstupní rozdílové napětí může být maximálně 0,3 V. Operační zesilovač LMP7721 disponuje vývody, které lze použít k pasivnímu stínění vstupů na desce plošných spojů podle obrázku 4.4. Připojením stínícího prstence k externímu bufferu je možné jeden ze vstupů stínit aktivně.



Obrázek 4.4 Stínění vstupů operačního zesilovače LMP7721 [29]

Dalším elektrometrickým operačním zesilovačem je OPA129, který je také od společnosti Texas Instruments. Výrobce ovšem doporučuje vybírat novější operační zesilovač LMP7721, protože pro operační zesilovač OPA129 ukončuje prodej (stav na konci roku 2019). Na UTEE je ovšem několik kusů stále k dispozici. Tento operační zesilovač má vývody, které lze použít k pasivnímu stínění vstupů na desce plošných spojů podobně jako u operačního zesilovače LMP7721, ale navíc má i speciální vývod pro aktivní stínění pouzdra, který se připojí na jeden z jeho vstupů podle konkrétního zapojení operačního zesilovače. Doporučené rozvržení desky plošných spojů v okolí operačního zesilovače OPA129 je na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5 Doporučené rozvržení desky plošných spojů v okolí operačního zesilovače OPA129 [30]

Operační zesilovač AD549 od společnosti Analog Devices se vyrábí v několika různých variantách. Nejlepší je varianta AD549L. Stejně jako operační zesilovač OPA129 disponuje vývodem k aktivnímu stínění pouzdra, který se připojuje na jeden z jeho vstupů podle konkrétního zapojení operačního zesilovače.

LMC6001 vyrábí společnost Texas Instruments. Je také vyráběn v několika různých variantách. Nejlepší je varianta LMC6001A. Tento operační zesilovač ovšem nemá žádný vývod pro aktivní stínění vstupního vývodu nebo pouzdra. Výrobce doporučuje pouze pasivní stínění pomocí stínicího prstence okolo obou vstupů připojeného na zem. Další možností je použití externího bufferu k aktivnímu stínění. Poslední způsob, který výrobce v katalogovém listu zmiňuje, je pouhé zvednutí vstupního vývodu do vzduchu a použití vzdušného spoje. Tento způsob je velmi jednoduchý a zároveň velice efektivní.

Z hlediska vstupního klidového proudu je na tom zdaleka nejlépe operační zesilovač ADA4530-1. Další jeho velkou výhodou je integrovaný buffer k aktivnímu stínění.

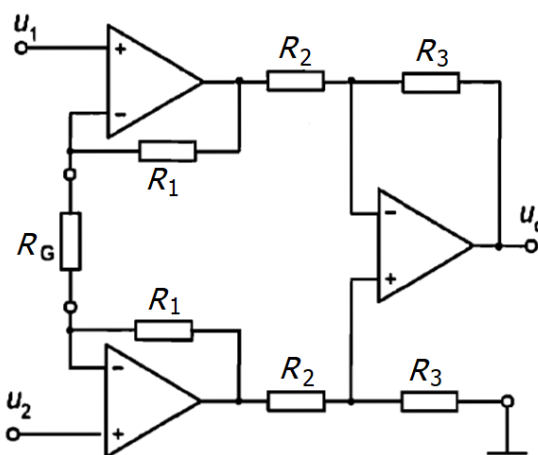
Operační zesilovač LMP7721 je nejlepší z hlediska vstupního šumového napětí. Jeho vstupní klidový proud je o trochu vyšší než u operačního zesilovače ADA4530-1. Nevýhodou tohoto modelu je, že má nejvyšší vstupní šumový proud ze všech porovnávaných operačních zesilovačů. Další nevýhodou je skutečnost, že vstupní vývod je bez použití externího bufferu možné stínit pouze pasivně. Při návrhu elektrometrického zesilovače se bude dále uvažovat o použití operačních zesilovačů ADA4530-1 a LMP7721.

4.2 Přístrojové zesilovače

Přístrojové zesilovače jsou rozdílové zesilovače s uzavřenou zpětnou vazbou, které zesilují rozdíl vstupních napětí a potlačují souhlasné napětí na jejich vstupech [33]. Používají se k zesílení velmi malých signálů za přítomnosti rušení a šumu. Skládají se ze tří operačních zesilovačů zapojených podle obrázku 4.6. Zesílení přístrojových zesilovačů se nastavuje rezistorem R_G a není ovlivněno vnitřním odporem zdrojů signálů. Napěťové zesílení přístrojových zesilovačů je dáno vztahem:

$$A_u = 1 + \frac{2 \cdot R_1}{R_G} \quad [-; \Omega, \Omega] . \quad (4.3)$$

Vstupní impedance obou rozdílových vstupů mají stejnou velikost, typicky $10^9 \Omega$ až $10^{12} \Omega$ a vstupní klidové proudy bývají u přístrojových zesilovačů velmi malé. Některé přístrojové zesilovače se vyrábí jako integrovaný obvod, přepínání rozsahu je pak možné provádět změnou velikosti externího rezistoru R_G .

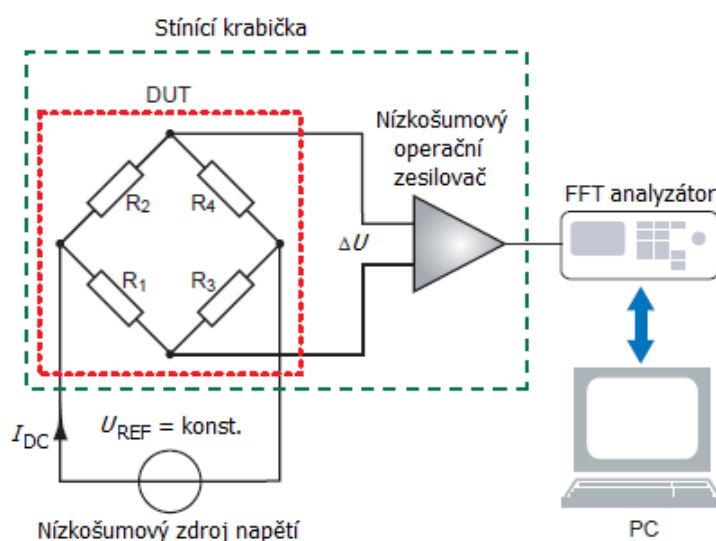


Obrázek 4.6 Přístrojový zesilovač se třemi operačními zesilovači [33]

Na UTEE je k dispozici několik kusů přístrojových zesilovačů INA116 od společnosti Texas Instruments. Výrobce už ukončil prodej tohoto přístrojového zesilovače a jako náhradu nabízí model INA121. Jedná se o monolitický přístrojový zesilovač s unipolární strukturou. Přístrojový zesilovač INA116 také disponuje vývody na aktivní stínění vstupů. Výrobce doporučuje tyto vývody připojit na vnější stínící vodič přívodního koaxiálního vedení [34].

5 METODY MĚŘENÍ ŠUMU REZISTORŮ A OPERAČNÍCH ZESILOVAČŮ

Pro měření blikavého šumu rezistorů se používá stejnosměrná měřicí metoda s Wheatstoneovým můstkem. Wheatstoneův můstek se běžně používá k přesnému měření odporu a malých změn odporu. Lze jej ovšem použít i k měření blikavého šumu rezistorů. Výhodou je, že není nutné použít vysokoohmový drátem vinutý odpor bez přídavného šumu $1/f$, jak je uvedeno v normě na měření blikavého šumu rezistorů z roku 1961 [35]. Nevýhodou je nutnost použití čtyř stejných rezistorů, přičemž se měří průměrný šum těchto čtyř kusů. Uspořádání měřicího systému s Wheatstoneovým můstkem pro měření blikavého šumu rezistorů je na obrázku 5.1.

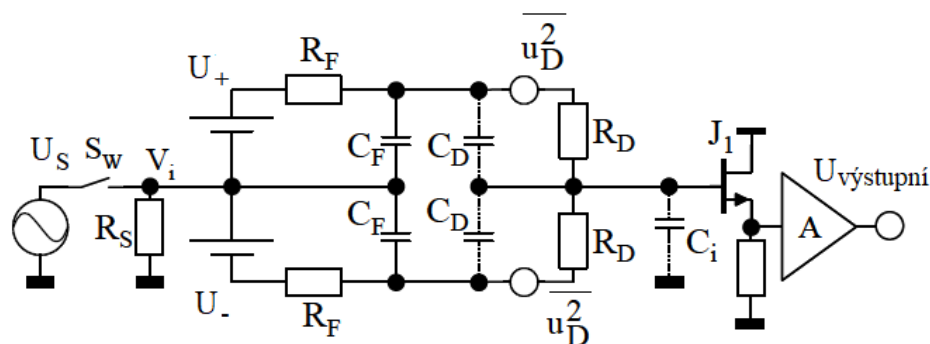


Obrázek 5.1 Uspořádání měřicího systému s Wheatstoneovým můstkem pro měření blikavého šumu rezistorů [19]

Pro vyvážený Wheatstoneův můstek musí platit podmínka $R_1 = R_4 = R_0$ a $R_2 = R_3 = R_0$. Všechny čtyři rezistory tedy musí mít stejnou hodnotu. Stejnosměrné referenční napětí je připojeno na jednu diagonálu Wheatstoneova můstku a přes všechny rezistory protéká stejnosměrný proud $I_{DC}/2$. Pro měření blikavého šumu rezistorů je proud I_{DC} dodáván do obvodu nastavitelným nízkošumovým zdrojem napětí.

Na druhé diagonále je poté možné změřit rozdílové napětí na můstku ΔU . Rozdílové napětí je dáno nevyvážeností můstku vlivem rozdílného odporu dvou protilehlých rezistorů v můstku. Pokud je Wheatstoneův můstek přesně vyvážený, rozdílové napětí odpovídá šumovému napětí rezistorů a šumovému pozadí měřicího systému. Protože šumové příspěvky jednotlivých rezistorů jsou nekorelované, celkový šum celého můstku se dá považovat za šum jediného rezistoru, na kterém je úbytek napětí roven napětí přiloženému na můstek [19]. Změřený šum je dán průměrem šumů všech čtyř rezistorů. Šumové napětí je nutné zesílit pomocným rozdílovým operačním zesilovačem s velmi nízkým vstupním šumem, aby převyšovalo šumový práh spektrálního analyzátoru, kterým je poté měřena efektivní hodnota šumového napětí.

Blikavý šum rezistorů je možné také jednoduše změřit pomocí dvou stejných rezistorů podle zapojení na obrázku 5.2 z článku [36]. Základem zapojení jsou dva symetrické zdroje napětí, které musí do obvodu dodávat naprosto stejnou úroveň napětí. Dva zdroje napětí je možné nahradit jedním zdrojem napětí a dvěma nízkošumovými operačními zesilovači, jedním do každé větve. Jeden zesilovač v invertujícím zapojení a druhý v neinvertujícím zapojení. Jejich zesílení musí být rovno jedné. Rezistory R_F a kondenzátory C_F představují filtr typu dolní propust, který by měl filtrovat rušivé síťové signály ze zdrojů. Rezistory R_D jsou dva identické měřené rezistory a kondenzátory C_D v zapojení představují jejich parazitní kapacity. Na měřených rezistorech může být libovolný úbytek napětí, protože na jejich společném uzlu bude vždy napětí proti zemi odpovídat pouze jejich šumovému napětí a šumovému pozadí měřicího systému podobně jako u vyváženého Wheatstoneova můstku. JFET tranzistor J_1 představuje předzesilovač a není nutné ho do obvodu přidávat, pokud se použije přesný nízkošumový operační zesilovač. Kondenzátor C_i slouží k potlačení rušivých signálů, které by mohly vznikat případným mechanickým kmitáním (mikrofonní jev) a také ho není nutné do obvodu přidávat. Zdroj střídavého napětí U_S se do obvodu připojuje pouze v případě, že chceme určit přenosovou funkci zapojení.



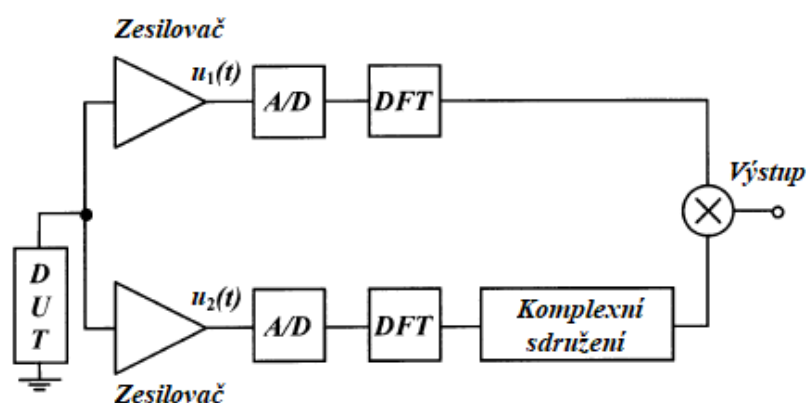
Obrázek 5.2 Obvodové zapojení k měření blikavého šumu rezistorů se dvěma stejnými rezistory [36]

Pro dosažení přesnějších výsledků by u obou metod mělo být nejprve změřeno šumové pozadí měřicího systému a mělo by být použito ke korekci hodnot, které byly naměřeny s rezistory. Výsledná hodnota se určí z průměrování dostatečného množství měření. Efektivní hodnota se poté musí přepočítat příslušnými vztahy na spektrální hustotu. Ve vztazích musí být zahrnuto zesílení pomocného operačního zesilovače i nastavená šířka pásma použitého spektrálního analyzátoru.

Obě metody mají také své nedostatky. Omezení je dáno tepelným šumem rezistorů a vstupním šumovým napětím použitého pomocného operačního zesilovače. Ze zdroje napětí mohou do obvodu vstupovat rušivé signály na kmitočtu 50 Hz a 150 Hz, proto je někdy výhodné použít k napájení baterii. Celé měřicí uspořádání by se mělo uzavřít do stínící krabice pro potlačení vnějšího elektromagnetického rušení.

Obvodové zapojení na obrázku 5.2 je možné upravit, pokud využijeme vlastnosti nekorelovaného šumu měřeného subjektu a šumového pozadí měřicího systému podle článku [37]. Autoři článku uvádějí, že je možné jednoduše změřit šum měřeného subjektu, pokud je jeho úroveň alespoň o 10 dB vyšší než šumové pozadí měřicího systému. Pokud se tato podmínka nedá splnit, je vhodné využít dvou kanálů spektrálního

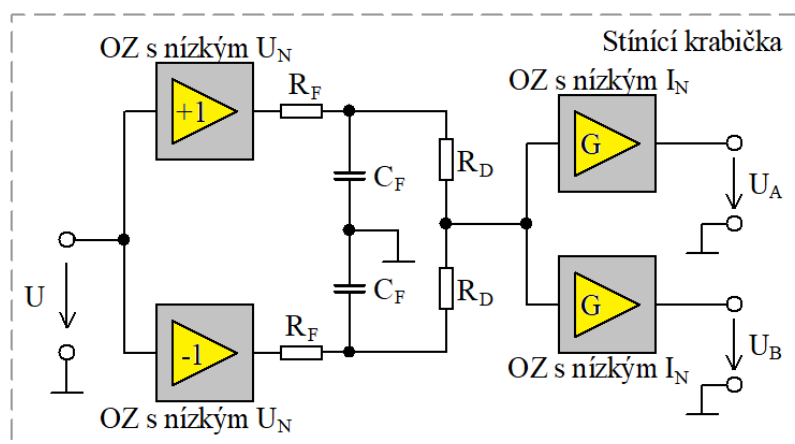
analyzátoru a jejich korelace podle obrázku 5.3. Tento postup využívá dva nízkošumové operační zesilovače připojené za měřený subjekt. Následně je v obou kanálech spektrálního analyzátoru provedena diskrétní Fourierova transformace a pomocí matematických operací se získá vzájemná korelace spekter signálů na výstupu obou operačních zesilovačů. Šum, který v obvodu způsobují operační zesilovače, je tímto způsobem ve velké míře odstraněn, protože je nekorelovaný, na rozdíl od šumu měřeného subjektu.



Obrázek 5.3 Blokový diagram k měření šumu pomocí korelace dvou kanálů spektrálního analyzátoru [37]

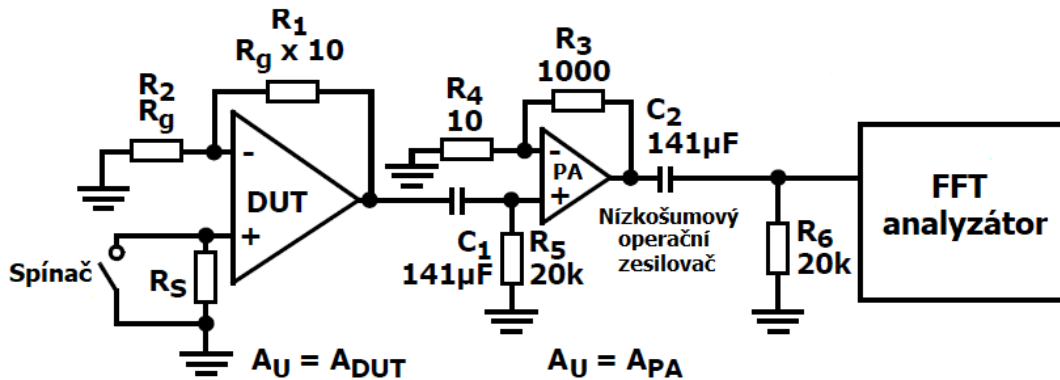
Je evidentní, že oba zesilovače musí mít stejně velké zesílení, je potřeba použít rezistory s malou odchylkou. Volba operačních zesilovačů závisí na druhu měřeného šumu. Při měření šumového napětí je u operačních zesilovačů důležitým parametrem vstupní šumový proud, protože příspěvek vstupního šumového napětí bude odstraněn při korelaci kanálů spektrálního analyzátoru. Při měření šumového proudu je naopak důležitým parametrem operačních zesilovačů vstupní šumové napětí.

S využitím principů naznačených na obrázcích 5.2 a 5.3 je možné navrhnout obvodové zapojení pro co nejpřesnější měření blikavého šumu rezistorů. Zapojení je na obrázku 5.4. Na výstupy U_A a U_B se připojí vstupy spektrálního analyzátoru.



Obrázek 5.4 Obvodové zapojení k měření blikavého šumu rezistorů se dvěma rezistory a dvěma kanály spektrálního analyzátoru

Měření vstupního šumového napětí a vstupního šumového proudu operačních zesilovačů se provádí podle obrázku 5.5, který je převzat z literatury [38].



Obrázek 5.5 Uspořádání měřicího systému pro měření vstupního šumového napětí a proudu operačních zesilovačů [38]

Uspořádání měřicího systému pro měření vstupního šumového napětí a proudu operačních zesilovačů se příliš neliší od uspořádání měřicího systému pro měření blikavého šumu rezistorů. Místo Wheatstoneova můstku je zde zapojený testovaný operační zesilovač a za ním je v kaskádě zapojený pomocný nízkošumový operační zesilovač. Zesílení obou operačních zesilovačů se násobí, v decibelech se sčítá. Měření vstupního šumového napětí se provádí bez rezistoru R_S . Tento rezistor se použije při měření vstupního šumového proudu k převodu proudu na napětí. Velikost rezistoru R_S by měla být zvolena podle vztahu z literatury [38]:

$$R_S^2 \cdot I_{N_vstup}^2 \geq 4 \cdot k \cdot T \cdot R_S \quad [\Omega, A; JK^{-1}, K]. \quad (5.1)$$

Pro měření vstupního šumového proudu operačních zesilovačů s unipolární strukturou, jejichž úroveň vstupního šumového proudu je velmi nízká, je výhodnější vycházet z návrhu měřicí metody uvedené v literatuře [39]. Podle tohoto návrhu se z uspořádání měřicího systému na obrázku 5.5 odstraní rezistory R_S a R_2 . Zapojení měřeného operačního zesilovače poté odpovídá zapojení zpětnovazebního ampérmetru, které je detailně probráno v následující kapitole. Na vstupu operačního zesilovače je pouze vstupní rušivý proud invertující větve, který je poté podle principu zpětnovazebního ampérmetru převeden na výstupní napětí.

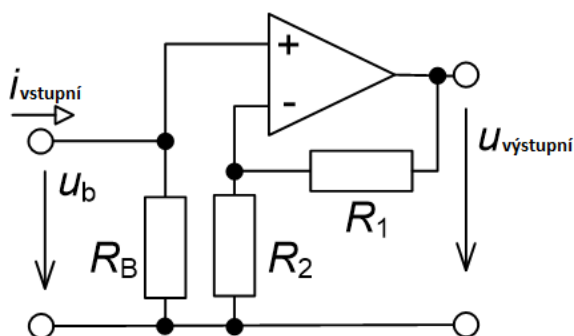
Napájení měřeného operačního zesilovače by mělo být z nízkošumového zdroje napětí. Pro potlačení rušivých kmitočtů ze sítě je opět vhodné použít baterii. Měření i pomocný operační zesilovač by měli být ve stínící krabici. Omezení určuje tepelný šum rezistorů a vstupní šumové napětí a proud použitého pomocného operačního zesilovače. Měření by mělo být provedeno i bez měřeného operačního zesilovače pro zjištění šumového pozadí měřicího systému. Při přepočtu efektivní hodnoty na spektrální hustotu je nutné zahrnout do výpočtu zesílení obou operačních zesilovačů.

6 ELEKTROMETRICKÉ ZESILOVAČE VELMI MALÝCH PROUDŮ

Pro měření malých proudů se používají velmi přesné operační zesilovače. Měřená veličina je převáděna na napětí, které je zesíleno operačním zesilovačem a poté měřeno. Měřená veličina je v našem případě elektrický proud a elektrický náboj.

6.1 Elektrometrický zesilovač s bočníkovým ampérmetrem

Bočníkové ampérmetry se používají v laboratorních digitálních multimetrech a v některých typech elektrometrů [15]. Proud se převádí na napětí pomocí bočníku zapojeným před operačním zesilovačem. Obvodové zapojení bočníkového ampérmetru je na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1 Obvodové zapojení bočníkového ampérmetru [15]

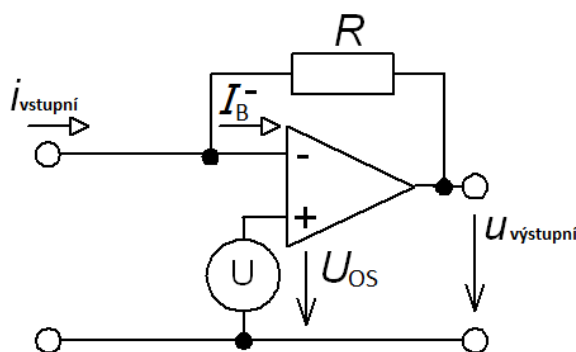
Vstupní proud protéká přes bočník a způsobuje na něm nežádoucí úbytek napětí u_b označovaný jako vložené napětí. Odpor bočníku by měl být co nejmenší, aby se minimalizovala velikost vložení napětí. Rezistory s menším odporem mají přesnější hodnotu, lepší časovou a teplotní stabilitu než rezistory s velkým odporem. Nižší odpor bočníku také zlepšuje dynamické vlastnosti ampérmetru, protože snižuje jeho časovou odezvu [15]. Snižování odporu bočníku však snižuje poměr signálu k šumu, což ve výsledku znamená, že snižování jeho velikosti je omezené a musí se volit kompromis. Velikost výstupního napětí bočníkového ampérmetru je dána vztahem:

$$u_{výstupní} = i_{vstupní} \cdot R_B \cdot \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) \quad [\text{V}; \text{A}, \Omega] . \quad (6.1)$$

V tomto zapojení lze použít přístrojový zesilovač, který umožňuje snadné nastavení zesílení pro přepínání rozsahů. Elektrometrický zesilovač s bočníkovým ampérmetrem je k dispozici na UTEE s přístrojovým zesilovačem INA116. Právě tento starý elektrometrický zesilovač by měl být ve stávajícím měřicím uspořádání s aspiračním kondenzátorem nahrazen nově navrženým elektrometrickým zesilovačem.

6.2 Elektrometrický zesilovač se zpětnovazebním ampérmetrem

Pikoampérmetry a novější elektrometry používají pouze zpětnovazební ampérmetry [15]. Základní zapojení využívá zapojení operačního zesilovače jako převodníku proudu na napětí. Schéma zapojení zpětnovazebního ampérmetru je na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2 Obvodové zapojení zpětnovazebního ampérmetru [15]

Vstupní proud je přiveden na invertující vstup. Neinvertující vstup je uzemněn a podle definice ideálního operačního zesilovače musí být proud procházející invertujícím vstupem nulový. Vstupní proud tedy protéká rezistorem ve zpětné vazbě a vyvolá na něm úbytek napětí rovný výstupnímu napětí. Výstupní napětí se potom určí vztahem:

$$u_{\text{výstupní}} = -i_{\text{vstupní}} \cdot R \quad [\text{V}; \text{A}, \Omega]. \quad (6.2)$$

Vložené napětí u zpětnovazebního ampérmetru určuje pouze velikost vstupní napětěvé nesymetrie U_{OS} . Toto napětí je možné kompenzovat „nulováním“. Minimální hodnota proudu, který dokáže operační zesilovač zesílit s určitou chybou udávanou výrobcem operačního zesilovače, je dána vstupním klidovým proudem I_B^- invertujícího vstupu. Pro měření nízkých proudů se volí zesilovače s co nejnižší hodnotou vstupního klidového proudu. Vstupní napětěvá nesymetrie a vstupní klidový proud jsou teplotně závislé a jejich změna s teplotou způsobuje změnu výstupního napětí, proto je potřeba udržovat zpětnovazební ampérmetr během měření ve stabilní teplotě. Vezmeme-li v úvahu tyto zdroje nepřesností, pak vztah pro výstupní napětí přechází podle literatury [39] do tvaru:

$$u_{\text{výstupní}} = \frac{u_{\text{výstupní}}}{A_u} - (i_{\text{vstupní}} - I_B^-) \cdot R + U_{OS} \quad [\text{V}; -, \text{A}, \Omega, \text{V}], \quad (6.3)$$

kde $u_{\text{výstupní}}$ je velikost výstupního napětí, A_u je napětěvé zesílení operačního zesilovače, $i_{\text{vstupní}}$ je vstupní proud, I_B^- je vstupní klidový proud invertujícího vstupu, R je velikost zpětnovazebního rezistoru a U_{OS} je vstupní napětěvá nesymetrie.

Pokud má použitý operační zesilovač dostatečně velké zesílení, vstupní napětěvá nesymetrie je správně kompenzována a vstupní klidový proud je dostatečně malý a obvod teplotně stabilizován, můžeme pro určení výstupního napětí použít jednodušší vztah (6.2).

Zpětnovazební ampérmetr je svými vlastnostmi blízký ideálnímu ampérmetru [15]. Jeho citlivost je určena především zpětnovazebním rezistorem, na kterém se vytváří Johnsonův tepelný šum i blikavý šum $1/f$. Výstupní šumové napětí je dáno vztahem:

$$U_{N_{\text{výstup}}} = \sqrt{U_N^2 + (I_N^- \cdot R)^2 + 4k_B R T B_N} \quad [V; V, A, \Omega, JK^{-1}, K, Hz], \quad (6.4)$$

kde U_N je velikost vstupního šumového napětí, I_N^- je vstupní šumový proud invertujícího vstupu, R je velikost zpětnovazebního rezistoru, k_B je Boltzmannova konstanta ($k_B = 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$), T je absolutní teplota rezistoru a B_N je šumová šířka pásma.

Po přepočtu na vstupní šumový proud dostáváme výraz:

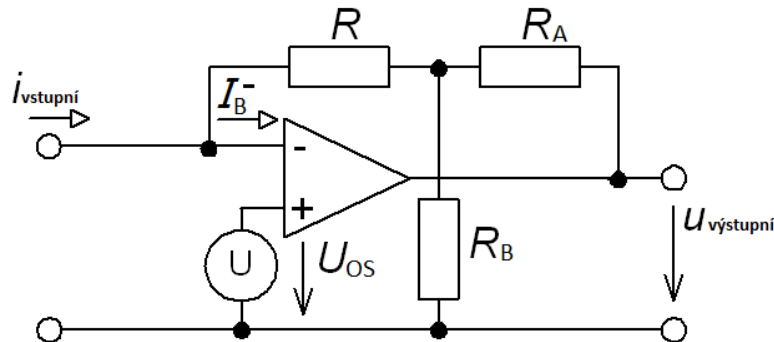
$$I_{N_{\text{vstup}}} = \sqrt{\left(\frac{U_N}{R}\right)^2 + (I_N^-)^2 + \frac{4k_B T B_N}{R}} \quad [A; V, \Omega, A, JK^{-1}, K, Hz]. \quad (6.5)$$

Při návrhu zpětnovazebního ampérmetru je tedy důležitá volba přesného vysokoohmového rezistoru. Zde nastává problém s dostupností přesných stabilních vysokoohmových rezistorů, které produkují málo šumu.

Používají se různé modifikace tohoto zapojení. Pro zvýšení rychlosti měření se kompenzuje vliv parazitní kapacity zpětnovazebního rezistoru přidáním druhé časové konstanty podle obrázku 3.4. Pro snížení celkového vstupního klidového proudu I_B je možné před neinvertující vstup připojit rezistor. Na rezistoru vzniká nežádoucí vložné napětí, toto řešení tedy není příliš vhodné. Pokud je potřeba měnit zesílení operačního zesilovače a zachovat při tom stejný zpětnovazební rezistor, můžeme zapojit do zpětnovazební větve odporový T-článek [15]. Výstupní napětí je potom definováno vztahem:

$$u_{\text{výstupní}} = -i_{\text{vstupní}} \cdot R \cdot \left(1 + \frac{R_A}{R_B}\right) \quad [V; A, \Omega]. \quad (6.6)$$

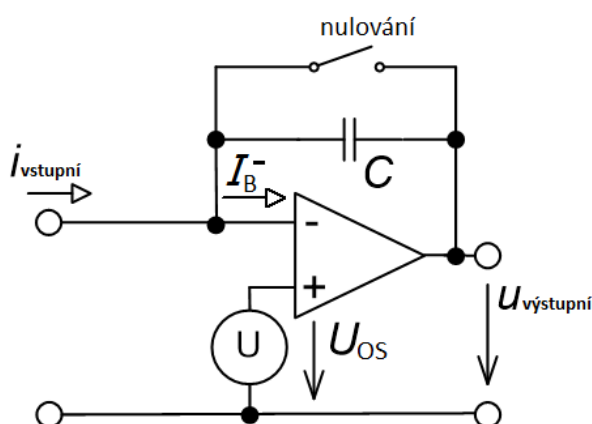
Zapojením T-čláčku se zhorší šumové vlastnosti zpětnovazebního ampérmetru. Podle literatury [39] je použití T-čláčku výhodné pouze u operačních zesilovačů s malou napěťovou nesymetrií. Obvodové zapojení je podle obrázku 6.3.



Obrázek 6.3 Obvodové zapojení zpětnovazebního ampérmetru s T-článkem [15]

6.3 Elektrometrický zesilovač se zpětnovazebním coulombmetrem

Zpětnovazební coulombmetry se používají ve všech elektrometrech, které jsou schopny měřit elektrický náboj [15]. Elektrometry jsou vhodné k měření náboje, protože nízký vstupní klidový proud nemění přenesený náboj. Zpětnovazební rezistor je v tomto případě nahrazen kondenzátorem. Johnsonův tepelný šum a blikavý šum $1/f$ rezistoru ve zpětnovazebním coulombmetru odpadají. Obvodové zapojení je na obrázku 6.4. V podstatě se jedná o integrační zesilovač, který převádí náboj akumulovaný ve zpětnovazebním kondenzátoru na výstupní napětí. Zpětnovazební coulombmetr má navíc vlastnosti filtru typu dolní propust.



Obrázek 6.4 Obvodové zapojení zpětnovazebního coulombmetru [15]

Před měřením se musí nejprve vynulovat počáteční náboj kondenzátoru. Poté probíhá samotné měření. Výstupní napětí zpětnovazebního coulombmetru se určí ze vztahu:

$$u_{výstupní} = -\frac{1}{C} \int_0^{T_{nabíjení}} i_{vstupní}(t) dt = \frac{-Q}{C} \quad [V; F, s, A, C], \quad (6.7)$$

kde C je kapacita zpětnovazebního kondenzátoru, $T_{nabíjení}$ je doba nabíjení kondenzátoru, $i_{vstupní}$ je vstupní proud a Q je velikost náboje akumulovaného v kondenzátoru. Pokud známe kapacitu kondenzátoru, dobu nabíjení a napětí, na které se během doby nabíjení nabil, můžeme vypočítat střední hodnotu proudu protékajícího kondenzátorem:

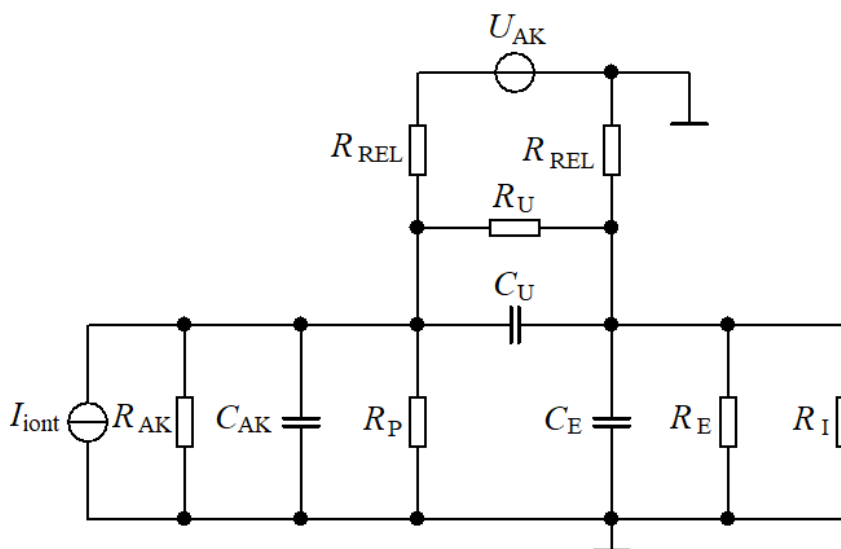
$$I_{vstupní} = \frac{C \cdot U_{výstupní}}{T_{nabíjení}} \quad [A; F, V, s]. \quad (6.8)$$

Měření tedy obvykle probíhá tak, že zvolíme pevnou dobu nabíjení kondenzátoru o známe kapacitě a změříme na jaké napětí byl nabit. Poté jsme schopni vypočítat střední hodnotu vstupního proudu po dobu nabíjení kondenzátoru. Důležité je dodržet přesnou dobu nulování a dobu nabíjení, zapojení musí obsahovat kvalitní časovací obvod.

6.4 Schéma aspiračního kondenzátoru s elektrometrickým zesilovačem

Na obrázku 6.5 je náhradní schéma aspiračního kondenzátoru s elektrometrickým zesilovačem tvořené pasivními součástkami, které je převzaté z literatury [40]. I_{iont} je proud úměrný koncentraci vzdušných iontů, R_{AK} je svodový odpor aspiračního kondenzátoru, který je dán odporem teflonu mezi vnější a vnitřní elektrodou aspiračního kondenzátoru a C_{AK} je kapacita aspiračního kondenzátoru, která je určena vtahem pro kapacitu válcového kondenzátoru (1.3). Dále v náhradním schématu následuje odpor teflonové průchodky R_{P} , kapacita zdroje polarizačního napětí C_{U} , vnitřní odpor zdroje polarizačního napětí R_{U} a svodový odpor nabíjecích relé R_{REL} . U_{AK} je zdroj polarizačního napětí. Poslední část náhradního schématu tvoří odpor a kapacita přívodů k elektrometrickému zesilovači R_{E} a C_{E} a vstupní odpor samotného elektrometrického zesilovače R_{I} .

V literatuře [5] byl pro náhradní schéma aspiračního kondenzátoru vypočítán proudový přenos v závislosti na velikosti vstupního odporu elektrometrického zesilovače. Z výsledků vyplývá, že se snižujícím se vstupním odporem elektrometrického zesilovače narůstá proudový přenos. Při měření proudu pomocí bočníkového ampérmetru je při nízké hodnotě odporu bočnicku i malé snímací napětí, což má za následek snížení poměru signálu k šumu. Z tohoto důvodu je výhodné použít k měření koncentrace vzdušných iontů s aspiračním kondenzátorem zpětnovazební ampérmetr nebo zpětnovazební coulombmetr.



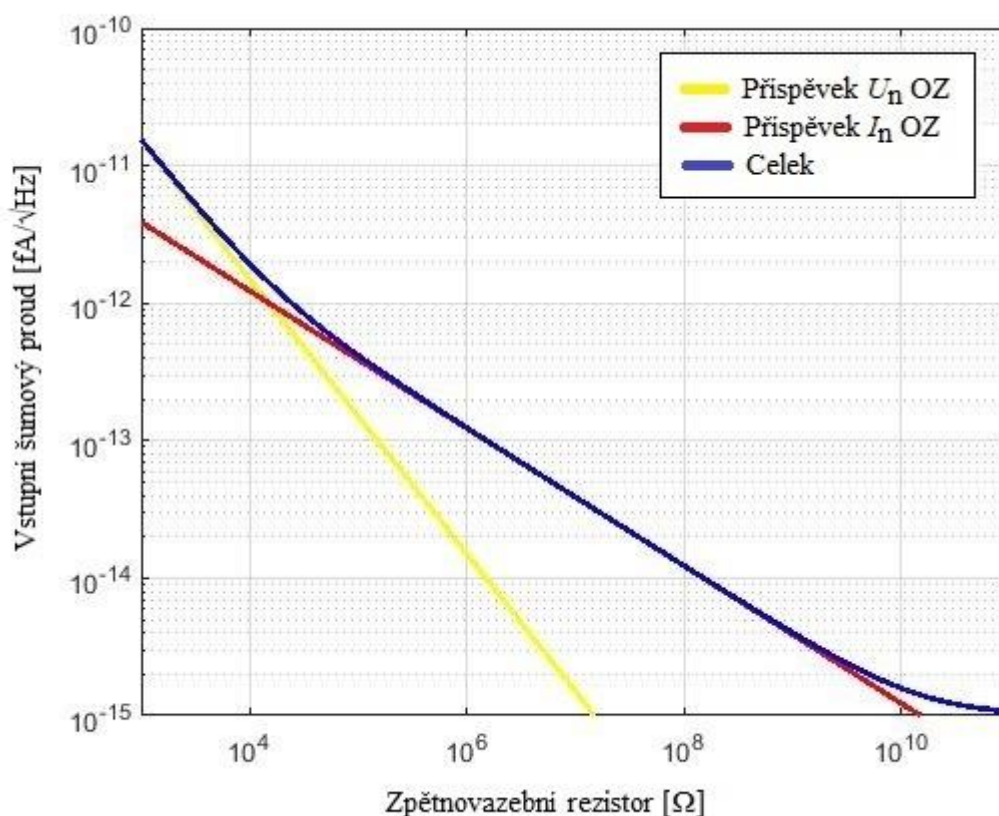
Obrázek 6.5 Náhradní schéma aspiračního kondenzátoru s elektrometrickým zesilovačem [5]

7 POČÍTAČOVÉ SIMULACE

Počítačové simulace byly prováděny v programu Matlab od společnosti MathWorks, v programu Tina-TI verze 9 od společnosti DesignSoft a v programu LTspice XVII od společnosti Analog Devices. Byla simulována pouze spektrální hustota vstupního šumového proudu zpětnovazebního ampérmetru a zpětnovazebního coulombmetru pro dva operační zesilovače. Jedná se o ADA4530-1 a LMP7721. Pro bočníkový ampérmetr nebyla simulace prováděna, protože podle rozboru v kapitole 6.4 není toto zapojení příliš vhodné k měření koncentrace vzdušných iontů s aspiračním kondenzátorem.

7.1 Vstupní šumový proud zpětnovazebního ampérmetru

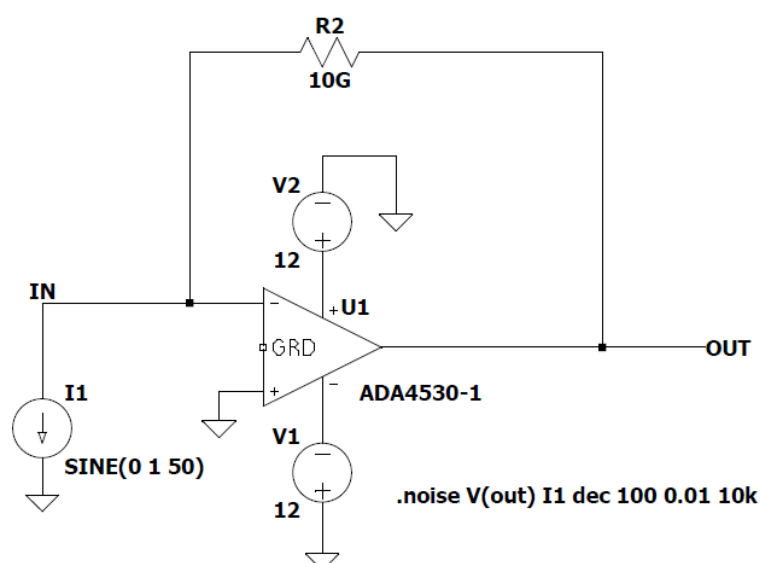
Na obrázku 7.1 je zobrazen výpočet závislosti vstupního šumového proudu na velikosti zpětnovazebního rezistoru ve zpětnovazebním ampérmetru podle vztahu 6.5. Výpočet byl proveden v programu Matlab. Do výpočtu jsou zahrnuty parametry z katalogového listu operačního zesilovače ADA4530-1. Vstupní šumový proud je rozdělen na příspěvek vstupního šumového napětí a na příspěvek vstupního šumového proudu použitého operačního zesilovače.



Obrázek 7.1 Podíl U_n a I_n použitého operačního zesilovače na vstupním šumovém proudu zpětnovazebního ampérmetru

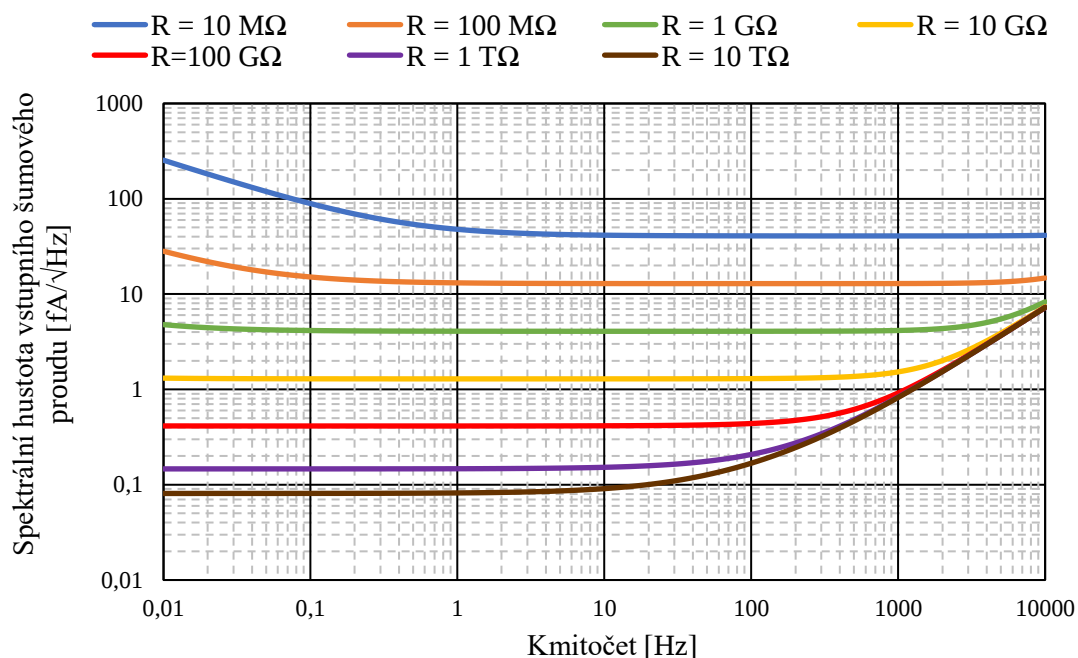
Z obrázku je patrné, že při vyšších hodnotách zpětnovazebního rezistoru má výraznější vliv na vstupní šumový proud celého zapojení vstupní šumový proud použitého operačního zesilovače. Při návrhu zpětnovazebního ampérmetru je tedy klíčovým parametrem operačního zesilovače jeho vstupní šumový proud. Druhým klíčovým parametrem je vstupní klidový proud, protože se uvažuje o měření stejnosměrných proudů.

Prvním operačním zesilovačem, pro který byla provedena počítačová simulace, je ADA4530-1. Výrobce poskytuje simulační model do programu LTspice. Poskytovaný model je poměrně přesný a je do něj zahrnut i nízkofrekvenční blikavý šum $1/f$. Zapojení zpětnovazebního ampérmetru s operačním zesilovačem ADA4530-1 v programu LTspice je na obrázku 7.2.



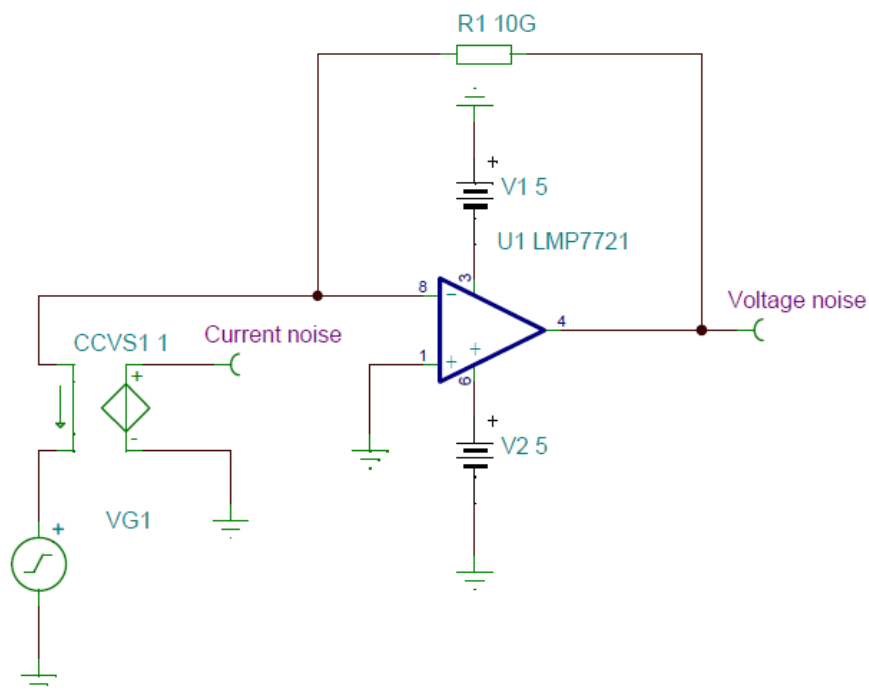
Obrázek 7.2 Zapojení zpětnovazebního ampérmetru s operačním zesilovačem ADA4530-1 v programu LTspice

Na obrázku 7.3 jsou zobrazeny křivky spektrální hustoty vstupního šumového proudu zpětnovazebního ampérmetru s operačním zesilovačem ADA4530-1. Z křivek je patrné, že s rostoucí velikostí zpětnovazebního rezistoru spektrální hustota vstupního šumového proudu klesá. Výrobce v katalogovém listu [28] udává, že operační zesilovač ADA4530-1 neprodukuje žádný nízkofrekvenční blikavý šum $1/f$, ovšem podle simulačního modelu se při nižších velikostech zpětnovazebního rezistoru blikavý šum operačního zesilovače projeví. Blikavý šum zpětnovazebního rezistoru není do počítačové simulace zahrnut. Výrobci vysokoohmových rezistorů neuvádějí ani přibližné úrovně tohoto šumu. Při použití kvalitních vysokoohmových rezistorů na bázi oxidu kovu, které jsou doporučeny v katalogovém listu operačního zesilovače ADA4530-1, můžeme předpokládat, že úroveň blikavého šumu generovaného rezistorem bude nízká. Výrazná úroveň nízkofrekvenčního blikavého šumu $1/f$ vzniká na rezistorech vyrobených tlustovrstvou technologií, jak bylo rozebráno v kapitole 2.4. Na vyšších kmitočtech je z obrázku patrný nárůst spektrální hustoty vstupního šumového proudu. Tento nárůst je způsoben dalším typem šumu, který ovšem nebude mít na přesnost měření žádný vliv, protože se uvažuje pouze o měření stejnosměrných proudů.



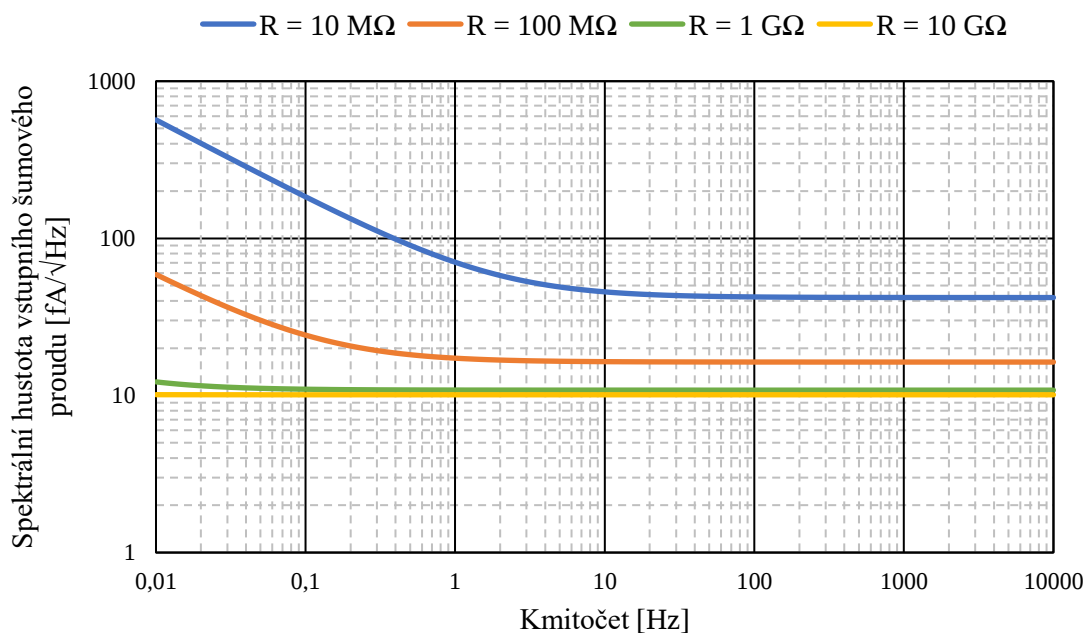
Obrázek 7.3 Spektrální hustota vstupního šumového proudu zpětnovazebního ampérmetru s operačním zesilovačem ADA4530-1

Dalším simulovaným operačním zesilovačem byl typ LMP7721. Výrobce poskytuje simulační model pouze do programu Tina-TI. Zapojení zpětnovazebního ampérmetru s operačním zesilovačem LMP7721 je na obrázku 7.4.



Obrázek 7.4 Zapojení zpětnovazebního ampérmetru s operačním zesilovačem LMP7721 v programu Tina-TI

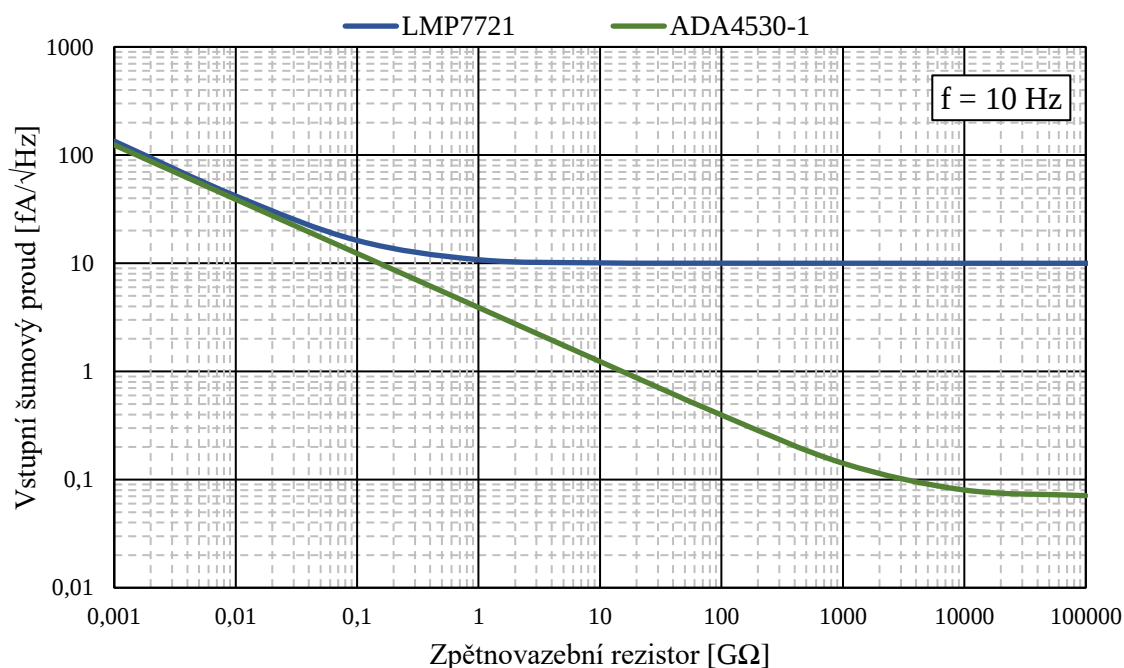
Operační zesilovač LMP7721 má vyšší úroveň spektrální hustoty vstupního šumového proudu v bílé oblasti spektra než operační zesilovač ADA4530-1. Vstupní šumový proud operačního zesilovače LMP7721 na kmitočtu 1 kHz je $10 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$. Spektrální hustota vstupního šumového proudu zpětnovazebního ampérmetru je omezena tímto šumovým parametrem použitého operačního zesilovače. Křivky na obrázku 7.5 jsou proto omezeny pouze na hodnoty zpětnovazebního rezistoru do $10 \text{ G}\Omega$. Při dalším zvyšování velikosti zpětnovazebního rezistoru již nedochází k poklesu vstupního šumového proudu celého zapojení. Operační zesilovač LMP7721 je ze všech elektrometrických operačních zesilovačů z hlediska vstupního šumového napětí nejlepší, ovšem podle zjištění na obrázku 7.1, je při návrhu zpětnovazebního ampérmetru klíčovým parametrem operačního zesilovače vstupní šumový proud. Tato skutečnost je potvrzena i na obrázku 7.5. Na tomto obrázku je také možné si všimnout, že operační zesilovač LMP7721 má o něco vyšší spektrální hustotu nízkofrekvenčního blikavého šumu $1/f$ než operační zesilovač ADA4530-1. Blikavý šum vysokoohmových rezistorů není do simulace zahrnut. Vliv vysokofrekvenčních šumů se projeví na vyšších kmitočtech, než je tomu u operačního zesilovače ADA4530-1. Na kmitočtech do 10 kHz není vysokofrekvenční šum patrný.



Obrázek 7.5 Spektrální hustota vstupního šumového proudu zpětnovazebního ampérmetru s operačním zesilovačem LMP7721

Na obrázku 7.6 je zobrazena závislost vstupního šumového proudu na velikosti zpětnovazebního rezistoru pro oba operační zesilovače. Porovnáváné závislosti jsou na kmitočtu 10 Hz , kdy se neprojevuje nízkofrekvenční blikavý šum $1/f$. Z obrázku je patrné velmi rychlé omezení vstupního šumového proudu operačního zesilovače LMP7721 při nízkých hodnotách zpětnovazebního rezistoru. Omezení je dáno vyšší hodnotou vstupního šumového proudu operačního zesilovače. Pro dosažení nejlepších vlastností je výhodné dosáhnout co nejnižší úrovně vstupního šumového proudu, je tedy vhodné při návrhu zpětnovazebního ampérmetru zvolit operační zesilovač ADA4530-1. Při vyšších

velikostech zpětnovazebního rezistoru se dosáhne také většího potlačení nízkofrekvenčního blikavého šumu $1/f$ operačních zesilovačů. Protože výrobci neuvádějí ani přibližnou hodnotu blikavého šumu vysokohmových rezistorů, není možné odhadnout, jak bude nízkofrekvenční oblast ovlivněna šumem použitých rezistorů. Lze se pouze spoléhat na doporučení a na některé údaje, které uvádí výrobce operačního zesilovače ADA4530-1 v katalogovém listu [28]. Simulované hodnoty jsou pouze orientační na základě teoretického výpočtu, v praxi se projeví různé svodové proudy a nedokonalosti použitých komponentů.



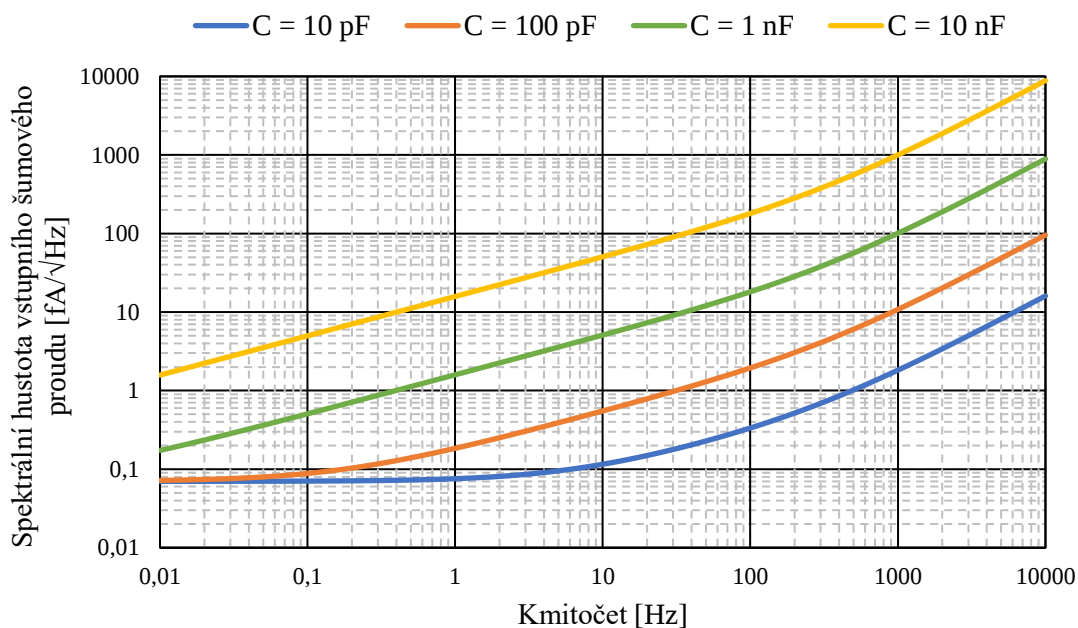
Obrázek 7.6 Závislost vstupního šumového proudu zpětnovazebního ampérmetru na velikosti zpětnovazebního rezistoru

7.2 Vstupní šumový proud zpětnovazebního coulombmetru

Zpětnovazební coulombmetr byl také simulován s oběma operačními zesilovači. V zapojeních se pouze změnil zpětnovazební rezistor na zpětnovazební kondenzátor. Použité programy a modely u jednotlivých operačních zesilovačů zůstávají stejné.

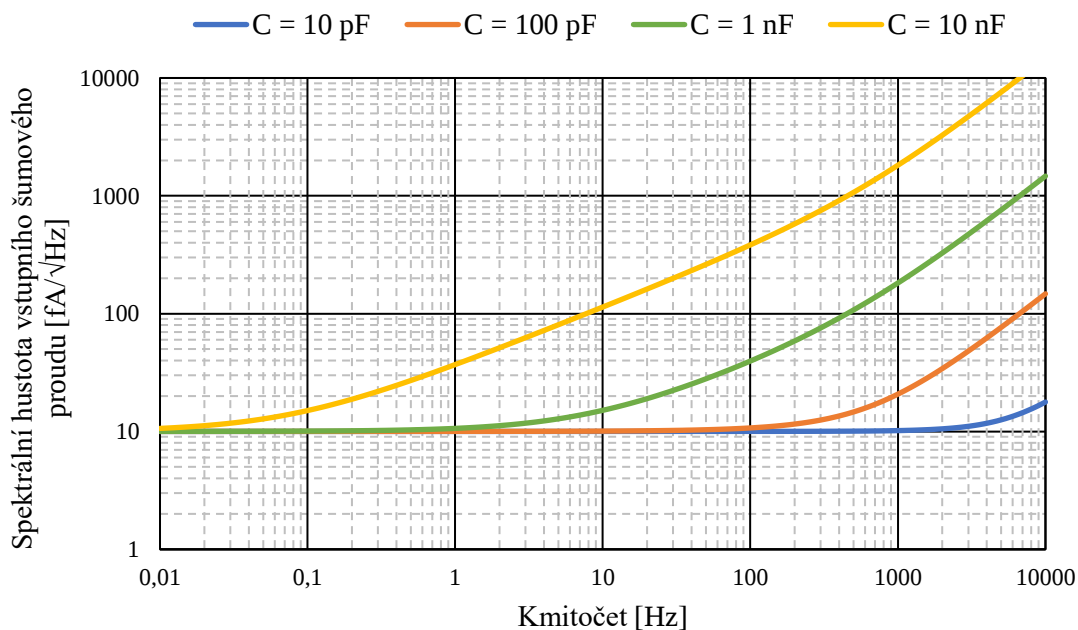
Spektrální hustota vstupního šumového proudu zpětnovazebního coulombmetru s operačním zesilovačem ADA4530-1 je na obrázku 7.7. Na rozdíl od zpětnovazebního ampérmetru se u zpětnovazebního coulombmetru neprojeví blikavý šum $1/f$ ani Johnsonův tepelný šum zpětnovazebního rezistoru.

Spektrální hustota vstupního šumového proudu u coulombmetru je na nízkých kmitočtech velmi malá a teoreticky je dána vstupním šumovým proudem použitého operačního zesilovače. V praxi se projeví svodový proud relé a použitého kondenzátoru. Z průběhů je patrné, že kapacita zpětnovazebního kondenzátoru ovlivňuje rychlost nárůstu spektrální hustoty vstupního šumového proudu. Nárůst je způsoben potlačením vyšších kmitočtů. Zpětnovazební coulombmetr je ve své podstatě integračním článkem.



Obrázek 7.7 Spektrální hustota vstupního šumového proudu zpětnovazebního coulombmetru s operačním zesilovačem ADA4530-1

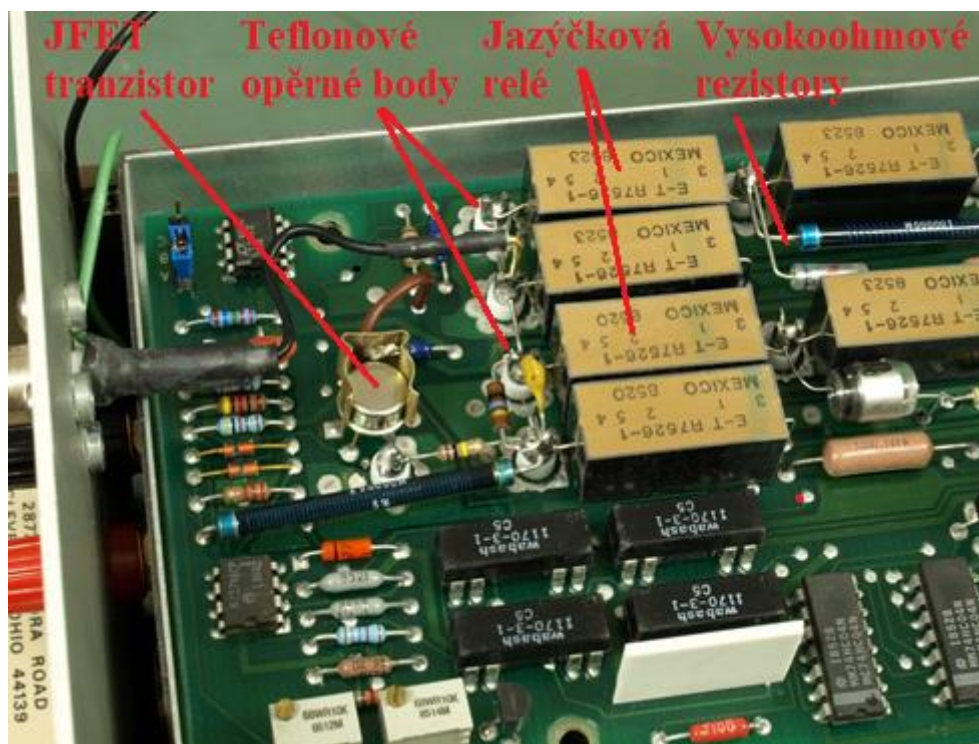
Na obrázku 7.8 je zobrazena spektrální hustota vstupního šumového proudu zpětnovazebního coulombmetru s operačním zesilovačem LMP7721. U tohoto operačního zesilovače je patrnější omezení spektrální hustoty na nízkých kmitočtech vlivem vstupního šumového proudu operačního zesilovače.



Obrázek 7.8 Spektrální hustota vstupního šumového proudu zpětnovazebního coulombmetru s operačním zesilovačem LMP7721

8 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ ZESILOVAČE

Z továrních výrobků je možné získat inspiraci ohledně konstrukčního provedení nízkoúrovňového zesilovače. Je především nutné, aby celá vstupní část byla elektrostaticky odstíněna od okolního prostředí, proto bývá umístěna ve stínící krabici. U samotného vstupního zesilovače je důležité uvažovat i o stínění aktivním. Z internetových stránek zabývajících se opravou elektrometrů Keithley je možné získat fotografie vstupních částí zesilovače. U starších přístrojů se používaly teflonové opěrné body na desce plošných spojů, které zajišťovaly vysoký izolační odpor nedegradovaný běžným materiálem používaným k výrobě desek plošných spojů FR4, jak bylo popsáno v kapitole 2. Příklad konstrukčního provedení vstupní části elektrometru Keithley 617 je na obrázku 8.1.



Obrázek 8.1 Uspořádání vstupní části zesilovače elektrometru Keithley 617 [41]

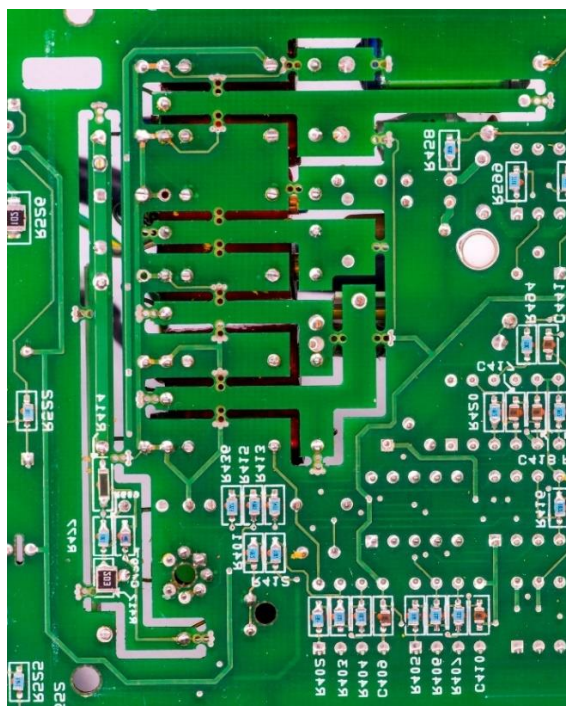
Vstupní signál z triaxiálního kabelu je přiveden na teflonový opěrný bod a dále přes několik ochranných rezistorů na elektrometrický dvojité JFET tranzistor. Klíčové součástky, jako jsou relé a vysokoohmové rezistory, jsou umístěny na teflonových opěrných bodech ve vzduchu. Toto řešení je náročné na ruční montáž vstupního dílu, ale dosahuje nejlepších vlastností.

Jazýčková relé pro přepínání rozsahů použitá v elektrometru Keithley 6517 na obrázku 8.2 jsou izolována od spínací cívky teflonovou kostrou. Navíc využívají pasivní stínění pomocí měděné pásky omotané okolo relé a připojené na zem. V novějších elektrometrech se již využívá aktivního stínění jazýčkových relé pro přepínání rozsahů.



Obrázek 8.2 Uspořádání vstupní části zesilovače elektrometru Keithley 6517 [42]

U novějších přístrojů bylo omezeno použití teflonových opěrných bodů s využitím levnějšího frézování desky plošných spojů, při kterém jsou klíčové vysokoohmové součástky odděleny od ostatních částí desky vzduchem a drží jen na velmi tenké části desky. Je zde důležité naprosté očištění desky kvalitním izopropylalkoholem a následným ohřevem na 60 °C.



Obrázek 8.3 Frézování desky plošných spojů v kritických částech vstupního zesilovače elektrometru Keithley 6517 [43]

Protože u navrhovaného zesilovače nepůjde o velkou výrobní sérii, nýbrž o dosažení velmi kvalitních parametrů, je vhodnější použít teflonových opěrných bodů podle staršího řešení v kombinaci s aktivním stíněním relé u novějších elektrometrů.

Na rozdíl od elektrometrů je potřeba při návrhu zesilovače na měření vzdušných iontů uvažovat i o napájení elektrod aspiračního kondenzátoru. Na UTEE se používá polarizační kondenzátor zapojený do série se zesilovačem, jak bylo popsáno v kapitole 1.3. Nejjednodušším konstrukčním řešením je umístit polarizační kondenzátor na společnou desku plošných spojů se zesilovačem. Od obou elektrod aspiračního kondenzátoru povedou skrz desku plošných spojů teflonové průchodky. Pro oddělení nabíjení polarizačního kondenzátoru a měření koncentrace vzdušných iontů budou použita jazýčková relé. Protože jsou připojena na nízkoúrovňový vstup, budou od spínací cívky oddělena teflonovou kostrou podobně jako jazýčková relé v elektrometru Keithley 6517. Relé, které bude aktivní během měření bude stíněno aktivně. Konstrukční řešení aktivního stínění jazýčkových relé bylo navrženo na UTEE vedoucím práce. Měděná páska bude umístěna mezi spínací cívkou a teflonovou kostrou a bude připojená na stejný potenciál jako stíněné relé. Pokud je teflonová kostra včetně dutiny, do které se vkládá jazýčkové relé, důsledně vyčištěna, je z hlediska odstínění nežádoucích svodových proudů výhodnější umístit měděnou pásku okolo teflonové kostry než pouze okolo samotného jazýčkového relé.

Postup výroby aktivně stíněného jazýčkového relé je na obrázku 8.4. Nejprve je nutné vysoustružit teflonovou kostru a důkladně ji vyčistit v kvalitním izopropylalkoholu. Kostra se poté přelepí měděnou lepicí páskou. Měděnou vrstvu je vhodné překrýt izolační lepicí páskou, na kterou se poté musí ručně navíjet vinutí cívky. Závitu se navine tolik, aby se vyplnil celý prostor na kostře relé. Nakonec se závity překryjí teplem smrštitelnou bužírkou.



Obrázek 8.4 Postup výroby aktivně stíněných relé navržených na UTEE

Konkrétní typ použitého jazýčkového relé je KSK-1A46-1520 od německého výrobce Meder. Podle katalogového listu [44] je izolační odpor relé $1\text{ G}\Omega$ a statický odpor kontaktů je $150\text{ m}\Omega$. Maximální stejnosměrné napětí je 200 V a maximální proud protékající tímto relé je $0,5\text{ A}$. Kontakty jsou vyrobeny z rhodia a jsou hermeticky uzavřeny ve skle.

Všechny součástky na vstupu budou umístěny na teflonových opěrných bodech vlastní výroby a veškeré spoje budou vzdušné. Okolo teflonových opěrných bodů budou na desce plošných spojů prstence, které budou také připojeny na aktivní stínění. Teflonové opěrné body jsou na obrázku 8.5. Na desku plošných spojů se připevňují vtlačení do otvorů s průměrem, který odpovídá průměru užší části opěrných bodů.



Obrázek 8.5 Teflonové opěrné body

Ze tří možných variant zapojení elektrometrického zesilovače z kapitoly 6 bylo vybráno zapojení zpětnovazebního ampérmetru. Bočníkový ampérmetr podle rozboru v kapitole 6.4 není příliš vhodný k měření koncentrace vzdušných iontů s aspiračním kondenzátorem, o jeho návrhu se tedy neuvažovalo. Zpětnovazební coulombmetr sice vykazuje z hlediska spektrální hustoty vstupního šumového proudu podle počítačových simulací lepší vlastnosti, ale je náchylný k chybovosti kvůli případné nestabilitě doby nulování a nabíjení zpětnovazebního kondenzátoru.

Z elektrometrických operačních zesilovačů, pro které byly prováděny počítačové simulace, vychází lépe ADA4530-1. Velkou výhodou tohoto operačního zesilovače je integrovaný stínicí buffer, kterým je možné aktivně stínit vstup. Právě na výstupní pin tohoto bufferu se připojí aktivní stínění relé a teflonových opěrných bodů. Vstupní napěťová a proudová nesymetrie bude kompenzována externě. Vstupní pin operačního zesilovače bude zvednutý a přívod povede z teflonového opěrného bodu vzduchem, tím se zamezí případným svodovým proudům v těsném okolí vstupního pinu operačního zesilovače.

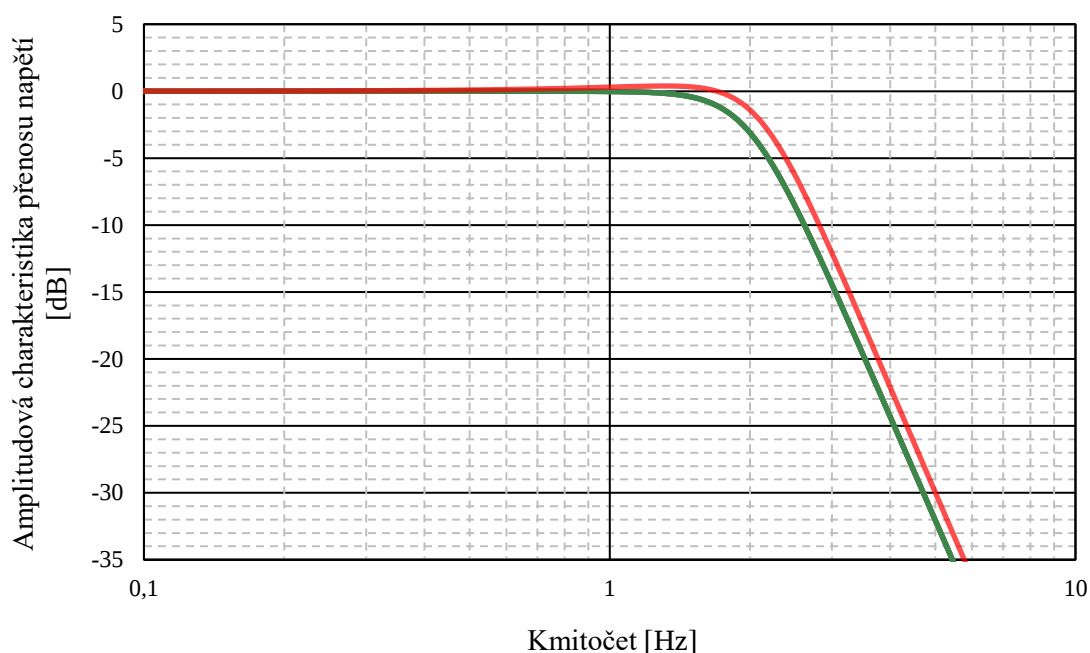
Při návrhu zpětnovazebního ampérmetru je důležitá volba přesného vysokoohmového rezistoru. Zde nastává problém s dostupností přesných stabilních vysokoohmových rezistorů, které produkují málo šumu. Většina vysokoohmových rezistorů se totiž vyrábí tlustovrstvou technologií. Rezistory vyrobené tlustovrstvou technologií generují blikavý šum s úrovní výrazně vyšší než rezistory vyrobené tenkovrstvou technologií, jak bylo popsáno v kapitole 2.4. Na trhu jsou ovšem dostupné

také vysokoohmové rezistory na bázi oxidu kovu od společnosti Ohmite. Tyto rezistory doporučuje výrobce operačního zesilovače ADA4530-1 v katalogovém listu [28] a uvádí zde i několik zkušebních měření s těmito rezistory. Jejich cena výrazně převyšuje cenu rezistorů vyrobených tlustovrstvou technologií, ale úroveň generovaného blikavého šumu je velmi nízká. Rezistory jsou uzavřeny ve skleněné tubě o délce zhruba pěti centimetrů. Jejich teplotní koeficient je podle katalogového listu [45] menší než 50 ppm/°C a jejich tolerance by měla být $\pm 1\%$. 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 . Tyto hodnoty vyplývají z rozměrů AK a potřebných rozsahů uvedených v kapitole 1.3. Při takto vysokých hodnotách zpětnovazebního rezistoru bude úroveň vstupního šumového proudu velmi malá, jak lze vypočítat z počítačových simulací v předchozí kapitole. Z obrázku 7.3 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 v oblasti bílého šumu. V reálném řešení lze očekávat vyšší hodnoty vlivem šumu ostatních vstupních součástek.

Za elektrometrickým operačním zesilovačem ADA4530-1 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 model OPA211 od společnosti Texas Instruments. Tento operační zesilovač má podle katalogového listu výrobce [46] spektrální hustotu vstupního šumového napětí 2 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ na kmitočtu 10 Hz a 1,1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ na kmitočtu 1 kHz. Dalším důležitým uváděným parametrem je typická hodnota vstupní napěťové nesymetrie $\pm 30\text{ }\mu\text{V}$ a také typická hodnota tepelného driftu $\pm 0,35\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Šířka pásma je 45 MHz pro jednotkové zesílení a rychlost přeběhu 27 V/ μs .

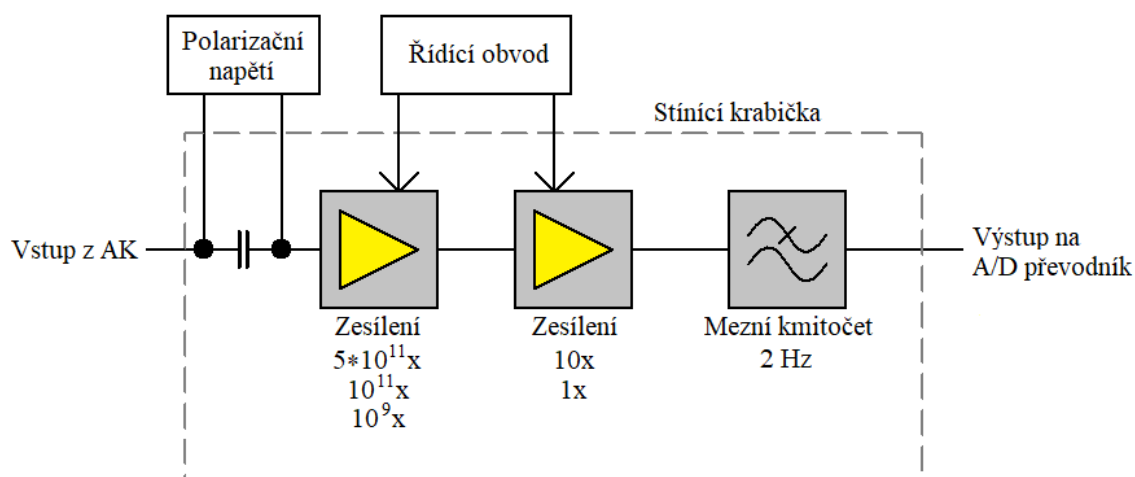
Posledním blokem v zesilovači je filtr typu dolní propust čtvrtého řádu s Butterworthovou aproximací a mezním kmitočtem 2 Hz. Filtr byl navržen pomocí programu NAF [47] a optimalizován pomocí počítačové simulace v programu PSpice. Je složen ze dvou stupňů topologií Sallen-Key a použitým operačním zesilovačem v obou stupních je OP27 od společnosti Analog Devices. Podle katalogového listu výrobce [48] má tento operační zesilovač spektrální hustotu vstupního šumového napětí 3,5 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ na kmitočtu 10 Hz a 3 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ na kmitočtu 1 kHz. Pásmo blikavého šumu 1/f by mělo údajně končit na kmitočtu 2,7 Hz. Citlivostní analýza přenosu napětí navrženého filtru je na obrázku 8.6. Všem pasivním součástkám byla nastavena tolerance 5 % a z deseti různých výsledků simulace se pouze červený průběh odlišuje od ostatních devíti průběhů, které jsou zobrazeny zelenou barvou.

Celý nízkoúrovňový zesilovač musí být uzavřen ve stínící krabici kvůli odstínění vnějších rušivých signálů. Kvůli výšce některých součástek se krabice připevňuje na horní stranu desky plošných spojů a všechny součástky budou také připevněny pouze na horní stranu. Na spodní straně desky bude rozlita souvislá vrstva mědi, která nahradí spodní víko stínící krabice a bude s ní spojena prokovenými otvory. Blokové schéma zesilovače je zobrazeno na obrázku 8.7. Kompletní obvodové zapojení, deska plošných spojů a seznam součástek jsou uvedeny v přílohách. Všechny součástky uvnitř krabice se musí nejprve očistit kvalitním izopropylalkoholem a poté vysušit ohřevem na 60 °C. Stejný proces je potřeba také u samotné desky plošných spojů. Důkladně vyčištěná musí být zejména oblast nízkoúrovňového vstupu a vstupní součástky.



Obrázek 8.6 Citlivostní analýza přenosu napětí navrženého filtru

Polarizační napětí k nabíjení kondenzátoru bude do zesilovače dodáváno z jiné desky plošných spojů. Na samostatné desce bude také mikrokontroler určený k řízení relé a ke komunikaci s počítačem po sběrnici. Mikrokontroler bude spínat PNP tranzistory BC856 umístěné na desce zesilovače mimo stínící krabici, které budou aktivovat jazýčková relé. Při použití PNP tranzistorů nebude na relé v rozepnutém stavu napětí. Všechny dílčí desky plošných spojů budou uzavřeny v plastové instalační krabici, která bude pevně uchycena k aspiračnímu kondenzátoru.



Obrázek 8.7 Blokové schéma nízkoúrovňového zesilovače

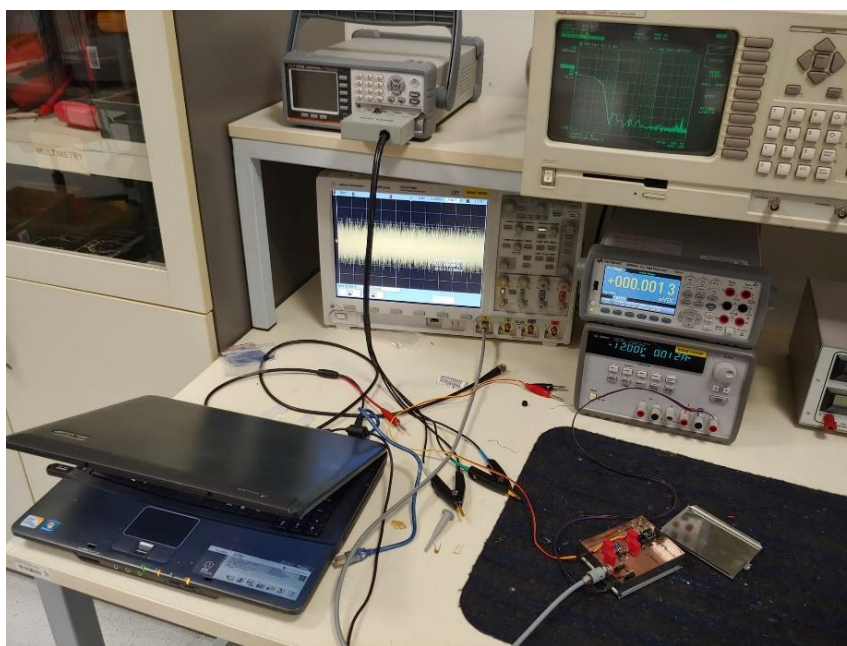
9 NAMĚŘENÉ HODNOTY A PRŮBĚHY

Měření probíhalo v laboratořích na UTEE. Veškeré použité vybavení bylo školní.

9.1 Vstupní šumové napětí operačního zesilovače LMP7721

Pro teoretické účely měření spektrální hustoty vstupního šumového napětí operačního zesilovače LMP7721 byla navržena deska podle zapojení na obrázku 5.5. Tento model byl vybrán, protože má ze všech elektrometrických operačních zesilovačů nejnižší spektrální hustotu vstupního šumového napětí. Jako pomocný nízkošumový operační zesilovač byl vybrán OPA211. Napájení operačního zesilovače LMP7721 bylo nesymetrické -1,5 V a 3,5 V, protože pro tuto variantu je podle katalogového listu [29] nejmenší vstupní klidový proud. Toto napájení bylo zajištěno z nízkošumových lineárních stabilizátorů TPS7A4901 a TPS7A3001. Stabilizátory byly napájeny z laboratorního zdroje. Zesílení operačních zesilovačů bylo 40 dB a 40 dB. Deska byla během měření uzavřena ve stínící krabici.

K měření spektrální hustoty vstupního šumového napětí byl použit nízkofrekvenční spektrální analyzátor HP 35660A s kmitočtovým rozsahem do 100 kHz. Měření probíhalo ve třech různých kmitočtových pásmech. Nejprve bylo provedeno měření bez operačního zesilovače LMP7721 pro zjištění šumového pozadí měřicího systému. Poté probíhalo měření s LMP7721. V každém kmitočtovém pásmu bylo provedeno průměrování ze sta měření. Použitý spektrální analyzátor nemá žádné funkční komunikační rozhraní, naměřené hodnoty tedy musely být odečítány kurzory a zapisovány do počítače ručně. Zapojení pracoviště je na obrázku 9.1.



Obrázek 9.1 Zapojení pracoviště pro měření vstupního šumového napětí operačního zesilovače LMP7721

Změřené efektivní hodnoty na vstupu spektrálního analyzátoru v dBV byly převedeny na spektrální hustotu vstupního šumového napětí zesilovací kaskády v jednotkách nV/√Hz. Přepočet musel být proveden pro každé kmitočtové pásmo zvlášť. Nejprve se šířka pásma převedla do decibelové míry:

$$B_{dBHz} = 10 \cdot \log \left(1,36 \cdot \frac{B}{400} \right) \quad [\text{dBHz; Hz}] . \quad (9.1)$$

Poté se efektivní hodnota na vstupu spektrálního analyzátoru v dBV převedla na spektrální hustotu v dBV/√Hz odečtením šířky pásma v decibelové míře od naměřených hodnot:

$$U_{dBV/\sqrt{Hz}} = U_{dBV} - 3 - 2,5 - B_{dBHz} \quad [\text{dBV}/\sqrt{\text{Hz}}; \text{dBV}, \text{dBHz}] . \quad (9.2)$$

Následně se zjistila spektrální hustota na vstupu zesilovací kaskády odečtením zesílení obou operačních zesilovačů v decibelové míře od spektrální hustoty na vstupu spektrálního analyzátoru. Poté se spektrální hustota na vstupu zesilovací kaskády převedla do absolutní míry ve V/√Hz odlogaritmováním:

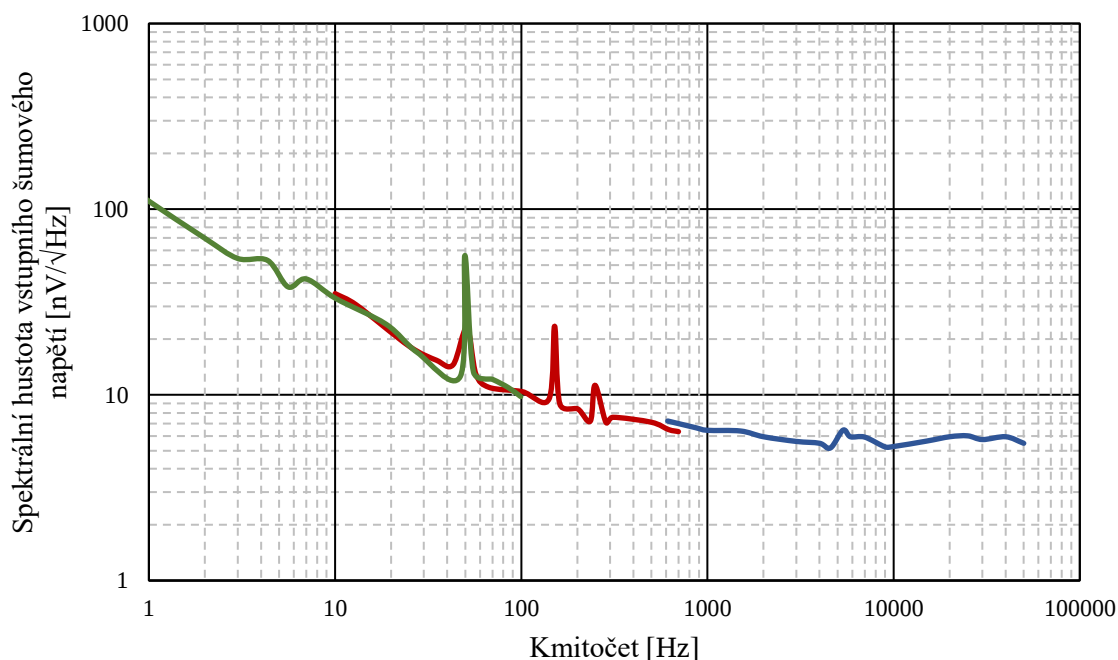
$$U_{V/\sqrt{Hz}} = 10^{\frac{U_{dBV/\sqrt{Hz}} - A_1 - A_2}{20}} \quad [\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}; \text{dBV}/\sqrt{\text{Hz}}, \text{dB}, \text{dB}] . \quad (9.3)$$

Tento výpočet musel být proveden i pro změřené hodnoty šumového pozadí, aby bylo možné provést korekci. Korekce byla provedena v absolutní míře odečtením kvadrátu spektrální hustoty šumového pozadí od kvadrátu spektrální hustoty s LMP7721 podle vztahu:

$$U_{V/\sqrt{Hz_korigované}} = \sqrt{U_{V/\sqrt{Hz}}^2 - U_{V/\sqrt{Hz_šumové\ pozadí}}^2} \quad [\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}] . \quad (9.4)$$

Výsledná vypočítaná hodnota udává spektrální hustotu vstupního šumového napětí operačního zesilovače LMP7721 ve V/√Hz. Hodnoty byly v posledním kroku převedeny na nV/√Hz.

Na obrázku 9.2 je zobrazena spektrální hustota vstupního šumového napětí operačního zesilovače LMP7721 po korekci. Vzhledem k tomu, že napájení bylo z laboratorního zdroje, je na obrázku viditelné rušení na kmitočtech 50 Hz a 150 Hz. Jednotlivá kmitočtová pásma, ve kterých měření probíhalo, jsou zobrazena rozdílnými barvami. Pokud pomineme rušení ze sítě, lze změřenou spektrální hustotu vstupního šumového napětí operačního zesilovače LMP7721 porovnat s průběhem v katalogovém listu [29]. Naměřená spektrální hustota se prakticky neliší od průběhu udávaného v katalogovém listu. V oblasti bílého šumu bylo naměřeno 6,5 nV/√Hz, výrobce udává stejnou hodnotu. V oblasti blikavého šumu 1/f jsou hodnoty velmi blízké hodnotám udávaným v katalogovém listu.



Obrázek 9.2 Změřená spektrální hustota vstupního šumového napětí operačního zesilovače LMP7721

Šum byl zachycen také v časové oblasti pomocí osciloskopu. Pomocí kurzorů byl zjištěn rozkmit signálu 16 mV šumového pozadí měřícího systému pro šířku pásma 20 MHz. S operačním zesilovačem LMP7721 byl rozkmit signálu 181 mV pro stejnou šířku pásma. Oba časové průběhy jsou v přílohách.

Zároveň byla také změřena velikost vstupní napěťové nesymetrie operačního zesilovače LMP7721 pomocí laboratorního multimetru. Výrobce udává typickou hodnotu vstupní napěťové nesymetrie $\pm 26 \mu\text{V}$ a maximální hodnotu $\pm 150 \mu\text{V}$. Naměřená hodnota je $54 \mu\text{V}$, měřený operační zesilovač tedy odpovídá údajům, které uvádí výrobce.

9.2 Vstupní šumový a klidový proud operačního zesilovače LMC6001A

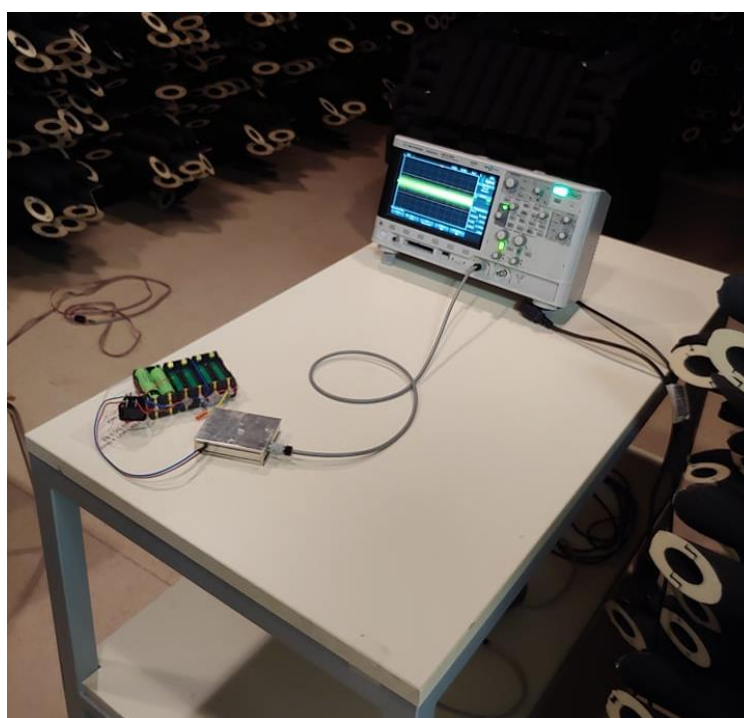
Klíčový elektrometrický operační zesilovač ADA4530-1 nakonec nebyl distributorem doručen. Objednávka byla potvrzena a zaplacená v době, kdy distributor udával, že má několik desítek kusů tohoto operačního zesilovače k dispozici. Termín dodání byl následně odložen. Předpokládá se, že tento operační zesilovač bude distributorem dodán v listopadu 2020. Nezdařil se ani pokus o vyjednání vzorku přímo s výrobcem.

Jako náhradu se podařilo sehnat operační zesilovač LMC6001A, který má sice podle tabulky 4 v kapitole 4.1 mírně horší parametry, než původně zamýšlený model ADA4530-1, ale stále se jedná o jeden z nejlepších elektrometrických operačních zesilovačů na trhu. Podle zdroje [22] je používán v elektrometru Keithley 6517A, který je k dispozici na UTEE. Jeho nevýhodou ovšem je, že neobsahuje integrovaný buffer pro aktivní stínění vstupu. Jazyčkové relé ani teflonové opěrné body na vstupu zesilovače tedy nebudou s tímto operačním zesilovačem stíněny aktivně. Deska plošných spojů

zesilovače je již vyrobená a není možné ji doplnit o další operační zesilovač plnící funkci bufferu. Jakmile bude operační zesilovač ADA4530-1 k dispozici, nahradí model LMC6001A a aktivní stínění se využije.

Pro měření vstupního klidového a šumového proudu byl operační zesilovač zapojen ve funkci zpětnovazebního ampérmetru. Jako zpětnovazební rezistor se použil přesný vysokoohmový rezistor na bázi oxidu kovu od společnosti Ohmite, který byl zakoupen pro použití v zesilovači. Jeho velikost byla $100\text{ G}\Omega$. Zapojení bylo doplněno o filtr typu horní propust a pomocný nízkošumový operační zesilovač OPA211 podle obrázku 5.5.

Měření probíhalo ve stíněné komoře na UTEE. Teplota okolí byla po celou dobu měření $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, relativní vlhkost vzduchu byla 56 % a napájení operačních zesilovačů bylo z baterií. Zapojení pracoviště je na obrázku 9.3.

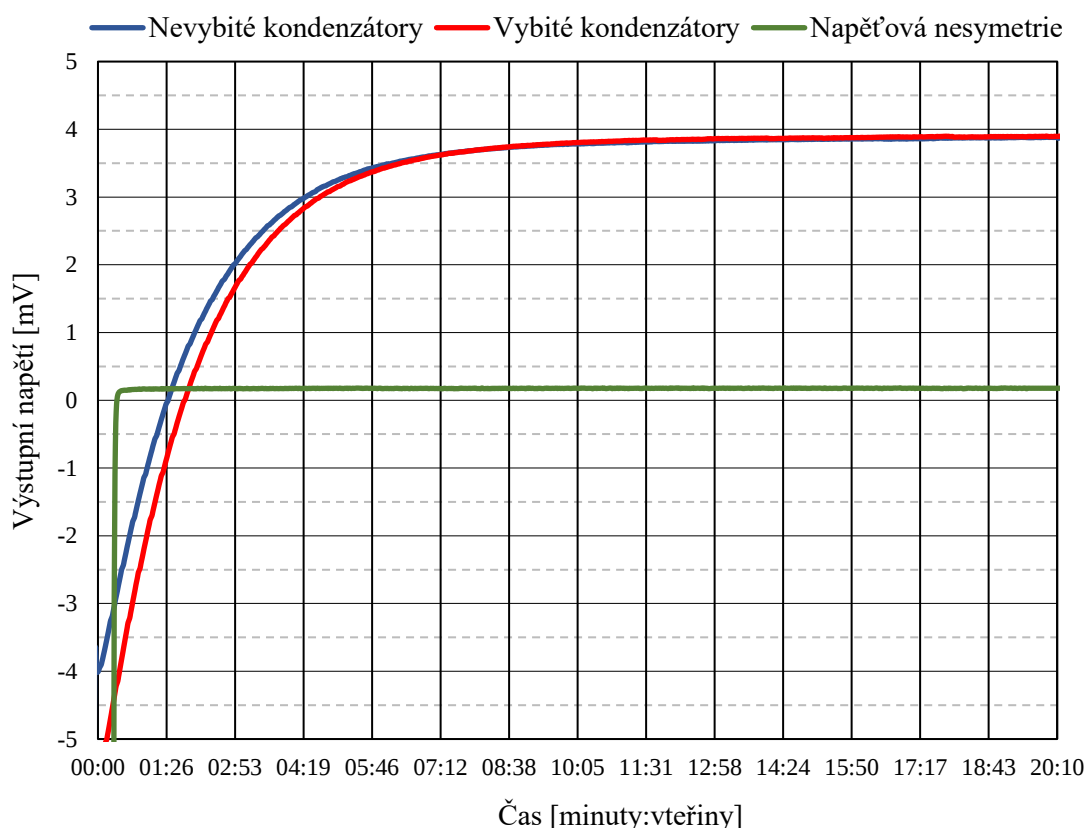


Obrázek 9.3 Zapojení pracoviště pro měření vstupního šumového a klidového proudu operačního zesilovače LMC6001A

Výstup operačního zesilovače LMC6001A byl rozkmitaný, proto byl ke zpětnovazebnímu rezistoru přidán paralelní kondenzátor o kapacitě 100 pF . Výsledná časová konstanta byla přibližně šedesát sekund a šířka pásma $0,01\text{ Hz}$. Širokopásmový šum tedy nebylo možné změřit. Ve změřeném pásmu do $0,01\text{ Hz}$ byla pomocí osciloskopu zjištěna efektivní hodnota vstupního šumového proudu $1,8\text{ fA}$. Do zpětné vazby operačního zesilovače LMC6001A v zesilovači bude také potřeba doplnit kondenzátory k rezistorům, aby na výstupu nebylo kmitání.

Vstupní klidový proud byl změřen pomocí laboratorního multimetru ovládaného z počítače obslužným programem v prostředí Keysight VEE. Programem byla změřena časová závislost vstupního klidového proudu po dobu dvaceti minut. Časová závislost výstupního napětí operačního zesilovače LMC6001A je na obrázku 9.4. Vydělením naměřených hodnot velikostí zpětnovazebního rezistoru $100\text{ G}\Omega$ podle vztahu 6.2 lze

výstupní napětí snadno přepočítat na vstupní klidový proud. Byla provedena tři měření. Začátek měření začínal od připojení napájecího napětí. V modrém průběhu je počáteční hodnota výstupního napětí vyšší než u červeného průběhu, protože tantalové kondenzátory u napájení operačního zesilovače nebyly zcela vybity. Zelený průběh zobrazuje časovou závislost vstupní napětíové nesymetrie, která byla změřena se zpětnovazebním rezistorem $1\text{ G}\Omega$. Naměřená hodnota je $0,17\text{ mV}$, výrobce udává maximální hodnotu $\pm 10\text{ mV}$. Odečtením napětíové nesymetrie od časových průběhů výstupního napětí lze zjistit přesnou hodnotu naměřeného vstupního klidového proudu. Oba změřené a přepočítané časové průběhy vstupního klidového proudu se zhruba po osmnácti minutách ustálily na hodnotě $36,9\text{ fA}$. Výrobce udává v katalogovém listu [32] typickou hodnotu vstupního klidového proudu $\pm 10\text{ fA}$ a maximální hodnotu $\pm 25\text{ fA}$.

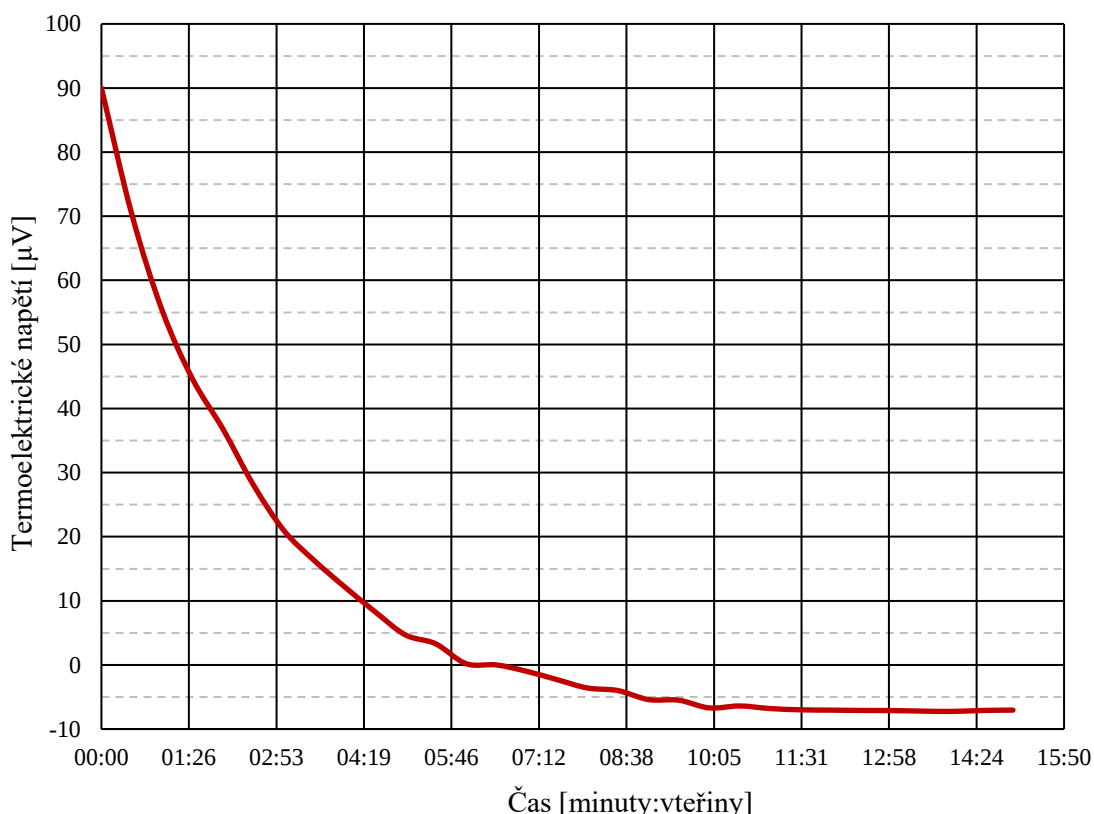


Obrázek 9.4 Časová závislost výstupního napětí a napětíové nesymetrie operačního zesilovače LMC6001A

9.3 Termoelektrické napětí a svodový proud jazýčkových relé

Termoelektrické napětí jazýčkových relé bylo změřeno pomocí laboratorního nanovoltmetru. Všechna jazýčková relé spínají při napětí na vinutí $1,4\text{ V}$ a rozepínají při napětí $1,1\text{ V}$. Časová závislost pro jedno relé je na obrázku 9.5. Pro ostatní relé byl průběh podobný, ale detailně bylo změřeno pouze jedno relé. Úroveň termoelektrického napětí

se pro všechna relé ustálila na hodnotě přibližně $-7 \mu\text{V}$. Protože relé bylo před měřením drženo v rukou a zahříváno tělesnou teplotou, byla počáteční hodnota vysoká a doba ustálení byla zhruba deset minut. Při měření bylo důležité udržovat v blízkosti relé konstantní teplotu. Měření mohlo být ovlivněno i vydechnutím na relé a pohybem v laboratoři, který by vyvolal otřesy.



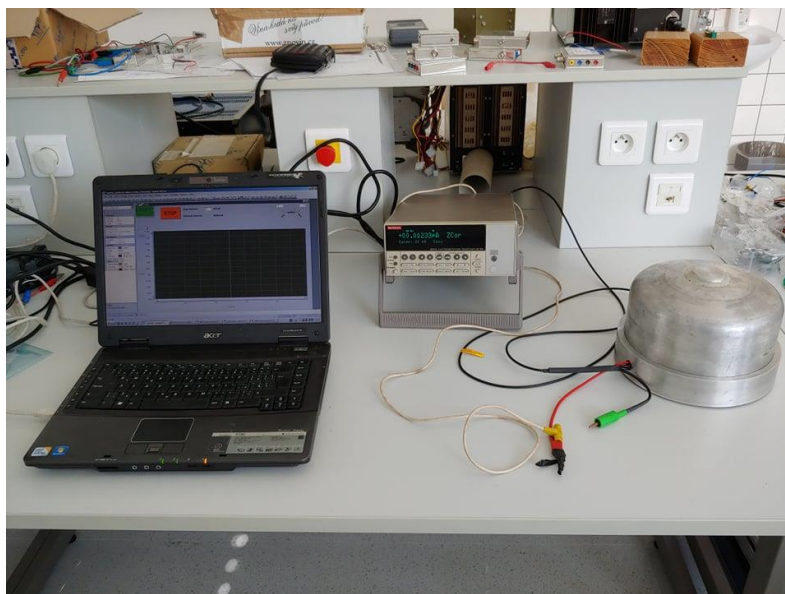
Obrázek 9.5 Časová závislost termoelektrického napětí jazýčkových relé

Změřen byl také svodový proud jednotlivých relé. Měření probíhalo pomocí elektrometru Keithley 6517A, který byl ovládán obslužným programem v prostředí Keysight VEE. Na obrázku 9.6 je fotografie měřicího pracoviště. Měřené relé bylo uzavřeno ve stínící nádobě. Měření bylo ovlivněno relativní vlhkostí vzduchu 53 %, teplotou okolí 25°C a pohybem v laboratoři. Jako nejvhodnější způsob měření se osvědčilo automatické měření časové závislosti svodových proudů po dobu deseti minut, během kterých v laboratoři nikdo nebyl.

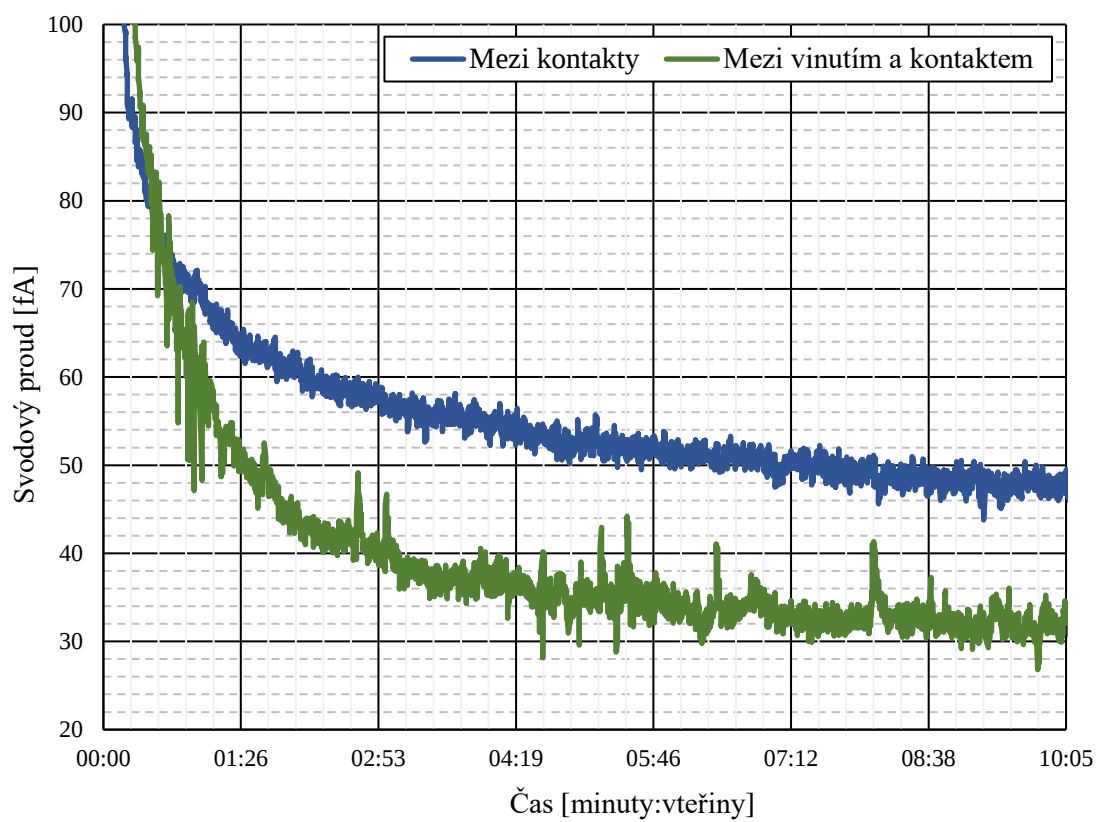
Byl změřen svodový proud mezi kontakty i mezi vinutím a kontaktem. Maximální dovolený úbytek napětí na jazýčkovém kontaktu je podle výrobce 200 V, všechna relé byla měřena při úbytku napětí 100 V. V zesilovači bude na relé úbytek napětí 2 V, za předpokladu lineární závislosti Ohmova zákona i při takto vysoké hodnotě odporu by měl svodový proud relé v zesilovači mít padesátkrát nižší hodnotu než naměřené hodnoty s elektrometrem. Takto nízké hodnoty jsou pod hranici detekovatelnosti elektrometru.

Na obrázku 9.7 jsou zobrazeny svodové proudy prvního relé. Svodový proud mezi kontakty se po deseti minutách ustálil na hodnotě zhruba 48 fA, což je nejvyšší hodnota

ze všech tří měřených relé. Svodový proud mezi vinutím a kontaktem se ustálil na hodnotě zhruba 32 fA.

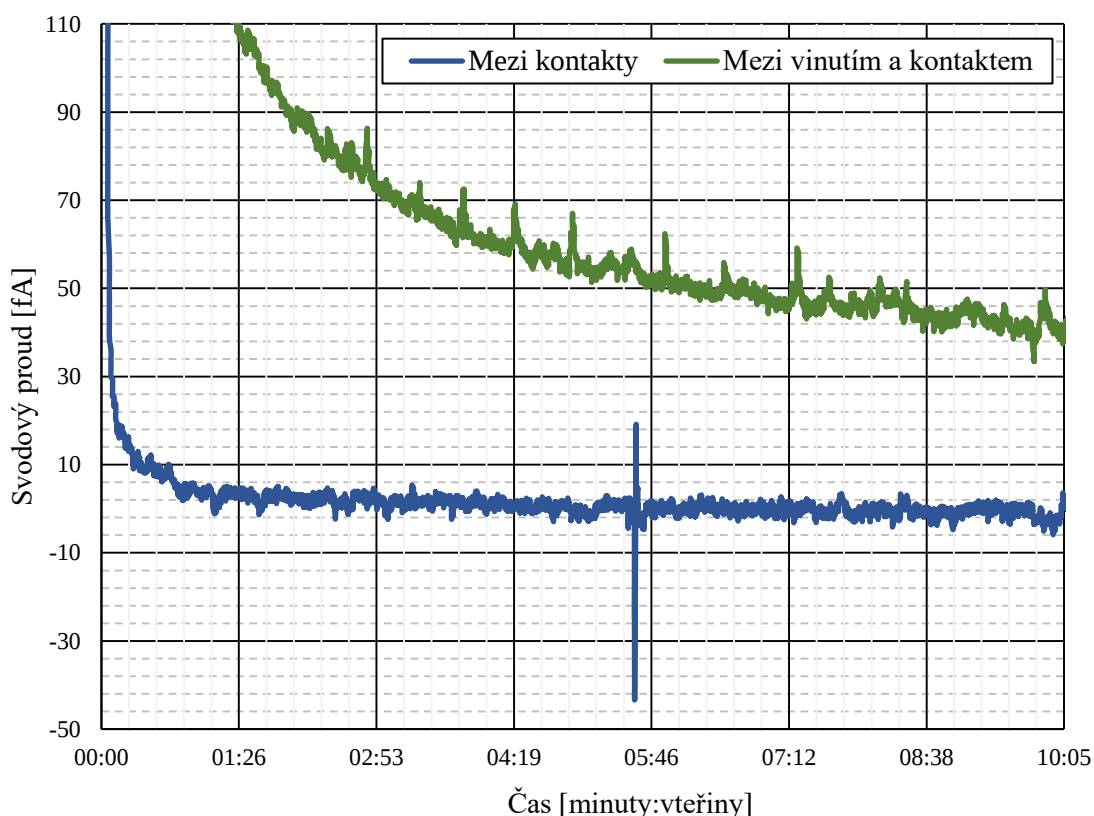


Obrázek 9.6 Zapojení měřicího pracoviště s elektrometrem



Obrázek 9.7 Časová závislost svodových proudů prvního relé

Na obrázku 9.8 jsou zobrazeny svodové proudy druhého relé. Svodový proud mezi vinutím a kontaktem je nejvyšší ze všech tří měřených relé, ale z jeho časového průběhu je patrné, že hodnota svodového proudu nebyla zcela ustálená. Pro zjištění ustálené hodnoty by muselo měření probíhat dvojnásobnou dobu. Svodový proud mezi kontakty se při prvním měření ustálil na hodnotě 90 fA. Jazyčkové relé bylo poté vyčištěno kvalitním izopropylalkoholem a svodový proud byl změřen znovu. Při druhém měření byl svodový proud mezi kontakty pod hranicí detekovatelnosti elektrometru. Změnu polarity svodového proudu mohou způsobovat například elektrochemické jevy na povrchu desky plošných spojů. Vysoký zákmit v jinak ustáleném časovém průběhu mohl způsobit pohyb a otřesy na chodbě před laboratoří.

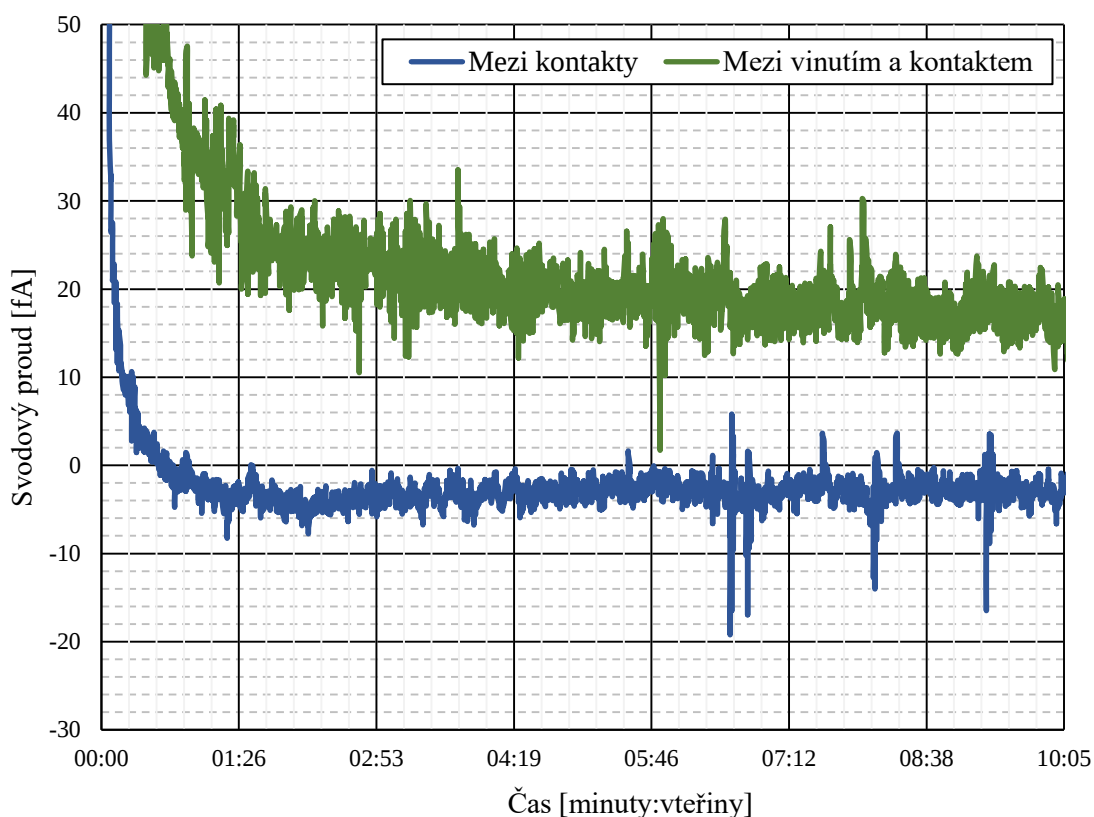


Obrázek 9.8 Časová závislost svodových proudů druhého relé

Na obrázku 9.9 je zobrazena časová závislost svodových proudů třetího relé. Hodnota svodového proudu mezi kontakty je stejně jako u druhého relé pod hranicí detekovatelnosti elektrometru. Svodový proud mezi vinutím a kontaktem se ustálil pod hranicí 20 fA. Třetí relé je tedy nejlepší ze všech tří měřených relé a bude proto umístěno na nízkoúrovňový vstup zesilovače. Ostatní dvě relé budou přepínat rozsahy elektrometrického operačního zesilovače.

Posledním vyrobeným relé bylo dvojité relé pro nabíjení polarizačního kondenzátoru. Toto relé nebylo možné změřit, protože teflonová kostra měla příliš velké otvory na jazyčkové kontakty, které uvnitř kostry nedržely pevně a během měření by mohlo dojít k jejich uvolnění a vypadnutí z kostry. V zesilovači bude tento problém odstraněn přilepením kostry relé k desce plošných spojů a připájením vývodů

jazyčkových kontaktů na vývody polarizačního kondenzátoru.



Obrázek 9.9 Časová závislost svodových proudů třetího relé

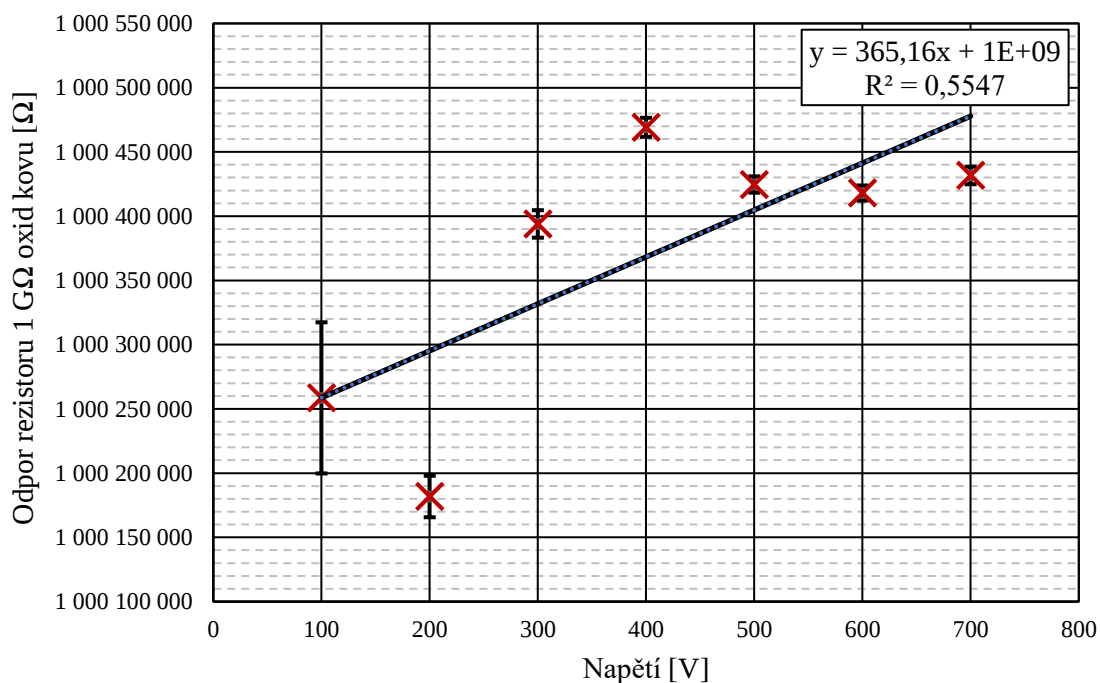
9.4 Přesnost hodnoty odporu a šum vysokoohmových rezistorů

Přesnost hodnoty odporu vysokoohmových rezistorů, které budou použity v zesilovači, byla také změřena pomocí elektrometru. Teplota okolí byla $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu 44 %. Měřila se hodnota odporu pro úbytky napětí od 100 V do 700 V. Naměřené hodnoty se poté proložily přímkou a z jejího sklonu se určila přesnost rezistoru.

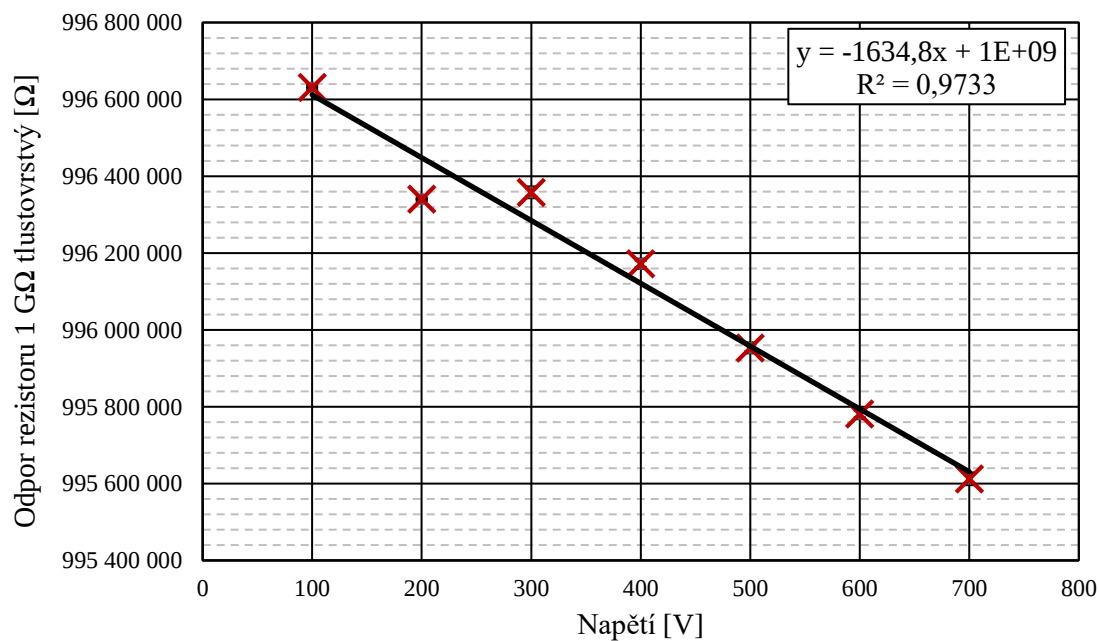
Na obrázku 9.10 je závislost odporu rezistoru $1\text{ G}\Omega$ na bázi oxidu kovu na úbytku napětí. Z obrázku je patrné, že rezistor je velice přesný a jeho hodnota je poměrně stálá se zvyšující se hodnotou úbytku napětí. Při nižších úbytcích napětí 100 V a 200 V je odpor rezistoru nejbližší hodnotě $1\text{ G}\Omega$. Při vyšších úbytcích napětí má hodnota odporu větší odchylku, je ale téměř konstantní. Sklon přímky je tedy poměrně malý.

Rezistor na bázi oxidu kovu byl porovnán s rezistorem $1\text{ G}\Omega$ série Slim-Mox vyrobeném tlustovrstvou technologií s přesností hodnoty odporu $\pm 1\text{ }%$ [49], jehož závislost odporu na úbytku napětí je na obrázku 9.11. Podle naměřených údajů jeho hodnota není tak přesná, jako hodnota rezistoru na bázi oxidu kovu a s rostoucím úbytkem napětí se odchylka výrazně zvětšuje. Tyto rezistory jsou jedny z nejpřesnějších

vysokoohmových rezistorů vyrobených tlustvrstvou technologií, ale rezistory na bázi oxidu kovu jsou přesnější. Jejich kvalita se projevuje také na jejich ceně, která je desetinásobně vyšší než cena rezistorů série Slim-Mox.

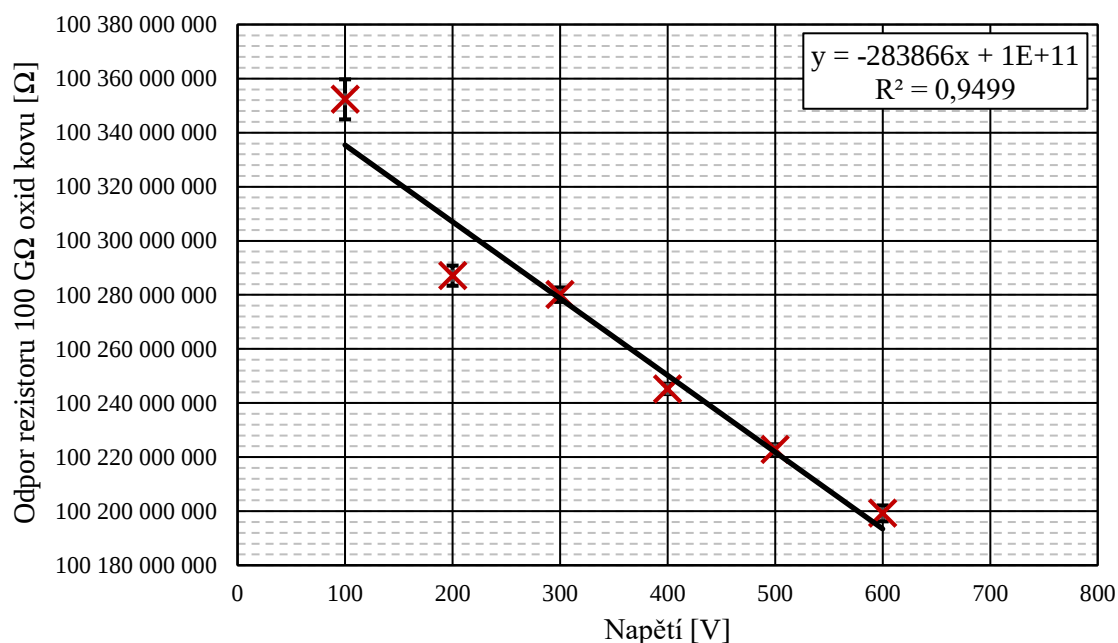


Obrázek 9.10 Závislost odporu rezistoru o velikosti 1 GΩ na bázi oxidu kovu na úbytku napětí



Obrázek 9.11 Závislost odporu rezistoru o velikosti 1 GΩ, vyrobeném tlustvrstvou technologií, na úbytku napětí

Byla změřena také přesnost hodnoty odporu rezistoru 100 GΩ na bázi oxidu kovu. Jeho závislost odporu na úbytku napětí je na obrázku 9.12. Tento rezistor je také velmi přesný, ale odchylka jeho hodnoty není při rozdílném úbytku napětí stálá. Rezistor o hodnotě 500 GΩ, který měl být v zesilovači použit k měření nejnižších rozsahů, nebyl dodavatelem doručen a nebyl tedy ani změřen.



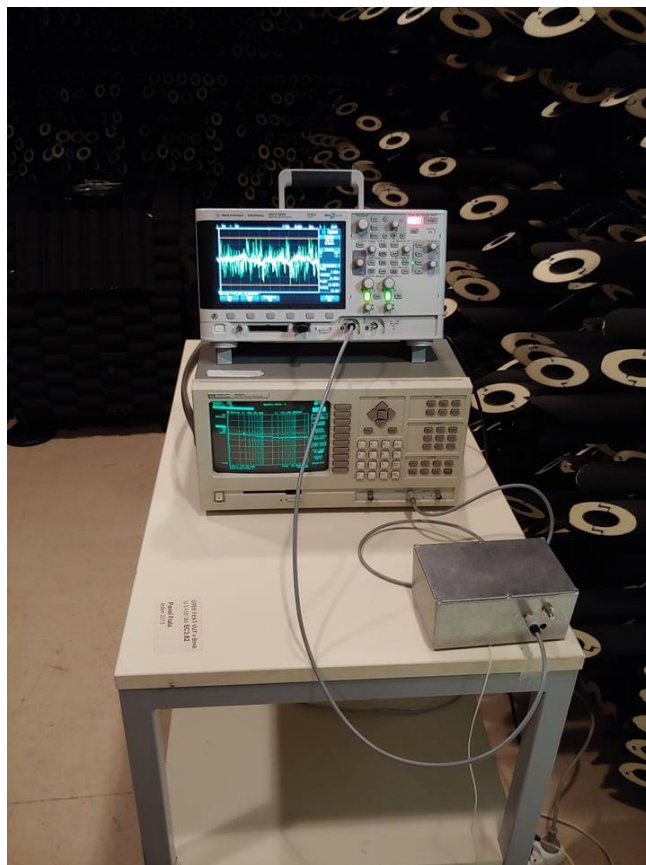
Obrázek 9.12 Závislost odporu rezistoru o velikosti 100 GΩ na bázi oxidu kovu na úbytku napětí

Změřen byl také šum rezistorů. Měření bylo provedeno se dvěma stejnými rezistory podle návrhu na obrázku 5.4. Byly měřeny rezistory o hodnotě 1 GΩ na bázi oxidu kovu a pro porovnání také rezistory vyrobené tlustovrstvou technologií série Slim-Mox. Rezistor o hodnotě 100 GΩ měřen nebyl, protože byl doručen pouze jeden kus a k měření touto metodou jsou zapotřebí dva kusy.

Úbytek napětí na rezistorech byl v obou případech 4,9 V. Úbytek bylo možné měnit pomocí víceotáčkového potenciometru, který byl připojen na vstup dvou paralelně zapojených operačních zesilovačů OPA211 se zesílením jedna. První byl zapojen v neinvertujícím zapojení a druhý v invertujícím. Napájení bylo z baterií, rezistory byly uzavřeny ve stínící krabici připojené na aktivní stínění pomocí bufferu. Celé měřicí uspořádání včetně baterií bylo uzavřeno ve velké stínící krabici připojené na zemnicí kolík v zásuvce. Pokud krabice nebyla uzemněna, bylo výstupní šumové napětí rušeno síťovým kmitočtem. Měření probíhalo ve stíněné komoře. Zapojení měřicího pracoviště pro měření šumu rezistorů je na obrázku 9.13. Teplota okolí byla 25 °C a relativní vlhkost vzduchu byla 53 %.

Výstupní šumové napětí rezistorů bylo zesíleno pomocí elektrometrických operačních zesilovačů LMC6001A se zesílením 40 dB. Zapojení sice umožňuje použití metody měření šumu pomocí vzájemné korelace dvou kanálů spektrálního analyzátoru, ale nakonec se tato možnost nevyužila, protože použitý spektrální analyzátor vzájemnou

korelaci kanálů neumožňuje. Použité operační zesilovače mají velmi malou hodnotu vstupního šumového napětí, takže chyba měření způsobená jejich šumem byla minimální a rozdíl výstupních časových průběhů obou operačních zesilovačů byl zanedbatelný.

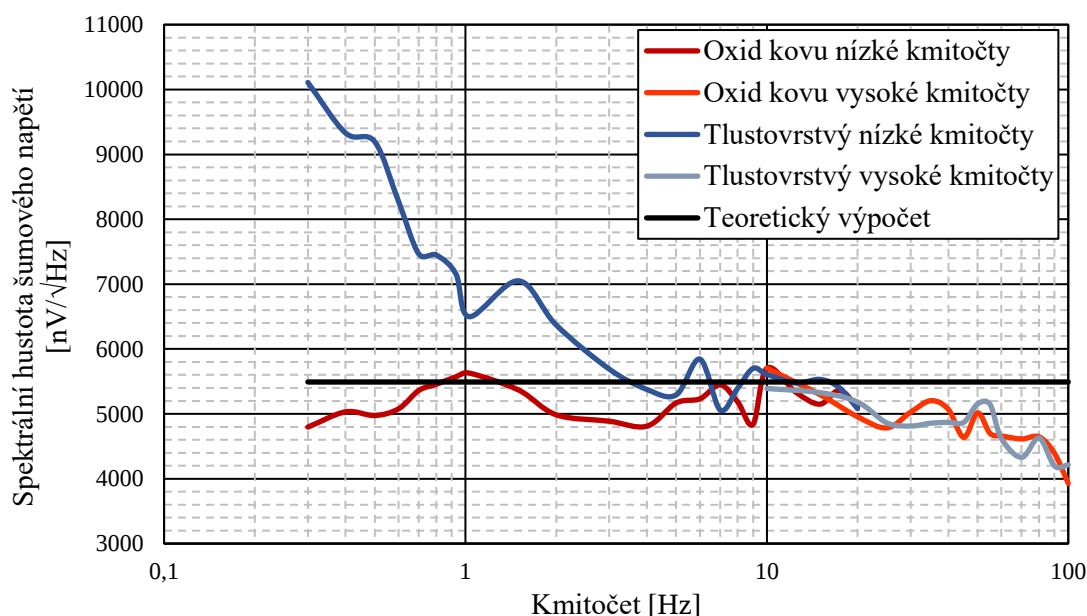


Obrázek 9.13 Zapojení měřicího pracoviště pro měření šumu rezistorů

Spektrální hustota šumového napětí byla změřena ve dvou kmitočtových pásmech pro oba rezistory. Nižší kmitočtové pásmo bylo od 0,3 Hz do 20 Hz a vyšší kmitočtové pásmo bylo od 10 Hz do 100 Hz. V obou kmitočtových pásmech bylo provedeno průměrování ze sta měření. Změřené hodnoty v dBV byly přepočítány na spektrální hustotu v jednotkách nV/√Hz podle vztahů (9.1) až (9.4). Spektrální hustota šumového napětí obou rezistorů v obou kmitočtových pásmech je na obrázku 9.14. U tlustovrstvého rezistoru je zřejmý vysoký nárůst spektrální hustoty na nízkých kmitočtech vlivem blikavého šumu $1/f$. Šum rezistoru na bázi oxidu kovu se dá posuzovat jako bílý v celém měřeném pásmu. Splňuje tedy specifikace výrobce a teoretické předpoklady pro rezistory vyrobené touto technologií. Na nejnižším měřeném kmitočtu 0,3 Hz je šum tlustovrstvého rezistoru dvojnásobně vyšší než šum rezistoru na bázi oxidu kovu i přesto, že se jedná o velmi kvalitní tlustovrstvé rezistory.

V obrázku je také vynesena teoretická úroveň Johnsonova tepelného bílého šumu pro rezistor o velikosti 1 GΩ vypočítaná podle vztahu (2.2). Protože v zapojení pro měření šumu rezistorů se dvěma stejnými rezistory jsou měřené rezistory zapojeny paralelně, odpovídaly naměřené hodnoty jednomu rezistoru o velikosti 0,5 GΩ. Změřené

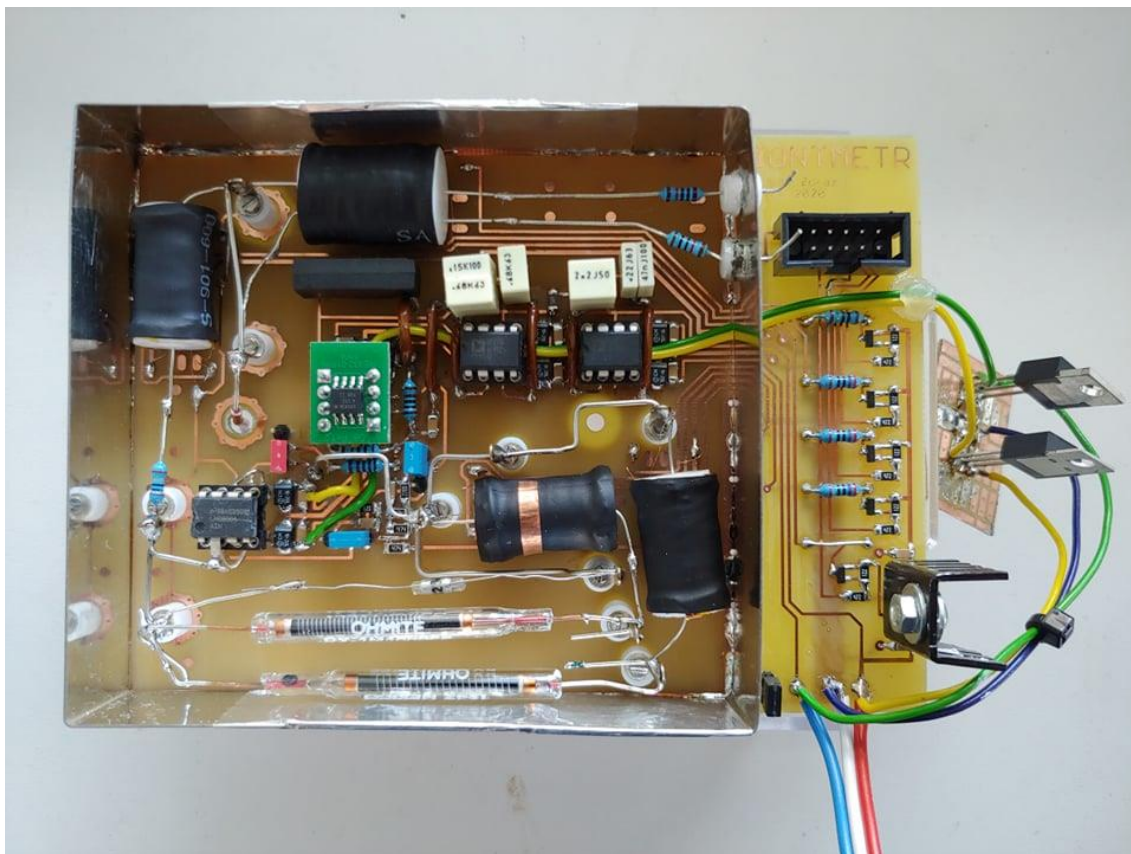
spektrální hustoty tedy musely být vynásobeny dvěma, aby odpovídaly teoretické úrovni. Některé naměřené hodnoty jsou nižší než vypočítaná teoretická úroveň. Může to být způsobeno malým zesílením šumového napětí. Spektrální analyzátor změřil příliš nízké úrovně s menší přesností. Na vyšších kmitočtech může být pokles spektrální hustoty způsoben útlumem filtru typu dolní propust, který je tvořen rezistory a jejich parazitní kapacitou. Na kmitočtu 50 Hz je možné pozorovat mírný nárůst spektrální hustoty vlivem rušení ze sítě.



Obrázek 9.14 Změřená spektrální hustota šumu rezistorů

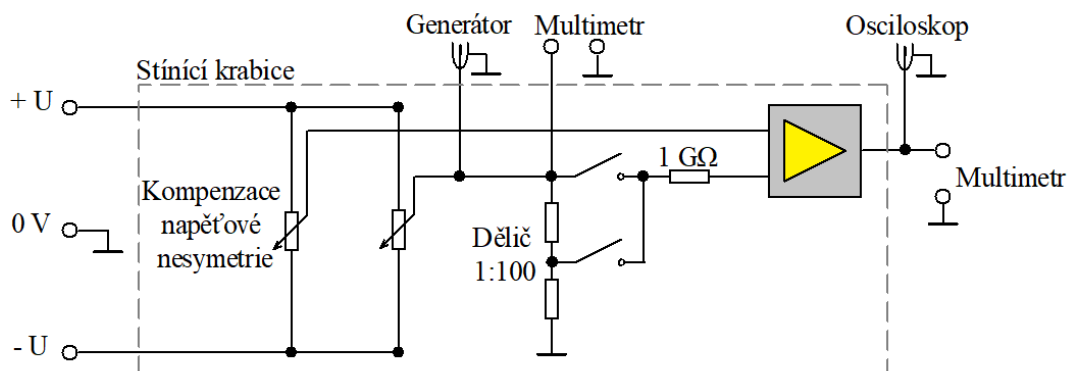
9.5 Převodní charakteristika a vstupní šumový proud zesilovače

V nízkourovňovém zesilovači se použil totožný operační zesilovač LMC6001A, pro který byl změřen jeho vstupní šumový a klidový proud. Deska plošných spojů se musela upravit, protože byla navržena pro operační zesilovač ADA4530-1. Použité zpětnovazební rezistory jsou stejné kusy, kterým byla změřena přesnost hodnoty odporu. Rezistor o velikosti $500\text{ G}\Omega$ nebyl dodavatelem doručen a v zapojení byl nahrazen kondenzátorem o kapacitě 12 pF , aby na výstupu nebylo kmitání. Šířka pásma byla tedy $0,13\text{ Hz}$ se zpětnovazebním rezistorem o velikosti $100\text{ G}\Omega$ a 13 Hz se zpětnovazebním rezistorem o velikosti $1\text{ G}\Omega$. Na výstupu zesilovače ovšem signál prochází filtrem typu dolní propust se šířkou pásma 2 Hz . Zesílení druhého stupně mělo být podle návrhu $1\times$ nebo $10\times$. Aby se ušetřil prostor na desce plošných spojů, spíná se pouze jedna zpětnovazební větev invertujícího zesilovače. Zesílení $1\times$ je tedy dáno paralelní kombinací obou zpětnovazebních rezistorů a jeho přesná hodnota je $0,909\times$. Fotografie nízkourovňového zesilovače ve stínící krabici je na obrázku 9.15. Pro účely kalibrace a ověření vlastností zesilovače byl polarizační kondenzátor nahrazen zkratem.



Obrázek 9.15 Nízkoúrovňový zesilovač ve stínící krabici

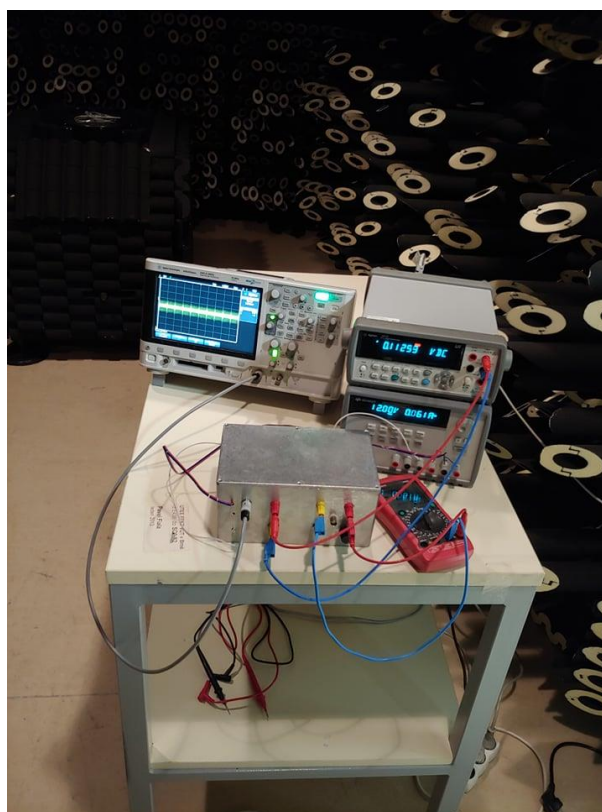
Kvůli potlačení rušení během měření se zesilovačem byla vyrobena stínící krabice, do které byl zesilovač uzavřen i se zdrojem velmi nízkého proudu. Nízký vstupní proud se vytvářel pomocí druhého kusu rezistoru na bázi oxidu kovu s odporem $1\text{ G}\Omega$. Podle výsledků měření s elektrometrem tento rezistor vykazoval větší přesnost odporu a nižší šum než ruský etalon o velikosti $1\text{ G}\Omega$, který byl speciálně zakoupen pro účely kalibrace zesilovače. Pro změření nižších rozsahů se před rezistor $1\text{ G}\Omega$ přidal dělič napětí 1:100. Změna vstupního napětí se prováděla víceotáčkovým potenciometrem. Před napěťový dělič byl také přidán BNC konektor pro připojení výstupu z generátoru. Zapojení měřícího uspořádání je na obrázku 9.16.



Obrázek 9.16 Zapojení měřícího uspořádání s nízkoúrovňovým zesilovačem

Zesilovači byl naměřen odběr z laboratorního zdroje 19 mA záporné napájecí větve a 56 mA kladné napájecí větve se sepnutým vstupním a jedním zpětnovazebním jazýčkovým relé s teflonovou kostrou. Jazýčkové relé ve zpětné vazbě druhého stupně zvýší odběr kladné větve na 70 mA. Počet sepnutých relé odpovídá situaci při reálném měření koncentrace vzdušných iontů. Zapojení zesilovače umožňuje měnit mezi kompenzací napěťové nesymetrie prvního a druhého stupně. Při měření zesilovače bylo zvoleno kompenzování nesymetrie druhého stupně. Změřená napěťová nesymetrie prvního stupně včetně vstupu celého nízkourovňového zesilovače byla 12 mV, což odpovídá vstupnímu chybovému proudu 120 fA. Změřená napěťová nesymetrie prvního stupně o velikosti 12 mV zřejmě vzniká na vstupní části zesilovače, protože operačnímu zesilovači LMC6001A byla v kapitole 9.2 naměřena vstupní napěťová nesymetrie 0,17 mV. Při měření koncentrace vzdušných iontů bude možné tuto napěťovou nesymetrii kompenzovat pomocí obslužného programu.

Nízkourovňový zesilovač byl také měřen ve stíněné komoře. Během měření byla teplota okolí 25 °C a relativní vlhkost vzduchu byla 57 %. Zapojení měřicího pracoviště je na obrázku 9.17. Napájení bylo z laboratorního zdroje. Před měřením byla vstupní část zesilovače důkladně očištěna kvalitním izopropylalkoholem.



Obrázek 9.17 Zapojení měřicího pracoviště pro měření zesilovače

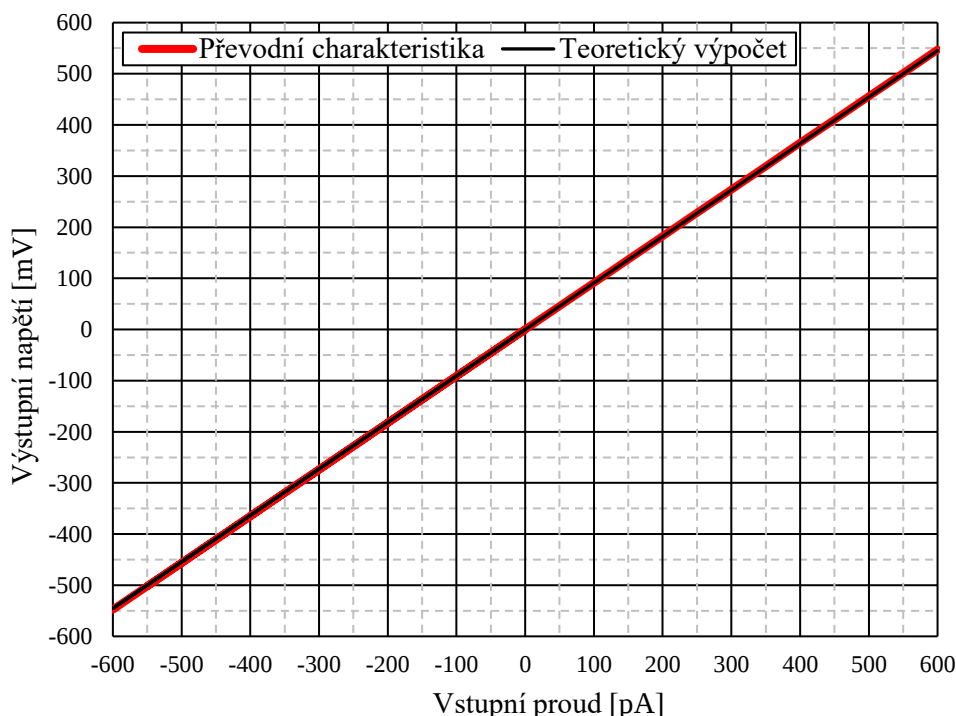
Nejprve byly změřeny převodní charakteristiky pro všechny čtyři rozsahy zesilovače. Víceotáčkovým potenciometrem byla nastavována úroveň vstupního proudu od -600 pA do 600 pA pro dva vyšší rozsahy s velikostí zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 1 G Ω , a od -6 pA do 6 pA pro dva nižší rozsahy s velikostí zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 100 G Ω . Větší změnu vstupního proudu nebylo

možné potenciometrem nastavit. Změřena byla tedy pouze lineární oblast všech rozsahů. Omezení je dáno saturací obou zesilovacích stupňů. První stupeň má symetrické napájení $\pm 5\text{ V}$ a druhý stupeň $\pm 12\text{ V}$. Maximální hodnoty rozsahu výstupního napětí tedy byly určeny 4 V , pokud druhý stupeň zesiluje $0,909\times$ a 10 V , pokud druhý stupeň zesiluje $10\times$. Na obrázcích 9.18 až 9.21 jsou zobrazeny lineární oblasti převodních charakteristik pro všechny čtyři rozsahy.

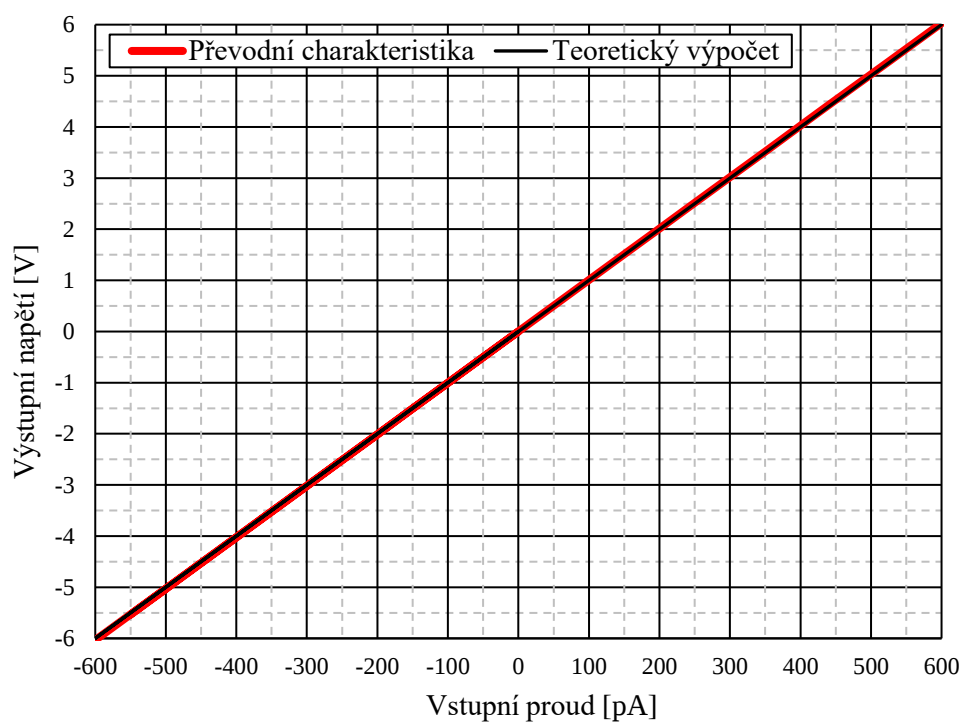
Pro naměřené hodnoty byly vypočítány také relativní odchylky z rozsahu a chyby linearity pro všechny čtyři rozsahy. Tabulky s naměřenými a vypočítanými hodnotami jsou v přílohách. Maximální hodnoty relativní odchylky z rozsahu a chyby linearity pro všechny čtyři rozsahy jsou v tabulce 5. Rozsahy, při kterých bylo zesílení druhého stupně $0,909\times$ byly změřeny v milivoltech a zaokrouhleny na dvě desetinná místa. Rozsahy, při kterých bylo zesílení druhého stupně $10\times$ byly změřeny ve voltech a zaokrouhleny na tři desetinná místa.

Tabulka 5 Maximální hodnoty relativní odchylky z rozsahu a chyby linearity pro všechny čtyři rozsahy nízkoúrovňového zesilovače

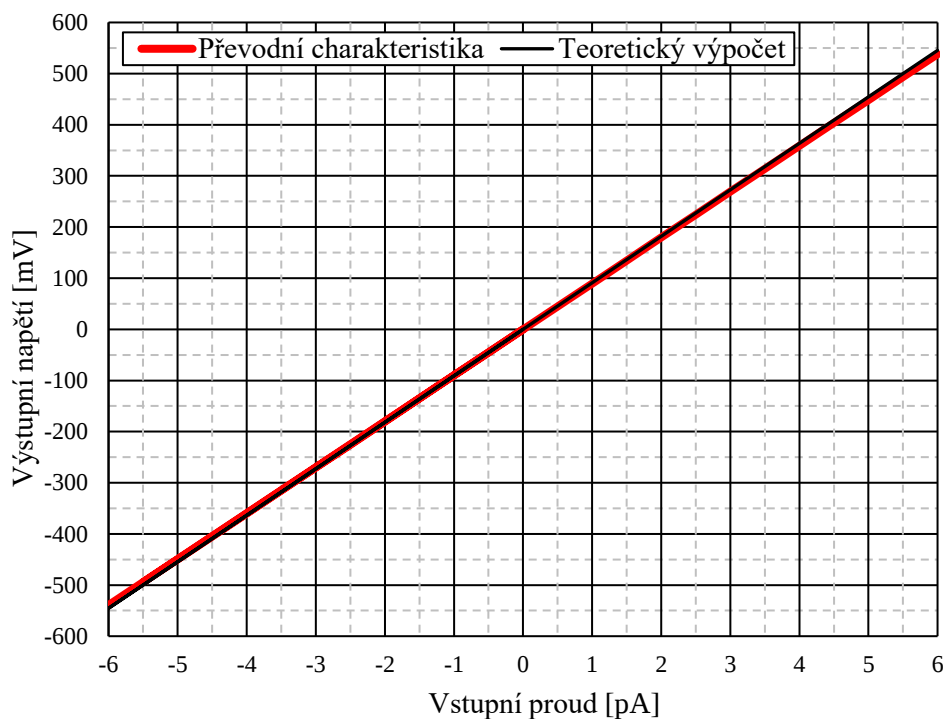
Rozsah	Maximální relativní odchylka z rozsahu	Maximální chyba linearity
1 G Ω a 0,909x	0,06 %	0,45 mV
1 G Ω a 10x	0,35 %	0,008 V
100 G Ω a 0,909x	0,19 %	0,83 mV
100 G Ω a 10x	0,55 %	-0,008 V



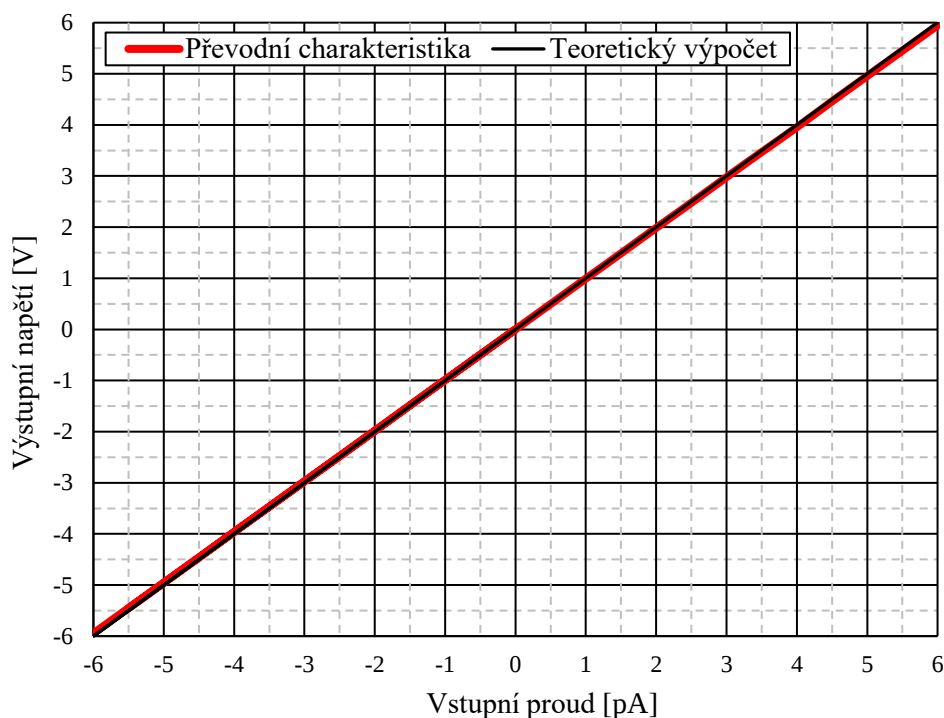
Obrázek 9.18 Převodní charakteristika zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 1 G Ω a zesílení druhého stupně $0,909\times$



Obrázek 9.19 Převodní charakteristika zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 1 GΩ a zesílení druhého stupně 10x



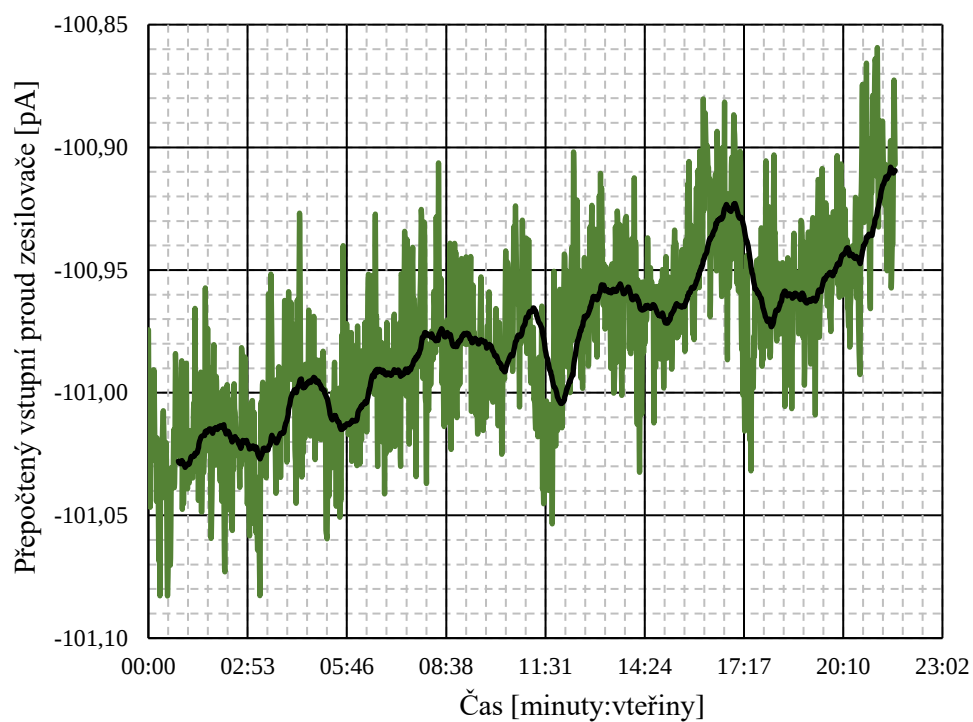
Obrázek 9.20 Převodní charakteristika zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 100 GΩ a zesílení druhého stupně 0,909x



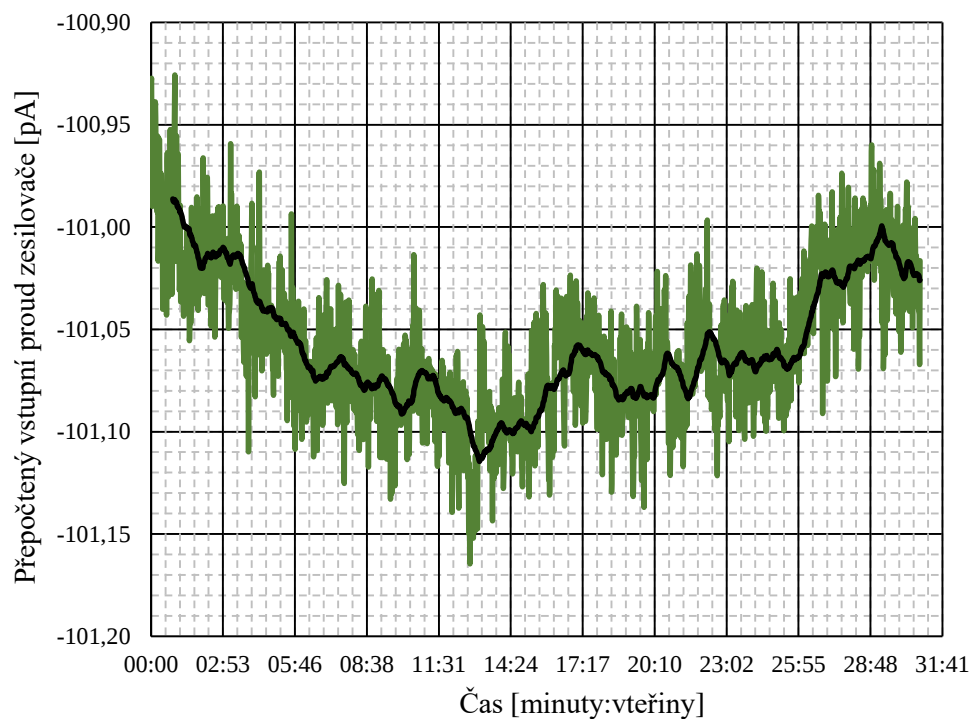
Obrázek 9.21 Převodní charakteristika zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $10\times$

Dále byl změřen vstupní šumový proud nízkoúrovňového zesilovače pro všechny čtyři rozsahy. Pro rozsahy s velikostí zpětnovazebního rezistoru prvního stupně $1\text{ G}\Omega$ byl nastaven vstupní proud -100 pA a pro rozsahy s velikostí zpětnovazebního rezistoru prvního stupně $100\text{ G}\Omega$ byl nastaven vstupní proud -1 pA . Napájení bylo z laboratorního zdroje. Při pokusu s napájením z baterií byl změřen pouze trend jejich vybíjení. Výstupní napětí bylo měřeno pomocí laboratorního multimetru ovládaného z počítače obslužným programem v prostředí Keysight VEE. Programem byla změřena časová závislost výstupního napětí, která byla poté přepočítána na časovou závislost vstupního proudu. Doba měření pro jednotlivé rozsahy se pohybovala od dvaceti do padesáti minut. Při měření koncentrace vzdušných iontů se provádí každých dvacet minut automatické nulování zesilovače, delší měření vstupního šumového proudu tedy nemá význam. Během měření byla okolní teplota $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu 57% . Při měření rozsahu s velikostí zpětnovazebního rezistoru prvního stupně $100\text{ G}\Omega$ a zesílením druhého stupně $0,909\times$ byla teplota okolí a relativní vlhkost vzduchu zaznamenávána dataloggerem teploty a vlhkosti. Časové průběhy z dataloggeru jsou v přílohách.

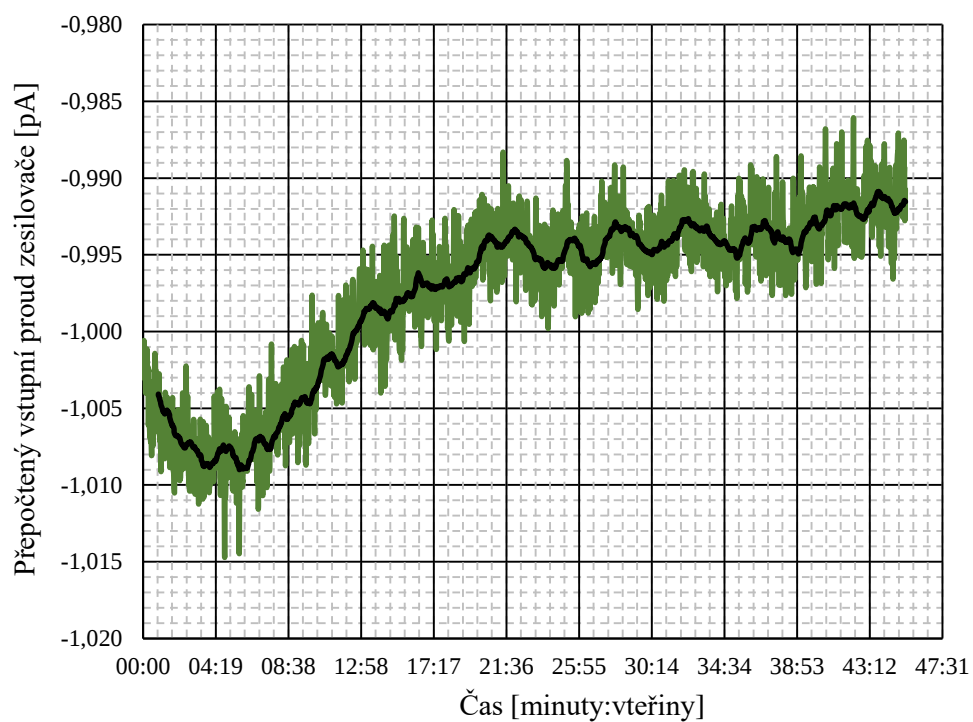
Na obrázcích 9.22 až 9.25 jsou zobrazeny časové závislosti vstupních proudů přepočítaných z výstupního napětí pro všechny čtyři rozsahy. V časové závislosti je patrné kolísání. Zřejmě je způsobené ustálením vstupního klidového proudu operačního zesilovače LMC6001A, které trvá přibližně osmnáct minut. Při dvou nižších rozsazích s velikostí zpětnovazebního rezistoru prvního stupně $100\text{ G}\Omega$, které byly měřeny delší dobu, je doba ustálení vstupního klidového proudu operačního zesilovače zřetelná. Změřená doba ustálení odpovídá době ustálení, která byla zjištěna při ověřování vlastností operačního zesilovače LMC6001A v kapitole 9.2. V časových průbězích je zobrazen trend jejich kolísání pomocí klouzavého průměru s periodou padesát vzorků.



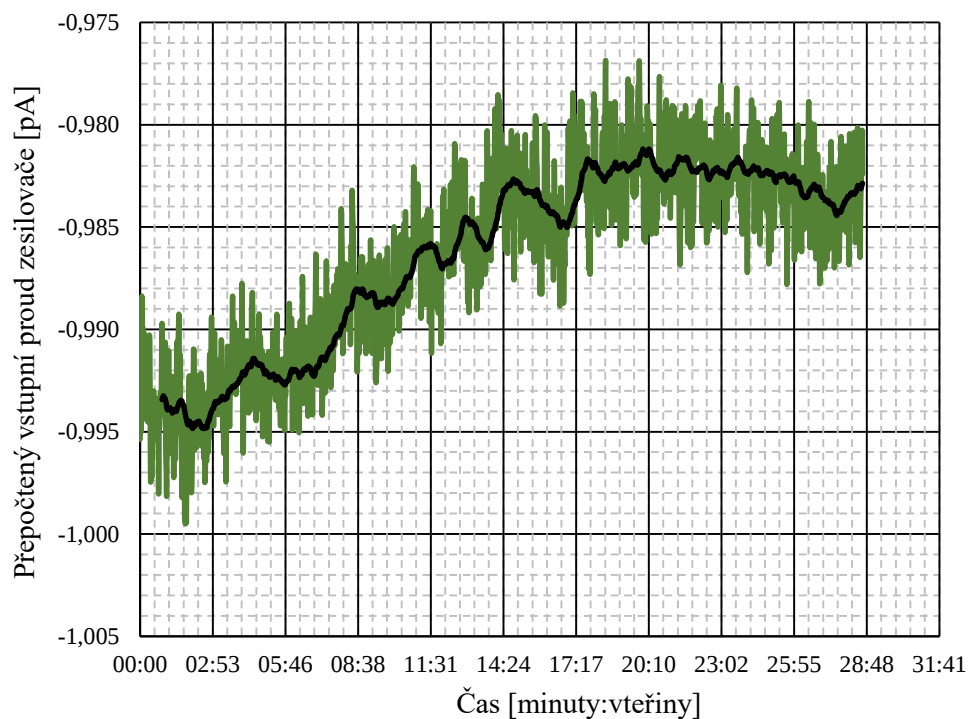
Obrázek 9.22 Přepočtený vstupní proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909x$



Obrázek 9.23 Přepočtený vstupní proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $10x$



Obrázek 9.24 Přepočtený vstupní proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909x$



Obrázek 9.25 Přepočtený vstupní proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru prvního stupně $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $10x$

Od všech přepočtených časových průběhů vstupního proudu byl odečten jejich trend kolísání, který byl zjištěn pomocí klouzavého průměru s periodou padesát vzorků. Šumy tedy byly normovány kolem nulové hodnoty a byla z nich zjištěna jejich mezivrcholová hodnota. Pro oba vyšší rozsahy s velikostí zpětnovazebního rezistoru prvního stupně $1\text{ G}\Omega$ je mezivrcholová hodnota zhruba 80 fA a pro oba nižší rozsahy je zhruba 8 fA . Časové průběhy normovaných vstupních šumových proudů pro všechny rozsahy jsou v přílohách. Z normovaných časových průběhů byly poté zobrazeny histogramy a byly z nich určeny statistické parametry šumu. Histogramy pro všechny normované časové průběhy jsou také v přílohách. Histogramy byly proloženy křivkou normálního rozdělení, která se téměř shoduje s rozdělením naměřených hodnot. Vstupní šumový proud zesilovače lze tedy považovat za Gaussovský. Střední hodnoty a směrodatné odchylky šumu pro všechny rozsahy jsou v tabulce 6. Hodnoty vstupních šumových proudů byly změřeny s platností na pět desetinných míst.

Tabulka 6 Statistické parametry vstupních šumových proudů pro všechny rozsahy zesilovače

Rozsah	Střední hodnota šumu	Směrodatná odchylka šumu
$1\text{ G}\Omega$ a $0,909x$	$0,00251\text{ pA}$	$0,02534\text{ pA}$
$1\text{ G}\Omega$ a $10x$	$-0,00048\text{ pA}$	$0,02202\text{ pA}$
$100\text{ G}\Omega$ a $0,909x$	$0,00013\text{ pA}$	$0,00187\text{ pA}$
$100\text{ G}\Omega$ a $10x$	$0,00018\text{ pA}$	$0,00197\text{ pA}$

Podle článku [50] se směrodatná odchylka bílého šumu rovná jeho efektivní hodnotě. Efektivní hodnoty vstupního šumového proudu zpětnovazebního ampérmetru v závislosti na velikosti zpětnovazebního rezistoru pro šířku pásma 1 Hz byly vypočítány v kapitole s počítačovými simulacemi a zobrazeny na obrázku 7.6 pro operační zesilovače ADA4530-1 a LMP7721. Pro hodnoty zpětnovazebního rezistoru až do $1\text{ T}\Omega$ lze teoretickou závislost efektivní hodnoty vstupního šumového proudu zpětnovazebního ampérmetru s operačním zesilovačem LMC6001A považovat za shodnou s vypočítanou závislostí pro operační zesilovač ADA4530-1. Naměřené efektivní hodnoty šumu pro obě velikosti zpětnovazebního rezistoru jsou vyšší než teoretické výpočty. Odlišnou efektivní hodnotu šumu v reálném řešení způsobuje zejména rozdílná šířka pásma, vliv teflonového relé a teflonových opěrných bodů na vstupu zesilovače a parametry operačního zesilovače, které nejsou totožné s typickými údaji udávanými v katalogovém listu.

9.6 Stanovení nejistot měření

Nejistota měření typu A byla vypočítána z naměřených časových průběhů výstupního napětí zesilovače podle vztahu pro výběrovou směrodatnou odchylku uvedeného v učebním textu [51].

Pro určení nejistoty měření typu B byla nejprve určena přenosová funkce zesilovače, která zahrnovala všechny dílčí zdroje nejistot. Přenosová funkce částečně vychází ze vztahu pro výstupní napětí zpětnovazebního ampérmetru (6.3). První člen tohoto vztahu bylo možné zanedbat, protože zesílení zpětnovazebního ampérmetru je dostatečně velké. Do vztahu byl naopak zahrnut člen pro napěťový přenos druhého stupně.

Pro zesílení druhého stupně 0,909x přenosová funkce zesilovače s dílčími zdroji nejistot nabývá tvaru:

$$u_{výstupní} = \left(-(i_{vstupní} - I_B^-) \cdot R + U_{OS} \right) \cdot \left(-\frac{\frac{R_{ZV1} \cdot R_{ZV2}}{R_{ZV1} + R_{ZV2}}}{R_{VST}} \right) \quad [V; A, \Omega, V], \quad (9.5)$$

kde $i_{vstupní}$ je vstupní proud zesilovače, který byl -100 pA pro rozsahy s velikostí zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 1 GΩ a -1 pA pro rozsahy s velikostí zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 100 GΩ, I_B^- je změřený vstupní klidový proud operačního zesilovače LMC6001A 36,9 fA, R je velikost zpětnovazebního rezistoru, U_{OS} je změřená napěťová nesymetrie operačního zesilovače LMC6001A 0,17 mV, R_{ZV1} a R_{ZV2} jsou velikosti zpětnovazebních rezistorů druhého stupně (R_9 a R_8 v příloze A.1) a R_{VST} je velikost vstupního rezistoru druhého stupně (R_7 v příloze A.1). Pro zesílení druhého stupně 10x přejde přenosová funkce zesilovače do jednoduššího tvaru:

$$u_{výstupní} = \left(-(i_{vstupní} - I_B^-) \cdot R + U_{OS} \right) \cdot \left(-\frac{R_{ZV1}}{R_{VST}} \right) \quad [V; A, \Omega, V]. \quad (9.6)$$

Pro obě přenosové funkce byly zjištěny citlivostní koeficienty pomocí parciálních derivací podle všech zdrojů nejistot. Zdroji nejistot jsou v obou případech všechny velikosti rezistorů s tolerancí $\pm 1\%$, vstupní klidový proud operačního zesilovače I_B^- a napěťová nesymetrie operačního zesilovače U_{OS} . Pro všechny zdroje nejistot byly určeny dílčí nejistoty typu B, které byly následně vynásobeny citlivostními koeficienty danými parciálními derivacemi přenosových funkcí. Odmocnina ze součtu druhých mocnin jednotlivých součinů dílčích nejistot a citlivostních koeficientů vyjadřuje nejistotu měření typu B.

Rozšířená nejistota měření U se podle návodu v učebním textu [51] určila pro všechny rozsahy jako součet druhých mocnin jednotlivých nejistot typu A i B pod odmocninou, vynásobený koeficientem rozšíření 2. Veškeré nejistoty měření pro všechny rozsahy nízkoúrovňového zesilovače jsou v tabulce 7. Postup výpočtu nejistot je v přiložených souborech.

Tabulka 7 Nejistoty měření pro všechny rozsahy zesilovače

Rozsah	Nejistota měření typu A	Nejistota měření typu B	Rozšířená nejistota měření U
1 GΩ a 0,909x	0,00000 V	0,00089 V	0,00178 V
1 GΩ a 10x	0,00001 V	0,01005 V	0,02010 V
100 GΩ a 0,909x	0,00001 V	0,00214 V	0,00429 V
100 GΩ a 10x	0,00012 V	0,02371 V	0,04742 V

Výsledné výstupní napětí ve voltech se pro zvolené vstupní proudy -100 pA a -1 pA poté zapíše ve tvaru $(-0,091 \pm 0,002)$ V pro první rozsah, $(-1,005 \pm 0,020)$ V pro druhý rozsah, $(-0,090 \pm 0,004)$ V pro třetí rozsah a $(-0,988 \pm 0,047)$ V pro čtvrtý rozsah, kde první číslo v závorce je skutečná změřená hodnota a druhé číslo je rozšířená nejistota U .

10 ZÁVĚR

V diplomové práci byla prostudována měřící metoda koncentrace vzdušných iontů s aspiračním kondenzátorem. Dále byly prostudovány zdroje rušení a omezení, které jsou při běžném měření zanedbatelné, ale při měření velmi nízkých proudů mají podstatný vliv na chybu měření. Jedná se například o svodové proudy po povrchu desek plošných spojů a po povrchu součástek. Byly prostudovány některé izolační materiály a jejich vlastnosti. Jako vhodný izolační materiál pro použití v nízkoúrovňovém zesilovači byl zvolen teflon.

Část práce se věnuje studiu šumů. Zejména se jedná o Johnsonův tepelný šum a blikavý šum $1/f$. Je zde probrán vznik těchto šumů v pasivních i aktivních součástkách. Při měření koncentrace vzdušných iontů má výrazný vliv na přesnost měření především úroveň blikavého šumu s kmitočtovou závislostí $1/f$. Při výběru součástek nízkoúrovňového zesilovače tedy bylo důležité, aby vybrané součástky generovaly v obvodu co nejnižší úroveň blikavého šumu $1/f$. Byly prostudovány měřící metody pro ověření úrovně blikavého šumu pasivních i aktivních součástek. Některé z nich byly v pozdější fázi vývoje nízkoúrovňového zesilovače realizovány.

Byl proveden průzkum trhu s přesnými operačními zesilovači, které se běžně používají k nízkoúrovňovým měřením. Z dostupných operačních zesilovačů byl vybrán model ADA4530-1, který je nejlepší z hlediska vstupního klidového a vstupního šumového proudu. Navíc je vybaven integrovaným bufferem pro aktivní stínění vstupu. Pro porovnání byl vybrán také model LMP7721, který má nejnižší úroveň vstupního šumového napětí ze všech dostupných přesných operačních zesilovačů.

Byly prostudovány možné varianty zapojení operačních zesilovačů pro měření velmi malých proudů. Jedná se o bočníkový ampérmetr, zpětnovazební ampérmetr a zpětnovazební coulombmetr. Podle náhradního schématu aspiračního kondenzátoru bylo zjištěno, že pro měření koncentrace vzdušných iontů s aspiračním kondenzátorem je vhodné volit zapojení zpětnovazebního ampérmetru nebo zpětnovazebního coulombmetru. Pro obě zapojení byly provedeny počítačové simulace s vybranými operačními zesilovači ADA4530-1 a LMP7721. Počítačové simulace prokázaly, že při měření velmi nízkých proudů jsou klíčovými parametry operačního zesilovače vstupní klidový a vstupní šumový proud. Do nízkoúrovňového zesilovače byl tedy vybrán operační zesilovač ADA4530-1. Z obou simulovaných zapojení bylo nakonec vybráno zapojení zpětnovazebního ampérmetru, protože zpětnovazební coulombmetr je náchylný k chybovosti kvůli případné nestabilitě doby nulování a nabíjení zpětnovazební kondenzátoru.

Podařilo se zajistit velmi přesné vysokoohmové rezistory velikosti $1\text{ G}\Omega$ a $100\text{ G}\Omega$ na bázi oxidu kovu pro použití ve zpětnovazebním ampérmetru. Výhoda této výrobní technologie spočívá v tom, že rezistory neprodukují téměř žádný blikavý šum $1/f$. Podle jedné z prostudovaných metod měření šumu rezistorů bylo navrženo a realizováno měřící uspořádání a byla změřena spektrální hustota šumu rezistoru na bázi oxidu kovu o velikosti $1\text{ G}\Omega$. Změřená spektrální hustota je v celém změřeném pásmu téměř konstantní a odpovídá teoretické úrovni Johnsonova tepelného šumu. Rezistory na bázi oxidu kovu tedy neprodukují žádný blikavý šum $1/f$. Pro porovnání byl změřen i kvalitní rezistor velikosti $1\text{ G}\Omega$, vyrobený tlustovrstvou technologií. Na nejnižším změřeném kmitočtu byla spektrální hustota šumu tohoto rezistoru zhruba dvakrát vyšší než spektrální hustota šumu rezistoru na bázi oxidu kovu. Pomocí vysokoimpedančního pracoviště

s elektrometrem Keithley 6517A byla ověřena také přesnost odporu vysokoohmových rezistorů. Rezistory na bázi oxidu kovu jsou přesnější než rezistory vyrobené tlustovrstvou technologií.

Podle průzkumu konstrukčních uspořádání elektrometrů bylo navrženo konstrukční uspořádání nízkoúrovňového zesilovače. Vstupní část zesilovače byla vyřešena pomocí vzdušných spojů podepřených teflonovými opěrnými body vlastní výroby. Kostry vstupních jazýčkových relé pro přepínání mezi měřením a nabíjením polarizačního kondenzátoru a zpětnovazebních jazýčkových relé byly také vyrobeny z teflonu. Okolo teflonových opěrných bodů na desce plošných spojů byly navrženy stínící prstence k aktivnímu stínění. Aktivní stínění se využilo i u jazýčkových relé pomocí měděné pásky navinuté okolo teflonových koster relé. U jazýčkových relé byl pomocí elektrometru změřen svodový proud při úbytku napětí 100 V. Svodový proud mezi vinutím a kontaktem byl pro všechna měřená relé v rozmezí mezi 15 fA až 30 fA a svodový proud mezi kontakty byl u většiny jazýčkových relé pod hranici detekovatelnosti elektrometru. Nízkoúrovňový zesilovač byl doplněn o druhý zesilovací stupeň se zesílením 10x nebo 0,909x a filtr typu dolní propust se šířkou pásma 2 Hz.

Operační zesilovač ADA4530-1 nebyl dodavatelem doručen. Podařilo se zajistit náhradní operační zesilovač LMC6001A, který má téměř stejně dobré parametry vstupního klidového a vstupního šumového proudu. Tomuto operačnímu zesilovači byl naměřen vstupní klidový proud 36,9 fA a vstupní napěťová nesymetrie 0,17 mV. Změřena byla také efektivní hodnota vstupního šumového proudu 1,8 fA v pásmu do 0,01 Hz.

Nízkoúrovňový zesilovač byl zkonstruován a byla změřena lineární oblast jeho převodní charakteristiky pro všechny rozsahy. Pro veškeré naměřené hodnoty byla vypočítána relativní odchylka z rozsahu a chyba linearity. Nejvyšší vypočítaná hodnota relativní odchylky z rozsahu je 0,55 % a nejvyšší hodnota chyby linearity je 8 mV. Obě hodnoty platí pro nejnižší rozsah s velikostí zpětnovazebního rezistoru prvního stupně 100 G Ω a zesílení druhého stupně 10x. Pouze půlprocentní maximální relativní odchylka na nejnižším rozsahu zesilovače svědčí o jeho vysoké přesnosti. Zesilovači byla také změřena vstupní napěťová nesymetrie prvního stupně 12 mV, což odpovídá vstupnímu chybovému proudu 120 fA. Pro porovnání byl změřen také vstupní chybový proud elektrometru Keithley 6517. Zjištěná hodnota byla 250 fA. Zesilovač má tedy nižší hodnotu vstupního chybového proudu než komerčně vyráběný kvalitní elektrometr. Dále byl změřen vstupní šumový proud zesilovače pro všechny rozsahy. Mezivrcholová hodnota šumu pro dva vyšší rozsahy je zhruba 80 fA a pro dva nižší rozsahy je zhruba 8 fA. Byla také vypočítána střední hodnota šumu a jeho směrodatná odchylka pro všechny rozsahy. Ze statistických parametrů šumu a z histogramů lze usuzovat, že se podařilo dosáhnout normálního rozdělení vstupního šumového proudu. Velká výhoda zesilovače tedy je, že nevytváří téměř žádný blikavý šum s kmitočtovou závislostí 1/f. Vysokou odolnost proti mechanickým otřesům zajišťují teflonové opěrné body. Pro všechny rozsahy byly také vypočítány nejistoty měření typu A i B a rozšířená nejistota měření U.

Měření parametrů zesilovače probíhalo ve stíněné komoře při stálé okolní teplotě 25 °C a relativní vlhkosti vzduchu v rozmezí 50 % až 60 %. Měření koncentrace vzdušných iontů se provádí v jeskyních, kde je nižší okolní teplota a vyšší relativní vlhkost vzduchu. Vyšší relativní vlhkost vzduchu bude ovšem pohlcena vysoušecím gelem v instalační krabici s iontmetrem, Nižší okolní teplota bude mít pozitivní účinek na vstupní klidový proud operačního zesilovače a sníží jeho hodnotu.

LITERATURA

- [1] F. T. FREUND, I. G. KULAHCI, G. CYR, J. LING, M. WINNICK, J. TREGLOANREED A FREUND M. M., *Air ionization at rock surfaces and pre-earthquake signals Original Research Article Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 71, Issues 17–18, December 2009, Pages 1824-1834.
- [2] KRUEGER, A. P.; REED, E. J. *Biological impact of small ions*. Science. 1976, 193, s. 1209–1213.
- [3] A. L. TCHIEVSKY, *A Manual for the Application of Ionized Air in Industry, Agriculture, and Medicine* (in Russian). Moscow, Russia: Gosplanizdat, 1959.
- [4] ŠOT, Jan. *Nízkoúrovňová měření pro zjištění koncentrace vzdušných iontů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 51 s., 17 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Roubal.
- [5] ROUBAL, Zdeněk. *Nízkoúrovňová měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 95 s. Vedoucí disertační práce: doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.
- [6] HÖRRAK, U. *Air ion mobility spectrum at a rural area*. Tartu: Dissertationes Geophysicales Universitatis Tartuensis, 2001.
- [7] LENARD, P. *Über die Elektrizität der Wasserfälle*. Ann. Phys. Lpz. 46: 1892, 584–636.
- [8] SPURNÝ, Zdeněk. *Atmosférická ionizace*. Praha: Československá akademie věd, 1985. 156 s.
- [9] ŠEDA, Josef. *Dozimetrie ionizujícího záření: vysokoškolská učebnice*. Praha: SNTL, 1983. 418 s.
- [10] JANDL, Jaromír a Ivo PETR. *Ionizující záření v životním prostředí*. Praha: SNTL, 1988. 200 s.
- [11] BARTUŠEK, Karel. *Měření spektrálních charakteristik iontových polí*. *Elektrorevue* [online]. 2001, 2001/38, [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01038/index.html>.
- [12] P. KOLARŽ, B. P. MARINKOVIĆ a FILIPOVI D. M. *Zeroing and testing units developed for Gerdien atmospheric ion detectors*. *Review of Scientific Instruments*, 76, 2005, 046107–9.
- [13] TAMMET, H. *Symmetric inclined grid mobility analyzer for the measurement of charged clusters and fine nanoparticles in atmospheric air*. *Aerosol Sci. Technol.*, 45, 2011, 468–479.
- [14] 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.
- [15] *Low Level Measurements Handbook: Precision DC Currents, Voltage, and Resistance Measurements* [online]. Ohio, USA: Keithley Instruments, Inc., 2004 [cit. 2019-10-31]. Dostupné z: <https://web.mit.edu/8.13/8.13d/manuals/LowLevMsHandbk.pdf>.
- [16] VRBA, Kamil. *Konstrukce elektronických zařízení*. První vydání. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, Brno, 2013, 249 s. ISBN 978-80-214-4719-6.

- [17] DOSTÁL, Tomáš. *Teorie obvodů*. První vydání. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, Brno, 2006, 177 s. ISBN 80-214-3312-4.
- [18] PETRŽELA, Jiří. *Teorie elektronických obvodů*. První vydání. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, Brno, 2012, 200 s. ISBN 978-80-214-4494-2.
- [19] SEIFERT, Frank. *Resistor Current Noise Measurements* [online]. 2009, [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://dcc.ligo.org/public/0002/T0900200/001/current_noise.pdf.
- [20] MÄRKI, Peter. *White Paper thick film resistor flicker noise* [online]. 2013, [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://people.phys.ethz.ch/~pmaerki/public/resistor_flicker_noise/20171219a_white_paper_resistor_flicker_noise.pdf.
- [21] KEITHLEY INSTRUMENTS. *6517A Electrometer/High Resistance Meter* [online], [cit. 2019-12-2]. Dostupné z: <https://xdevs.com/doc/Keithley/6517/data.pdf>.
- [22] EEVblog Electronics Community Forum. *Topic: Electrometer output stage, Keithley 6517* [online], [cit. 2019-12-2]. Dostupné z: <https://www.eevblog.com/forum/repair/electrometer-output-stage-keithley-6517/25/>.
- [23] KEITHLEY INSTRUMENTS. *Model 6517A Electrometer Service Manual* [online]. 1999, [cit. 2019-12-2]. Dostupné z: https://xdevs.com/doc/Keithley/6517/6517A_902_01B.pdf.
- [24] LÁNÍČEK, Robert. *Elektronika: obvody - součástky - děje*. Praha: BEN – technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-25-2.
- [25] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 4. dopl. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-37-6.
- [26] BRANČÍK, Lubomír., DOSTÁL, Tomáš. *Analogové elektronické obvody: přednášky*. První vydání. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, Brno, 2007, 125 s. ISBN 978-80-214-3525-4.
- [27] VRBA, Kamil. *Analogová technika*. První vydání. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, Brno, 2012, 202 s. ISBN 978-80-214-4458-4.
- [28] ANALOG DEVICES. *ADA4530-1: Femtoampere Input Bias Current Electrometer Amplifier* [online]. 2015, [cit. 2019-12-8]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4530-1.pdf>.
- [29] TEXAS INSTRUMENTS. *LMP7721: 3-Femtoampere Input Bias Current Precision Amplifier* [online]. 2014, [cit. 2019-12-8]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp7721.pdf>.
- [30] TEXAS INSTRUMENTS. *OPA129: Ultra-Low Bias Current Difet OPERATIONAL AMPLIFIER* [online]. 2007, [cit. 2019-12-8]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa129.pdf>.
- [31] ANALOG DEVICES. *AD549: Ultralow Input Bias Current Operational Amplifier* [online]. 2002, [cit. 2019-12-8]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD549.pdf>.
- [32] TEXAS INSTRUMENTS. *LMC6001: Ultra-Low Input Current Amplifier* [online]. 2015, [cit. 2019-12-8]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/snos694i/snos694i.pdf>.

- [33] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky 5. díl - Operační zesilovače a komparátory*. První vydání. Nakladatelství BEN, Praha, 2007, 232 s. ISBN 978-80-7300-187-2.
- [34] TEXAS INSTRUMENTS. *INA116: Ultra Low Input Bias Current INSTRUMENTATION AMPLIFIER* [online]. 1995, [cit. 2019-12-8]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina116.pdf>.
- [35] DEPARTMENT OF DEFENSE TEST METHOD STANDARD: *Method 308, current-noise test for fixed resistors*. [online]. 2015, [cit. 2019-12-14]. Dostupné z: <https://landandmaritimeapps.dla.mil/Downloads/MilSpec/Docs/MIL-STD-202/std202mthd308.pdf>.
- [36] ARNABOLDI, C. et al. *Low-frequency noise characterization of very large value resistors*, in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 49, no. 4, pp. 1808-1813, Aug. 2002.
- [37] CIOFI, C.; CRUPI, F.; PACE, C. *A new method for high-sensitivity noise measurements*, in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 51, no. 4, pp. 656-659, Aug. 2002.
- [38] RENESAS. *AN1560: Making Accurate Voltage Noise and Current Noise Measurements on Operational Amplifiers Down to 0.1 Hz* [online]. 2011, [cit. 2019-12-14]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/eu/en/www/doc/application-note/an1560.pdf>.
- [39] DOSTÁL, Jiří. *Operační zesilovače*. Praha: BEN-technická literatura, 2005. 536 s. ISBN 80-7300-049-0.
- [40] BARTUŠEK, K., FIALA, P., JIRKŮ, T. a E. KROUTILOVÁ., 2007. *Experiments of Accuracy Air Ion Field Measurement*. PIERS Online, 3 (8), s. 1330-1333. ISSN: 1931- 7360.
- [41] EEVblog Electronics Community Forum. *Topic: Fun With Low Leakage/Bias Current: Femtompere, Electrometer, Keithley 617* [online]. [cit. 2020-2-2]. Dostupné z: <https://www.eevblog.com/forum/testgear/fun-with-low-leakagebias-current-femtompere-electrometer-keithley-617/>.
- [42] xDevs.com. *Keithley 6517 Electrometer / High-resistance meter repair* [online]. [cit. 2020-2-2]. Dostupné z: <https://xdevs.com/fix/kei6517/>.
- [43] xDevs.com. *Keithley 6517A electrometer restoration project* [online]. [cit. 2020-2-2]. Dostupné z: https://xdevs.com/fix/k6517a_u2/.
- [44] MEDER. *Jazyčkový kontakt KSK 1A46* [online]. 2009, [cit. 2020-2-2]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/sheets/k/ksk1a46-1520.pdf>.
- [45] OHMITE. *RX-1M Hi-Meg* [online]. 2015, [cit. 2020-2-2]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/303/res_rx1m-1317429.pdf.
- [46] TEXAS INSTRUMENTS. *OPA211: 1.1-nV/√Hz Noise, Low Power, Precision Operational Amplifiers* [online]. 2006, [cit. 2020-2-2]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa211.pdf>.
- [47] HÁJEK, Karel, SEDLÁČEK, Jiří. *Kmitočtové filtry*. První vydání. Technická literatura BEN, Praha, 2002. 535 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [48] ANALOG DEVICES. *OP27: Low-Noise, Precision Operational Amplifier* [online]. 2003, [cit. 2020-2-2]. Dostupné z: <http://www.mit.edu/~6.301/OP27c.pdf>.
- [49] OHMITE. *Slim-Mox* [online]. 2001, [cit. 2020-6-27]. Dostupné z: https://www.ohmite.com/assets/docs/res_slimmox.pdf.
- [50] BIOLEK, Dalibor. *Šumová analýza* [online]. [cit. 2020-7-15]. Dostupné z: https://user.unob.cz/biolek/vyukaVUT/prednasky/BMPS/pro_studenty8.pdf.

- [51] BARTUŠEK, K., GESCHEIDTOVÁ, E., REZ, J., STEINBAUER, M., KUBÁSEK, R., MIKULKA, J. *Měření v elektrotechnice*. 2., přeprac. a dopl. vydání. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky, Brno, 2010, 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6

SEZNAM PŘÍLOH

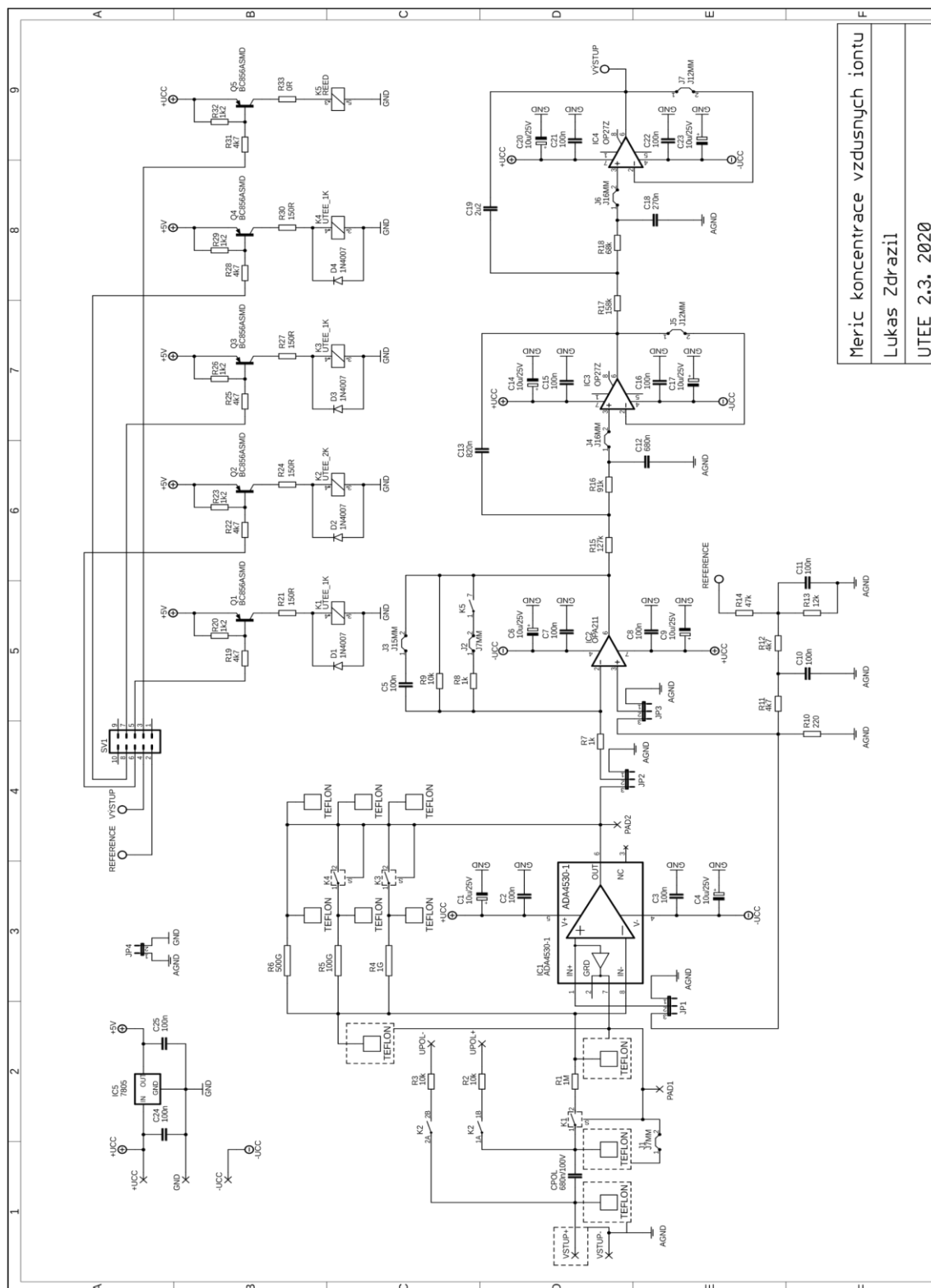
A	Návrh zařízení	80
A.1	Obvodové zapojení zesilovače	80
A.2	Deska plošného spoje zesilovače – top	81
A.3	Deska plošného spoje zesilovače – bottom	81
A.4	Osazovací plán zesilovače – top.....	82
A.5	Osazovací plán zesilovače – bottom	82
A.6	Obvodové zapojení měřiče šumu rezistorů	83
A.7	Deska plošného spoje měřiče šumu rezistorů – top	84
A.8	Deska plošného spoje měřiče šumu rezistorů – bottom	84
A.9	Osazovací plán měřiče šumu rezistorů – top.....	85
A.10	Osazovací plán měřiče šumu rezistorů – bottom	85
A.11	Obvodové zapojení měřiče I_N a I_B OZ LMC6001A.....	86
A.12	Deska plošného spoje měřiče I_N a I_B OZ LMC6001A – top	87
A.13	Deska plošného spoje měřiče I_N a I_B OZ LMC6001A – bottom.....	87
A.14	Osazovací plán měřiče I_N a I_B OZ LMC6001A – top	88
A.15	Osazovací plán měřiče I_N a I_B OZ LMC6001A – bottom	88
A.16	Obvodové zapojení měřiče U_{OS} a U_N OZ LMP7721	89
A.17	Deska plošného spoje měřiče U_{OS} a U_N OZ LMP7721 – top.....	90
A.18	Deska plošného spoje měřiče U_{OS} a U_N OZ LMP7721 – bottom	90
A.19	Osazovací plán měřiče U_{OS} a U_N OZ LMP7721 – top	91
A.20	Osazovací plán měřiče U_{OS} a U_N OZ LMP7721 – bottom.....	91
B	Seznam součástek	92
B.1	Seznam součástek pro zesilovač	92
B.2	Seznam součástek pro měřič šumu rezistorů.....	94
B.3	Seznam součástek pro měřič I_N a I_B OZ LMC6001A	95
B.4	Seznam součástek pro měřič U_{OS} a U_N OZ LMP7721.....	96
C	Seznam použitých měřících přístrojů.....	98
D	Ostatní přílohy.....	99
D.1	Časový průběh šumového napětí měřicího systému bez OZ LMP7721	99
D.2	Časový průběh šumového napětí s OZ LMP7721	100
D.3	Měřič I_N a I_B OZ LMC6001A ve stínící krabici	101

D.4	Relé uvnitř stínící nádoby elektrometru	102
D.5	Měřič šumu rezistorů ve stínící krabici	103
D.6	Časové průběhy obou výstupů šumového napětí rezistorů a jejich rozdíl	104
D.7	Zesilovač ve stínící krabici	105
D.8	Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot převodní charakteristiky při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\text{x}$	106
D.9	Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot převodní charakteristiky při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně 10x	107
D.10	Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot převodní charakteristiky při velikosti zpětnovazebního rezistoru $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\text{x}$	108
D.11	Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot převodní charakteristiky při velikosti zpětnovazebního rezistoru $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně 10x	109
D.12	Časová závislost okolní teploty během měření šumu při velikosti zpětnovazebního rezistoru $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\text{x}$	110
D.13	Časová závislost relativní vlhkosti vzduchu během měření šumu při velikosti zpětnovazebního rezistoru $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\text{x}$	111
D.14	Normovaný vstupní šumový proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\text{x}$	112
D.15	Normovaný vstupní šumový proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně 10x	113
D.16	Normovaný vstupní šumový proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\text{x}$	114
D.17	Normovaný vstupní šumový proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně 10x	115
D.18	Histogram normovaného vstupního šumového proudu zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\text{x}$	116
D.19	Histogram normovaného vstupního šumového proudu zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně 10x	117
D.20	Histogram normovaného vstupního šumového proudu zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\text{x}$	118
D.21	Histogram normovaného vstupního šumového proudu zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně 10x	119
D.22	Odezva zesilovače na obdélníkový vstupní signál při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\text{x}$	120
D.23	Odezva zesilovače na obdélníkový vstupní signál při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\text{x}$ – detail náběžné hrany	121
D.24	Odezva zesilovače na obdélníkový vstupní signál při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně 10x	122

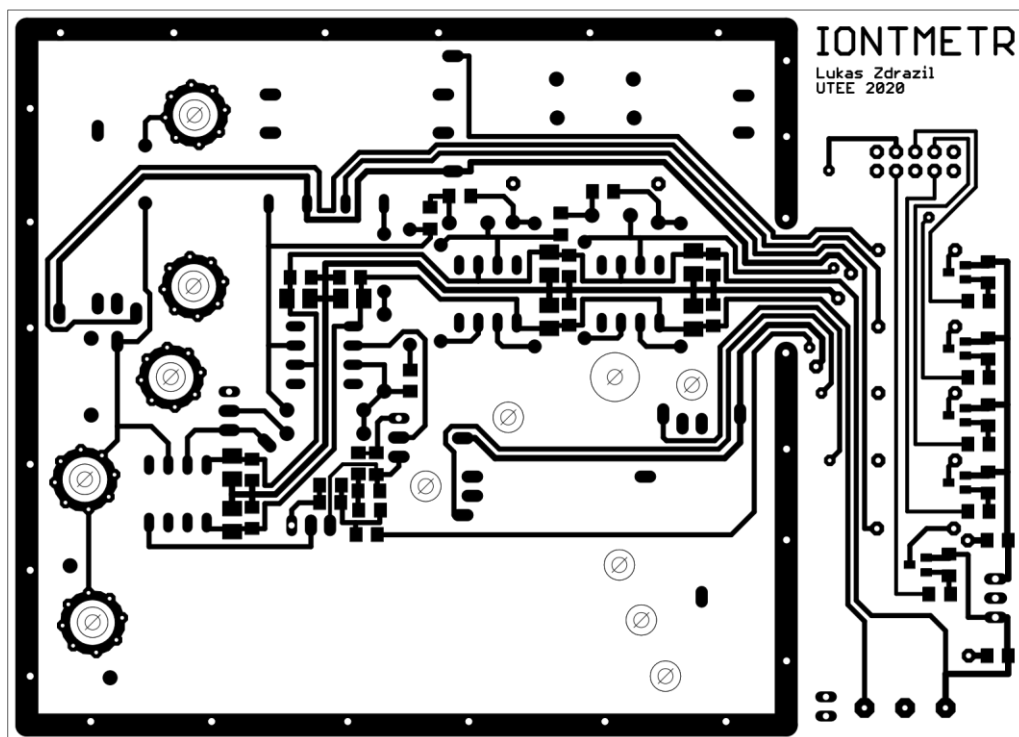
D.25 Odezva zesilovače na obdélníkový vstupní signál při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $10\times$ – detail náběžné hrany	123
D.26 Odezva zesilovače na obdélníkový vstupní signál při velikosti zpětnovazebního rezistoru $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\times$	124
D.27 Odezva zesilovače na obdélníkový vstupní signál při velikosti zpětnovazebního rezistoru $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $10\times$	125

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Obvodové zapojení zesilovače

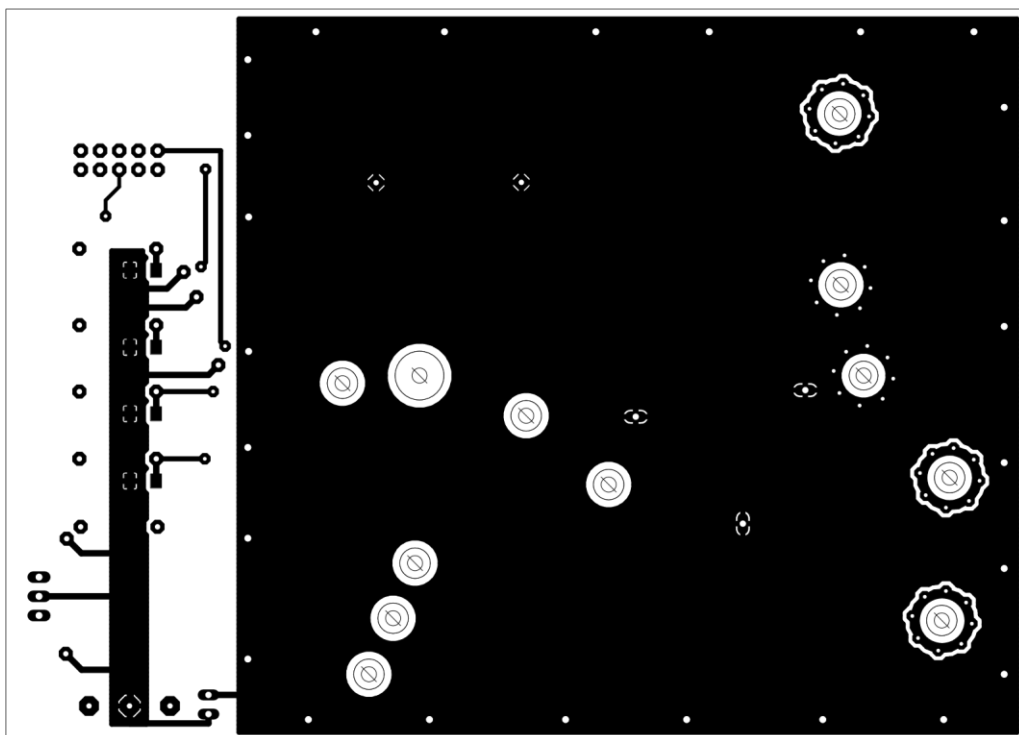


A.2 Deska plošného spoje zesilovače – top



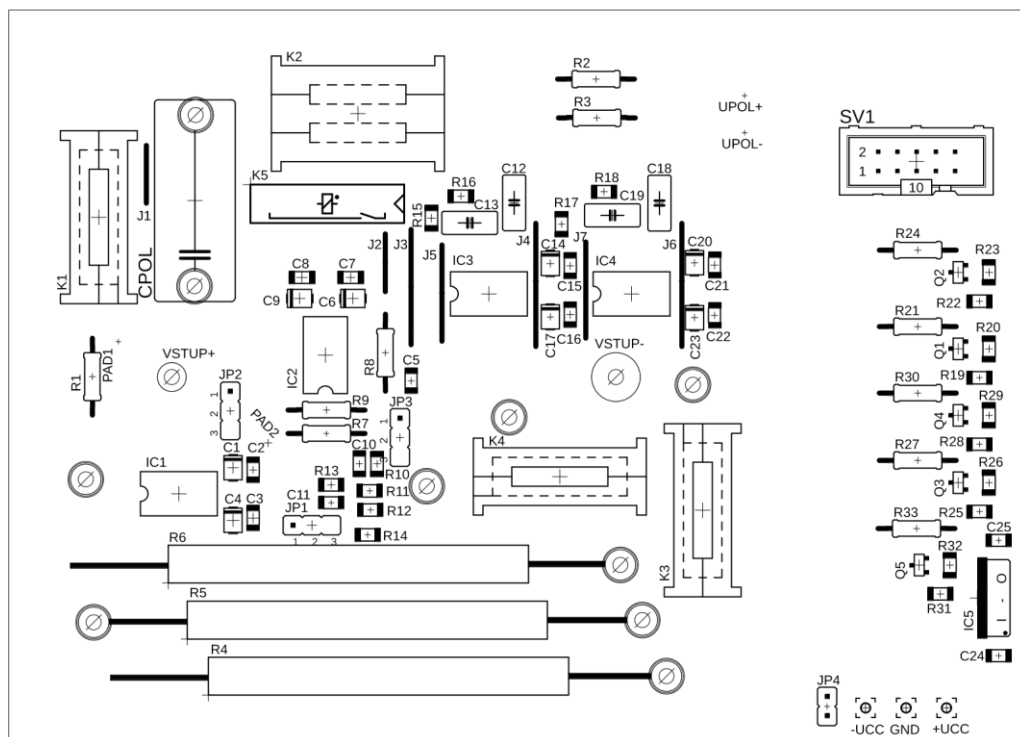
Rozměr desky 135 x 97 [mm], měřítko M1:1

A.3 Deska plošného spoje zesilovače – bottom

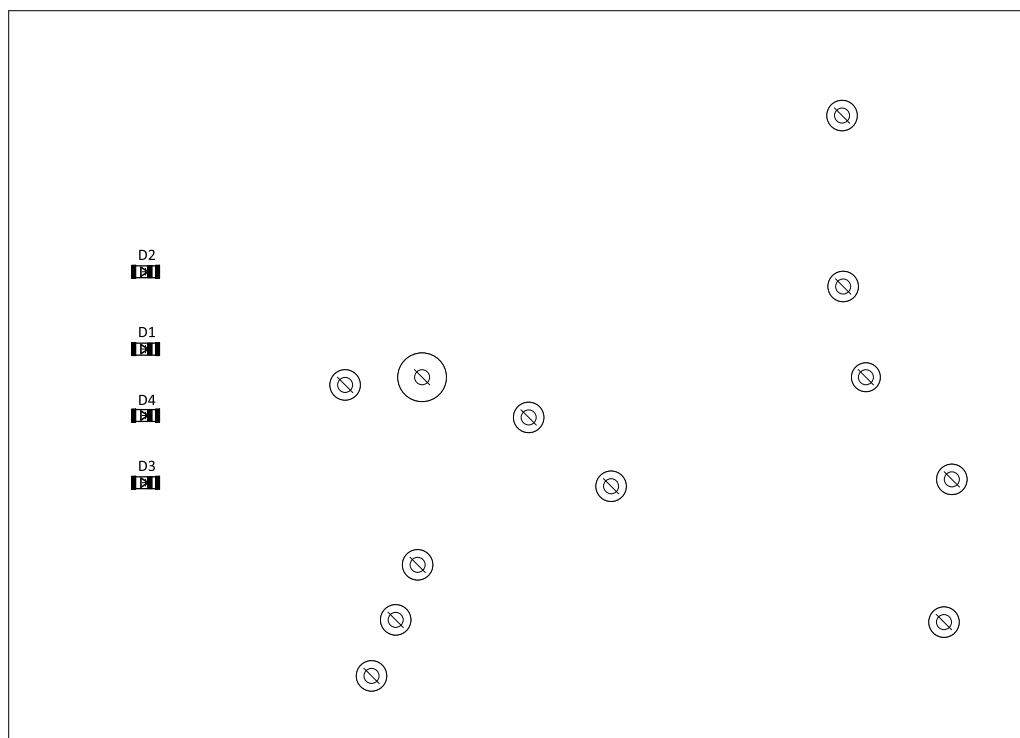


Rozměr desky 135 x 97 [mm], měřítko M1:1

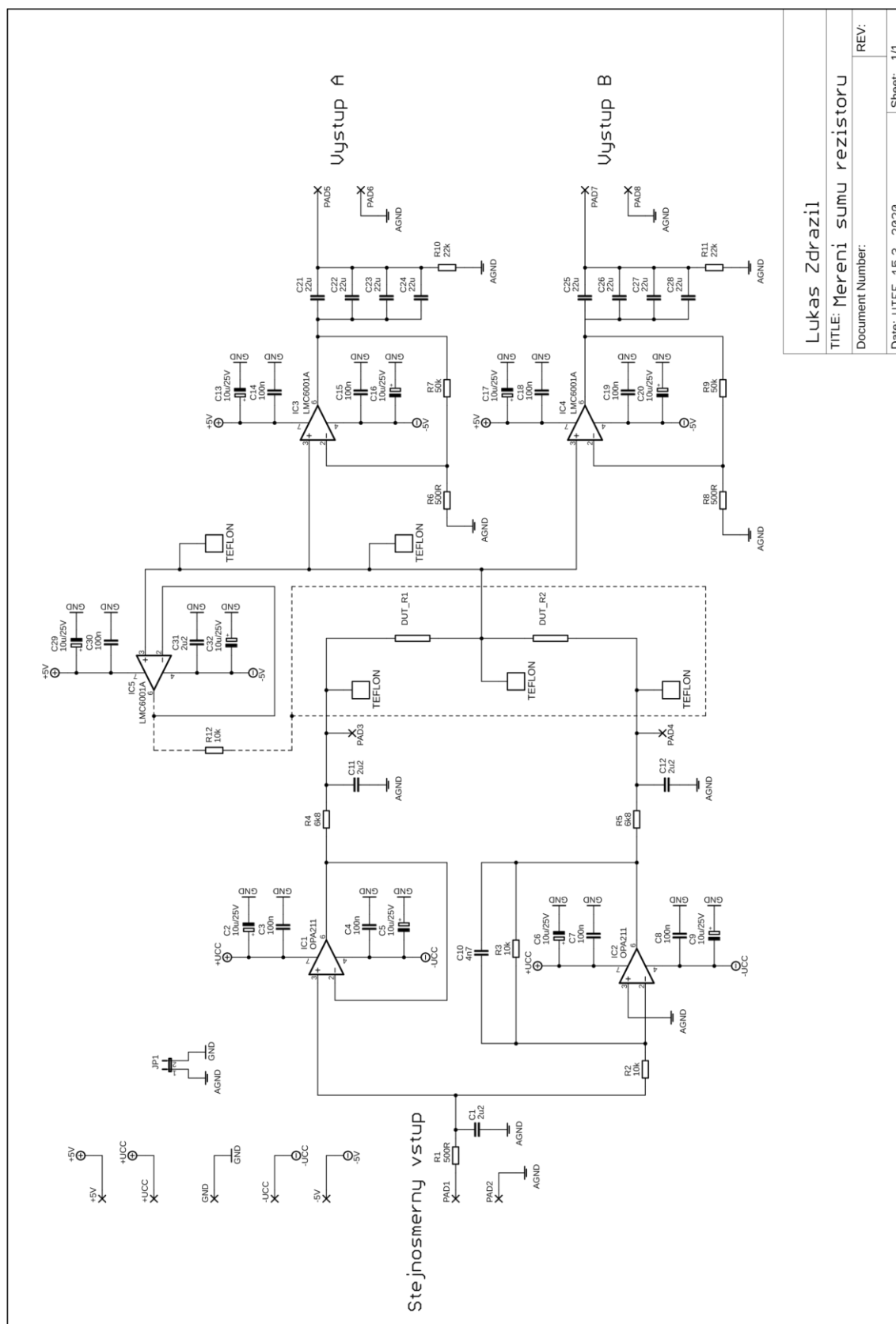
A.4 Osazovací plán zesilovače – top



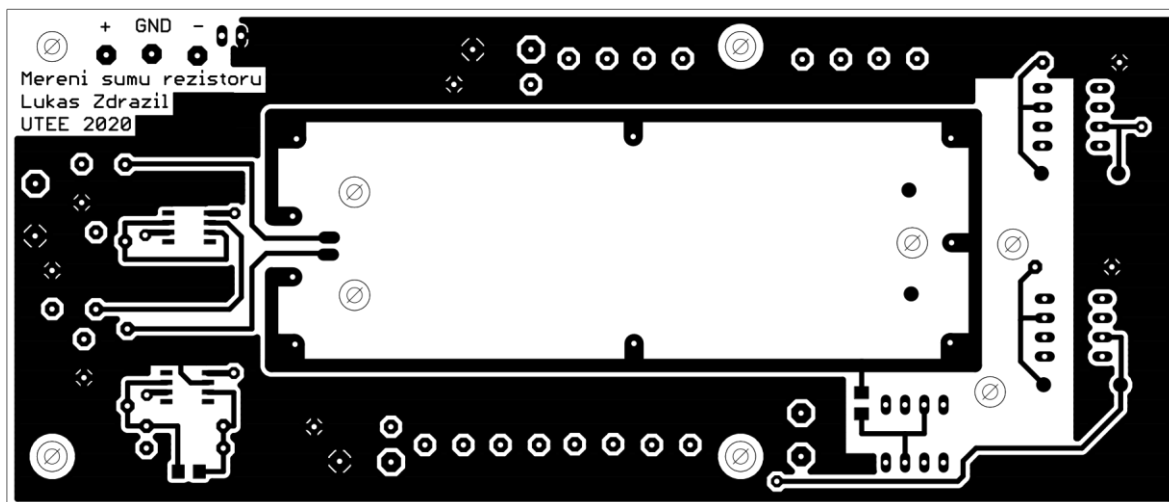
A.5 Osazovací plán zesilovače – bottom



A.6 Obvodové zapojení měřiče šumu rezistorů

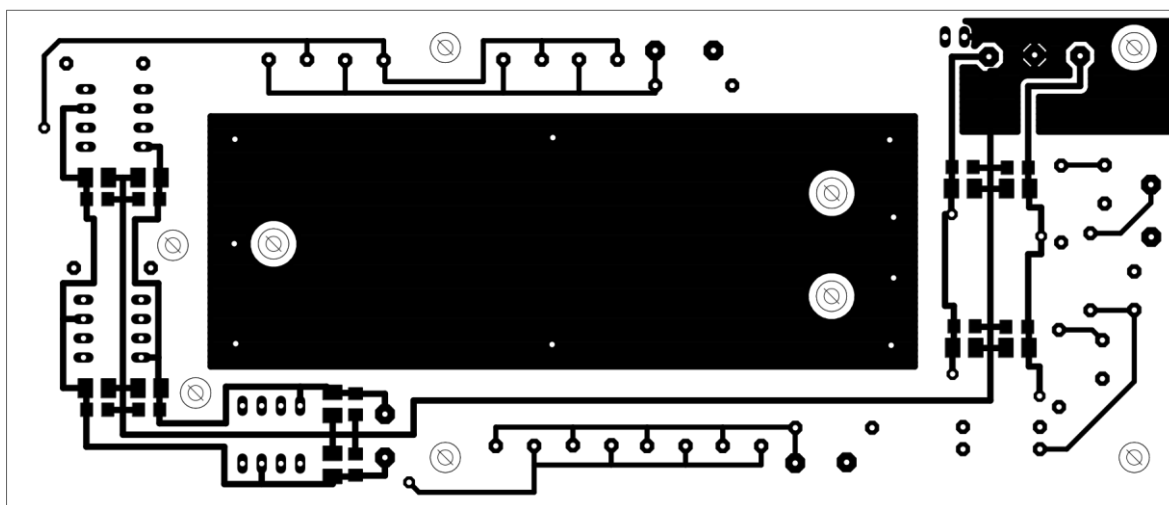


A.7 Deska plošného spoje měřiče šumu rezistorů – top



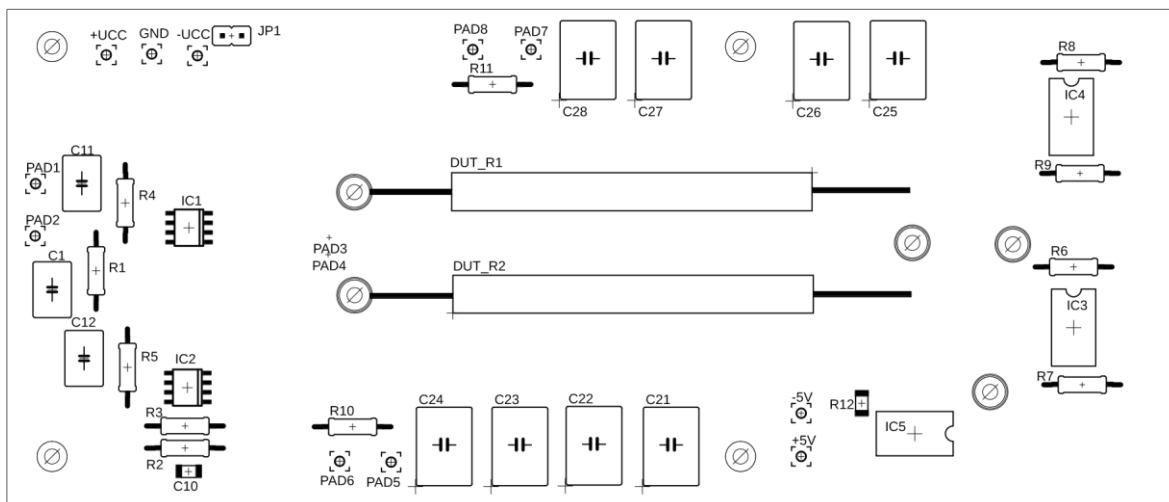
Rozměr desky 155 x 66 [mm], měřítko M1:1

A.8 Deska plošného spoje měřiče šumu rezistorů – bottom

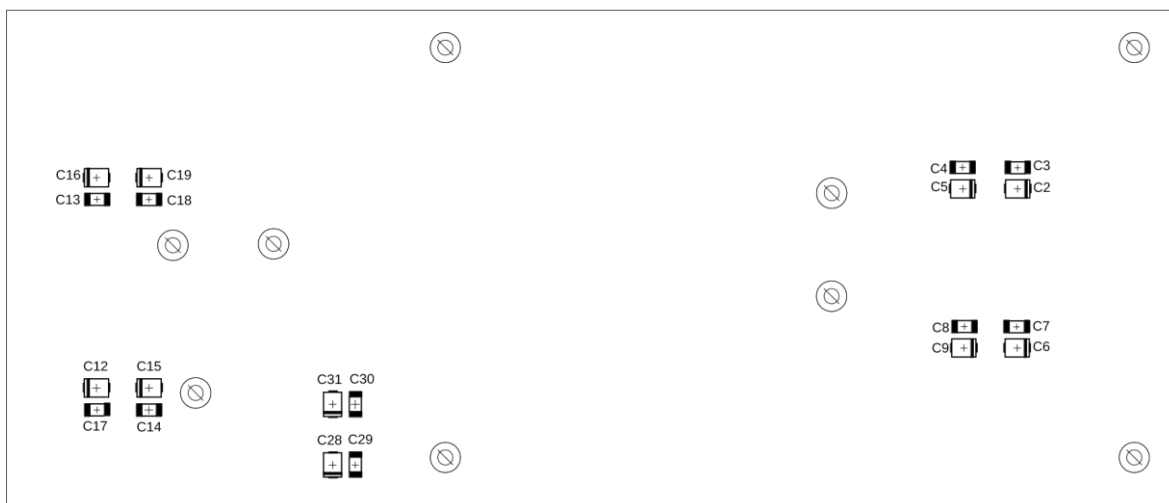


Rozměr desky 155 x 66 [mm], měřítko M1:1

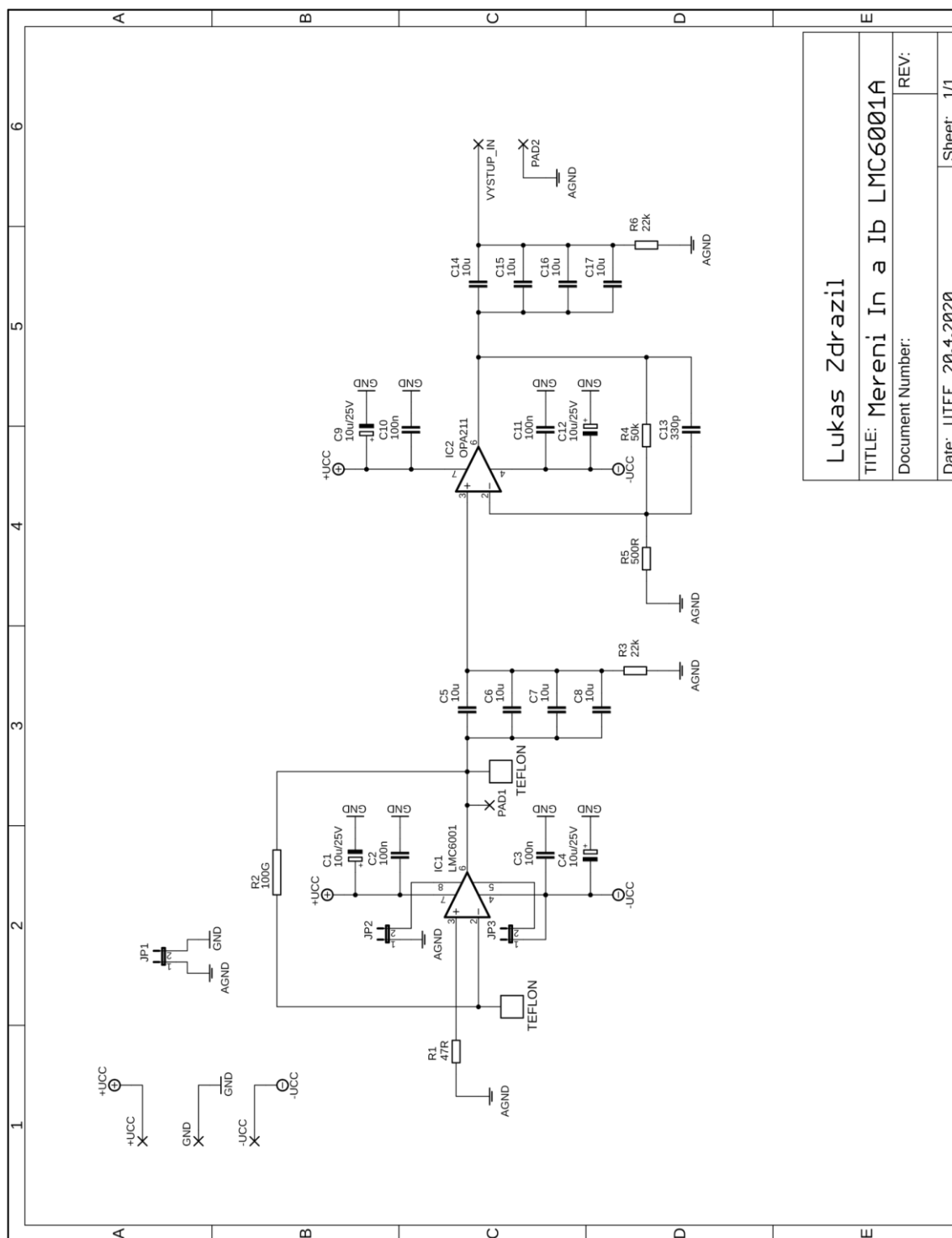
A.9 Osazovací plán měřiče šumu rezistorů – top



A.10 Osazovací plán měřiče šumu rezistorů – bottom



A.11 Obvodové zapojení měřiče I_N a I_B OZ LMC6001A



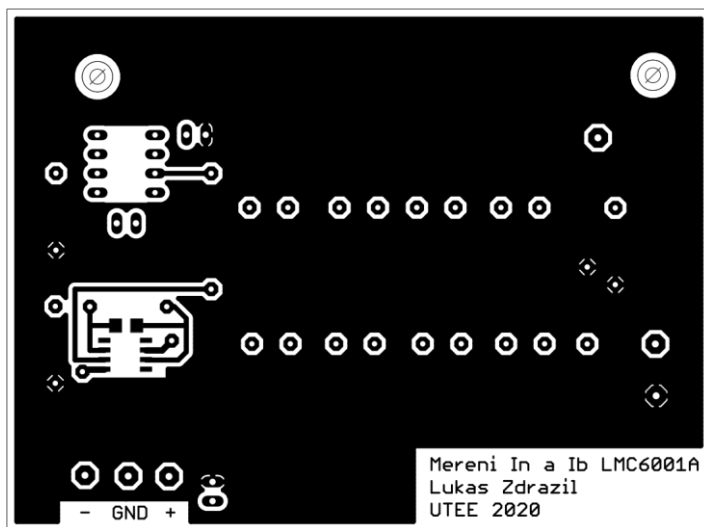
Lukas Zdravil

TITLE: Mereni I_N a I_B LMC6001A

Document Number: REV:

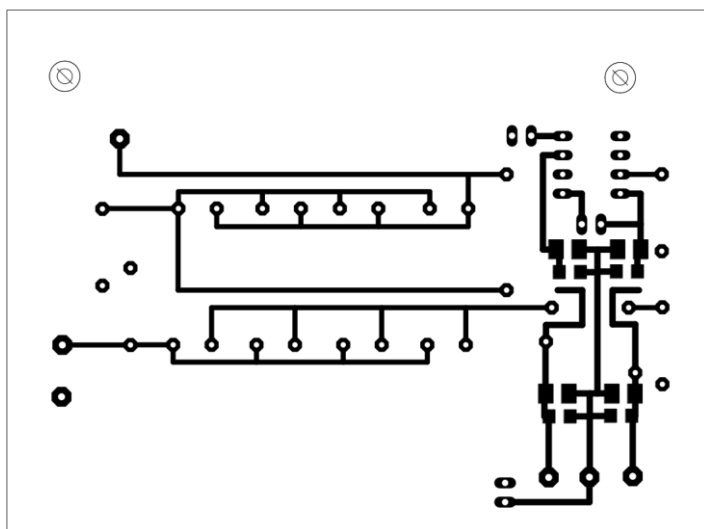
Date: UTEE 20.4.2020 Sheet: 1/1

A.12 Deska plošného spoje měřiče I_N a I_B OZ LMC6001A – top



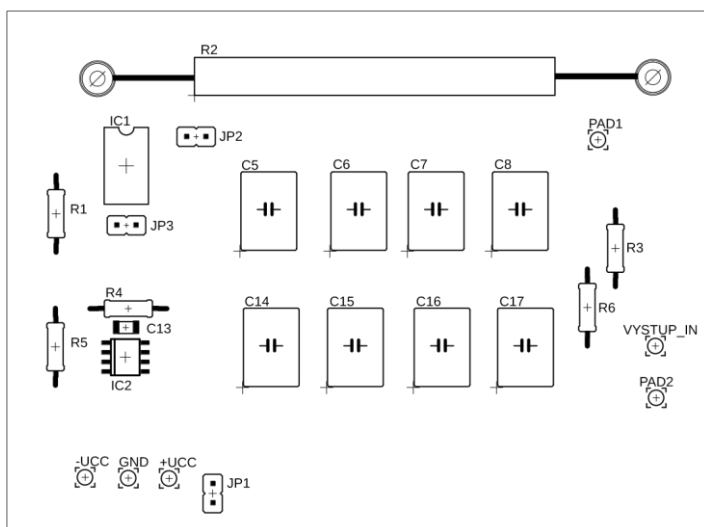
Rozměr desky 93 x 69 [mm], měřítko M1:1

A.13 Deska plošného spoje měřiče I_N a I_B OZ LMC6001A – bottom

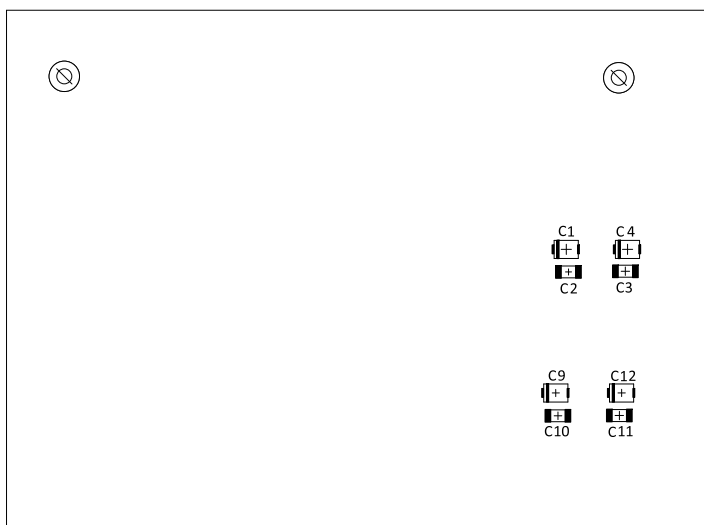


Rozměr desky 93 x 69 [mm], měřítko M1:1

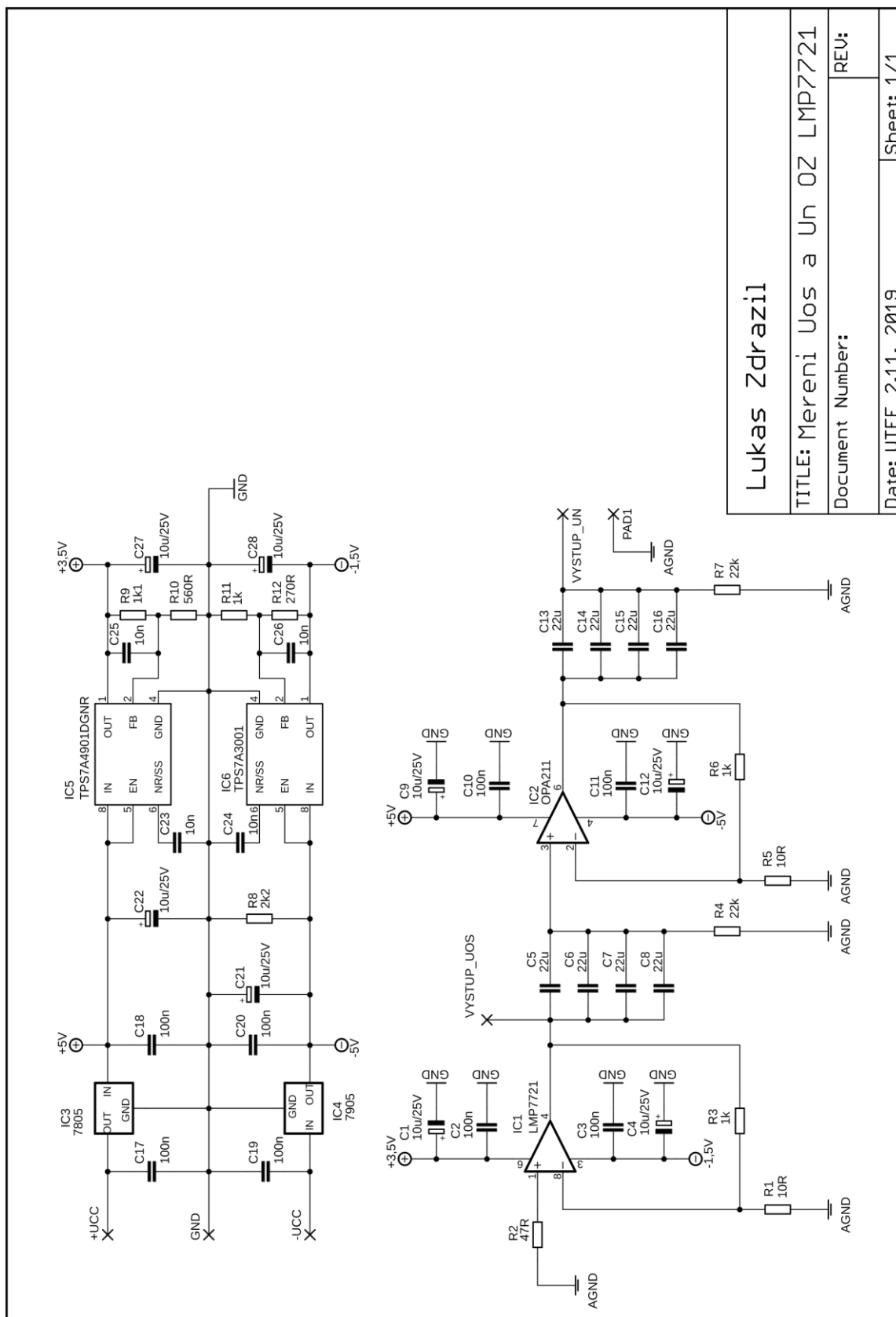
A.14 Osazovací plán měřiče I_N a I_B OZ LMC6001A – top



A.15 Osazovací plán měřiče I_N a I_B OZ LMC6001A – bottom



A.16 Obvodové zapojení měřiče U_{OS} a U_N OZ LMP7721



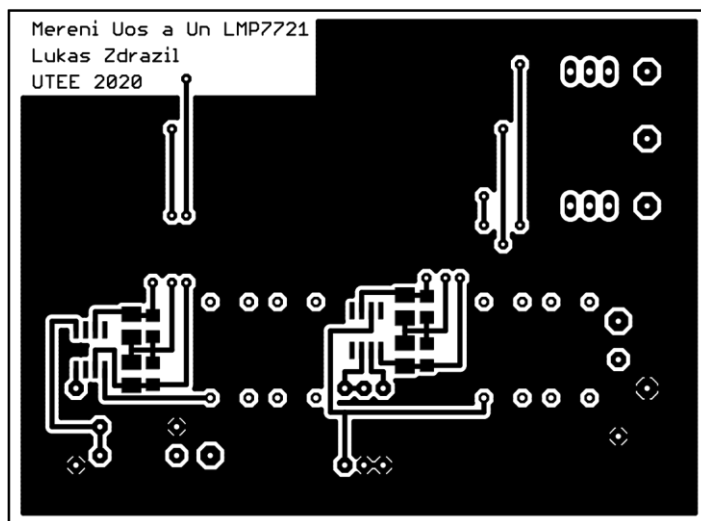
Lukas Zdravil

TITLE: Mereni Uos a Un OZ LMP7721

Document Number: REV:

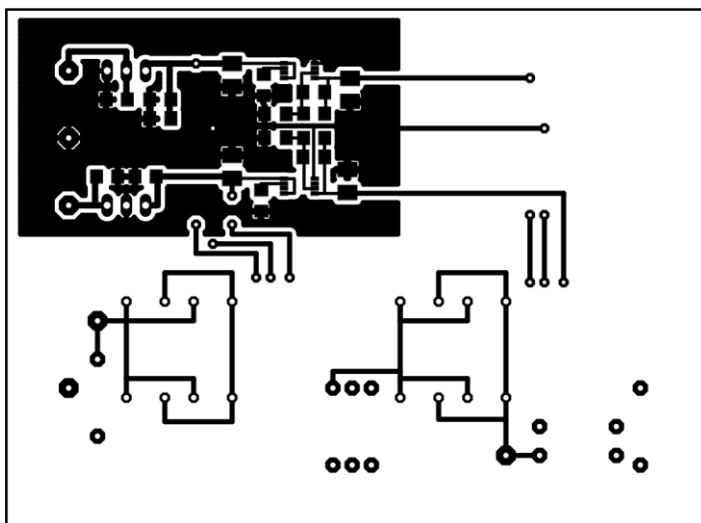
Date: UTEE 2.11. 2019 Sheet: 1/1

A.17 Deska plošného spoje měřiče U_{OS} a U_N OZ LMP7721 – top



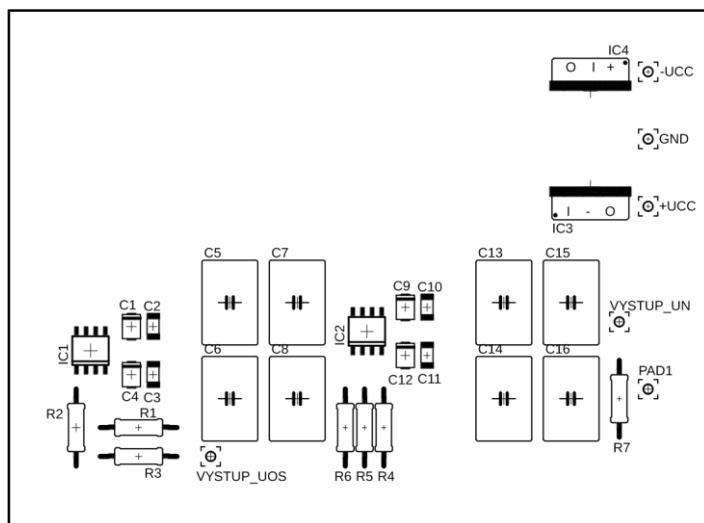
Rozměr desky 93 x 69 [mm], měřítko M1:1

A.18 Deska plošného spoje měřiče U_{OS} a U_N OZ LMP7721 – bottom

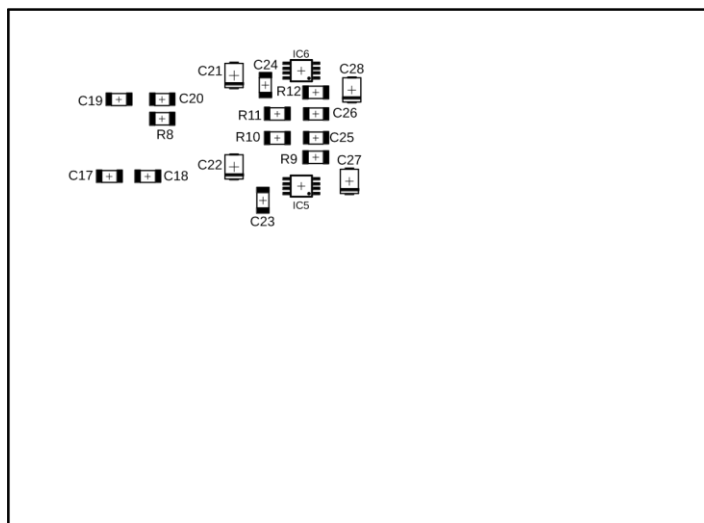


Rozměr desky 93 x 69 [mm], měřítko M1:1

A.19 Osazovací plán měřiče U_{OS} a U_N OZ LMP7721 – top



A.20 Osazovací plán měřiče U_{OS} a U_N OZ LMP7721 – bottom



B SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Seznam součástek pro zesilovač

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
CPOL	680n/100V	C225-108X268	Fóliový kondenzátor
C1	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C2	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C3	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C4	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C5	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C6	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C7	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C8	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C9	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C10	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C11	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C12	680n	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C13	820n	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C14	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C15	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C16	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C17	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C18	270n	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C19	2u2	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C20	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C21	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C22	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C23	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C24	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C25	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
D1	1N4007	SOD80C	Dioda
D2	1N4007	SOD80C	Dioda
D3	1N4007	SOD80C	Dioda
D4	1N4007	SOD80C	Dioda
IC1	ADA4530-1	DIL08	Operační zesilovač
IC2	OPA211	DIL08	Operační zesilovač
IC3	OP27	DIL08	Operační zesilovač
IC4	OP27	DIL08	Operační zesilovač
IC5	7805	TO220V	Stabilizátor napětí
J1		J7MM	Vzduchová propojka
J2		J7MM	Vzduchová propojka

J3		J15MM	Vzduchová propojka
J4		J16MM	Vzduchová propojka
J5		J12MM	Vzduchová propojka
J6		J16MM	Vzduchová propojka
J7		J12MM	Vzduchová propojka
JP1		JP2	Propojka
JP2		JP2	Propojka
JP3		JP2	Propojka
JP4		JP1	Propojka
K1	UTEE_1K	RELE_UTEE_1K	Spínací jazýčkové relé UTEE
K2	UTEE_2K	RELE_UTEE_2K	Spínací jazýčkové relé UTEE
K3	UTEE_1K	RELE_UTEE_1K	Spínací jazýčkové relé UTEE
K4	UTEE_1K	RELE_UTEE_1K	Spínací jazýčkové relé UTEE
K5	REED	REED	Spínací jazýčkové relé
Q1	BC856	SOT23-BEC	SMD PNP tranzistor
Q2	BC856	SOT23-BEC	SMD PNP tranzistor
Q3	BC856	SOT23-BEC	SMD PNP tranzistor
Q4	BC856	SOT23-BEC	SMD PNP tranzistor
Q5	BC856	SOT23-BEC	SMD PNP tranzistor
R1	1M	0207/10	Vývodový rezistor
R2	10k	0207/10	Vývodový rezistor
R3	10k	0207/10	Vývodový rezistor
R4	1G	RX-1M1007FE	Rezistor na bázi oxidu kovu
R5	100G	RX-1M1009FE	Rezistor na bázi oxidu kovu
R6	500G	RX-1M5009KE	Rezistor na bázi oxidu kovu
R7	1k	0207/10	Vývodový rezistor
R8	1k	0207/10	Vývodový rezistor
R9	10k	0207/10	Vývodový rezistor
R10	220R	R1206	SMD rezistor
R11	4k7	R1206	SMD rezistor
R12	4k7	R1206	SMD rezistor
R13	12k	R1206	SMD rezistor
R14	47k	R1206	SMD rezistor
R15	127k	R1206	SMD rezistor
R16	91k	R1206	SMD rezistor
R17	158k	R1206	SMD rezistor
R18	68k	R1206	SMD rezistor
R19	4k7	R1206	SMD rezistor
R20	1k2	R1206	SMD rezistor
R21	150R	0207/10	Vývodový rezistor
R22	4k7	R1206	SMD rezistor
R23	1k2	R1206	SMD rezistor
R24	150R	0207/10	Vývodový rezistor

R25	4k7	R1206	SMD rezistor
R26	1k2	R1206	SMD rezistor
R27	150R	0207/10	Vývodový rezistor
R28	4k7	R1206	SMD rezistor
R29	1k2	R1206	SMD rezistor
R30	150R	0207/10	Vývodový rezistor
R31	4k7	R1206	SMD rezistor
R32	1k2	R1206	SMD rezistor
R33	0R	0207/10	Vývodový rezistor
SV1		ML10	Konektor
TEFLON		TEFLON	Teflonový opěrný bod

B.2 Seznam součástek pro měřič šumu rezistorů

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
DUT_R1			Měřený rezistor
DUT_R2			Měřený rezistor
C1	2u2	C050-050X075	Fóliový kondenzátor
C2	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C3	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C4	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C5	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C6	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C7	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C8	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C9	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C10	4n7	C1206	SMD keramický kondenzátor
C11	2u2	C050-050X075	Fóliový kondenzátor
C12	2u2	C050-050X075	Fóliový kondenzátor
C13	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C14	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C15	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C16	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C17	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C18	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C19	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C20	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C21	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C22	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C23	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C24	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C25	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor

C26	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C27	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C28	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C29	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C30	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C31	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C32	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
IC1	OPA211	SOIC8	Operační zesilovač
IC2	OPA211	SOIC8	Operační zesilovač
IC3	LMC6001A	DIL08	Operační zesilovač
IC4	LMC6001A	DIL08	Operační zesilovač
IC5	LMC6001A	DIL08	Operační zesilovač
JP1		JP1	Propojka
R1	500R	0207/10	Vývodový rezistor
R2	10k	0207/10	Vývodový rezistor
R3	10k	0207/10	Vývodový rezistor
R4	6k8	0207/10	Vývodový rezistor
R5	6k8	0207/10	Vývodový rezistor
R6	500R	0207/10	Vývodový rezistor
R7	50k	0207/10	Vývodový rezistor
R8	500R	0207/10	Vývodový rezistor
R9	50k	0207/10	Vývodový rezistor
R10	22k	0207/10	Vývodový rezistor
R11	22k	0207/10	Vývodový rezistor
R12	10k	R1206	SMD rezistor
TEFLON		TEFLON	Teflonový opěrný bod

B.3 Seznam součástek pro měřič I_N a I_B OZ LMC6001A

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C2	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C3	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C4	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C5	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C6	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C7	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C8	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C9	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C10	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C11	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C12	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor

C13	330p	C1206	SMD keramický kondenzátor
C14	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C15	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C16	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C17	10u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
IC1	LMC6001A	DIL08	Operační zesilovač
IC2	OPA211	SOIC8	Operační zesilovač
JP1		JP1	Propojka
JP2		JP2	Propojka
JP3		JP3	Propojka
R1	47R	0207/10	Vývodový rezistor
R2	100G	RX-1M1009FE	Rezistor na bázi oxidu kovu
R3	22k	0207/10	Vývodový rezistor
R4	50k	0207/10	Vývodový rezistor
R5	500R	0207/10	Vývodový rezistor
R6	22k	0207/10	Vývodový rezistor
TEFLON		TEFLON	Teflonový opěrný bod

B.4 Seznam součástek pro měřič U_{OS} a U_N OZ LMP7721

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C2	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C3	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C4	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C5	22u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C6	22u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C7	22u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C8	22u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C9	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C10	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C11	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C12	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C13	22u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C14	22u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C15	22u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C16	22u	C050-075X110	Fóliový kondenzátor
C17	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C18	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C19	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C20	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C21	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor

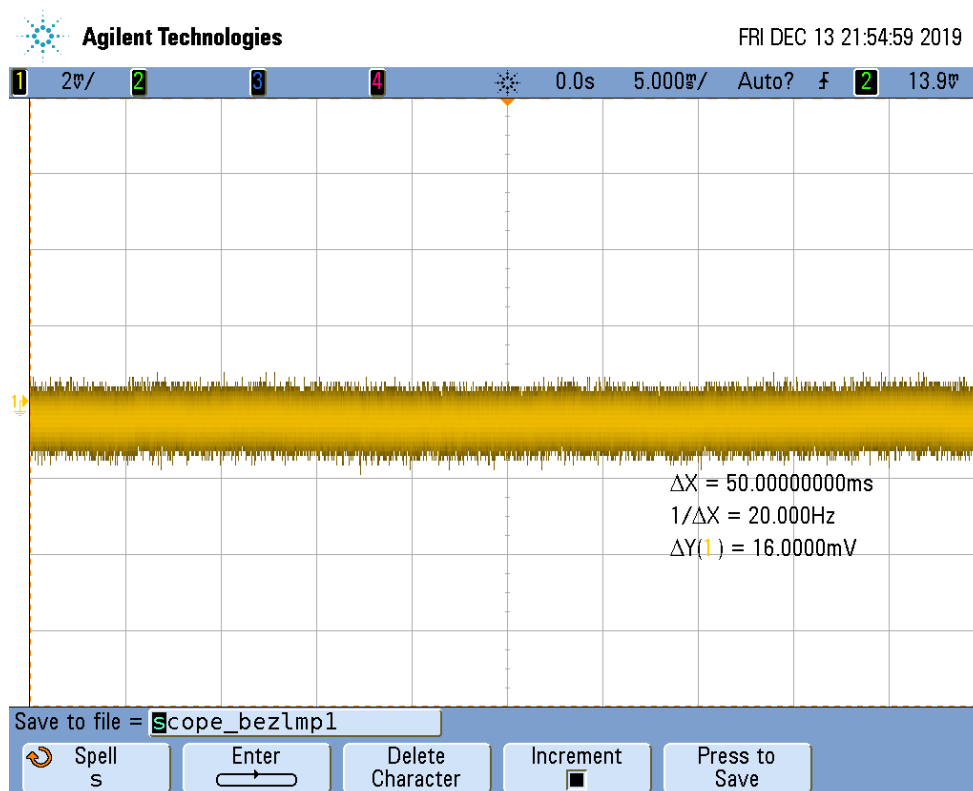
C22	10n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C23	10n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C24	10n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C25	10n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C26	10n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C27	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C28	10u/25V	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
IC1	LMP7721	SO08	Operační zesilovač
IC2	OPA211	SO08	Operační zesilovač
IC3	7805	TO220V	Stabilizátor napětí
IC4	7905	TO220V	Stabilizátor napětí
IC5	TPS7A4901	MSOP8	Stabilizátor napětí
IC6	TPS7A3001	MSOP8	Stabilizátor napětí
R1	10R	0207/10	Vývodový rezistor
R2	47R	0207/10	Vývodový rezistor
R3	1k	0207/10	Vývodový rezistor
R4	22k	0207/10	Vývodový rezistor
R5	10R	0207/10	Vývodový rezistor
R6	1k	0207/10	Vývodový rezistor
R7	22k	0207/10	Vývodový rezistor
R8	2k2	R1206	SMD rezistor
R9	1k1	R1206	SMD rezistor
R10	560R	R1206	SMD rezistor
R11	1k	R1206	SMD rezistor
R12	270R	R1206	SMD rezistor

C SEZNAM POUŽITÝCH MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJŮ

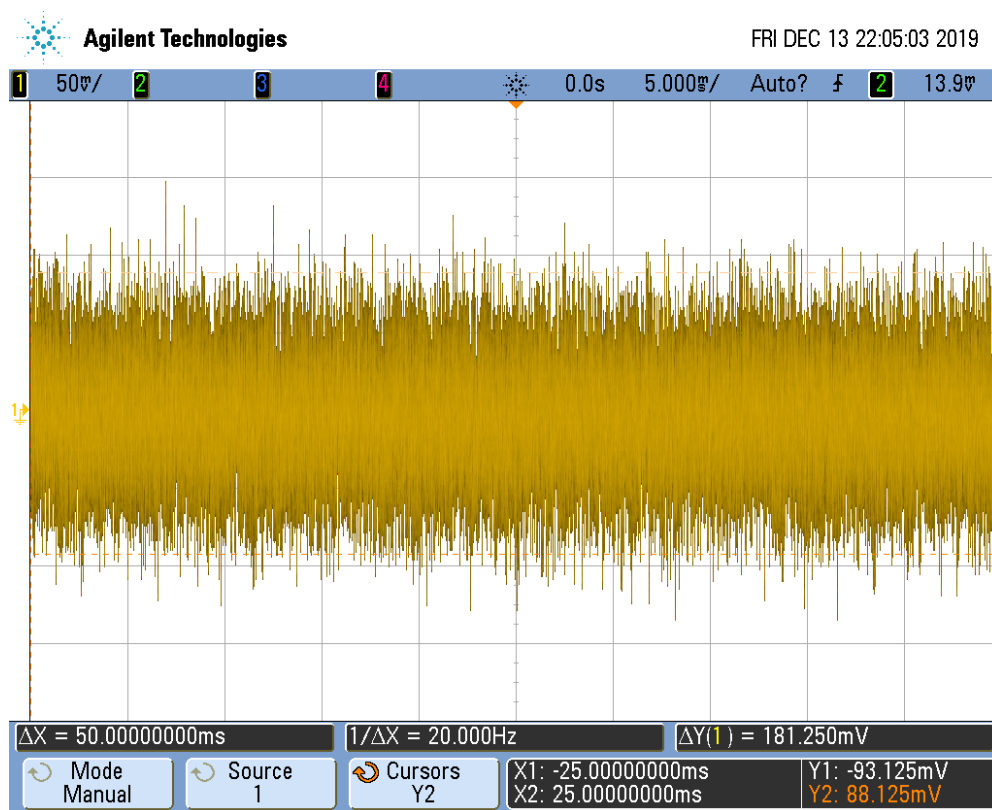
Přístroj	Výrobce	Typ	Rozsah
Elektrometr	Keithley Instruments	6517A	-----
Spektrální analyzátor	Hewlett Packard	36660A	-----
Nanovoltmetr	Agilent Technologies	34420A	-----
Osciloskop	Agilent Technologies	DSO-X 2002A	-----
Osciloskop	Agilent Technologies	MSO7104A	-----
Multimetr	Agilent Technologies	34410A	-----
Multimetr	Keysight Technologies	34465A	-----
Generátor	Agilent Technologies	33521A	1 μ Hz - 30 MHz
Laboratorní zdroj	Keysight Technologies	E3631A	0 - 6 V, 5 A/0 - $\pm$ 25 V, 1 A
Datalogger	Axio	AX-DT100	-40 °C - 70 °C/0 - 100 % RH

D OSTATNÍ PŘÍLOHY

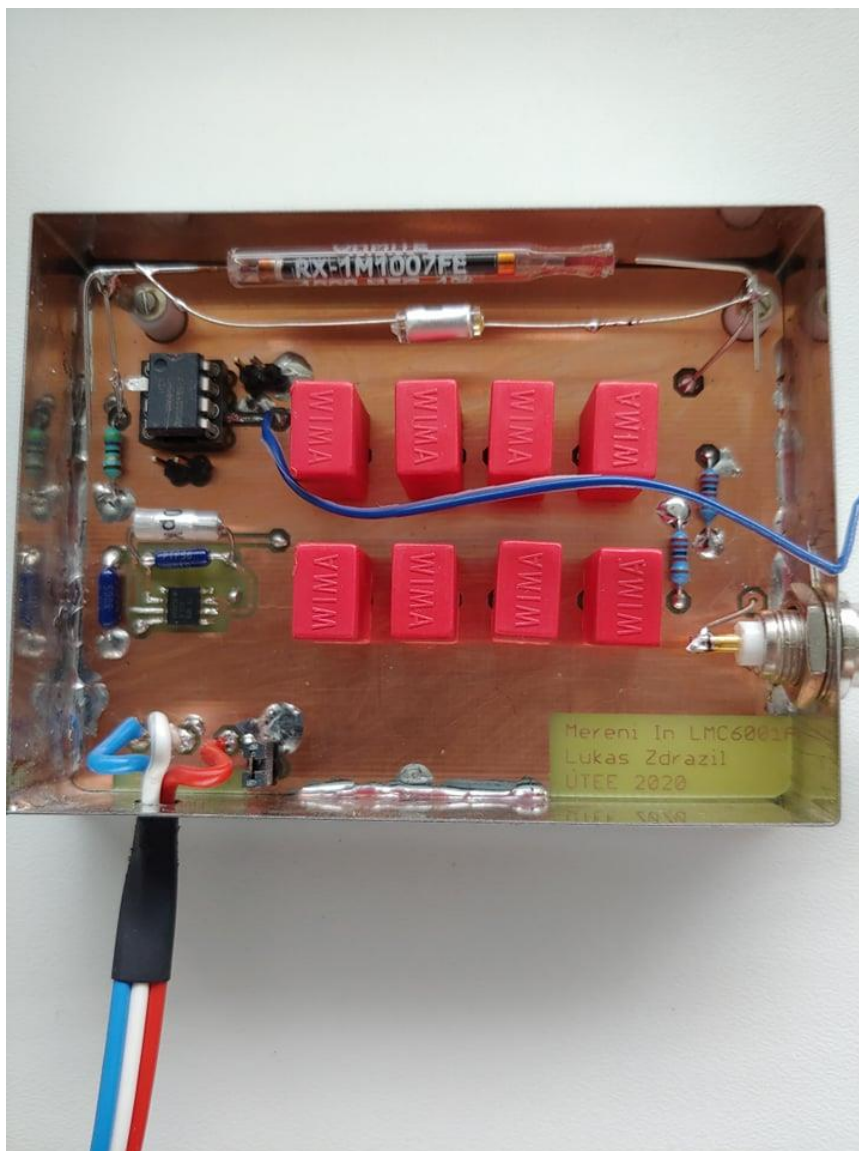
D.1 Časový průběh šumového napětí měřicího systému bez OZ LPM7721



D.2 Časový průběh šumového napětí s OZ LPM7721



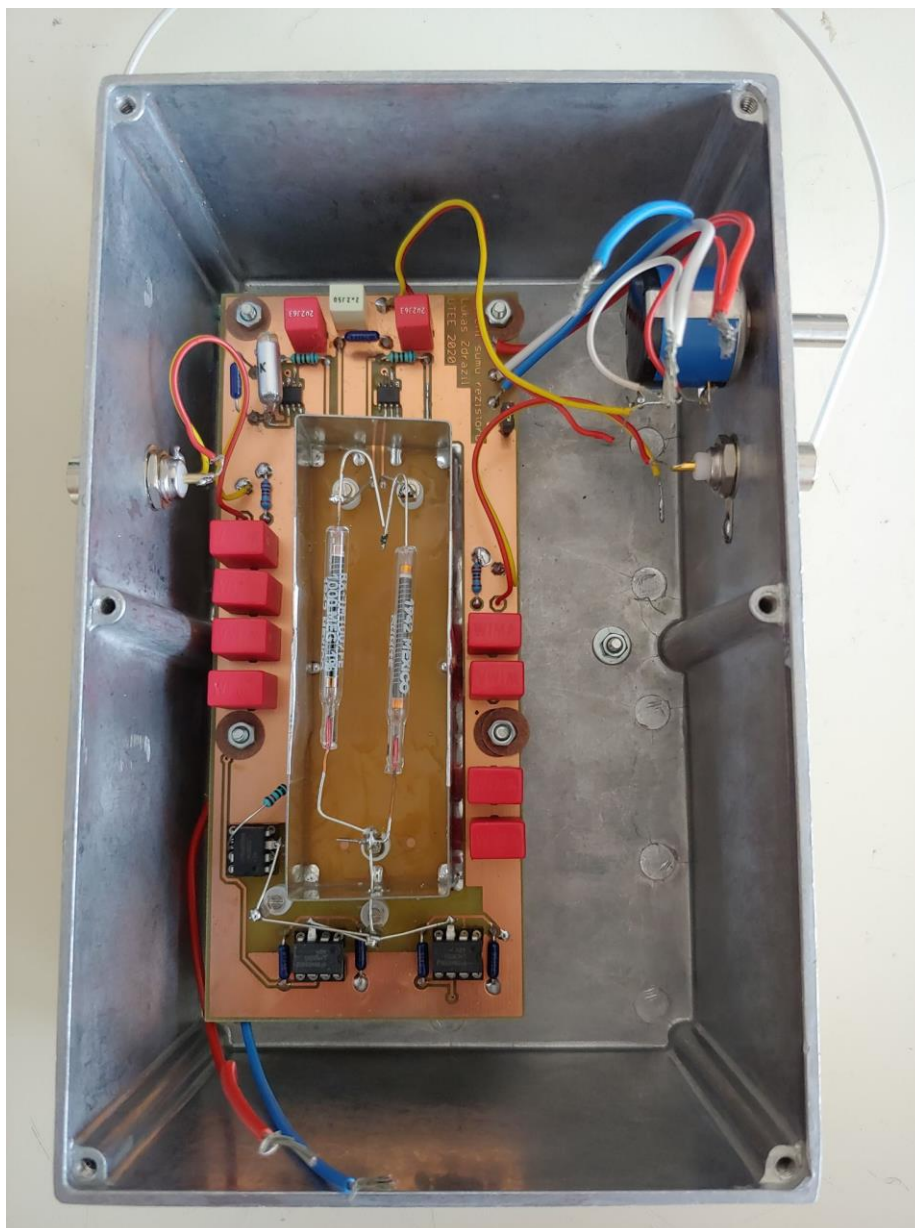
D.3 Měřič I_N a I_B OZ LMC6001A ve stínící krabici



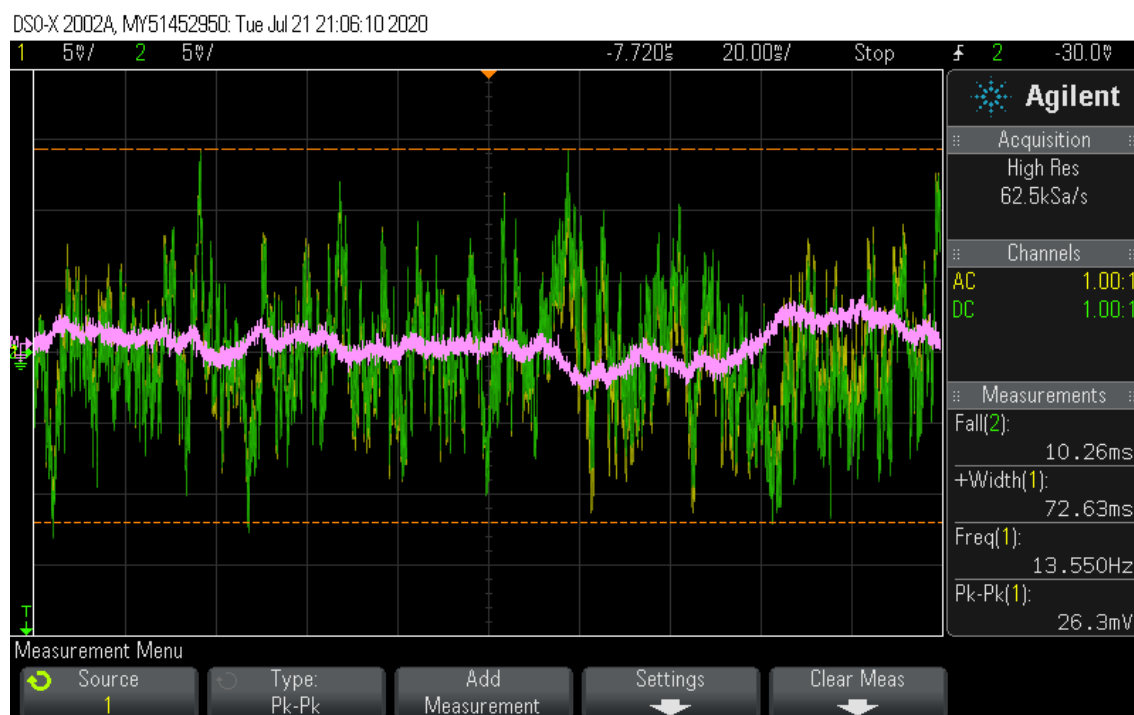
D.4 Relé uvnitř stínící nádoby elektrometru



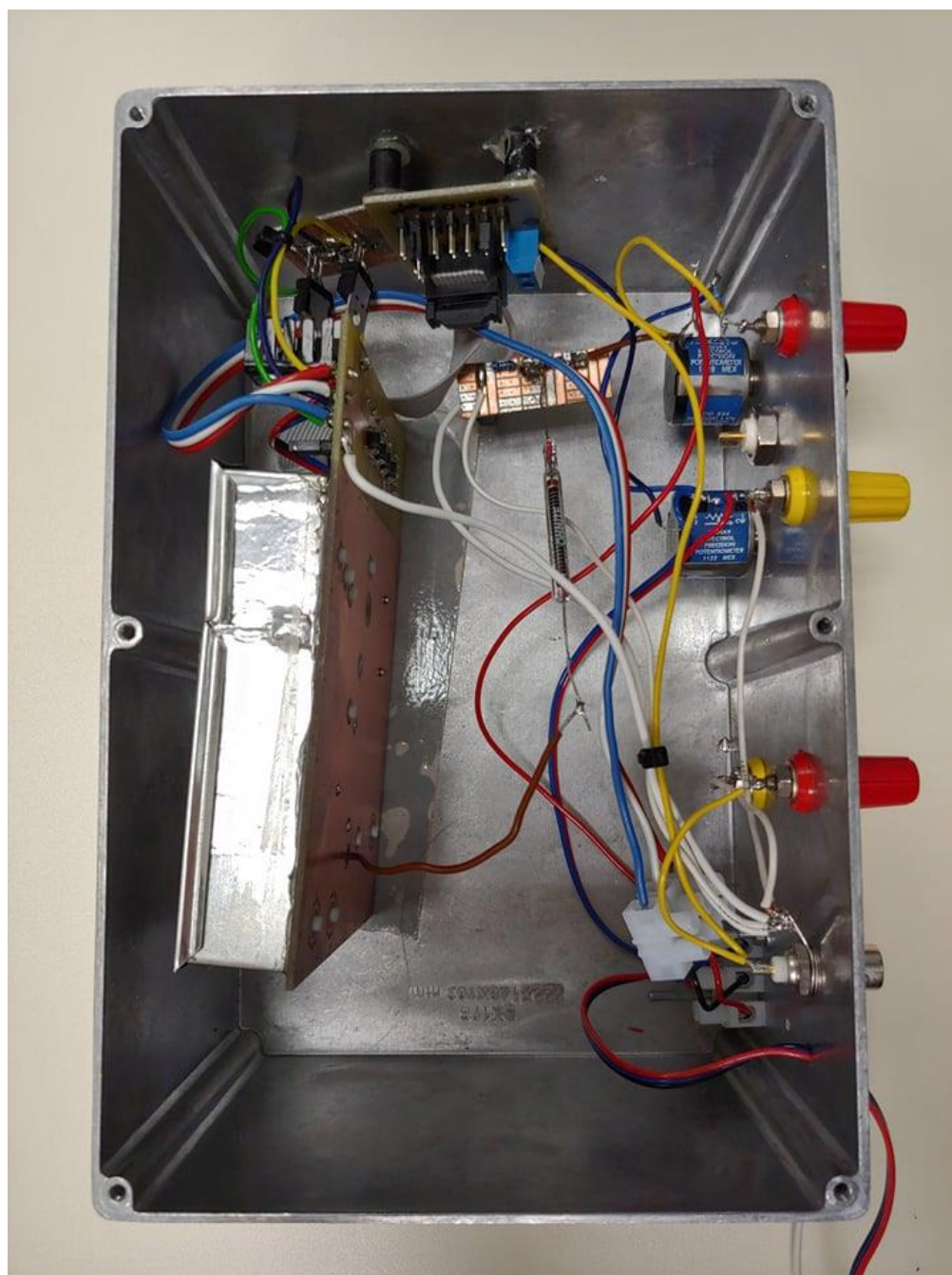
D.5 Měřič šumu rezistorů ve stínící krabici



D.6 Časové průběhy obou výstupů šumového napětí rezistorů a jejich rozdíl



D.7 Zesilovač ve stínící krabici



D.8 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot převodní charakteristiky při velikosti zpětnovazebního rezistoru 1 GΩ a zesílení druhého stupně 0,909x

Vstupní proud [pA]	Výstupní napětí [mV]	Teoretický výpočet [mV]	Relativní odchylka [%]	Chyba linearity [mV]
-600	-547,60	-545,40	0,06	0,00
-550	-501,90	-499,95	0,05	0,09
-500	-456,50	-454,50	0,05	-0,12
-450	-410,70	-409,05	0,04	0,06
-400	-365,10	-363,60	0,04	0,05
-350	-319,30	-318,15	0,03	0,24
-300	-274,20	-272,70	0,04	-0,27
-250	-228,60	-227,25	0,03	-0,29
-200	-182,50	-181,80	0,02	0,20
-150	-136,90	-136,35	0,01	0,19
-100	-91,04	-90,90	0,00	0,43
-50	-45,56	-45,45	0,00	0,30
0	0,00	0,00	0,00	0,25
50	45,70	45,45	0,01	0,34
100	91,20	90,90	0,01	0,23
150	137,00	136,35	0,02	0,41
200	182,40	181,80	0,01	0,20
250	228,10	227,25	0,02	0,29
300	273,50	272,70	0,02	0,07
350	318,94	318,15	0,02	-0,10
400	365,10	363,60	0,04	0,45
450	410,10	409,05	0,03	-0,16
500	455,90	454,50	0,03	0,02
550	501,20	499,95	0,03	-0,29
600	547,10	545,40	0,04	0,00

D.9 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot převodní charakteristiky při velikosti zpětnovazebního rezistoru 1 GΩ a zesílení druhého stupně 10x

Vstupní proud [pA]	Výstupní napětí [V]	Teoretický výpočet [V]	Relativní odchylka [%]	Chyba linearity [V]
-600	-6,034	-6,000	0,34	0,000
-550	-5,535	-5,500	0,35	-0,004
-500	-5,033	-5,000	0,33	-0,004
-450	-4,529	-4,500	0,29	-0,003
-400	-4,027	-4,000	0,27	-0,003
-350	-3,525	-3,500	0,25	-0,004
-300	-3,022	-3,000	0,22	-0,004
-250	-2,516	-2,500	0,16	0,000
-200	-2,016	-2,000	0,16	-0,003
-150	-1,506	-1,500	0,06	0,004
-100	-1,005	-1,000	0,05	0,003
-50	-0,501	-0,500	0,01	0,004
0	0,000	0,000	0,00	0,003
50	0,504	0,500	0,04	0,004
100	1,008	1,000	0,08	0,005
150	1,510	1,500	0,10	0,005
200	2,012	2,000	0,12	0,004
250	2,516	2,500	0,16	0,005
300	3,018	3,000	0,18	0,005
350	3,518	3,500	0,18	0,002
400	4,025	4,000	0,25	0,007
450	4,529	4,500	0,29	0,008
500	5,027	5,000	0,27	0,003
550	5,527	5,500	0,27	0,001
600	6,029	6,000	0,29	0,000

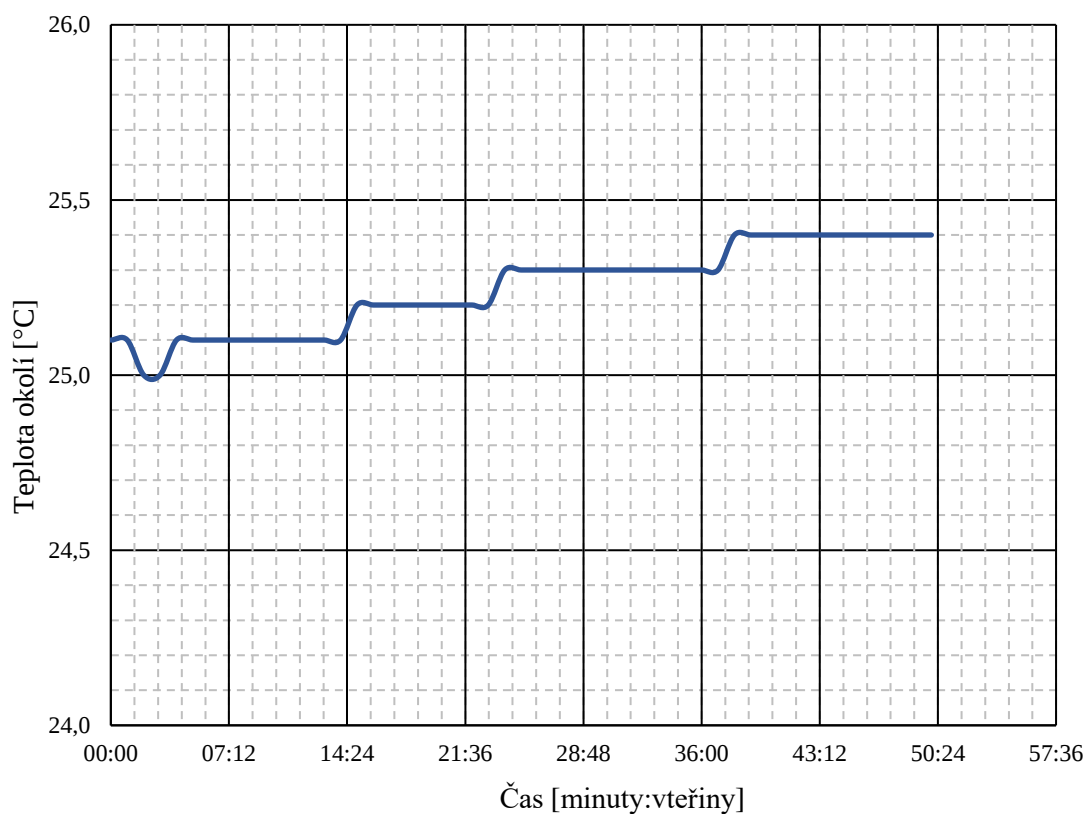
D.10 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot převodní charakteristiky při velikosti zpětnovazebního rezistoru 100 GΩ a zesílení druhého stupně 0,909x

Vstupní proud [pA]	Výstupní napětí [mV]	Teoretický výpočet [mV]	Relativní odchylka [%]	Chyba linearity [mV]
-6,0	-539,20	-545,40	0,15	0,00
-5,5	-494,50	-499,95	0,14	-0,18
-5,0	-449,90	-454,50	0,12	-0,46
-4,5	-405,10	-409,05	0,10	-0,54
-4,0	-360,20	-363,60	0,09	-0,52
-3,5	-315,20	-318,15	0,07	-0,40
-3,0	-270,30	-272,70	0,06	-0,38
-2,5	-225,80	-227,25	0,04	-0,75
-2,0	-180,60	-181,80	0,03	-0,43
-1,5	-135,10	-136,35	0,03	0,19
-1,0	-89,90	-90,90	0,03	0,51
-0,5	-45,30	-45,45	0,00	0,23
0,0	0,00	0,00	0,00	0,65
0,5	44,60	45,45	0,02	0,37
1,0	89,30	90,90	0,04	0,19
1,5	134,30	136,35	0,05	0,31
2,0	179,70	181,80	0,05	0,83
2,5	224,10	227,25	0,08	0,35
3,0	269,30	272,70	0,08	0,68
3,5	313,90	318,15	0,11	0,40
4,0	358,80	363,60	0,12	0,42
4,5	403,70	409,05	0,13	0,44
5,0	448,10	454,50	0,16	-0,04
5,5	493,30	499,95	0,17	0,28
6,0	537,90	545,40	0,19	0,00

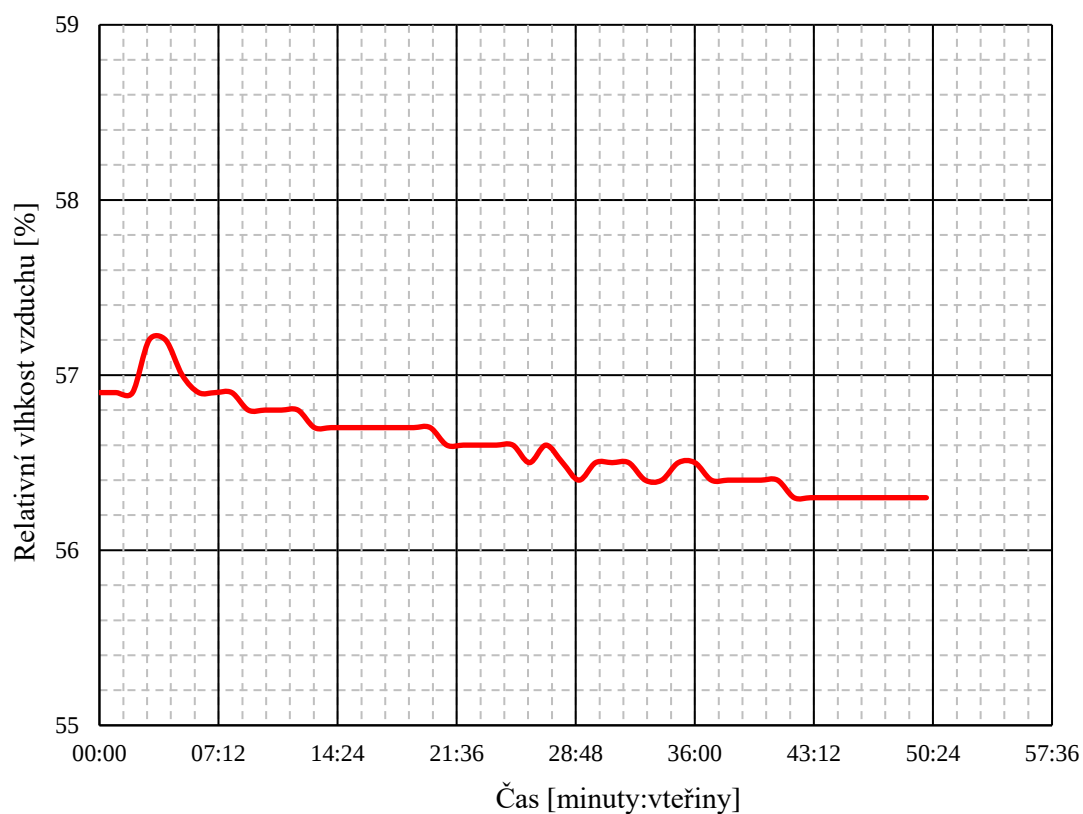
D.11 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot převodní charakteristiky při velikosti zpětnovazebního rezistoru 100 GΩ a zesílení druhého stupně 10x

Vstupní proud [pA]	Výstupní napětí [V]	Teoretický výpočet [V]	Relativní odchylka [%]	Chyba linearity [V]
-6,0	-5,945	-6,000	0,55	0,000
-5,5	-5,455	-5,500	0,45	-0,005
-5,0	-4,959	-5,000	0,41	-0,005
-4,5	-4,466	-4,500	0,34	-0,007
-4,0	-3,963	-4,000	0,37	0,000
-3,5	-3,469	-3,500	0,31	-0,001
-3,0	-2,975	-3,000	0,25	-0,003
-2,5	-2,485	-2,500	0,15	-0,008
-2,0	-1,988	-2,000	0,12	-0,007
-1,5	-1,487	-1,500	0,13	-0,001
-1,0	-0,988	-1,000	0,12	0,002
-0,5	-0,495	-0,500	0,05	0,000
0,0	0,000	0,000	0,00	-0,001
0,5	0,496	0,500	0,04	0,000
1,0	0,993	1,000	0,07	0,002
1,5	1,487	1,500	0,13	0,000
2,0	1,985	2,000	0,15	0,003
2,5	2,476	2,500	0,24	-0,002
3,0	2,977	3,000	0,23	0,004
3,5	3,469	3,500	0,31	0,000
4,0	3,954	4,000	0,46	-0,010
4,5	4,461	4,500	0,39	0,001
5,0	4,955	5,000	0,45	0,000
5,5	5,451	5,500	0,49	0,000
6,0	5,946	6,000	0,54	0,000

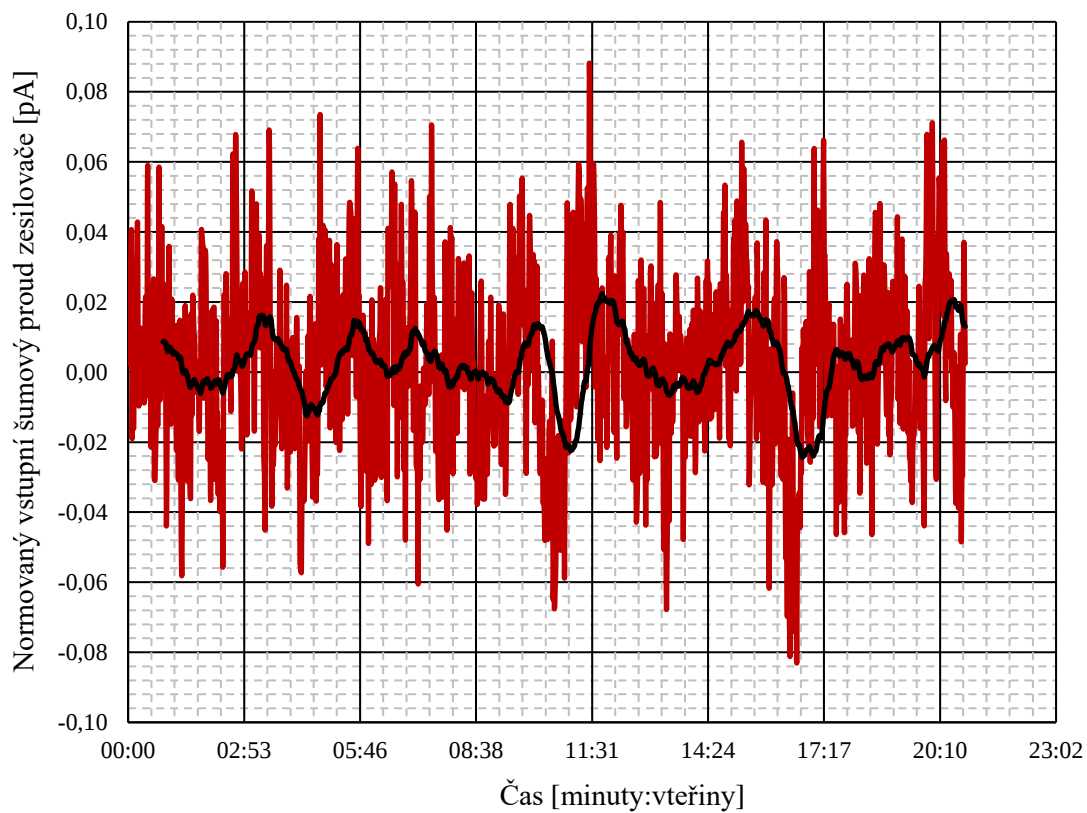
D.12 Časová závislost okolní teploty během měření šumu při velikosti zpětnovazebního rezistoru 100 GΩ a zesílení druhého stupně 0,909x



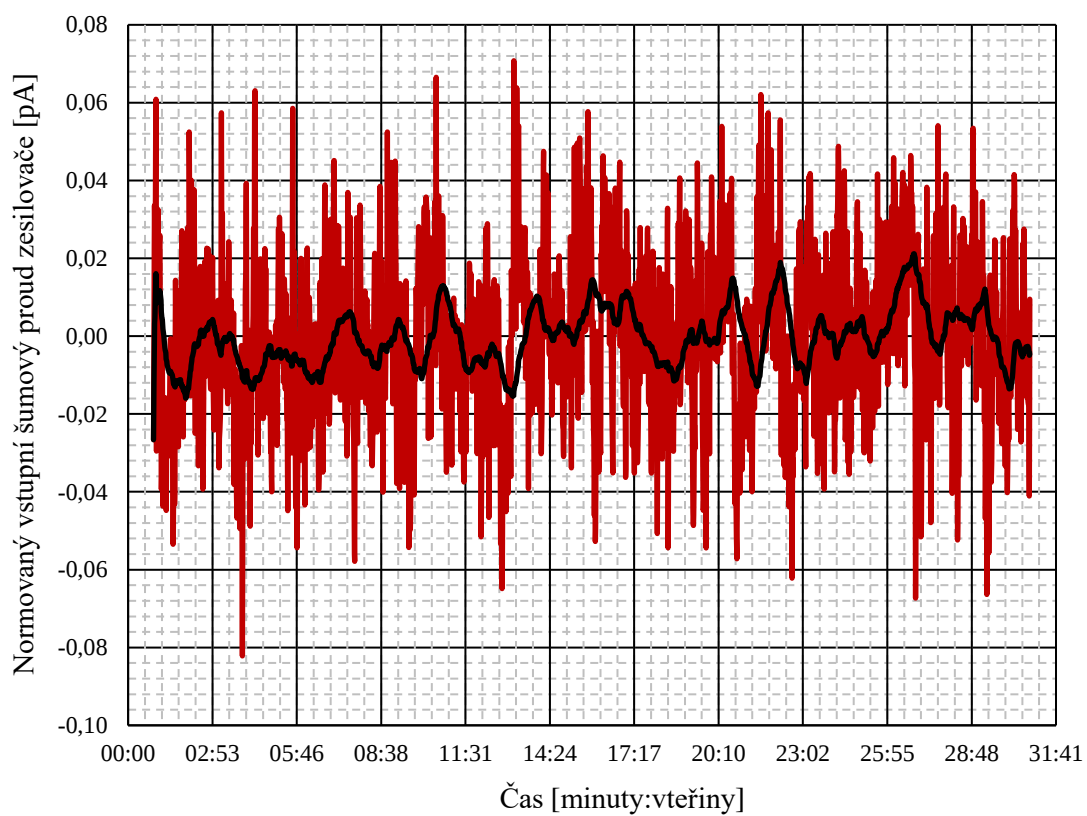
D.13 Časová závislost relativní vlhkosti vzduchu během měření šumu při velikosti zpětnovazebního rezistoru 100 GΩ a zesílení druhého stupně 0,909x



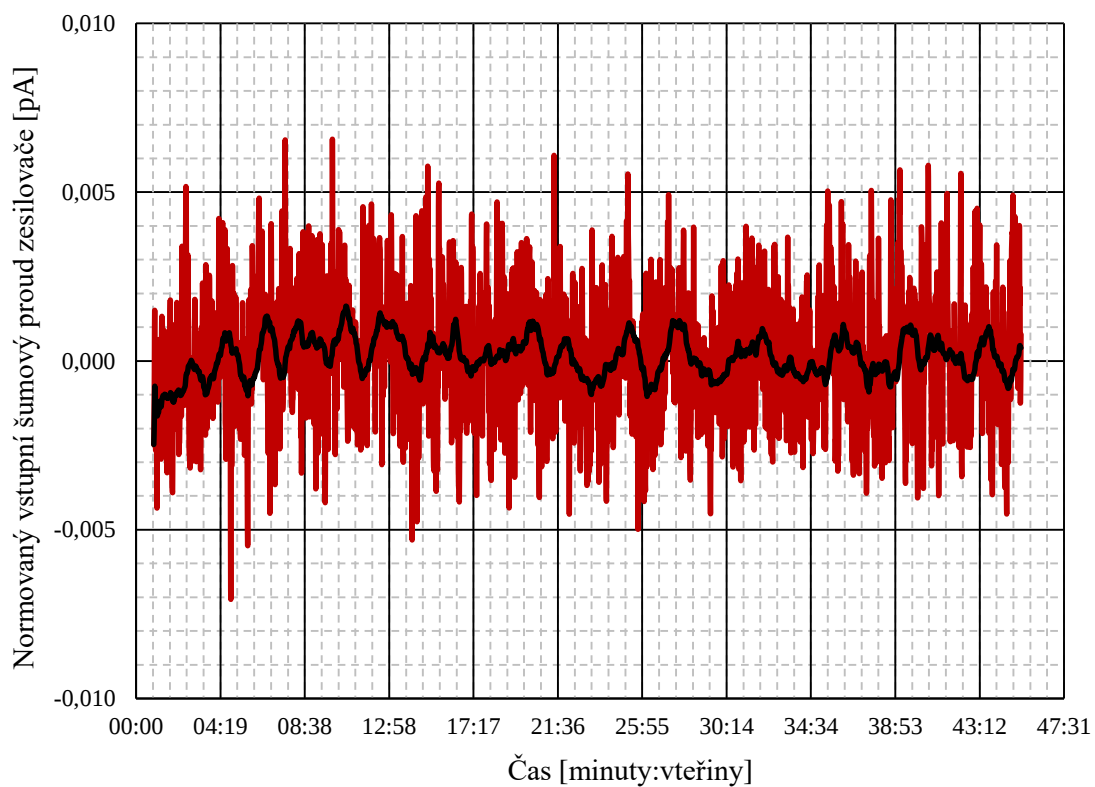
D.14 Normovaný vstupní šumový proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\times$



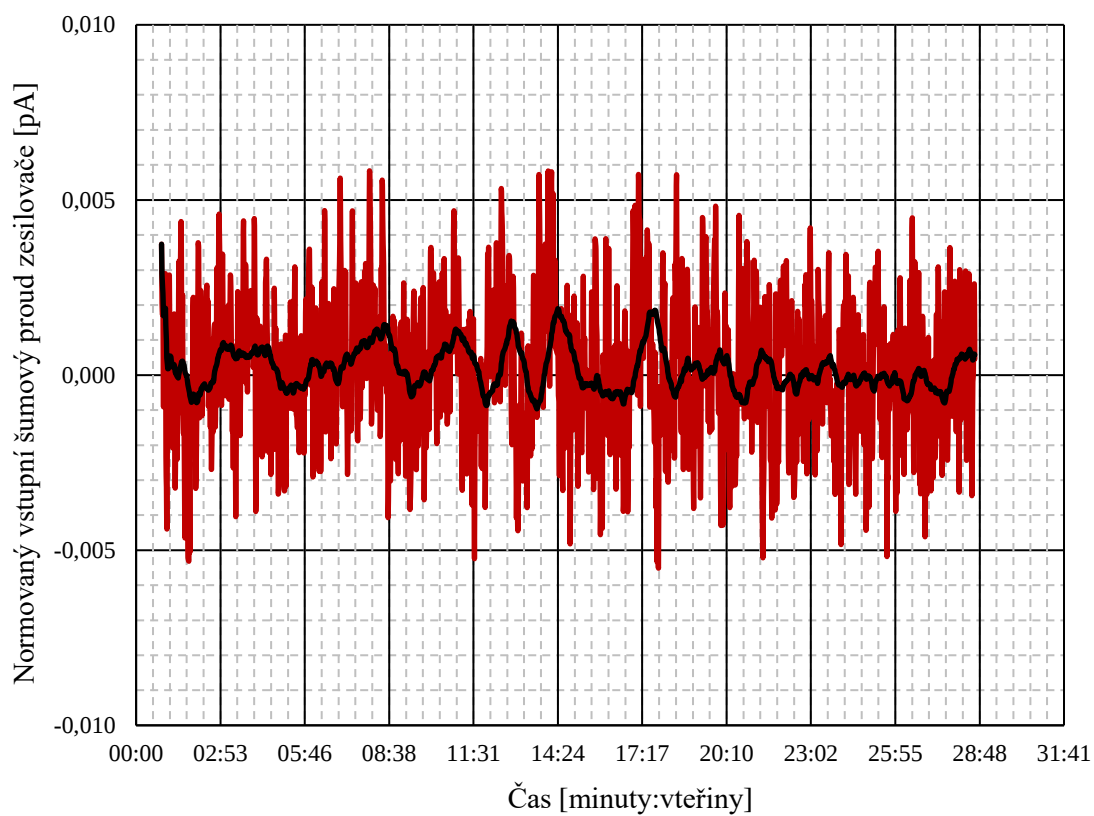
D.15 Normovaný vstupní šumový proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $10\times$



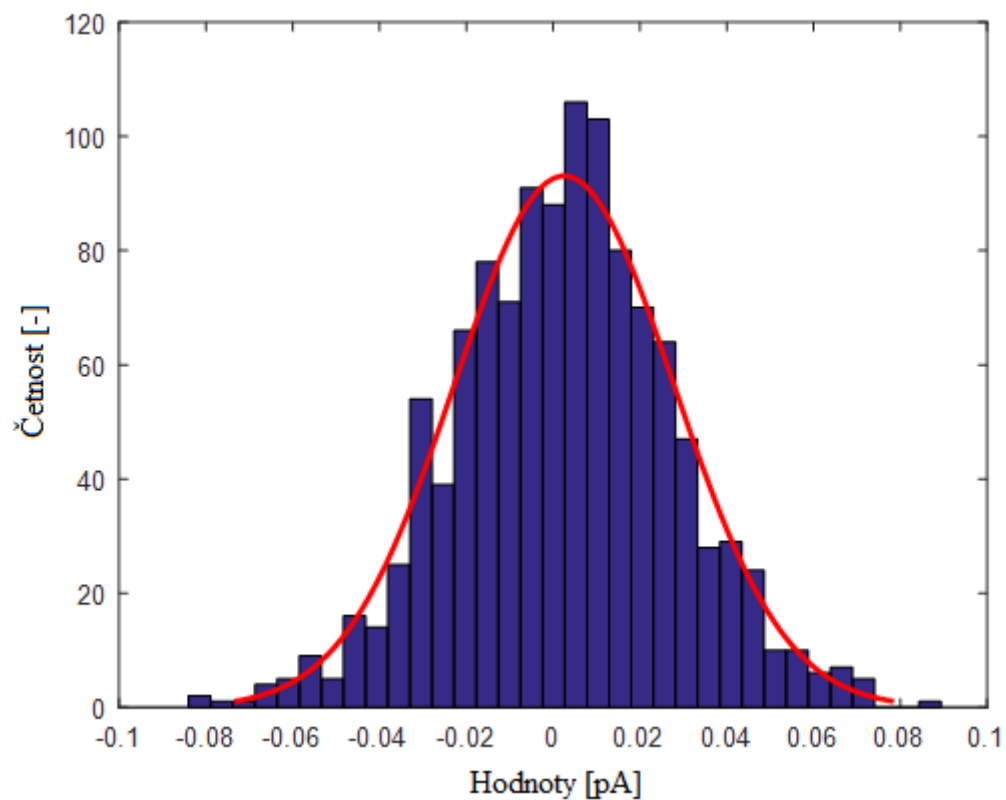
D.16 Normovaný vstupní šumový proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru 100 G Ω a zesílení druhého stupně 0,909x



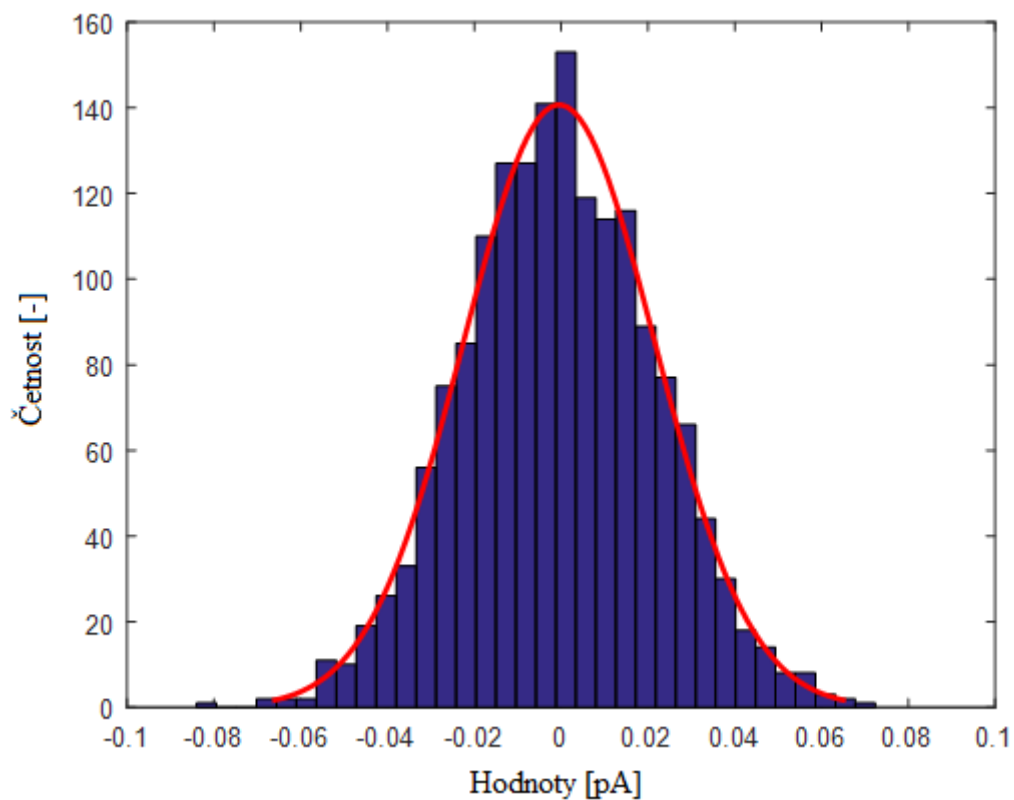
D.17 Normovaný vstupní šumový proud zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru 100 G Ω a zesílení druhého stupně 10x



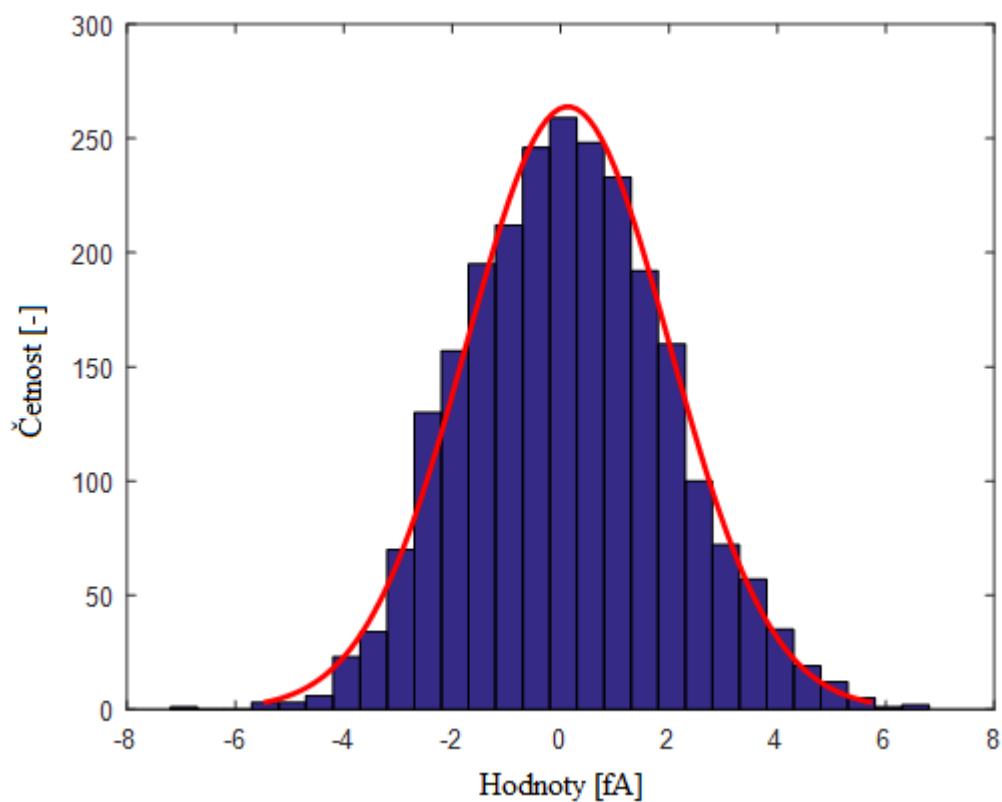
D.18 Histogram normovaného vstupního šumového proudu zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\times$



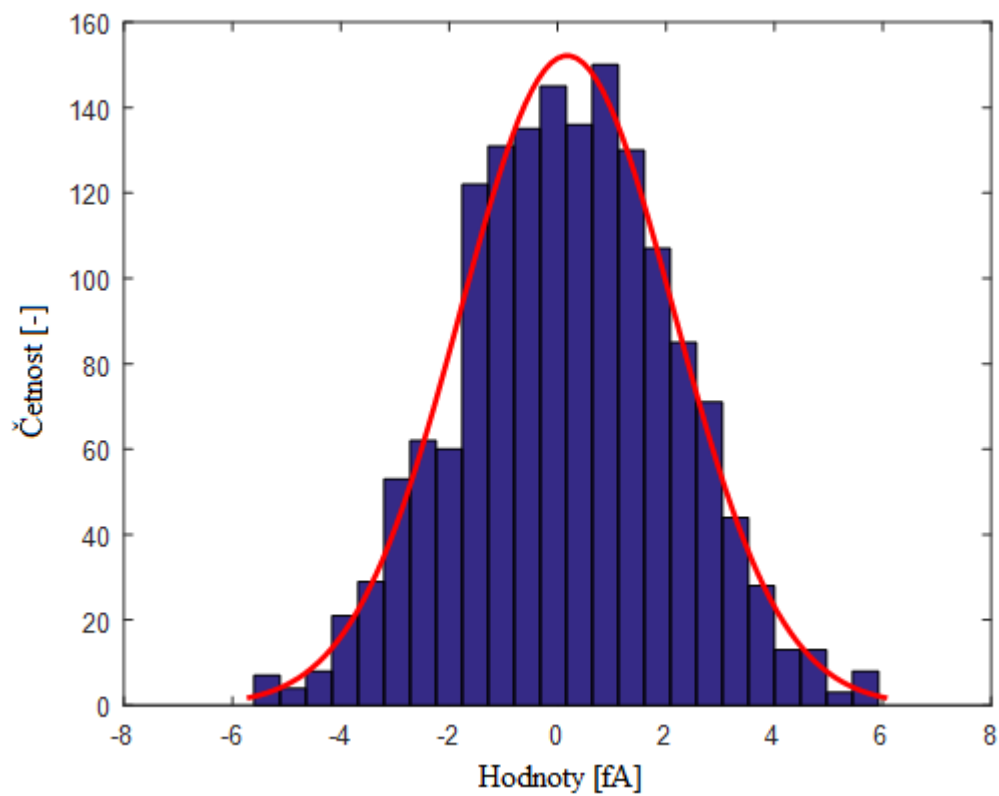
D.19 Histogram normovaného vstupního šumového proudu zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $10\times$



D.20 Histogram normovaného vstupního šumového proudu zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru 100 G Ω a zesílení druhého stupně 0,909x

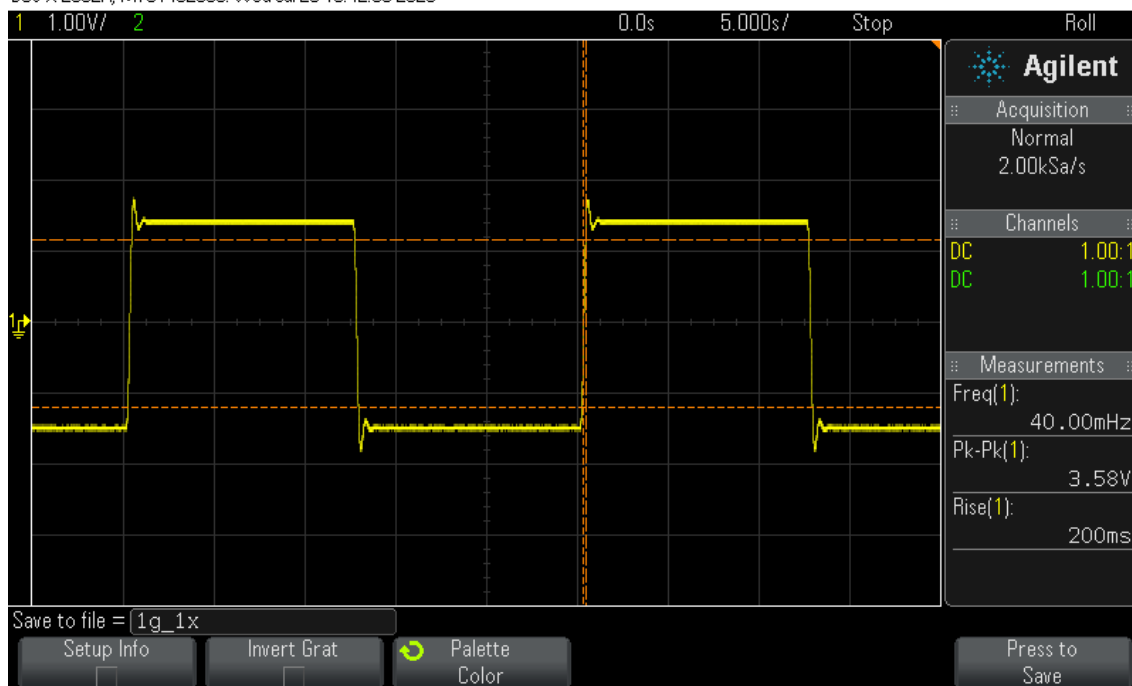


D.21 Histogram normovaného vstupního šumového proudu zesilovače při velikosti zpětnovazebního rezistoru $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $10\times$

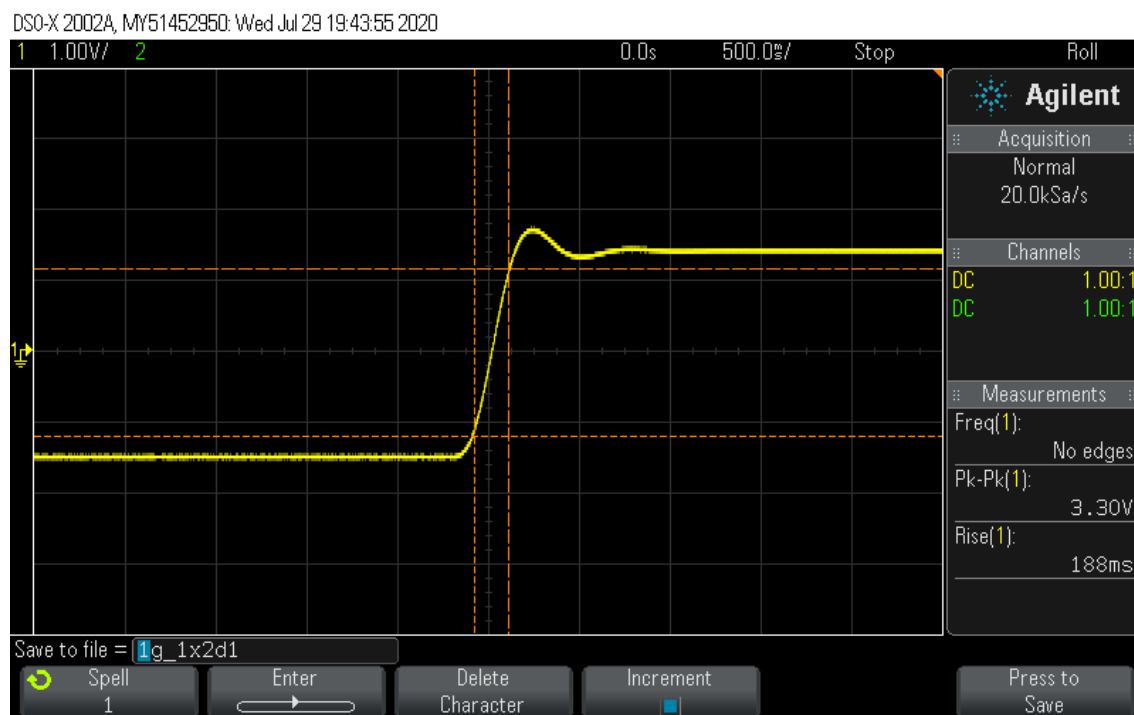


D.22 Odezva zesilovače na obdélníkový vstupní signál při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909\times$

DSO-X 2002A, MY51452950: Wed Jul 29 19:42:50 2020

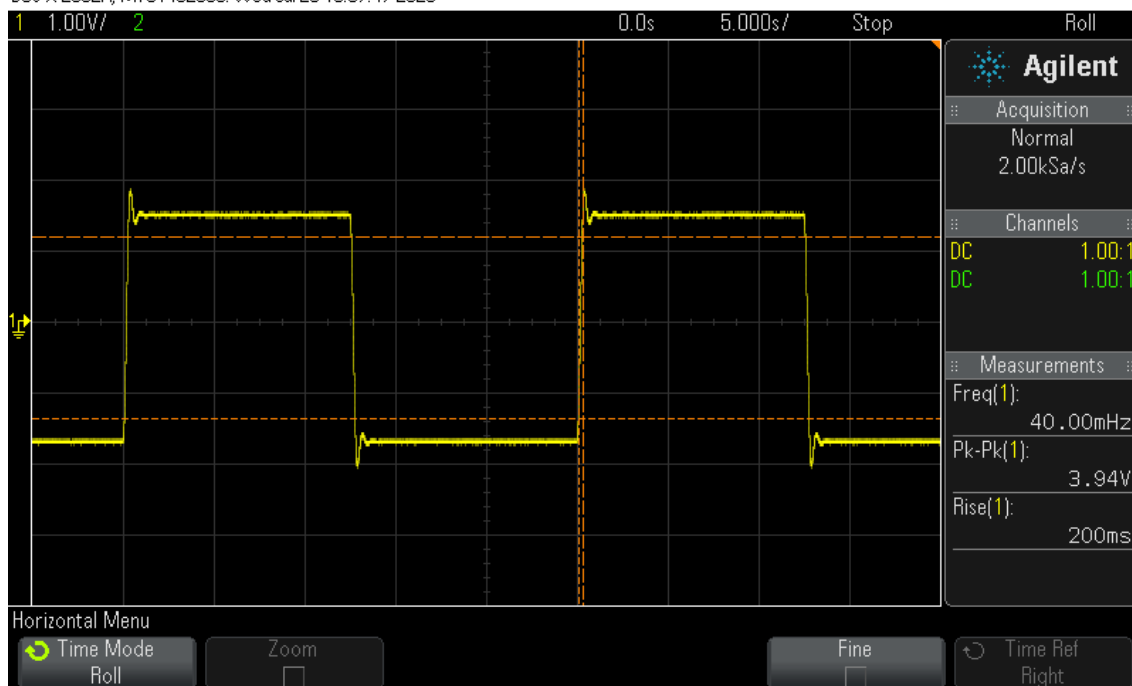


D.23 Odezva zesilovače na obdélníkový vstupní signál při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesilení druhého stupně $0,909x$ – detail náběžné hrany



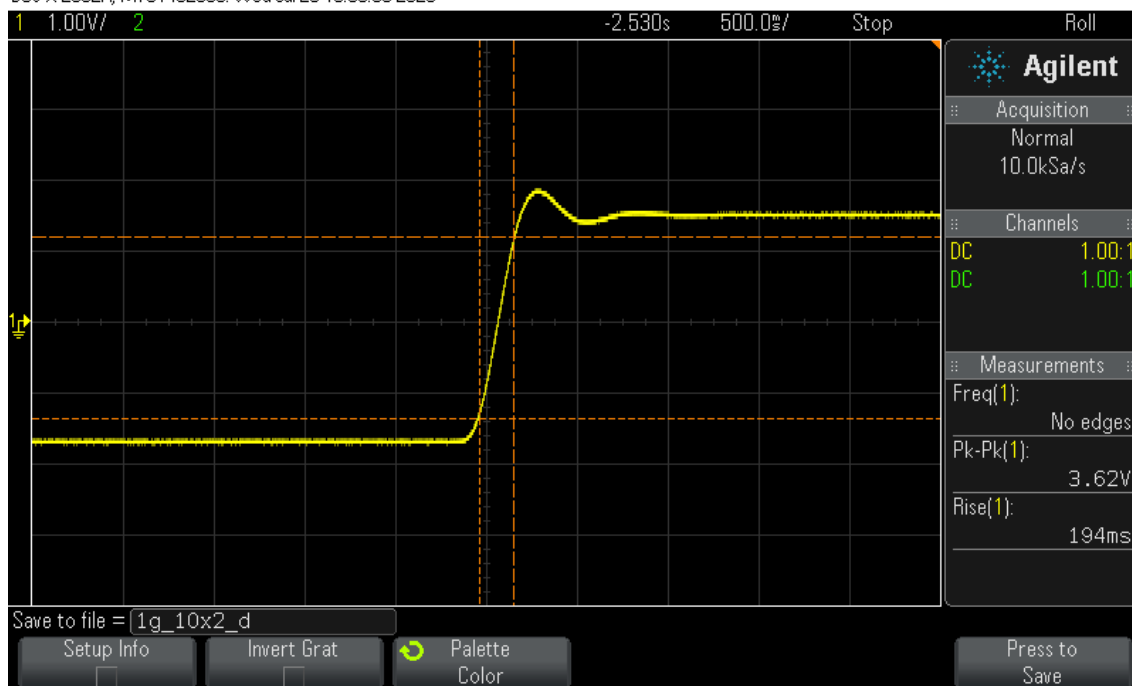
D.24 Odezva zesilovače na obdélníkový vstupní signál při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $10\times$

DSO-X 2002A, MY51452950: Wed Jul 29 19:37:47 2020



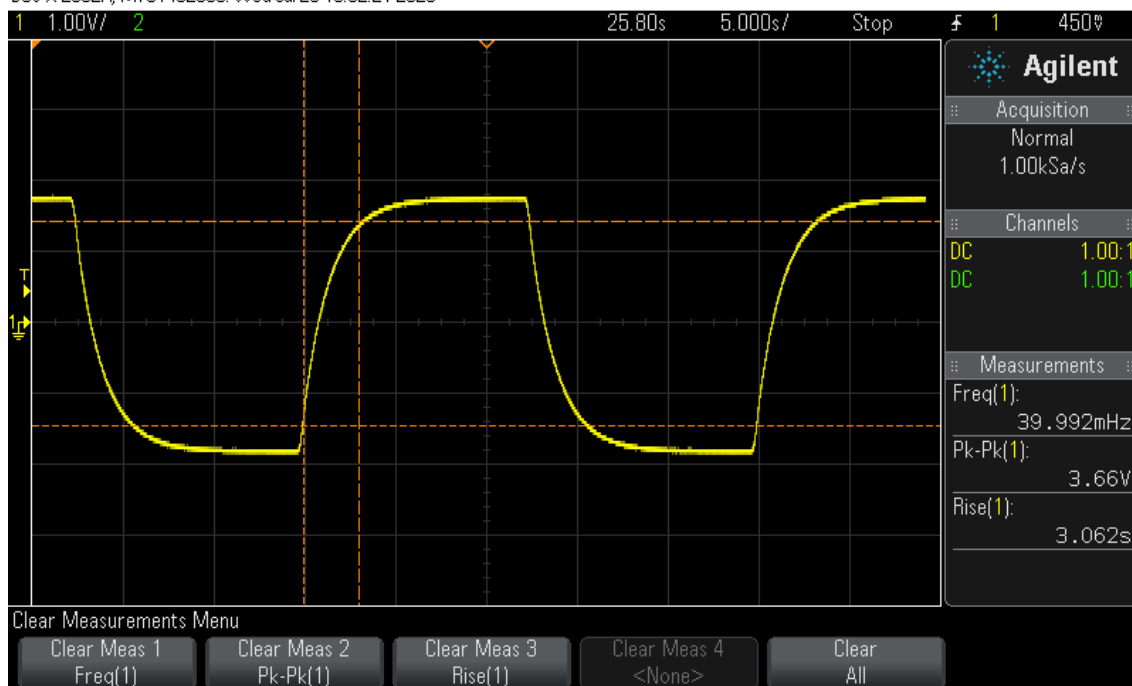
D.25 Odezva zesilovače na obdélníkový vstupní signál při velikosti zpětnovazebního rezistoru $1\text{ G}\Omega$ a zesilení druhého stupně 10x – detail náběžné hrany

DSO-X 2002A, MY51452950: Wed Jul 29 19:39:03 2020



D.26 Odezva zesilovače na obdélníkový vstupní signál při velikosti zpětnovazebního rezistoru $100\text{ G}\Omega$ a zesílení druhého stupně $0,909x$

DSO-X 2002A, MY51452950: Wed Jul 29 18:52:21 2020



D.27 Odezva zesilovače na obdélníkový vstupní signál při velikosti zpětnovazebního rezistoru 100 G Ω a zesílení druhého stupně 10x

DSO-X 2002A, MY51452950: Wed Jul 29 19:04:02 2020

