



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

PŘESNÝ WATTMETR PRO MĚŘENÍ MĚRNÝCH ZTRÁT FERITOVÝCH JADER

ACCURATE WATTMETER FOR MEASURE POWER LOSS IN FERRITE CORE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Lukáš Zdražil

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Roubal, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Lukáš Zdražil

ID: 186600

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Přesný wattmetr pro měření měrných ztrát feritových jader

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte měřicí principy používané v elektronických wattmetrech v kmitočtovém pásmu do 50 kHz. Zvláště se zaměřte na analogové násobičky. Prostudujte měřicí metody používané pro určení měrných ztrát ve feritech. Uvažujte potřebné zesílení nutné pro měření malých vzorků. Navrhněte vhodný způsob řízení wattmetru.

Navrhněte a sestavte wattmetr vhodný pro měření měrných ztrát ve feritových materiálech v daném kmitočtovém rozsahu. Proměřte jeho vlastnosti a proveďte měření měrných ztrát pro vybrané vzorky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

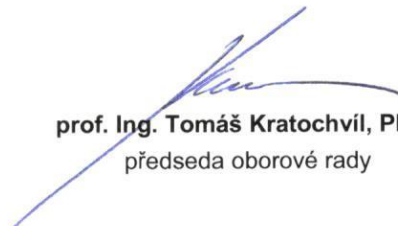
[1] GESCHIEDTOVÁ, E., REZ, J., STEINBAUER, M. Měření v elektrotechnice. Skriptum FEKT VUT v Brně. Brno: Vydavatelství VUTIUM, 2002, ISBN 80-214-1990-3

[2] TUMANSKI, Slawomir. Handbook of Magnetic Measurements. CRC Press, 2011. ISBN 1439829519.

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 24. 5. 2018

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


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



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Ztráty ve feromagnetických materiálech se dají změřit wattmetrem. Lze je dělit na ztráty vířivými proudy a hysterezní ztráty. Měření ztrát se provádí na uzavřených vzorcích. Wattmetry by měly být přesné a citlivé. Používají se elektrodynamické wattmetry, které dosahují maximální výchylky při účinníku menším než jedna. Dalším možným způsobem měření ztrát je použít speciální elektronické obvody, jejichž hlavní částí je analogová násobička. Analogová násobička realizuje součin dvou vstupních signálů, zejména se jedná o napětí nebo proud. Pro tyto účely byla vyvinuta řada integrovaných obvodů. Největšími výrobci jsou společnosti Analog Devices a Texas Instruments.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektronický wattmetr, měření ztrát, magnetická indukce, feritová jádra, operační zesilovač, analogová násobička, násobení.

ABSTRACT

Losses in ferromagnetic materials can be measured by a wattmeter. They can be divided into eddy current losses and hysteresis losses. Loss measurements are performed on closed samples. Wattmeters should be accurate and sensitive. There are electrodynamic wattmeters used which reach the maximum deflection at a power factor less than one. Another possible way how to measure losses is by the usage of special electronic circuits. The main part of these circuits is called an analog multiplier. The analog multiplier performs a product of two input signals, especially voltage or current. For these purposes a lot of integrated circuits have been developed. The biggest producers are companies such as Analog Devices and Texas Instruments.

KEYWORDS

Electronic wattmeter, measurement of losses, magnetic induction, ferrite cores, operational amplifiers, analog multiplier, multiplication.

ZDRAŽIL, L. *Přesný wattmetr pro měření měrných ztrát feritových jader*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2018. 51 s., 46 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Roubal, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Přesný wattmetr pro měření měrných ztrát feritových jader jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

Seznam obrázků	x
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
1 Požadované parametry	2
2 Návrh wattmetru	3
3 Měření magnetických ztrát na uzavřených vzorcích	4
3.1 Měření ztrát wattmetrem.....	4
3.1.1 Princip.....	4
3.1.2 Postup měření	7
3.1.3 Rozdělení ztrát	8
3.1.4 Chyby měření.....	9
3.2 Přístroje k provoznímu měření ztrát	9
3.2.1 Epsteinův přístroj.....	9
3.2.2 Malý Epsteinův přístroj.....	11
3.3 Jiné způsoby určení ztrát.....	12
3.3.1 Určení ztrát z velikosti plochy dynamické hysterezní smyčky.....	12
3.3.2 Měření ztrát můstkovými metodami.....	13
4 Wattmetry vhodné k měření magnetických ztrát	14
4.1 Elektrodynamické wattmetry	14
4.2 Elektronické wattmetry.....	15
5 Analogové násobičky	16
5.1 Analogová násobička AD534	18
5.2 Analogová násobička AD734	19
6 Podrobný popis bloků	21
6.1 Napěťový kanál.....	21
6.2 Proudový kanál	22
6.3 Převodník proudu na napětí	23
6.4 Násobící a usměrňující bloky	24

6.5	Dolní propusti	25
6.6	Stabilizátory s chladiči.....	25
7	Počítačová simulace	26
7.1	Střídavá analýza operačního zesilovače OPA842	26
7.2	Střídavá analýza operačního zesilovače OPA656	27
7.3	Střídavá analýza operačního zesilovače THS4631	28
7.4	Střídavá analýza napěťového kanálu	29
7.5	Výstupní průběhy napětí převodníku proudu na napětí.....	31
8	Naměřené průběhy	33
8.1	Převodní a frekvenční charakteristiky násobičky AD534K	33
8.2	Převodní a frekvenční charakteristiky násobičky AD734	36
8.3	Frekvenční charakteristiky napěťového a proudového kanálu	39
8.4	Frekvenční charakteristika převodníku proudu na napětí.....	43
8.5	Frekvenční charakteristiky dolních propustí.....	44
9	Závěr	46
	Literatura	48
	Seznam symbolů, veličin a zkratek	50
A	Návrh zařízení	52
A.1	Obvodové zapojení napěťového kanálu.....	52
A.2	Deska plošného spoje napěťového kanálu – top.....	53
A.3	Deska plošného spoje napěťového kanálu – bottom	53
A.4	Obvodové zapojení proudového kanálu	54
A.5	Deska plošného spoje proudového kanálu – top.....	55
A.6	Deska plošného spoje proudového kanálu – bottom	55
A.7	Obvodové zapojení převodníku I na U	56
A.8	Deska plošného spoje převodníku I na U – top	57
A.9	Deska plošného spoje převodníku I na U – bottom	57
A.10	Obvodové zapojení násobícího bloku.....	58
A.11	Deska plošného spoje násobícího bloku – top.....	59
A.12	Deska plošného spoje násobícího bloku – bottom.....	59
A.13	Obvodové zapojení usměrňujícího bloku	60
A.14	Deska plošného spoje usměrňujícího bloku – top	61

A.15	Deska plošného spoje usměrňujícího bloku – bottom	61
A.16	Obvodové zapojení dolních propustí	62
A.17	Deska plošného spoje dolních propustí – top	63
A.18	Deska plošného spoje dolních propustí – bottom	63
A.19	Obvodové zapojení stabilizátorů s chladiči	64
A.20	Deska plošného spoje stabilizátorů s chladiči – bottom	65
B	Seznam součástek	66
B.1	Seznam součástek pro napěťový kanál	66
B.2	Seznam součástek pro proudový kanál	68
B.3	Seznam součástek pro převodník I na U	70
B.4	Seznam součástek pro násobící blok	71
B.5	Seznam součástek pro usměrňující blok	72
B.6	Seznam součástek pro dolní propusti	73
B.7	Seznam součástek pro stabilizátory s chladiči	75
C	Seznam použitých měřících přístrojů	76
D	Ostatní přílohy	77
D1	Měření frekvenčních charakteristik proudového kanálu	77
D2	Měření výstupních průběhů proudového kanálu	78
D3	Proudový kanál ve stínící krabici	79
D4	Šum na výstupu proudového kanálu při zesílení 300	80
D5	Šum na výstupu proudového kanálu při zesílení 900	81
D6	Odezva proudového kanálu na náběžnou hranu při zesílení 300	82
D7	Odezva proudového kanálu na náběžnou hranu při zesílení 900	83
D8	Časové průběhy proudového kanálu při frekvenci 100 kHz	84
D9	Časové průběhy proudového kanálu při frekvenci 1 MHz	85
D10	Měření výstupních průběhů převodníku I na U	86
D11	Převodník I na U ve stínící krabici	87
D12	Časové průběhy převodníku I na U při frekvenci 10 kHz	88
D13	Časové průběhy převodníku I na U při frekvenci 100 kHz	89
D14	Časové průběhy násobičky AD534 při frekvenci 1 kHz	90
D15	Časové průběhy násobičky AD534 při frekvenci 700 kHz	91
D16	Časové průběhy násobičky AD734 při frekvenci 1 kHz	92
D17	Časové průběhy násobičky AD734 při frekvenci 700 kHz	93

D18	Dolní propusti ve stínící krabici	94
D19	Odezva filtru s dobou ustálení 1 s na náběžnou hranu	95
D20	Odezva filtru s dobou ustálení 300 ms na náběžnou hranu	96
D21	Odezva filtru s dobou ustálení 30 ms na náběžnou hranu	97

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1	Blokové schéma navrhovaného wattmetru	3
Obrázek 3.1	Měření ztrát wattmetrem na vzorku s jedním vinutím [7]	4
Obrázek 3.2	Měření ztrát wattmetrem na vzorku s dvojitým vinutím [7]	5
Obrázek 3.3	Epsteinův přístroj [7]	10
Obrázek 3.4	Fotografie Epsteinova přístroje	10
Obrázek 3.5	Malý Epsteinův přístroj [7]	11
Obrázek 3.6	Fotografie malého Epsteinova přístroje [8]	12
Obrázek 4.1	Princip elektrodynamického měřicího ústrojí [4]	14
Obrázek 4.2	Blokové schéma obvodu ADE7763 [1]	15
Obrázek 5.1	Princip dělení analogových násobiček [5]	16
Obrázek 5.2	Typické zapojení dvoukvadrantové násobičky [5]	17
Obrázek 5.3	Zapojení násobičky AD534 ve funkci násobení [2]	19
Obrázek 5.4	Zapojení násobičky AD734 ve funkci násobení [3]	20
Obrázek 6.1	Zapojení napěťového kanálu v programu OrCAD PSpice Designer	22
Obrázek 6.2	Zapojení převodníku I na U v programu OrCAD PSpice Designer	24
Obrázek 7.1	Frekvenční charakteristiky OPA842 pro zesílení 1	26
Obrázek 7.2	Frekvenční charakteristiky OPA842 pro zesílení 3	27
Obrázek 7.3	Frekvenční charakteristiky OPA656 pro zesílení 3,07	28
Obrázek 7.4	Frekvenční charakteristiky THS4631 pro zesílení 3,26	29
Obrázek 7.5	Amplitudová charakteristika napěťového kanálu pro všechna zesílení ..	30
Obrázek 7.6	Fázová charakteristika napěťového kanálu pro všechna zesílení	30
Obrázek 7.7	Výstupní průběhy napětí napěťového kanálu pro všechna zesílení	31
Obrázek 7.8	Výstupní průběhy napětí převodníku proudu na napětí	32
Obrázek 8.1	Zapojení měřicího pracoviště pro měření AD534K	33
Obrázek 8.2	Převodní charakteristika AD534K	34
Obrázek 8.3	Naměřená chyba AD534K	34
Obrázek 8.4	Frekvenční charakteristika AD534K při vstupním napětí 1 V RMS	35
Obrázek 8.5	Frekvenční charakteristika AD534K při vstupním napětí 3 V RMS	36
Obrázek 8.6	Převodní charakteristika AD734	37
Obrázek 8.7	Naměřená chyba AD734	37
Obrázek 8.8	Frekvenční charakteristika AD734 při vstupním napětí 1 V RMS	38

Obrázek 8.9	Frekvenční charakteristika AD734 při vstupním napětí 3 V RMS.....	39
Obrázek 8.10	Frekvenční charakteristiky napěťového kanálu při zesílení 30	40
Obrázek 8.11	Frekvenční charakteristiky napěťového kanálu při zesílení 90	40
Obrázek 8.12	Frekvenční charakteristiky napěťového kanálu při zesílení 300	41
Obrázek 8.13	Frekvenční charakteristiky napěťového kanálu při zesílení 900.	41
Obrázek 8.14	Frekvenční charakteristiky proudového kanálu při zesílení 300	42
Obrázek 8.15	Frekvenční charakteristiky proudového kanálu při zesílení 900	42
Obrázek 8.16	Frekvenční charakteristika převodníku proudu na napětí.....	44
Obrázek 8.17	Frekvenční charakteristiky dolních propustí.....	45

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Přehled dostupných analogových násobiček a jejich parametrů [9].....	18
Tabulka 2	Vstupní rozsahy napěťového kanálu a jejich zesílení.....	21
Tabulka 3	Vstupní rozsahy převodníku proudu na napětí a jejich zesílení	23
Tabulka 4	Nasimulované hodnoty poklesu fáze pro všechna zesílení.....	31
Tabulka 5	Nasimulované hodnoty poklesu fáze na výstupu z převodníku I na U...	32
Tabulka 6	Porovnání simulovaných a naměřených hodnot napěťového kanálu	39

ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá tematikou měření měrných ztrát ve feromagnetických materiálech. Cílem první části této práce je seznámení se s různými měřicími metodami, které jsou vhodné k určení měrných ztrát ve feromagnetických materiálech. V této části práce se také pojednává o přístrojích určených k provoznímu měření ztrát.

Cílem další části je prostudování principů používaných ve wattmetrech určených k měření měrných ztrát. Tato část práce je věnována elektrodynamickým i elektronickým wattmetrům.

Třetí část má za cíl prozkoumání funkce analogových násobiček. V této části jsou dále důkladně prostudovány principy používané při výrobě analogových násobiček, také různé modifikace násobiček a jejich dostupnost.

Hlavním cílem této práce je vytvoření návrhu elektronického wattmetru, který bude schopný měřit měrné ztráty ve feromagnetických materiálech. K navržení elektronického wattmetru je nutné využít poznatků získaných během vytváření předchozích částí této práce. Navržený wattmetr by měl být zkonstruován a jeho funkčnost by měla být ověřena měřicími testy na feritových jádrech.

1 POŽADOVANÉ PARAMETRY

Navrhovaný wattmetr by měl měřit měrné ztráty vznikající ve všech feromagnetických materiálech, jako je křemíková ocel, železo, nikl, kobalt a ferity. Důležitým požadavkem na wattmetr je jeho minimální vlastní spotřeba. Minimální vlastní spotřeby docílíme použitím elektronického wattmetru, který bude napájen z odděleného zdroje.

Velké nároky jsou kladeny také na citlivost wattmetru. Wattmetr by měl být schopný měřit ztráty na velkých i na velmi malých vzorcích. Na malých vzorcích se naměří malé ztrátové výkony. Minimální hodnota, kterou by měl být wattmetr schopný změřit, je 10^{-7} W/kg a maximální hodnota 10^1 W/kg. Citlivost zajistí kaskáda operačních zesilovačů s nastavitelným zesílením. Operační zesilovače musí mít malé offsetové napětí a velmi malou změnu fáze v pracovním pásmu, aby nebyla narušena přesnost wattmetru. Pro dosažení velké přesnosti měření je také důležité použít přesnou analogovou násobičku.

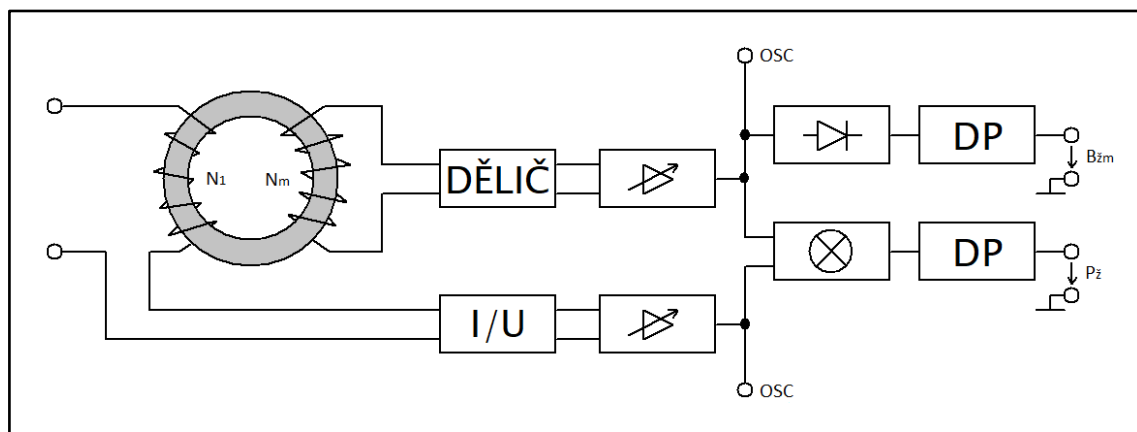
Magnetická indukce, při které bude měření probíhat, by měla být v rozsahu od 1 mT do 2 T. Průběh magnetické indukce bude pouze harmonický. Je také požadována velká šířka pásma, jmenovitě od 10 Hz do 50 kHz. V tomto pásmu by měl wattmetr měřit s přesností ± 2 %.

2 NÁVRH WATTMETRU

Elektronické wattmetry jsou tvořeny proudovým a napěťovým kanálem. V našem případě se do proudového kanálu bude přivádět okamžitá hodnota proudu tekoucího primárním vinutím vzorku a do napěťového kanálu okamžitá hodnota napětí na sekundárním vinutí vzorku. Schéma navrhovaného wattmetru je zobrazeno na obrázku 2.1. Na vstup napěťového kanálu bude umístěn kmitočtově kompenzovaný odporový dělič a na vstup proudového kanálu se umístí převodník proudu na napětí s operačním zesilovačem.

Za odporovým děličem a převodníkem proudu na napětí budou umístěny kaskády operačních zesilovačů s nastavitelným zesílením. Kaskády se budou moci nastavovat nezávisle na sobě. Obě kaskády budou složeny z šesti operačních zesilovačů. Zesilovací kaskády, odporový dělič a převodník proudu na napětí budou navrženy tak, aby pro všechny vstupní rozsahy bylo napětí na výstupu stejné. Do obou kanálů se za zesilovací kaskády přidají konektory pro připojení k osciloskopu.

Oba kanály budou následně vstupovat do přesné analogové násobičky, která je základním prvkem elektronických wattmetrů. Násobičky budou použity dvě, první bude násobit signály s nižší frekvencí a druhá signály s vyšší frekvencí. Okamžitá hodnota napětí na výstupu z násobičky bude rovna okamžité hodnotě měrných ztrát vzorku. Za zesilovací kaskádu napěťového kanálu se navíc připojí usměrňovač napětí a na jeho výstupu bude stejnosměrná hodnota napětí úměrná amplitudě magnetické indukce vzorku. Za násobičku a usměrňovač budou ještě připojeny dolní propusti pro ustálení výstupního napětí. Na výstup za dolní propusti se připojí přesný analogový voltmetr a jeho výchylka bude rovna měrným ztrátám, případně úměrná magnetické indukci.



Obrázek 2.1 Blokové schéma navrhovaného wattmetru

Ve wattmetru bude potřeba řídit rozsahy převodníku proudu na napětí, nastavovat zesílení obou zesilovacích kaskád nezávisle na sobě, přepínat mezi první a druhou násobičkou a měnit šířku pásma dolních propustí. Přepínání se zajistí pomocí elektromagnetických relé, která budou řízena otočnými přepínači.

Generátor se použije laboratorní. Napájecí zdroj pro aktivní součástky bude také laboratorní.

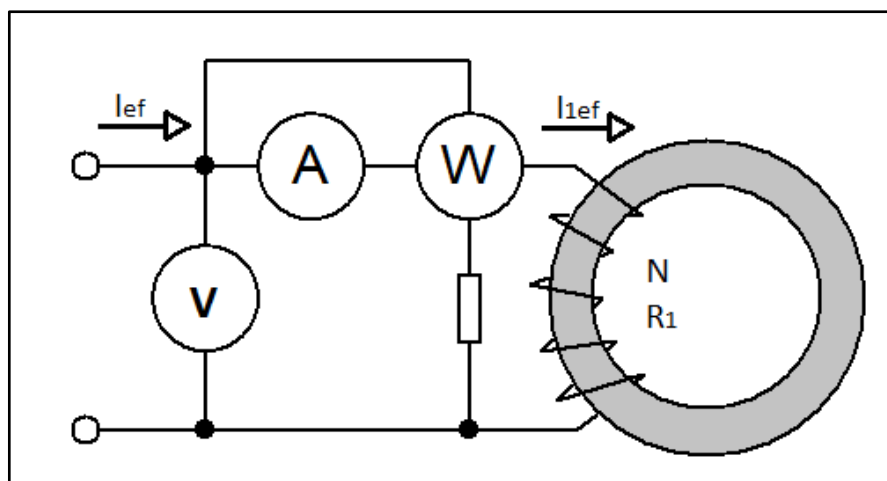
3 MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH ZTRÁT NA UZAVŘENÝCH VZORCÍCH

3.1 Měření ztrát wattmetrem

Ztráty vzorku je možné měřit wattmetrem, který udává výkon odebíraný vzorkem ze zdroje magnetizačního proudu. Měří se na uzavřených prstencových vzorcích, na kterých je navinuto měřicí vinutí. Wattmetry mají být co nejpřesnější a co nejcitlivější s malou vlastní spotřebou. Používají se speciální elektrodynamické wattmetry, které dosahují plné výchylky při účinníku $\cos \varphi = 0,2$ nebo $0,1$. Výchylka těchto wattmetrů je pětkrát, respektive desetkrát větší než výchylka běžných wattmetrů s $\cos \varphi = 1$. Výhodou je, že přístroje měří hodnoty v horní části jejich stupnice, měření je tedy přesnější. Elektrodynamické wattmetry lze použít pouze pro měření na nižších kmitočtech a při dostatečně velkých ztrátových výkonech. Navržený elektronický wattmetr bude schopný měřit v širokém kmitočtovém pásmu a při malých i velkých hodnotách ztrátových výkonů.

3.1.1 Princip

Nejjednodušší zapojení pro měření ztrát wattmetrem je zobrazeno na obrázku 3.1. Zapojení používá pouze jedno vinutí na vzorku. Wattmetr ovšem neudává pouze ztráty vzorku, ale i ztráty v odporu magnetizačního vinutí a část spotřeby měřících přístrojů.



Obrázek 3.1 Měření ztrát wattmetrem na vzorku s jedním vinutím [7]

Ztráty vzorku se pak vypočítají podle vztahu (3.1):

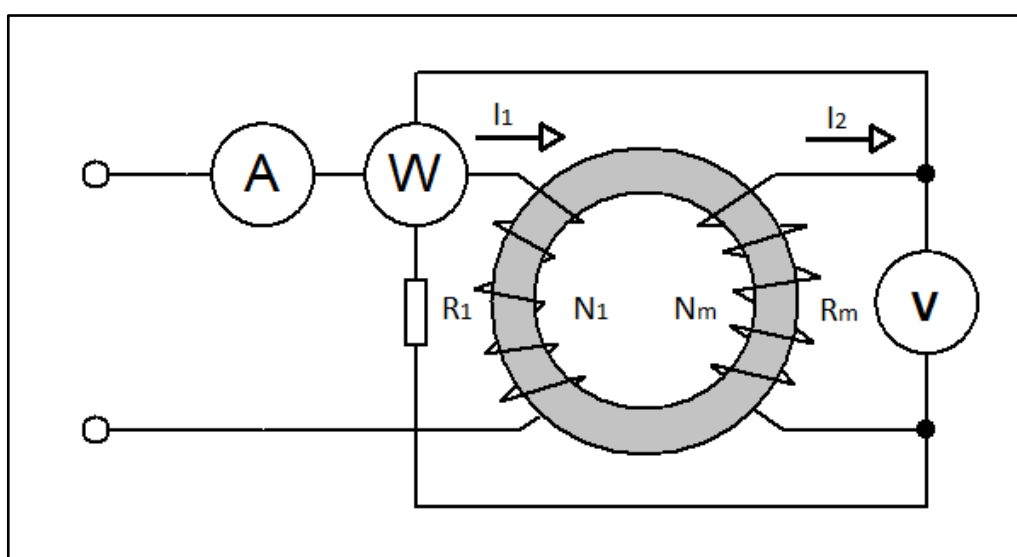
$$P_z = P' - \left[R_1 I_{1ef}^2 + \left(\frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_{wn}} \right) U_{1ef}^2 \right] \quad [W; \Omega, A, V], \quad (3.1)$$

kde P' je údaj wattmetru, R_1 je odpor magnetizačního vinutí, R_v je odpor voltmetru, R_{wn} je odpor napěťového obvodu wattmetru, I_{1ef} je efektivní hodnota magnetizačního proudu

a U_{1ef} je efektivní hodnota napětí měřeného voltmetrem. Proud I_{1ef} lze nahradit proudem I_{ef} , pokud je proud voltmetru I_v a proud napěťového obvodu wattmetru I_{Wn} dostatečně malý.

Nevýhodou tohoto zapojení je vliv odporu magnetizačního vinutí R_1 . Při výpočtu ztrát sice lze ztráty v odporu R_1 zanedbat, ale při výpočtu magnetické indukce z napětí U_{1ef} nelze zanedbat vliv úbytku napětí na odporu R_1 . Toto zapojení je tedy vhodné jen pro velmi rozměrné vzorky, u nichž je vliv úbytku napětí na odporu vinutí poměrně malý.

K přesnějšímu měření ztrát a ztrátového čísla se používá zapojení s dvojitým vinutím na vzorku. Zapojení je zobrazeno na obrázku 3.2. Napěťový obvod wattmetru a voltmetr jsou připojeny na měřicí (sekundární) vinutí. Tím se vyloučí vliv ztrát v magnetizačním vinutí a magnetickou indukci lze přesně určit z napětí indukovaného v měřicím vinutí.



Obrázek 3.2 Měření ztrát wattmetrem na vzorku s dvojitým vinutím [7]

Při střídavém napětí a proudu udává wattmetr hodnotu (3.2):

$$P' = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_1 dt \quad [W; s, V, A], \quad (3.2)$$

kde T je doba trvání jedné periody, u_2 je okamžitá hodnota napětí na napěťovém obvodu wattmetru a i_1 je okamžitá hodnota proudu proudové cívky.

Okamžitá hodnota napětí u_2 je dána vztahem (3.3):

$$u_2 = N_m \frac{R'}{R' + R_m} \left[S_z \frac{dB_{zt}}{dt} + \mu_0 (S_m - S_z) \frac{dH_{zt}}{dt} \right] \quad [V; -, \Omega, m^2, T, Am^{-1}], \quad (3.3)$$

kde N_m je počet závitů měřicího vinutí, R_m je odpor měřicího vinutí, R' je výsledný odpor paralelně spojených přístrojů připojených na měřicí vinutí, S_z je průřez vzorku, S_m je

plocha závitů měřicího vinutí, B_{zt} je okamžitá hodnota magnetické indukce vzorku a H_{zt} je okamžitá hodnota intenzity magnetického pole na povrchu vzorku.

Okamžitou hodnotu proudu i_1 lze vyjádřit pomocí intenzity pole H_{zt} vztahem (3.4):

$$i_1 = \frac{l_s}{N_1} H_{zt} + \frac{N_m}{N_1} i_2 \quad [\text{A}; \text{m}, -, \text{Am}^{-1}], \quad (3.4)$$

kde l_s je střední délka vzorku, N_1 je počet závitů magnetizačního vinutí a i_2 je okamžitá hodnota proudu v měřicím vinutí.

Nyní vztah (3.4) dosadíme do (3.2) a dostaneme:

$$P' = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_1 dt = \frac{l_s}{N_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_2 H_{zt} dt + \frac{N_m}{N_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_2 dt. \quad (3.5)$$

Do prvního členu na pravé straně rovnice (3.5) dosadíme (3.3) a dostaneme:

$$P' = \frac{N_m}{N_1} \frac{R'}{R' + R_m} \left[l_s S_z \frac{1}{T} \int_0^T H_{zt} \frac{dB_{zt}}{dt} dt + \mu_0 l_s (S_m - S_z) \frac{1}{T} \int_0^T H_{zt} \frac{dH_{zt}}{dt} dt \right] + \frac{N_m}{N_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_2 dt. \quad (3.6)$$

První člen v hranaté závorce na pravé straně rovnice je roven ztrátám vzorku, protože platí vztah (3.7):

$$P_z = l_s S_z \frac{1}{T} \int_0^T H_{zt} \frac{dB_{zt}}{dt} dt = V_z f \oint H_z dB_z \quad [\text{W}; \text{m}, \text{m}^2, \text{s}, \text{Am}^{-1}, \text{T}, \text{m}^3, \text{Hz}], \quad (3.7)$$

kde $V_z = l_s S_z$ je objem vzorku a $f = 1/T$ je kmitočet magnetizačního proudu.

Druhý člen v hranaté závorce je roven nule, protože platí vztah (3.8):

$$\int_0^T H_{zt} \frac{dH_{zt}}{dt} dt = \int_{H_{z0}}^{H_{zT}=H_{z0}} H_{zt} dH_{zt} = 0 \quad [\text{Am}^{-1}], \quad (3.8)$$

(pro okamžik $t = 0$ i $t = T$ je magnetická intenzita pole stejná, $H_{zT} = H_{z0}$). Tento člen je dán magnetickým tokem vzduchem a je z něj patrné, že magnetický tok vzduchem nemá vliv na údaj wattmetru. Má ovšem vliv na údaj voltmetru, neboť způsobí chybu při určování magnetické indukce výpočtem z indukovaného napětí.

Třetí člen na pravé straně rovnice znamená spotřebu přístrojů připojených na měřicí vinutí, které odebírají proud i_2 při napětí u_2 :

$$\frac{N_m}{N_1} \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_2 dt = \frac{N_m}{N_1} P_{př} = \frac{N_m}{N_1} \frac{U_{2ef}^2}{R'}. \quad (3.9)$$

Pokud vyjádříme spotřebu přístrojů $P_{\text{př}}$ jejich odporem R' a napětím $U_{2\text{ef}}$, platí vztah (3.10):

$$P' = \frac{N_m}{N_1} \left[\frac{R'}{R' + R_m} P_z + \frac{U_{2\text{ef}}^2}{R'} \right] \quad [W; -, \Omega, V]. \quad (3.10)$$

Ztráty vzorku se dají stanovit podle vztahu (3.11):

$$P_z = \left[\frac{N_1}{N_m} P' - \frac{U_{2\text{ef}}^2}{R'} \right] \frac{R' + R_m}{R'} \quad [W; -, V, \Omega], \quad (3.11)$$

kde P' je údaj wattmetru, N_1 je počet závitů magnetizačního vinutí, N_m je počet závitů měřicího vinutí, $U_{2\text{ef}}$ je efektivní hodnota napětí měřicího vinutí změřená voltmetrem, R' je výsledný odpor přístrojů připojených na měřicí vinutí a R_m je odpor měřicího vinutí.

Pokud se voltmetr po změření napětí odpojí a nezůstává zařazen při měření ztrát, počítá se jen s odporem napěťového obvodu wattmetru, $R' = R_{\text{Wn}}$. Pokud je odpor měřicího vinutí R_m zanedbatelný oproti R' , lze použít zjednodušeného vztahu (3.12):

$$P_z = \frac{N_1}{N_m} P' - \frac{U_{2\text{ef}}^2}{R'} \quad [W; -, V, \Omega]. \quad (3.12)$$

Ze vztahu je patrné, že zvětšováním poměru počtu závitů N_1/N_m lze zvětšovat výchylku wattmetru. To znamená, že zvětšením počtu závitů měřicího vinutí N_m lze dosáhnout zřetelné výchylky wattmetru i při měření malých vzorků s malými ztrátami. Zvyšování počtu závitů má však omezení, protože se zároveň zvětšuje i napětí $U_{2\text{ef}}$ a tím i spotřeba přístrojů $P_{\text{př}} = U_{2\text{ef}}/R'$. Pokud se $P_{\text{př}}$ bude přibližně rovnat $N_1 P'/N_m$, bude měření velmi nepřesné, protože měřené ztráty P_z budou dány malým rozdílem dvou přibližně stejně velkých hodnot.

3.1.2 Postup měření

Pokud jsou nároky na přesnost kmitočtu a tvar křivky menší, lze použít napájení ze sítě. Pokud chceme dosáhnout sinusového průběhu magnetické indukce, musí mít zdroj co nejmenší vnitřní odpor. K nastavení napětí tedy nelze použít regulačních odporů a musí se použít regulační transformátor s nejmenším možným vnitřním odporem. Také magnetizační vinutí a všechny přístroje, kterými prochází magnetizační proud, musí mít malý odpor.

Pokud se měří na kmitočtu odlišném od kmitočtu sítě nebo je-li potřeba přesně nastavovat kmitočet a dodržovat přesně sinusový tvar křivky, je vhodné použít synchronní generátor, u kterého lze měnit kmitočet změnou počtu otáček a měnit napětí změnou buzení. Generátor musí být dimenzovaný na jednofázové zatížení a na výkon značně větší, než je velikost zdánlivého příkonu vzorku. Tato podmínka je nutná, aby nesinusový magnetizační proud nezkreslil tvar křivky napětí generátoru.

Aby se plně využilo citlivosti wattmetru, musí se vhodně zvolit počty závitů obou vinutí vzorku N_1 a N_m tak, aby proud $I_{1\text{ef}}$ a napětí $U_{2\text{ef}}$ odpovídaly rozsahům wattmetru.

Ztráty se měří při předem zvolených amplitudách magnetické indukce B_{zm} . Indukce se stanoví z údaje druhého voltmetru, který měří střední absolutní hodnotu napětí U_{2s} . Pro zvolenou indukci B_{zm} se vypočítá příslušné napětí U_{2s} podle vztahu (3.13):

$$U_{2s} = 4fN_m S_z B_{zm} \quad [V; \text{Hz}, -, \text{m}^2, T], \quad (3.13)$$

kde f je kmitočet, N_m je počet závitů měřicího vinutí, S_z je průřez vzorku a B_{zm} je amplituda magnetické indukce.

Pokud není vliv odporu měřicího vinutí zanedbatelný, je nutné vztah doplnit na tvar (3.14):

$$U_{2s} = 4fN_m S_z B_{zm} \frac{R'}{R' + R_m} \quad [V; \text{Hz}, -, \text{m}^2, T, \Omega], \quad (3.14)$$

kde R' je výsledný odpor všech přístrojů připojených na měřicí vinutí a R_m je odpor měřicího vinutí. Pokud je průběh magnetické indukce blízký sinusovému průběhu, stačí jeden voltmetr, který udává efektivní hodnotu napětí U_{2ef} . Požadovaná indukce B_{zm} je potom dána napětím U_{2ef} . Vztahy zůstávají stejné, pouze konstanta 4 se změní na 4,44.

Nejprve se napětí U_{2s} , případně napětí U_{2ef} , nastaví pouze přibližně při zkratované proudové cívce wattmetru. Podle údaje ampérmetru se nastaví vhodný proudový rozsah wattmetru a ampérmetr se odpojí. Potom se nastaví napětí přesně a oba voltmetry se také odpojí, tím se neuplatní jejich spotřeba. Po přečtení údaje z wattmetru se oba voltmetry znovu připojí a kontroluje se, zda se během měření nezměnila hodnota napětí. Také kmitočet se musí kontrolovat před měřením i po měření.

Ze změřených ztrát vzorku se určí ztrátové číslo pro danou hmotnost vzorku vztahem (3.15):

$$Z = \frac{P_z}{m_z} \quad [W\text{kg}^{-1}; W, \text{kg}]. \quad (3.15)$$

Před měřením ztrát není třeba vzorek odmagnetovat, pokud se neměří při magnetických indukcích menších než několik desetin T. Při měření elektrodynamickým wattmetrem toto zřídka přichází v úvahu. Ovšem v případě elektronického wattmetru jsme schopni měřit i velmi malé hodnoty magnetické indukce.

3.1.3 Rozdělení ztrát

Měrné ztráty P_z se dají dělit na hysterezní ztráty P_h a ztráty vířivými proudy P_v . Dělení je nutné například při měření nesinusového průběhu magnetické indukce. Při dělení ztrát se také dají lépe zjistit jejich příčiny a tím i možnosti jejich potlačení. Pro rozdělení ztrát platí vztah (3.16):

$$P_z = P_h + P_v \quad [W; W, W]. \quad (3.16)$$

Rozdělit ztráty je možné několika způsoby. Jednou možností je měření při různých kmitočtech a při stejném tvaru křivky magnetické indukce a konstantní hodnotě

amplitudy magnetické indukce B_{zm} . Tímto způsobem se změří velikost hysterezních ztrát a ztráty vířivými proudy se vypočítají ze vztahu (3.16). Druhou možností je měření na jednom kmitočtu a různých tvarech křivky magnetické indukce. Amplituda magnetické indukce je i v tomto případě konstantní. Tímto způsobem se změří velikost ztrát vířivými proudy a hysterezní ztráty se vypočítají ze vztahu (3.16). Další možností je určení ztrát ze statické hysterezní smyčky. Tento způsob je pracný a výsledek bývá zkrácen samovolnými změnami magnetické indukce.

Ztrátová čísla se udávají pro sinusový průběh magnetické indukce. Ztráty P_z změřené při nesinusovém průběhu magnetické indukce lze přepočítat pro sinusový průběh indukce. Musíme však znát rozdělení měřených ztrát na hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy a také činitel tvaru indukovaného napětí. Platí vztah (3.17):

$$P_{zsin} = P_h + P_v \left(\frac{1,11}{K_e} \right)^2 [W; W, W, -], \quad (3.17)$$

kde P_h a P_v jsou hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy změřené při nesinusovém průběhu, K_e je činitel tvaru indukovaného napětí, při němž se měřilo a 1,11 je hodnota činitele tvaru pro sinusový průběh.

3.1.4 Chyby měření

Pro prstencové vzorky je měření nejpřesnější, ale i zde vznikají chyby vlivem nehomogenity pole a rozptylovými toky. Pro uzavřené vzorky jiného tvaru, například vzorky skládané z pásků do tvaru čtverce, je měření méně přesné. Vinutí na vzorcích musí být pečlivě izolováno, protože i jediný zkratovaný závit může způsobit velké chyby při měření ztrát.

Ztráty se musí měřit při určité magnetické indukci. Při nesinusovém průběhu magnetické indukce se měřené ztráty mění a je potřeba provádět pracný přepočet ztrát na sinusový průběh. Nejčastějšími chybami při určování magnetické indukce jsou nepřesné určení průřezu vzorku, použití voltmetru s nevhodným rozsahem a zanedbání magnetického toku šířícího se vzduchem.

Velké nároky jsou kladeny na přesnost a citlivost wattmetru. Wattmetr také musí mít malou spotřebu napěťového obvodu. Elektronický wattmetr bude napájen odděleně, jeho spotřeba bude minimální, takže chyby způsobené wattmetrem budou zanedbatelné.

3.2 Přístroje k provoznímu měření ztrát

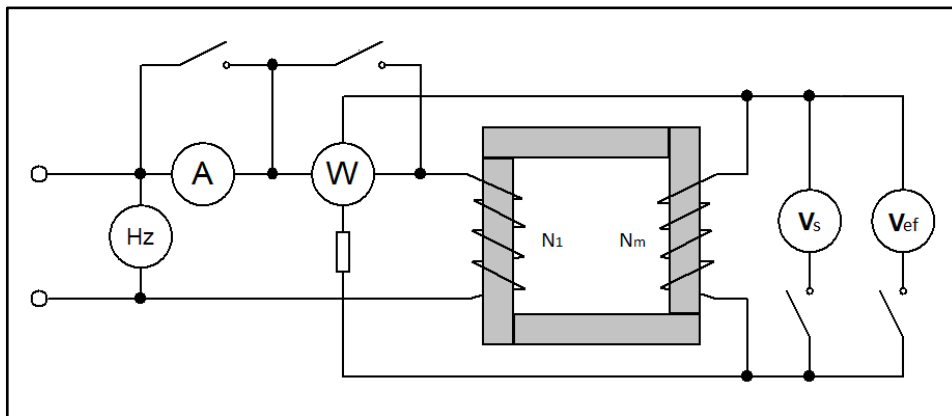
Měření na prstencových vzorcích dosahuje velmi dobré přesnosti, ale pro provozní měření je zhotovování prstencových vzorků příliš pracné. Proto byly vyvinuty přístroje s pevnými cívkami, do nichž se vkládají pásky plechů nebo svazky pásků tak, že vytvoří přibližně uzavřený homogenní magnetický obvod.

3.2.1 Epsteinův přístroj

Nejstarší z přístrojů k provoznímu měření ztrát je Epsteinův přístroj, který se dosud často používá. Vzorky používané v Epsteinově přístroji jsou z pásků plechu složených do čtyř

svazků, každý o hmotnosti 2,5 kilogramu. Celková hmotnost vzorku je tedy $m_z = 10$ kilogramů a celková délka je $l = 2$ metry. Svazky jsou vloženy do čtvercového rámu tvořeného čtyřmi shodnými cívkami. Počty závitů magnetizačního a měřícího vinutí jsou stejné $N_1 = N_m = 600$ a obě vinutí jsou rovnoměrně rozložena na všechny čtyři cívky rámu.

K měření ztrát se používá zapojení podle obrázku 3.3. Měří se zejména při kmitočtu $f = 50$ Hz, při sinusovém průběhu magnetické indukce a při indukcích $B_{zm} = 1$ T nebo $B_{zm} = 1,5$ T. K určení ztrát se použije vztah (3.12) uvedený v kapitole o měření ztrát pomocí wattmetru, který se zjednoduší dosazením $N_1/N_m = 1$.



Obrázek 3.3 Epsteinův přístroj [7]

Epsteinův přístroj se často považuje za základní metodu měření ztrát. Norma udává přesnost ± 3 %, pokud se měří předepsaným způsobem na přístrojích předepsaného provedení. Na zařízeních odlišného provedení a s různým přístrojovým vybavením se výsledky liší o 5 až 10 %. Jednou z hlavních příčin nepřesností jsou vzduchové mezery v místech, kde se svazky navzájem dotýkají. Mezery vyvolávají nerovnoměrné rozložení magnetické indukce podél svazku. Pro přejímací zkoušky a kontrolu jakosti materiálu nejsou tyto nepřesnosti příliš velkou závadou a Epsteinův přístroj je pro tyto účely stále používán. Fotografie Epsteinova přístroje je na obrázku 3.4.

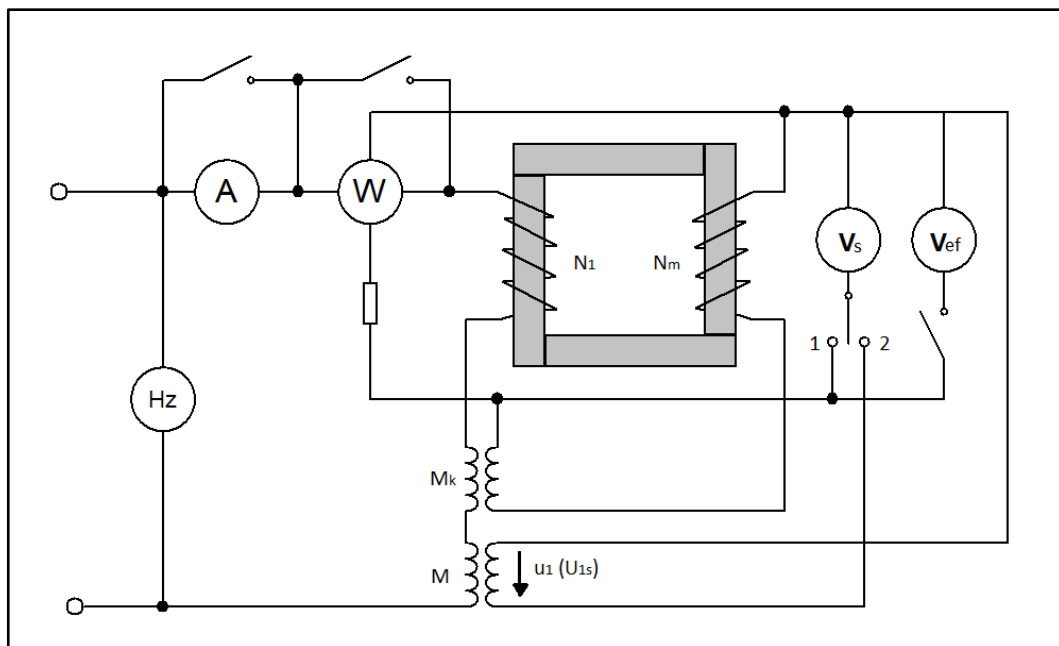


Obrázek 3.4 Fotografie Epsteinova přístroje

3.2.2 Malý Epsteinův přístroj

Malý Epsteinův přístroj používá taktéž vzorky složené z pásků a vložené do rámu se čtyřmi cívkami s magnetizačním a měřicím vinutím. Rozdíl oproti velkému Epsteinovu přístroji je ten, že vzorek je mnohem menší a jinak složen. Vzorky se rovněž skládají z jednotlivých pásků plechu jako u velkého Epsteinova přístroje. Nejprve se vloží pásky do dvou protilehlých cívek, potom přes ně pásky do druhých dvou protilehlých cívek a tímto způsobem se vrství až do celkové hmotnosti vzorku 0,5 až 1,5 kilogramu. Počet pásků musí být dělitelný čtyřmi, aby se rovnoměrně rozdělily na všechny strany čtverce. Aktivní délka vzorku byla dohodou stanovena na $l_{akt} = 0,82$ metru. Počty závitů magnetizačního a měřicího vinutí jsou $N_1 = 700$ a $N_m = 2100$ a obě vinutí jsou rovnoměrně rozložena na všechny čtyři cívky rámu.

Malý Epsteinův přístroj se zapojuje podle obrázku 3.5. K odstranění vlivu magnetického toku vzduchem, který by způsobil chyby v určení magnetické indukce, protože plocha závitů měřicího vinutí je značně větší než průřez vzorku, slouží kompenzační vzájemná indukčnost M_k . Druhá vzájemná indukčnost M slouží k měření magnetické intenzity pole vzorku.



Obrázek 3.5 Malý Epsteinův přístroj [7]

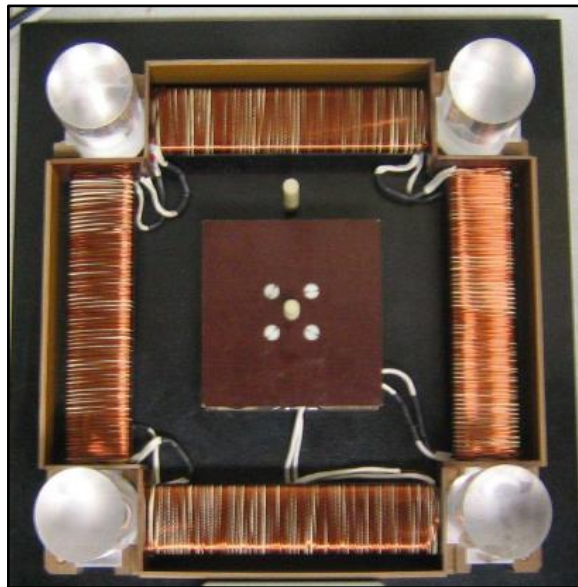
Ztráty se určují z údaje wattmetru podle vztahu (3.12) uvedeného v kapitole o měření ztrát pomocí wattmetru. Není-li odpor R' přístrojů zapojených na měřicí vinutí dostatečně velký oproti odporu měřicího vinutí R_m , musí se ztráty vypočítat podle vztahu (3.11). Ztrátové číslo se určí ze vztahu (3.18):

$$Z = \frac{P_z}{0,82m_z} \quad [\text{Wkg}^{-1}; \text{W}, \text{kg}] , \quad (3.18)$$

kde P_z jsou ztráty vzorku, m_z je skutečná hmotnost vzorku a konstanta 0,82 je aktivní

délka vzorku l_{akt} . Kvůli malým rozměrům vzorku nelze dosáhnout sinusového průběhu magnetické indukce a změřené ztráty vzorku P_z a ztrátové číslo Z se musí přepočítat na sinusový průběh.

Výhodami malého Epsteinova přístroje jsou menší spotřeba materiálu na vzorky a menší pracnost výroby vzorků. Nevýhodou je menší absolutní přesnost, což je způsobeno nepřesným určením aktivní délky vzorku a také tím, že se měří menší výkony. Další nevýhodou je nutnost přepočítávání ztrát a ztrátového čísla na sinusové průběhy. I přes tyto nevýhody malý Epsteinův přístroj postupně nahrazuje velký s desetakilogramovými vzorky. Fotografie malého Epsteinova přístroje je na obrázku 3.6.



Obrázek 3.6 Fotografie malého Epsteinova přístroje [8]

3.3 Jiné způsoby určení ztrát

V mnoha případech nelze měření pomocí elektrodynamického wattmetru použít. Zejména při měření na vyšších kmitočtech. Také pokud jsou rozměry vzorku příliš malé nebo pokud se měří při malých indukcích, takže výkony jsou malé a nestačí citlivost wattmetru. V takových případech se používá některá z alternativních metod. Například určení ztrát z velikosti plochy dynamické hysterezní smyčky, z fázového posunu mezi magnetizačním proudem a indukovaným napětím, měření ztrát můstkovými metodami nebo kalorimetrem.

3.3.1 Určení ztrát z velikosti plochy dynamické hysterezní smyčky

Ztráty feromagnetických materiálů jsou úměrné velikosti plochy jejich hysterezní smyčky podle rovnice (3.19):

$$P_z = V_z \cdot f \cdot S_{hd} \quad [W; m^3, Hz, Jm^{-3}], \quad (3.19)$$

kde V_z je objem magnetovaného materiálu, f je kmitočet a S_{hd} je plocha dynamické

hysterezní smyčky. Plocha S_{hd} nesmí být vyjádřena v jednotkách plochy, protože se musí brát ohled na osy B_z a H_z . Lze ji zjistit z grafu hysterezní smyčky.

Měření jednotlivých bodů a přesné zakreslení hysterezní smyčky je ovšem náročné. K usnadnění měření byla vypracována metoda, při které se přímo měří šířka smyčky ΔH_z v několika místech. Tím se získají grafy, které lze snáze zakreslit a mají stejnou plochu jako hysterezní smyčka. Měření se provádí pomocí řízeného usměrňovače. Obdobný způsob platí i pro výšku smyčky ΔB_z .

Metoda určování ztrát z velikosti plochy dynamické hysterezní smyčky se provádí při nízkých kmitočtech a při malých výkonech, kdy nestačí citlivost wattmetru. Metoda dosahuje dobré přesnosti, řádově jen několik procent. Pokud jsou nároky na přesnost malé, lze určovat ztráty i z plochy hysterezní smyčky zobrazené na stínítku oscilografu.

3.3.2 Měření ztrát můstkovými metodami

V případě, že se jedná o sinusové průběhy intenzity pole, lze stanovit ztráty ze ztrátového odporu změřeného některou můstkovou metodou. Pro sinusové průběhy totiž platí náhradní schéma cívky navinuté na vzorek složené z odporu vinutí R_{vin} , sériového náhradního ztrátového odporu R_{zs} a z náhradní indukčnosti L_s . Výkon dodávaný do vzorku první harmonickou složkou magnetizačního proudu se dá popsat rovnicí (3.20):

$$P_{z1} = R_{zs} \cdot I_{1ef1}^2 \quad [W; \Omega, A], \quad (3.20)$$

kde R_{zs} je sériový náhradní ztrátový odpor a I_{1ef1} je efektivní hodnota první harmonické složky magnetizačního proudu. Výkon P_{z1} se rovná ztrátám vzorku P_z , pokud je výkon vyšších harmonických roven nule.

Při můstkových měřeních je obvykle složité dosáhnout sinusového průběhu při větších amplitudách magnetické indukce. Nelineární vlastnosti vzorku způsobí, že část výkonu první harmonické prochází i dalšími větvemi můstku jako výkon vyšších harmonických složek. To má za následek zvětšení výkonu první harmonické složky a ztrátového odporu R_{zs} . Výkon P_{z1} je potom větší než skutečné ztráty P_z .

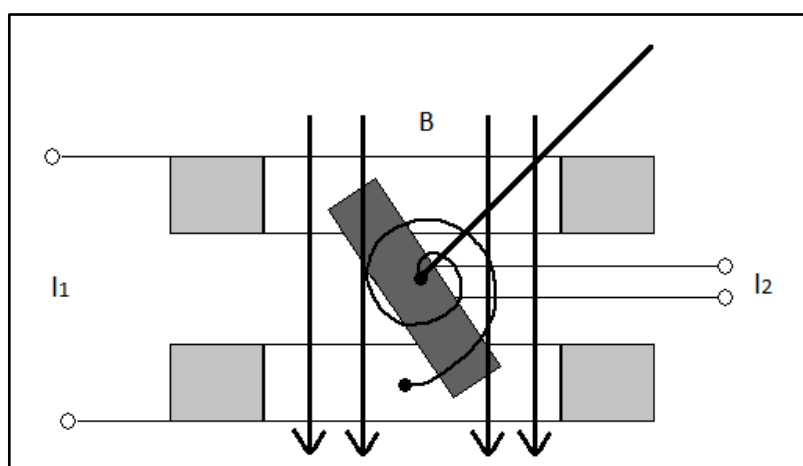
Použití můstkových metod k měření je tedy nejvhodnější při malých amplitudách magnetické indukce, kdy lze snadno dosáhnout sinusových průběhů. Můstek lze napájet z operačního zesilovače se zpětnou vazbou, která vynucuje sinusový průběh indukovaného napětí. Výhodou můstkových měření je možnost měřit velmi malé výkony ve velmi širokém kmitočtovém rozsahu.

4 WATTMETRY VHODNÉ K MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH ZTRÁT

Na wattmetry k přesnému měření magnetických ztrát jsou kladeny vysoké nároky. Je možné použít analogové elektrodynamické wattmetry nebo speciální elektronické obvody, které se s rozvojem analogové a digitální elektroniky stávají stále více rozšířenější.

4.1 Elektrodynamické wattmetry

Základem elektrodynamických wattmetrů je elektrodynamické měřicí ústrojí. Ústrojí využívá elektromagnetických sil působících mezi cívkami, kterými protéká proud. V magnetickém poli pevné cívky se pohybuje otočná cívka. Direktivní moment je vyvozován pružinami a tlumení je vzduchové. Pohybový moment je dán součinem proudů, které procházejí oběma cívkami a je závislý na směru proudů. Princip elektrodynamického ústrojí je na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1 Princip elektrodynamického měřicího ústrojí [4]

Elektrodynamické měřicí ústrojí se používá téměř výhradně ke konstrukci wattmetrů, které jsou schopny měřit výkon stejnosměrného i harmonicky proměnného proudu. Pevná cívka je proudová a je zapojena v sérii se spotřebičem, pohyblivá cívka je napěťová a je přes předřadný odpor zapojena ke spotřebiči paralelně.

Běžné elektrodynamické wattmetry dosahují plné výchylky při účinníku $\cos \varphi = 1$. Pro použití wattmetrů k měření měrných ztrát ve feromagnetických materiálech je vhodné použít wattmetry s maximální výchylkou při účinníku $\cos \varphi = 0,2$ případně 0,1. Tyto wattmetry jsou při malých účinnících přesnější.

Kmitočet, při kterém měření probíhá, má vliv na vlastní i vzájemnou indukčnost cívek a způsobuje vznik vířivých proudů. V důsledku toho je způsobena odchylka fáze. Elektrodynamické wattmetry se proto dají použít pouze do kmitočtu 1 kHz. Taktéž nejsou příliš vhodné pro měření velmi malých výkonů, jaké vznikají na málo rozměrných vzorcích nebo pokud měření probíhá při malých hodnotách magnetické indukce.

4.2 Elektronické wattmetry

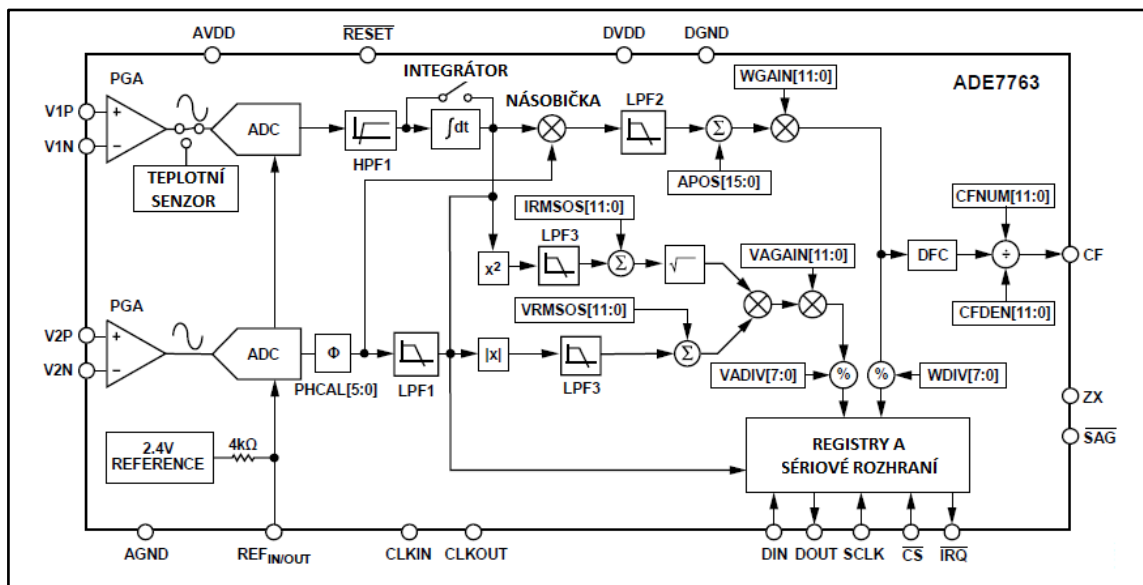
Další možností je použít elektronický obvod, který je schopný měřit výkon. Hlavní částí těchto obvodů je analogová násobička, která násobí dvě vstupní napětí. Okamžitý proud spotřebičem je přes převodník proudu na napětí přiveden spolu s okamžitým napětím na spotřebiči na vstupy analogové násobičky. Na výstupu násobičky je okamžitá hodnota napětí rovna okamžité hodnotě výkonu. Dále se signál přivádí přes filtr typu dolní propust na analogový měřicí přístroj nebo na A/Č převodník a zobrazovací jednotku.

Tyto obvody mohou dosahovat větší šířky pásma než elektrodynamické wattmetry. Obvykle také bývají schopné měřit větší rozsahy výkonů. Jejich nevýhodou je, že vyžadují externí napájení, neboť při napájení z měřeného obvodu by měření vykazovalo velkou odchylku danou vlastní spotřebou elektronického wattmetru. Jejich nejistota je dána nejistotami všech částí přístroje.

Některé obvody pro měření výkonu se vyrábějí sériově. Celý obvod je umístěn do jednoho čipu. Příkladem je třeba ADE7763 od společnosti Analog Devices. Tento obvod dosahuje velmi dobré přesnosti. Vyhovuje mezinárodním standardům IEC61036/60687, IEC62053-21 a IEC62053-22. Jeho celková chyba je $\pm 0,1\%$ z měřeného rozsahu. Obvod je schopný měřit do kmitočtu 14 kHz.

ADE7763 má dva diferenční vstupní kanály. Maximální napětí přivedené na oba vstupy je $\pm 0,5$ V. Za vstupy jsou umístěny operační zesilovače s programovatelným zesílením. Analogový signál se převádí na číslicový ještě před vstupem do násobičky. Signál je tedy násoben v číslicové podobě. V prvním kanálu je mezi A/D převodníkem a násobičkou zapojen integrátor pro převod proudu na napětí. Výstupní signál z násobičky je ukládán do registrů, odtud je možné data číst přes sériovou komunikaci.

Obvod vyžaduje stejnosměrné symetrické napájení ± 5 V pro analogovou i pro digitální část. Kmitočet hodinového signálu by měl být 3,5 MHz. Blokové schéma obvodu je na obrázku 4.2.



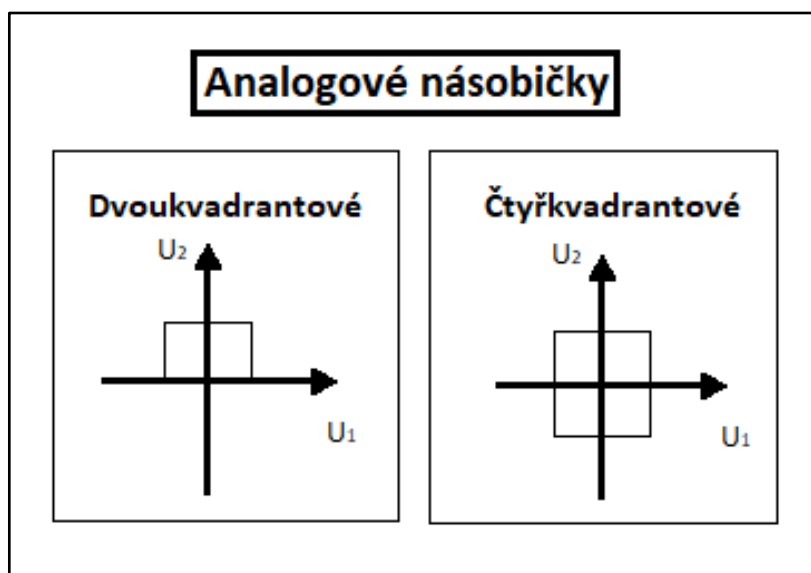
Obrázek 4.2 Blokové schéma obvodu ADE7763 [1]

5 ANALOGOVÉ NÁSOBIČKY

Jedná se o elektronické obvody, které obvodově realizují součin vstupních analogových signálů. Zejména se jedná o proud nebo napětí. Obecná rovnice pro násobičku dvou napětí má tvar (5.1):

$$u_{out}(t) = k \cdot u_1(t) \cdot u_2(t) \quad [V; -, V, V], \quad (5.1)$$

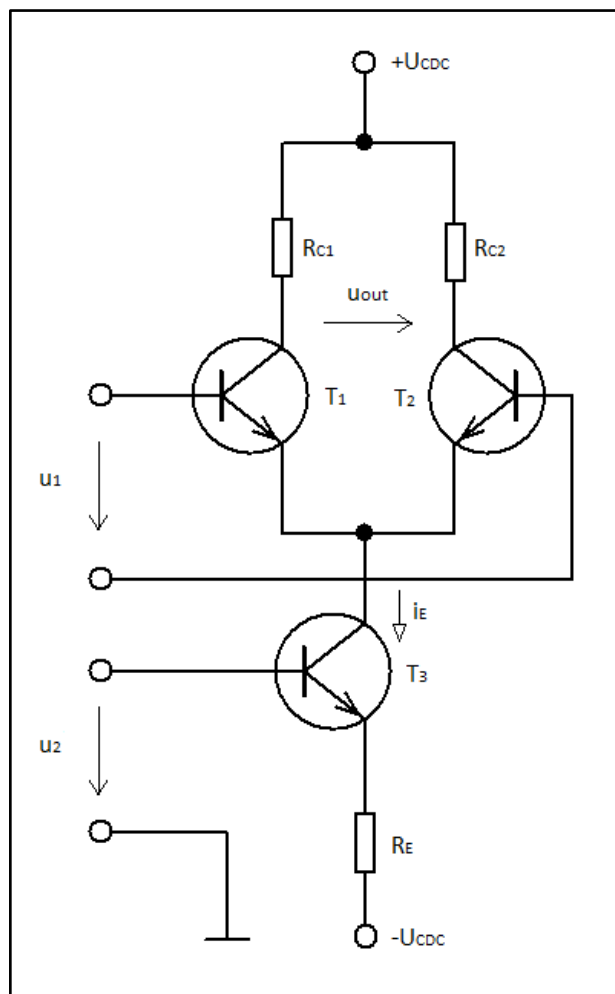
kde $u_{out}(t)$ představuje výstupní napětí z násobičky, $u_1(t)$ a $u_2(t)$ jsou vstupní napětí do násobičky a k je konstanta násobení. Násobičky můžeme dělit na jednokvadrantové, kdy mají obě napětí jen jednu polaritu, dvoukvadrantové kdy má jedno napětí obojí polaritu a čtyřkvadrantové kdy mají obě napětí obojí polaritu. Princip dělení analogových násobiček je zobrazen na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1 Princip dělení analogových násobiček [5]

Násobí-li se dva signály se stejnou fází, výsledkem je zcela kladný signál o dvojnásobném kmitočtu. Pokud jsou od sebe signály fázově posunuty, průměrná hodnota kladné části je hodnota efektivního výkonu a průměrná hodnota záporné části je hodnota jalového výkonu.

Typické zapojení dvoukvadrantové násobičky je na obrázku 5.2. Tranzistor T_3 funguje jako zdroj proudu řízený napětím u_2 . Toto napětí může mít pouze kladnou polaritu. Napětí u_1 se přivádí do bází tranzistorů T_1 a T_2 . Změny proudu I_E neovlivní u_{out} přímo, ale přes změnu strmosti převodní charakteristiky $u_{out} = f(u_1)$. Jiná modifikace využívá proudové zrcadlo doplněné rezistorem. Spojením dvou můstkových stupňů vznikne čtyřkvadrantová násobička, která je známá jako Gilbertův obvod. Existují i další modifikace násobiček, které se liší například ve zpracovávaném kmitočtu, přesnosti nebo doplňkovými obvody na linearizaci přenosové funkce.



Obrázek 5.2 Typické zapojení dvoukvadrantové násobičky [5]

Některé násobičky provádějí funkci násobení nepřímo. Vztah pro součin dvou proměnných se převede na jiný matematický výraz, který se analogovými prostředky snáze realizuje. Nejčastěji se využívá převodu na součet logaritmů. Na tomto způsobu jsou založeny logaritmické násobičky. Jejich nevýhodou ovšem je, že vstupní napětí mohou být pouze kladná, jedná se tedy o jednokvadrantové násobičky. Další typ násobiček využívá řízení strmosti tranzistoru. Jedná se o násobičky s proměnnou strmostí. Strmost tranzistoru je charakterizována jako závislost kolektorového proudu na změně napětí mezi bází a emitorem tranzistoru. Pro správnou funkčnost obvodu je potřeba, aby jedno ze vstupních napětí bylo pouze záporné, zatímco druhé napětí může být kladné i záporné. Tyto násobičky jsou tedy dvoukvadrantové.

Analogové násobičky lze použít například pro řízené zesilovače, modulátory, demodulátory, směšovače a fázové komparátory. Byla vyvinuta řada integrovaných obvodů, které se liší podle způsobu činnosti (logaritmické, s proměnnou strmostí, modulační, s Hallovým článkem, s amplitudově-šířkovou modulací...). Mezi největší výrobce těchto obvodů patří společnosti Analog Devices a Texas Instruments. V tabulce 1 je uveden téměř kompletní seznam dostupných analogových násobiček.

Tabulka 1 Přehled dostupných analogových násobiček a jejich parametrů [9]

Typ	Výrobce	Šířka pásma (-3 dB)	Přesnost [% z měřeného rozsahu]	$ V_{in,max} $ [V]	Základní přenosová funkce
ADL5391	AD	2 GHz	1	2,5	$W = \frac{a \cdot X \cdot Y}{U} + Z$
AD835		250 MHz	2	1	$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{U} + Z$
AD633		1 MHz	2	10	$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z$
AD734		10 MHz	0,4 (0,25)	10	$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{U} + Z$
AD834		500 MHz	0,5	1	$W = \frac{XY}{(1 V)^2} \cdot 4 \text{ mA}$
AD538		400 kHz	1	10	$W = X \left(\frac{Z}{X}\right)^m$
AD539		25 MHz	2,5	4,2	$W = -\frac{XY}{U}$
AD632		1 MHz	0,5	12	$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{U} + Z$
AD534		1 MHz	1 (0,5; 0,25)	10	$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z$
AD532		1 MHz	1	10	$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z$
MPY634		TI	10 MHz	2	10
MPY100	550 kHz		2(1; 0,5)	10	$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10 V}$

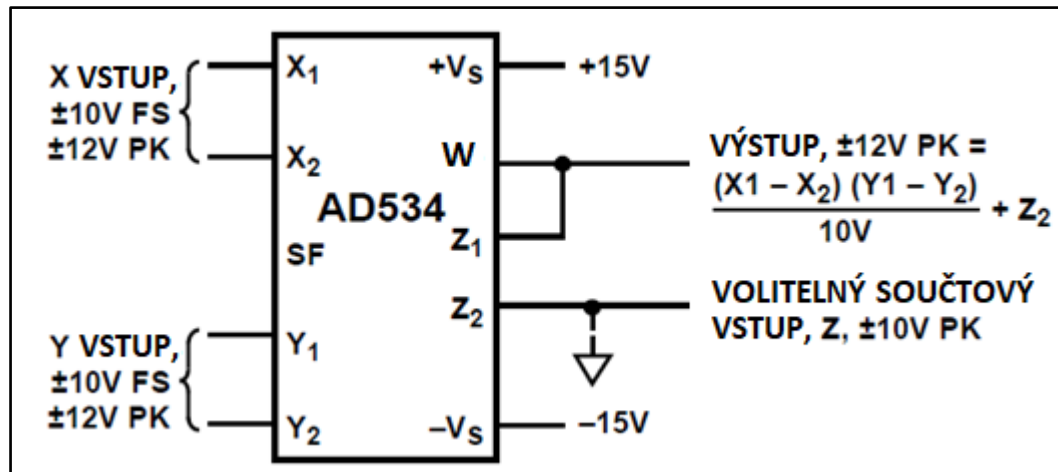
5.1 Analogová násobička AD534

Jedna z vhodných analogových násobiček pro navrhovaný elektronický wattmetr je násobička AD534 od společnosti Analog Devices. Jedná se o čtyřkvadrantovou násobičku. Kromě funkce násobení umí také dělení, druhou mocninu a druhou odmocninu. Pro násobení realizuje funkci (5.2):

$$W = \frac{(X_1 - X_2) \cdot (Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z \quad [V; V, V, V], \quad (5.2)$$

kde W je výstupní napětí, X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 a Z jsou napětí příslušných vstupů proti zemní síťce a konstanta 10 V je napětí vnitřního zdroje stabilizovaného Zenerovou diodou.

Zapojení násobičky je uvedeno na obrázku 5.3. Vstupy X a Y jsou diferenční s vysokou vstupní impedancí $10\text{ M}\Omega$. Vstup Z je součtový, který umožňuje připojit výstupy dalších násobiček a realizovat tak složitější funkce. Impedance výstupu W je dána výstupní impedancí operačního zesilovače. Násobička nevyžaduje žádné další externí součástky.



Obrázek 5.3 Zapojení násobičky AD534 ve funkci násobení [2]

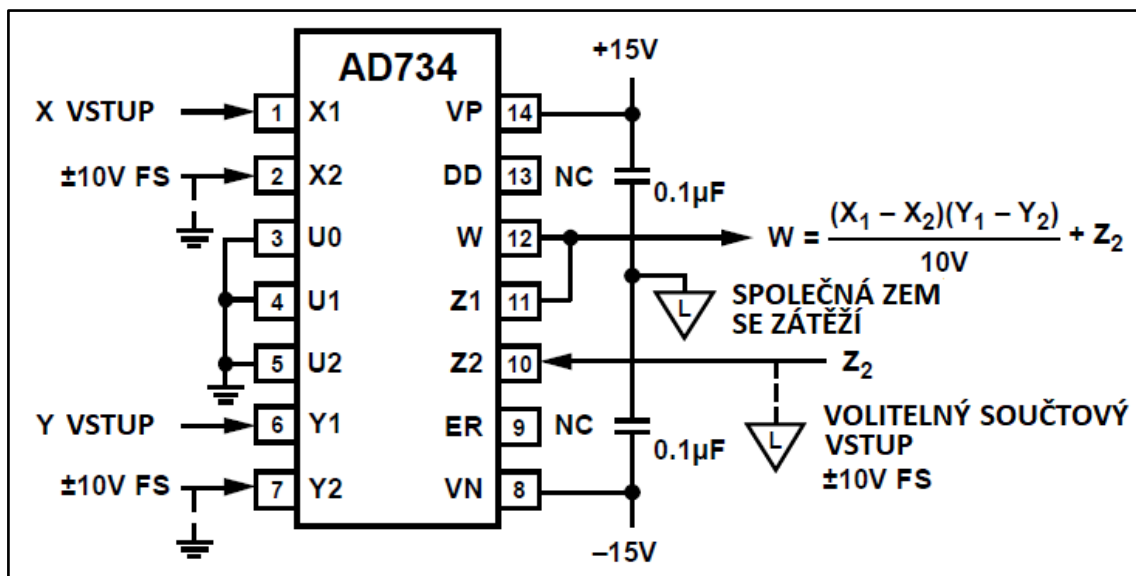
Symetrické napájení může být v rozsahu $\pm 8\text{ V}$ až $\pm 18\text{ V}$. Výrobce udává parametry při napájecím napětí $\pm 15\text{ V}$ a teplotě $25\text{ }^\circ\text{C}$. Násobička se vyrábí ve třech různých modelech. V rozsahu napětí na vstupech X a Y od -10 V do $+10\text{ V}$ je pro model J celková chyba $\pm 1\%$, pro model K je $\pm 0,5\%$ a pro model L je $\pm 0,25\%$. Maximální offsetové napětí je 15 mV . Rychlost přeběhu je $20\text{ V}/\mu\text{s}$ a šířka pásma pro signály do 100 mV RMS je 1 MHz , pro větší signály je šířka pásma pouze 50 kHz .

5.2 Analogová násobička AD734

Druhou vhodnou násobičkou je násobička AD734 také od společnosti Analog Devices. Tato násobička má hodně společného s násobičkou AD534. Je také čtyřkvadrantová a také realizuje násobení, dělení, druhou mocninu a druhou odmocninu. Přenosová funkce pro násobení je stejná jako u modelu AD534.

Liší se hlavně větší šířkou pásma a mnohonásobně větší rychlostí přeběhu. Lze ji zapojit také jako dvoukvadrantovou děličku s šířkou pásma až 200 MHz .

Zapojení násobičky ve funkci násobení je uvedeno na obrázku 5.4. Vstupy X a Y jsou také diferenční jako u AD534 a jejich vstupní impedance je $50\text{ k}\Omega$. I tato násobička disponuje součtovým vstupem Z . Výrobce dává důraz na správné připojení k zemi. Pokud nejsou vstupy X a Y použity jako diferenční, měly by být volné piny na těchto vstupech připojeny k zemi. V případě, že není používán také vstup Z_2 , měl by být připojen na společnou zem se zátěží. Rozmístění pinů je stejné jako u AD534. Ovšem u modelu AD734 nejsou piny U_0 , U_1 a U_2 vnitřně spojeny jako tomu je u AD534, proto je vhodné je spojit externě. Obvykle se připojují k zemi, ale je možné je připojit i k záporné větvi symetrického napájecího napětí.



Obrázek 5.4 Zapojení násobičky AD734 ve funkci násobení [3]

Symetrické napájení může být v rozsahu ± 8 V až $\pm 16,5$ V. Výrobce udávané parametry jsou platné při napájecím napětí ± 15 V a teplotě 25 °C. Celková chyba v rozsahu napětí na vstupech X a Y od -10 V do $+10$ V je $\pm 0,1$ %. Offsetové napětí bývá obvykle menší než 5 mV. Rychlost přeběhu je 450 V/ μ s a šířka pásma je 10 MHz v celém rozsahu vstupního napětí.

6 PODROBNÝ POPIS BLOKŮ

6.1 Napěťový kanál

Napěťový kanál bude mít osm vstupních rozsahů. Nastavovat půjdou čtyři hodnoty celkového zesílení kaskády operačních zesilovačů. Pro čtyři nižší vstupní rozsahy bude obvodové zapojení bez odporového děliče a pro vyšší rozsahy se bude přepínat mezi děličem 1:10 a 1:100. Použití dvou děličů je výhodnější z hlediska šumu. Vstupní rozsahy, dělicí poměry a hodnoty celkového zesílení jsou zaznamenány v tabulce 2. Hodnoty rezistorů byly vybírány podle doporučení výrobce a vzhledem k jejich hodnotám se skutečné zesílení bude mírně lišit od hodnot v tabulce. Rozdíly se projeví v řádu desetin.

Tabulka 2 Vstupní rozsahy napěťového kanálu a jejich zesílení

Vstupní rozsah	Dělič napětí	Celkové zesílení zesilovačů
10 mV	žádný	900
30 mV	žádný	300
100 mV	žádný	90
300 mV	žádný	30
1 V	1:10	90
3 V	1:10	30
10 V	1:100	90
30 V	1:100	30

Pro dosažení požadované přesnosti wattmetru $\pm 2\%$ v kmitočtovém rozsahu od 10 Hz do 50 kHz, musel být zvolen zesilovač s velkou šířkou pásma. Změna fáze v tomto frekvenčním rozsahu nesmí překročit mez 20 minut, tedy 0,33 stupně (podle literatury [10]). Dalším požadavkem bylo, aby byl zesilovač stabilní i při zesílení jedna. Zvolen byl zesilovač OPA842 od firmy Texas Instruments.

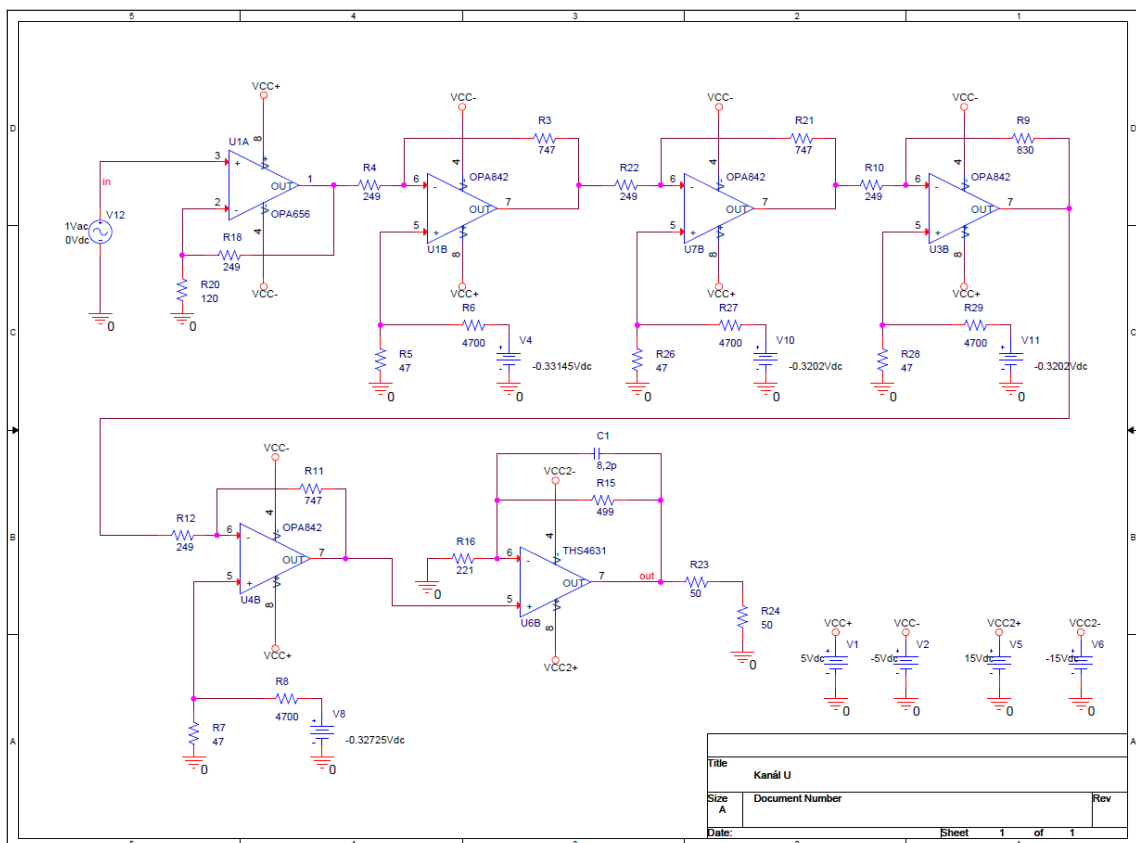
Tyto zesilovače se do kaskády zapojí celkem čtyři. Všechny v invertujícím zapojení. První OPA842 bude mít nastavenou pevnou hodnotu zesílení tři. U ostatních pak půjde zesílení přepínat mezi hodnotami jedna a tři. Třetí OPA842 v pořadí nebude nastaven přesně na hodnotu zesílení tři, ale na hodnotu 3,33 periodických. To umožní změnu celkového zesílení z devadesáti na tři sta. U těchto zesilovačů také bude nutné kompenzovat hodnotu offsetového napětí.

Operační zesilovač OPA842 má malý vstupní odpor, tudíž se nedá použít na vstupu zesilovací kaskády za odporový dělič. Na vstupu bude proto zapojen operační zesilovač OPA656, který má velký vstupní odpor. Zapojení bude neinvertující s pevným zesílením 3,07.

Na výstup se také musí zapojit jiný operační zesilovač, protože bude nutné napětí zesílit na hodnotu, při které vykazuje násobička nejmenší chybu. Pro všechny vstupní rozsahy by na výstupu měla být maximální amplituda napětí 9 V. OPA842 nedokáže napětí zesílit na požadovanou hodnotu. Proto se na výstup zapojí operační

zesilovač THS4631, který má napájecí napětí ± 15 V. Bude zapojen jako neinvertující a jeho zesílení bude neustále nastaveno na 3,26. Tato hodnota spolu s hodnotou zesílení OPA656 umožní měnit celkové zesílení z třiceti na devadesát a z tří set na devět set. Do zpětné vazby THS4631 je nutné zapojit kondenzátor, aby nedocházelo k rezonančnímu převýšení a případnému kmitání na tomto stupni.

Na obrázku 6.1 je znázorněno zapojení napěťového kanálu v programu OrCAD PSpice Designer. Obvod je zapojen pro vstupní rozsah 10 mV, zapojení je tedy bez odporového děliče a celková hodnota zesílení je 900. Kompletní schéma napěťového kanálu je zobrazeno v příloze A.1. Výsledky simulací napěťového kanálu i jednotlivých operačních zesilovačů jsou uvedeny v kapitole 7.



Obrázek 6.1 Zapojení napěťového kanálu v programu OrCAD PSpice Designer

6.2 Proudový kanál

Návrh proudového kanálu z velké části vychází z návrhu napěťového kanálu. Kaskáda operačních zesilovačů zůstává stejná. Změna nastane v hodnotách celkového zesílení kaskády. Bude se přepínat pouze mezi zesílením 900 a 300. Rozsahy vstupního napětí tedy budou 10 mV a 30 mV. Rozsahy vstupního proudu se budou měnit pomocí převodníku proudu na napětí, který bude umístěn na samostatné desce plošného spoje. Obvodové zapojení proudového kanálu je zobrazeno v příloze A.4.

6.3 Převodník proudu na napětí

Na výstupu převodníku proudu na napětí se budou střídát úrovně napětí do 10 mV a do 30 mV, které následně budou zesilovány kaskádou operačních zesilovačů v proudovém kanálu. Převod proudu na napětí se zajistí rezistorem zapojeným ve zpětné vazbě operačního zesilovače. Použitý operační zesilovač bude OPA656, protože má velký vstupní odpor. Rozsahy vstupního proudu, hodnota rezistoru ve zpětné vazbě a zesílení kaskády operačních zesilovačů v proudovém kanálu jsou uvedeny v tabulce 3.

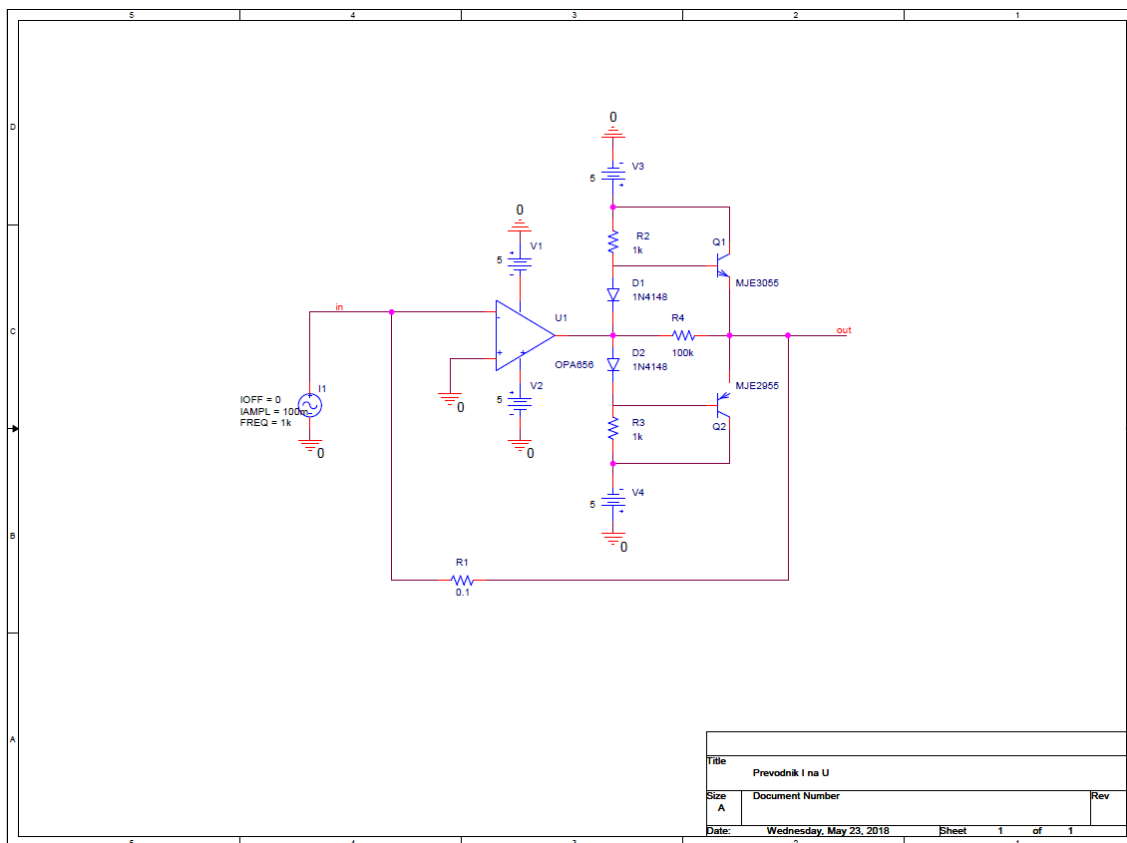
Tabulka 3 Vstupní rozsahy převodníku proudu na napětí a jejich zesílení

Vstupní rozsah	Rezistor	Napětí na výstupu	Celkové zesílení zesilovačů
1 μ A	10K	10 mV	900
3 μ A	10K	30 mV	300
10 μ A	1K	10 mV	900
30 μ A	1K	30 mV	300
100 μ A	100R	10 mV	900
300 μ A	100R	30 mV	300
1 mA	10R	10 mV	900
3 mA	10R	30 mV	300
10 mA	1R	10 mV	900
30 mA	1R	30 mV	300
100 mA	0,1R	10 mV	900
300 mA	0,1R	30 mV	300

Celkový počet všech rozsahů vstupního proudu tedy bude dvanáct, ale ve zpětné vazbě operačního zesilovače OPA656 stačí přepínat mezi šesti hodnotami rezistoru. Zesílení kaskády operačních zesilovačů v proudovém kanálu bude přepínáno zvlášť.

V zapojení budou dále použity dva výkonové tranzistory a dvě diody. NPN tranzistor MJE3055 a PNP tranzistor MJE2955. Oba tranzistory a obě diody bude potřeba chladit. Na tranzistory se připevní pasivní chladiče a odvod tepla z diod se vyřeší vodičem vedeným od diod k chladičům na tranzistorech.

Na obrázku 6.2 je zobrazeno zapojení převodníku proudu na napětí v programu OrCAD PSpice Designer. Hodnota rezistoru ve zpětné vazbě je 10 ohmů, obvod je tedy zapojen pro vstupní rozsahy 1 mA a 3 mA. Výsledky simulace převodníku proudu na napětí jsou uvedeny v kapitole 7 a kompletní schéma převodníku proudu na napětí je zobrazeno v příloze A.7.



Obrázek 6.2 Zapojení převodníku I na U v programu OrCAD PSpice Designer

6.4 Násobící a usměrňující bloky

V násobícím bloku se použijí obě násobičky popsané v kapitole 5. Relé pro jejich přepínání se umístí na oba vstupy i na výstup obou násobiček. Pokud by relé byla pouze na vstupech nebo pouze na výstupech, mohlo by docházet k situacím, kdy neaktivní násobička ovlivní aktivní násobičku. Kompletní obvodové zapojení násobícího bloku je zobrazeno v příloze A.10.

K usměrnění se použije jednocestný usměrňovač s operačním zesilovačem NE5534N s nastaveným zesílením 1. Zapojení usměrňovače s operačním zesilovačem je výhodné pro usměrnění nízkých napětí. Zpětná vazba operačního zesilovače kompenzuje úbytek napětí na diodách. Za usměrňovač se navíc zapojí kaskáda čtyř filtrů typu dolní propust druhého řádu s mezním kmitočtem 5 Hz. Na výstup bude možnost připojit voltmetr a ze změřené hodnoty napětí se podle vztahu (3.13) určí hodnota amplitudy magnetické indukce vzorku. Deska plošného spoje se z důvodu finanční úspory při velké celkové finanční náročnosti celého projektu použije již navržená a osazená z některého z předchozích projektů. Obvodové zapojení celého usměrňujícího bloku je zobrazeno v příloze A.13.

6.5 Dolní propusti

Za blokem s analogovými násobičkami bude zařazen blok s bankou filtrů typu dolní propust. Zapojení těchto dolních propustí je provedeno jako kaskádní zapojení dvou filtrů typu Sallen-Key druhého řádu s operačním zesilovačem OP227. Časové konstanty filtru jsou zvoleny 1 s, 0,3 s a 30 ms. Tyto časové konstanty odpovídají době ustálení napětí na výstupu filtru na úroveň 100 % vstupního napětí po přivedení jednotkového skoku na jeho vstup. Potřebné informace pro návrh dolních propustí byly získány z literatury [9]. Na výstupu filtru bude možné měřit ustálenou konstantní úroveň napětí laboratorním voltmetrem a z ní se poté určí měrné ztráty vzorku. Kompletní zapojení dolních propustí je uvedeno v příloze A.16.

6.6 Stabilizátory s chladiči

Z důvodu příliš velkého proudového odběru zakoupených rozpínacích CRR relé se stabilizátory LM7805 a LM7905 z napěťového a proudového kanálu a z násobícího bloku umístí na samostatnou jednostrannou desku plošného spoje a přidají se k nim pasivní chladiče. Chlazení vyžadují hlavně stabilizátory LM7805, které kromě operačních zesilovačů napájí také relé. Každé relé má proudový odběr přibližně 43 mA a v současné době bude aktivních 8 relé. Celkový proudový odběr všech relé tedy bude zhruba 344 mA. Proudový odběr všech operačních zesilovačů bude podle hodnot udávaných výrobcem 222 mA z kladného i záporného pólu napájecího napětí.

Chlazení stabilizátorů bude také potřeba u převodníku proudu na napětí. Na desce plošného spoje tohoto bloku se nachází výkonové PNP a NPN tranzistory a jejich proudový odběr bude v rozsahu od 300 mA do 450 mA podle rozsahu vstupního proudu. Stabilizátory se umístí na samostatnou jednostrannou desku plošného spoje, která bude stejná jako deska na stabilizátory z napěťového a proudového kanálu a z násobícího bloku.

7 POČÍTAČOVÁ SIMULACE

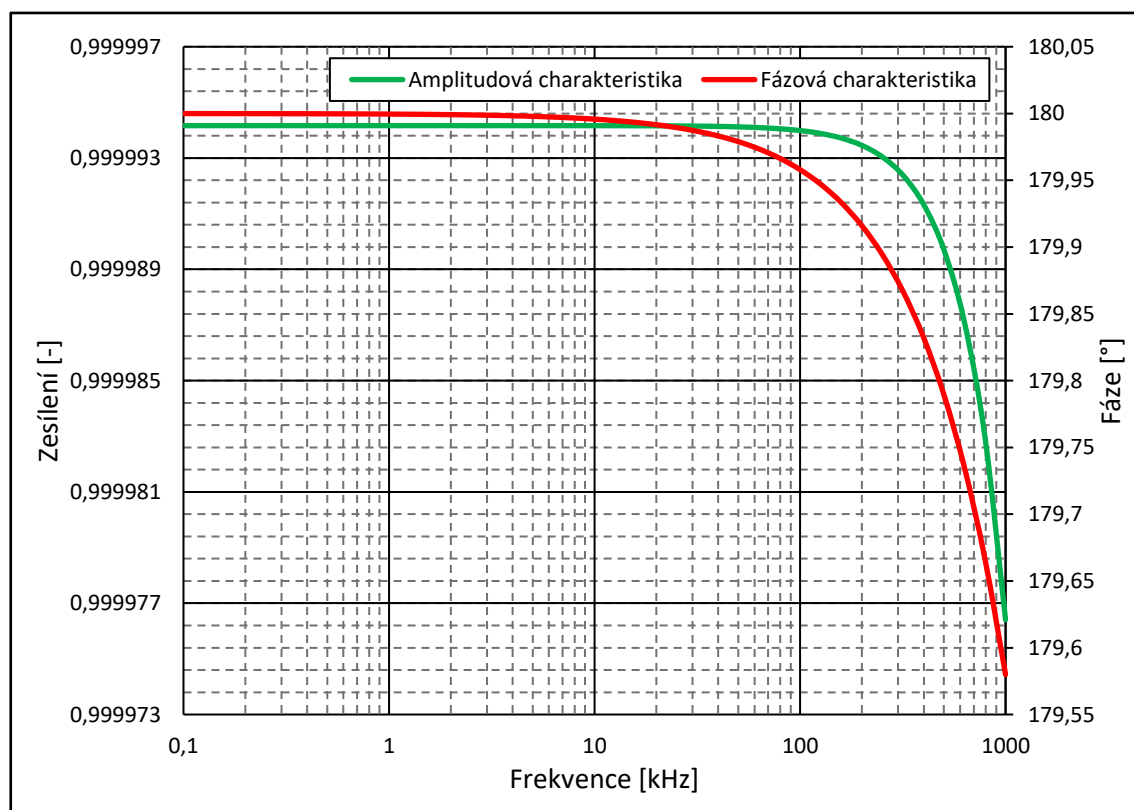
Všechny počítačové simulace byly provedeny v programu OrCAD PSpice Designer od společnosti Cadence.

7.1 Střídavá analýza operačního zesilovače OPA842

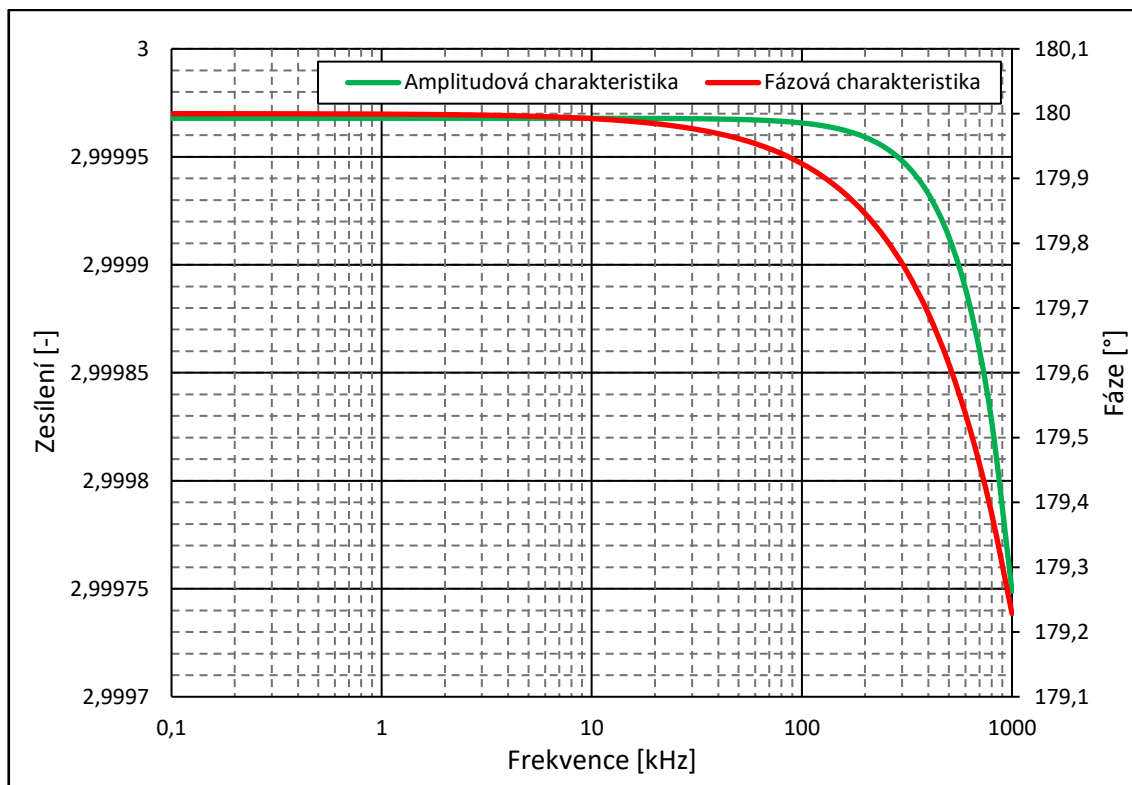
Vzhledem k návrhu obou kanálů byla simulace tohoto operačního zesilovače provedena pro zesílení jedna a pro zesílení tři. Zesilovač byl zapojen v invertujícím zapojení. Amplitudová charakteristika je zobrazena zelenou křivkou a fázová charakteristika je zobrazena červenou křivkou. Na obrázku 7.1 jsou zobrazeny charakteristiky při zesílení jedna a na obrázku 7.2 jsou zobrazeny charakteristiky při zesílení tři.

Z výsledku simulace lze odhadnout pokles fáze o 0,33 stupně na 750 kHz při zesílení jedna a na 400 kHz při zesílení tři. Zesilovač je stabilní pro obě zesílení.

Pro tento zesilovač výrobce udává šířku pásma 400 MHz při zesílení jedna a 200 MHz při zesílení větším než jedna, offsetové napětí 1,2 mV a rychlost přeběhu 400 V/ μ s. Tyto parametry platí při provozní teplotě 25 °C. Stejnoseměrné napájecí napětí je ± 5 V. Zesilovač používá napěťovou zpětnou vazbu.



Obrázek 7.1 Frekvenční charakteristiky OPA842 pro zesílení 1



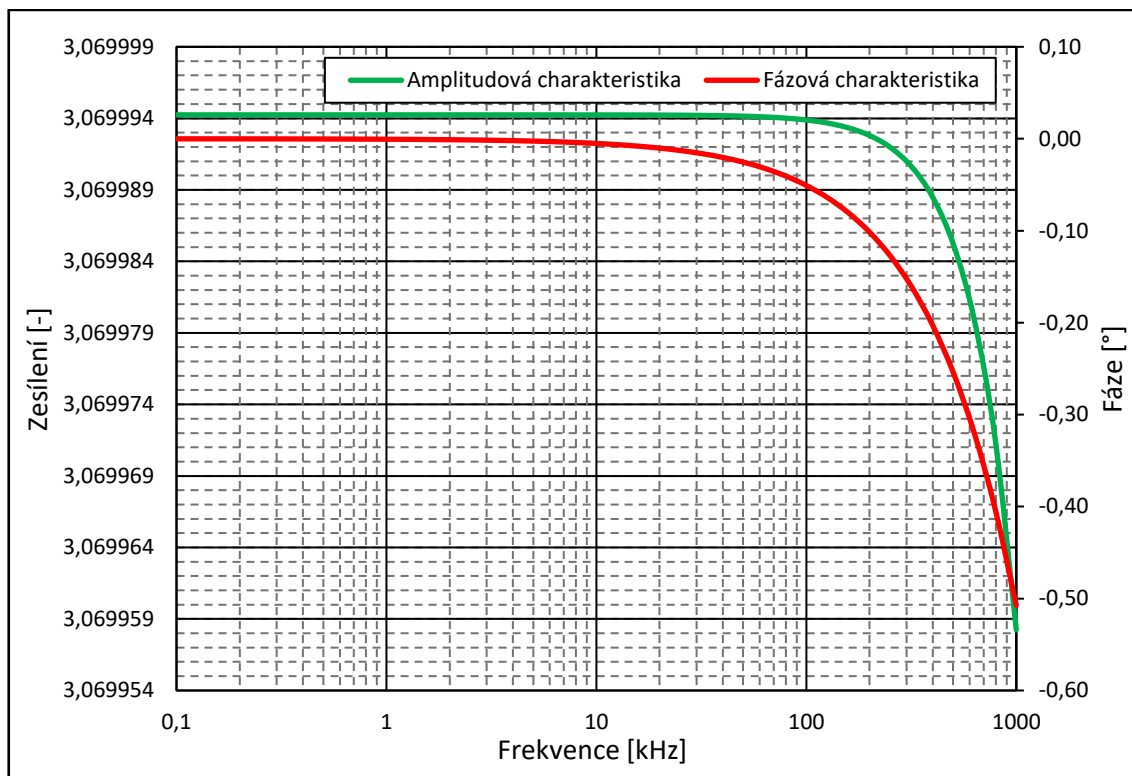
Obrázek 7.2 Frekvenční charakteristiky OPA842 pro zesílení 3

7.2 Střídavá analýza operačního zesilovače OPA656

Tento operační zesilovač bude díky velkému vstupnímu odporu umístěn na vstupu zesilovací kaskády napěťového i proudového kanálu. Aby se simulace shodovala s návrhem obou kanálů, byl zesilovač simulován v neinvertujícím zapojení a hodnota zesílení byla nastavena na 3,07. Jeho charakteristiky jsou zobrazeny na obrázku 7.3.

Podle simulované fázové charakteristiky fáze poklesne o 0,33 stupně na 650 kHz. I tento zesilovač je stabilní a vyhovuje tedy návrhu wattmetru.

Výrobce udává šířku pásma tohoto zesilovače 500 MHz při zesílení jedna. Tuto skutečnost ovšem doplňuje o informaci, že při zesílení menším než tři v invertujícím i neinvertujícím zapojení dochází k rezonančnímu převýšení. Dále udává velikost offsetového napětí 0,25 mV a rychlost přeběhu 290 V/ μ s. Všechny parametry jsou platné při provozní teplotě 25 °C a stejnosměrném napájecím napětí ± 5 V. I tento zesilovač používá napěťovou zpětnou vazbu.



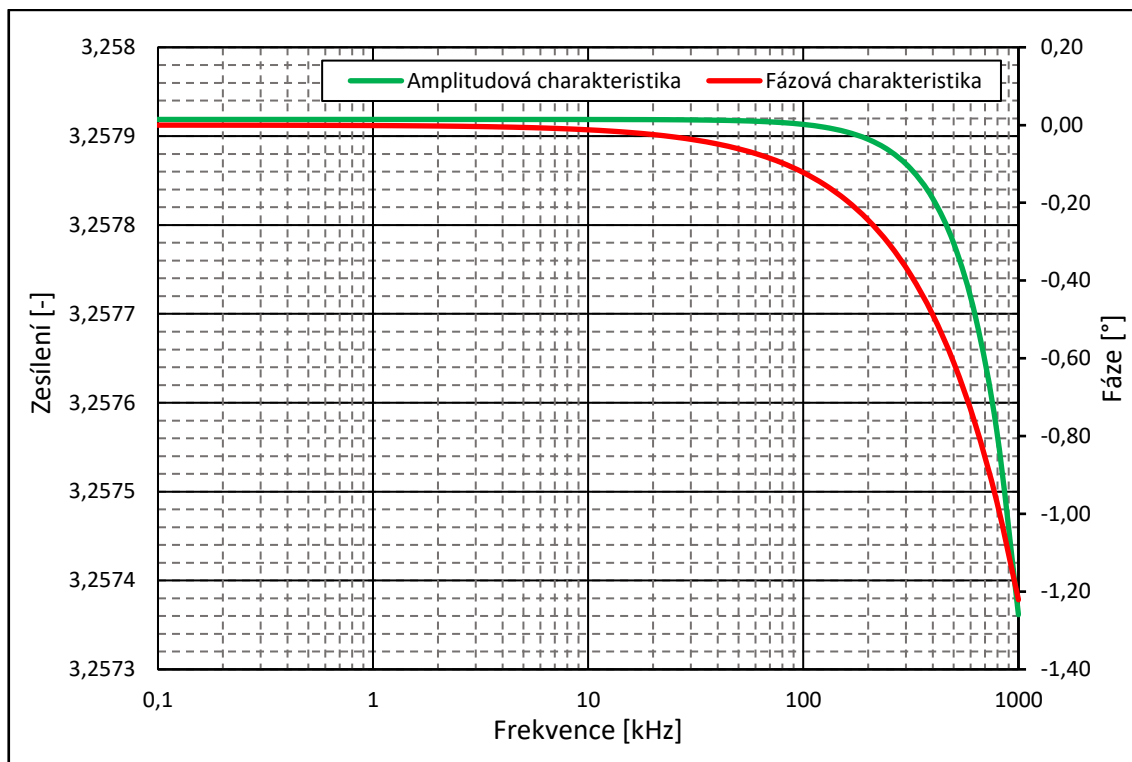
Obrázek 7.3 Frekvenční charakteristiky OPA656 pro zesílení 3,07

7.3 Strídavá analýza operačního zesilovače THS4631

THS461 nemá tak velkou šířku pásma jako předchozí dva zesilovače, má však větší rozsah napájecího napětí a je schopen zesílit napětí na výstupu z kaskády operačních zesilovačů na požadovanou hodnotu. Simulace THS461 byla provedena tak, aby odpovídala návrhu zapojení tohoto operačního zesilovače v zesilovacích kaskádách. Zapojení je neinvertující a zesílení je nastaveno na 3,26. Charakteristiky jsou zobrazeny na obrázku 7.4.

Ze simulace je patrná menší šířka pásma než u předchozích dvou zesilovačů. Pokles fáze o 0,33 stupně je na 270 kHz. Nicméně pro návrh wattmetru je to přijatelné a operační zesilovač THS4631 je možné považovat za vhodný.

Šířka pásma udávaná výrobcem je 325 MHz při zesílení jedna a 210 MHz při zesílení větším než jedna. Dále výrobce udává hodnotu offsetového napětí 0,5 mV a rychlost přeběhu 900 V/μs. Platnost parametrů je zaručena při teplotě 25 °C a při napájecím napětí ±15 V. Také THS4631 používá napěťovou zpětnou vazbu stejně jako předchozí dva operační zesilovače.



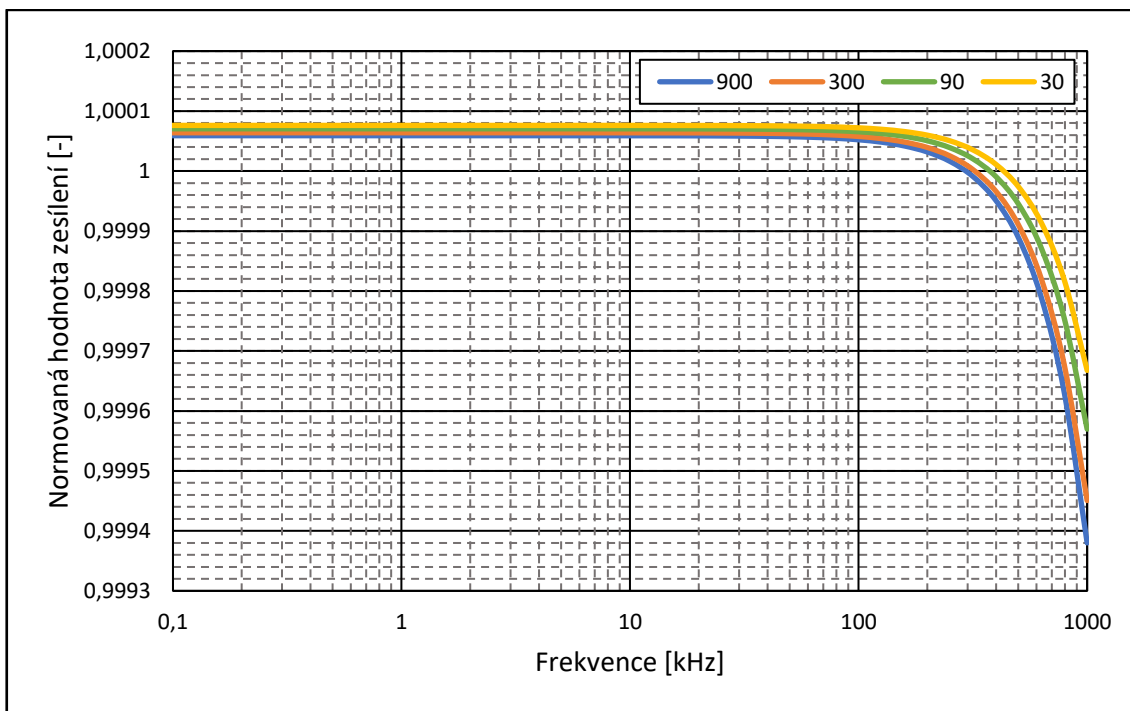
Obrázek 7.4 Frekvenční charakteristiky THS4631 pro zesílení 3,26

7.4 Střídavá analýza napěťového kanálu

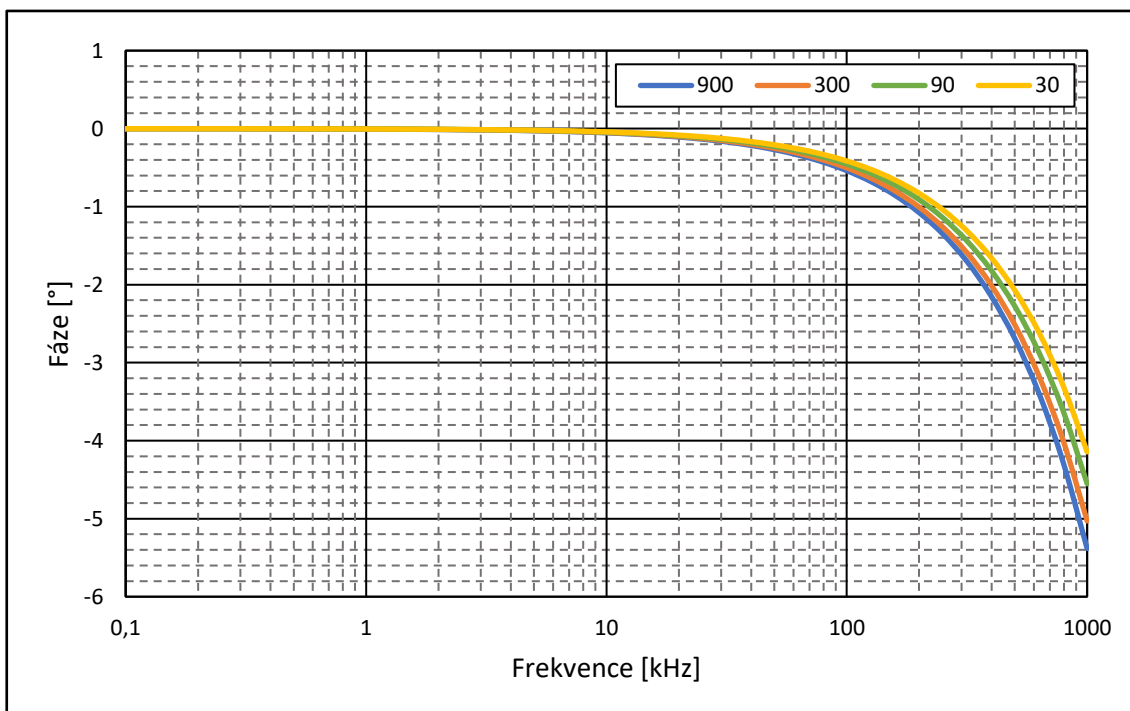
Napěťový kanál byl simulován v zapojení znázorněném na obrázku 6.1. V jednotlivých grafech jsou zobrazeny charakteristiky a časové průběhy pro všechny hodnoty zesílení kaskády operačních zesilovačů. Simulace byla provedena pouze pro vstupní rozsahy, u kterých není potřeba zapojovat vstupní dělič, protože při zapojení děliče by se hodnoty zesílení opakovaly.

Na obrázku 7.5 jsou zobrazeny amplitudové charakteristiky napěťového kanálu pro všechny úrovně zesílení kaskády operačních zesilovačů. Simulované charakteristiky jsou poděleny předpokládanou hodnotou zesílení, aby se všechny vešly do jednoho grafu a zůstaly dobře čitelné.

Fázové charakteristiky jsou vykresleny na obrázku 7.6. Z jejich průběhů je zřejmé, že celé zapojení napěťového kanálu nebude invertovat fázi. Lze z nich také určit pokles fáze v kmitočtovém rozsahu od 10 Hz do 50 kHz. Úrovně poklesu fáze pro všechna zesílení jsou zaznamenány v tabulce 4. Hodnoty v tabulce vypovídají o tom, že napěťový kanál by měl splnit pro všechny úrovně zesílení požadovanou mez poklesu fáze maximálně o 0,33 stupně v kmitočtové oblasti 10 Hz až 50 kHz.



Obrázek 7.5 Amplitudová charakteristika napěťového kanálu pro všechna zesílení

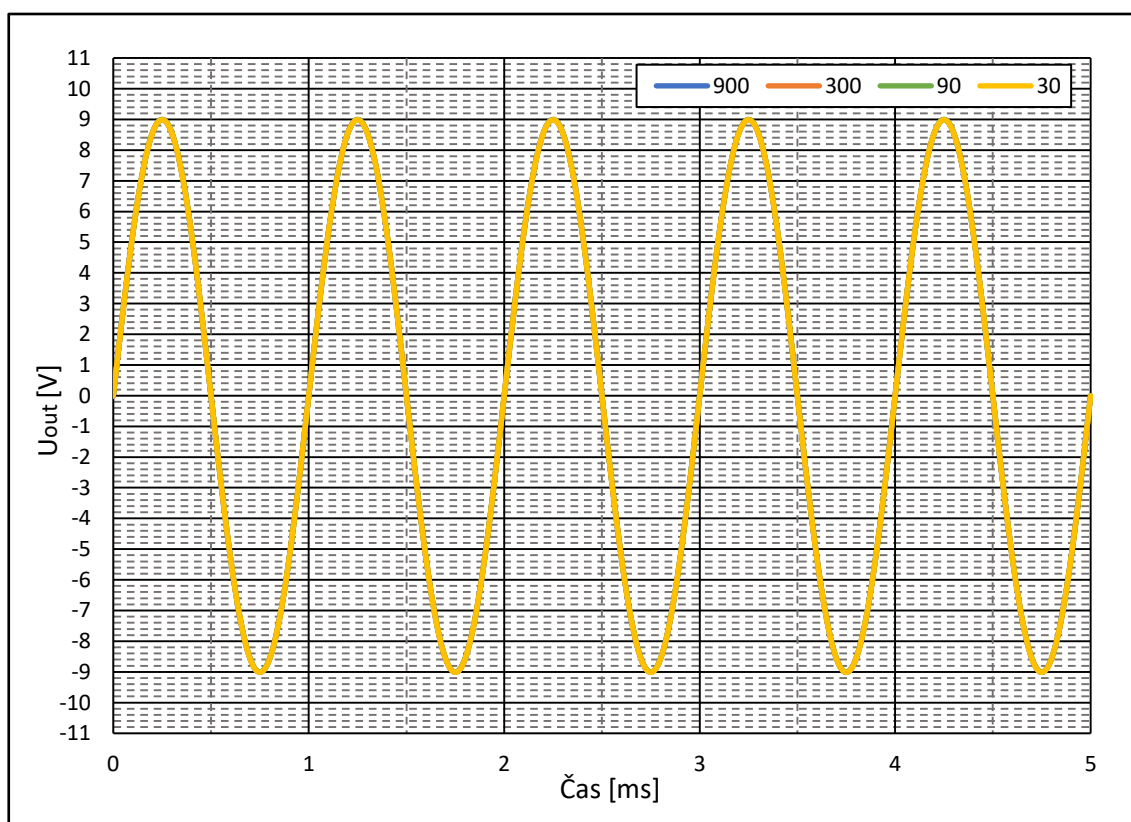


Obrázek 7.6 Fázová charakteristika napěťového kanálu pro všechna zesílení

Tabulka 4 Nasimulované hodnoty poklesu fáze pro všechna zesílení

Frekvence	Změna fáze pro zesílení 900	Změna fáze pro zesílení 300	Změna fáze pro zesílení 90	Změna fáze pro zesílení 30
10 kHz	-0,05°	-0,05°	-0,04°	-0,04°
30 kHz	-0,16°	-0,15°	-0,14°	-0,12°
50 kHz	-0,27°	-0,25°	-0,23°	-0,21°

Výstupní časové průběhy napětí napěťového kanálu jsou zobrazeny na obrázku 7.7. Jednotlivé průběhy se vzájemně překrývají, to vypovídá o tom, že napěťový kanál je navržen správně. Pro všechny vstupní rozsahy by měla být maximální úroveň amplitudy napětí na výstupu stejná. Kmitočet časových průběhů na obrázku je 1 kHz.

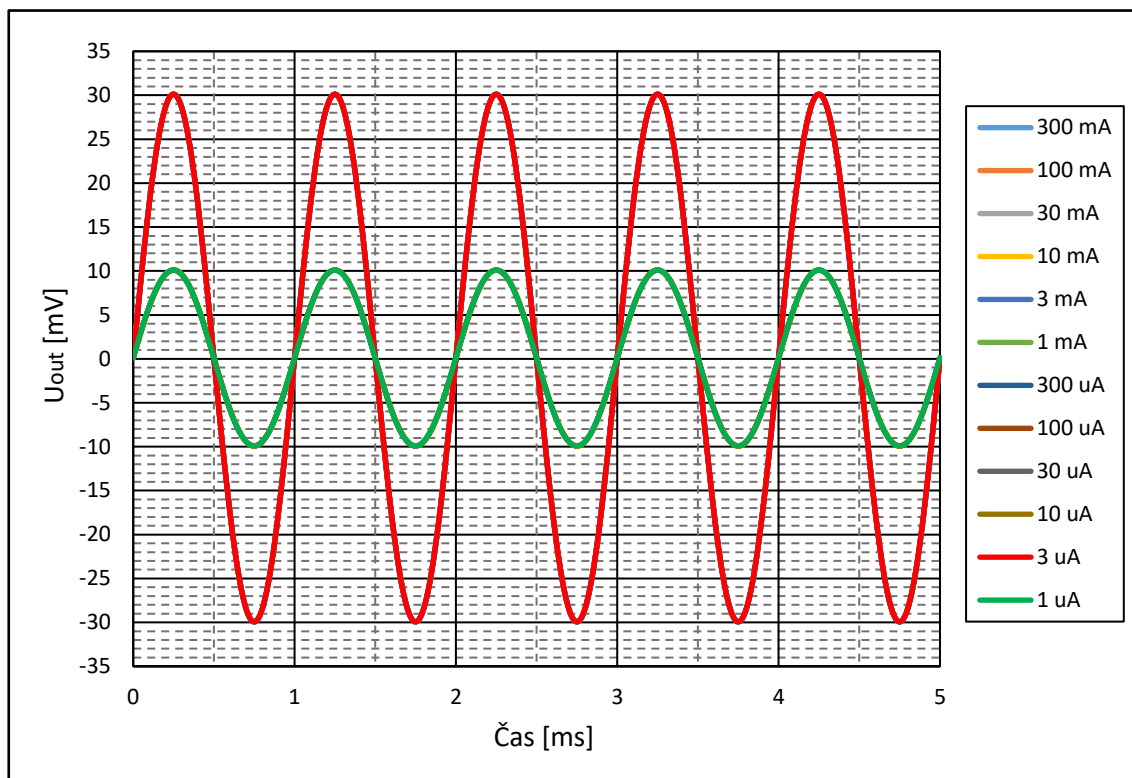


Obrázek 7.7 Výstupní průběhy napětí napěťového kanálu pro všechna zesílení

7.5 Výstupní průběhy napětí převodníku proudu na napětí

U převodníku proudu na napětí je důležité, aby maximální úroveň amplitudy napětí na výstupu byla pro všechny vstupní proudové rozsahy stejná. Proto byla pro zapojení převodníku proudu na napětí provedena simulace, ve které se postupně zjišťovaly výstupní průběhy napětí pro všechny rozsahy vstupního proudu. Simulace byla provedena podle zapojení na obrázku 6.2. Výstupní průběhy jsou zaznamenány na obrázku 7.8. Z obrázku je patrné, že průběhy jsou vzájemně překryté, takže převodník proudu na

napětí by měl být navržen správně. Na výstupu převodníku proudu na napětí se střídají průběhy napětí s amplitudou 10 mV a 30 mV. Kmitočet časových průběhů je 1 kHz.



Obrázek 7.8 Výstupní průběhy napětí převodníku proudu na napětí

Při střídavé analýze převodníku proudu na napětí se zjišťoval pokles fáze, který roste nepřímou úměrou s hodnotou rezistoru ve zpětné vazbě operačního zesilovače. Nasimulované hodnoty poklesu fáze na výstupu z převodníku proudu na napětí jsou zaznamenány v tabulce 5.

Tabulka 5 Nasimulované hodnoty poklesu fáze na výstupu z převodníku I na U

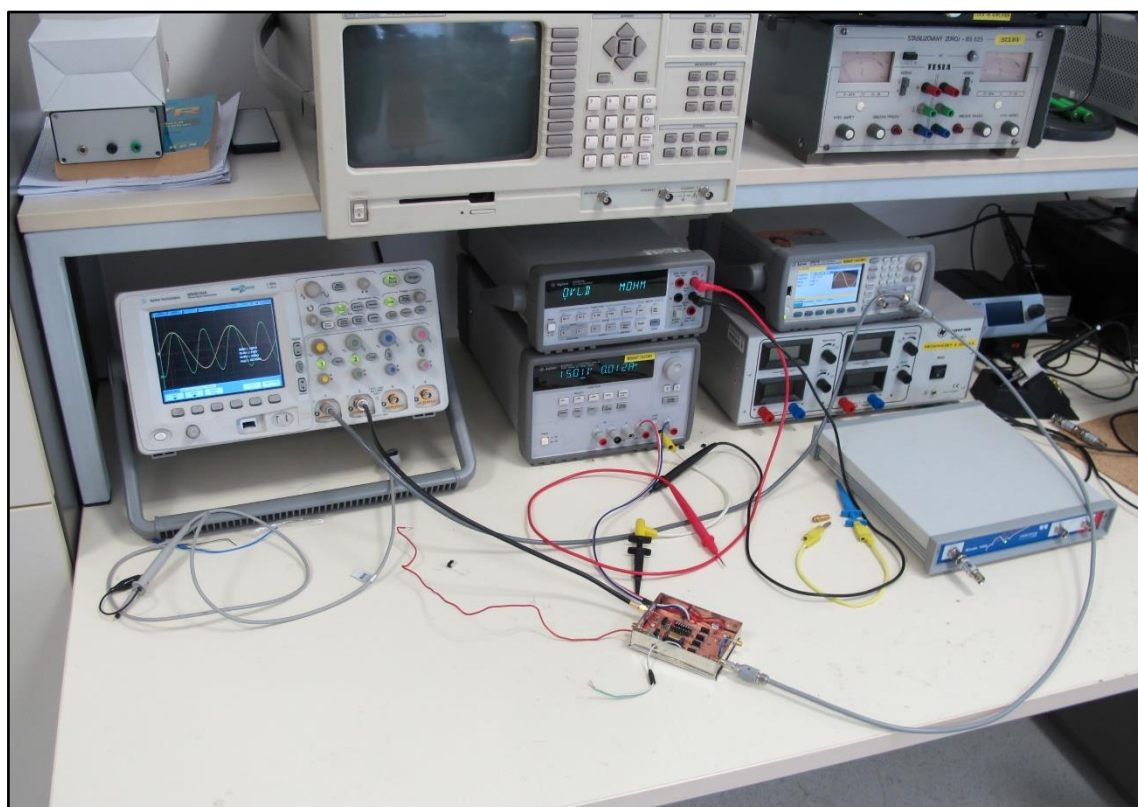
Hodnota rezistoru	Změna fáze na 10 kHz	Změna fáze na 30 kHz	Změna fáze na 50 kHz
10K	-3,45°	-10,31°	-16,81°
1K	-3,45°	-10,32°	-16,82°
100R	-3,49°	-10,44°	-17,14°
10R	-3,89°	-11,63°	-18,99°
1R	-6,96°	-20,75°	-33,80°
0,1R	-15,05°	-41,78°	-61,88°

8 NAMĚŘENÉ PRŮBĚHY

Měření probíhalo ve studentských dílnách v budově fakulty. Veškeré použité vybavení bylo školní.

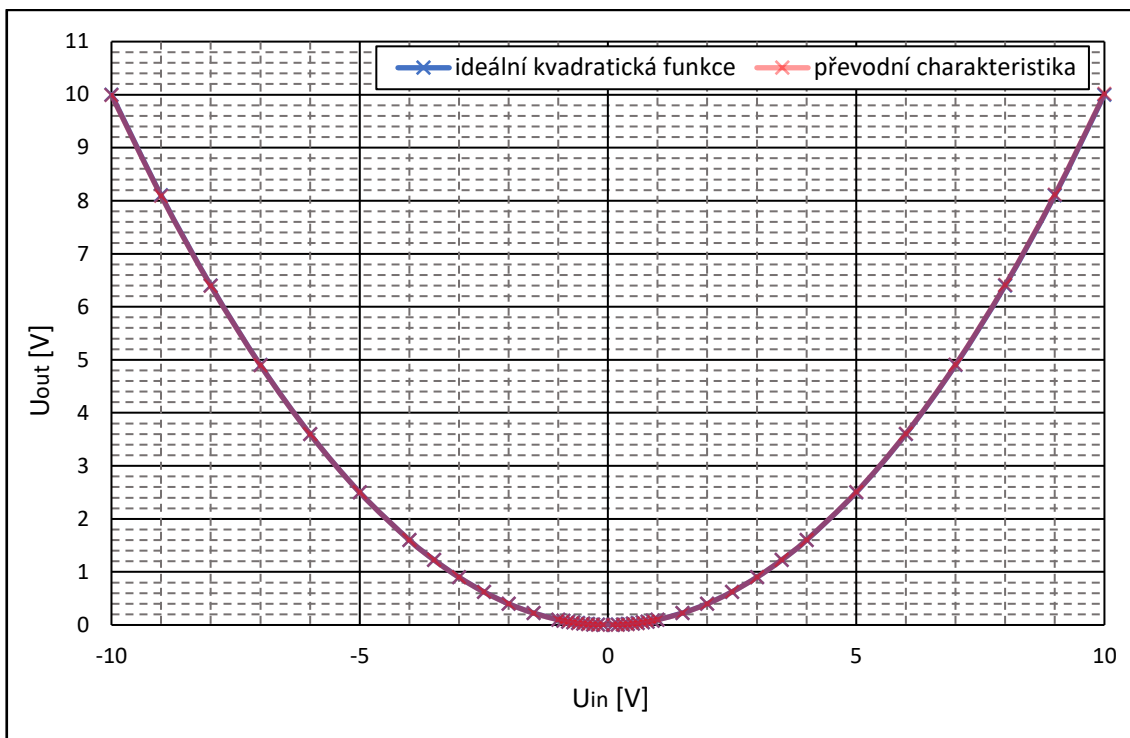
8.1 Převodní a frekvenční charakteristiky násobičky AD534K

K měření byl vybrán model K a bylo zvoleno zapojení, které realizuje kvadratickou funkci. Vstupy X_1 a Y_1 jsou spojeny, volitelný vstup Z_1 je spojen s výstupem W a vstupy X_2 , Y_2 a Z_2 jsou připojeny na zem. Násobička byla měřena při symetrickém napájení ± 15 V. Zapojení měřicího pracoviště je na obrázku 8.1.

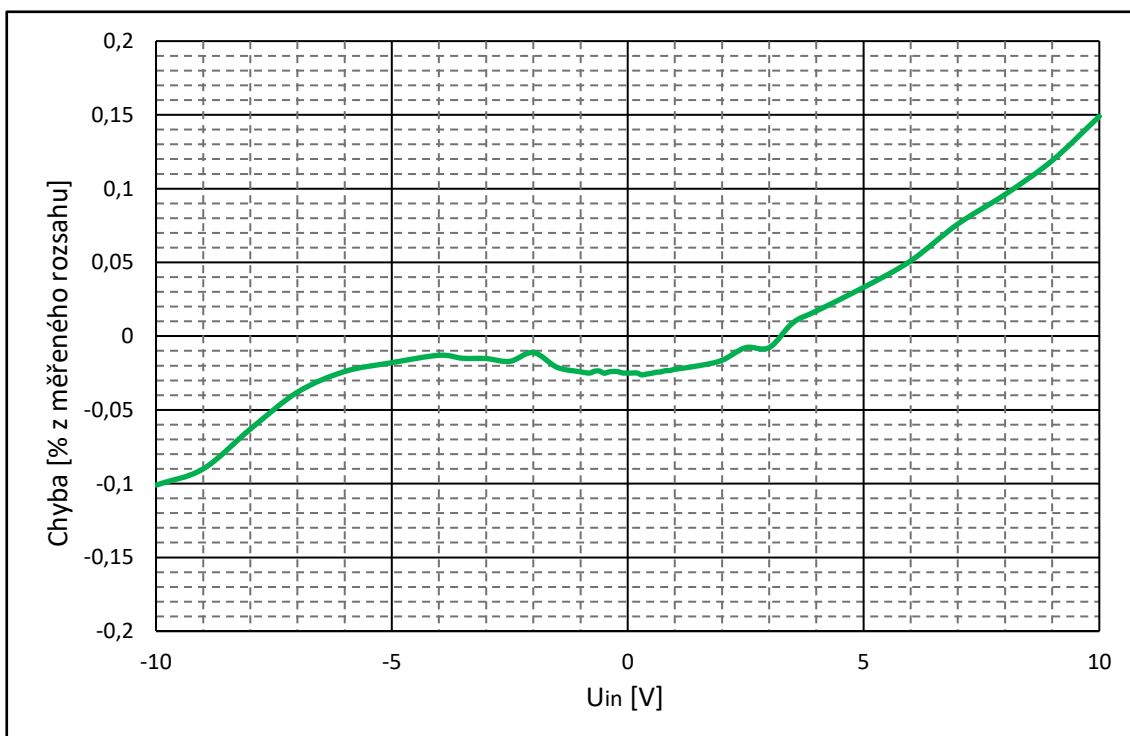


Obrázek 8.1 Zapojení měřicího pracoviště pro měření AD534K

Při měření převodní charakteristiky bylo na vstup přiváděno stejnosměrné napětí v rozsahu 0,1 V až 10 V pro obě polarity. Při velikosti vstupního napětí do 0,3 V se projevovalo offsetové napětí násobičky. Změřený průběh byl porovnán s ideální kvadratickou funkcí a byla zjištěna celková chyba z měřeného rozsahu. Pokud je násobička v zapojení pro realizaci kvadratické funkce, výrobce udává pro model K chybu $\pm 0,3$ %. Při měření jsme dosáhli maximální chyby 0,15 %, násobička tedy splňuje parametry udávané výrobcem. Převodní charakteristika je na obrázku 8.2 a celková chyba v měřeném rozsahu je zobrazena na obrázku 8.3.

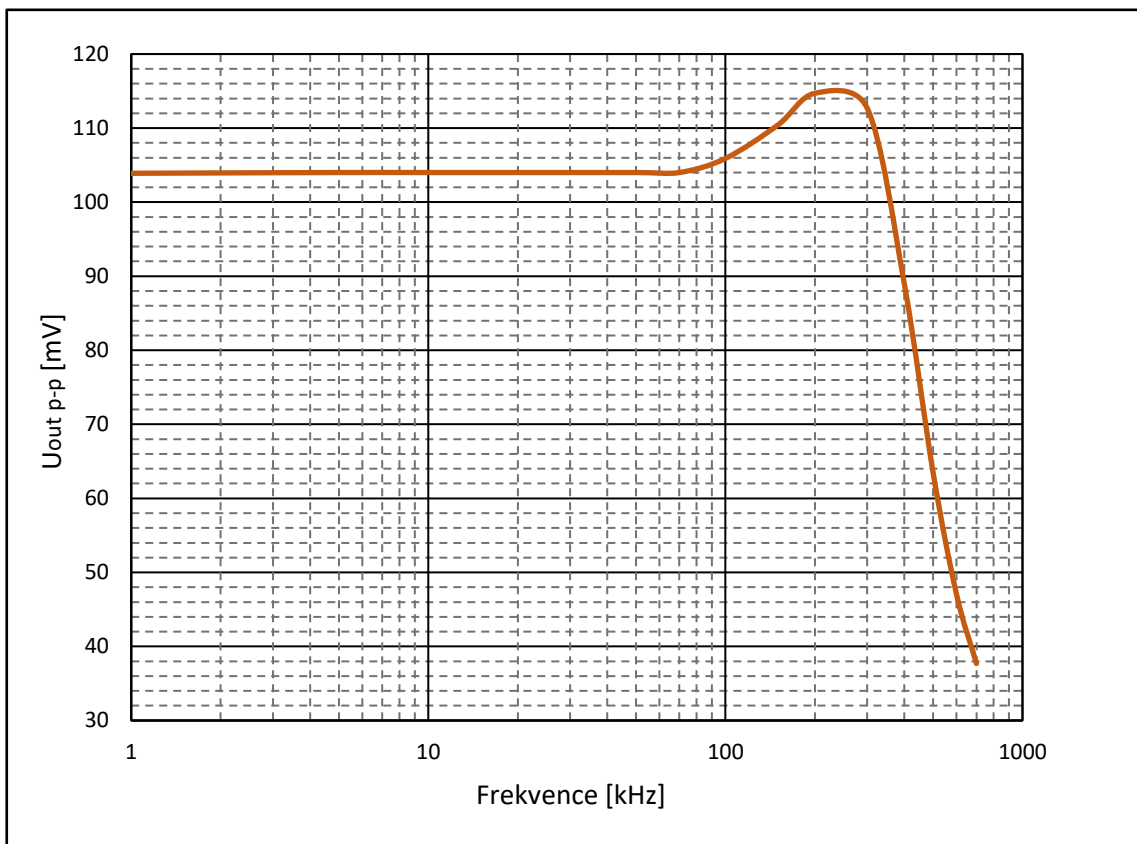


Obrázek 8.2 Převodní charakteristika AD534K

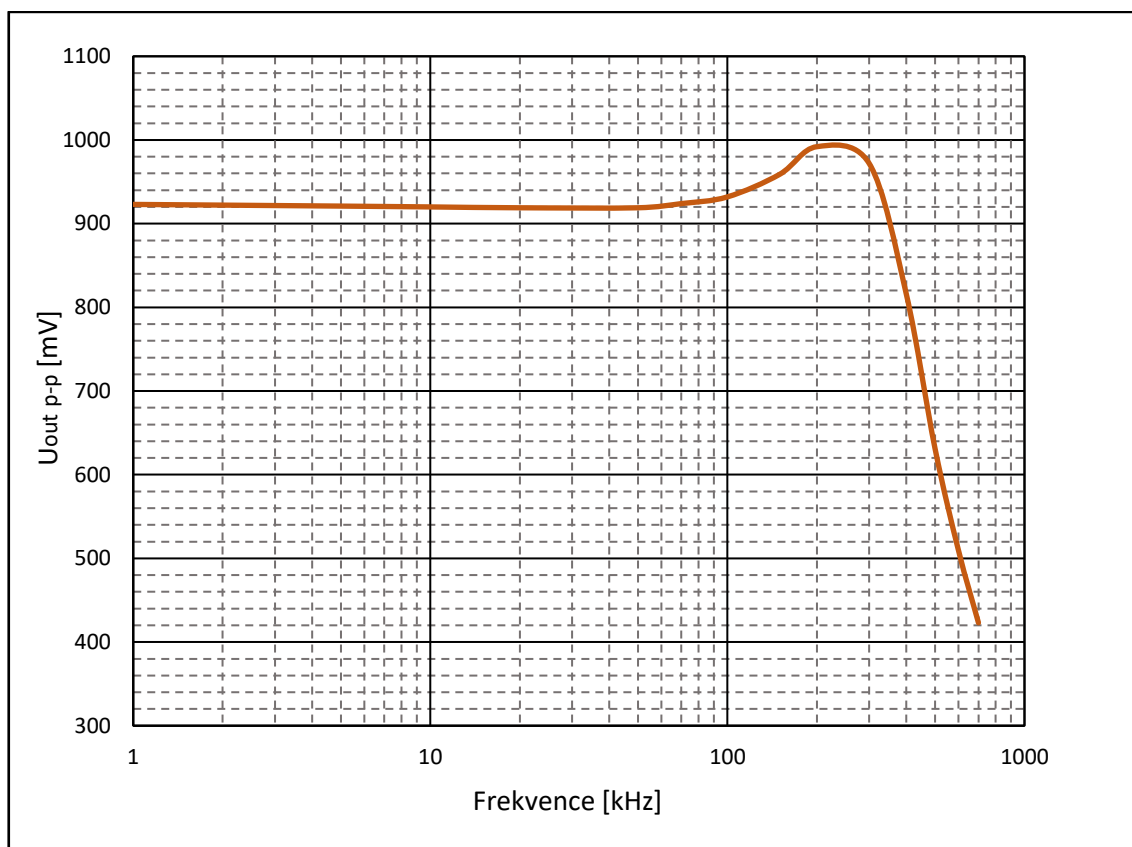


Obrázek 8.3 Naměřená chyba AD534K

Frekvenční charakteristiky byly měřeny pro dvě různé úrovně vstupního harmonického signálu. Tyto úrovně byly 1 V RMS a 3 V RMS. Kmitočet byl postupně zvyšován od 1 kHz do 700 kHz. Výrobce zaručovaný konstantní průběh do 1 MHz je platný, pokud je velikost výstupního napětí maximálně 0,1 V RMS. Pro větší signály výrobce udává šířku pásma 50 kHz. Pro obě měřené úrovně vstupního napětí bylo výstupní napětí větší než 0,1 V RMS, předpokládaná šířka pásma tedy byla 50 kHz. Naměřené charakteristiky se dají považovat za konstantní zhruba do kmitočtu 60 kHz. Při dalším zvyšování kmitočtu úroveň výstupního signálu postupně rostla. Maximální úroveň dosáhl výstupní signál při kmitočtu zhruba 150 kHz a následně strmě klesal. Při kmitočtu 700 kHz začal být výstupní signál rozkmitaný a harmonický průběh značně zkruslený. Frekvenční charakteristiky jsou zobrazeny na obrázcích 8.4 a 8.5.



Obrázek 8.4 Frekvenční charakteristika AD534K při vstupním napětí 1 V RMS

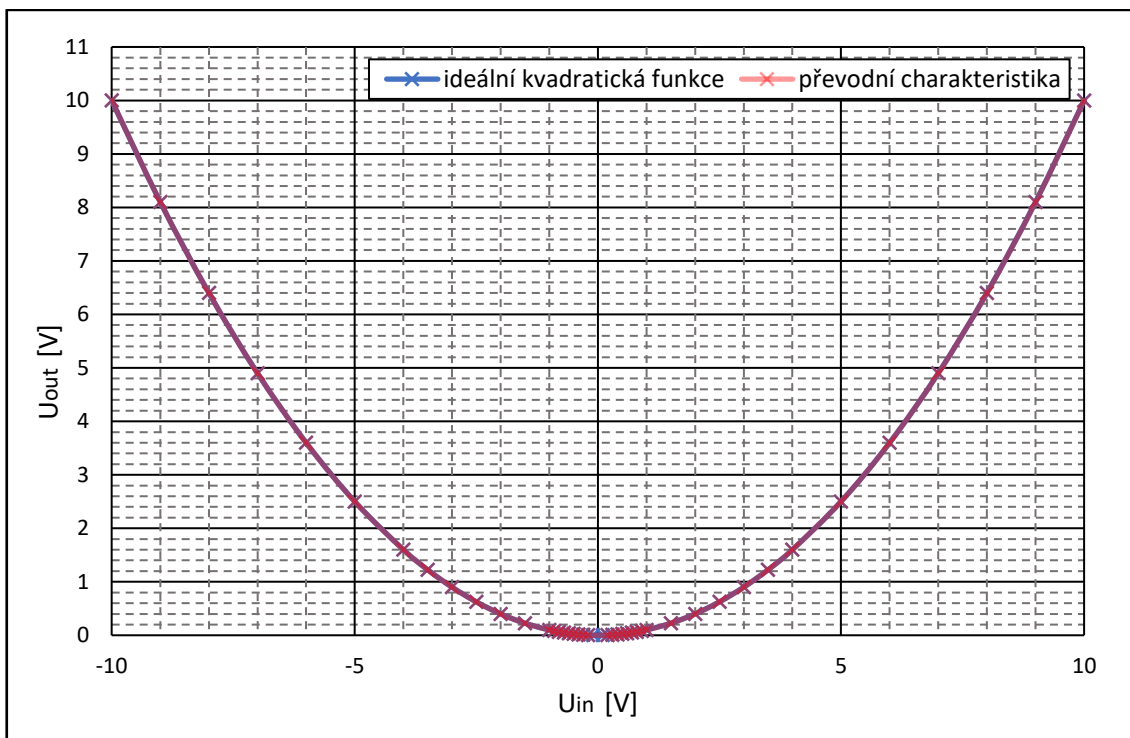


Obrázek 8.5 Frekvenční charakteristika AD534K při vstupním napětí 3 V RMS

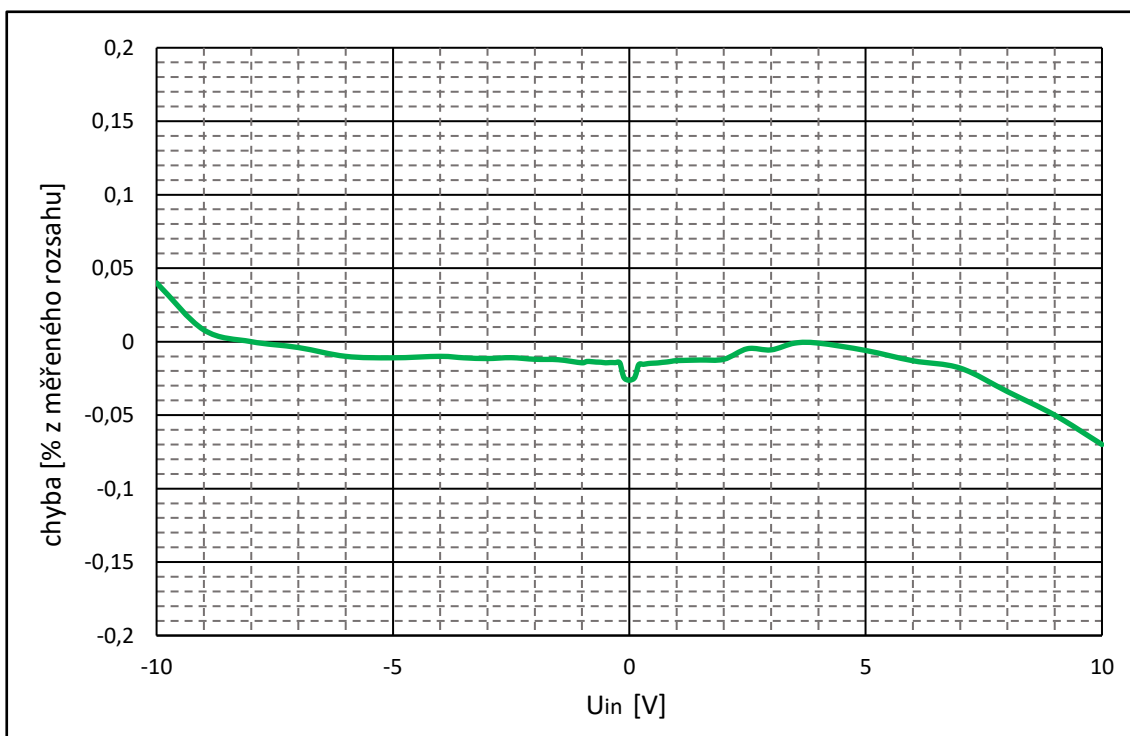
8.2 Převodní a frekvenční charakteristiky násobičky AD734

Analogová násobička AD734 byla měřena při stejných podmínkách, ve stejném zapojení a při stejných úrovních symetrického napájení jako analogová násobička AD534K.

Při měření převodní charakteristiky byly na vstup přiváděny stejné úrovně stejnosměrného napětí jako u předchozí násobičky. I u této násobičky se projevilo offsetové napětí v případě, kdy bylo na vstup přiváděno napětí nižší než 0,3 V. Výrobce udává pro tuto násobičku chybu $\pm 0,1\%$ v celém frekvenčním rozsahu do 10 MHz. Tato chyba je platná při násobení dvou signálů s rozdílnou úrovní i při zapojení, které realizuje kvadratickou funkci. Při porovnání naměřené převodní charakteristiky s ideální kvadratickou funkcí vyšla chyba dokonce ještě nižší. Maximální naměřená chyba byla $-0,07\%$ při vstupním napětí 10 V. Analogová násobička AD734 je tedy z hlediska přesnosti lepší než analogová násobička AD534K. Převodní charakteristika AD734 a naměřená chyba jsou zobrazeny na obrázcích 8.6 a 8.7.



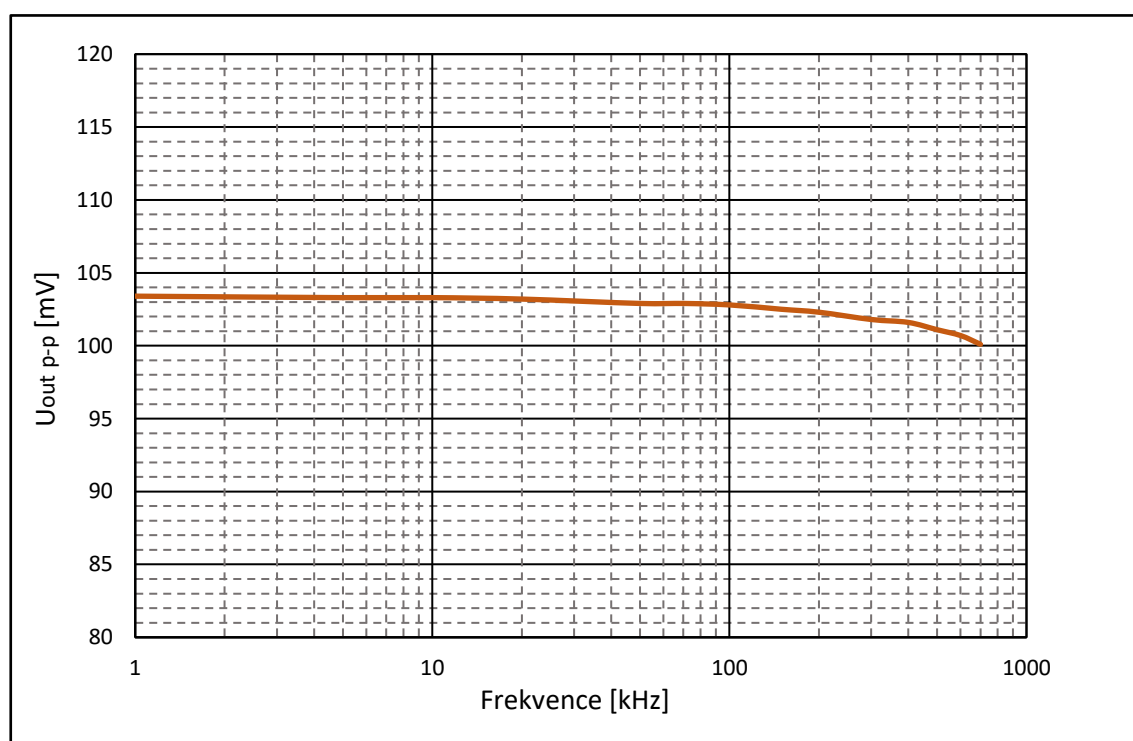
Obrázek 8.6 Převodní charakteristika AD734



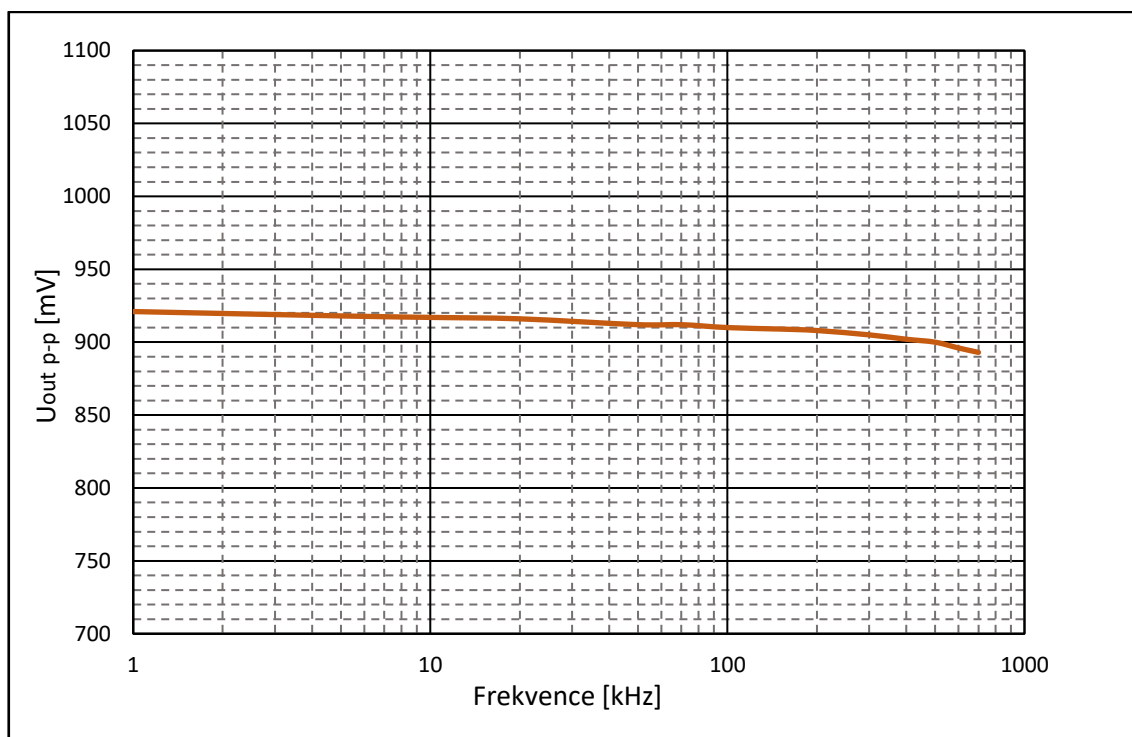
Obrázek 8.7 Naměřená chyba AD734

Frekvenční charakteristiky byly měřeny pro stejné úrovně harmonického vstupního signálu a ve stejném kmitočtovém rozsahu jako u násobičky AD534K. Při vstupním napětí 1 V RMS i 3 V RMS vychází frekvenční charakteristiky lépe než u předchozí násobičky. Zatímco u násobičky AD534K se na kmitočtu zhruba 150 kHz nacházelo rezonanční převýšení, u násobičky AD734 je celý průběh frekvenční charakteristiky monotónně klesající s velmi malou strmostí. Při kmitočtech vyšších než 100 kHz sice začíná strmost narůstat, ale výstupní průběhy nekmitají a zůstává zachován jejich harmonický průběh. Časové průběhy obou násobiček jsou k nahlédnutí v příloze D. Na obrázku 8.8 je zobrazena frekvenční charakteristika při vstupním harmonickém signálu 1 V RMS a na obrázku 8.9 je zobrazena frekvenční charakteristika při vstupním harmonickém signálu 3 V RMS.

Při vzájemném porovnání obou násobiček vychází lépe násobička AD734 jak z hlediska přesnosti násobení, tak i z hlediska šířky pásma.



Obrázek 8.8 Frekvenční charakteristika AD734 při vstupním napětí 1 V RMS



Obrázek 8.9 Frekvenční charakteristika AD734 při vstupním napětí 3 V RMS

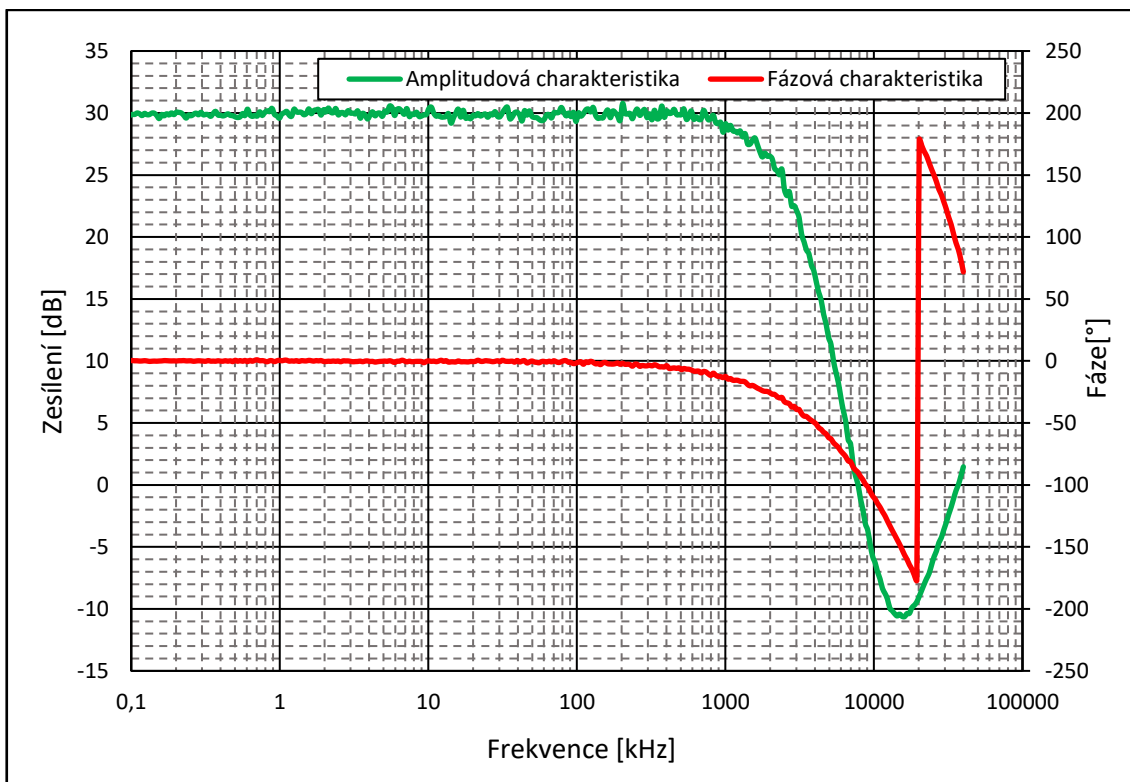
8.3 Frekvenční charakteristiky napěťového a proudového kanálu

Při ověřování vlastností napěťového i proudového kanálu bylo zjištěno, že výstupní napětí kmitá při vyšších hodnotách zesílení. Kondenzátor 8,2 pF ve zpětné vazbě u operačního zesilovače THS4631 kmitání nezabránil, proto byly ke všem ostatním operačním zesilovačům přidány paralelně k rezistorům ve zpětné vazbě kondenzátory 22 pF. Tyto kondenzátory způsobily rychlejší pokles fáze, než bylo očekáváno podle výsledků simulace. Porovnání simulovaných a naměřených hodnot poklesu fáze pro všechna zesílení je uvedeno v tabulce 6.

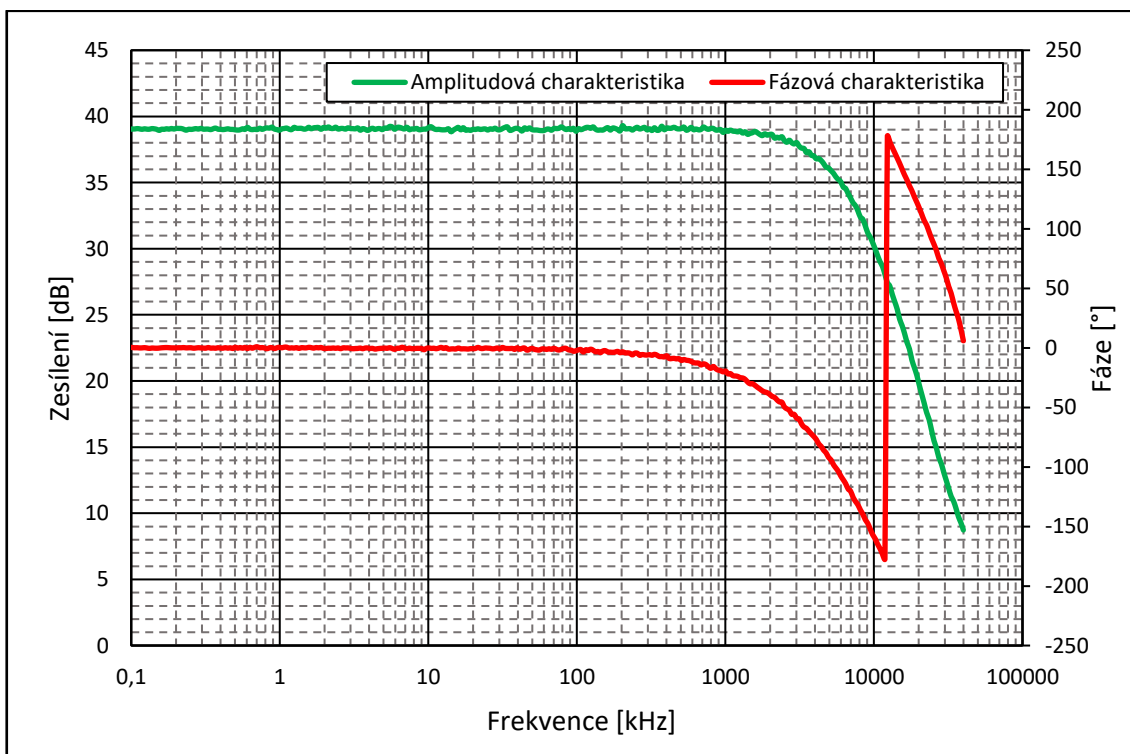
Tabulka 6 Porovnání simulovaných a naměřených hodnot napěťového kanálu

Frekvence	Změna fáze pro zesílení 900		Změna fáze pro zesílení 300		Změna fáze pro zesílení 90		Změna fáze pro zesílení 30	
	Simulace	Měření	Simulace	Měření	Simulace	Měření	Simulace	Měření
10 kHz	-0,05°	-0,16°	-0,05°	-0,12°	-0,04°	-0,11°	-0,04°	-0,08°
30 kHz	-0,16°	-0,52°	-0,15°	-0,29°	-0,14°	-0,19°	-0,12°	-0,13°
50 kHz	-0,27°	-1,11°	-0,25°	-0,76°	-0,23°	-0,35°	-0,21°	-0,28°

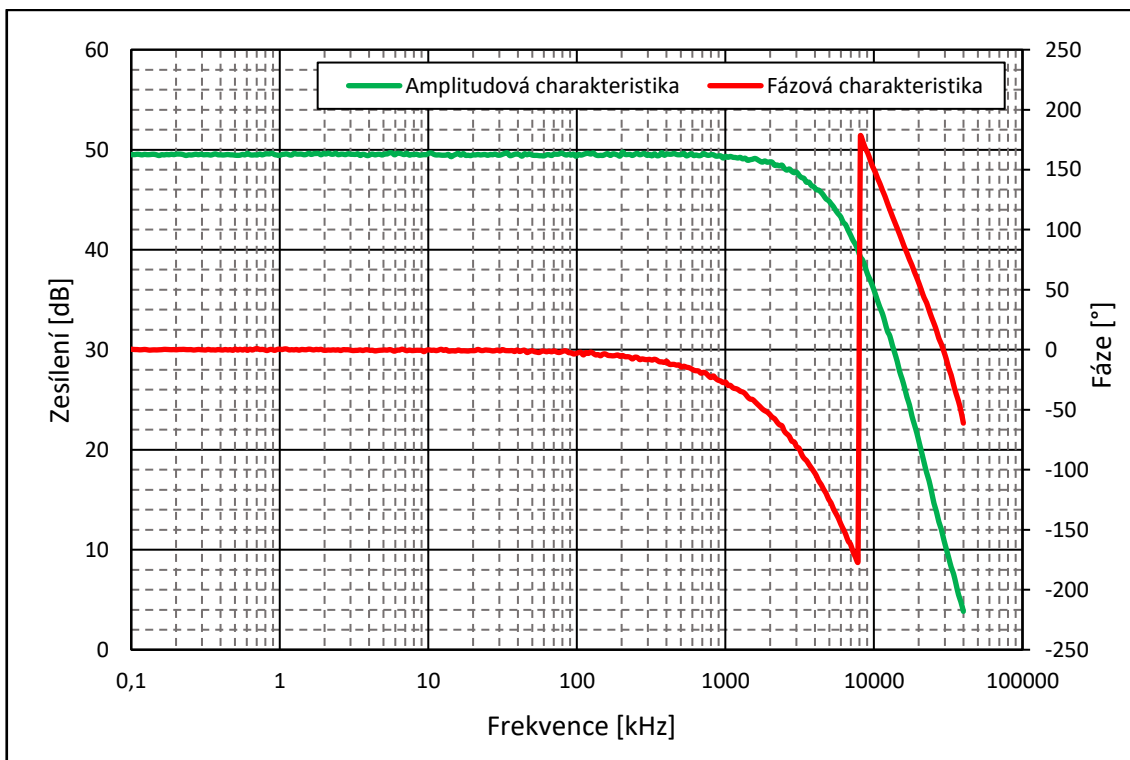
Požadovanou mez poklesu fáze o 0,33 stupně pro dodržení přesnosti wattmetru $\pm 2\%$ v kmitočtovém rozsahu od 10 Hz do 50 kHz se podařilo splnit jen pro zesílení 30. Frekvenční charakteristiky jsou zobrazeny na obrázcích 8.10 až 8.15.



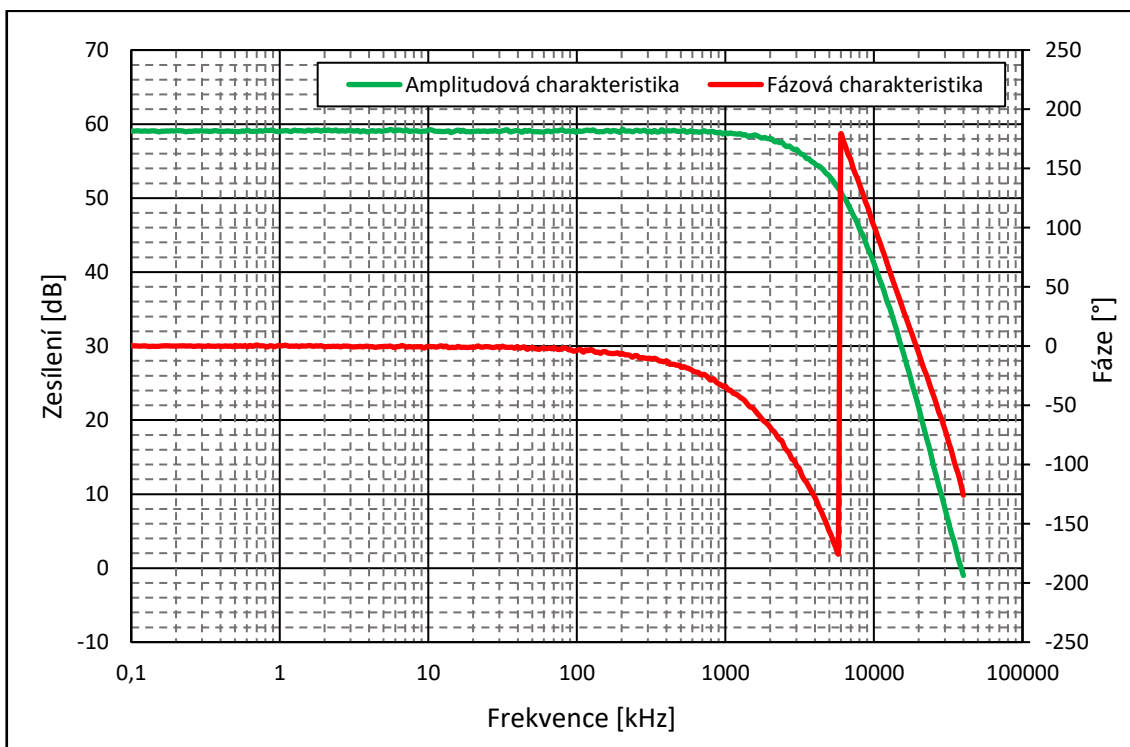
Obrázek 8.10 Frekvenční charakteristiky napěťového kanálu při zesílení 30



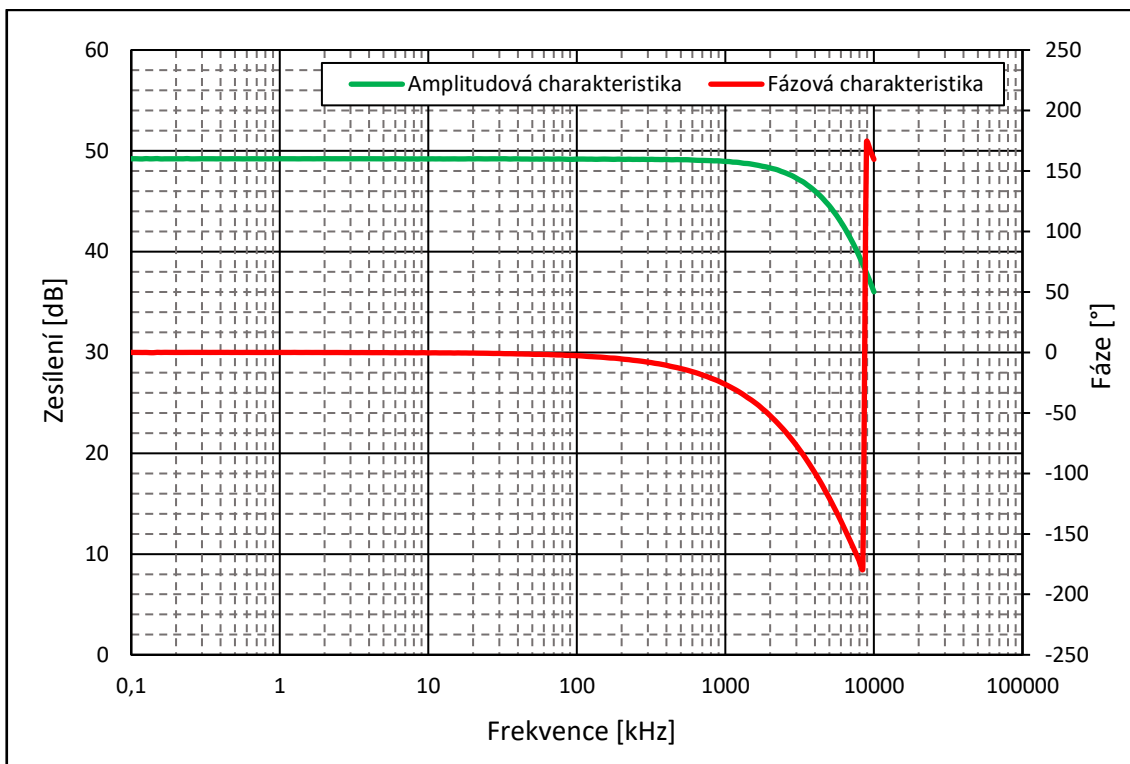
Obrázek 8.11 Frekvenční charakteristiky napěťového kanálu při zesílení 90



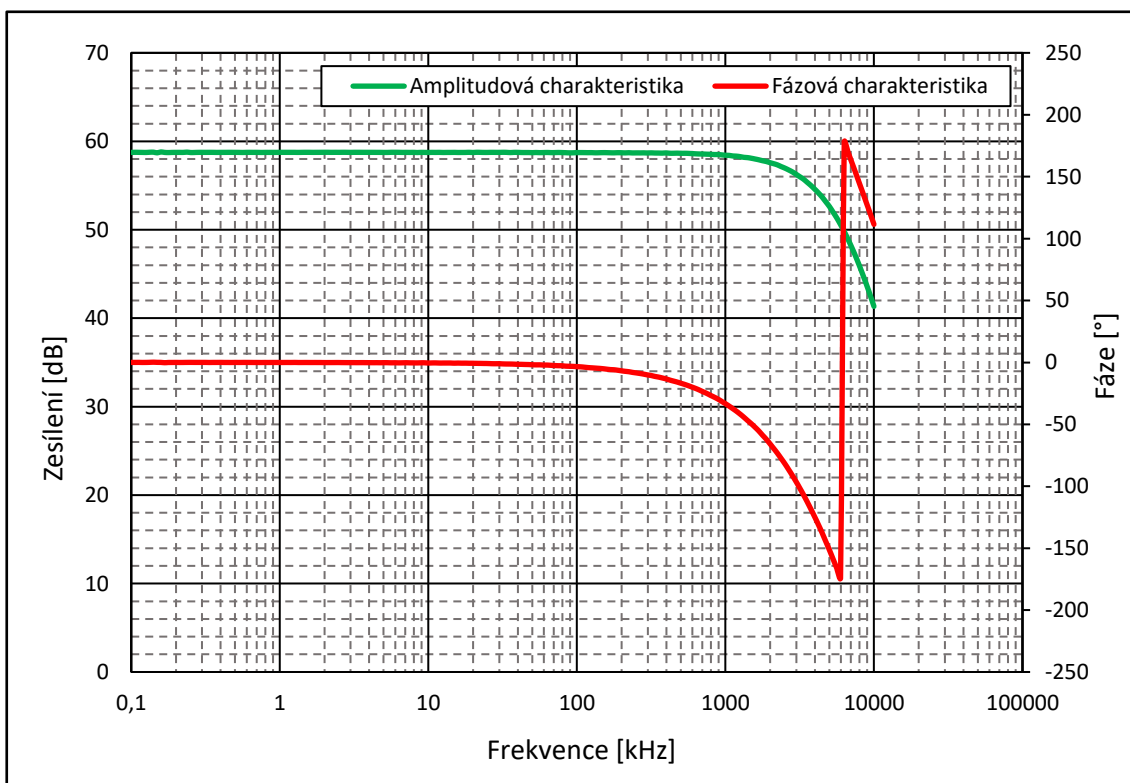
Obrázek 8.12 Frekvenční charakteristiky napětového kanálu při zesílení 300



Obrázek 8.13 Frekvenční charakteristiky napětového kanálu při zesílení 900.



Obrázek 8.14 Frekvenční charakteristiky proudového kanálu při zesílení 300



Obrázek 8.15 Frekvenční charakteristiky proudového kanálu při zesílení 900

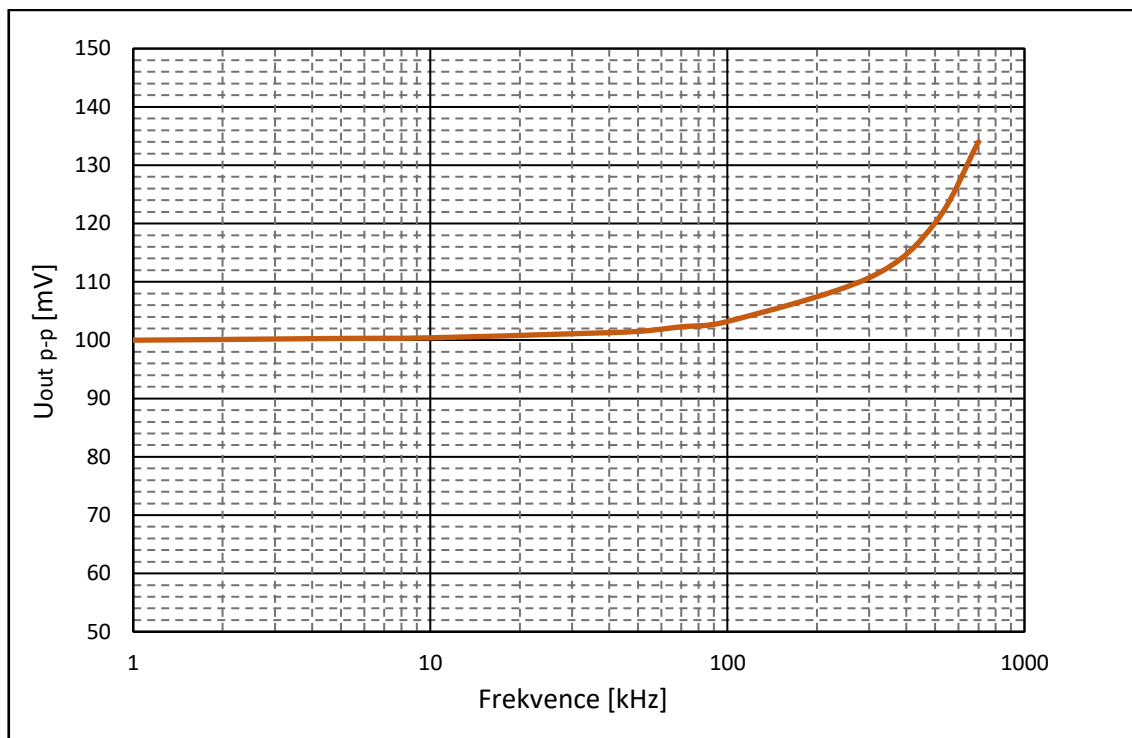
Jelikož je proudový kanál téměř totožný s kanálem napětovým, vychází i jejich frekvenční charakteristiky velmi podobně. U obou kanálů je amplitudová charakteristika zkruslena šumem, který je způsoben příliš dlouhými přívodními koaxiálními kabely a útlumovými články. V příloze D jsou zobrazeny fotografie z měření proudového kanálu, šum na výstupu proudového kanálu při nulové úrovni vstupního napětí, odezva proudového kanálu na náběžnou hranu a časové průběhy proudového kanálu.

8.4 Frekvenční charakteristika převodníku proudu na napětí

V zapojení převodníku proudu na napětí bylo během měření a ověřování funkčnosti provedeno několik úprav. Výkonové tranzistory MJE3055 a MJE2955 byly nahrazeny tranzistory pro menší výkony, ale s větší šířkou pásma. Náhradním NPN tranzistorem zapojeným v převodníku proudu na napětí je BD139 a náhradním PNP tranzistorem je BD140. Tyto tranzistory zajišťují konstantní průběh frekvenční charakteristiky v širším frekvenčním pásmu. Také bylo zjištěno, že výstupní průběh napětí byl rozkmitaný a tento problém se nepodařilo odstranit ani přidáním kondenzátoru do zpětné vazby operačního zesilovače. Chybu vyřešilo nahrazení operačního zesilovače OPA656 operačním zesilovačem OPA211. Zesilovač OPA656 má příliš velkou šířku pásma a tím bylo způsobeno kmitání na výstupu. Zesilovač OPA211 má menší šířku pásma a ke kmitání už nedochází.

Měření frekvenční charakteristiky bylo provedeno pouze pro jednu hodnotu rezistoru ve zpětné vazbě. Tato hodnota byla 1 ohm. Na vstupu by tedy měla být maximální úroveň proudu 30 mA, aby na výstupu byla maximální úroveň napětí 60 mV špička-špička. Tato úroveň proudu byla překročena, aby bylo měření provedeno při plném buzení. Na vstup byl přiváděn harmonický signál z generátoru. Úroveň napětí z generátoru byla 2 V RMS, ale na vstupu převodníku proudu na napětí byl navíc vložen útlumový článek 20 dB. Frekvenční charakteristika převodníku proudu na napětí je zobrazena na obrázku 8.16. Z průběhu frekvenční charakteristiky lze stanovit, že převodník proudu na napětí v kmitočtovém rozsahu od 10 Hz do 50 kHz splňuje požadavky na přesnost wattmetru. Při vyšších kmitočtech začal průběh frekvenční charakteristiky strmě růst a docházelo k rezonančnímu převýšení.

Při kmitočtech vyšších než 50 kHz se navíc v časovém výstupním průběhu začalo projevovat přechodové zkreslení způsobené tranzistorem. Toto zkreslení způsobilo narušení harmonického průběhu napětí. Převodník proudu na napětí je proto použitelný pouze do kmitočtu 50 kHz. Ovšem i přes tento nedostatek vyhovuje požadavkům na přesnost wattmetru. Časové průběhy převodníku proudu na napětí jsou zobrazeny v příloze D.

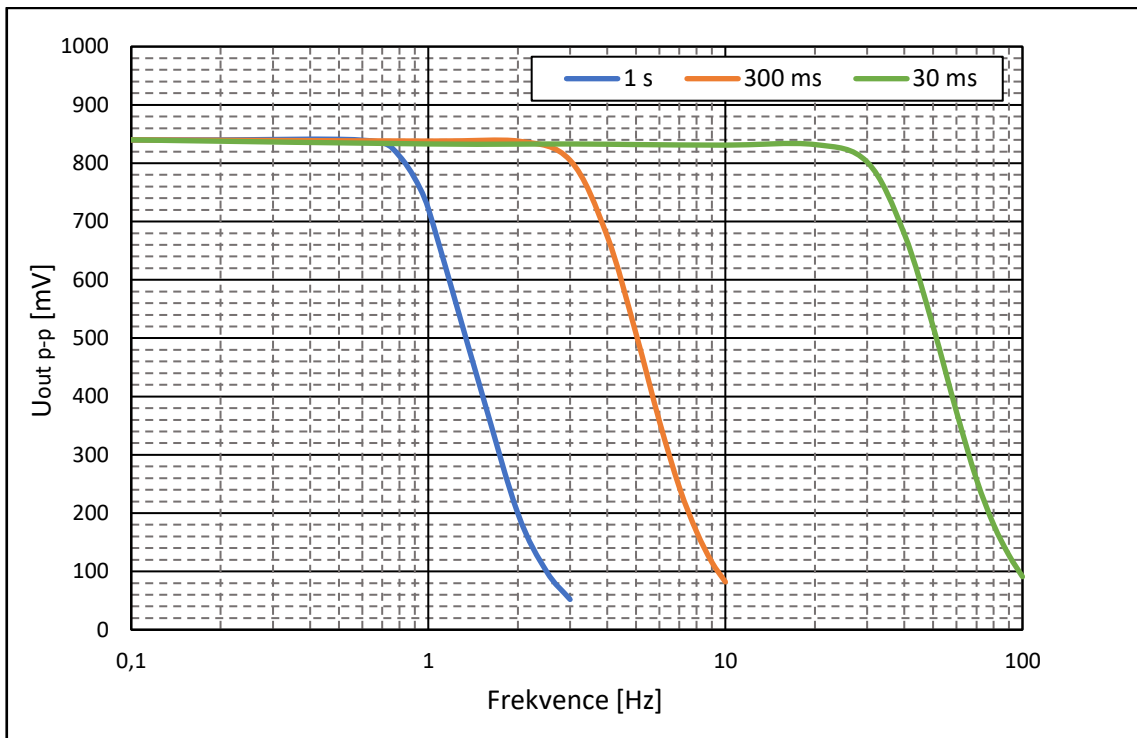


Obrázek 8.16 Frekvenční charakteristika převodníku proudu na napětí

8.5 Frekvenční charakteristiky dolních propustí

Při měření frekvenčních charakteristik dolních propustí bylo na vstup přiváděno harmonické napětí 1,5 V RMS v kmitočtovém rozsahu od 100 mHz do 100 Hz. Změřené šířky pásma odpovídají jednotlivým časovým konstantám. Filtr s časovou konstantou 1 s má šířku pásma zhruba do kmitočtu 1 Hz, filtr s časovou konstantou 0,3 s má šířku pásma do kmitočtu 3 Hz a filtr s časovou konstantou 30 ms má šířku pásma zhruba do kmitočtu 30 Hz. Frekvenční charakteristiky jsou zobrazeny na obrázku 8.17.

Během měření odezvy filtru na náběžnou hranu bylo zjištěno, že změřené časové konstanty neodpovídají předpokládaným hodnotám. Časové konstanty 1 s, 0,3 s a 30 ms by měly odpovídat době 5τ . Tedy době, kdy se výstupní napětí ustálí na úrovni 100 % vstupního napětí po přivedení jednotkového skoku na vstup. Skutečná naměřená doba ustálení je menší než doba ustálení předpokládaná, časové konstanty filtru 1 s, 0,3 s a 30 ms jsou tedy pouze přibližné. Odezvy všech tří propustí na náběžnou hranu je možné zhlédnout v příloze D.



Obrázek 8.17 Frekvenční charakteristiky dolních propustí

9 ZÁVĚR

V bakalářské práci byly zjištěny všechny vhodné měřicí postupy a způsoby určení měrných ztrát ve feromagnetických materiálech. Byly prostudovány principy používané u přístrojů k provoznímu měření měrných ztrát. Dále byly zjištěny možnosti, jakými mohou být provedeny wattmetry, které jsou schopny měřit ztráty ve feromagnetických materiálech.

Velká část práce je věnována analogovým násobičkám. Byly důkladně prostudovány způsoby provedení analogových násobiček. Také byla zjištěna jejich dostupnost a byly vybrány dvě násobičky vhodné pro použití v elektronickém wattmetru. Vybrány byly analogové násobičky AD534K a AD734. Obě byly změřeny při stejných podmínkách a z výsledků měření lze jednoznačně určit, že analogová násobička AD734 je lepší jak z hlediska přesnosti násobení, tak i z hlediska šířky pásma. Nicméně násobička AD534K i násobička AD734 splňují požadavky na přesnost wattmetru, takže bylo rozhodnuto, že se ve wattmetru použijí obě násobičky a bude mezi nimi umožněna volba přepínačem.

Dále bylo navrženo vhodné blokové schéma elektronického wattmetru, který by byl schopný měřit ztráty do kmitočtu 50 kHz. V napěťovém kanálu se nachází blok děliče napětí a blok kaskády operačních zesilovačů. V proudovém kanálu se nachází blok převodníku proudu na napětí a také blok kaskády operačních zesilovačů. Oba kanály vstupují do bloku s analogovými násobičkami, za kterým je ještě zařazen blok s filtry typu dolní propust. Součástí blokového schéma je i blok s usměrňovačem napětí, který je zařazen za kaskádu operačních zesilovačů v napěťovém kanálu paralelně k bloku s analogovými násobičkami.

Nutností bylo uvážit vhodné zesílení pro měření malých vzorků. Byly vybrány tři vhodné operační zesilovače a pro každý z nich byla provedena počítačová simulace amplitudových a fázových charakteristik. Vybrány byly operační zesilovače OPA656, OPA842 a THS4631.

Tyto operační zesilovače se použily v zesilovacích kaskádách napěťového i proudového kanálu. Pro zesilovací kaskádu napěťového kanálu byly zvoleny hodnoty zesílení 30, 90, 300 a 900. Pro zesilovací kaskádu proudového kanálu byly zvoleny hodnoty zesílení 300 a 900. Oba kanály mají téměř totožné zapojení. Toto zapojení bylo nejprve detailně otestováno v počítačové simulaci a poté byly oba kanály zkonstruovány a oživeny. Při zjišťování vlastností obou kanálů bylo zjištěno, že výstupní napětí kmitá při vyšších hodnotách zesílení, proto byly do obou kanálů do zpětných vazeb operačních zesilovačů OPA842 přidány kondenzátory 22 pF. Přidání kondenzátorů do zpětných vazeb způsobilo rychlejší pokles fáze. Požadavkem byla přesnost wattmetru $\pm 2\%$. Pro tuto přesnost byla povolena mez poklesu fáze celé kaskády operačních zesilovačů na kmitočtu 50 kHz 0,33 stupně. Vlivem kapacit ve zpětných vazbách se tuto přesnost povedlo dodržet pouze u zesílení 30. Dále bylo vykompenzováno offsetové napětí u všech operačních zesilovačů OPA842. Obě zesilovací kaskády jsou plně funkční pro všechny hodnoty zesílení.

Před kaskádu operačních zesilovačů v napěťovém kanálu byl zařazen blok s kmitočtově kompenzovaným děličem. Hodnoty děliče byly zvoleny 1:1, 1:10 a 1:100. Pro hodnoty 1:10 a 1:100 nebyly zatím k rezistorům přidány kondenzátory pro kmitočtovou kompenzaci.

Před kaskádu operačních zesilovačů v proudovém kanálu byl zařazen blok převodníku proudu na napětí. V návrhu převodníku bylo nejprve uvažováno použití dvou výkonových tranzistorů MJE3055 a MJE2955 a operačního zesilovače OPA656. Pro zapojení s těmito tranzistory a operačním zesilovačem byla provedena simulace a byla zjištěna malá šířka pásma. Při konstrukci tohoto bloku byly výkonové tranzistory nahrazeny tranzistory BD139 a BD140, které mají větší šířku pásma. Dále bylo zjištěno, že výstupní napětí kmitá a tento problém se nepodařilo neodstranit ani přidáním kondenzátoru do zpětné vazby operačního zesilovače. Proto byl OPA656 nahrazen operačním zesilovačem OPA211, který má menší šířku pásma. Menší šířka pásma operačního zesilovače pomohla odstranit problém s kmitáním. Převodník proudu na napětí je funkční pouze v kmitočtovém rozsahu do 50 kHz. Pro vyšší kmitočty se projevuje přechodové zkreslení způsobené tranzistory. Po uvážení celého návrhu by mohl být převodník proudu na napětí nahrazen přepínatelným bočníkem.

Dalším blokem ve wattmetru je filtr typu dolní propust druhého řádu. Tento filtr ustálí výstupní napětí z analogové násobičky na konstantní hodnotu. Časové konstanty filtru byly zvoleny 1 s, 0,3 s a 300 ms. Blok byl oživen a byly proměřeny kmitočtové charakteristiky. Šířky propustných pásem odpovídají časovým konstantám filtru.

Posledním blokem ve wattmetru je usměrňující blok. Deska plošného spoje tohoto bloku byla použita již osazená z některého z předchozích projektů. Vlastnosti tohoto bloku nebyly ověřeny měřením.

Bylo uvažováno symetrické napájení z laboratorního zdroje ± 15 V. Pro napájení některých operačních zesilovačů a relé bylo potřeba tuto hodnotu stabilizovat na ± 5 V. Proto byla navržena jednoduchá jednostranná deska plošného spoje, na které jsou umístěny stabilizátory napětí LM7805 a LM7905 s pasivními chladiči. Wattmetru zatím nebyl navržen přední panel a bloky nebyly uchyceny ve společné krabici.

Wattmetr nebyl prověřen měřícími testy feritových vzorků, přesto byl každý blok změřen zvlášť. Všechny bloky jsou funkční a splňují zadání. Přesnost wattmetru je při nižších kmitočtech velmi velká vzhledem k velké přesnosti použitých komponentů. Při nízkých kmitočtech je přesnost wattmetru dána především přesností analogové násobičky. S rostoucím kmitočtem se přesnost wattmetru zmenšuje. Přesnost také záleží na hodnotě zesílení kaskády operačních zesilovačů. Větší zesílení způsobí menší přesnost wattmetru.

Při návrhu wattmetru bylo uvažováno, že při měření magnetických ztrát bude průběh napětí vždy harmonický, ale průběh proudu bude neharmonický. Při použití analogové násobičky AD734 je možné wattmetrem změřit vyšší harmonické proudy i na budícím kmitočtu 50 kHz.

LITERATURA

- [1] ANALOG DEVICES. *ADE7763: Single-Phase Active and Apparent Energy Metering IC* [online]. 2017 [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7763.pdf>.
- [2] ANALOG DEVICES. *AD534: Internally Trimmed Precision IC Multiplier* [online]. 2017 [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD534.pdf>.
- [3] ANALOG DEVICES. *AD734: 10 MHz, Four-Quadrant Multiplier/Divider* [online]. 2017 [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD734.pdf>.
- [4] 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
- [5] BRANČÍK, L., DOSTÁL, T. *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.
- [6] DOLEČEK, J. *Moderní učebnice elektroniky 5. díl - Operační zesilovače a komparátory*. První vydání. Nakladatelství BEN, Praha, 2007, 232 s. ISBN 978-80-7300-187-2.
- [7] DUFEK, M., HRABÁK, J., TRNKA, J. *Magnetická měření*. První vydání. Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1964, 404 s.
- [8] MTHOMBENI, L. T., PILLAY, P., STRNAT, R. *A new Epstein frame for lamination core loss measurements at high frequencies and high flux densities* [online]. Potsdam: Clarkson University, Department of electrical & computer engineering, 2005 [cit. 2017-12-02]. Dostupné z: <http://users.encs.concordia.ca/~pillay/c3.pdf>.
- [9] REJNUŠ, M. *Měřicí zesilovač využívající vektorové synchronní detekce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2014. 73 s., 34 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Drexler Ph.D.
- [10] SMUTNÝ, M. *Přesný wattmetr pro měření měrných ztrát ve feromagnetikách řízený AVR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 71 s., 24 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Roubal.
- [11] TEXAS INSTRUMENTS. *OPA656: Wideband, Unity-Gain Stable, FET-Input Operational Amplifier* [online]. 2001 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa656.pdf>.
- [12] TEXAS INSTRUMENTS. *OPA842: Wideband, Low Distortion, Unity-Gain Stable, Voltage-Feedback Operational Amplifier* [online]. 2010 [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa842.pdf>.
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. *THS4631: High-Voltage, High Slew Rate, Wideband Fet-Input Operational Amplifier* [online]. 2004 [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/th4631.pdf>.
- [14] TUMANSKI, S. *Handbook of magnetic measurements*. První vydání. Nakladatelství CRC Press, Boca Raton, 2011, 404 s. ISBN 978-1-4398-2951-6.

- [15] VRBA, K. *Analogová technika*. První vydání. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, Brno, 2012, 202 s. ISBN 978-80-214-4458-4.

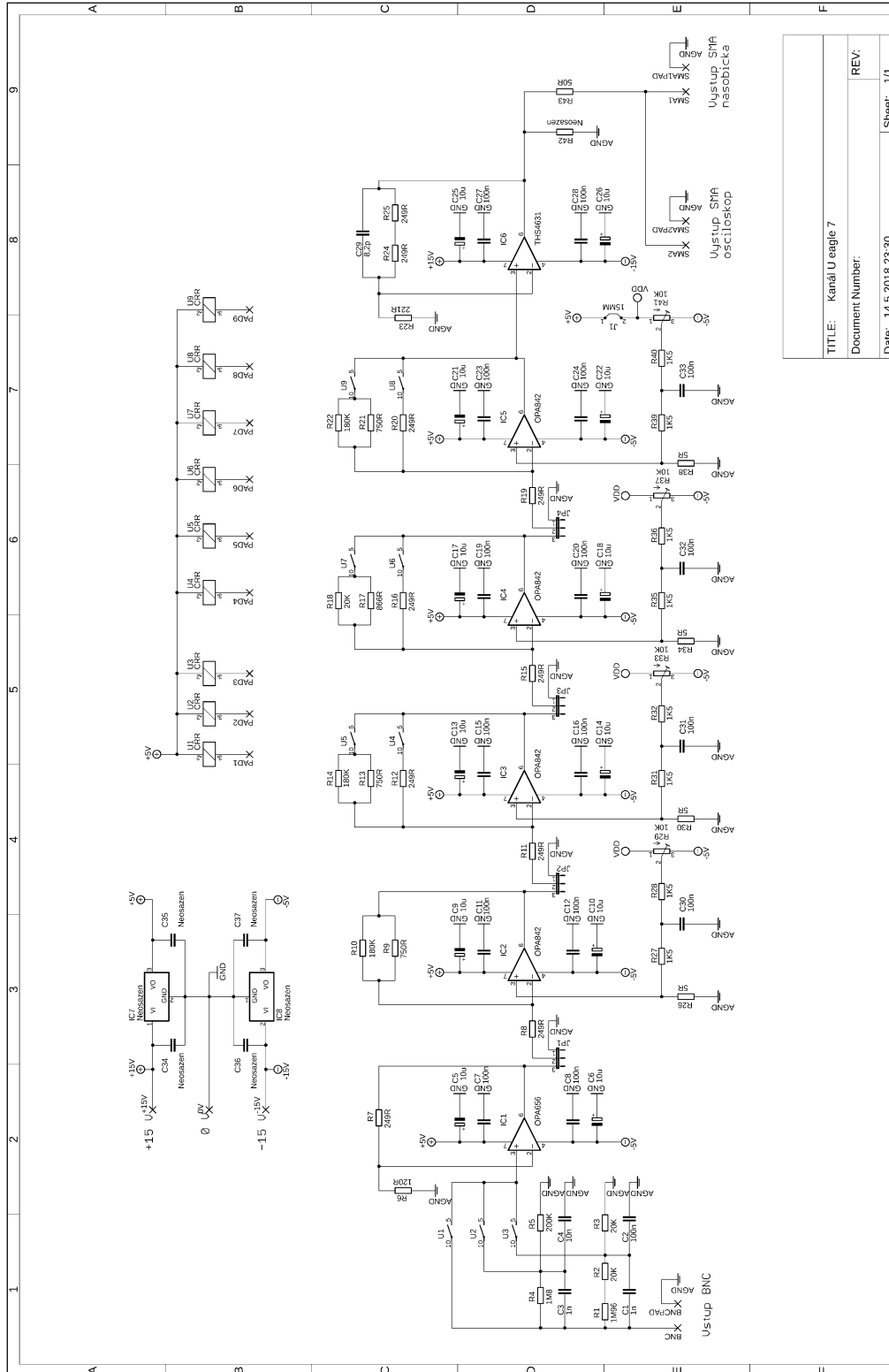
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

B	Magnetická indukce
B_{zm}	Amplituda magnetické indukce
B_{zt}	Okamžitá hodnota magnetické indukce
$\cos \varphi$	Účinitel
H_{zt}	Okamžitá hodnota magnetické intenzity
I_{1ef}	Efektivní hodnota proudu v proudové cívce
I_{1ef1}	Efektivní hodnota první harmonické složky proudu v proudové cívce
i_1	Okamžitá hodnota proudu proudové cívky
i_2	Okamžitá hodnota proudu v měřicím vinutí
K_e	Činitel tvaru indukovaného napětí
l_{akt}	Aktivní délka vzorku
l_s	Střední délka vzorku
L_s	Náhradní indukčnost cívky
m_z	Hmotnost vzorku
N_m	Počet závitů měřicího vinutí
N_1	Počet závitů magnetizačního vinutí
P'	Údaj wattmetru
P_h	Hysterezní ztráty
P_v	Ztráty vířivými proudy
P_z	Ztráty vzorku
P_{zsin}	Ztráty vzorku při sinusovém průběhu magnetické indukce
P_{z1}	Výkon dodávaný do vzorku první harmonickou složkou proudu
R'	Výsledný odpor přístrojů připojených na měřicí vinutí
R_m	Odpor měřicího vinutí
R_v	Odpor voltmetru
R_{wn}	Odpor napěťového obvodu wattmetru
R_{zs}	Náhradní sériový ztrátový odpor cívky
R_1	Odpor magnetizačního vinutí
S_{hd}	Plocha dynamické hysterezní smyčky
S_m	Plocha závitů měřicího vinutí
S_z	Průřez vzorku

T	Doba trvání jedné periody
$u_{\text{out}}(t)$	Okamžitá hodnota výstupního napětí z analogové násobičky
$U_{2\text{ef}}$	Efektivní hodnota napětí na napěťovém obvodu wattmetru
$U_{2\text{s}}$	Střední hodnota napětí na napěťovém obvodu wattmetru
$u_1(t)$	Okamžitá hodnota prvního vstupního napětí do analogové násobičky
$u_2(t)$	Okamžitá hodnota druhého vstupního napětí do analogové násobičky
u_2	Okamžitá hodnota napětí na napěťovém obvodu wattmetru
$V_{\text{ž}}$	Objem magnetovaného materiálu
Z	Ztrátové číslo
μ_0	Permeabilita vakua

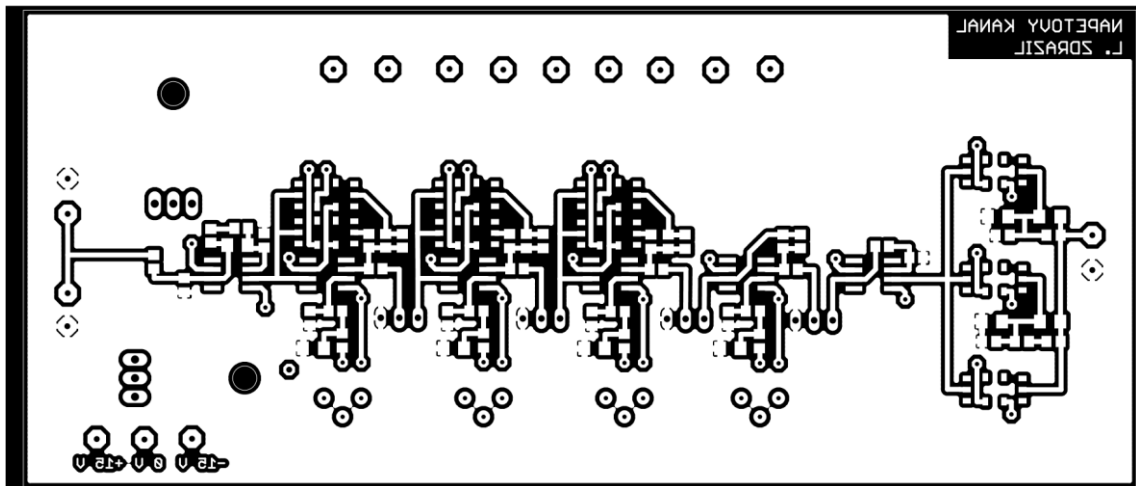
A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Obvodové zapojení napěťového kanálu



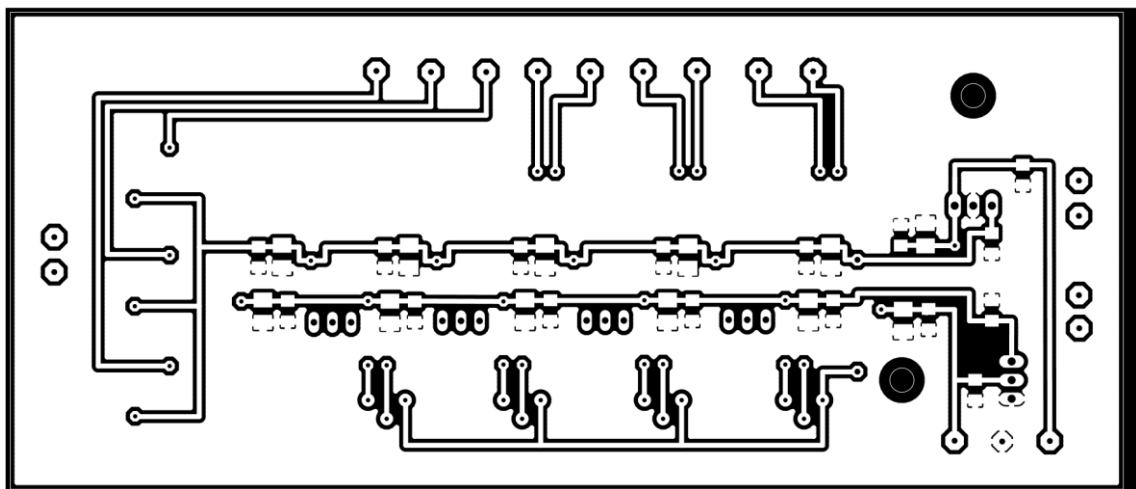
TITLE: Kanál U eagle 7
Document Number:
Date: 14.5.2018 23:30
REV:
Sheet: 1/1

A.2 Deska plošného spoje napět'ového kanálu – top



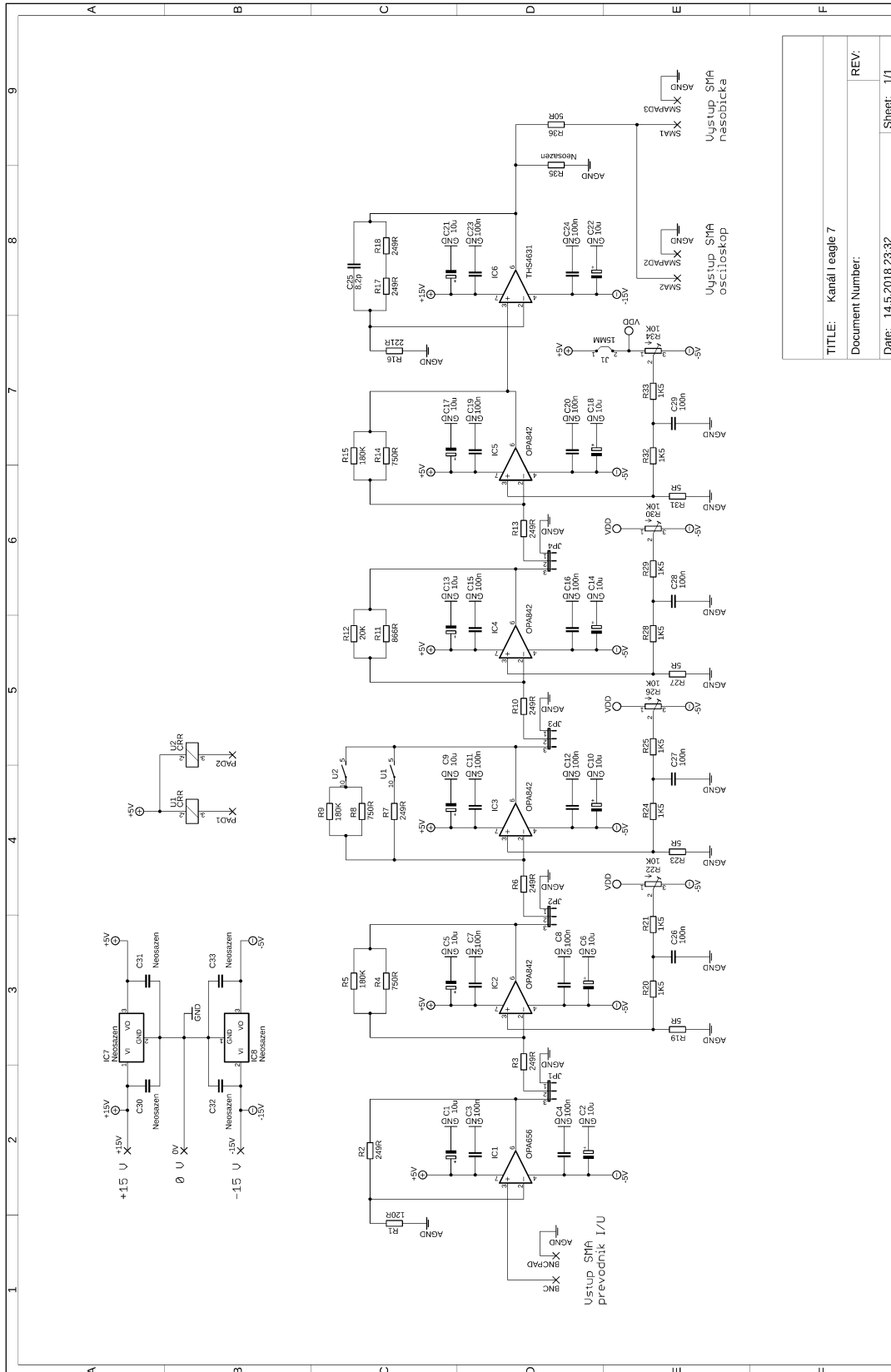
Rozměr desky 152 x 65 [mm], měřítko M1:1

A.3 Deska plošného spoje napět'ového kanálu – bottom



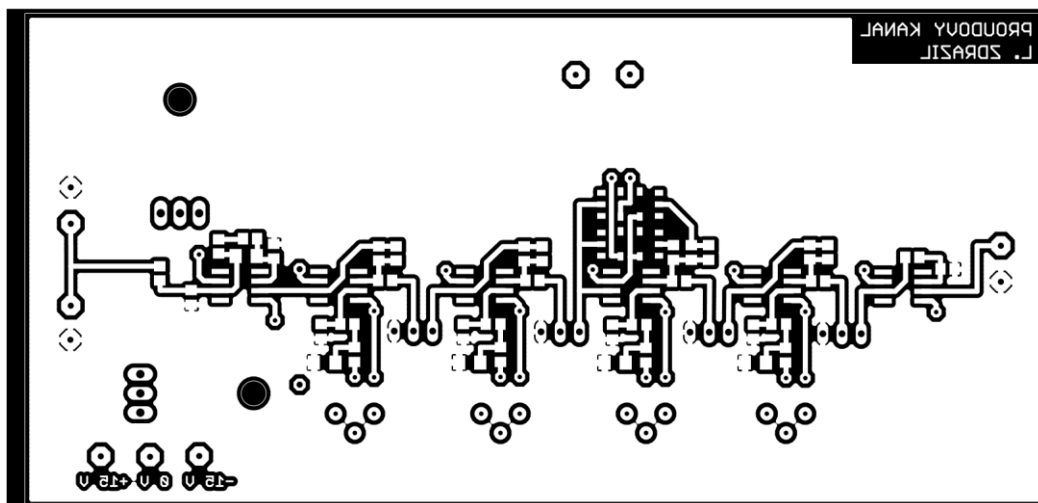
Rozměr desky 152 x 65 [mm], měřítko M1:1

A.4 Obvodové zapojení proudového kanálu



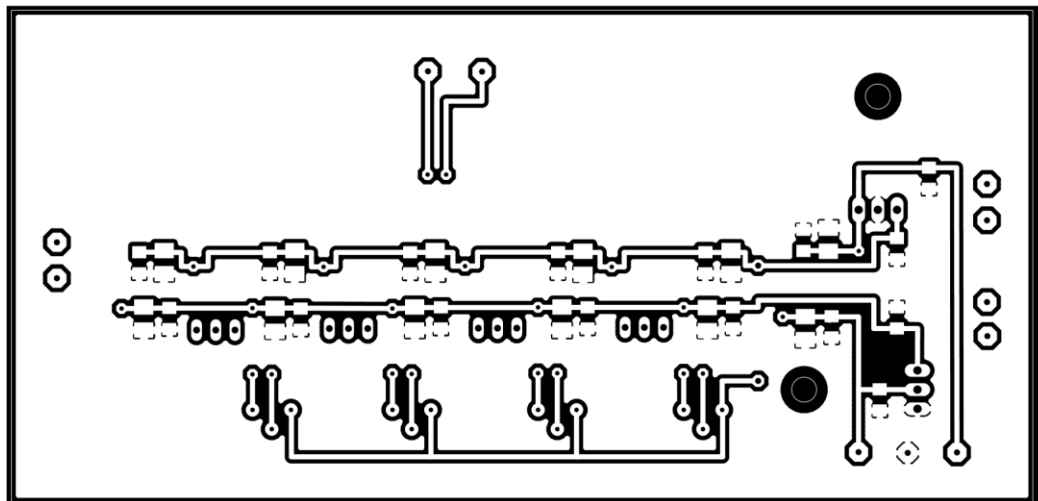
TITLE: Kanal I eagle 7
Document Number:
Date: 14.5.2018 23:32
REV:
Sheet: 1/1

A.5 Deska plošného spoje proudového kanálu – top



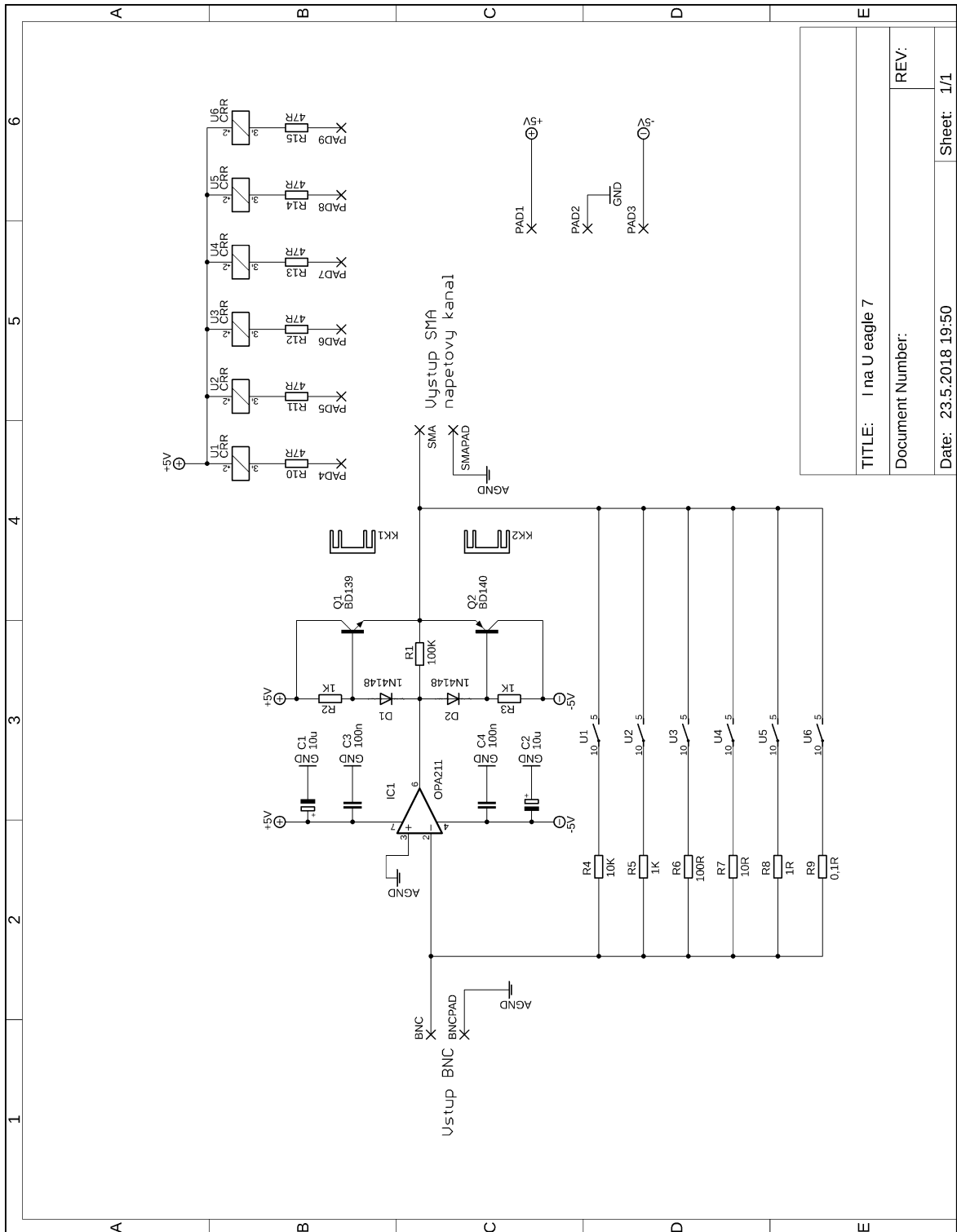
Rozměr desky 135 x 65 [mm], měřítko M1:1

A.6 Deska plošného spoje proudového kanálu – bottom



Rozměr desky 135 x 65 [mm], měřítko M1:1

A.7 Obvodové zapojení převodníku I na U



TITLE: I na U eagle 7

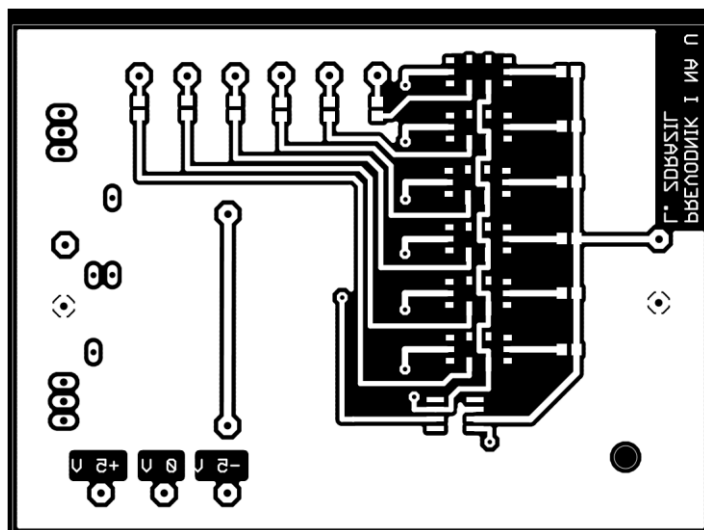
Document Number:

Date: 23.5.2018 19:50

REV:

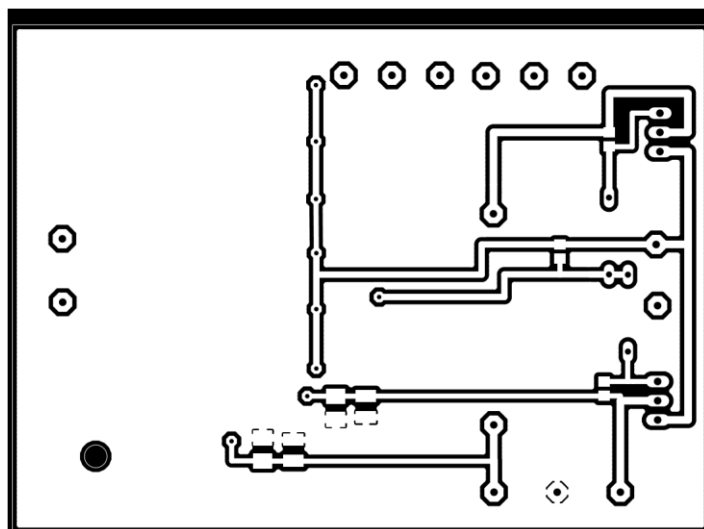
Sheet: 1/1

A.8 Deska plošného spoje převodníku I na U – top



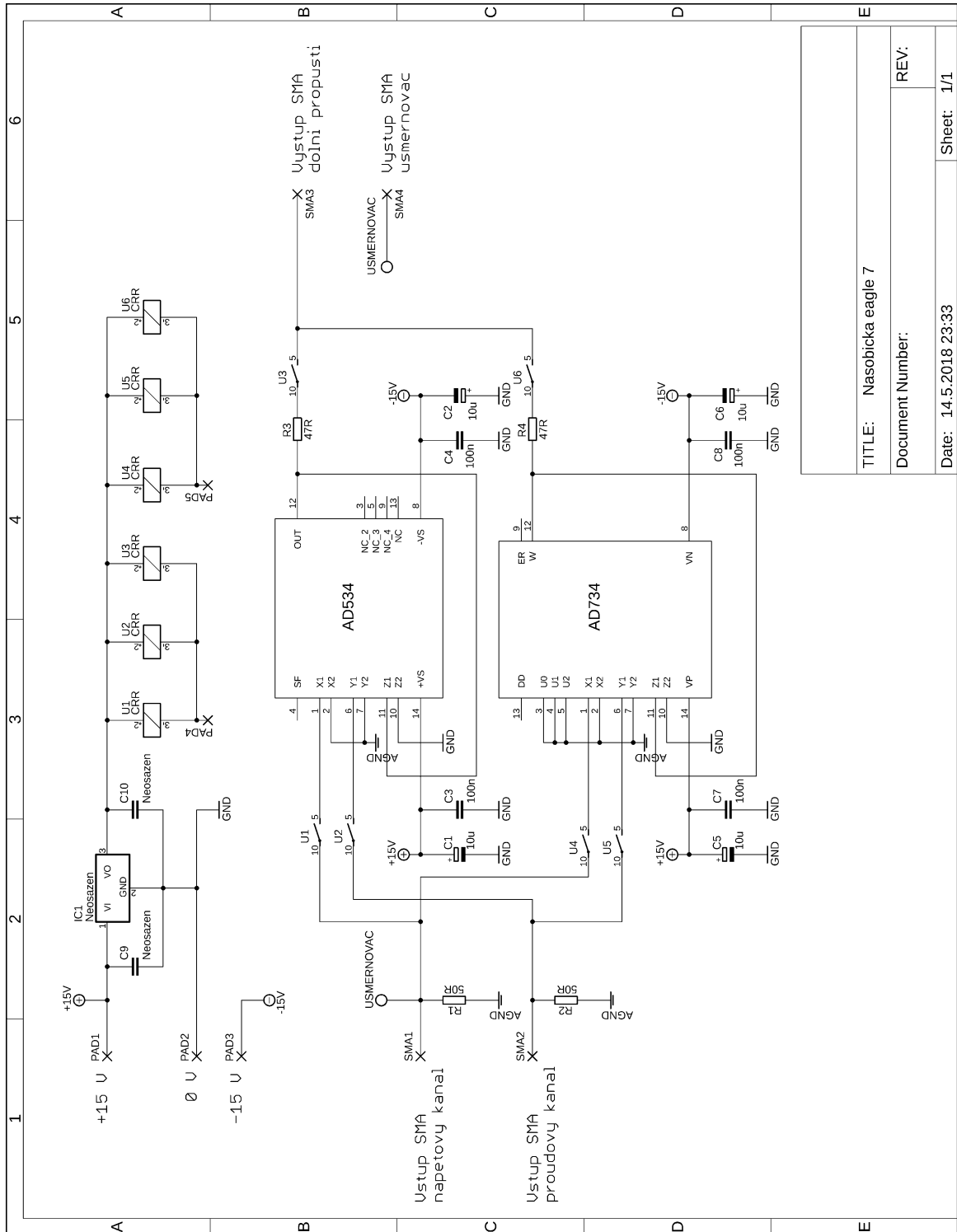
Rozměr desky 88 x 65 [mm], měřítko M1:1

A.9 Deska plošného spoje převodníku I na U – bottom



Rozměr desky 88 x 65 [mm], měřítko M1:1

A.10 Obvodové zapojení násobícího bloku



TITLE: Nasobicka eagle 7

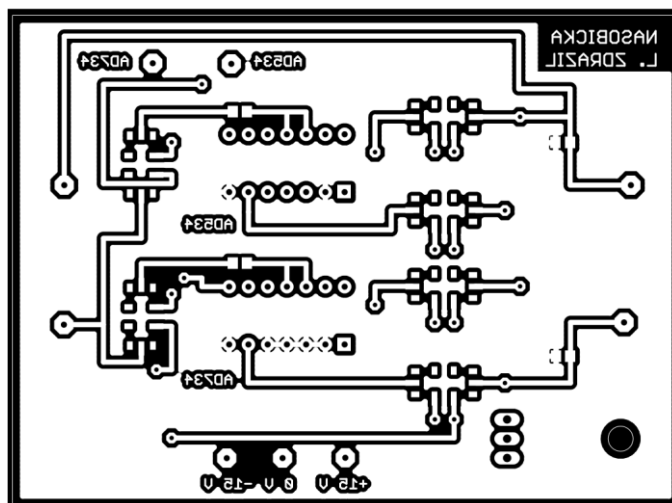
Document Number:

Date: 14.5.2018 23:33

REV:

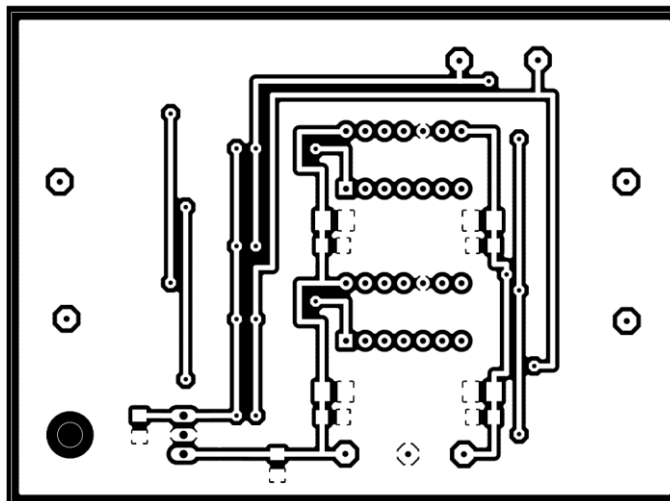
Sheet: 1/1

A.11 Deska plošného spoje násobícího bloku – top



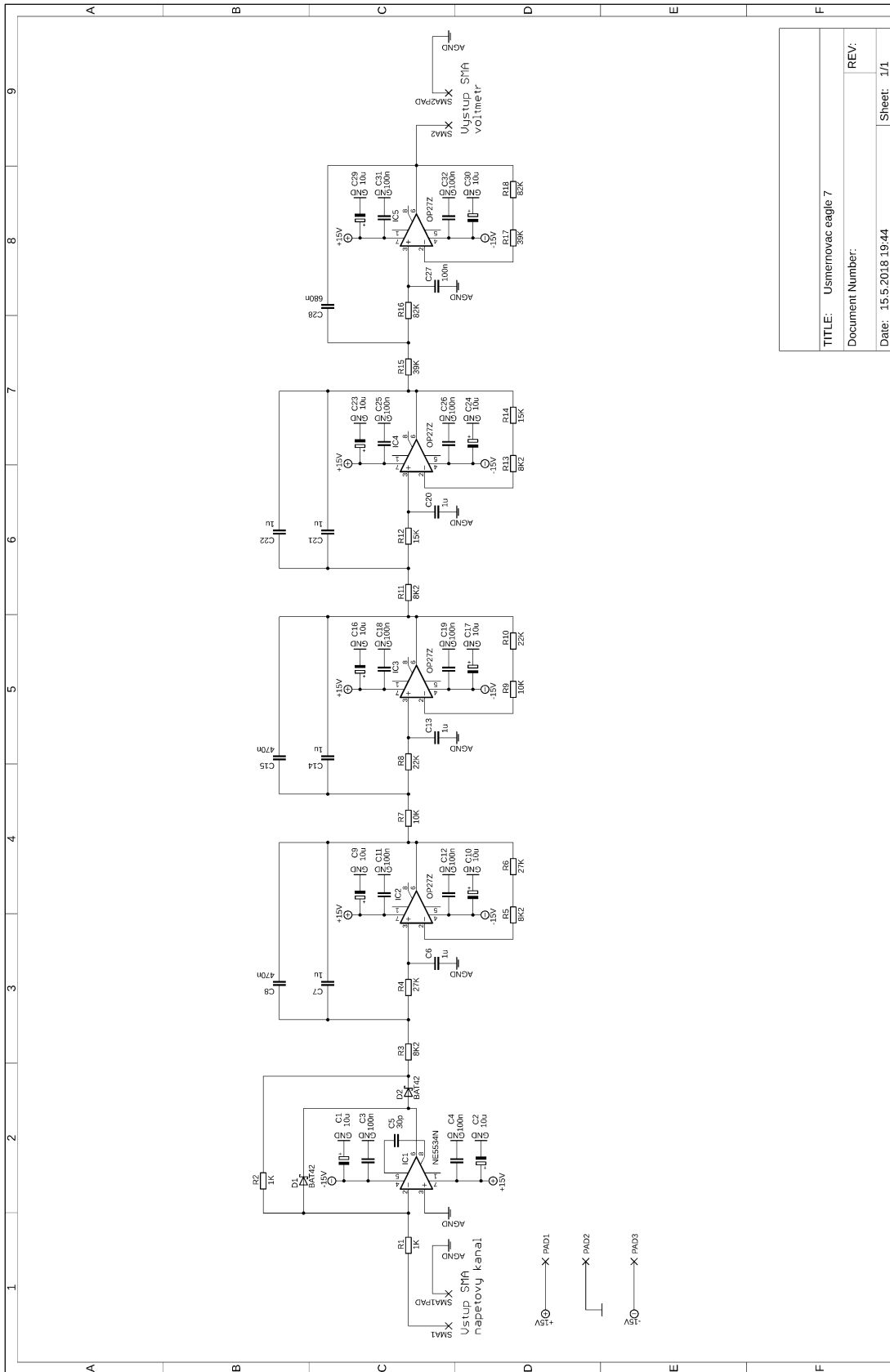
Rozměr desky 88 x 65 [mm], měřítko M1:1

A.12 Deska plošného spoje násobícího bloku – bottom



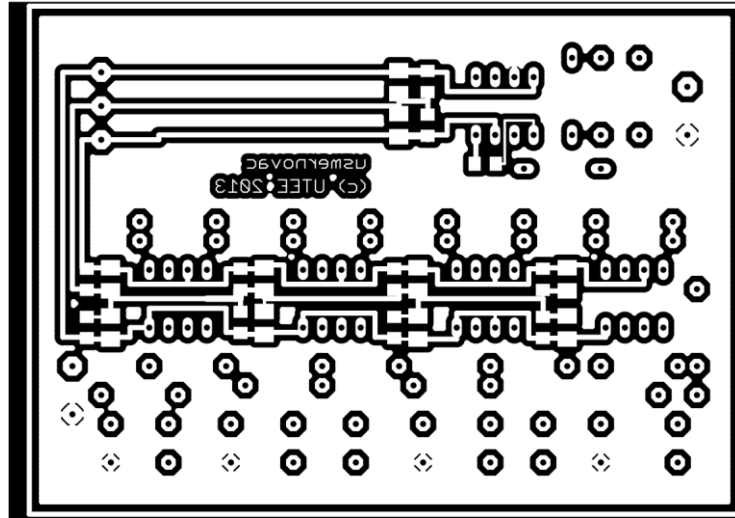
Rozměr desky 88 x 65 [mm], měřítko M1:1

A.13 Obvodové zapojení usměrňujícího bloku



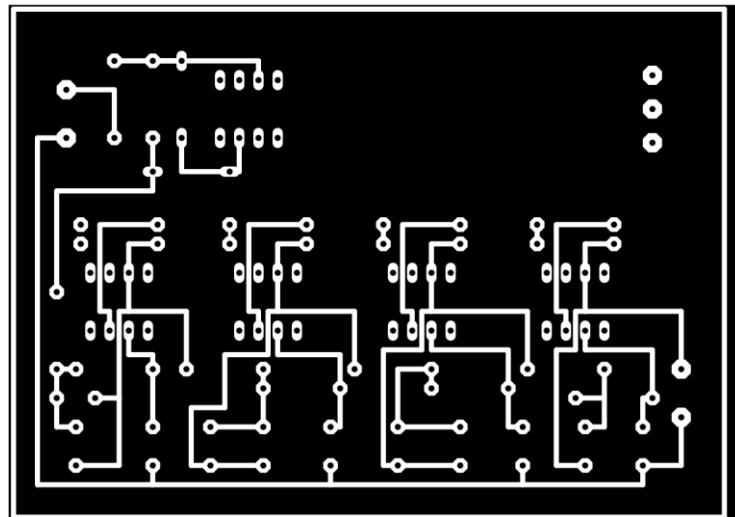
TITLE: Usmernovac eagle 7	REV:
Document Number:	
Date: 15.5.2018 19:44	Sheet: 1/1

A.14 Deska plošného spoje usměrňujícího bloku – top



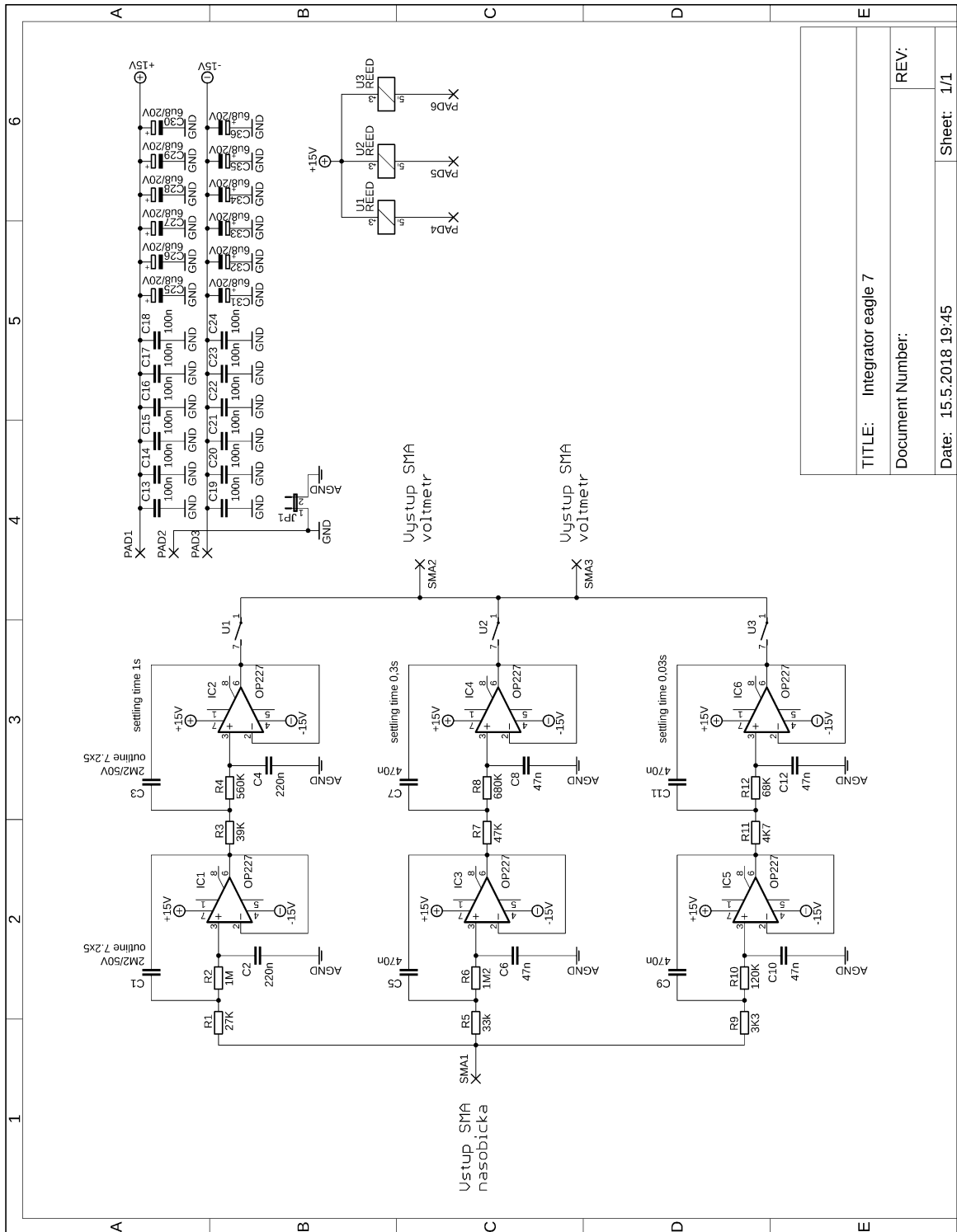
Rozměr desky 94 x 67 [mm], měřítko M1:1

A.15 Deska plošného spoje usměrňujícího bloku – bottom



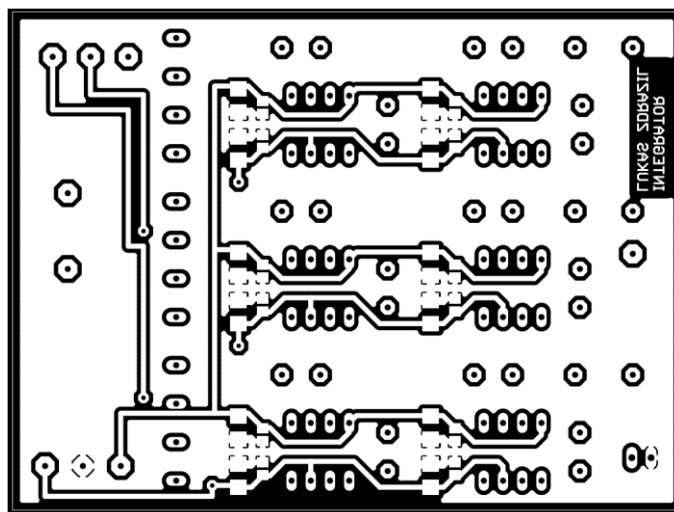
Rozměr desky 94 x 67 [mm], měřítko M1:1

A.16 Obvodové zapojení dolních propustí



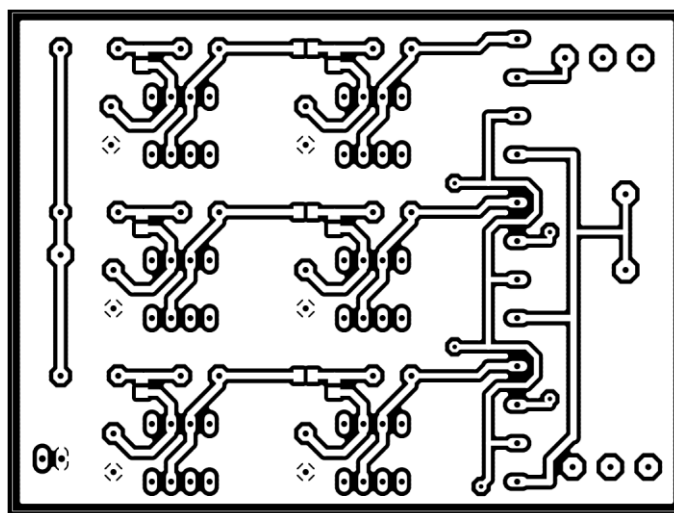
TITLE: Integrator eagle 7
Document Number:
Date: 15.5.2018 19:45
REV:
Sheet: 1/1

A.17 Deska plošného spoje dolních propustí – top



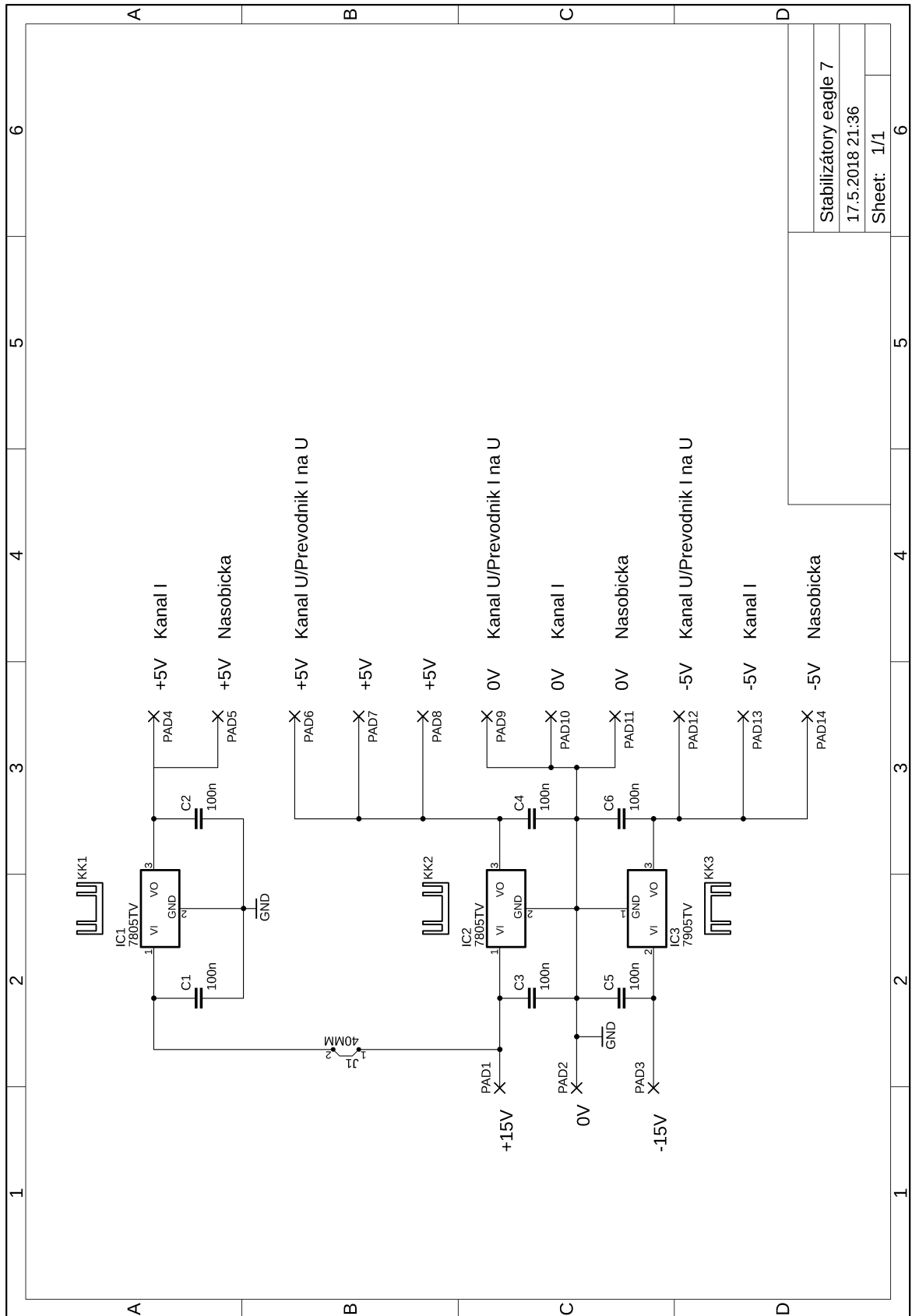
Rozměr desky 88 x 66 [mm], měřítko M1:1

A.18 Deska plošného spoje dolních propustí – bottom

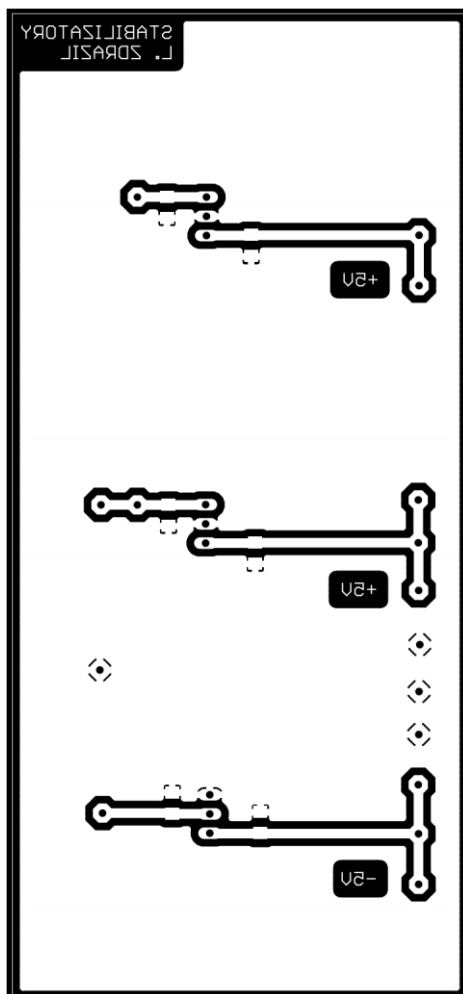


Rozměr desky 88 x 66 [mm], měřítko M1:1

A.19 Obvodové zapojení stabilizátorů s chladiči



A.20 Deska plošného spoje stabilizátorů s chladiči – bottom



Rozměr desky 60 x 130 [mm], měřítko M1:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Seznam součástek pro napěťový kanál

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	1n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C2	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C3	1n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C4	10n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C5	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C6	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C7	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C8	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C9	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C10	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C11	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C12	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C13	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C14	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C15	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C16	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C17	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C18	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C19	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C20	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C21	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C22	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C23	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C24	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C25	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C26	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C27	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C28	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C29	8,2p	C1206	SMD keramický kondenzátor
C30	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C31	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C32	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C33	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C34	Neosazen	C1206	SMD keramický kondenzátor
C35	Neosazen	C1206	SMD keramický kondenzátor
C36	Neosazen	C1206	SMD keramický kondenzátor
C37	Neosazen	C1206	SMD keramický kondenzátor

IC1	OPA656	SO08	Operační zesilovač
IC2	OPA842	SO08	Operační zesilovač
IC3	OPA842	SO08	Operační zesilovač
IC4	OPA842	SO08	Operační zesilovač
IC5	OPA842	SO08	Operační zesilovač
IC6	THS4631	SO08	Operační zesilovač
IC7	Neosazen	TO220H	Stabilizátor napětí
IC8	Neosazen	TO220H	Stabilizátor napětí
J1		15MM	Vzduchová propojka
JP1		JP2	Propojka
JP2		JP2	Propojka
JP3		JP2	Propojka
JP4		JP2	Propojka
R1	1M96	R0805	SMD rezistor
R2	20K	R0805	SMD rezistor
R3	20K	R0805	SMD rezistor
R4	1M8	R0805	SMD rezistor
R5	200K	R0805	SMD rezistor
R6	120R	R0805	SMD rezistor
R7	249R	R0805	SMD rezistor
R8	249R	R0805	SMD rezistor
R9	750R	R0805	SMD rezistor
R10	180K	R0805	SMD rezistor
R11	249R	R0805	SMD rezistor
R12	249R	R0805	SMD rezistor
R13	750R	R0805	SMD rezistor
R14	180K	R0805	SMD rezistor
R15	249R	R0805	SMD rezistor
R16	249R	R0805	SMD rezistor
R17	866R	R0805	SMD rezistor
R18	20K	R0805	SMD rezistor
R19	249R	R0805	SMD rezistor
R20	249R	R0805	SMD rezistor
R21	750R	R0805	SMD rezistor
R22	180K	R0805	SMD rezistor
R23	221R	R0805	SMD rezistor
R24	249R	R0805	SMD rezistor
R25	249R	R0805	SMD rezistor
R26	5R	R0805	SMD rezistor
R27	1K5	R0805	SMD rezistor
R28	1K5	R0805	SMD rezistor
R29	10K	RTRIM64Y	Trimr
R30	5R	R0805	SMD rezistor

R31	1K5	R0805	SMD rezistor
R32	1K5	R0805	SMD rezistor
R33	10K	RTRIM64Y	Trimr
R34	5R	R0805	SMD rezistor
R35	1K5	R0805	SMD rezistor
R36	1K5	R0805	SMD rezistor
R37	10K	RTRIM64Y	Trimr
R38	5R	R0805	SMD rezistor
R39	1K5	R0805	SMD rezistor
R40	1K5	R0805	SMD rezistor
R41	10K	RTRIM64Y	Trimr
R42	Neosazen	R0805	SMD rezistor
R43	50R	R0805	SMD rezistor
U1	CRR	CRR	Rozpínací relé
U2	CRR	CRR	Rozpínací relé
U3	CRR	CRR	Rozpínací relé
U4	CRR	CRR	Rozpínací relé
U5	CRR	CRR	Rozpínací relé
U6	CRR	CRR	Rozpínací relé
U7	CRR	CRR	Rozpínací relé
U8	CRR	CRR	Rozpínací relé
U9	CRR	CRR	Rozpínací relé

B.2 Seznam součástek pro proudový kanál

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	2,2u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C2	2,2u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C3	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C4	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C5	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C6	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C7	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C8	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C9	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C10	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C11	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C12	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C13	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C14	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C15	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor

C16	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C17	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C18	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C19	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C20	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C21	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C22	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C23	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C24	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C25	8,2p	C1206	SMD keramický kondenzátor
C26	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C27	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C28	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C29	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C30	Neosazen	C1206	SMD keramický kondenzátor
C31	Neosazen	C1206	SMD keramický kondenzátor
C32	Neosazen	C1206	SMD keramický kondenzátor
C33	Neosazen	C1206	SMD keramický kondenzátor
IC1	OPA656	SO08	Operační zesilovač
IC2	OPA842	SO08	Operační zesilovač
IC3	OPA842	SO08	Operační zesilovač
IC4	OPA842	SO08	Operační zesilovač
IC5	OPA842	SO08	Operační zesilovač
IC6	THS4631	SO08	Operační zesilovač
IC7	Neosazen	TO220H	Stabilizátor napětí
IC8	Neosazen	TO220H	Stabilizátor napětí
J1		15MM	Vzduchová propojka
JP1		JP2	Propojka
JP2		JP2	Propojka
JP3		JP2	Propojka
JP4		JP2	Propojka
R1	120R	R0805	SMD rezistor
R2	249R	R0805	SMD rezistor
R3	249R	R0805	SMD rezistor
R4	750R	R0805	SMD rezistor
R5	180K	R0805	SMD rezistor
R6	249R	R0805	SMD rezistor
R7	249R	R0805	SMD rezistor
R8	750R	R0805	SMD rezistor
R9	180K	R0805	SMD rezistor
R10	249R	R0805	SMD rezistor
R11	866R	R0805	SMD rezistor
R12	20K	R0805	SMD rezistor

R13	249R	R0805	SMD rezistor
R14	750R	R0805	SMD rezistor
R15	180K	R0805	SMD rezistor
R16	221R	R0805	SMD rezistor
R17	249R	R0805	SMD rezistor
R18	249R	R0805	SMD rezistor
R19	5R	R0805	SMD rezistor
R20	1K5	R0805	SMD rezistor
R21	1K5	R0805	SMD rezistor
R22	10K	RTRIM64Y	Trimr
R23	5R	R0805	SMD rezistor
R24	1K5	R0805	SMD rezistor
R25	1K5	R0805	SMD rezistor
R26	10K	RTRIM64Y	Trimr
R27	5R	R0805	SMD rezistor
R28	1K5	R0805	SMD rezistor
R29	1K5	R0805	SMD rezistor
R30	10K	RTRIM64Y	Trimr
R31	5R	R0805	SMD rezistor
R32	1K5	R0805	SMD rezistor
R33	1K5	R0805	SMD rezistor
R34	10K	RTRIM64Y	Trimr
R35	Neosazen	R0805	SMD rezistor
R36	50R	R0805	SMD rezistor
U1	CRR	CRR	Rozpínací relé
U2	CRR	CRR	Rozpínací relé

B.3 Seznam součástek pro převodník I na U

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C2	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C3	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C4	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
D1	1N4446	DO35-10	Dioda
D2	1N4446	DO35-10	Dioda
IC1	OPA211	SO08	Operační zesilovač
KK1			Pasivní chladič
KK2			Pasivní chladič
Q1	BD139	TO126V	NPN výkonový tranzistor
Q2	BD140	TO126V	PNP výkonový tranzistor

R1	100K	R0805	SMD rezistor
R2	1K	R0805	SMD rezistor
R3	1K	R0805	SMD rezistor
R4	10K	R0805	SMD rezistor
R5	1K	R0805	SMD rezistor
R6	100R	R0805	SMD rezistor
R7	10R	R0805	SMD rezistor
R8	1R	R0805	SMD rezistor
R9	0,1R	R0805	SMD rezistor
R10	47R	R0805	SMD rezistor
R11	47R	R0805	SMD rezistor
R12	47R	R0805	SMD rezistor
R13	47R	R0805	SMD rezistor
R14	47R	R0805	SMD rezistor
R15	47R	R0805	SMD rezistor
U1	CRR	CRR	Rozpínací relé
U2	CRR	CRR	Rozpínací relé
U3	CRR	CRR	Rozpínací relé
U4	CRR	CRR	Rozpínací relé
U5	CRR	CRR	Rozpínací relé
U6	CRR	CRR	Rozpínací relé

B.4 Seznam součástek pro násobící blok

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
AD534	AD534K	N-14	Analogová násobička
AD734	AD734	N-14	Analogová násobička
C1	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C2	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C3	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C4	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C5	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C6	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C7	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C8	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C9	Neosazen	C1206	SMD keramický kondenzátor
C10	Neosazen	C1206	SMD keramický kondenzátor
IC1	Neosazen	TO220H	Stabilizátor napětí
R1	50R	R0805	SMD rezistor
R2	50R	R0805	SMD rezistor
R3	47R	R0805	SMD rezistor

R4	47R	R0805	SMD rezistor
U1	CRR	CRR	Rozpínací relé
U2	CRR	CRR	Rozpínací relé
U3	CRR	CRR	Rozpínací relé
U4	CRR	CRR	Rozpínací relé
U5	CRR	CRR	Rozpínací relé
U6	CRR	CRR	Rozpínací relé

B.5 Seznam součástek pro usměrňující blok

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C2	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C3	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C4	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C5	30p	C1206	SMD keramický kondenzátor
C6	1u	C050-075X075	Fóliový kondenzátor
C7	1u	C050-075X075	Fóliový kondenzátor
C8	470n	C050-075X075	Fóliový kondenzátor
C9	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C10	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C11	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C12	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C13	1u	C050-075X075	Fóliový kondenzátor
C14	1u	C050-075X075	Fóliový kondenzátor
C15	470n	C050-075X075	Fóliový kondenzátor
C16	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C17	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C18	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C19	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C20	1u	C050-075X075	Fóliový kondenzátor
C21	1u	C050-075X075	Fóliový kondenzátor
C22	1u	C050-075X075	Fóliový kondenzátor
C23	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C24	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C25	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C26	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C27	100n	C050-075X075	Fóliový kondenzátor
C28	680n	C050-075X075	Fóliový kondenzátor
C29	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor
C30	10u	B/3528-21R	SMD tantalový kondenzátor

C31	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C32	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
D1	BAT42	DO35-10	Dioda
D2	BAT42	DO35-10	Dioda
IC1	NE5534N	DIL08	Operační zesilovač
IC2	OP27Z	DIL08	Operační zesilovač
IC3	OP27Z	DIL08	Operační zesilovač
IC4	OP27Z	DIL08	Operační zesilovač
IC5	OP27Z	DIL08	Operační zesilovač
R1	1K	0207/10	Vývodový rezistor
R2	1K	0207/10	Vývodový rezistor
R3	8K2	0207/10	Vývodový rezistor
R4	27K	0207/10	Vývodový rezistor
R5	8K2	0207/10	Vývodový rezistor
R6	27K	0207/10	Vývodový rezistor
R7	10K	0207/10	Vývodový rezistor
R8	22K	0207/10	Vývodový rezistor
R9	10K	0207/10	Vývodový rezistor
R10	22K	0207/10	Vývodový rezistor
R11	8K2	0207/10	Vývodový rezistor
R12	15K	0207/10	Vývodový rezistor
R13	8K2	0207/10	Vývodový rezistor
R14	15K	0207/10	Vývodový rezistor
R15	39K	0207/10	Vývodový rezistor
R16	82K	0207/10	Vývodový rezistor
R17	39K	0207/10	Vývodový rezistor
R18	82K	0207/10	Vývodový rezistor

B.6 Seznam součástek pro dolní propusti

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	2M2/50V	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C2	220n	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C3	2M2/50V	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C4	220n	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C5	470n	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C6	47n	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C7	470n	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C8	47n	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C9	470n	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C10	47n	C050-030X075	Fóliový kondenzátor

C11	470n	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C12	47n	C050-030X075	Fóliový kondenzátor
C13	100n	C0805	SMD keramický kondenzátor
C14	100n	C0805	SMD keramický kondenzátor
C15	100n	C0805	SMD keramický kondenzátor
C16	100n	C0805	SMD keramický kondenzátor
C17	100n	C0805	SMD keramický kondenzátor
C18	100n	C0805	SMD keramický kondenzátor
C19	100n	C0805	SMD keramický kondenzátor
C20	100n	C0805	SMD keramický kondenzátor
C21	100n	C0805	SMD keramický kondenzátor
C22	100n	C0805	SMD keramický kondenzátor
C23	100n	C0805	SMD keramický kondenzátor
C24	100n	C0805	SMD keramický kondenzátor
C25	6u8/20V	CT3528	SMD tantalový kondenzátor
C26	6u8/20V	CT3528	SMD tantalový kondenzátor
C27	6u8/20V	CT3528	SMD tantalový kondenzátor
C28	6u8/20V	CT3528	SMD tantalový kondenzátor
C29	6u8/20V	CT3528	SMD tantalový kondenzátor
C30	6u8/20V	CT3528	SMD tantalový kondenzátor
C31	6u8/20V	CT3528	SMD tantalový kondenzátor
C32	6u8/20V	CT3528	SMD tantalový kondenzátor
C33	6u8/20V	CT3528	SMD tantalový kondenzátor
C34	6u8/20V	CT3528	SMD tantalový kondenzátor
C35	6u8/20V	CT3528	SMD tantalový kondenzátor
C36	6u8/20V	CT3528	SMD tantalový kondenzátor
IC1	OP227	DIL08	Operační zesilovač
IC2	OP227	DIL08	Operační zesilovač
IC3	OP227	DIL08	Operační zesilovač
IC4	OP227	DIL08	Operační zesilovač
IC5	OP227	DIL08	Operační zesilovač
IC6	OP227	DIL08	Operační zesilovač
R1	27K	0204/7	Vývodový rezistor
R2	1M	M0805	SMD rezistor
R3	39K	M0805	SMD rezistor
R4	560K	M0805	SMD rezistor
R5	33K	0204/7	Vývodový rezistor
R6	1M2	M0805	SMD rezistor
R7	47K	M0805	SMD rezistor
R8	680K	M0805	SMD rezistor
R9	3K3	0204/7	Vývodový rezistor
R10	120K	M0805	SMD rezistor
R11	4K7	M0805	SMD rezistor

R12	68K	M0805	SMD rezistor
U1	REED	REED	Spínací jazýčkové relé
U2	REED	REED	Spínací jazýčkové relé
U3	REED	REED	Spínací jazýčkové relé

B.7 Seznam součástek pro stabilizátory s chladiči

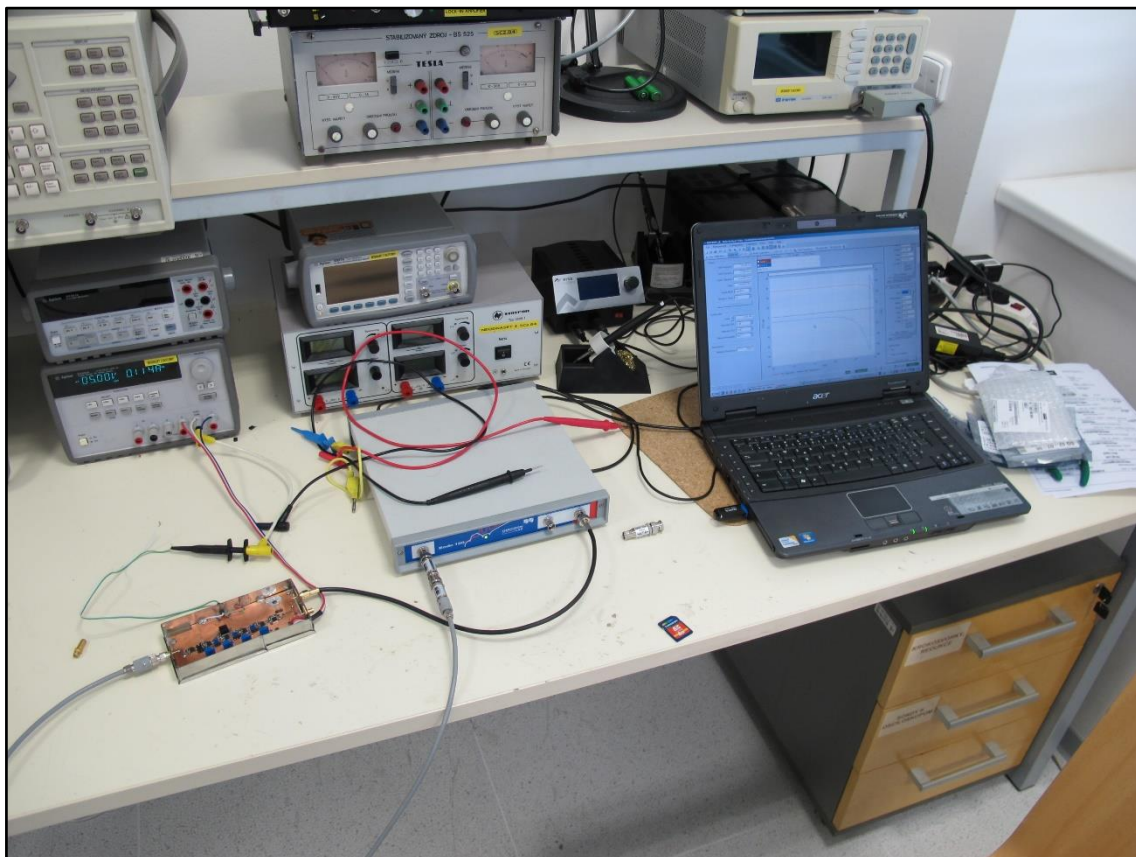
Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C2	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C3	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
C4	100n	C1207	SMD keramický kondenzátor
C5	100n	C1208	SMD keramický kondenzátor
C6	100n	C1206	SMD keramický kondenzátor
IC1	7805T	TO220V	Stabilizátor napětí
IC2	7805T	TO220V	Stabilizátor napětí
IC3	7905T	TO220V	Stabilizátor napětí
J1		40MM	Vzduchová propojka
KK1			Pasivní chladič
KK2			Pasivní chladič
KK3			Pasivní chladič

C SEZNAM POUŽITÝCH MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJŮ

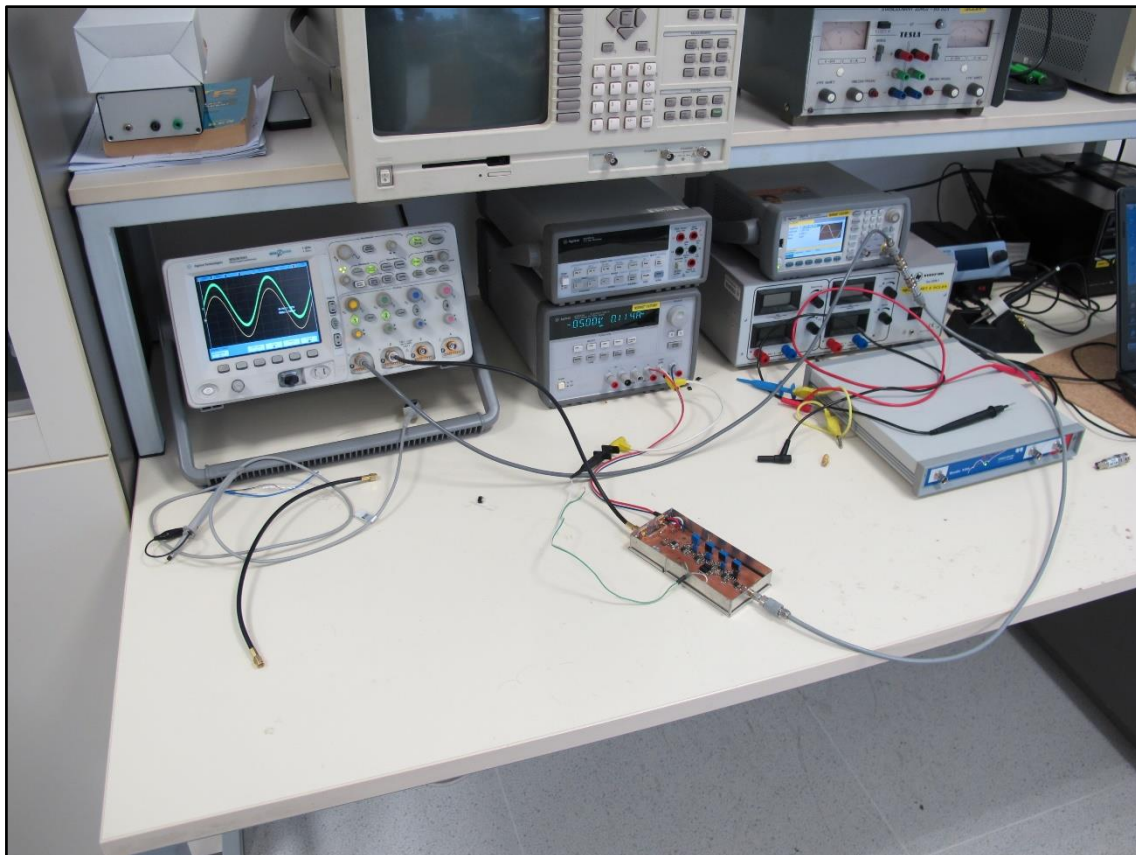
Přístroj	Výrobce	Výrobní číslo	Rozsah
Multimetr	Agilent	34401A	-----
Bode analyzer	OMICRON Lab	-----	-----
Osciloskop	Agilent	MSO6104A	-----
Generátor	Agilent	33521A	1 μ Hz - 30 MHz
Laboratorní zdroj	Agilent	E3631A	0 - 6 V, 5 A/0 - \pm 25 V, 1 A
Laboratorní zdroj	Tesla	BS 525	0 – 30 V, 1A
Útlumové články	Mini-Circuits	15542	20 dB

D OSTATNÍ PŘÍLOHY

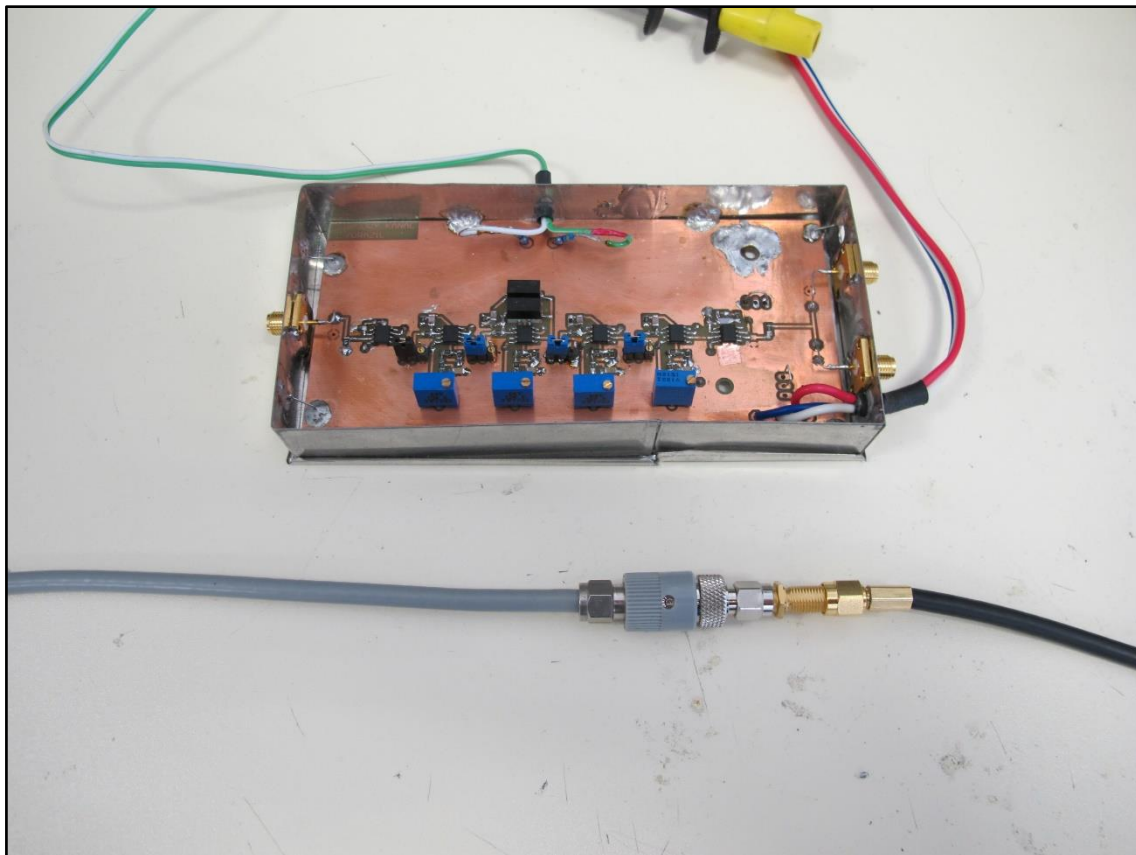
D.1 Měření frekvenčních charakteristik proudového kanálu



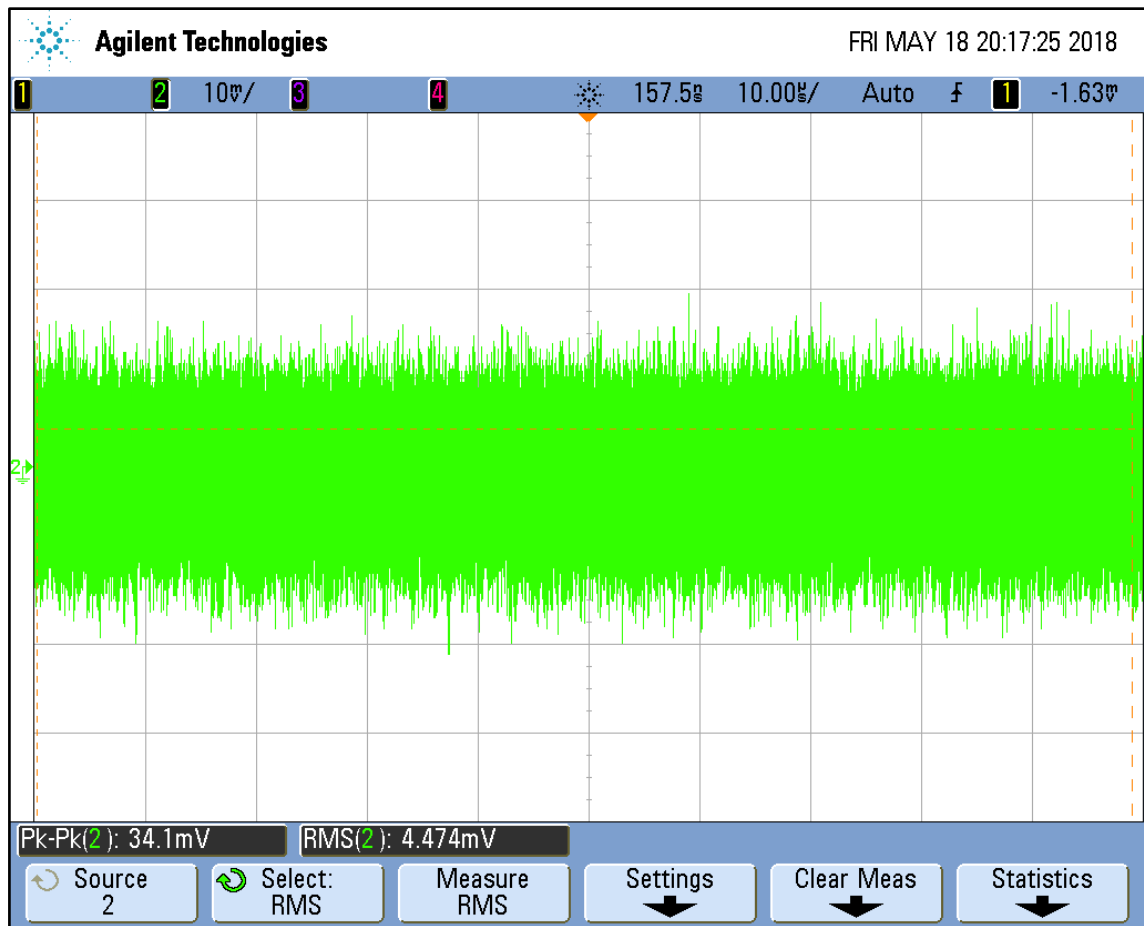
D.2 Měření výstupních průběhů proudového kanálu



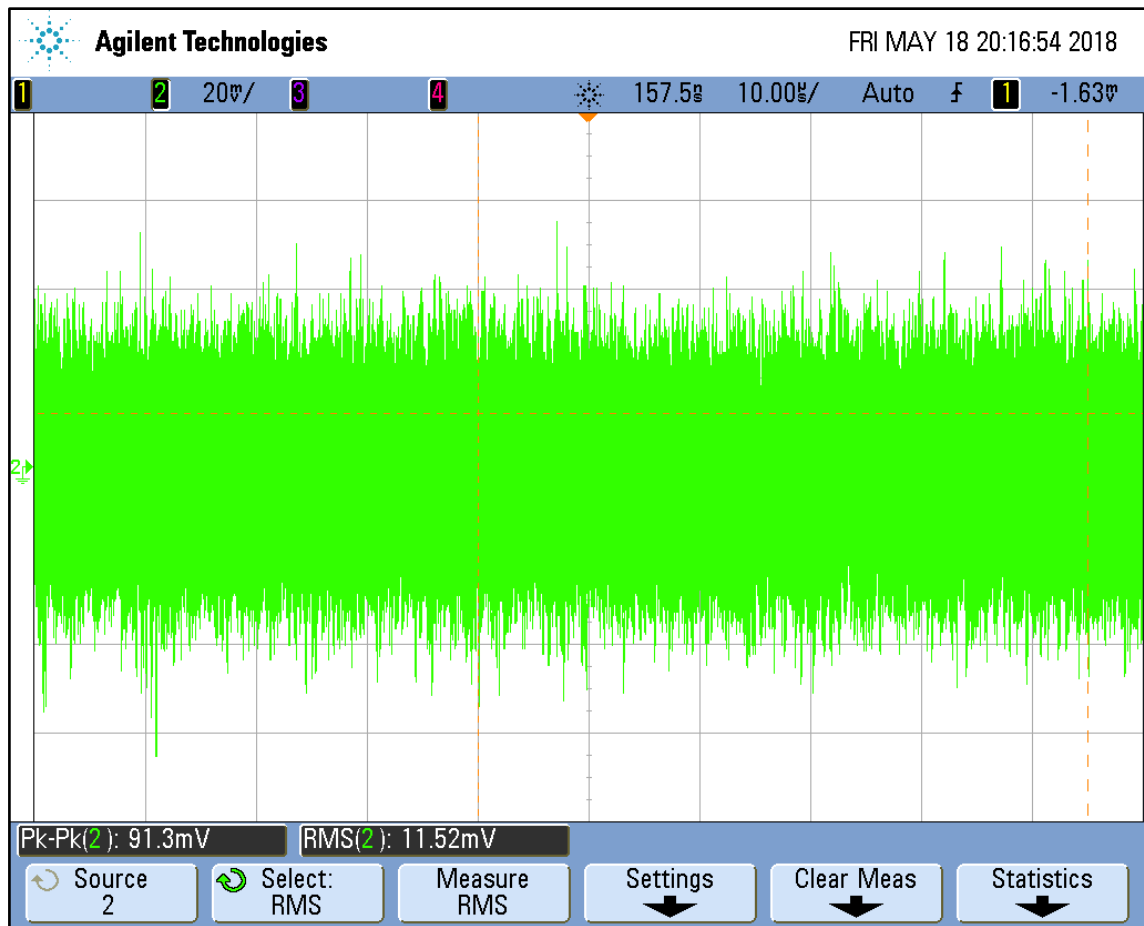
D.3 Proudový kanál ve stínící krabičce



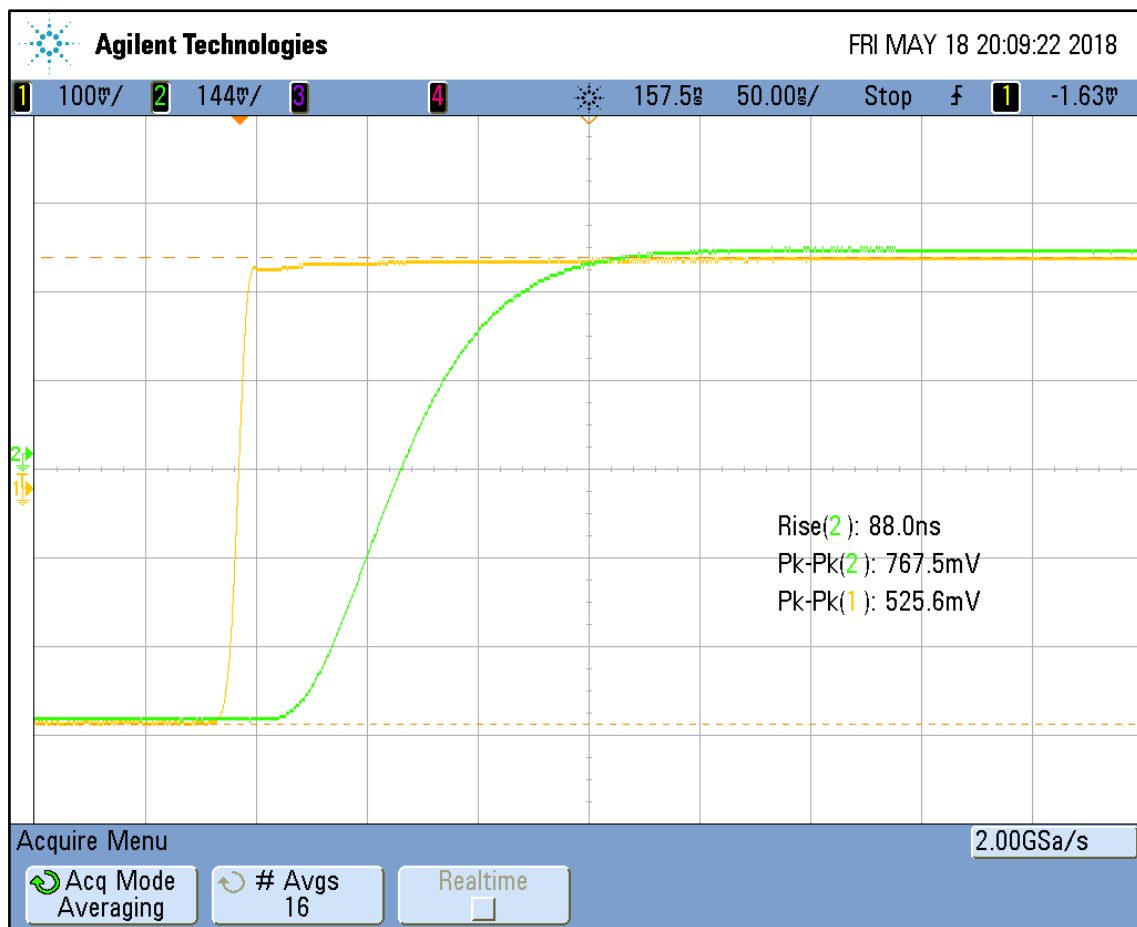
D.4 Šum na výstupu proudového kanálu při zesílení 300



D.5 Šum na výstupu proudového kanálu při zesílení 900

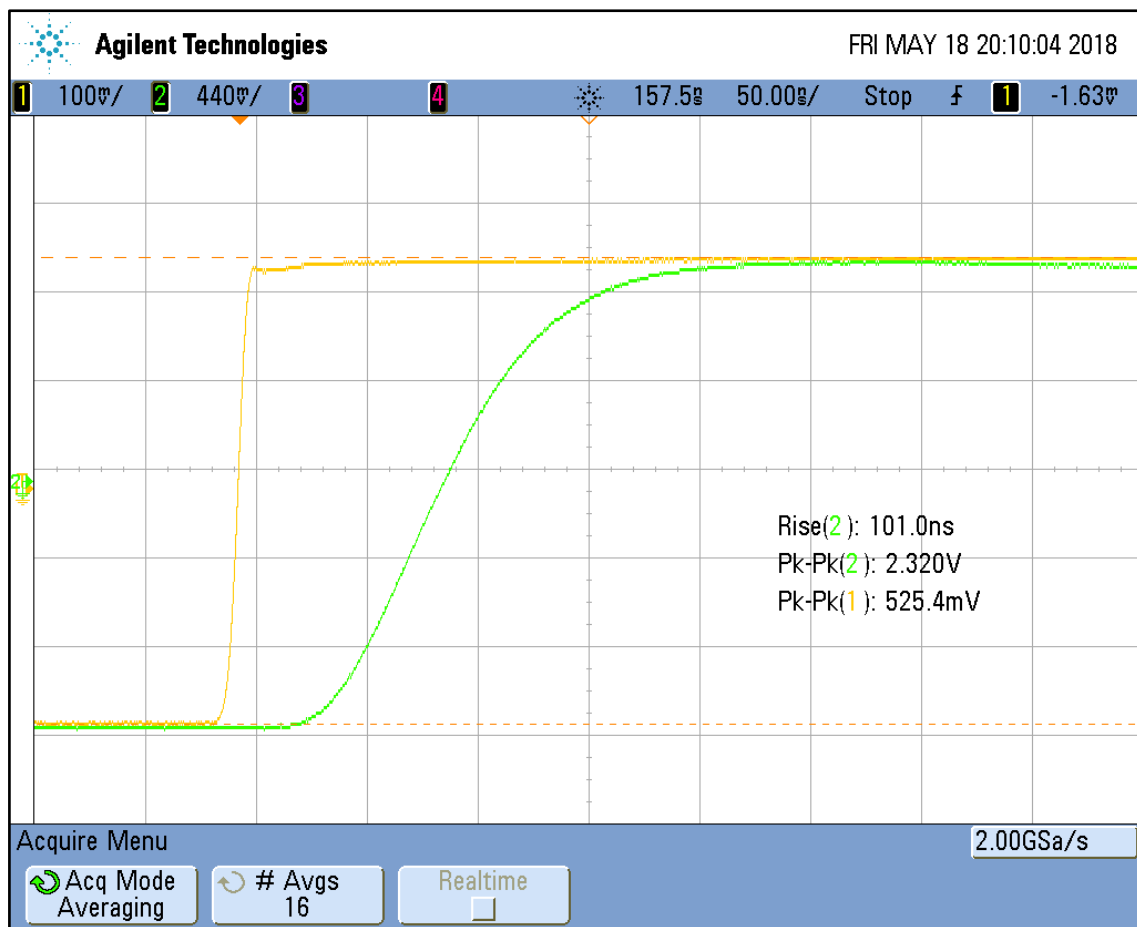


D.6 Odezva proudového kanálu na náběžnou hranu při zesílení 300



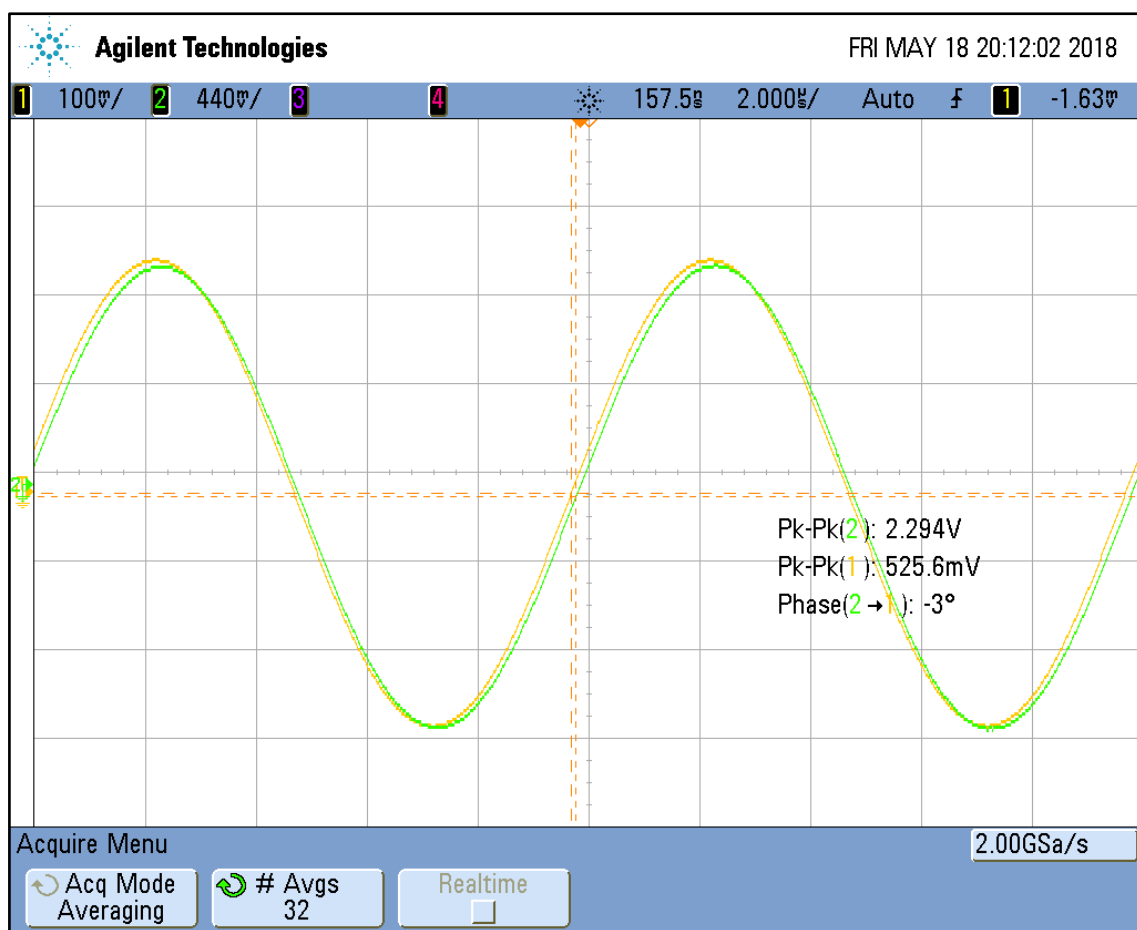
Žlutá křivka znázorňuje průběh napětí na vstupu a zelená křivka znázorňuje průběh napětí na výstupu.

D.7 Odezva proudového kanálu na náběžnou hranu při zesílení 900



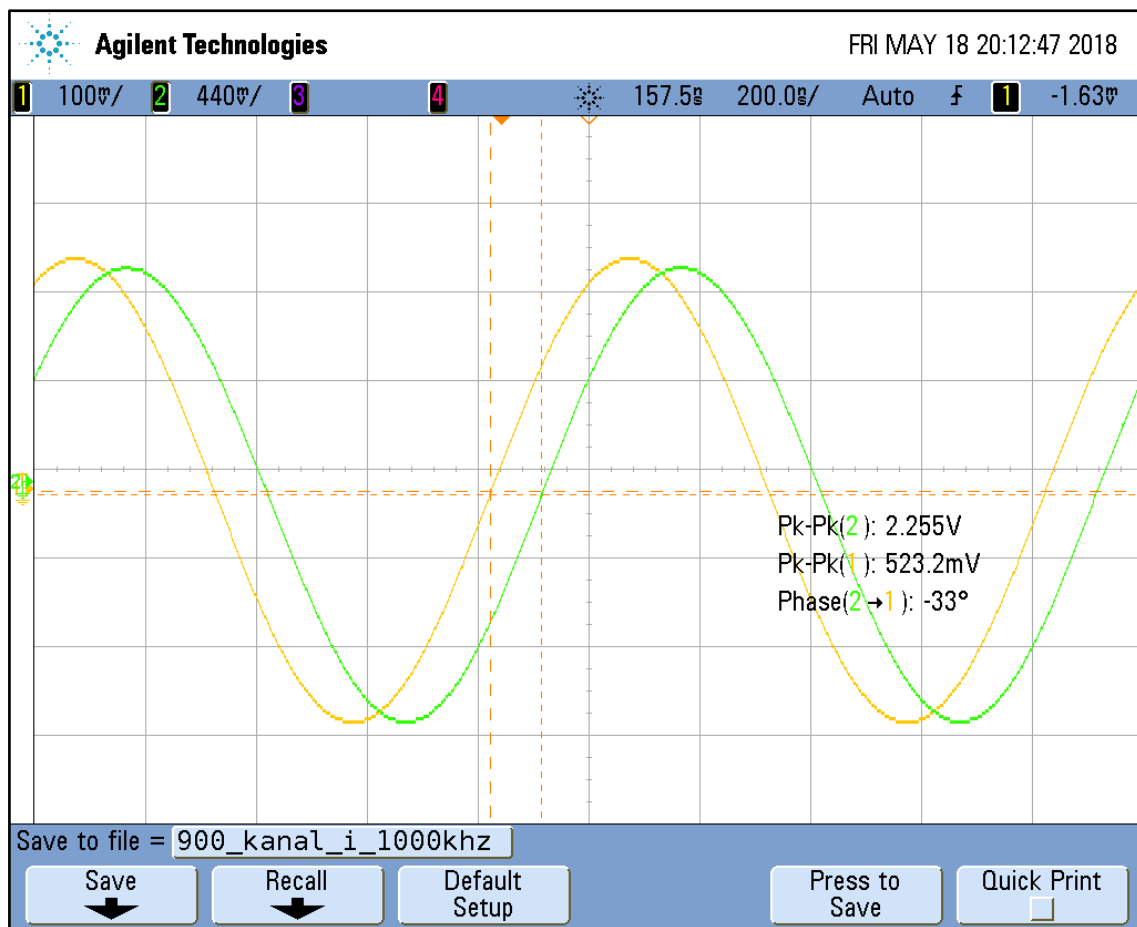
Žlutá křivka znázorňuje průběh napětí na vstupu a zelená křivka znázorňuje průběh napětí na výstupu.

D.8 Časové průběhy proudového kanálu při frekvenci 100 kHz



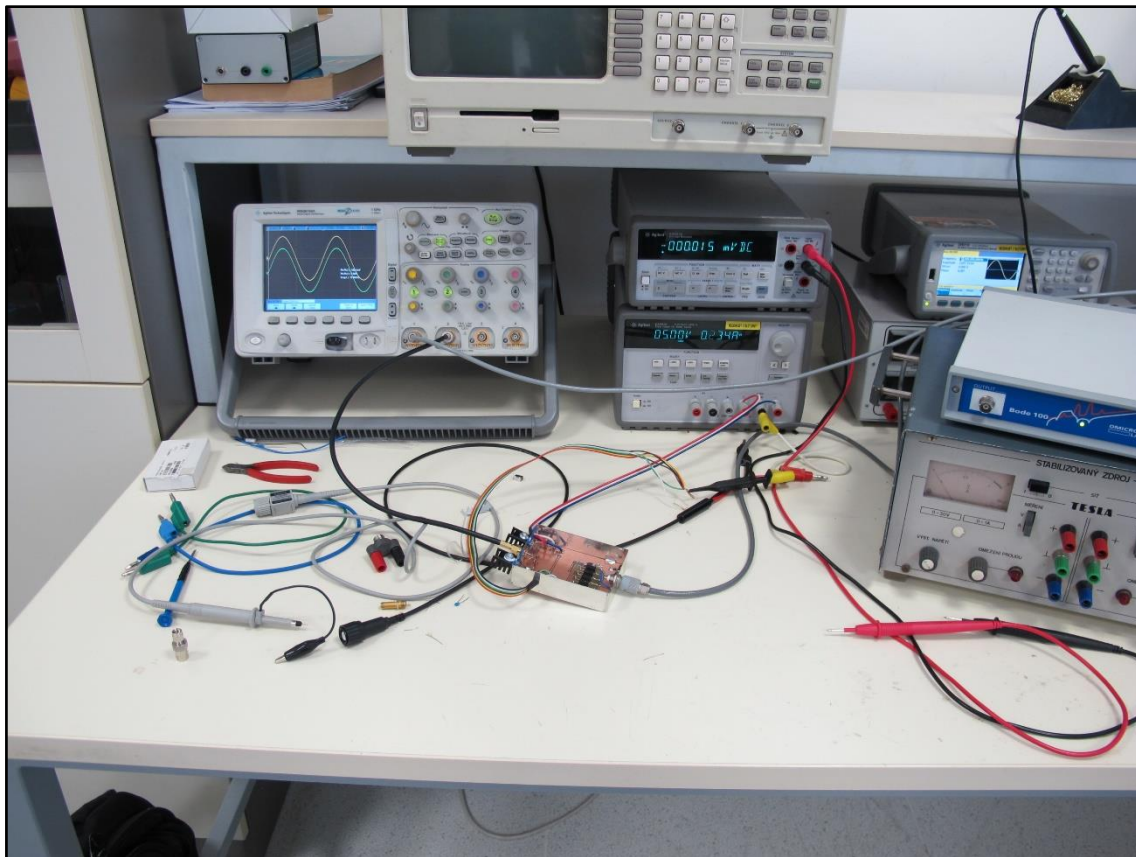
Žlutá křivka znázorňuje průběh napětí na vstupu a zelená křivka znázorňuje průběh napětí na výstupu.

D.9 Časové průběhy proudového kanálu při frekvenci 1 MHz

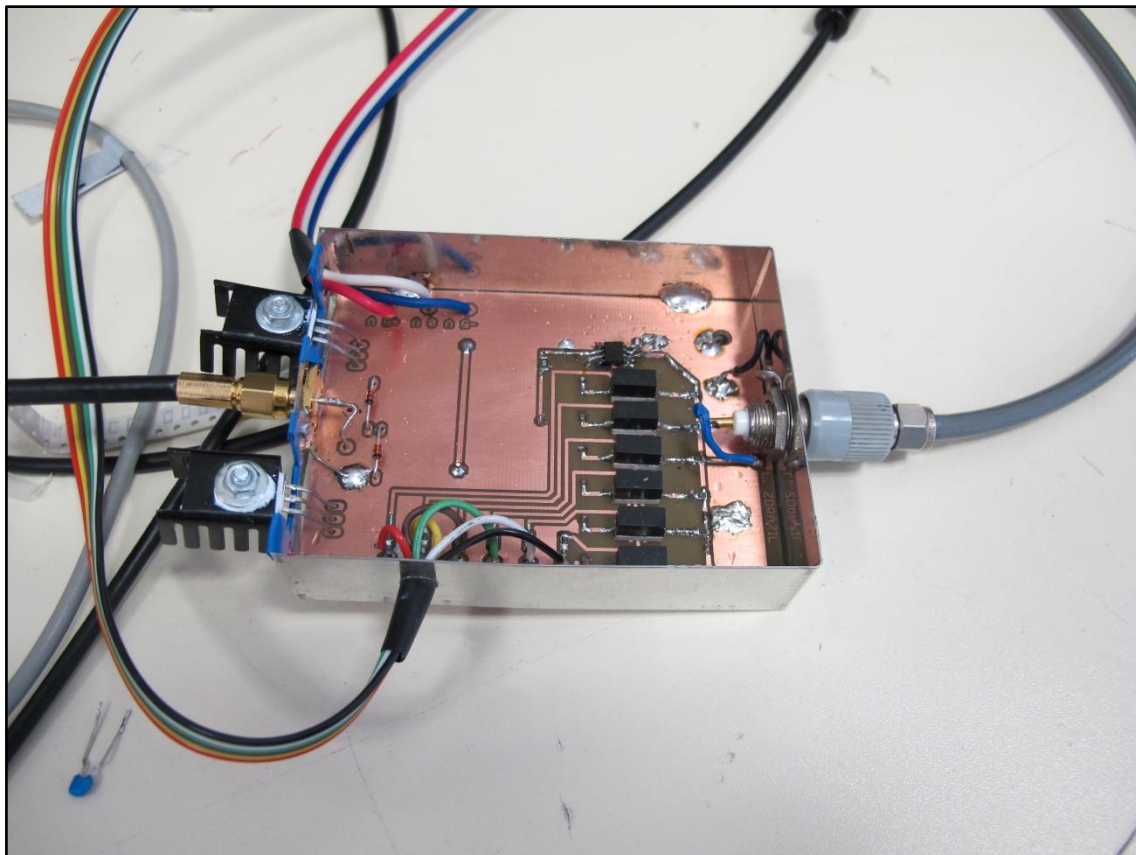


Žlutá křivka znázorňuje průběh napětí na vstupu a zelená křivka znázorňuje průběh napětí na výstupu.

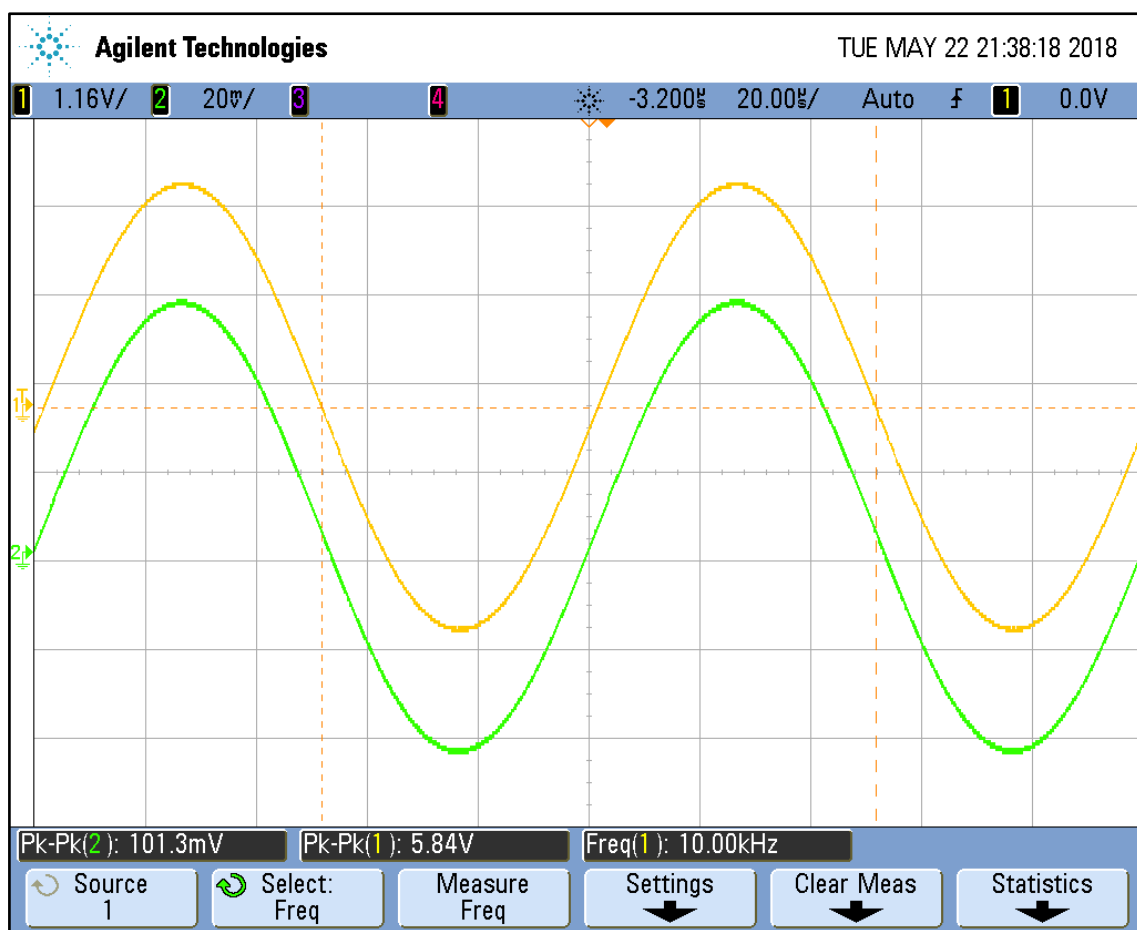
D.10 Měření výstupních průběhů převodníku I na U



D.11 Převodník I na U ve stínící krabičce

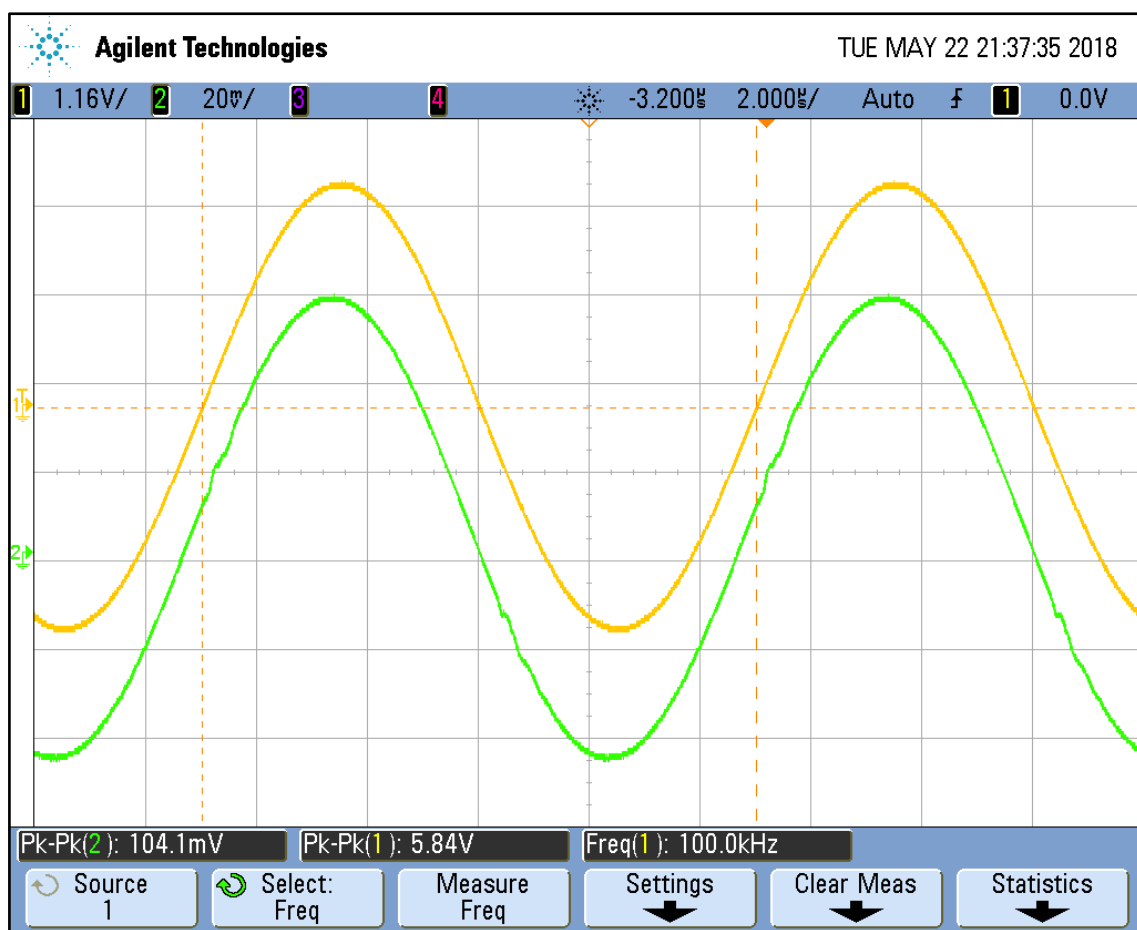


D.12 Časové průběhy převodníku I na U při frekvenci 10 kHz



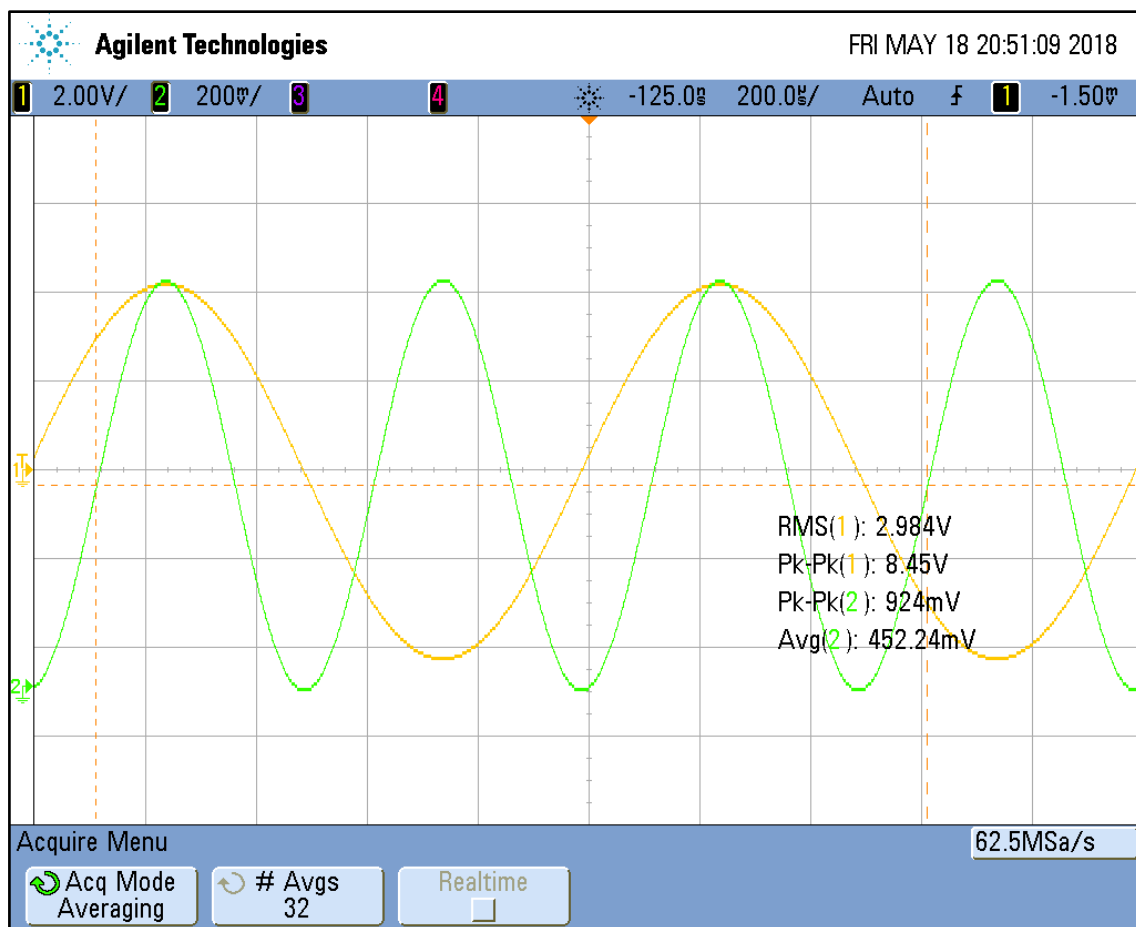
Žlutá křivka znázorňuje průběh napětí na vstupu a zelená křivka znázorňuje průběh napětí na výstupu.

D.13 Časové průběhy převodníku I na U při frekvenci 100 kHz



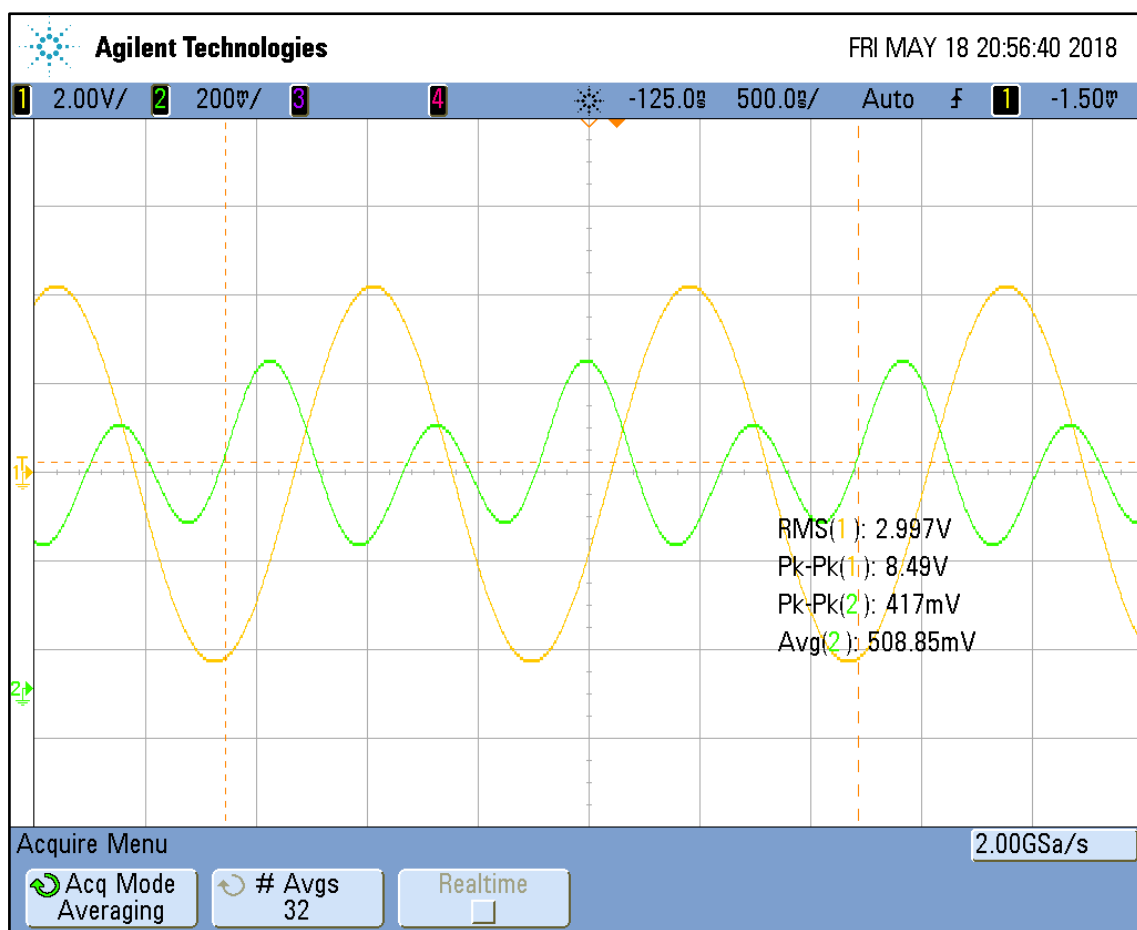
Žlutá křivka znázorňuje průběh napětí na vstupu a zelená křivka znázorňuje průběh napětí na výstupu.

D.14 Časové průběhy násobičky AD534 při frekvenci 1 kHz



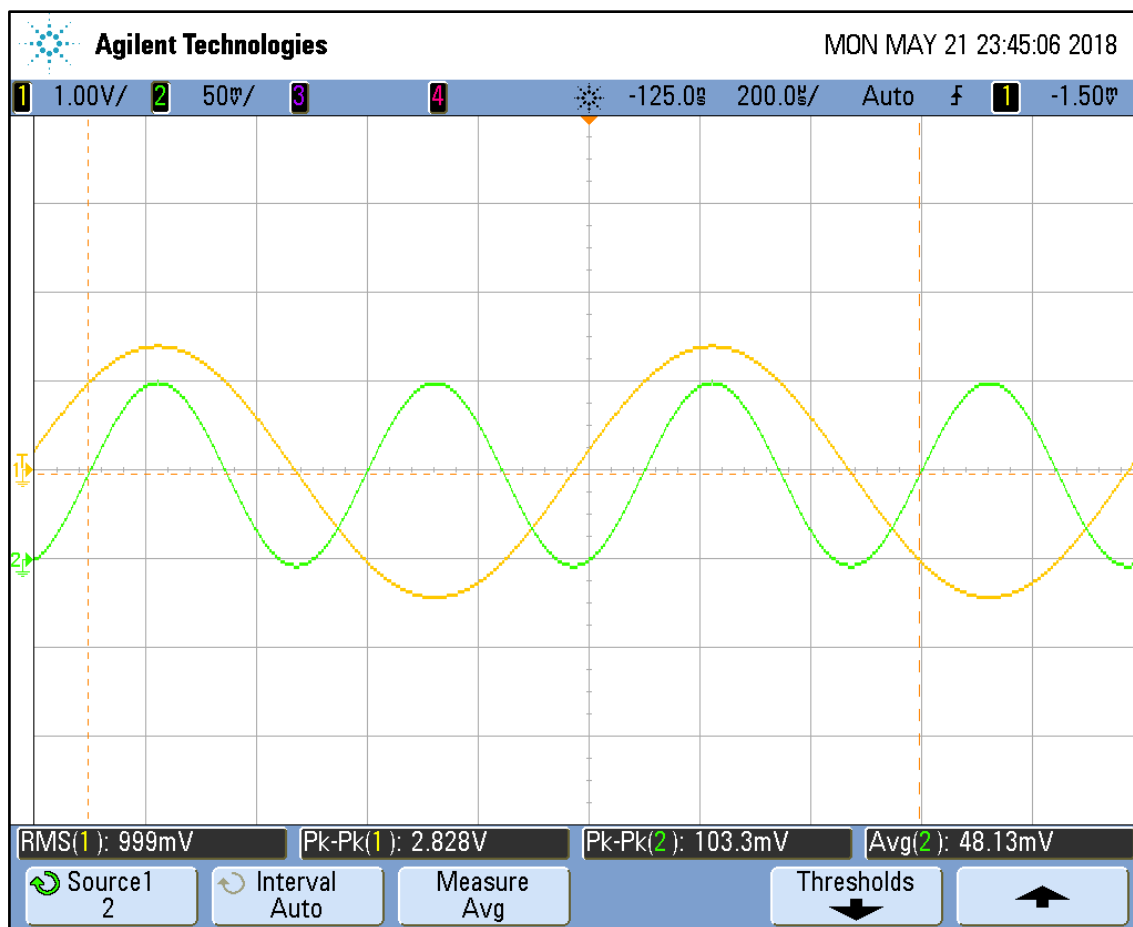
Žlutá křivka znázorňuje průběh napětí na vstupu a zelená křivka znázorňuje průběh napětí na výstupu.

D.15 Časové průběhy násobičky AD534 při frekvenci 700 kHz



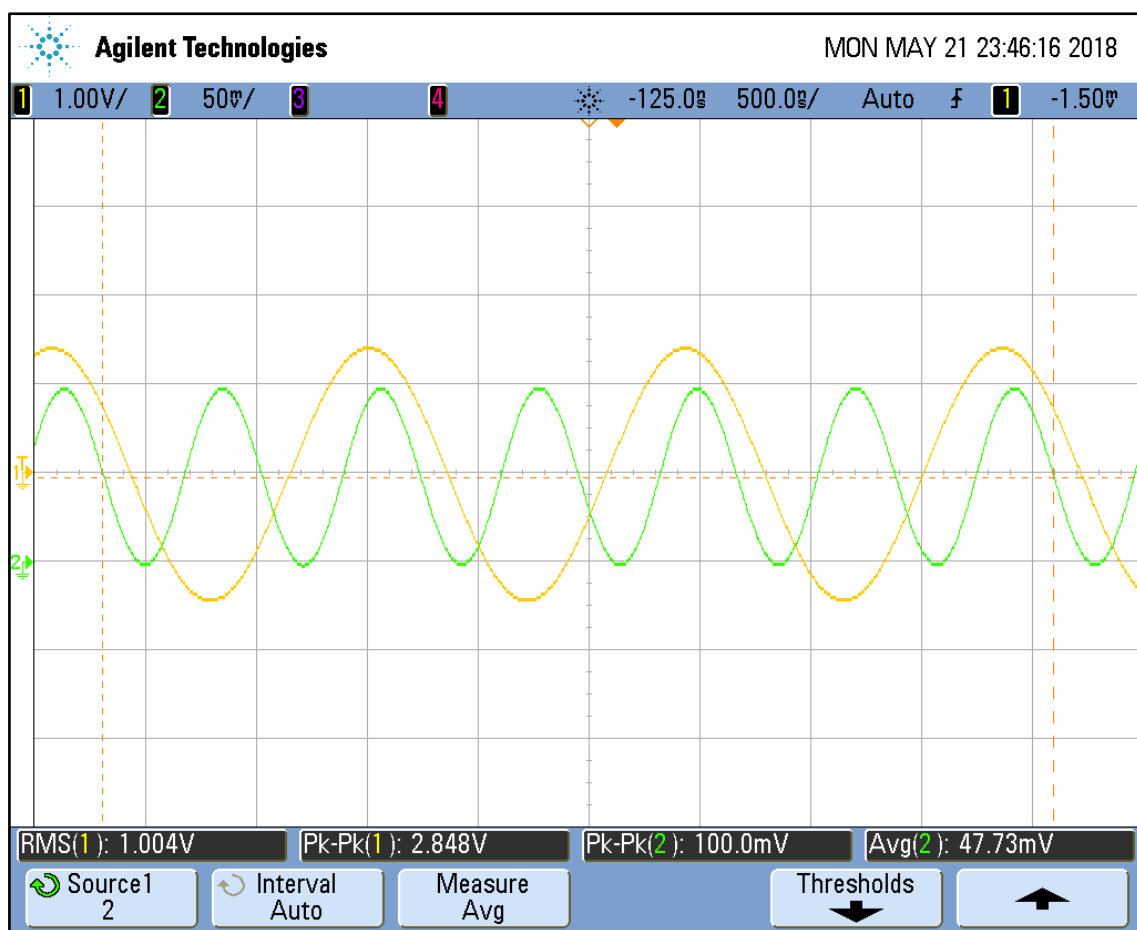
Žlutá křivka znázorňuje průběh napětí na vstupu a zelená křivka znázorňuje průběh napětí na výstupu.

D.16 Časové průběhy násobičky AD734 při frekvenci 1 kHz



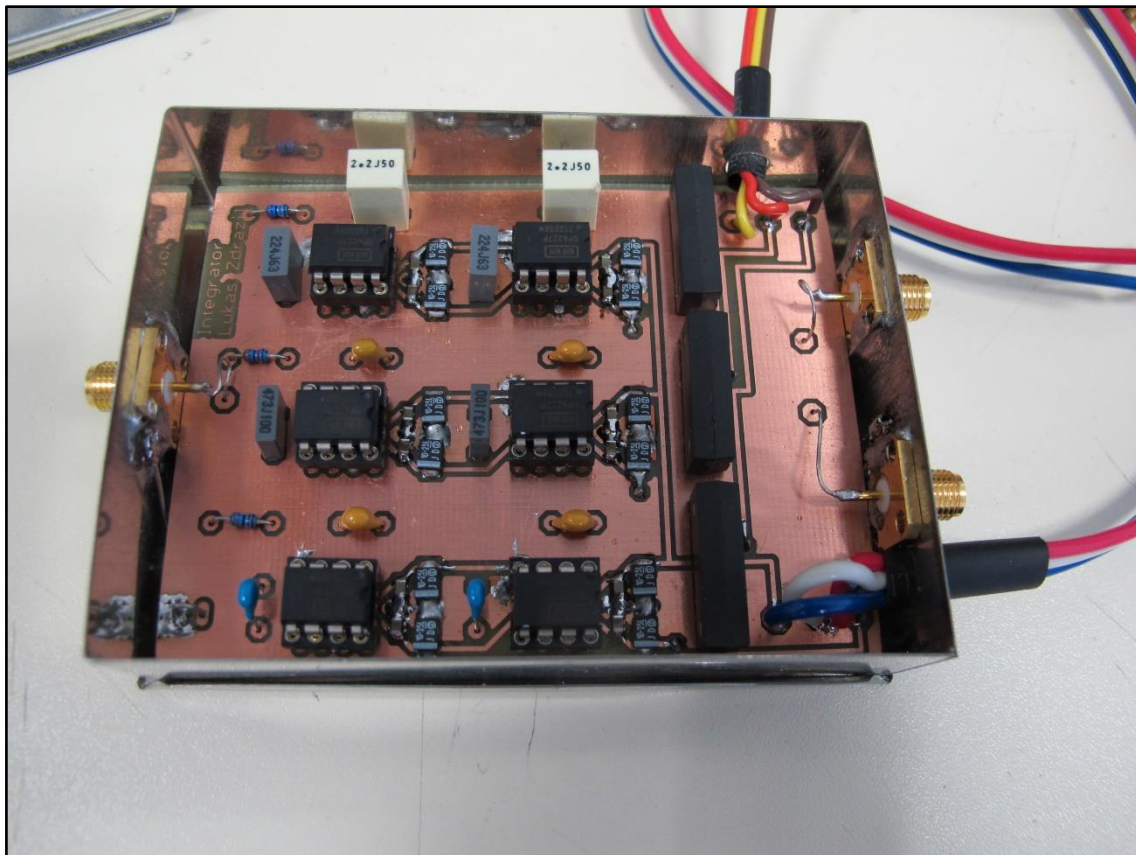
Žlutá křivka znázorňuje průběh napětí na vstupu a zelená křivka znázorňuje průběh napětí na výstupu.

D.17 Časové průběhy násobičky AD734 při frekvenci 700 kHz

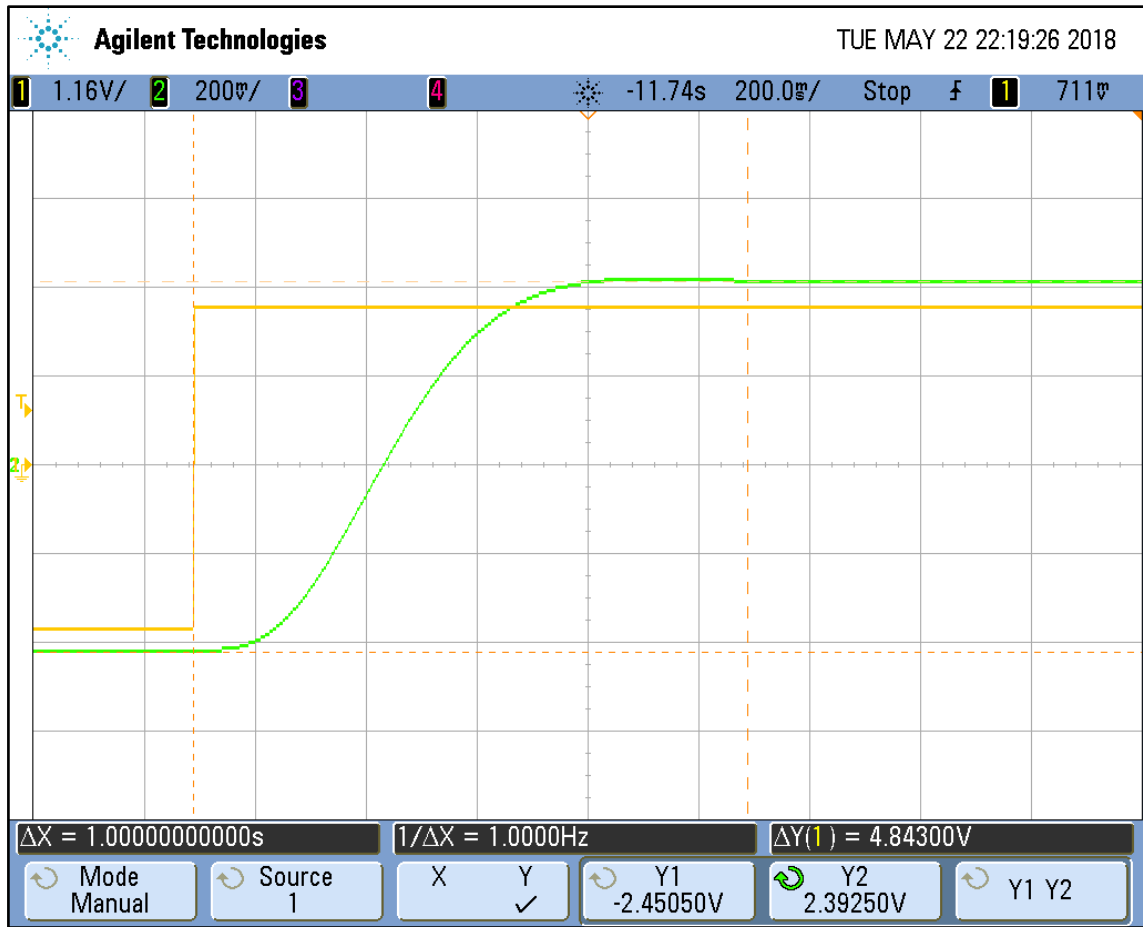


Žlutá křivka znázorňuje průběh napětí na vstupu a zelená křivka znázorňuje průběh napětí na výstupu.

D.18 Dolní propusti ve stínící krabičce

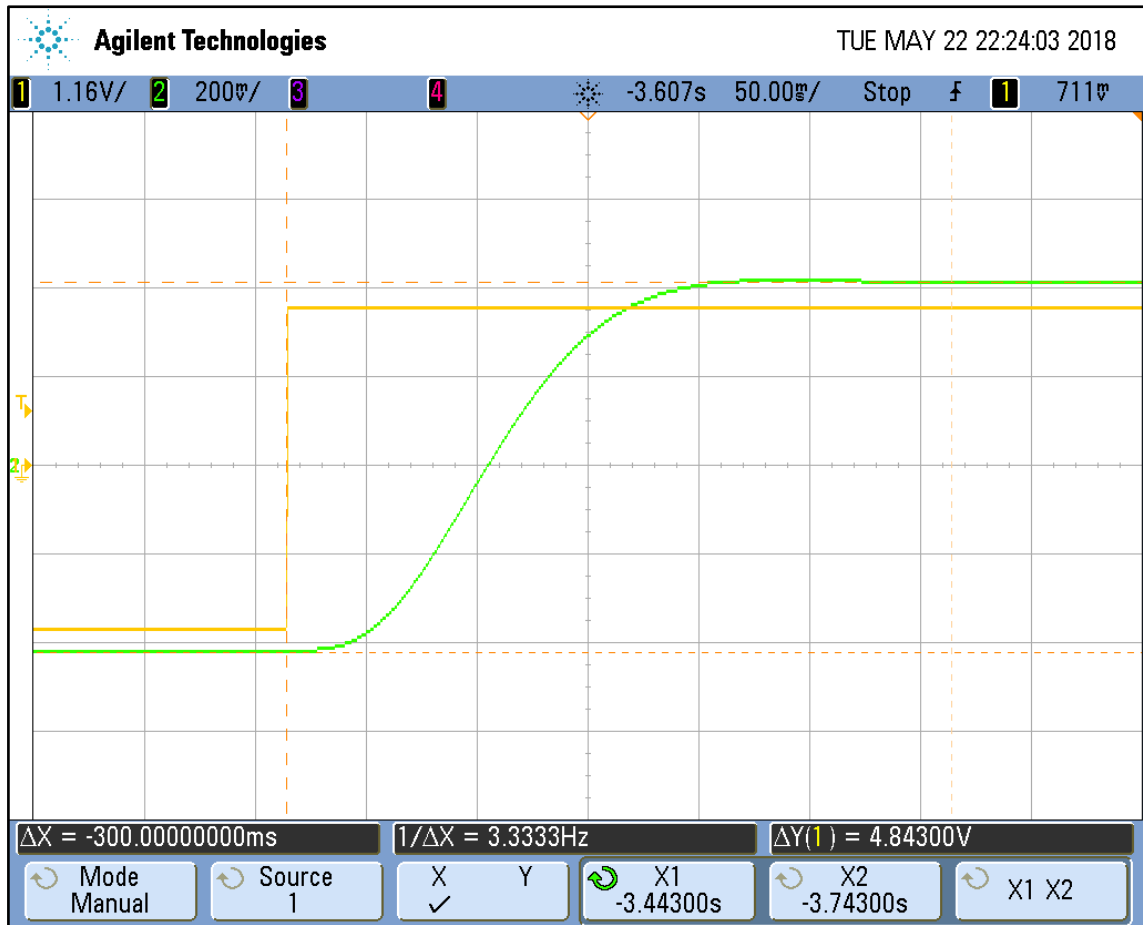


D.19 Odezva filtru s dobou ustálení 1 s na náběžnou hranu



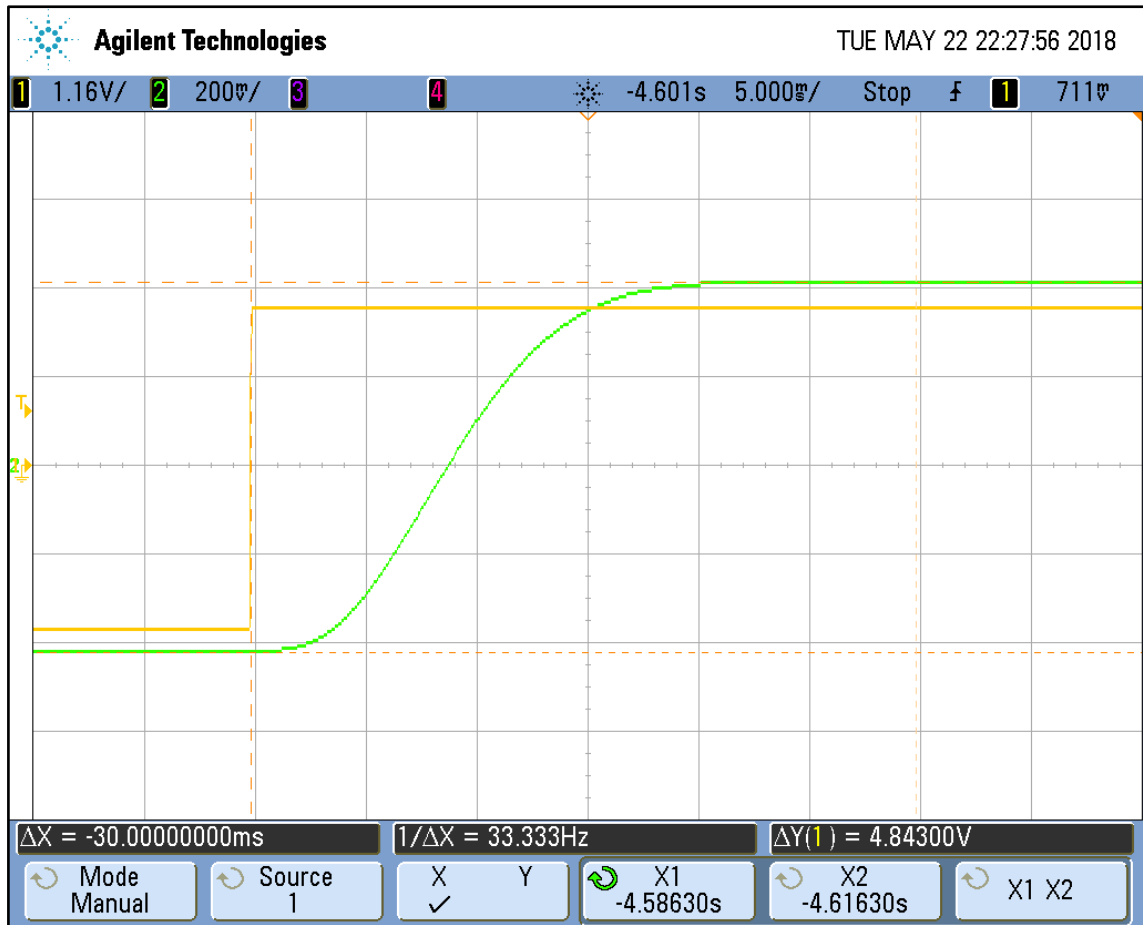
Žlutá křivka znázorňuje průběh napětí na vstupu a zelená křivka znázorňuje průběh napětí na výstupu.

D.20 Odezva filtru s dobou ustálení 300 ms na náběžnou hranu



Žlutá křivka znázorňuje průběh napětí na vstupu a zelená křivka znázorňuje průběh napětí na výstupu.

D.21 Odezva filtru s dobou ustálení 30 ms na náběžnou hranu



Žlutá křivka znázorňuje průběh napětí na vstupu a zelená křivka znázorňuje průběh napětí na výstupu.