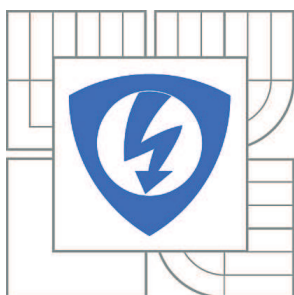


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# ELEKTRONICKY ŘIDITELNÉ AKTIVNÍ PRVKY K REALIZACI OSCILÁTORŮ A FUNKČNÍCH GENERÁTORŮ

ELECTRONICALLY ADJUSTABLE ACTIVE ELEMENTS FOR THE REALIZATION OF  
OSCILLATORS AND FUNCTION GENERATORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

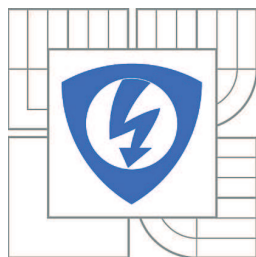
Bc. TOMÁŠ BOKŮVKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF POLÁK

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Telekomunikační a informační technika**

**Student:** Bc. Tomáš Bokůvka

**ID:** 125372

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Elektronicky říditelné aktivní prvky k realizaci oscilátorů a funkčních generátorů**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Z dostupné literatury nastudujte problematiku oscilátorů a funkčních generátorů a možnosti jejich realizací pomocí elektronicky říditelných aktivních prvků. Zaměřte se především na aktivní prvky pracující v proudovém módu. Z vybraných aktivních prvků navrhnete několik zapojení oscilátorů a funkčních generátorů. Funkčnost všech navržených zapojení ověřte pomocí počítačových simulací s dostupnými modely aktivních prvků a vhodně srovnajte odsimulované vlastnosti jednotlivých zapojení. Vybraná zapojení prakticky zrealizujte do podoby desky s navrženými součástkami a proměřte jejich vlastnosti. Výsledky simulací všech navržených obvodů i výsledky z praktické realizace vhodně srovnajte a prezentujte v této práci.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BIOLEK, D., SENANI, R., BIOLKOVA, V., KOLKA, Z. Active Elements for Analog Signal Processing: Classification, Review and New Proposals. Radioengineering. 2008, vol. 17, no. 4. ISSN 1210-2512.  
[2] ŠOTNER, R.; JEŘÁBEK, J.; PETRŽELA, J.; DOSTÁL, T.; VRBA, K. Electronically tunable simple oscillator based on single-output and multiple-output transistor. IEICE Electronics Express, 2009, roč. 6 (2009), č. 20, s. 1476-1482. ISSN: 1349- 2543.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 30.5.2014

**Vedoucí práce:** Ing. Josef Polák

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

## **ABSTRAKT**

Náplní práce je návrh, analýza a realizace nových zapojení oscilátoru a generátoru s využitím elektronicky říditelných aktivních prvků.

V úvodní diskusi jsou teoreticky popsány funkční generátory a oscilátory z hlediska rozdělení, postupu při návrhu, vlastností a oscilačních podmínek. Dále jsou prezentovány některé elektronicky říditelné aktivní prvky, které se jeví jako vhodné pro konstrukci oscilátorů a generátorů. Zejména pak operační transkonduktanční zesilovač OTA (Operational Transconductance Amplifier), napětím řízený zesilovač VCA (Voltage Control Amplifier) a digitálně říditelný proudový zesilovač DACA (Digitally Adjustable Current Amplifier). Právě s těmito prvky je následně prezentováno šest oscilátorů a dva funkční generátory. Jsou zde uvedeny metody jejich návrhu a výsledky simulací. Další část práce je zaměřena na praktickou realizaci a měření vybraných zapojení. V závěru práce jsou diskutovány a porovnány dosažené výsledky simulací a měření.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

elektronické řízení, aktivní prvek, oscilátor, generátor, OTA, DACA, VCA, UCC

## **ABSTRACT**

This thesis is focused on the design, analysis and realization of new oscillator and generator circuits using electronically adjustable active elements.

In the opening discussion the aspects of distribution, proposal, properties and oscillation conditions of generators and oscillators are theoretically described. Next, there are presented some electronically adjustable active elements which appear to be suitable for construction of the oscillators and generators. This covers in particular the Operational Transconductance Amplifier OTA, Voltage Control Amplifier VCA and Digitally Adjustable Current Amplifier DACA. Using these elements the six oscillators and two functional generators are presented. Simulation results and design methods are included. Next part is focused on practical realization and measurement. At the end of the thesis the measurement and simulation results are discussed and compared.

## **KEYWORDS**

electronical adjustment, active element, oscillator, generator, OTA, DACA, VCA, UCC

BOKŮVKA, T. *Elektronicky říditelné aktivní prvky k realizaci oscilátorů a funkčních generátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 105 stran. Vedoucí diplomové práce Ing. Josef Polák.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Elektronicky říditelné aktivní prvky k realizaci oscilátorů a funkčních generátorů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského 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 mé diplomové práce Ing. Josefu Polákovi za cennou a užitečnou pomoc a rady které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>7</b>
<b>seznam tabulek</b> .....	<b>10</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>13</b>
<b>1 Oscilátory</b> .....	<b>14</b>
1.1 Základní charakteristika, rozdělení .....	14
1.2 Oscilační podmínky.....	14
1.3 Charakteristická rovnice .....	15
1.4 Vlastnosti .....	15
1.5 Postup při návrhu oscilátorů .....	17
<b>2 Generátory</b> .....	<b>18</b>
<b>3 Aktivní prvky</b> .....	<b>19</b>
3.1 Pracovní režimy aktivních prvků.....	19
3.1.1 Napěťový režim .....	19
3.1.2 Proudový režim .....	19
3.1.3 Smíšený režim .....	20
3.2 Elektronické řízení a změna parametrů.....	20
3.3 Reálné obvody k realizaci aktivních prvků.....	21
3.3.1 OPA 860 .....	21
3.3.2 VCA810.....	21
3.3.3 DACA.....	22
3.3.4 UCC.....	23
3.4 Proudové konvejory .....	24
3.4.1 Generace proudových konvejerů .....	24
3.4.2 Univerzální proudový konvejer .....	26
3.5 Proudové aledovače.....	28
3.6 Proudové a napěťové zeailovače.....	30
3.6.1 Digitálně říditelný proudový zeailovač (DACA) .....	30
3.6.2 Transkonduktanční operační zesilovač.....	31
<b>4 Obvody pro stabilizaci amplitudy (AGC)</b> .....	<b>33</b>
4.1 Obecná kompozice a popis AGC.....	33
4.2 Zapojení s tranzistorem .....	34
4.3 Zapojení s OZ.....	35
<b>5 Návrh a simulace zapojení oscilátorů</b> .....	<b>36</b>

5.1	Oscilátor s jedním OTA a pasivními prvky .....	36
5.2	Oscilátor se dvěma OTA a pasivními prvky .....	39
5.3	Oscilátor se třemi OTA a pasivními prvky .....	42
5.4	Oscilátor a VCA810 .....	45
5.5	Oscilátor a DACA .....	47
5.6	Oscilátor s DACA a VCA810 .....	49
<b>6</b>	<b>Návrh a simulace zapojení generátorů .....</b>	<b>54</b>
6.1	Generátor a VCA810 .....	54
6.2	Generátor se dvěma OTA .....	57
	<b>Shrnutí výsledků simulací navržených obvodů .....</b>	<b>60</b>
<b>7</b>	<b>Praktická realizace a měření vybraných zapojení .....</b>	<b>62</b>
7.1	Oscilátor a jedním OTA .....	62
7.2	Oscilátor se dvěma OTA .....	65
7.3	Oscilátor a VCA .....	68
7.4	Oscilátor a DACA a VCA .....	71
7.5	Generátor a VCA .....	74
7.6	Generátor se dvěma OTA .....	78
	<b>Shrnutí výsledků měření prakticky realizovaných zapojení .....</b>	<b>82</b>
	<b>Srovnání výsledků simulací a výsledků měření .....</b>	<b>83</b>
	<b>Měření .....</b>	<b>84</b>
	<b>Závěr .....</b>	<b>85</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>86</b>
	<b>Seznam zkratk, veličin a symbolů .....</b>	<b>89</b>
<b>8</b>	<b>Přílohy .....</b>	<b>91</b>
8.1	Oscilátor a jedním OTA .....	91
8.2	Oscilátor se dvěma OTA .....	92
8.3	Oscilátor a VCA .....	93
8.4	Oscilátor s DACA a VCA .....	94
8.5	Generátor a VCA .....	101
8.6	Generátor se dvěma OTA .....	103
	<b>Soubory na CD .....</b>	<b>105</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Vytvořená admitanční síť pro návrh oscilátoru s jedním OTA .....	17
Obr. 3.1: Basic connections OPA860 [23].....	21
Obr. 3.2: Basic connections VCA810 [17] .....	22
Obr. 3.3: Basic connections čipu DACA pro jeden zesilovač [19].....	22
Obr. 3.4: Basic connections prvku UCC [33] .....	23
Obr. 3.5: Schematická značka CCI .....	24
Obr. 3.6: Schematická značka CCII .....	25
Obr. 3.7: Schematická značka univerzálního proudového konvejeoru.....	27
Obr. 3.8: Simulační model prvku UCC.....	28
Obr. 3.9: Schematická značka DO-CF (a), Schematická značka MO-CF (b).....	28
Obr. 3.10: Realizace prvku MO-CF pomocí UCC.....	29
Obr. 3.11: Schematická značka prvku DACA .....	30
Obr. 3.12: Simulační model prvku DACA.....	31
Obr. 3.13: Schematická značka prvku OTA .....	32
Obr. 3.14: Schematická značka BOTA (a), Realizace BOTA pomocí UCC (b) ....	32
Obr. 4.1: Zjednodušený blokový diagram "feedback" AGC.....	33
Obr. 4.2: Zjednodušený blokový diagram "feedforward" AGC .....	34
Obr. 4.3: Realizace AGC s tranzistorem.....	34
Obr. 4.4: AGC s operačním zesilovačem.....	35
Obr. 5.1: Schéma zapojení oscilátoru s jedním OTA a pasivními prvky.....	36
Obr. 5.2: Simulační PSpice schéma oscilátoru s jedním OTA.....	37
Obr. 5.3: Časový průběh na výstupu oscilátoru s jedním OTA .....	38
Obr. 5.4: Spektrum na výstupu oscilátoru s jedním OTA.....	38
Obr. 5.5: Schéma zapojení oscilátoru se dvěma OTA a třemi kondenzátory .....	39
Obr. 5.6: Simulační PSpice schéma oscilátoru se dvěma OTA .....	40
Obr. 5.7: Časový průběh na výstupu oscilátoru se dvěma OTA.....	41
Obr. 5.8: Spektrum na výstupu oscilátoru se dvěma OTA.....	41
Obr. 5.9: Obecné schéma zapojení oscilátoru se třemi OTA .....	42
Obr. 5.10: Simulační PSpice schéma oscilátoru se třemi OTA .....	43
Obr. 5.11: Časový průběh na výstupu oscilátoru se třemi OTA .....	43
Obr. 5.12: Spektrum na výstupu oscilátoru se třemi OTA.....	44
Obr. 5.13: Schéma zapojení oscilátoru s VCA810.....	45
Obr. 5.14: Simulační PSpice schéma oscilátoru s VCA810 .....	45
Obr. 5.15: Časový průběh na výstupu oscilátoru s VCA810 .....	46
Obr. 5.16: Spektrum na výstupu oscilátoru s VCA810.....	46
Obr. 5.17: Schéma zapojení oscilátoru s DACA.....	47
Obr. 5.18: Simulační PSpice schéma oscilátoru s DACA.....	48
Obr. 5.19: Časový průběh na výstupu oscilátoru s DACA .....	48
Obr. 5.20: Spektrum na výstupu oscilátoru s DACA.....	49
Obr. 5.21: Schéma zapojení oscilátoru s DACA a VCA .....	49
Obr. 5.22: Simulační PSpice schéma oscilátoru s DACA a VCA .....	50
Obr. 5.23: Časový průběh na výstupu oscilátoru pro nastavené zesílení $A=1$ .....	51
Obr. 5.24: Spektrum na výstupu oscilátoru pro nastavené zesílení $A=1$ .....	51
Obr. 5.25: Spektrum na výstupu oscilátoru pro různá zesílení DACA.....	52
Obr. 5.26: Spektrum na výstupu oscilátoru se zavedeným AGC.....	52
Obr. 5.27: Zapojení oscilátoru s DACA a VCA s připojeným obvodem AGC .....	53

Obr. 6.1: Schéma zapojení generátoru s VCA810 .....	54
Obr. 6.2: Simulační PSpice schéma generátoru s VCA810 .....	54
Obr. 6.3: Generované časové průběhy .....	55
Obr. 6.4: Spektrum obdélníkového signálu .....	55
Obr. 6.5: Schéma zapojení generátoru se dvěma OTA .....	57
Obr. 6.6: Simulační PSpice schéma generátoru se dvěma OTA .....	57
Obr. 6.7: Časové průběhy na výstupu generátoru se dvěma OTA .....	58
Obr. 6.8: Spektrum generovaného obdélníkového signálu .....	58
Obr. 7.1: Schéma zapojení oscilátoru s jedním OPA860 z programu Eagle .....	62
Obr. 7.2: Navržená deska plošných spojů oscilátoru s jedním OTA .....	63
Obr. 7.3: Časový průběh na výstupu oscilátoru OSC_1OTA .....	63
Obr. 7.4: Spektrum signálu na výstupu oscilátoru .....	64
Obr. 7.5: Schéma oscilátoru z programu Eagle .....	65
Obr. 7.6: Horní (a) a spodní (b) strana desky plošných spojů OSC_2OTA .....	66
Obr. 7.7: Časový průběh na výstupu oscilátoru OSC_2OTA .....	66
Obr. 7.8: Spektrum oscilátoru OSC_2OTA .....	67
Obr. 7.9: Schéma zapojení oscilátoru OSC_VCA z programu Eagle .....	68
Obr. 7.10: Navržená deska plošných spojů oscilátoru OSC_VCA .....	69
Obr. 7.11: Časový průběh napětí na výstupu oscilátoru OSC_VCA .....	69
Obr. 7.12: Spektrum signálu na výstupu oscilátoru OSC_VCA .....	70
Obr. 7.13: Horní (a) a spodní (b) strana navržené DPS .....	71
Obr. 7.14: Průběh na výstupu OSC_DACA_VCA pro nastavené A=1 .....	72
Obr. 7.15: Spektrum signálu na výstupu OSC_DACA_VCA pro nastavené A=1 ..	72
Obr. 7.16: Schéma zapojení generátoru s VCA z programu Eagle .....	74
Obr. 7.17: Horní strana navržené DPS generátoru s VCA z programu Eagle .....	74
Obr. 7.18: Průběh napětí na obdélníkovém výstupu generátoru s VCA .....	75
Obr. 7.19: Průběh napětí na trojúhelníkovém výstupu generátoru s VCA .....	76
Obr. 7.20: Spektrum obdélníkového průběhu .....	76
Obr. 7.21: Schéma zapojení generátoru se dvěma OTA z programu Eagle .....	78
Obr. 7.22: Horní a spodní strana navržené DPS generátoru se dvěma OTA .....	79
Obr. 7.23: Naměřené průběhy na výstupu generátoru .....	79
Obr. 7.24: Spektrum obdélníkového průběhu na výstupu generátoru .....	80
Obr. 8.1: Horní strana osazené DPS - oscilátor s jedním OTA .....	91
Obr. 8.2: Spodní strana osazené DPS - oscilátor s jedním OTA .....	91
Obr. 8.3: Horní strana osazené DPS - oscilátor se dvěma OTA .....	92
Obr. 8.4: Spodní strana osazené DPS - oscilátor se dvěma OTA .....	92
Obr. 8.5: Nežádoucí signál dosažený při měření OSC_2OTA .....	93
Obr. 8.6: Horní strana osazené DPS - oscilátor s VCA .....	93
Obr. 8.7: Spodní strana osazené DPS - oscilátor s VCA .....	93
Obr. 8.8: Horní strana osazené DPS - oscilátor s DACA a VCA .....	95
Obr. 8.9: Spodní strana osazené DPS - oscilátor s DACA a VCA .....	95
Obr. 8.10: Schéma zapojení oscilátoru s DACA a VCA z programu Eagle .....	96
Obr. 8.11: Ukázka měření OSC_DACA_VCA na osciloskopu - časový průběh ...	97
Obr. 8.12: Ukázka měření OSC_DACA_VCA na osciloskopu – spektrum .....	97
Obr. 8.13: Výstupní signál OSC_DACA_VCA pro nastavené A=2 .....	98
Obr. 8.14: Spektrum signálu na výstupu OSC_DACA_VCA pro nastavené A=2 ..	98
Obr. 8.15: Výstupní signál OSC_DACA_VCA pro nastavené A=3 .....	98
Obr. 8.16: Spektrum signálu na výstupu OSC_DACA_VCA pro nastavené A=3 ..	98
Obr. 8.17: Výstupní signál OSC_DACA_VCA pro nastavené A=4 .....	99

Obr. 8.18: Spektrum signálu na výstupu OSC_DACA_VCA pro nastavené $A=4$ .	99
Obr. 8.19: Srovnání průběhů na výstupu AGC pro zesílení DACA 1 a 8 .....	99
Obr. 8.20: Horní strana DPS oscilátoru s DACA a VCA – externí realizace .....	100
Obr. 8.21: Spodní strana DPS oscilátoru s DACA a VCA – externí realizace .....	100
Obr. 8.22: Horní strana osazené DPS - generátor s VCA .....	101
Obr. 8.23: Dolní strana osazené DPS - generátor s VCA .....	101
Obr. 8.24: Ukázka deformace obdélníkového signálu .....	101
Obr. 8.25: Ukázka měření trojúhelníku na osciloskopu.....	102
Obr. 8.26: Ukázka měření obdélníku na osciloskopu .....	102
Obr. 8.27: Horní strana osazené DPS - generátor se dvěma OTA .....	103
Obr. 8.28: Dolní strana osazené DPS - generátor se dvěma OTA .....	103
Obr. 8.29: Ukázka výsledků měření generátoru na osciloskopu.....	104
Obr. 8.30: Ukázka výsledků měření generátoru na osciloskopu - spektrum OBD	104

## SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Typy proudových konvektorů podle koeficientů a, b, c .....	25
Tab. 3.2: Impedanční úrovně.....	26
Tab. 3.3: Příklad realizace různých typů proudových konvektorů .....	27
Tab. 3.4: Impedance vstupu a výstupů MO-CF při realizaci pomocí UCC .....	29
Tab. 5.1: Napěťové úrovně jednotlivých harmonických složek spektra.....	38
Tab. 5.2: Napěťové úrovně jednotlivých harmonických složek spektra.....	42
Tab. 5.3: Napěťové úrovně jednotlivých harmonických složek .....	44
Tab. 5.4: Napěťové úrovně jednotlivých harmonických složek spektra.....	47
Tab. 6.1: Přehled napěťových úrovní jednotlivých harmonických složek spektra .	56
Tab. 6.2: Úrovně napětí jednotlivých harmonických složek.....	59
Tab. 6.3: Shrnutí navržených zapojení a jejich parametrů .....	61
Tab. 7.1: Přehled napěťových úrovní harmonických složek spektra OSC_1OTA .	64
Tab. 7.2: Přehled napěťových úrovní harmonických složek spektra OSC_2OTA .	67
Tab. 7.3: Přehled napěťových úrovní harmonických složek spektra OSC_VCA ...	70
Tab. 7.4: Parametry výstupních signálů v závislosti na zesílení DACA.....	73
Tab. 7.5: Přehled vlastností jednotlivých spekter .....	73
Tab. 7.6: Napěťové úrovně jednotlivých harmonických složek .....	77
Tab. 7.7: Přehled náběžných a sestupných hran obdélníku.....	80
Tab. 7.8: Napěťové úrovně jednotlivých harmonických složek pro GEN_OTA....	81
Tab. 7.9: Srovnání jednotlivých variant realizovaných obvodů.....	83
Tab. 7.10: Srovnání výsledků simulací a měření pro jednotlivá zapojení .....	83
Tab. 7.11: Všeobecná tabulka použitých měřicích přístrojů.....	84

# ÚVOD

Přestože vývoj, zejména v případě oscilátorů, značně pokročil a mnoho zapojení a návrhových metod je již známých, stále je oblast oscilátorů a funkčních generátorů neúplně probádána. Velký zájem je soustředěn zejména na vysokofrekvenční oblast a použití nových aktivních prvků, které se dnes objevují stále častěji.

Velkou výhodou přináší rovněž možnost elektronického řízení některého z parametrů zapojení, a to ať už se jedná o změnu hodnot pasivních prvků nebo změnu parametrů prvků aktivních. Tímto způsobem lze například měnit právě oscilační kmitočet u oscilátorů, činitel jakosti nebo mezní kmitočet u filtračních struktur, skokově či plynule nastavovat zesílení nebo prostě jen donastavit některý z parametrů obvodu.

Tato práce je zaměřena na návrh, analýzu a realizaci oscilátorů a funkčních generátorů za použití elektronicky říditelných aktivních prvků. Cílem je pak navrhnout a zrealizovat oscilátor a generátor. Pomocí programu OrCAD tato zapojení odsimulovat a výsledky porovnat s výsledky měření.

V první části práce jsou teoreticky rozebrány oscilátory a generátory, jejich vlastnosti a základní rozdělení.

Dále jsou uvedeny některé elektronicky říditelné aktivní prvky, které by mohly být vhodné pro konstrukci oscilátorů a generátorů. Jedná se o proudové konvejory a sledovače, napěťové a proudové zesilovače. Velký důraz je kladen zejména na operační transkonduktanční zesilovač OTA a digitálně říditelný proudový zesilovač DACA, které jsou při návrhu také využívány. Jsou zde uvedena simulační schémata, popis chování prvků a popis reálných obvodů pro praktickou realizaci.

Z těchto aktivních prvků byl vybrán zesilovač OTA (Operational Transconductance Amplifier), napětím řízený zesilovač VCA (Voltage Control Amplifier) a digitálně říditelný proudový zesilovač DACA (Digitally Adjustable Current Amplifier). Při simulacích byl pro OTA použit model prvku OPA860 a pro VCA potom model VCA810, oba dostupné z [17][23].

V navazující části práce je prezentováno šest zapojení oscilátorů a dvě zapojení funkčních generátorů. Při konstrukci byly použity právě výše uvedené aktivní prvky. První tři zapojení jsou sestavena s prvky OTA. Je zde také uvedeno porovnání jednotlivých oscilátorů. Uvedené generátory jsou navrženy tak, aby jejich výstupem byl jak obdélníkový signál, tak signál trojúhelníkový.

Následuje popis šesti prakticky realizovaných zapojení. Jsou zde uvedeny postupy při konstrukci, návrhy desek plošných spojů, seznamy součástek a bezpečnostní faktory a postupy při měření. U každého zapojení je uveden popis a výsledky měření.

V závěru práce jsou prezentovány a porovnány dosažené výsledky jak ze simulací, tak z měření. Je uvedeno zhodnocení obvodů z hlediska stability, oscilační frekvence a přeladitelnosti.

# 1 OSCILÁTORY

## 1.1 Základní charakteristika, rozdělení

Jak je uvedeno například v [1][2], oscilátory jsou autonomní elektronické obvody. Jedná se tedy o obvody, které nepracují s žádným vstupním signálem a jsou samy o sobě jeho zdrojem. Po připojení stejnosměrného napájecího napětí jsou schopny se samovolně rozkmitat a generovat tak střídavý signál.

S oscilátory a se setkáme zejména v radioelektrotechnice a přístrojové či měřicí technice.

Jako příklad zde bude uvedeno pouze nejdůležitější základní rozdělení. Rozeznáváme oscilátory nízkofrekvenční (kmitočty výstupního napětí se pohybují přibližně do desítek kilohertz) a vysokofrekvenční (řádově desítky a stovky megahertz). Další rozdělení (dle časového průběhu):

- Harmonické – generují napětí sinusového průběhu o neměnné frekvenci
- Neharmonické – generované časové průběhy výstupního napětí jsou například obdélníkovité nebo pilovité

U sinusových oscilátorů obvod vždy obsahuje jeden nebo více zesilovacích prvků se zavedenou kladnou zpětnou vazbou. Dále řídicí obvod (realizovaný pomocí pasivních součástí), jehož prostřednictvím je určena oscilační frekvence. Jedná se o zpětnovazební oscilátory.

## 1.2 Oscilační podmínky

Jak je popsáno v [2], jestliže v obvodu zavádíme kladnou zpětnou vazbu, je pro vznik oscilací nutno zajistit splnění dvou základních oscilačních podmínek. Amplitudové a fázové.

- Amplitudová podmínka – velikost součinu přenosu aktivního prvku (zesilovače) a řídicího obvodu musí být rovna jedné.

$$|\beta \cdot A_u| = 1 \quad (1.1)$$

Pokud by byl přenos větší než jedna, amplituda kmitů bude narůstat. Naopak pokud bude menší než jedna, kmity budou tlumené.

- Fázová podmínka – fázový posun mezi vstupním a výstupním signálem (resp. jejich součet) musí být nulový ( $2\pi +$  násobky  $2\pi$ ).

$$\varphi_A + \varphi_\beta = k \cdot 2\pi \quad (1.2)$$

Oscilační podmínky získáme z charakteristické rovnice dosazením za  $s = j \cdot \omega$  a následně rozdělením na reálnou a imaginární část. Z reálné části pak dostaneme podmínku amplitudovou, z imaginární fázovou. V praxi se při návrhu vychází z rovnice (1.4) popsané v další kapitole.

### 1.3 Charakteristická rovnice

Z charakteristické rovnice je možno zjistit chování a vlastnosti daného obvodu. Údaje o stabilitě a jak bylo uvedeno výše, také z ní vypočítáme podmínky oscilací. Rovnice je obecně popsána následujícím vztahem[2].

$$(s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0) = 0 \quad (1.3)$$

Polynom charakteristické rovnice je možno získat několika způsoby. První možností je vyjádření admitanční matice z daného obvodu. Jestliže pak vyjádříme její determinant a položíme ho roven nule, získáme charakteristickou rovnici. Další možností, pokud u daného obvodu známe jeho přenos, je získání rovnice z přenosu napětí.

Obě tyto metody se hojně využívají při práci s jednoduššími obvody. Jelikož je tato práce zaměřena na konstrukci obvodů s aktivními prvky, bude zde s výhodou využít SNAP, program pro symbolickou, semisymbolickou a numerickou analýzu elektronických obvodů.

Charakteristická rovnice CE (Characteristic equation) má typicky následující tvar.

$$s^2 - bs + \Omega_0^2 = 0 \quad (1.4)$$

Oscilační podmínku CO (Condition of Oscillation) potom získáme položením prostředního členu rovnu nule ( $B_1=0$ ).

Oscilační kmitočet lze vypočítat dle následujícího vztahu. Kde  $B_0$  je člen CE s nejnižší mocninou a  $B_2$  člen s nejvyšší mocninou.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{B_0}{B_2}} \quad (1.5)$$

### 1.4 Vlastnosti

- Stabilita kmitočtu

Stálost generovaného kmitočtu je zřejmě nejdůležitější vlastností oscilátorů. Dle vztahu, uvedeného například v [1], ji lze vyjádřit vztahem (1.6). Ten definuje, že stabilita je dána absolutní hodnotou podílu změny kmitočtu za určitý časový interval (označován  $\Delta f_0$ ) a stabilního kmitočtu ( $f_0$ ).

$$s(\varepsilon) = \left| \frac{\Delta f_0}{f_0} \right| \quad (1.6)$$

Dle [3] je stabilita ovlivňována mnoha faktory, kterými mohou být kupříkladu kolísání teploty, kolísání napájecího napětí, parazitní vlastnosti součástek (tranzistory, kondenzátory,...), obvodová realizace a jiné.

- Stabilita amplitudy

Při každém průchodu signálu obvodem zpětné vazby existuje potenciální možnost degradace nebo kolísání amplitudy výstupního signálu. Je to tedy schopnost oscilátoru udržovat konstantní amplitudu.

Obdobně jako u frekvenční stability, závisí stabilita amplitudy například na změnách teploty, stáří oscilátoru a samotných součástek, změnách v nastavení pracovního bodu atp.

- Laditelnost

Udává rozmezí kmitočtů, ve kterém lze daný oscilátor ladit.

Podle toho rozlišujeme oscilátory s pevným a proměnným kmitočtem. Laditelné oscilátory je pak možno rozdělit na mechanicky a elektricky laditelné VCO (Voltage Control Oscillator).

- Činitel harmonického zkreslení

Zkráceně také THD (Total Harmonic Distortion). Tento parametr se většinou spojuje se sinusovým signálem, nicméně často se s ním setkáme i u jiných signálů.

Činitel harmonického zkreslení udává míru zkreslení harmonického signálu, které vzniká při průchodu signálu nelineárním systémem[2]. Čím menší je THD, tím přesnější a reálnější daný signál bude.

Dle následujícího vztahu je THD roven poměru součtu mocnin všech efektivních hodnot napětí (počínaje druhou) jednotlivých harmonických složek k základní harmonické. Většinou se udává v procentech

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.7)$$

Pro ideální sinusový průběh by byl THD roven nule. S narůstajícím počtem harmonických složek pak dochází i k nárůstu zkreslení.

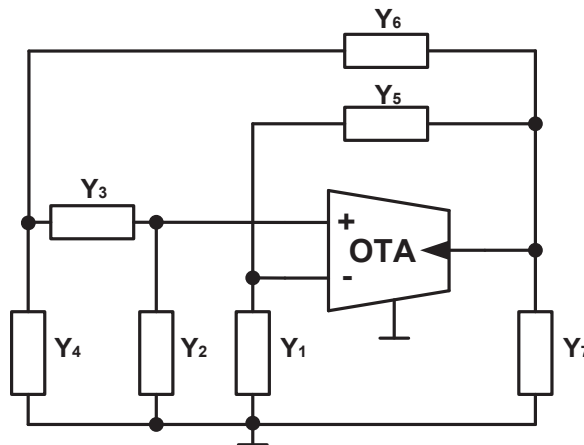
## 1.5 Postup při návrhu oscilátorů

Jelikož je již oblast oscilátorů notně probádaná, není jednoduché nalézt nová zapojení. Mezi osvědčené metody návrhu obvodů můžeme zařadit metodu návrhu pomocí admitanční sítě (Metoda autonomních obvodů)[21][2] nebo grafu signálových toků. Zapojení lze dále získat intuitivní skladbou a také derivací, úpravou, rozšířením nebo zrcadlením již existujícího zapojení.

První dvě zapojení oscilátorů byla navržena právě metodou autonomních obvodů. Pro první obvod byla vytvořena nová admitanční síť (viz Obr. 1.1). Pro druhý oscilátor byla použita a upravena úplná síť prezentovaná například v [22]. Postup při návrhu je následující.

Vytvoříme nebo zvolíme již existující autonomní obvod, tvořený admitancemi a aktivními prvky. Volbou různých zapojení získáme mnoho možných kombinací obvodů. Admitance mohou být nahrazeny kondenzátory, rezistory, jejich paralelní kombinací, zkraty nebo rozpojením[22]. Z obvodu sestavíme charakteristickou rovnici a dle rovnic uvedených v 1.3 vypočteme podmínky oscilací a oscilační kmitočet.

Pro výpočet rovnic z daného zapojení byl použit program SNAP.



Obr. 1.1: Vytvořená admitanční síť pro návrh oscilátoru s jedním OTA

Další zapojení vznikla intuitivním zapojením pasivních prvků a následnou analýzou v programu OrCAD.

## 2 GENERÁTORY

Generátor je elektronický obvod, který buď upravuje energii z budícího zdroje, nebo z napájecího zdroje a transformuje ji na střídavý signál požadovaného tvaru a frekvence [1]. Nejčastěji se setkáme s druhou variantou, kdy se generátor chová jako autonomní obvod a převádí napájecí napětí aktivního prvku na obdélníkový, trojúhelníkový nebo jiný signál na jeho výstupu.

Autonomním obvodem se rozumí takový obvod, který neobsahuje žádné budící zdroje. Jsou v něm zahrnuty pouze zdroje napájecí[2]. Bez budícího zdroje je nutno zajistit, aby se obvod sám rozkmital. Toto je zajištěno použitím kladné zpětné vazby ZV obdobně jako u oscilátoru. Zesilovací prvek zesiluje vlastní šum a ZV jej přivádí opět na jeho vstup. Takto kmity narůstají, dokud nejsou omezeny samotným zesilovacím prvkem a napájecím napětím. Pokud jsou splněny oscilační podmínky (viz 1.2) pro spektrum frekvencí, dosáhneme právě neharmonických kmitů.

Generátory lze rozdělovat dle mnoha parametrů. Nejzákladnější dělení je na Harmonické a neharmonické. Harmonické generátory vytvářejí sinusový průběh a jedná se o oscilátory. Neharmonické jsou generátory obdélníku, trojúhelníku atp..

Generátory jsou jindy také nazývány relaxačními generátory. Nejčastější je zřejmě realizace s klopnými obvody. Ty se rozdělují následovně.

- **Astabilní** – Obvod se samovolně překlápí mezi dvěma nestabilními stavy
- **Monostabilní** – Obvod má jeden stabilní stav. Po dodání pulsu se dočasně překlápí do nestabilního stavu a následně se opět vrátí zpět
- **Bistabilní** – Obvod má dva stabilní stavy, ve kterých setrvává, dokud není přiveden impuls. Teprve potom se překlápí do druhého stavu

Zapojení generátorů se většinou realizuje prostřednictvím integračního článku a komparátoru nebo pomocí speciálních integrovaných obvodů (například NE 555).

Integrátor provádí matematickou funkci integrování, napětí tedy lineárně roste. Jakmile dosáhne saturačního napětí, zareaguje komparátor a překlápí se. Na výstupu se tedy objeví trojúhelníkový signál.

Komparátor porovnává napětí přivedené na invertující a neinvertující vstup. Jestliže je větší napětí na kladném vstupu, je na výstupu kladné saturační napětí zesilovače a naopak. Na výstupu dostáváme tedy obdélníkový signál.

## 3 AKTIVNÍ PRVKY

Při konstrukci oscilátorů a generátorů vyžadujeme, aby bylo možno elektronicky ovlivňovat (řídit) některý z parametrů. V této kapitole proto tedy budou prioritně představeny zejména aktivní prvky (AP), které toto umožňují. Většina z dále uvedených AP pracuje v proudovém módu. Jeho výhody jsou již popsány v kapitole 3.1.2.

Nejvíce rozšířeným aktivním prvkem je zřejmě operační zesilovač. Jak napěťový tak proudový zesilovač s říditelným zesílením se jeví jako vhodné konstrukční prvky. Dále zde budou popsány proudové konvejory (CC – Current conveyor), proudové sledovače (CF – Current follower), transkonduktanční zesilovače (OTA – Operational transconductance amplifier) a některé další prvky.

### 3.1 Pracovní režimy aktivních prvků

Jak je uvedeno v [4][5], elektronické obvody lze rozlišovat dle následujících tří pracovních módů, a to podle toho jaké signály zpracovávají. Vhodný pracovní mód je zvolen dle požadavků a parametrů obvodu. Například u obvodů pracujících na vyšších kmitočtech s výhodou můžeme využít režim proudový, jelikož vlastnosti běžného operačního zesilovače už to nedovolují a silně se zde projevují parazitní vlastnosti.

#### 3.1.1 Napěťový režim

Napěťový mód (VM – Voltage Mode) se využívá v běžných obvodech, kde pracujeme s klasickými operačními zesilovači. Jak je uvedeno výše, není vhodný pro provoz na vyšších kmitočtech, kdy se začnou projevovat parazitní kapacity ve zpětnovazebním obvodě.

Obvod pracující v napěťovém módu je na vstupu buzen napěťovým zdrojem a na výstupu sledujeme napěťovou odezvu.

Jako příklad prvků pracujících v VM si můžeme uvést napěťový sledovač (VF – Voltage Follower) a napěťový operační zesilovač (VOA – Voltage Operational Amplifier) [5].

#### 3.1.2 Proudový režim

Obvody pracující v proudovém režimu (CM – Current Mode) jsou v dnešní době již jedny z nejrozšířenějších, jelikož vývoj v této oblasti velmi pokročil. Stále jsou objevovány a navrhovány nové aktivní prvky pracující v CM.

Zjevné výhody toho módu jsou: větší dynamika, možnost činnosti při velmi malých napájecích napětích ( $\pm 2,5$  V) a dobrá stabilita obvodu na vyšších kmitočtech (řádově desítky MHz). Z tohoto důvodu jsou proudové aktivní prvky využívány zejména v aplikacích aktivních filtrů, v oscilátorech atp.

Obvod pracující v proudovém módu je na vstupu buzen proudovým zdrojem a na výstupu sledujeme proudovou odezvu.

Příkladem aktivních prvků mohou být proudový sledovač (CF – Current Follower),

proudový operační zesilovač (COA – Current Operational Amplifier) nebo transkonduktanční zesilovač [5].

### 3.1.3 Smíšený režim

Jak již napovídá název, u obvodů pracujících ve smíšeném módu, jedna “část” pracuje v CM a druhá ve VM.

Podle této obvodové kompozice rozlišujeme dva druhy tohoto režimu. Většinou je použit proudový aktivní prvek, ale celý obvod pracuje s napěťovým signálem. V tom případě se jedná o smíšený režim V/CM. Inverzně k tomu pak existuje také duální smíšený režim C/VM.

Příkladem prvků pracujících v tomto režimu mohou být různé konvejeory.

## 3.2 Elektronické řízení a změna parametrů

V aplikacích oscilátorů, generátorů, filtrů a jiných je často vyžadováno, aby bylo u navržených zapojení možno ovlivňovat některý z parametrů obvodu. V případě oscilátorů je to například přeladování oscilační frekvence. U generátorů to bývá rovněž kmitočet nebo také střída DCL (duty cycle) generovaných pulsů.

Jako nejjednodušší varianta se jeví řízení parametru změnou hodnot některého z pasivních prvků, tedy rezistorů a kondenzátorů. Pro změnu kapacity by mohl být využit kupříkladu varikap[1], který je ve své podstatě kapacitní dioda. Jeho přechod PN, který je polarizován v závěrném směru, se chová jako kondenzátor. S rostoucím přivedeným napětím klesá kapacita přechodu.

U rezistorů se nabízí více možností. Lze například použít potenciometr nebo přepínatelnou odporovou síť, nicméně tato neumožňuje plynulou změnu odporu. Jako výhodné řešení se jeví použití proměnného rezistoru realizovaného pomocí proudového konvejeoru. Toto zapojení je uvedeno například v [8] nebo [11].

Další možností je měnit přímo některý z parametrů aktivních prvků.

V případě transkonduktoru OTA je možno měnit transkonduktanci tohoto prvku  $g_m$ . Toto se provádí změnou hodnoty odporu, připojeného na příslušný pin OTA. Konkrétně v případě komerčně vyráběného obvodu OPA860[23], který byl použit při simulacích, je transkonduktance nastavována pomocí rezistoru připojeného mezi pin IQADJ a záporné napájecí napětí.

Dále je vhodné zmínit digitálně říditelný proudový zesilovač DACA, který umožňuje změnu zesílení v rozsahu 1 až 8, a to pomocí tří-bitové sběrnice. Tento obvod je detailněji popsán v kapitolách 3.3.3 a 3.6.1.

Rovněž je možno uvést napětím řízený zesilovač VCA, který tvoří jádro oscilátoru a generátoru z Obr. 5.13 a Obr. 6.1. Tento umožňuje plynulou změnu zesílení pomocí přivedení záporného řídicího napětí na příslušný pin. U obvodu VCA810[17] je toto napětí připojeno mezi pin VC a zem. Nastavením VC v rozsahu 0 až -2 V lze řídit zisk v rozsahu  $\pm 40$  dB.

## 3.3 Reálné obvody k realizaci aktivních prvků

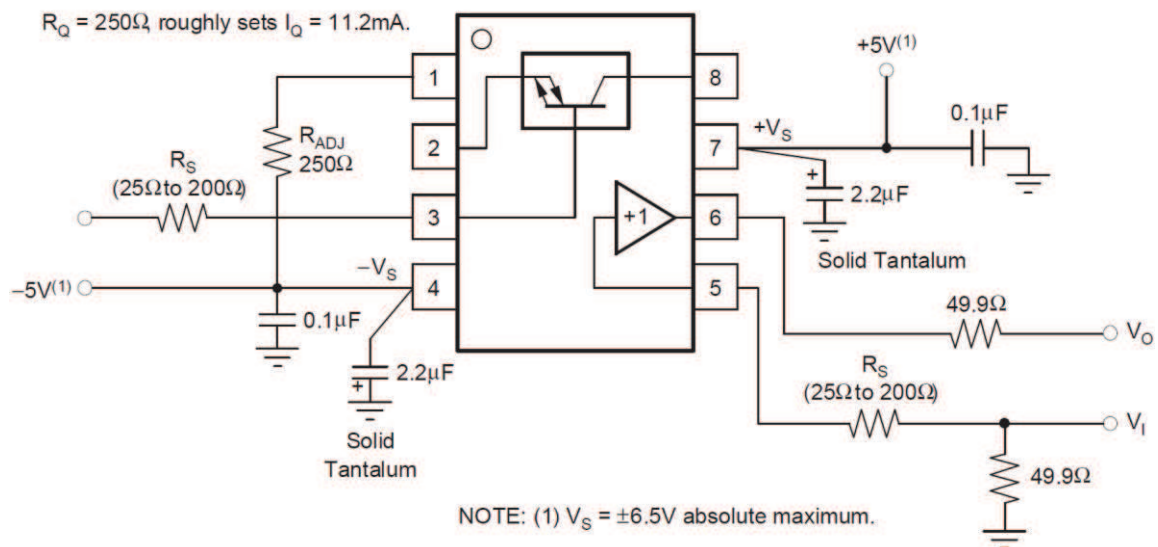
### 3.3.1 OPA 860

Obsahem integrovaného obvodu OPA860 je jeden OTA (Operational Transconductance Amplifier) umožňující externí řízení transkonduktance pomocí proudu  $I_Q$  a napěťový vyrovnávací zesilovač (voltage buffer.).

Některé z možných aplikací tohoto obvodu jsou rychlo-pulzní integrátory, senzory, aktivní filtry, ovladače LED obvodů pro optické přenosové systémy atd.

Obvod se vyznačuje nízkým klidovým proudem 11,2 mA a vysokou rychlostí přeběhu 900 V/ $\mu$ s. Šířka pásma je 80 MHz a transkonduktance 95 mA/V. Rozsah pracovních teplot od -45 °C do +85 °C. Napájecí napětí  $\pm 5$  V [23].

Základní zapojení obvodu je na následujícím obrázku.



Obr. 3.1: Basic connections OPA860 [23]

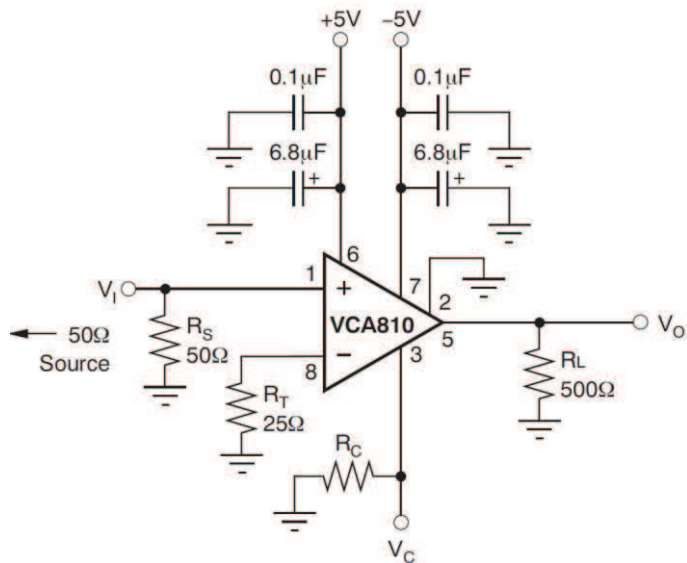
### 3.3.2 VCA810

VCA810 je napětím říditelný širokopásmový zesilovač obsahující diferenční vstup a jednoduchý výstup. Napájecí napětí obvodu je  $\pm 5$  V. Rozsah nastavení zisku  $\pm 40$  dB. Šířka pásma 35 MHz. Rozsah pracovních teplot od -40 °C do +85 °C [17].

Následující obrázek ukazuje základní zapojení obvodu VCA810.

Změna zesílení se realizuje připojením zdroje záporného napětí na pin 3 označovaný jako  $V_C$  (viz Obr. 3.2). Nastavené napětí v rozsahu 0 V až -2 V pak odpovídá udávanému zisku  $\pm 40$  dB.

Aplikační použití tohoto obvodu je například: sonary, aktivní filtry, oscilátory, obvody pro kompenzaci pulzní amplitudy, optické přijímače atd.



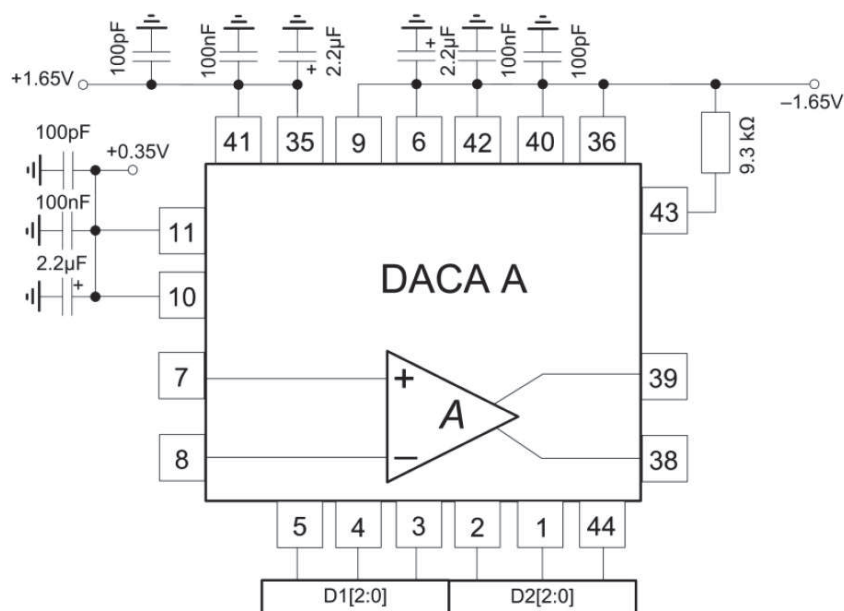
Obr. 3.2: Basic connections VCA810 [17]

### 3.3.3 DACA

Obvod DACA (Digitally Adjustable Current Amplifier) byl vyroben firmou ON Semiconductor v technologii CMOS 0,35  $\mu\text{m}$ . Zesilovač obsahuje plně diferenční vstupy i výstupy. Napájení obvodu je 3,3 V nebo  $\pm 1,65$  V a klidový proud 6 mA na každý zesilovač [19].

V jednu pouzdrě jsou obsaženy dva samostatné zesilovače. Umožňuje nastavení zesílení v rozsahu 1-8. Vše je uloženo v pouzdrě s označením PLCC44, které obsahuje 44 vývodů. Každý zesilovač zabírá 20 pinů, 4 zůstávají nezapojeny.

Na následujícím obrázku je základní zapojení prvku DACA.



Obr. 3.3: Basic connections čipu DACA pro jeden zesilovač [19]

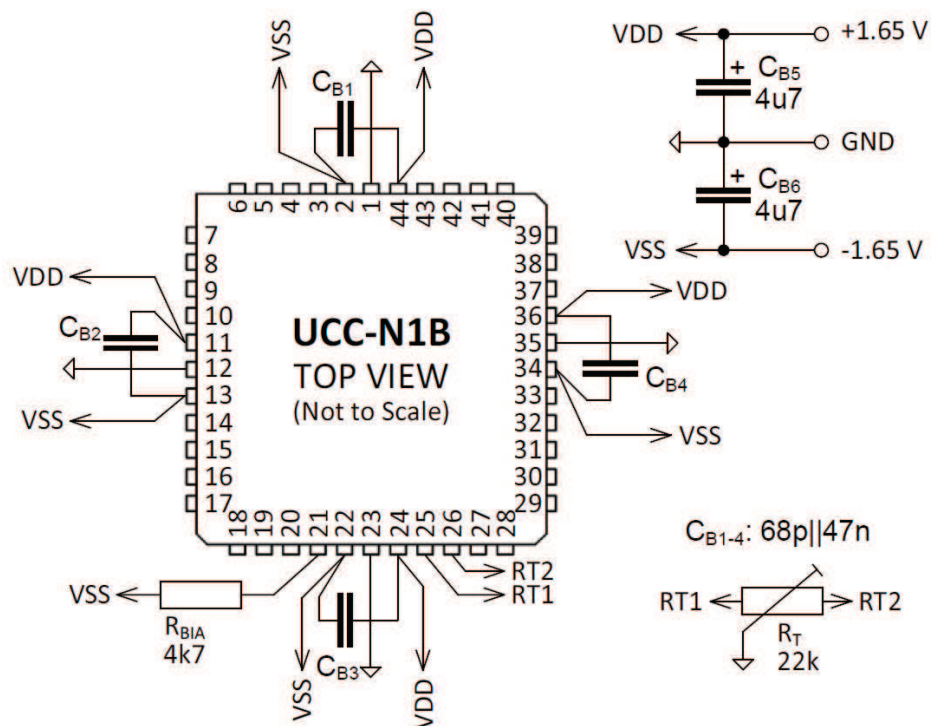
### 3.3.4 UCC

Čip univerzálního proudového konveju UCC-N1B (Universal Current Conveyor) obsahuje kromě UCC také jeden konveju druhé generace CCII+/- . Napájení obvodu je  $\pm 1,65$  V, klidový proud 27 mA.

Jak je uvedeno dále, UCC nabízí velký rozsah využití. Kromě všech generací a typů proudových konveju lze s jeho pomocí realizovat například prvek BOTA (Ballanced-output transconductance amplifier) nebo MO-CF (Multi-output current follower), čehož je také v práci dále využito.

Stejně jako obvod DACA, i UCC je realizován v technologii CMOS  $0,35 \mu\text{m}$  s pouzdem PLCC44, přičemž 17 vývodů je nezapojených.

Na následujícím obrázku je základní zapojení prvku UCC.



Obr. 3.4: Basic connections prvku UCC [33]

### 3.4 Proudové konvejory

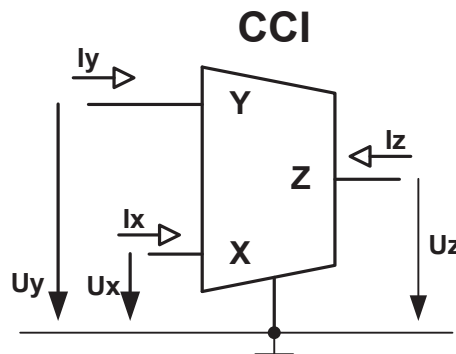
Proudové konvejory (CC – Current conveyor) jsou jedním z nejrozšířenějších a nezákladnějších stavebních prvků v proudové oblasti. Jejich prostřednictvím lze realizovat mnoho jiných aktivních prvků. Příkladem může být univerzální proudový konvektor (UCC – Universal current conveyor) který bude popsán dále.

#### 3.4.1 Generace proudových konvektorů

První proudový konvektor byl představen v roce 1968 [6]. Z počátku nebylo jasné, zda se tento prvek ujme, nicméně s postupem času a se zvětšujícím se zájmem o obvody pracující v proudovém režimu se z proudového konvektoru stal jeden z nejužitečnějších stavebních prvků.

Oproti klasickým operačním zesilovačům nabízí CC dokonce několik výhod. Jedná se například o větší zisk a větší stabilitu na vyšších kmitočtech.

Je již zavedeným standardem rozlišovat proudové konvejory dle jednotlivých generací v jakých vznikaly. Toto rozdělení je popsáno například v [6],[7],[8]. První generace konvektorů je označována jako CCI. Obvod obsahuje dva nízkoimpedanční vstupy, označované X a Y, s ideálně nulovou impedancí a výstup Z s ideálně nekonečnou impedancí. Na následujícím obrázku (Obr. 3.5) je zachycena schematická značka CCI.



Obr. 3.5: Schematická značka CCI

Popis funkce dle [6] je následující: jestliže je na vstup Y přivedeno napětí, tak na vstupu X se objeví napětí stejné. Obdobně potom jestliže je na vstup X přiveden proud, na vstupu Y bude proud o stejné hodnotě. Ten jistý proud je rovněž převeden na vysokoimpedanční výstup Z.

Vztahy mezi jednotlivými branami jsou popsány následujícím maticovým zápisem.

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Dle matice 3.2 a tabulky (Tab. 3.1) uvedené v [5], určují koeficienty a, b, c jednotlivé typy proudových konvektorů. Podle toho pak můžeme snadno sestavit matici pro jakýkoliv typ konvektoru.

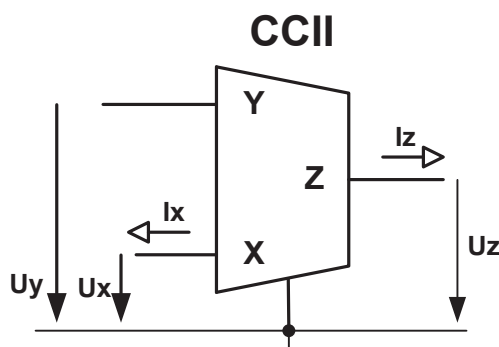
$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Tab. 3.1: Typy proudových konvektorů podle koeficientů a, b, c

	a	b	c
-1	III. Generace	Invertující proudový konvektor	záporný proudový přenos
0	II. Generace	-	-
1	I. Generace	Neinvertující proudový konvektor	kladný proudový přenos

Podle směru toku proudu rozlišujeme dva typy CCI. Pozitivní (označovaný CCI+) a negativní (označovaný CCI-). Později byl vyvinut proudový konvektor druhé generace označovaný CCII [6]. Na obrázku Obr. 3.6 je schematická značka CCII.

V této verzi se již nevyskytuje proud tekoucí vstupem Y, tudíž je nyní vysokoimpedanční. Vstup X má opět nulovou vstupní impedanci. Proud přivedený na vstup X je převeden na vysokoimpedanční výstup Z a má buď kladnou (CCII+) nebo zápornou (CCII-) polaritu.



Obr. 3.6: Schematická značka CCII

CCII je opět možno popsat následující maticí nebo dle tabulky Tab. 3.1.

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Pomocí CCII je možno realizovat velké množství zapojení a aplikací. Jako příklad je možno uvést všechny řízené zdroje (VCCS, CCCS, VCVS, CCVS), impedanční převodníky, impedanční inventory, gyrátory, proudový zesilovač atp.

Následující tabulka (Tab. 3.2) ukazuje shrnutí impedančních úrovní jednotlivých vstupů a výstupů proudových konvektorů první a druhé generace.

Tab. 3.2: Impedanční úrovně

	Označení uzlu	Impedanční úroveň
CCI	X	nízká (ideálně 0)
	Y	nízká (ideálně 0)
	Z	vysoká (ideálně $\infty$ )
CCII	X	nízká (ideálně 0)
	Y	vysoká (ideálně $\infty$ )
	Z	vysoká (ideálně $\infty$ )

Jako poslední rozlišujeme konvejory třetí generace, které byly uvedeny v roce 1995, označované jako CCIII $\pm$ . Pod všemi těmito generacemi vzniklo mnoho dalších variant, které se liší v počtech vstupů / výstupů a směru toku proudů [9]. Konkrétně jsou to například invertující proudové konvejory [11], které se liší negativním napěťovým přenosem mezi Y- a X- (ICCI $\pm$ , ICCII $\pm$ , ICCIII $\pm$ ).

Dále je jistě nutno uvést dvouvýstupový konvektor druhé generace (DOCCII – Dual-output CCII) který obsahuje kladný i záporný proud  $I_z$ . Jestliže oba proudy potečou stejným směrem, dostáváme prvek CFCCII $\pm$  (Current Follower CCII $\pm$ ). Podle znaménka je pak rozlišujeme jako kladné a záporné.

Jako DVCCII $\pm$  (Differential Voltage Current Conveyor) je pak označován diferenční CC který obsahuje dva vstupy, přičemž “napěťový“ vstup Y je rozdělen na  $y_1$  a  $y_2$ . Napětí na vstupu X je pak dáno rozdílem těchto dvou vstupů. Jak vývoj pokračoval, objevil se také DDCCII $\pm$  (Differential Difference CCII) [13]. Jedná se o trojvstupový diferenční CC, kde napětí na terminálu X je dáno kombinací napětí na vstupech  $y_1$ ,  $y_2$  a  $y_3$ .

Bylo uvedeno ještě mnoho dalších typů konvektorů, jejich přehled je například v [9]. Velkým pokrokem bylo uvedení univerzálního proudového konvektoru, který je popsán v následující kapitole.

### 3.4.2 Univerzální proudový konvektor

Kapitola je věnována univerzálnímu proudovému konvektoru (UCC – Universal Current Conveyor).

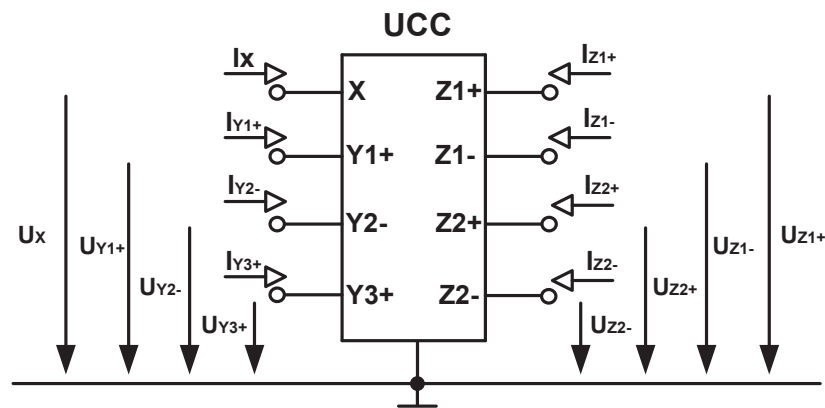
Jedná se o velice všestranný stavební prvek, obsahující osm vstupů / výstupů. Jeho prostřednictvím je možno realizovat všechny existující proudové konvejory obsahující jeden vstup. Velké využití pak nachází zejména v zapojeních, kdy je vyžadován diferenční vstup a je tak nutno použít více CCII (DDCC $\pm$  - differential difference current conveyors) [11].

Následující tabulka (Tab. 3.3) ukazuje způsoby zapojení UCC realizující různé typy proudových konvektorů. Je nutno uvést, že jsou zde pro přehlednost uvedeny pouze některé typy konvektorů.

Tab. 3.3: Příklad realizace různých typů proudových konvektorů

Typ konvektoru	Zapojené vstupy	Zapojené výstupy
CCI-	Y1	Z1-
CCI+	Y1	Z2+
CCII-	Y1	Z1-
CCII+	Y1	Z1+
CCIII-	Y1	Z2-
CCIII+	Y1	Z1+
DVCC	Y1, Y2	Z1+, Z1-
DDCC+	Y1, Y2, Y3	Z1-

Dle popisu uvedeného například v [10],[11] a dle schematické značky uvedené na Obr. 3.7, obsahuje UCC tři vysokoimpedanční vstupy označené jako  $Y_1, Y_2, Y_3$  a jeden nízkoimpedanční vstup  $X$ . Označení  $Z^+$  nebo  $Z^-$  pak nesou čtyři proudové výstupy, které jsou dle uvedeného znaménka buď kladné, nebo záporné.



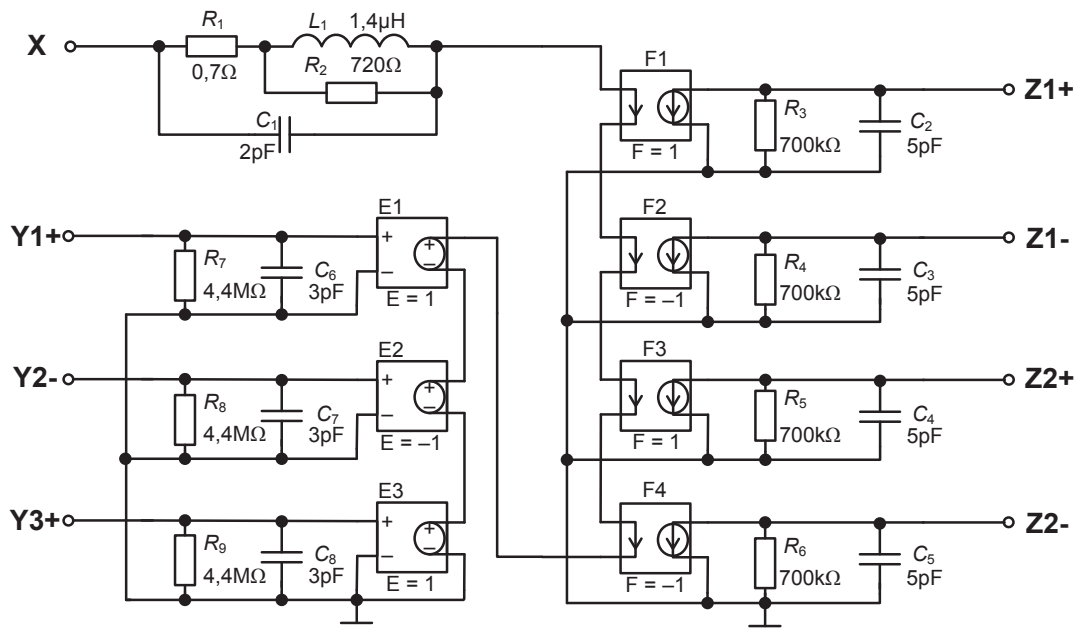
Obr. 3.7: Schematická značka univerzálního proudového konvektoru

Obdobně jako tomu bylo u předchozích generací konvektorů, i v případě UCC je zde uveden maticový zápis, který popisuje vztahy mezi jednotlivými branami (viz 3.4).

$$\begin{bmatrix} I_{Y1} \\ I_{Y2} \\ I_{Y3} \\ V_X \\ I_{Z1} \\ I_{Z2} \\ I_{Z1} \\ I_{Z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Y1} \\ V_{Y2} \\ V_{Y3} \\ I_X \\ V_{Z1} \\ V_{Z2} \\ V_{Z1} \\ V_{Z2} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

UCC může být realizován obvodem s označením UCC-N1B, který byl vyroben v rámci VUT v Brně ve spolupráci s ON Semiconductor v technologii CMOS 0,35  $\mu\text{m}$ .

Na následujícím obrázku je uveden simulační model z programu OrCAD, který byl použit při simulacích.



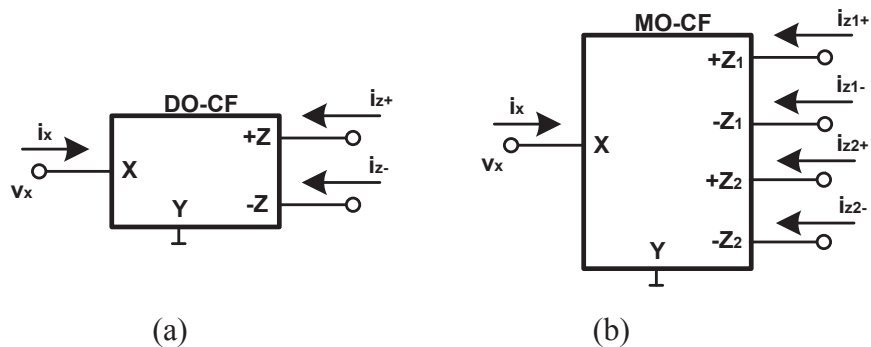
Obr. 3.8: Simulační model prvku UCC

### 3.5 Proudové sledovače

Úkolem proudových sledovačů je vytvářet z proudu na vstupu jeho kopie na výstupu. Minimální počet výstupů je jeden. Tento nejzákladnější sledovač je nejvíce znám pod pojmem proudové zrcadlo a může být realizován například pomocí CCII (vývod Y se uzemní).

Nejčastěji rozlišujeme dvouvýstupový DO-CF (Dual output current follower) [14] a vícevýstupový MO-CF (Multi output current follower) [15] proudový sledovač. Výstupní proudy jsou buď identické jako proud vstupní nebo mají převrácenou fázi.

Schematická značka DO-CF je na obrázku Obr. 3.9a. Prvek obsahuje jeden nízkoimpeданční vstup a dva vysokoimpeданční výstupy. Jeden kladný, druhý záporný.



Obr. 3.9: Schematická značka DO-CF (a), Schematická značka MO-CF (b)

Následující triviální rovnice (3.5) popisují funkci DO-CF.

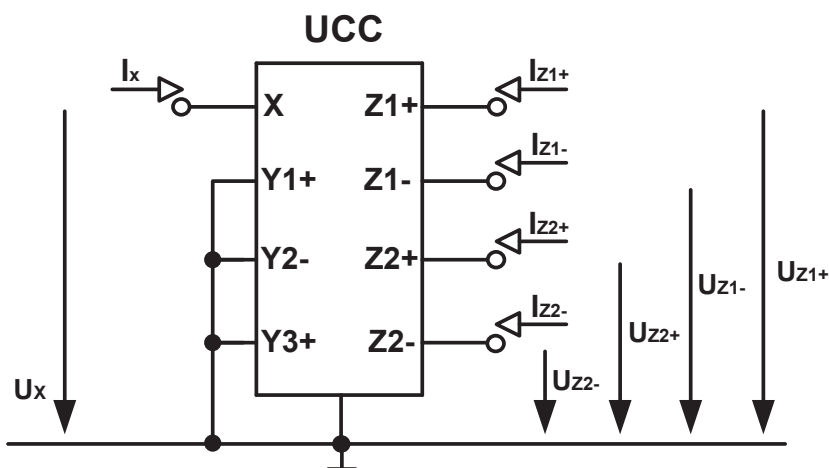
$$v_x = 0 \quad i_{z+} = +i_x \quad i_{z-} = -i_x \quad (3.5)$$

Schematická značka vícevýstupového proudového sledovače je na Obr. 3.9b. Jak je patrné, jedná se o čtyřvýstupovou variantu, kde dva výstupní proudy mají stejnou (kladnou) orientaci a dva opačnou (zápornou). MO-CF je opět popsán následujícími rovnicemi.

$$i_x = i_{z1+} = i_{z2+} \quad (3.6)$$

$$-i_x = i_{z1-} = i_{z2-} \quad (3.7)$$

Jak je uvedeno například v [15], MO-CF lze velice snadno realizovat pomocí univerzálního proudového konvejeoru (viz Obr. 3.10), pouze je nutno uzemnit všechny napěťové vstupy ( $Y_1, Y_2, Y_3$ ).



Obr. 3.10: Realizace prvku MO-CF pomocí UCC

Údaje v Tab. 3.4 jsou převzaty z [15] a uvádí impedanční úrovně vstupu a výstupů při různých kmitočtech. Dále je uvedeno, že při použití zapojení dle Obr. 3.10 dochází ke snížení šířky pásma proudových přenosů mezi vstupem X a jednotlivými výstupy na cca 40 MHz. Pro vybraná zapojení oscilátorů by měla být tato hodnota dostačující.

Tab. 3.4: Impedance vstupu a výstupů MO-CF při realizaci pomocí UCC

	Vstup	Výstupy
	X	Z1+, Z1-, Z2+, Z2-
100 kHz	0,2 $\Omega$	320 k $\Omega$
1 MHz	9 $\Omega$	35 k $\Omega$
10 MHz	76 $\Omega$	2,4 k $\Omega$

## 3.6 Proudové a napěťové zesilovače

Jedněmi z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších aktivních prvků jsou zesilovače. Jsou v mnoha směrech velmi podobné sledovačům, ale na rozdíl od nich, je jejich funkcí procházející signál zesílit.

V mnoha návrzích obvodů pracujících v napěťovém módu je využíván klasický operační zesilovač OZ. Jelikož je tato práce zaměřena na možnost elektronického ladění, nelze běžný OZ použít, protože tuto možnost neposkytuje [16]. Toto řeší zavedení napětím řízeného zesilovače VCA (Voltage Controlled Amplifier), který umožňuje změnu zisku za pomoci řídicího napětí [18].

Z komerčních obvodů býval nejznámější zřejmě VCA610, jenž byl později nahrazen novější variantou s označením VCA810, oba od výrobce Texas Instruments. Tento zesilovač se vyznačuje šířkou pásma 35 MHz a možností nastavení zisku v rozsahu  $\pm 40$  dB [17]. Podrobnější popis obvodu je uveden v 3.3.2.

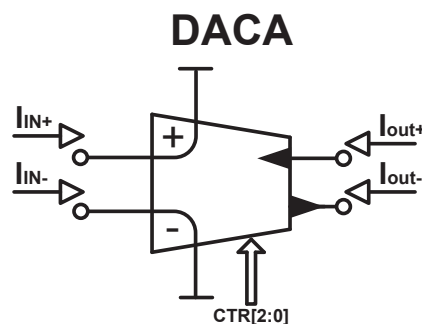
Z hlediska návrhu se jako vhodnější jeví říditelné proudové zesilovače, nicméně většina těchto aktivních prvků není komerčně dostupná a existují pouze jako návrhy a modely pro simulace.

Jako velice slibný a vhodný aktivní prvek však můžeme označit digitálně říditelný proudový zesilovač DACA (Digitally Adjustable Current Amplifier). Podobně jako UCC v kapitole 3.4.2, i DACA byl vyvinut na VUT v Brně ve spolupráci s ON Semiconductor v technologii  $0,35 \mu\text{m}$  [19]. Detailnější popis tohoto obvodu je uveden v následující kapitole a technické specifikace pak v 3.3.3.

### 3.6.1 Digitálně říditelný proudový zesilovač (DACA)

Dle údajů uvedených v [12] a [19], je DACA plně diferenční proudový zesilovač. Tedy jeho vstupy i výstupy jsou diferenční, jak je ukázáno na schematické značce (viz Obr. 3.11).

Největší jeho výhodou je právě možnost elektronického řízení, které je možno nastavovat pomocí tří-bitové sběrnice. Ta je rovněž vyznačena na obrázku Obr. 3.11 jako CTR [2:0]. Zesílení prvku je možno nastavit v rozsahu 1 až 8, právě pomocí tří-bitového slova (rozsah 000 – 111). Změna zesílení tedy není plynulá, jak tomu většinou bývá, ale skoková.

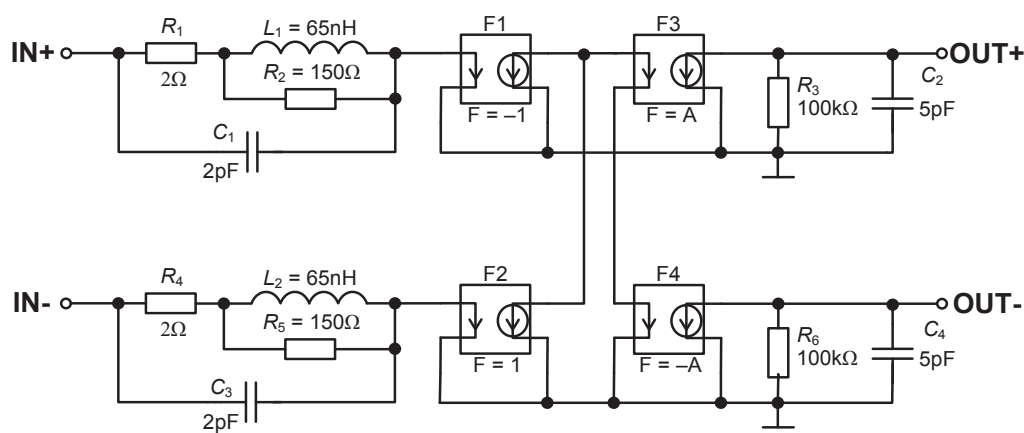


Obr. 3.11: Schematická značka prvku DACA

V jednom čipu DACA, který je umístěn v pouzdře PLCC se 44 vývody, jsou obsaženy dva samostatné zesilovače označené jako A a B. Velkou výhodou je nízké napájecí napětí, které může být buď 3,3 V nebo  $\pm 1,6$  V [19].

Na následujícím obrázku je znázorněna struktura prvku DACA, která může být využita při simulacích v programu PSpice. Vychází z makromodelu uvedeného například v [11] a modeluje zejména hodnoty impedancí a vlastnosti jednotlivých vstupů / výstupů. Tento model byl převzat z práce Ing. Jeřábka [12], který se podílel na vývoji tohoto aktivního prvku. Přesné zapojení vykonávající funkci DACA je také možno získat pomocí více komerčně dostupných obvodů.

Vstupy, označené IN+ a IN-, mají nízkou impedanci a výstupy jsou naopak vysokoimpedanční, což poskytuje dobrou konektivitu s navazujícími prvky.



Obr. 3.12: Simulační model prvku DACA

### 3.6.2 Transkonduktanční operační zesilovač

Operační transkonduktanční zesilovač OTA (Operational Transconductance Amplifier) je aktivní prvek, jehož předností je umožnění změny transkonduktance pomocí jeho řídicího vstupu [16]. K řízení se pak využívá řídicího proudu  $I_S$ . Téměř ve všech aplikacích se však setkáme s rezistorem připojeným v sérii na tento vstup. Jeho hodnota je potom rovna  $1/g_m$ .

Jako  $g_m$  je označován právě parametr transkonduktance (transfer conductance - převodní vodivost). Jak ukazuje následující převodní vztah [20], její jednotkou je Siemens. Hodnota  $K$  pak představuje přímo transkonduktanci  $g_m$ .

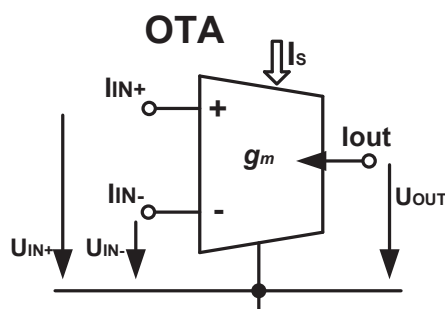
$$[K] = \frac{A}{V} = \frac{1}{\Omega} = S \quad (3.8)$$

OTA se v ideálním případě chová jako zdroj proudu řízený rozdílovým napětím (VCCS – Voltage Controlled Current Source) a jeho vstupní / výstupní impedance jsou nekonečně velké [21]. Jeho funkce je popsána následujícím zápisem, kde  $u_+$  a  $u_-$  jsou napětí inverujícího a neinverujícího vstupu.

$$I_{out} = gm(u_+ - u_-) \quad (3.9)$$

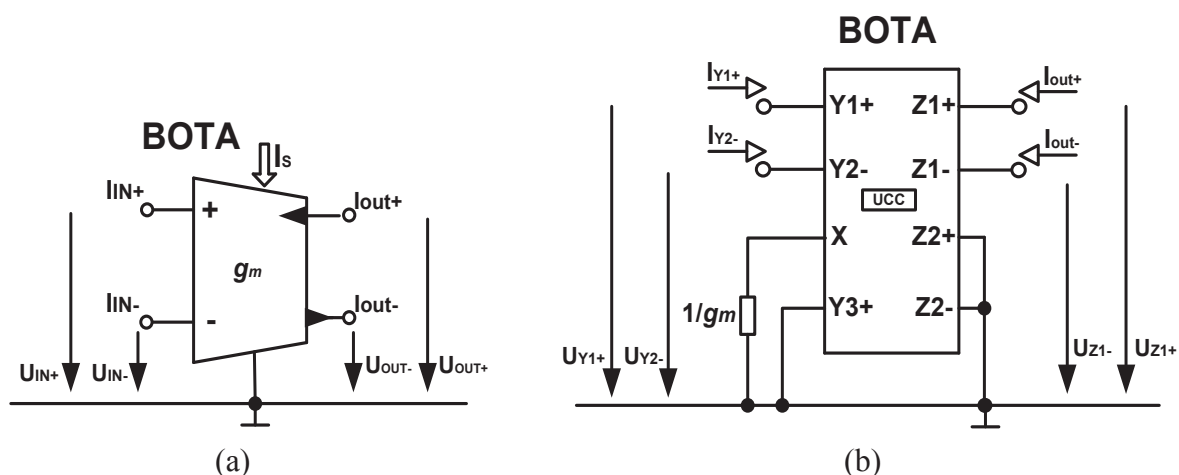
Reálný, komerční OTA, jehož schematická značka je na Obr. 3.13, je vyráběn různými firmami pod různým označením. Příkladem může být LT1228 (Linear Technology) nebo MAX435 (MAXIM-Dallas Semiconductor). Pro návrh a PSpice simulace byl zvolen OPA860 od Texas Instruments, který je novější variantou OPA660. Tento zesilovač s jedním výstupem se vyznačuje velkou šířkou pásma (80 MHz) a transkonduktancí 95 mA/V [23]. Podrobnější popis je uveden v kapitole 3.3.1.

S OPA860 se můžeme v některých publikacích setkat pod názvem diamantový tranzistor. Toto označení má z důvodu velmi dobrých vlastností v kmitočtové oblasti [16].



Obr. 3.13: Schematická značka prvku OTA

Ačkoliv se komerčně vyrábí pouze varianta OTA s jedním výstupem, velice často se v různých návrzích obvodů setkáme s vícevýstupovými variantami tohoto zesilovače. Tento prvek je pak označován jako MOTA (Multi-output Operational Transconductance Amplifier). Dvouvýstupová varianta je pak známa pod názvem BOTA (Balanced operational transconductance amplifier). Ten je opět možno realizovat pomocí UCC (viz 3.4.2). Schematická značka BOTA a realizace s UCC jsou na následujícím obrázku. Jak je patrné, počet výstupů je možno velmi snadno navýšit až na čtyři.



Obr. 3.14: Schematická značka BOTA (a), Realizace BOTA pomocí UCC (b)

## 4 OBVODY PRO STABILIZACI AMPLITUDY (AGC)

Některá zapojení oscilátorů vykazují špatnou stabilitu projevující se kolísáním amplitudy kmitů, a to zejména při přeladování oscilačního kmitočtu. Cílem tedy je, aby se při přeladování měnila amplituda kmitů co nejméně, případně aby nedocházelo k přerušování oscilací.

Z tohoto důvodu je vhodné doplnit zapojení o obvod pro automatickou stabilizaci amplitudy AGC (Automatic Gain Control).

Existuje mnoho způsobů realizací těchto obvodů. Od jednodušších, realizovaných pouze za pomoci několika pasivních součástek a tranzistoru, po složitější zapojení uvedená například v [28][29]. Lze také využít různé varianty s fotorezistorem nebo stabilizací s využitím OTA, která je uvedena například v [30].

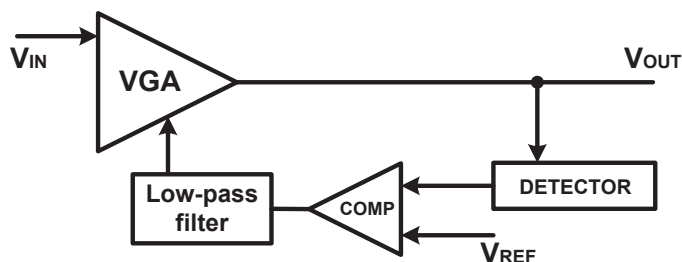
V následujících kapitolách je uveden obecný popis AGC obvodu a dále také zvolené zapojení, které je použito při návrhu oscilátoru s DACA a VCA.

### 4.1 Obecná kompozice a popis AGC

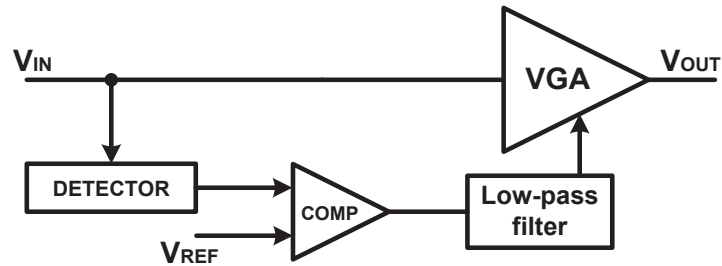
Obecný popis funkce AGC je uveden na Obr. 4.1 a Obr. 4.2. Vstupní signál  $V_{IN}$  je zesílen VGA (Variable Gain Amplifier), jehož zisk je řízen napětím  $V_C$ . Cílem je dosáhnout úrovně napětí  $V_{OUT}$ .

Přes "peak detector" je napětí  $V_{OUT}$  přivedeno na komparátor, kde je porovnáno s referenčním napětím  $V_{REF}$ . Následně, po vyfiltrování dostáváme právě řídicí napětí  $V_C$  [31].

Této funkce může být dosaženo buď detekováním signálu na vstupu VGA nebo na jeho výstupu. Podle toho pak rozlišujeme tzv. "feedback AGC" (detekce na výstupu) a "feedforward AGC" (detekce na vstupu). Blokové struktury obou zapojení jsou na následujících obrázcích.



Obr. 4.1: Zjednodušený blokový diagram "feedback" AGC



Obr. 4.2: Zjednodušený blokový diagram "feedforward" AGC

Oba uvedené typy AGC se vyznačují jinými vlastnostmi a není vždy snadné rozlišit, kde kterou variantu použít. Podrobnější popis obou zapojení, jejich vlastnosti, výhody a nevýhody je uveden například v [31].

Hlavními parametry systémů AGC jsou:

- **Dynamický rozsah** – Jedná se o rozsah vstupního signálu, pro který je výstupní signál v přijatelných mezích
- **Doba odezvy** – Udává rychlost, s jakou obvod zareaguje na změnu vstupního signálu

## 4.2 Zapojení s tranzistorem

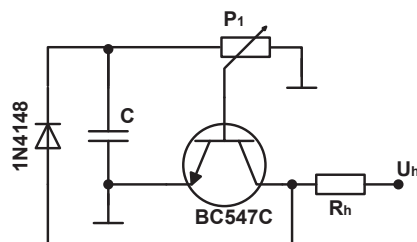
Toto zapojení je uvedeno spíše pro ukázkou. Jeho použití by bylo vhodné u jednodušších oscilátorů, nicméně u navržených struktur zůstává amplituda se změnou kmitočtu normální. AGC by tedy nemělo být nutné.

Na následujícím obrázku (Obr. 4.3) je uveden obvod stabilizace amplitudy, který byl navržen a prezentován například v [32]. Zapojení je z této práce převzato.

Jedná se o jednoduché zapojení, které se skládá z několika pasivních součástek a klasického NPN tranzistoru BC547C v zapojení se společným emitorem.

Princip AGC spočívá v uzavírání a otevírání tranzistoru při změnách v amplitudě generovaného signálu. Jestliže se amplituda výstupního signálu zmenší, tranzistor se více otevře a napětí se tím opět zvýší a naopak.

Časová konstanta je dána odporem proměnného rezistoru a volbou C je pak určena rychlost s jakou AGC reaguje na změny signálu [32].

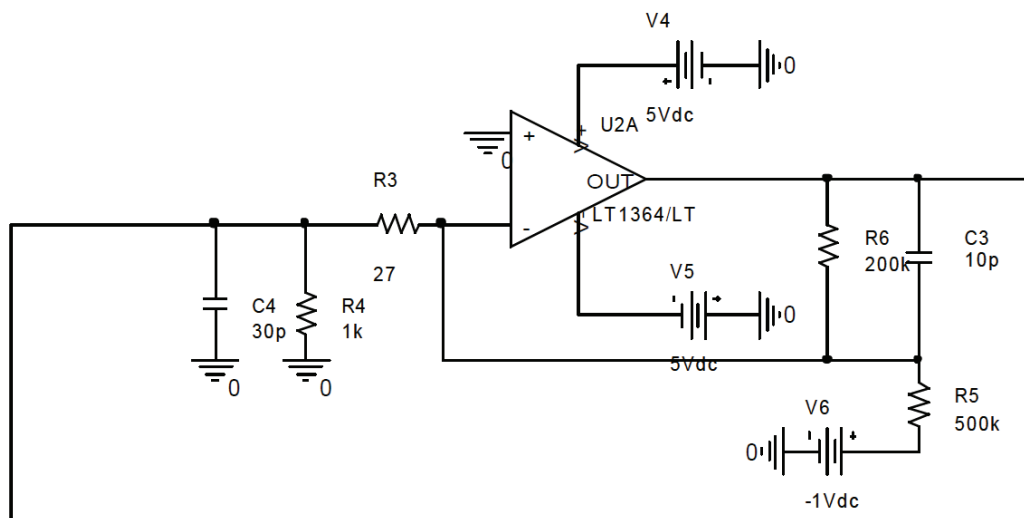


Obr. 4.3: Realizace AGC s tranzistorem

### 4.3 Zapojení s OZ

Jelikož u jednodušších oscilátorů ke kolísání amplitudy při přeladování téměř nedocházelo, výše uvedené zapojení ani nebylo použito. Proti tomu u oscilátoru s DACA a VCA docházelo při změně zesílení k velkému poklesu amplitudy signálu (viz Obr. 5.25).

Z tohoto důvodu byl do obvodu přidán následující obvod AGC. Funkce oscilátoru s AGC je podrobněji rozebrána v kapitole 5.6. Zapojení opět není původní. Vychází ze složitějšího obvodu, který byl poskytnut při konzultaci. Zapojení bylo pouze upraveno dle potřeb oscilátoru.



Obr. 4.4: AGC s operačním zesilovačem

Jádro obvodu tvoří operační zesilovač. Poměrem hodnot  $R_6$  a  $C_3$  je nastavována časová konstanta. Kondenzátor  $C_4$  by měl, jako v předchozím případě, udávat rychlost reakce obvodu AGC.

# 5 NÁVRH A SIMULACE ZAPOJENÍ OSCILÁTORŮ

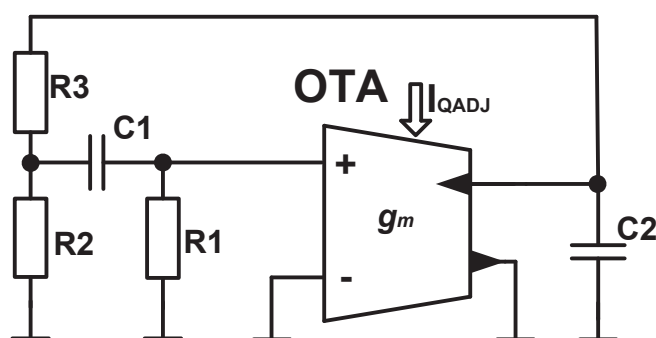
V této kapitole bude následovat šest zapojení oscilátorů. Pro realizaci byly zvoleny aktivní prvky OTA, VCA a DACA, přičemž u zapojení s OTA jsou uvedeny tři různé realizace s odlišným počtem zesilovačů.

Přesto že je již oblast oscilátorů prozkoumána velmi podrobně, následující struktury by doposud neměly být nikde prezentovány nebo nebyly ověřeny jejich vlastnosti. Zejména u zapojení s OTA však existuje mnoho podobných návrhů.

## 5.1 Oscilátor s jedním OTA a pasivními prvky

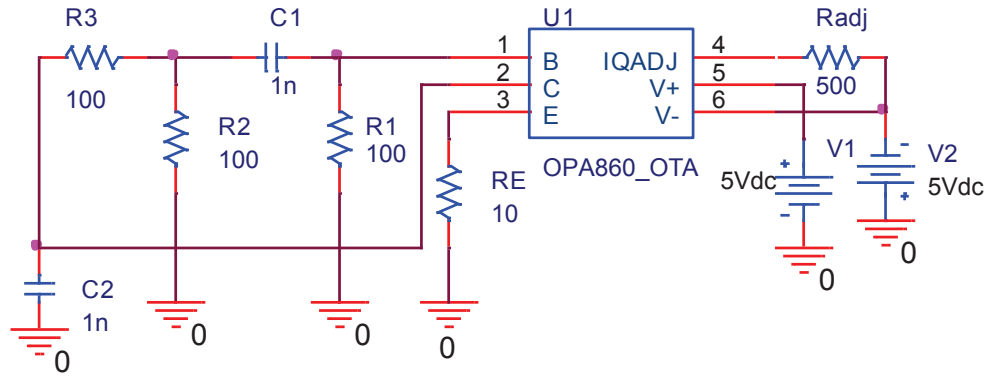
Obvod obsahuje jeden transkonduktanční operační zesilovač OTA, pro který byl při simulacích zvolen PSpice model zesilovače od Texas Instruments OPA860[23]. Podrobnější popis je uveden v kapitole 3.3.1. Zapojení je dále doplněno pěti pasivními prvky. Dvěma kondenzátory a třemi rezistory.

Oscilátor byl navržen pomocí metody admitanční sítě, jejíž stručný popis uvádí kapitola 1.5. Dle tohoto postupu je možno realizovat mnoho zapojení s různými vlastnostmi. Některá jsou uvedena například v [24][25]. Schéma zapojení oscilátoru je uvedeno na Obr. 5.1.



Obr. 5.1: Schéma zapojení oscilátoru s jedním OTA a pasivními prvky

Mimo síť pasivních prvků bylo pro simulace zapojení doplněno o rezistor  $R_E$  připojený na invertující vstup OTA a odpor připojený na pin  $I_{QADJ}$ . Jedná se o doporučené zapojení udávané výrobcem[23]. Blokovací kapacity nejsou uvedeny, jelikož nemají na simulaci žádný zásadní vliv. Schéma z programu PSpice je uvedeno na následujícím obrázku.



Obr. 5.2: Simulační PSpice schéma oscilátoru s jedním OTA

Pro výpočet oscilační podmínky a oscilační frekvence bylo využito programu SNAP. Po sestavení zapojení byla získána následující charakteristická rovnice.

$$s^2(R_1C_1C_2 + R_3C_1C_2 + R_2C_1C_2) + s(R_2R_3C_1 + R_1R_2C_2 - gmR_3C_1 + R_1R_3C_2 + R_1R_2R_3) = 0 \quad (5.1)$$

Aby byla splněna podmínka stability, položíme prostřední člen charakteristické rovnice B<sub>1</sub> roven nule.

$$(R_2R_3C_1 + R_1R_2C_2 - gmR_3C_1 + R_1R_3C_2 + R_1R_2R_3) = 0 \quad (5.2)$$

Po úpravě získáváme oscilační podmínku. Transkonduktance  $g_m$  je pak přímo úměrná kombinaci  $R_1$ ,  $R_2$  a  $C_2$ .

$$g_m = \frac{R_1R_2C_2}{C_1} + \frac{R_1C_2}{C_1} + R_1 + R_2 \quad (5.3)$$

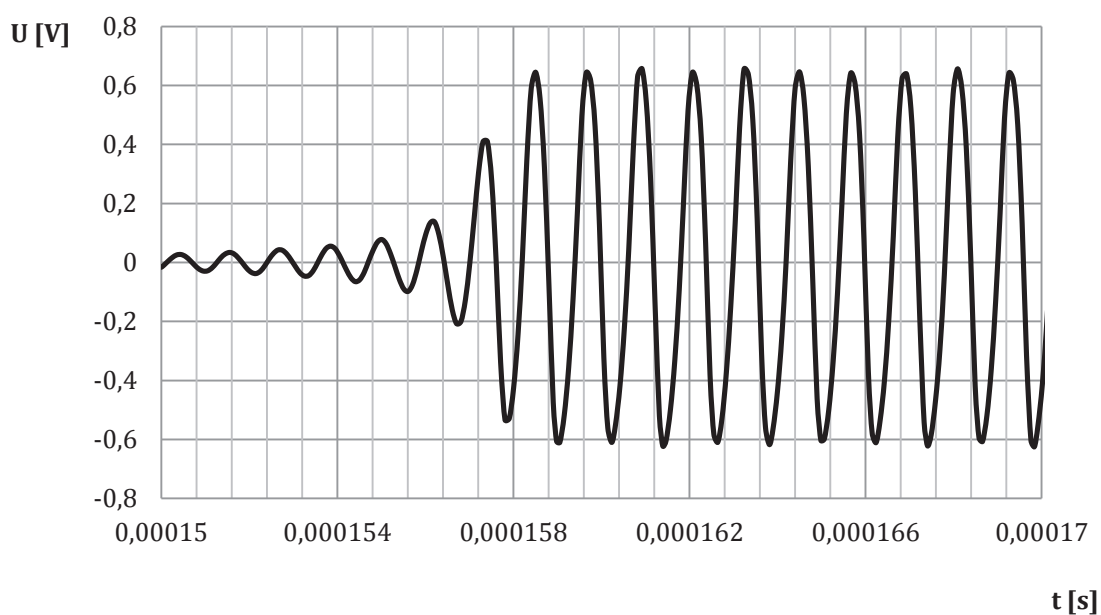
Oscilační kmitočet je pak dle následujícího vztahu roven odmocnině podílu posledního a prvního členu charakteristické rovnice.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{B_0}{B_2}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_1R_2R_3}{C_1C_2(R_1R_2R_3)}} \quad (5.4)$$

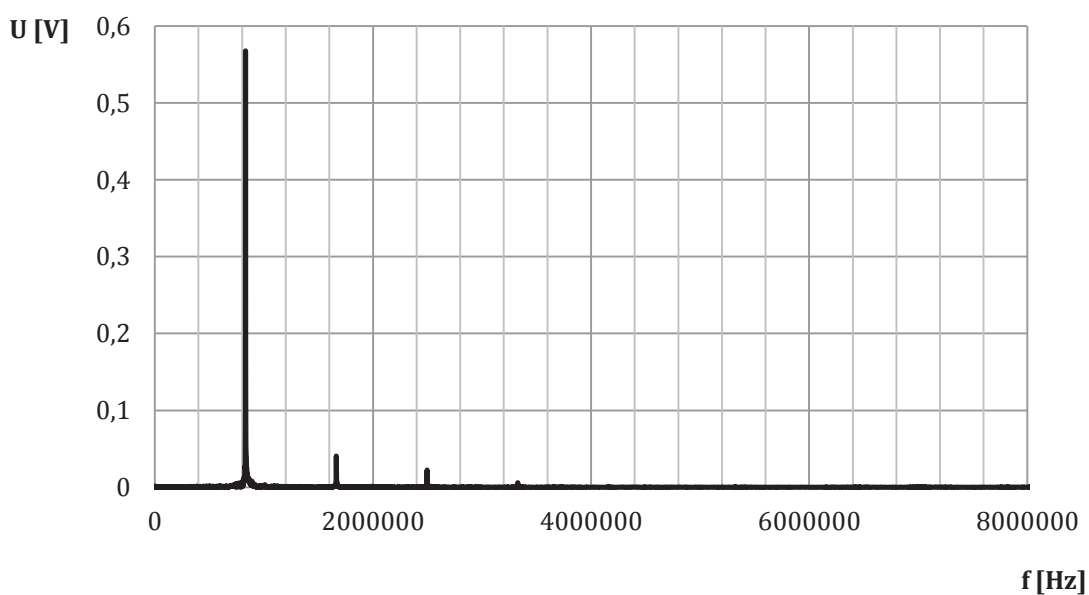
Pro simulace byly použity hodnoty rezistorů  $R_1=R_2=R_3=100 \Omega$  a  $C_1=C_2=1 \text{ nF}$ .

Současnou změnou hodnot rezistorů  $R_2$  a  $R_3$  od  $100 \Omega$  do přibližně  $6 \text{ k}\Omega$  je možno přeladovat kmitočet v rozsahu  $20 \text{ kHz}$  až  $1,5 \text{ MHz}$ . Při změně kondenzátorů  $C_1$  a  $C_2$  na nižší hodnotu, lze pak dosáhnout i vyšších kmitočtů.

Na Obr. 5.3 je uveden časový průběh napětí na výstupu oscilátoru. Spektrum výstupního signálu je pak na Obr. 5.4. Oscilační kmitočet pro výše uvedenou kombinaci hodnot pasivních prvků je přibližně  $820 \text{ kHz}$ .



Obr. 5.3: Časový průběh na výstupu oscilátoru s jedním OTA



Obr. 5.4: Spektrum na výstupu oscilátoru s jedním OTA

Jak je z Obr. 5.4 patrné, objevují se ve spektru nějaké nežádoucí harmonické složky. V následující tabulce je uveden jejich výpis.

Tab. 5.1: Napěťové úrovně jednotlivých harmonických složek spektra

Harmonická složka	Úroveň napětí [V]
1.	0,586
2.	0,04
3.	0,022

Dle vztahu 1.7, uvedeného v kapitole 1.4, je pak činitel harmonického zkreslení THD roven 5,31% (viz výpočet níže). Poněkud zvýšená hodnota THD je zřejmě způsobena mírnou deformací, která je trochu patrná z časového průběhu na Obr. 5.3. Pro jiné kmitočty se bude hodnota THD lišit.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (5.5)$$

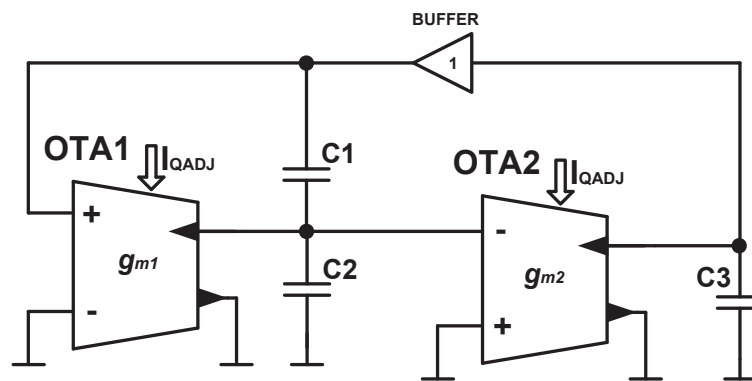
$$THD = \frac{\sqrt{0,04^2 + 0,022^2}}{0,586} \cdot 100 \quad (5.6)$$

$$THD = \underline{\underline{5,31 \%}} \quad (5.7)$$

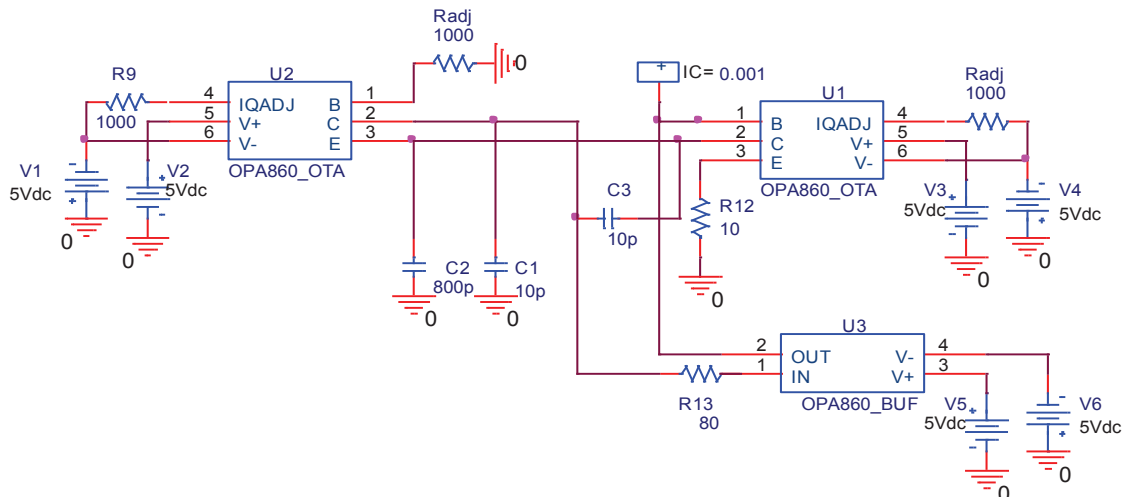
## 5.2 Oscilátor se dvěma OTA a pasivními prvky

Oscilátor se skládá z dvou transkonduktorů OTA, tří kondenzátorů a oddělovacího zesilovače (BUFFER) se zesilením rovným jedné. Opět zde byl pro simulace využit model obvodu OPA860, který uvnitř čipu obsahuje také jeden buffer[23].

Na následujícím obrázku je uvedeno navržené schéma oscilátoru. Obr. 5.6 pak ukazuje reálné zapojení použité pro simulace v programu PSpice.



Obr. 5.5: Schéma zapojení oscilátoru se dvěma OTA a třemi kondenzátory



Obr. 5.6: Simulační PSpice schéma oscilátoru se dvěma OTA

Obdobně jako u prvního oscilátoru i toto zapojení vzniklo z admitanční sítě. Byla použita úplná admitanční síť, prezentovaná například v [22] skládající se z dvaceti admitancí a dvou aktivních prvků. Tato byla následně upravena pro dva zesilovače OTA.

Charakteristická rovnice má následující tvar.

$$s^2(C_1C_3 + C_2C_3 + C_1C_2) + s(g_{m1}C_3 - g_{m2}C_3) + g_{m1} \cdot g_{m2} \quad (5.8)$$

Opět položíme člen  $B_1$  charakteristické rovnice roven nule, čímž získáme oscilační podmínku.

$$(g_{m1}C_3 - g_{m2}C_3) = 0 \quad (5.9)$$

Z rovnice (5.9) vyplývá, že k zajištění stability musí být transkonduktance stejné.

$$g_{m1} = g_{m2} \quad (5.10)$$

Oscilační frekvence pak vyjde následovně.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{B_0}{B_2}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1} \cdot g_{m2}}{C_1C_2 + C_1C_3 + C_2C_3}} \quad (5.11)$$

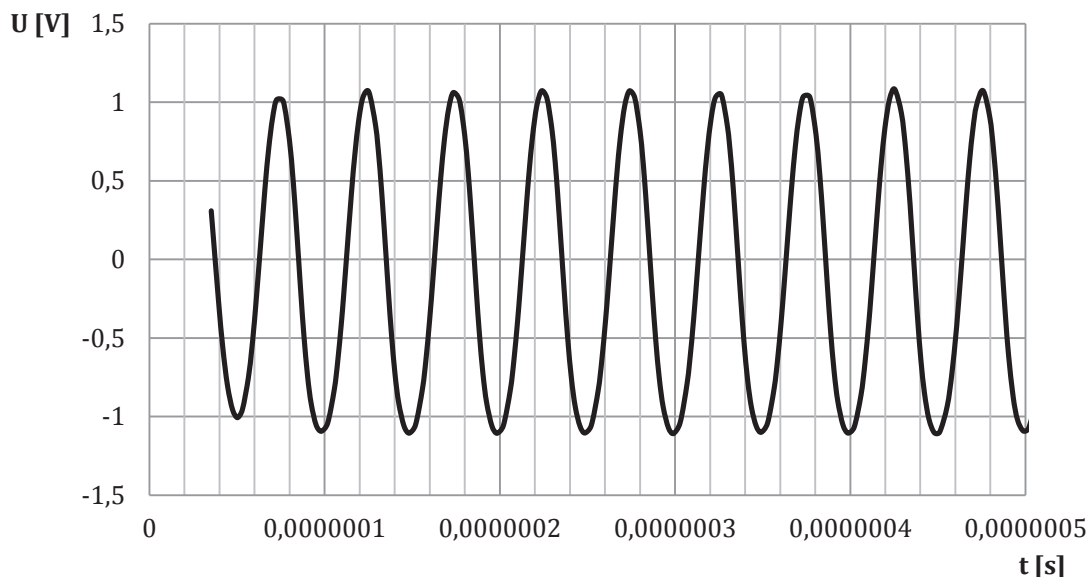
Pokud zvolíme  $C_1=C_2=C_3$  a platí rovnost (5.10), můžeme vztah upravit následovně

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{g_m}{3C} \quad (5.12)$$

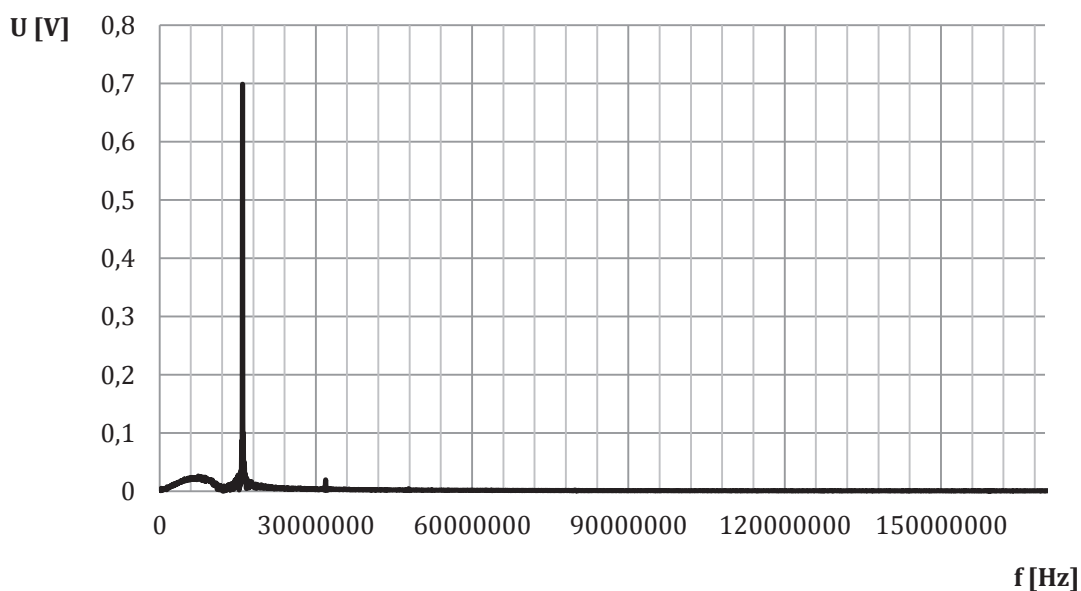
Při dodržení výše uvedených podmínek se na výstupu objeví harmonický signál (viz Obr. 5.7). Spektrum je pak na Obr. 5.8. Uvedené průběhy odpovídají nastaveným hodnotám pasivních prvků  $C_1=C_2=C_3=100\text{pF}$ .

Oscilační kmitočet je možno přeladovat pomocí rezistor  $R_9$ , a to jeho změnou od 1 k $\Omega$  do 20 k $\Omega$ . Tomu pak odpovídá rozsah řízení od přibližně 10 MHz do 30 MHz.

Uvedené průběhy na Obr. 5.7 a Obr. 5.8 jsou pak odpovídající nastavené hodnotě rezistoru  $R_9$  na 10 k $\Omega$ . Oscilační kmitočet se pohybuje kolem 15 MHz. Při podrobnější analýze časového průběhu je však patrné drobné kolísání amplitudy signálu v řádech desetin voltu.



Obr. 5.7: Časový průběh na výstupu oscilátoru se dvěma OTA



Obr. 5.8: Spektrum na výstupu oscilátoru se dvěma OTA

Ve spektru se v tomto případě neobjevují téměř žádné nežádoucí vyšší harmonické složky, čemuž také odpovídá dále uvedená hodnota THD=2,84 %.

V následující tabulce jsou uvedeny napěťové úrovně jednotlivých složek.

Tab. 5.2: Napěťové úrovně jednotlivých harmonických složek spektra

Harmonická složka	Úroveň napětí [V]
1.	0,698
2.	0,0198

Opět, podle vztahu pro činitele harmonického zkreslení z kapitoly 1.4, následuje výpočet THD.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (5.13)$$

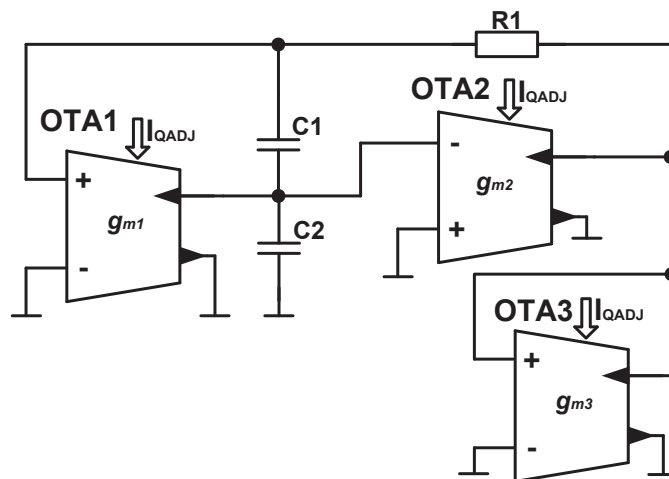
$$THD = \frac{\sqrt{0,0198^2}}{0,698} \cdot 100 \quad (5.14)$$

$$THD = \underline{\underline{2,84 \%}} \quad (5.15)$$

### 5.3 Oscilátor se třemi OTA a pasivními prvky

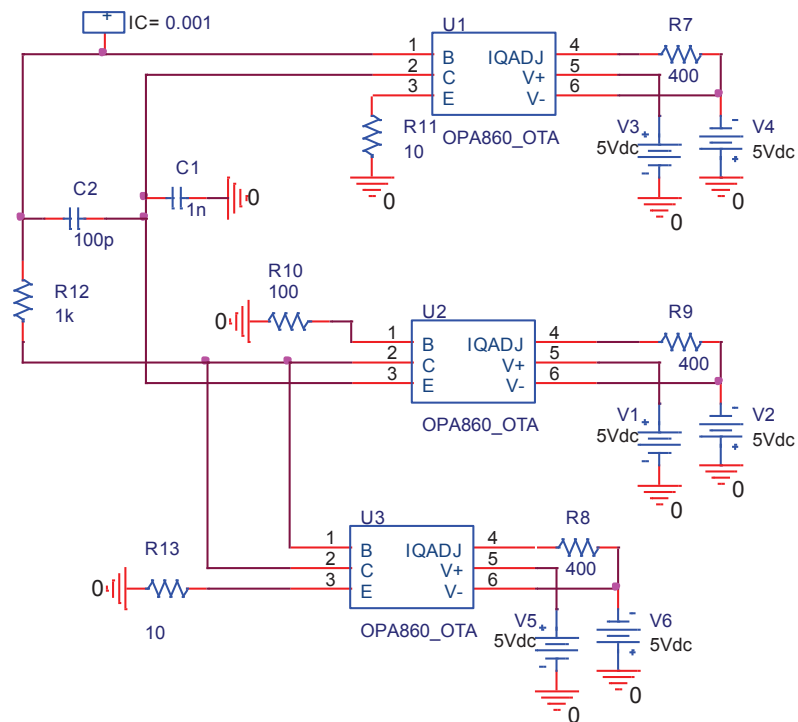
Navržený oscilátor je velmi podobný předchozímu zapojení, nicméně jsou zde použity tři transkonduktory OTA, dva kondenzátory a rezistor. Schéma zapojení a simulační schéma jsou na následujících obrázcích (viz Obr. 5.9 a Obr. 5.10).

Oscilátor vznikl ze zapojení se dvěma transkonduktančními zesilovači, pouze zde byl zařazen třetí zesilovač, který by měl zlepšovat vlastnosti oscilátoru. Zejména stabilitu a přeladitelnost.



Obr. 5.9: Obecné schéma zapojení oscilátoru se třemi OTA

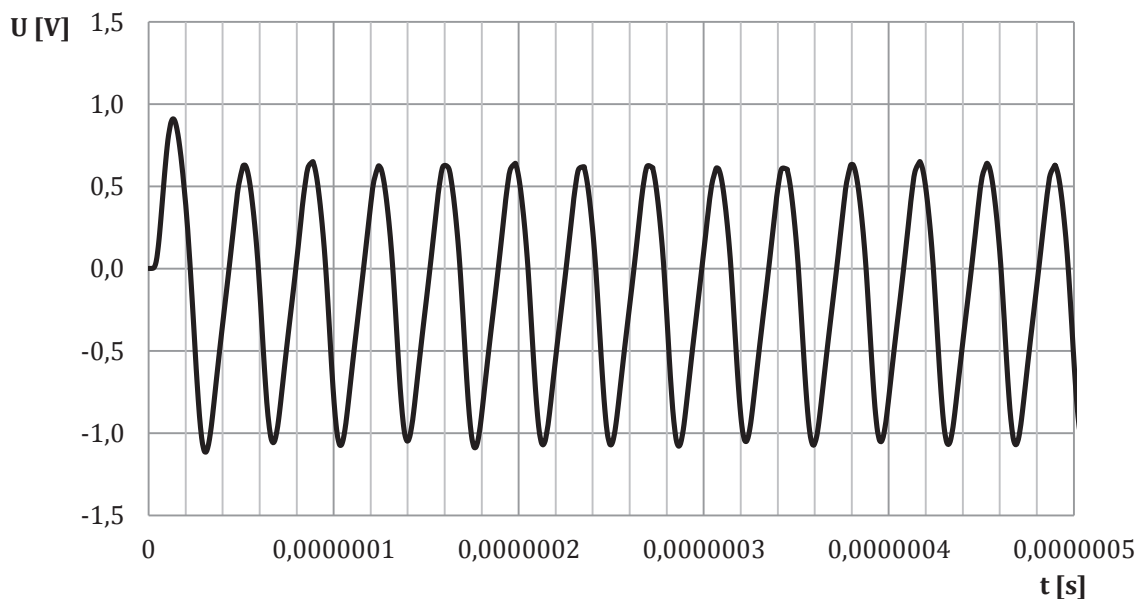
Zapojení je sice funkční a vykazuje lepší stabilitu než předchozí oscilátor, nicméně použití tří zesilovačů OTA je v praxi zřejmě zbytečné, jelikož k očekávanému zlepšení vlastností příliš nedošlo.



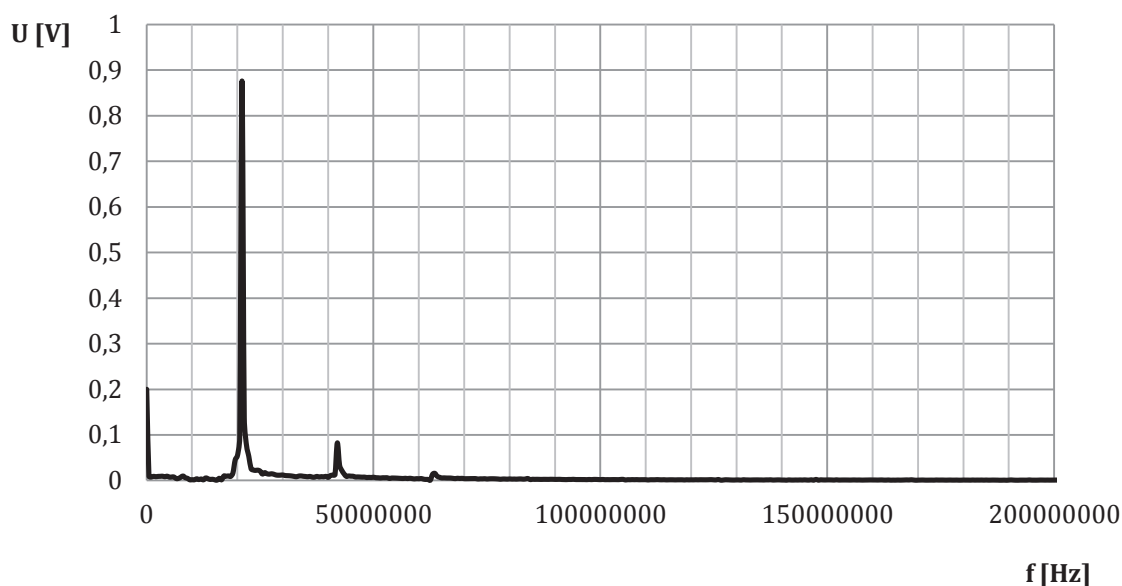
Obr. 5.10: Simulační PSpice schéma oscilátoru se třemi OTA

Přelaďování oscilátoru je také docela nepoužitelné. Je realizováno změnou kapacit kondenzátorů  $C_1$  a  $C_2$ . Rozsah kmitočtů se pohybuje přibližně v mezích 6 MHz až 35 MHz.

Na následujícím obrázku je časový průběh na výstupu oscilátoru. Obr. 5.12 je pak jeho spektrum. Průběhů bylo dosaženo po nastavení  $C_1=1$  nF,  $C_2=100$  pF a tomu odpovídá oscilační kmitočet přibližně 20 MHz.



Obr. 5.11: Časový průběh na výstupu oscilátoru se třemi OTA



Obr. 5.12: Spektrum na výstupu oscilátoru se třemi OTA

Ve spektru na Obr. 5.12 se vyskytují nežádoucí vyšší harmonické složky. Jejich napěťové úrovně jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5.3: Napěťové úrovně jednotlivých harmonických složek

Harmonická složka	Úroveň napětí [V]
1.	0,881
2.	0,068
3.	0,026

Činitel harmonického zkreslení THD je, stejně jako v předchozích případech, vypočítán následovně.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (5.16)$$

$$THD = \frac{\sqrt{0,068^2 + 0,026^2}}{0,881} \cdot 100 \quad (5.17)$$

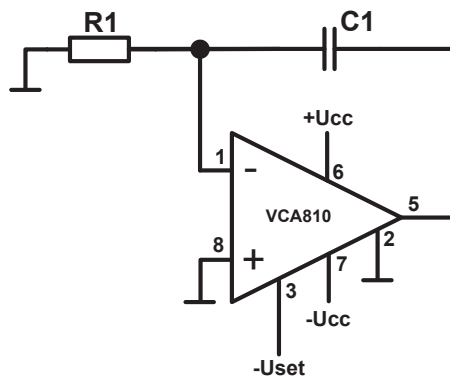
$$THD = \underline{\underline{8,26 \%}} \quad (5.18)$$

## 5.4 Oscilátor s VCA810

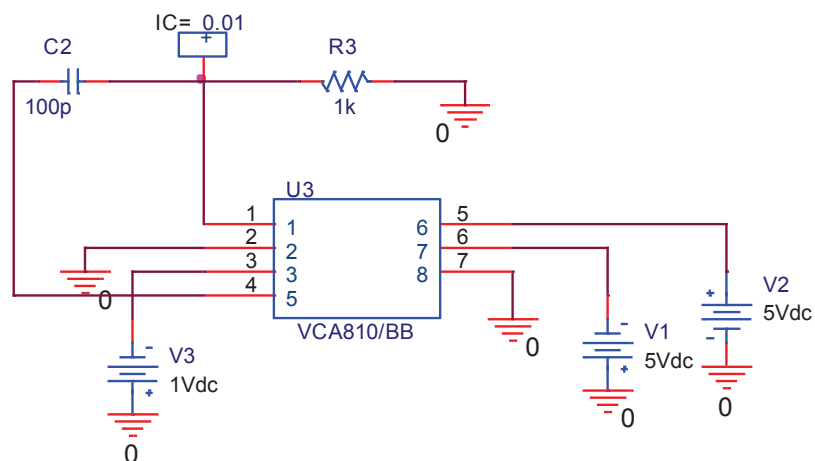
Při návrhu tohoto oscilátoru byl použit napětím řízený zesilovač v zapojení integrátor. Obvod VCA810 je používán také v dalších následujících zapojeních. Toto triviální zapojení je uvedeno zejména k ověření, zda je tento zesilovač vhodný k realizaci oscilátorů a funkčních generátorů. Další myšlenkou byla možnost přeladování oscilátoru řídicím napětím  $U_{set}$ .

Pro simulace byl zvolen model zesilovače VCA810 od Texas Instruments[17]. Jeho vlastnosti, popis a základní zapojení jsou popsány v kapitole 3.3.2.

Schéma oscilátoru a zapojení použité při simulaci jsou na Obr. 5.13 a Obr. 5.14.



Obr. 5.13: Schéma zapojení oscilátoru s VCA810



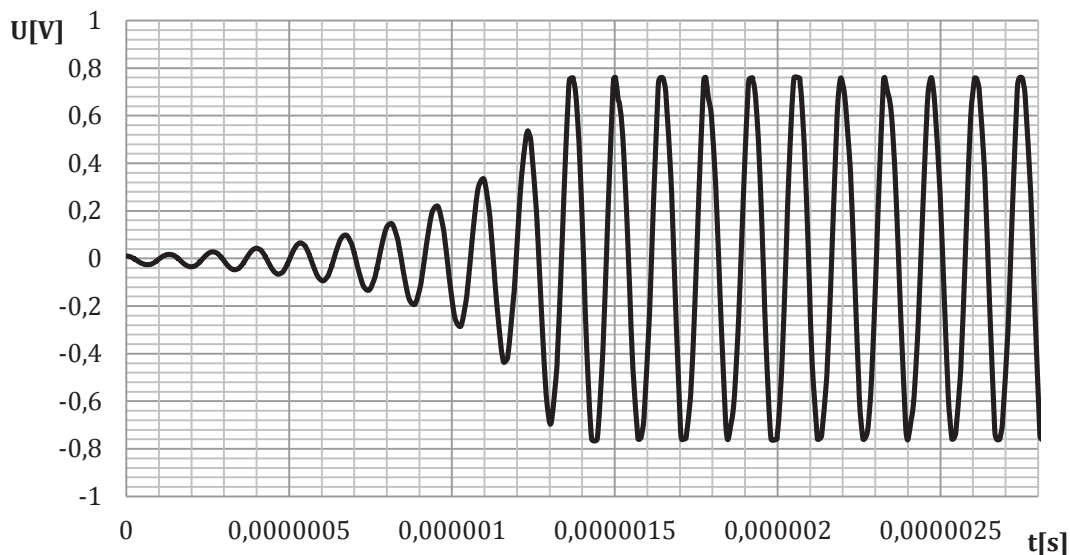
Obr. 5.14: Simulační PSpice schéma oscilátoru s VCA810

Po nastavení následujících hodnot pasivních prvků,  $C=100$  pF a  $R=1$  k $\Omega$ , se na výstupu objevil harmonický signál s amplitudou přibližně 0,75 V. Jeho časový průběh je na Obr. 5.15.

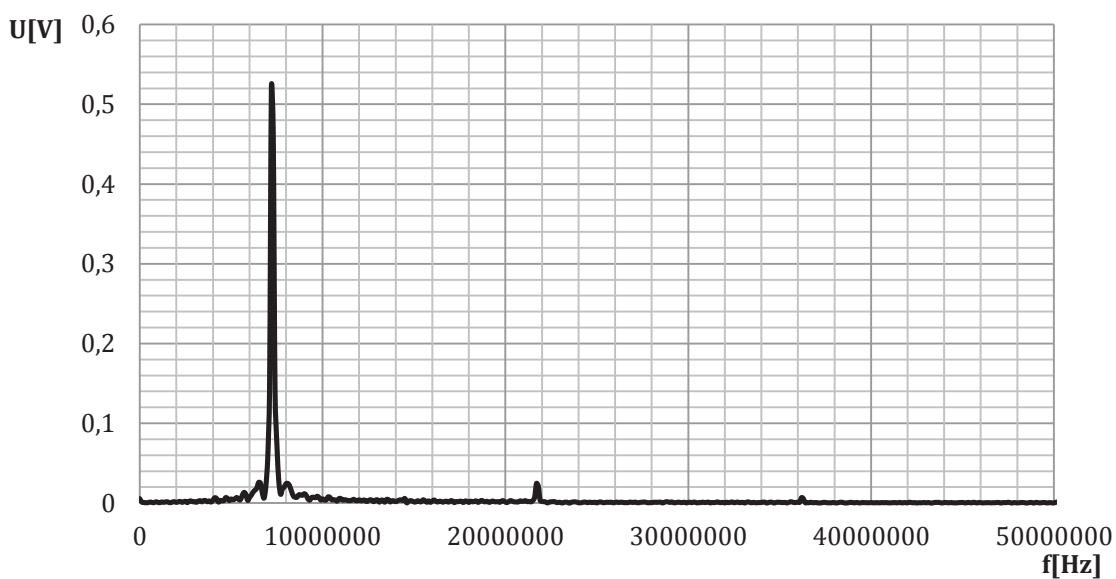
Změna zisku zesilovače je realizována připojením záporného napětí, v rozsahu 0 až -2V, na pin s označením  $V_C$  (3). V tomto případě bylo nastaveno  $U_{set} = -1$  V.

Oscilační kmitočet je možno přelad'ovat přibližně v rozsahu 4 MHz až 8 MHz, a to změnou velikosti odporu R.

Spektrum výstupního signálu pro  $R=1\text{ k}\Omega$ , čemuž odpovídá oscilační kmitočet 7,7 MHz je na Obr. 5.16.



Obr. 5.15: Časový průběh na výstupu oscilátoru s VCA810



Obr. 5.16: Spektrum na výstupu oscilátoru s VCA810

Dle následujícího výpočtu je THD, pro tento průběh, 5,436 %. Hodnoty harmonických složek ze spektra na Obr. 5.16 jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5.4: Napěťové úrovně jednotlivých harmonických složek spektra

Harmonická složka	Úroveň napětí [V]
1.	0,523
2.	0,027
3.	0,0089

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (5.19)$$

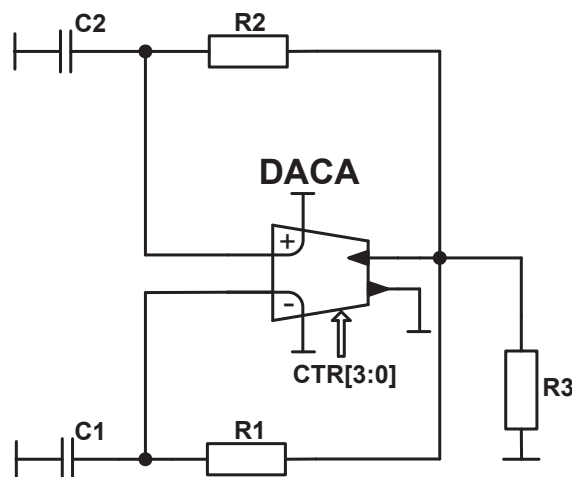
$$THD = \frac{\sqrt{0,027^2 + 0,0089^2}}{0,523} \cdot 100 \quad (5.20)$$

$$THD = \underline{\underline{5,436 \%}} \quad (5.21)$$

## 5.5 Oscilátor s DACA

Oscilátor vznikl intuitivním zapojením pasivních prvků k zesilovači DACA, který se jeví jako vhodný ke konstrukci oscilátorů. Jeho funkcí je možnost skokové změny zesílení v rozsahu 1 až 8. Tento obvod je podrobněji popsán v kapitole 3.6.1.

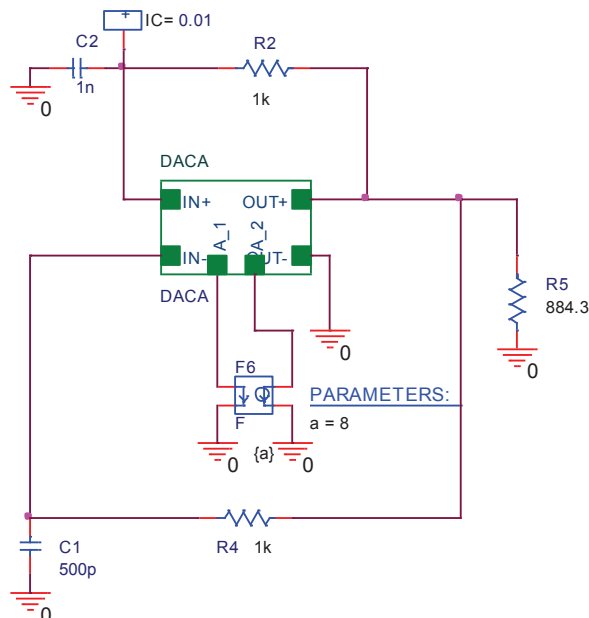
Již ze zapojení uvedeného na následujícím obrázku (viz Obr. 5.17), je patrné, že tato varianta nebude příliš funkční. Oscilátor lze sice přelaďovat, ale pouze změnou hodnot pasivních prvků a v poměrně malém rozsahu přibližně 10 MHz až 20 MHz. Změnou zesílení prvku DACA se pouze změní amplituda kmitů a navíc je vždy nutno donastavit rezistor  $R_3$ , jinak simulace neproběhne. Nicméně jsou zde uvedeny i parametry tohoto zapojení.



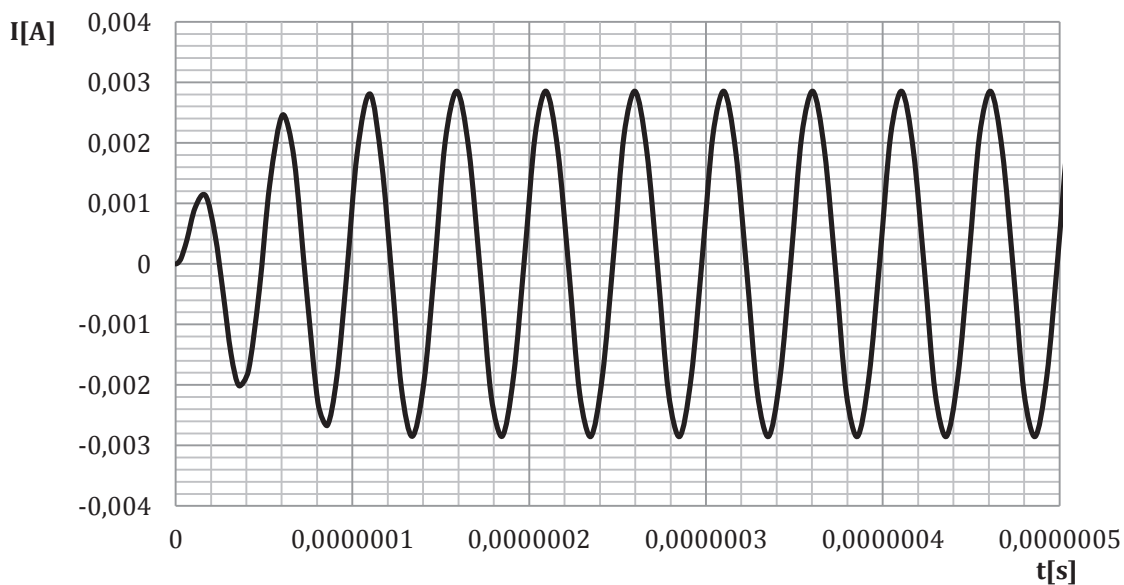
Obr. 5.17: Schéma zapojení oscilátoru s DACA

Jelikož se zesilovač DACA komerčně nevyrobí, byla v simulačním zapojení (Obr. 5.18) použita vnitřní struktura z Obr. 3.12.

K dosažení níže uvedených průběhů bylo nastaveno  $R_1=R_2= 1 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1= 500 \text{ pF}$  a  $C_2= 1 \text{ nF}$ . Časovému průběhu z Obr. 5.19 odpovídá nastavená hodnota zesílení  $A=1$ .

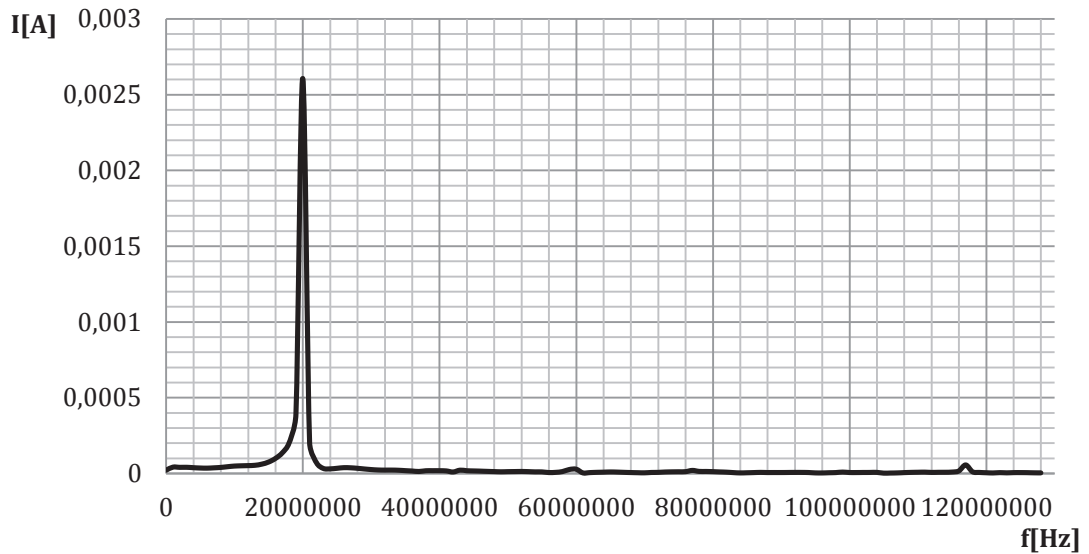


Obr. 5.18: Simulační PSpice schéma oscilátoru s DACA



Obr. 5.19: Časový průběh na výstupu oscilátoru s DACA

Oscilační frekvence pro výše nastavené hodnoty pasivních prvků se pohybuje kolem 20 MHz. Spektrum výstupního signálu je na Obr. 5.20.

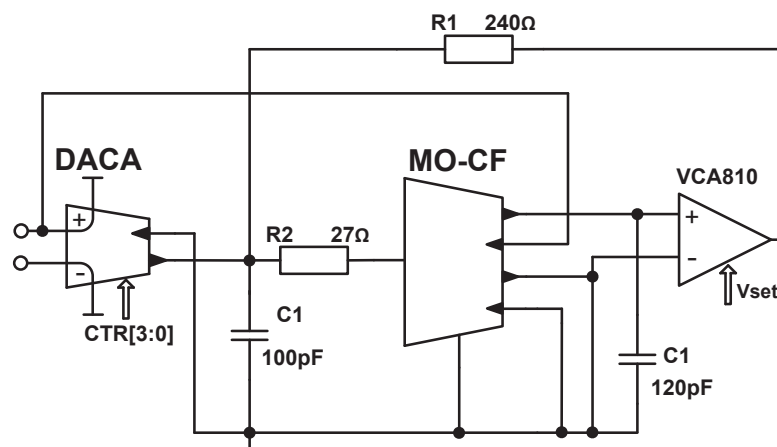


Obr. 5.20: Spektrum na výstupu oscilátoru s DACA

Z uvedeného spektra je patrné, že se zde nevyskytují téměř žádné nežádoucí vyšší harmonické složky. THD se bude pohybovat do 2 %.

## 5.6 Oscilátor s DACA a VCA810

Oscilátor se skládá z proudového říditelného zesilovače DACA (viz kapitola 3.3.3), proudového sledovače MO-CF (Multi-Output Current Follower) (viz kapitola 3.5), říditelného napěťového zesilovače a pasivních prvků. Na Obr. 5.21 je uvedeno principiální schéma zapojení.

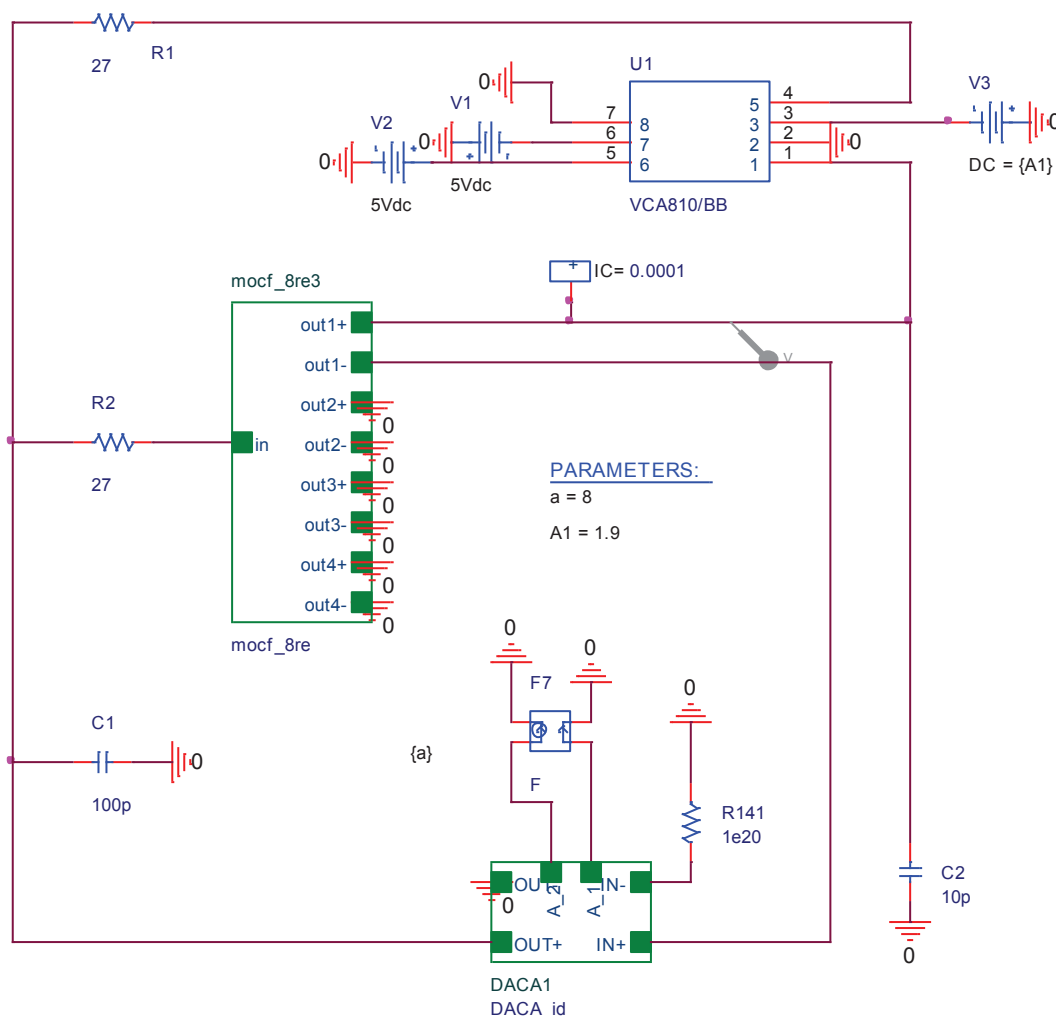


Obr. 5.21: Schéma zapojení oscilátoru s DACA a VCA

Místo MO-CF, který pouze vytváří kopie proudu přicházejícího na jeho vstup, lze použít dvouvýstupovou variantu DO-CF (3.5). Při praktickém návrhu bude k realizaci použit univerzální proudový konvektor UCC (3.4.2). S jeho pomocí lze realizovat oba prvky, nicméně použitím jednoduššího obvodu by se dal návrh ulehčit a zpřehlednit.

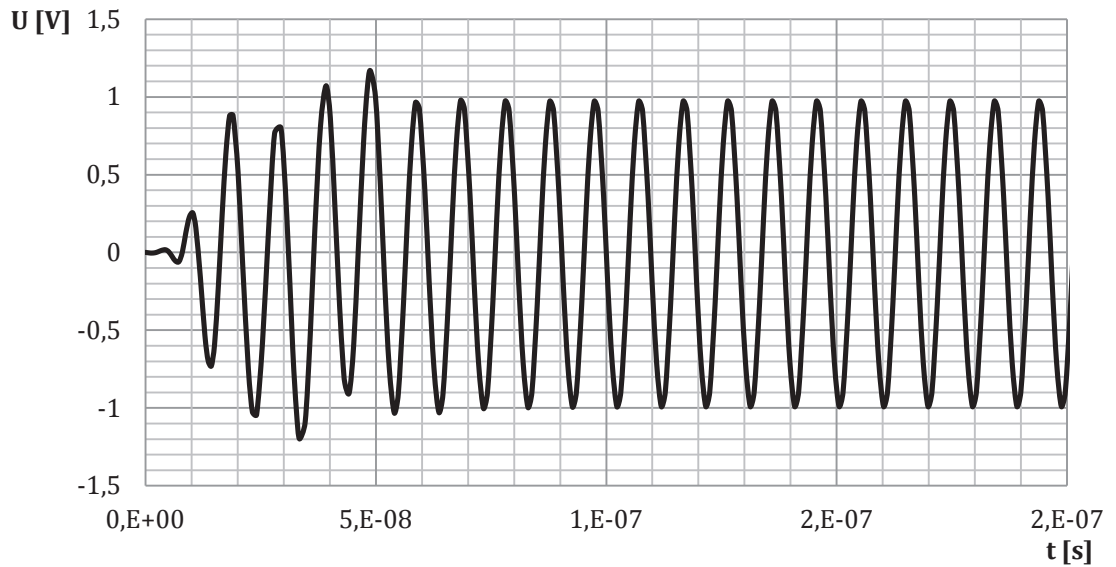
Původně plnil funkci VCA (Voltage Controlled Amplifier) ideální napětím řízený zdroj VCVS (Voltage Controlled Voltage Source) s nastaveným zesílením 1. Ten byl následně nahrazen již dříve uvedeným obvodem VCA810. Ten je v zapojení zodpovědný za vznik oscilací. Zesilovačem DACA je pak realizována změna oscilačního kmitočtu.

Pro simulace VCA byl použit PSpice model od Texas Instruments [17]. Vnitřní simulační modely DACA a UCC jsou uvedeny na Obr. 3.12 a Obr. 3.8. Celkové zapojení z programu OrCAD je na následujícím obrázku (Obr. 5.22).

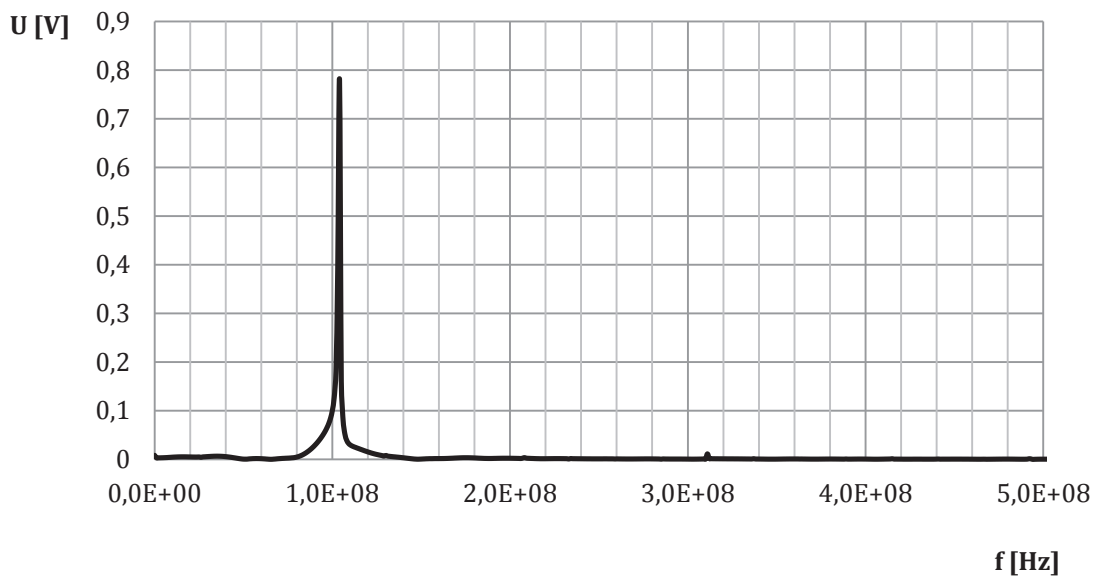


Obr. 5.22: Simulační PSpice schéma oscilátoru s DACA a VCA

Stabilních oscilací je dosaženo při nastaveném řídicím napětí VCA810 na -1,9 V. Změnou zesílení prvku DACA v rozsahu 1 – 8 je pak možno měnit oscilační kmitočet oscilátoru. Rozsah přeladění je určen hodnotami pasivních součástek. Následující časový průběh odpovídá nastavenému zesílení DACA = 1 a jak ukazuje spektrum na Obr. 5.24, oscilační kmitočet je 104 MHz.



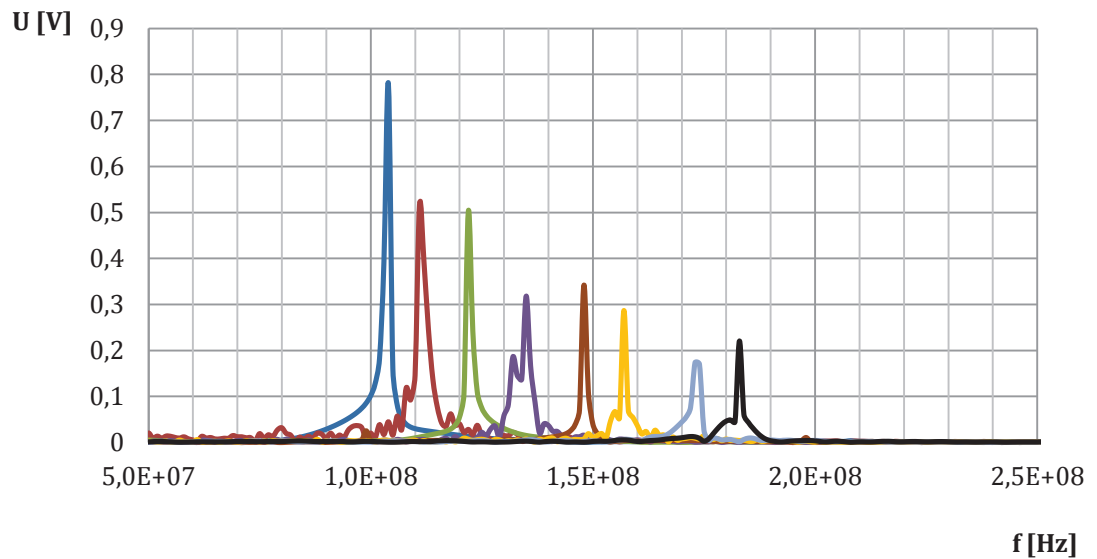
Obr. 5.23: Časový průběh na výstupu oscilátoru pro nastavené zesílení  $A=1$



Obr. 5.24: Spektrum na výstupu oscilátoru pro nastavené zesílení  $A=1$

Při nastavených hodnotách pasivních součástek,  $R_1=R_2=27 \Omega$ ,  $C_1=100 \text{ pF}$ ,  $C_2=10 \text{ pF}$ , je možno měnit oscilační kmitočet v rozsahu 104 MHz – 184 MHz. Jedná se o velice přemrštěné hodnoty frekvence, které budou reálně mnohem nižší. Také proto, že při simulaci jsou použity ideální modely aktivních prvků. Spektrum na výstupu oscilátoru, pro zesílení DACA 1 až 8, je na následujícím obrázku.

Změnou hodnot kondenzátorů a rezistorů lze snížit rozsah přeladění oscilačního kmitočtu až na 35 MHz.

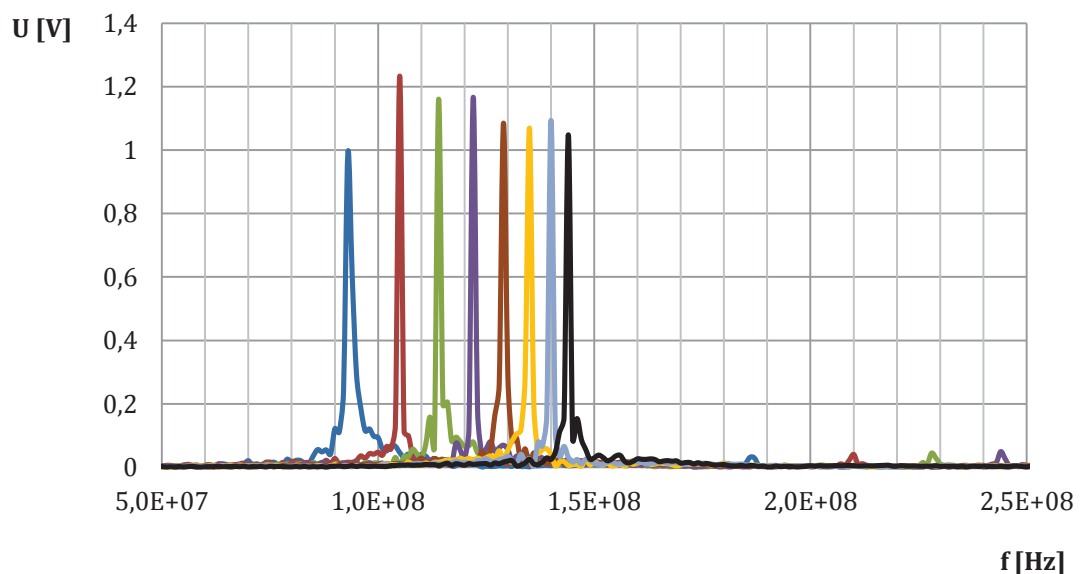


Obr. 5.25: Spektrum na výstupu oscilátoru pro různá zesílení DACA

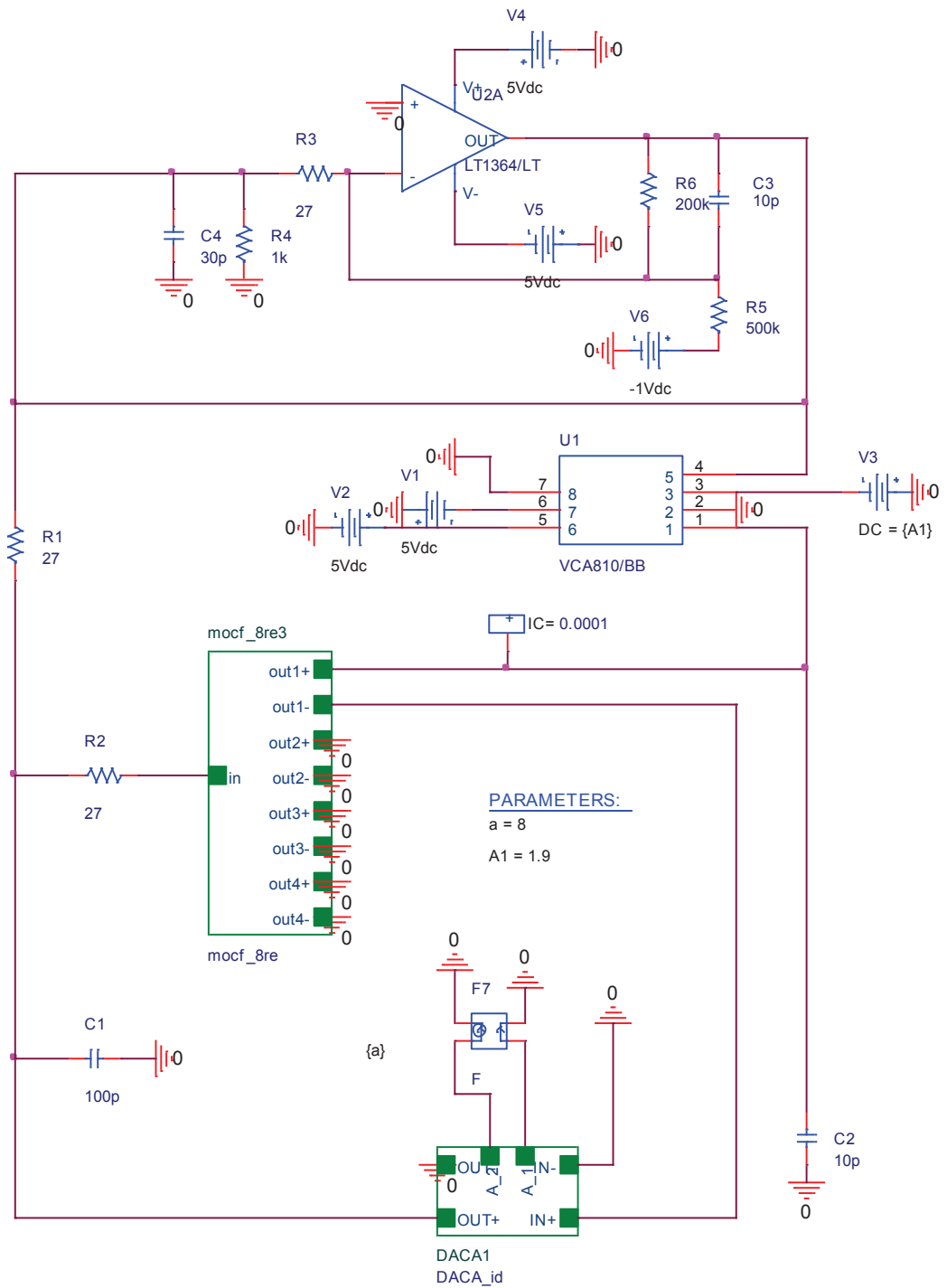
Ve spektru se nevyskytují žádné významné vyšší harmonické složky. Výstupní průběhy ovšem nejsou úplně dokonale ideální. Činitel harmonického zkreslení by se tedy mohl pohybovat přibližně kolem 2 %.

Při skokové změně zesílení DACA dochází k nežádoucímu kolísání amplitudy. Zapojení je tedy nutno doplnit o obvod pro stabilizaci amplitudy AGC (Amplitude Gain Control). Byl použit AGC z kapitoly 4.3. Výsledné zapojení z programu OrCAD, s jímž doplněným AGC, je na Obr. 5.27.

Po provedení simulace měly všechny výstupní průběhy (pro různá zesílení DACA) stejnou amplitudu 1,1 V. Pro přehlednost je uvedeno porovnání časových průběhů pro zesílení DACA 1 a 8. Průběhy jsou v přílohách na konci práce (viz Obr. 8.19). Spektrum na výstupu oscilátoru má pak následující tvar.



Obr. 5.26: Spektrum na výstupu oscilátoru se zavedeným AGC



Obr. 5.27: Zapojení oscilátoru s DACA a VCA s připojeným obvodem AGC

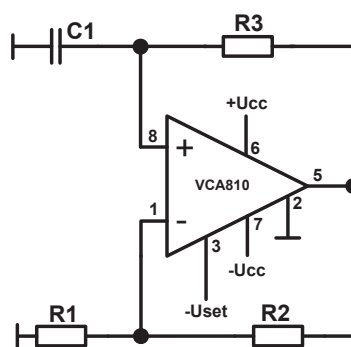
## 6 NÁVRH A SIMULACE ZAPOJENÍ GENERÁTORŮ

V následujícím textu jsou prezentována dvě zapojení generátorů využívající aktivní prvky VCA (Voltage Control Amplifier) a OTA (Operational Transconductance Amplifier). Při simulacích byly opět využity PSpice modely komerčně dostupných integrovaných obvodů VCA810 a OPA860 [17][23].

### 6.1 Generátor s VCA810

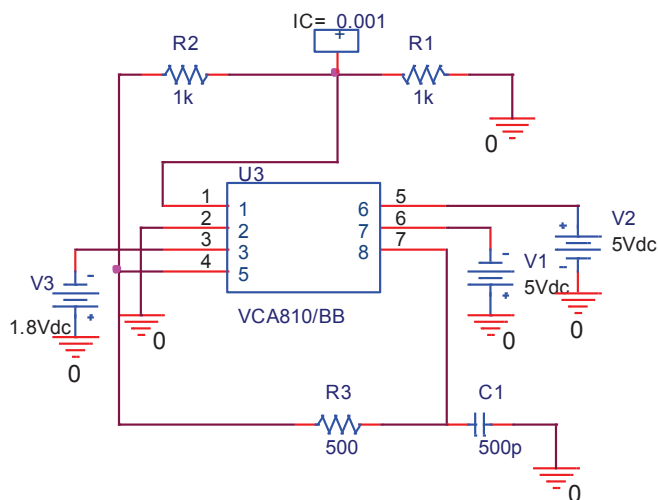
Při návrhu obvodu bylo použito klasické zapojení využívané při konstrukci generátorů. Zapojení využívá zapojení integrátor – komparátor.

Jádro obvodu tvoří výše uvedený napětím řízený zesilovač. Schéma zapojení je na následujícím obrázku.



Obr. 6.1: Schéma zapojení generátoru s VCA810

Následující obrázek (Obr. 6.2) je zapojení z programu OrCAD. Při simulaci byly použity hodnoty  $R_1=1\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=1\text{ k}\Omega$ ,  $R_3=500\ \Omega$ ,  $C_1=500\text{ pF}$ .



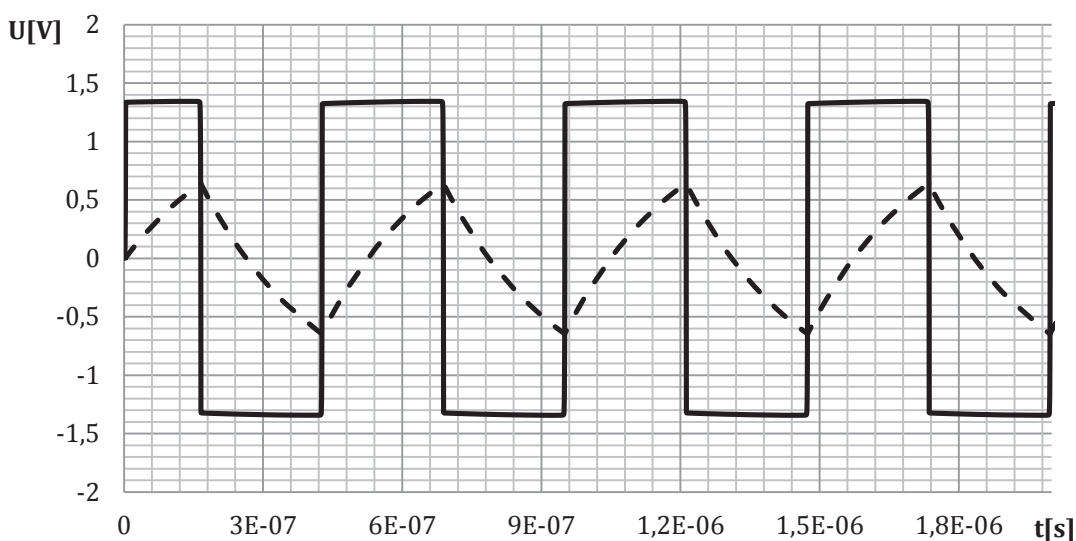
Obr. 6.2: Simulační PSpice schéma generátoru s VCA810

Princip funkce je následující. Komparátor tvořený rezistory  $R_1$  a  $R_2$  sleduje nabíjení a vybíjení kondenzátoru  $C_1$ . V momentě, kdy napětí na kondenzátoru dosáhne komparačního napětí, překlápí se. Generovaný trojúhelníkový signál je potom tvořen jednoduše integračním článkem. V momentě kdy se kondenzátor nabíjí, napětí lineárně roste a naopak.

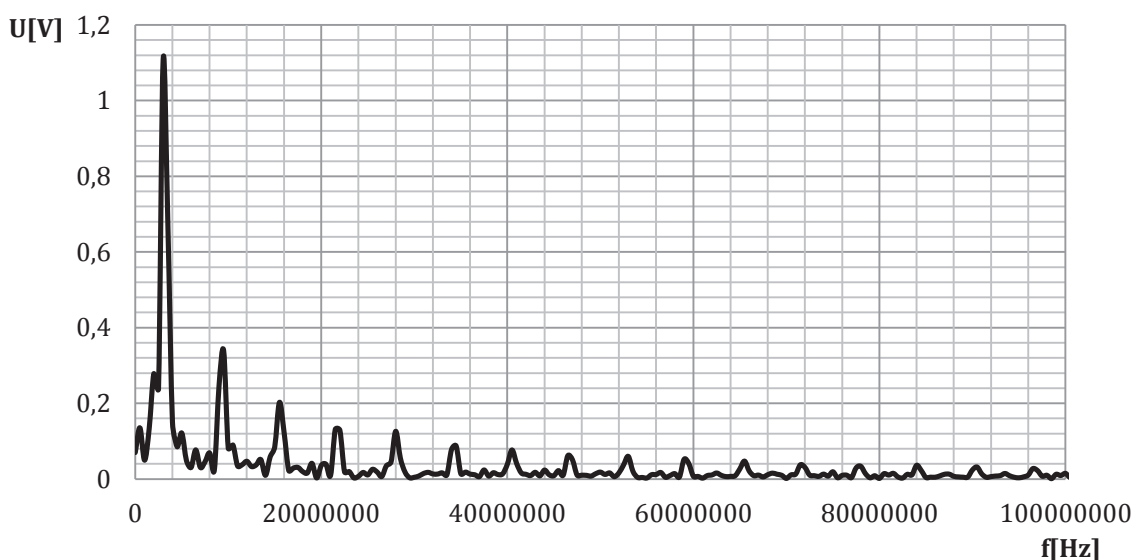
Pomocí záporného napětí, které je přivedeno na pin 3 (VC – Voltage Control) lze měnit kmitočet výstupního signálu v rozsahu 2 MHz až 5 MHz. Tomu odpovídající řídicí napětí je pak v rozsahu -1,2 V až -1,9 V.

Následující obrázek (Obr. 6.3) ukazuje generované časové průběhy napětí na výstupech generátoru.

Na Obr. 6.4 je pak spektrum obdélníkového signálu. Spektrum signálu trojúhelníkového uvedeno není.



Obr. 6.3: Generované časové průběhy



Obr. 6.4: Spektrum obdélníkového signálu

V následující tabulce jsou uvedeny úrovně napětí pro prvních deset harmonických složek z výše uvedeného spektra (Obr. 6.4).

Tab. 6.1: Přehled napěťových úrovní jednotlivých harmonických složek spektra

Harmonická složka	Úroveň napětí [V]
1.	1,682
2.	0,5241
3.	0,2651
4.	0,2534
5.	0,1833
6.	0,1654
7.	0,1132
8.	0,00884
9.	0,1127
10.	0,07188

Hodnotám v tabulce odpovídající činitel harmonického zkreslení je uveden níže a jeho hodnota je 42,08 %.

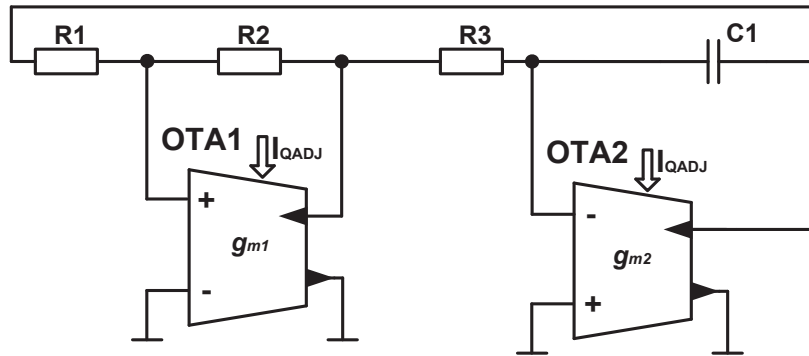
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (6.1)$$

$$THD = \frac{\sqrt{0,5241^2 + 0,2651^2 + 0,2534^2 + \dots + 0,07188^2}}{1,682} \cdot 100 \quad (6.2)$$

$$THD = \underline{\underline{42,08 \%}} \quad (6.3)$$

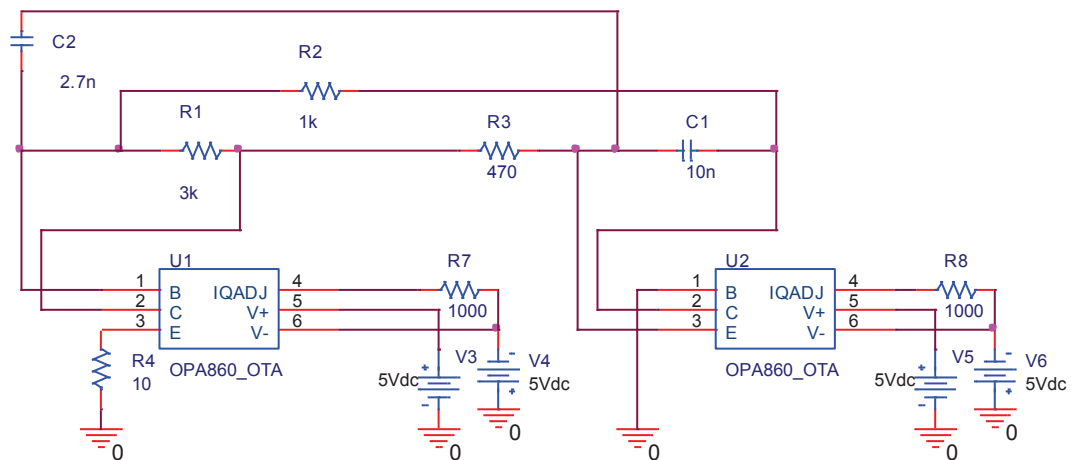
## 6.2 Generátor se dvěma OTA

Zapojení posledního generátoru obsahuje dva transkonduktory OTA a čtyři pasivní prvky. Základní myšlenkou bylo vytvořit dvojstupňové zapojení, kde jako první bude zařazen komparátor, z jehož výstupu bude vycházet obdélníkový signál a za něj potom integrátor, který bude generovat signál trojúhelníkový. Jedná se o klasické zapojení generátoru s OZ. Realizované zapojení je na následujícím obrázku.



Obr. 6.5: Schéma zapojení generátoru se dvěma OTA

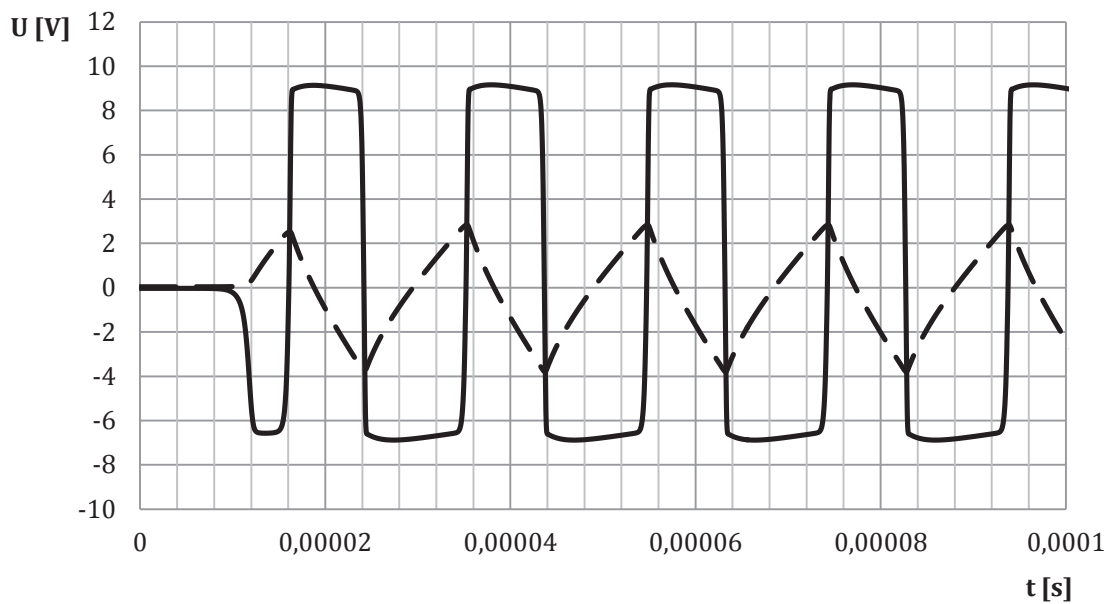
Stejně jako u výše uvedených oscilátorů, i zde byl při simulaci použit model integrovaného obvodu OPA860[23]. Simulační schéma z programu OrCAD je uvedeno na Obr. 6.6.



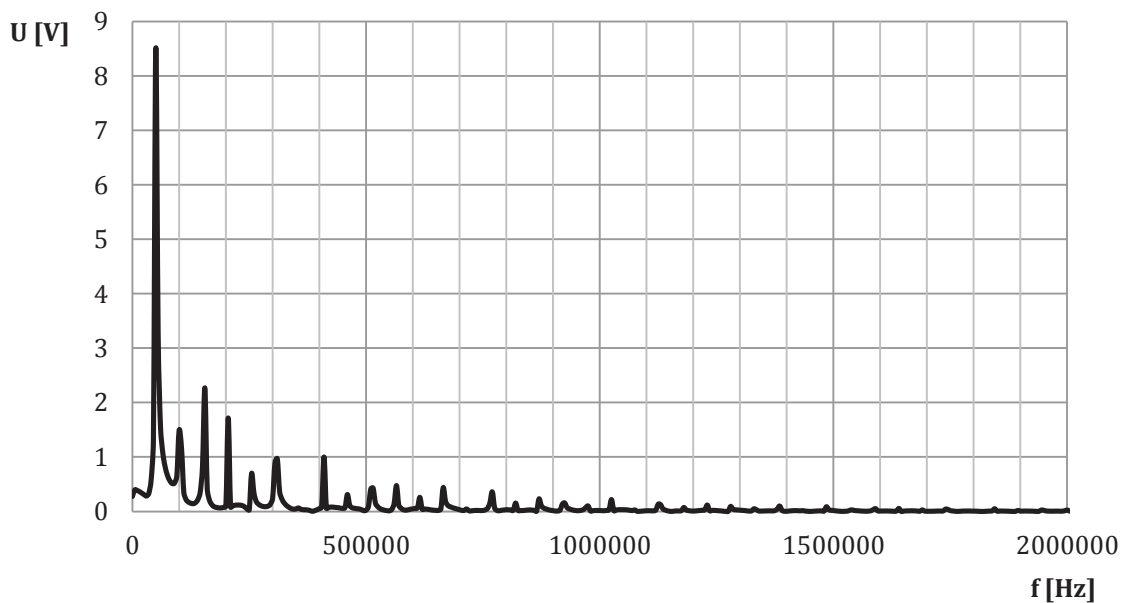
Obr. 6.6: Simulační PSpice schéma generátoru se dvěma OTA

Jakkoliv však může být toto zapojení vhodné při realizaci s operačními zesilovači, při návrhu s OTA již tak vhodné není. Na jednotlivých výstupech se sice objevily požadované průběhy (viz Obr. 6.7), ale jak je patrné, obdélník je poměrně zdeformovaný.

Do výše uvedeného zapojení byl navíc přidán ještě kondenzátor  $C_2=2,7$  nF, díky kterému dochází k mírnému vylepšení generovaných průběhů.



Obr. 6.7: Časové průběhy na výstupu generátoru se dvěma OTA



Obr. 6.8: Spektrum generovaného obdélníkového signálu

Výše uvedených časových průběhů i spektra na Obr. 6.8 bylo dosaženo při nastavených hodnotách pasivních prvků  $R_1=1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2=3 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1=10 \text{ nF}$ ,  $C_2=2,7 \text{ nF}$ .

U generátoru je možno plynule měnit kmitočet generovaných signálů pomocí rezistoru  $R_2$ . Změnou odporu od  $500 \text{ }\Omega$  do  $10 \text{ k}\Omega$  lze měnit kmitočet v rozsahu  $10 \text{ kHz}$  až  $110 \text{ kHz}$ .

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty prvních deseti harmonických složek výše uvedeného spektra.

Tab. 6.2: Úrovně napětí jednotlivých harmonických složek

Harmonická složka	Úroveň napětí [V]
1.	8,42
2.	1,494
3.	2,253
4.	1,703
5.	0,6766
6.	0,9692
7.	1,001
8.	0,311
9.	0,4281
10.	0,4774

Jak je uvedeno níže, vypočítaná hodnota činitele harmonického zkreslení THD je 43,02%.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (6.4)$$

$$THD = \frac{\sqrt{1,494^2 + 2,253^2 + 1,703^2 + \dots + 0,4774^2}}{8,42} \cdot 100 \quad (6.5)$$

$$THD = \underline{\underline{43,02 \%}} \quad (6.6)$$

Vzhledem k vysoké hodnotě THD i ne příliš přesvědčivým výsledkům simulací se toto zapojení nejeví jako kvalitní nebo vhodné k reálnému použití.

# SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ NAVRŽENÝCH OBVODŮ

První oscilátor, z Obr. 5.1, obsahuje pouze jeden OTA a pasivní prvky. Zapojení vzniklo pomocí metody autonomních obvodů. Při dodržení oscilační podmínky, bylo na jeho výstupu dosaženo stabilních oscilací, viz Obr. 5.3. Oscilační kmitočet je možno přeladovat změnou hodnot rezistorů  $R_2$  a  $R_3$  v rozsahu 35 kHz až 1,5 MHz.

Na Obr. 5.5 je zapojení oscilátoru se dvěma OTA a třemi kondenzátory. Ve zpětné vazbě je navíc zařazen oddělovací zesilovač se zesílením 1. Z Obr. 5.7 je patrné, že opět bylo dosaženo oscilací, nicméně dochází ke kolísání v rozsahu přibližně 5% z celkové amplitudy. Oscilační kmitočet lze řídit změnou hodnoty rezistoru  $R_{12}$  ( $R_E$ ) v rozsahu 4 MHz až 23 MHz.

Oscilátor z Obr. 5.9 obsahuje tři zesilovače OTA. U tohoto zapojení je již amplituda výstupního časového signálu bez zákmitů. Změna oscilačního kmitočtu je možná změnou hodnot kondenzátorů  $C_1$  a  $C_2$ . Toto řešení s ohledem na praktický návrh není příliš výhodné, nicméně kmitočet lze měnit v rozsahu 6 MHz až 35 MHz.

Při porovnání všech tří zapojení s OTA, se jeví jako nejlepší varianta se dvěma OTA. U prvního zapojení se pohyboval oscilační kmitočet pouze v řádu stovek kilohertzů až jednotek megahertzů a u posledního oscilátoru je nevýhodou změna kmitočtu pomocí kondenzátorů.

Oscilátor s VCA je na Obr. 5.13. Je tvořen jedním zesilovačem VCA810 a dvěma pasivními prvky v zapojení integrátor. Oscilací bylo dosaženo při nastavení řídicího napětí na -1 V a amplituda výstupního časového průběhu byla  $\sim 0,75$  V (viz Obr. 5.15). Při nastavené hodnotě  $R=1$  k $\Omega$  byl oscilační kmitočet 7,7 MHz. Přeladování oscilátoru je možné právě pomocí rezistoru  $R$ , a to v rozsahu 4 MHz až 8 MHz.

Dále je uveden oscilátor s DACA, který vznikl experimentálním zapojením pasivních prvků k zesilovači. Zapojení je na Obr. 5.17. Na výstupu oscilátoru (Obr. 5.19) je stabilní harmonický signál s kmitočtem 20 MHz. Jeho Přeladění je možné, nicméně pouze současnou změnou zesílení prvku DACA a hodnoty rezistoru  $R_3$ .

Jako poslední je prezentován oscilátor s DACA a VCA (Obr. 5.21), u kterého je změna kmitočtu skoková, realizovaná právě změnou zesílení prvku DACA v rozsahu 1 až 8. V simulacích byly použity ideální modely prvků a možná i díky tomu bylo dosaženo rozsahu oscilačních kmitočtů 104 MHz až 184 MHz.

První zapojení generátoru je na Obr. 6.1 a je zde využito zesilovače VCA810 a pasivních prvků v zapojení integrátor a komparátor. Lze generovat jak signál obdélníkový tak trojúhelníkový se střídou 1:1. Pomocí řídicího napětí je možno měnit kmitočet generovaných signálů přibližně v rozsahu 2 MHz až 5 MHz.

Jako poslední uvedené je zapojení generátoru se dvěma OTA (viz Obr. 6.5). Jedná se o kaskádně zařazené transkonduktory v klasickém zapojení komparátor – integrátor. Na Obr. 6.7 jsou sice patrné výstupní obdélníkové a trojúhelníkové průběhy, nicméně jsou zdeformované. Kmitočet generovaných pulzů lze měnit pomocí hodnoty rezistoru  $R_2$  v rozsahu 10 kHz až 110 kHz.

Výše popsané vlastnosti i vypočítané hodnoty THD jsou uvedeny v následující tabulce, která shrnuje všechna uvedená zapojení a některé jejich vlastnosti jako frekvenční rozsah či hodnotu THD.

Tab. 6.3: Shrnutí navržených zapojení a jejich parametrů

	Zapojení	Způsob řízení kmitočtu	Rozsah $f_{OSC}$	THD [%]
OSC	1OTA_3R_2C	Změnou $R_2, R_3$	35 kHz - 1,5 MHz	5,31
	2OTA_3C	Změnou $R_{12} (R_E)$	4 MHz – 23 MHz	6,1
	3OTA_1R_2C	Změnou $C_1, C_2$	6 MHz – 35 MHz	8,26
	OSC_VCA	Změnou R	4 MHz – 8 MHz	5,436
	OSC_DACA	Změnou pasivních prvků	10 MHz – 20 MHz	2
	OSC_DACA_VCA	Změnou R,C + zesílením DACA	35 MHz – 184 MHz	2
GEN	GEN_VCA	Změnou $U_{set}$	2 MHz – 5 MHz	42,08
	GEN_2OTA	Změnou $R_2$	10 kHz – 110kHz	43,02

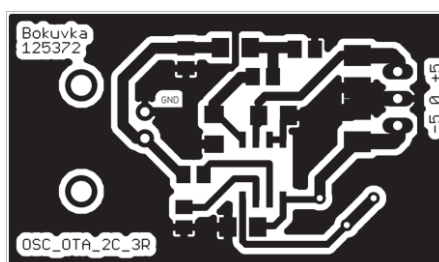


K napájecím kontaktům a napěťovým vývodům pouzdra jsou připojeny blokovací kapacity podle basic connections v kapitole 3.3.1. Výstupní signál je odebrán na výstupu s BNC konektorem pro připojení k osciloskopu.

Pro přeladování oscilátoru je využito odporového trimru. V zapojení z Obr. 5.1 je, dle simulací, přeladování realizováno současnou změnou dvou rezistorů. Nicméně pokud se nastaví  $R_2$  na hodnotu  $100\ \Omega$  a druhý rezistor se realizuje trimrem, je zapojení stále funkční, pouze se pozmění rozsah přeladění. Ve schématu níže je tedy použit pouze jeden trimr.

Při měření byla využita zařízení číslo 1, 3, 4 z Tab. 7.11 - měřicí přístroje.

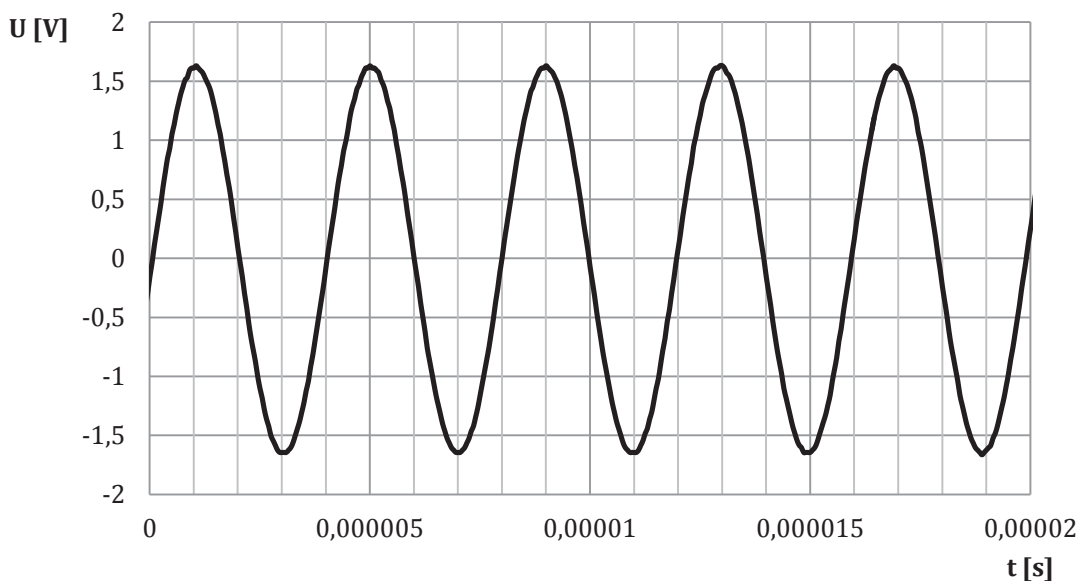
Navržená jednostranná deska plošných spojů z programu Eagle je uvedena na následujícím obrázku. V přílohách na konci práce je uvedena fotka již osazené horní i spodní strany DPS (viz Obr. 8.1 a Obr. 8.2).



Obr. 7.2: Navržená deska plošných spojů oscilátoru s jedním OTA

Obvod OPA860 je napájen symetrickým napětím  $\pm 5\text{ V}$ , nicméně začíná fungovat již kolem hodnoty napětí  $\pm 2\text{ V}$ . Po jeho připojení, se obvod rozkmital a na jeho výstupu se objevil harmonický signál viz Obr. 7.3.

Na použitém zdroji byla nastavena ochranná proudová pojistka  $100\text{ mA}$ , aby nedošlo, v případě chyby zapojení, ke zničení integrovaného obvodu. Proudový odběr v žádné napájecí větvi nepřekročil  $35\text{ mA}$ . Typicky se pohyboval kolem  $15 - 25\text{ mA}$ .



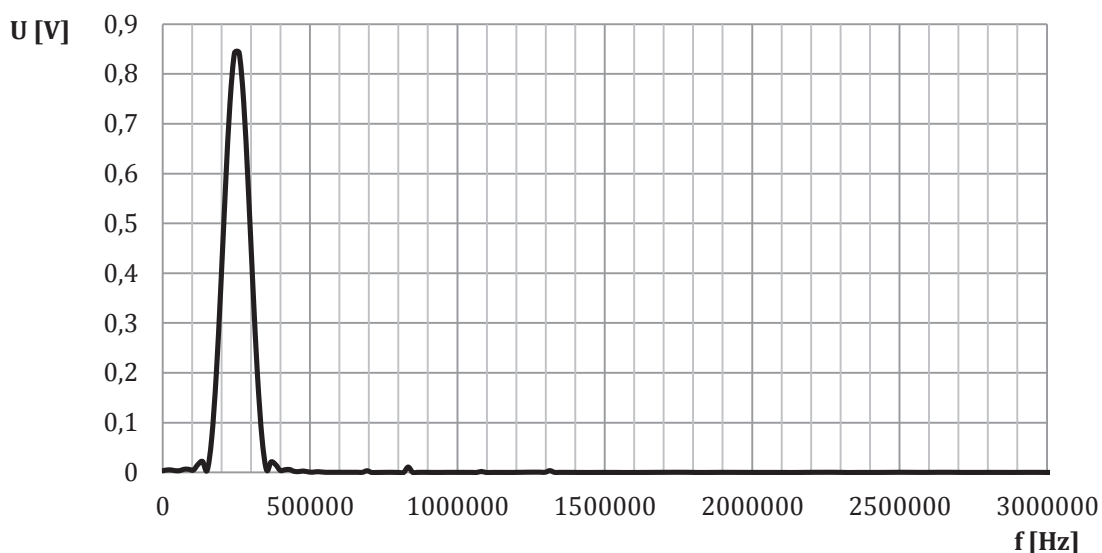
Obr. 7.3: Časový průběh na výstupu oscilátoru OSC\_1OTA

Sinusového průběhu na výše uvedeném obrázku je dosaženo těsně za krajní polohou trimru, jelikož oscilátor funguje až od hodnoty  $100\Omega$ . Hodnota použitého trimru má hodnotu  $1\text{ k}\Omega$ . Tento údaj, společně s ostatními použitými komponenty, je uveden v seznamu součástek (part list) v přílohách na konci práce (viz kapitola 8.1).

Očekávaný rozsah přeladění oscilátoru je  $35\text{ kHz}$  až  $1,5\text{ MHz}$  (viz kapitola 5.1). Nejnižší dosažitelná hodnota je v tomto případě přibližně  $117\text{ kHz}$ . Změnou hodnoty trimru lze měnit oscilační kmitočet, nicméně pouze do  $300\text{ kHz}$ . Místy byl časový průběh trochu deformovaný.

Amplituda výstupního signálu je, oproti výsledkům ze simulací, téměř dvojnásobná.

Spektrum časového průběhu je uvedeno na Obr. 7.4. Hodnota první harmonické složky je v tomto případě  $253\text{ kHz}$ . Vyšší složky se ve spektru téměř nevyskytují, což je s podivem, jelikož při simulacích byly poměrně výrazné (viz Obr. 5.4).



Obr. 7.4: Spektrum signálu na výstupu oscilátoru

Stejně jako u simulací, i zde byly změřeny napěťové úrovně harmonických složek spektra a následně použity k výpočtu THD. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce a výpočet je následuje.

Tab. 7.1: Přehled napěťových úrovní harmonických složek spektra OSC\_1OTA

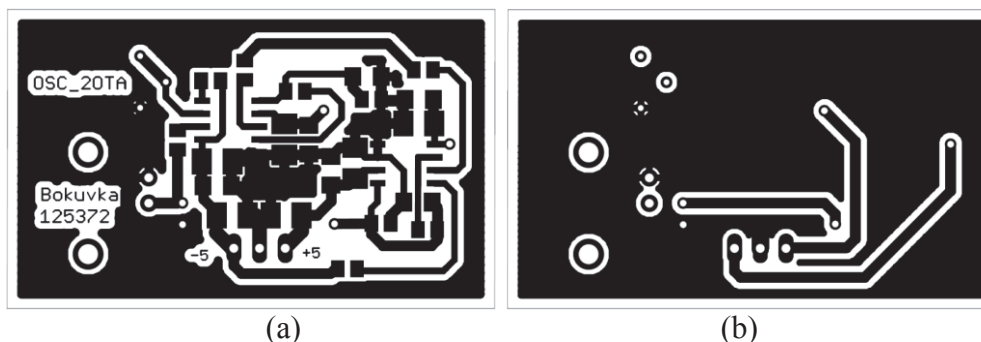
Harmonická složka	Úroveň napětí [V]
1.	0,8492
2.	0,015

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (7.1)$$

$$THD = \frac{\sqrt{0,015^2}}{0,8429} \cdot 100 \quad (7.2)$$



Na následujících obrázcích je uvedena horní a spodní strana navržené desky plošných spojů.

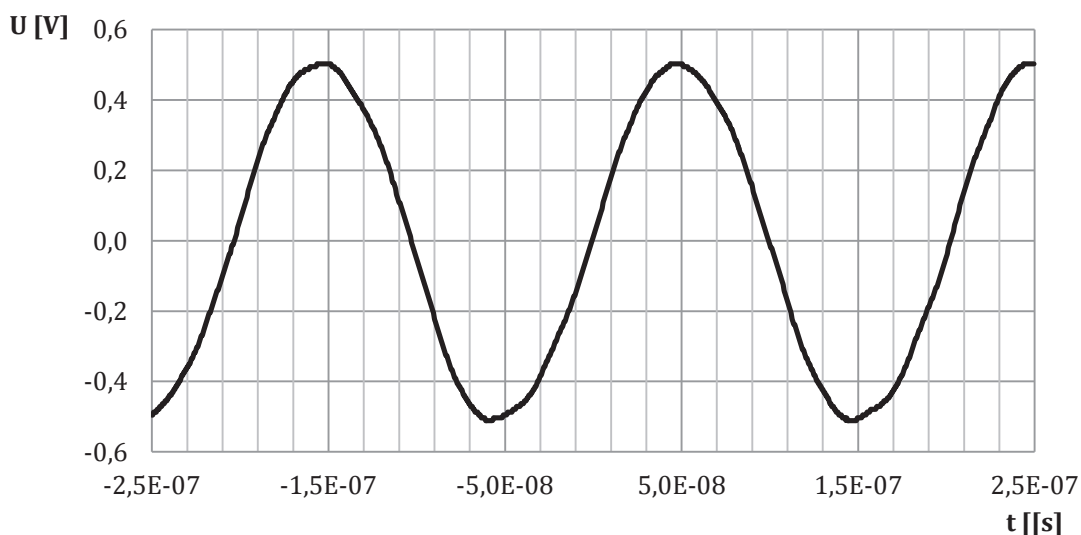


Obr. 7.6: Horní (a) a spodní (b) strana desky plošných spojů OSC\_20TA

Úplný seznam součástek je uveden, spolu s fotkami již osazených DPS, v přílohách na konci práce (viz kapitola 8.2, Obr. 8.3 a Obr. 8.4). Po osazení součástkami byl oscilátor podroben měření.

Po připojení symetrického napájení  $\pm 2,5$  V, se na výstupu objevil stabilní harmonický signál se špičkovou hodnotou napětí  $V_{pp}=0,4$  V. Stejně jako u předchozího zapojení, obvody začínají fungovat již od napětí asi  $\pm 2$  V.

Po zvýšení napájení na  $\pm 5$  V, se napětí kmitů nepatrně zvýšilo na  $V_{pp}=0,55$  V (viz Obr. 7.7). Dle simulací se měla amplituda kmitů pohybovat kolem 1 V. V tomto případě je bohužel skoro poloviční. Z obrázku je patrná slabá, téměř nepatrná, deformace signálu.



Obr. 7.7: Časový průběh na výstupu oscilátoru OSC\_20TA

Proudový odběr v žádné z napájecích větví nepřesáhl 50 mA. Typicky se pohyboval mezi 35-40 mA.

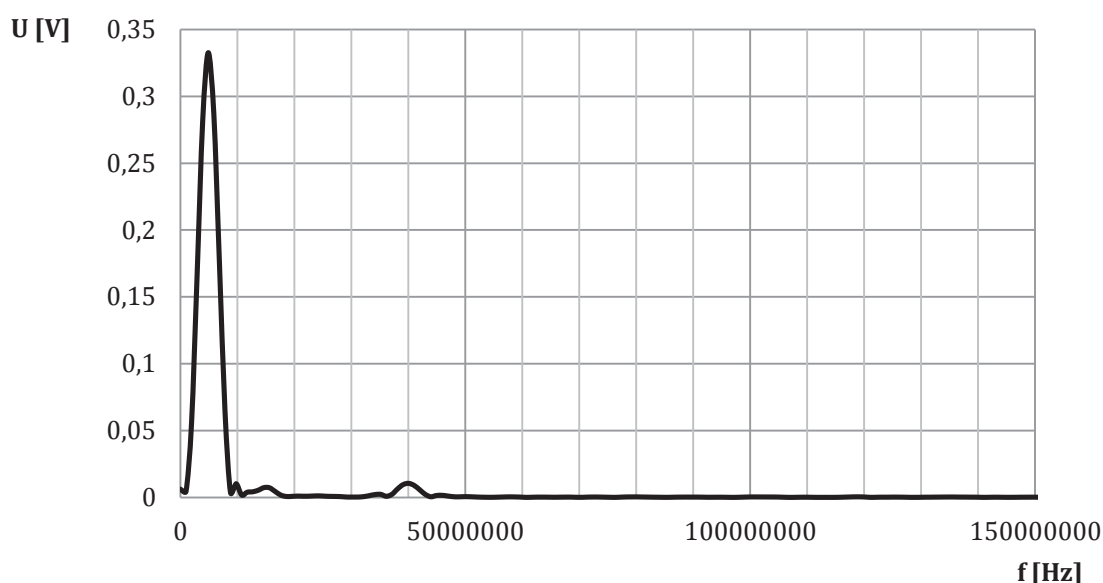
Při měření byla využita zařízení číslo 1, 3, 4 z tabulky měřicích přístrojů (viz Tab. 7.11).

Očekávané teoretické hodnoty jsou THD=6,1% a frekvenční rozsah přeladění 4 MHz až 23 MHz (viz Tab. 6.3).

Při změně odporu trimru se měnil oscilační kmitočet, nicméně pouze v rozsahu 3,5 MHz až 6,4 MHz. Dále již bylo přeladování omezeno rozsahem trimru. V úplně krajní poloze se z neznámého důvodu objevil mírně deformovaný signál s amplitudou 197 mV a kmitočtem 52,9 MHz. Jeho ukázka je v přílohách na konci práce (viz Obr. 8.5)

Nepřesná funkce byla očekávána, neboť byly při osazování použity jiné hodnoty kondenzátorů, které v SMD řadě E12 nebyly obsaženy. Odchyly byly pouze malé, v rozsahu jednotek a desítek nF (pF).

Na následujícím obrázku (Obr. 7.8) je spektrum výše uvedeného signálu. Jedná se o jednu z téměř krajních poloh trimru, tedy oscilační kmitočet je přibližně 5,3 MHz.



Obr. 7.8: Spektrum oscilátoru OSC\_2OTA

V

Tab. 7.2 jsou uvedeny změřené napěťové úrovně dvou harmonických složek vyskytujících se ve spektru z Obr. 7.8.

Tab. 7.2: Přehled napěťových úrovní harmonických složek spektra OSC\_2OTA

Harmonická složka	Úroveň napětí [V]
1.	0,33
2.	0,019

Po dosažení hodnot z předchozí tabulky je THD, dle následujícího výpočtu, roven 5,76 %, což je přibližně stejná hodnota jako při simulacích.

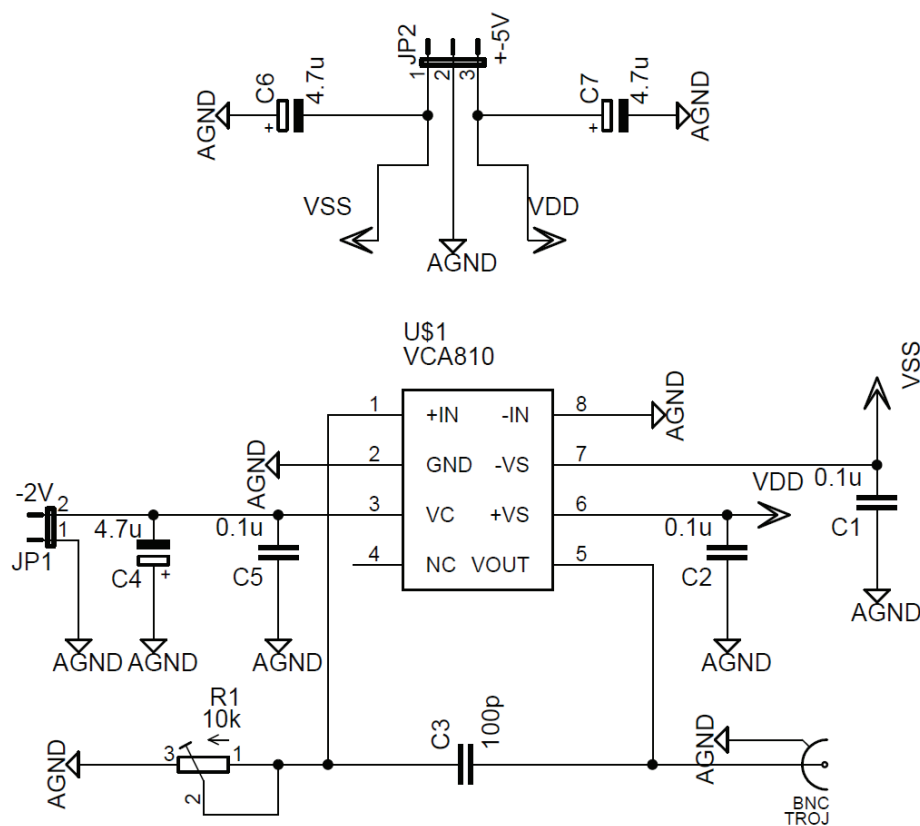
$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (7.4)$$

$$THD = \frac{\sqrt{0,019^2}}{0,33} \cdot 100 \quad (7.5)$$

$$THD = \underline{\underline{5,76\%}} \quad (7.6)$$

### 7.3 Oscilátor s VCA

Na následujícím obrázku (Obr. 7.9) je uvedeno schéma zapojení oscilátoru v programu Eagle. Základem je integrovaný obvod VCA810 od Texas Instruments. Podrobnější popis je možno získat například z datasheetu [17].



Obr. 7.9: Schéma zapojení oscilátoru OSC\_VCA z programu Eagle

Napájení obvodu a vývody pouzdra jsou opět doplněny o blokovací kapacity dle Basic connections z kapitoly 3.3.2. K třetímu pinu VCA je zaveden dvou-pinový konektor pro připojení řídicího napětí 0 až -2 V. Dále je zde zařazen odporový trimr  $R_1=10\text{ k}\Omega$  pro změnu oscilačního kmitočtu. Výstupní signál je odebrán z BNC konektoru.

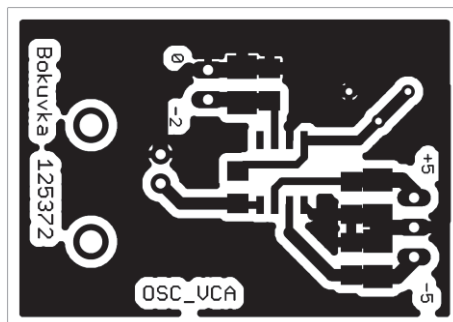
Navržená jednostranná DPS je na Obr. 7.10. Fotky vyrobené a součástkami osazené desky jsou uvedeny v přílohách na konci práce (viz Obr. 8.6 a Obr. 8.7).

Při měření byla využita zařízení číslo 1, 3, 4 z tabulky měřicích přístrojů (viz Tab. 7.11).

Obvod VCA810 je napájen symetrickým napětím  $\pm 5$  V, nicméně začíná fungovat již od  $\pm 2$  V.

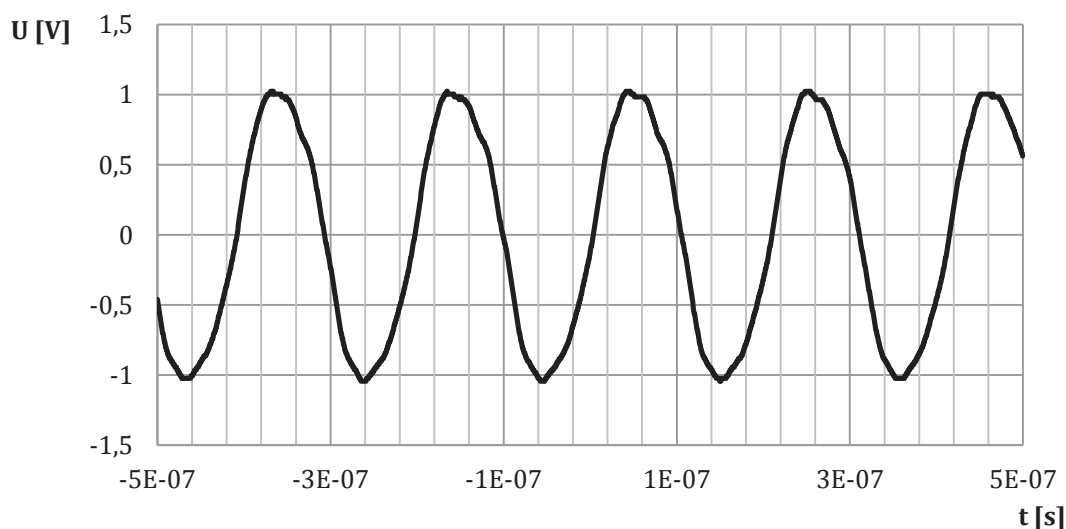
Proudová ochranná pojistka zdroje byla nastavena na 100 mA. Proudový odběr v obou napájecích větvích se pohyboval kolem 20 mA.

Záporné řídicí napětí bylo realizováno na nesymetrickém zdroji 0 – 6 V a přepólováním obou svorek.



Obr. 7.10: Navržená deska plošných spojů oscilátoru OSC\_VCA

Oscilátor se rozkmital až po připojení napájení a nastavení řídicího napětí na hodnotu  $U_{set} = -1,752$  V. Zobrazený časový průběh napětí je na Obr. 7.11. Amplituda se téměř shoduje s očekávanou hodnotou 0,85V získanou simulací zapojení. Zejména u kladných půlvln je pak patrná nežádoucí deformace signálu.



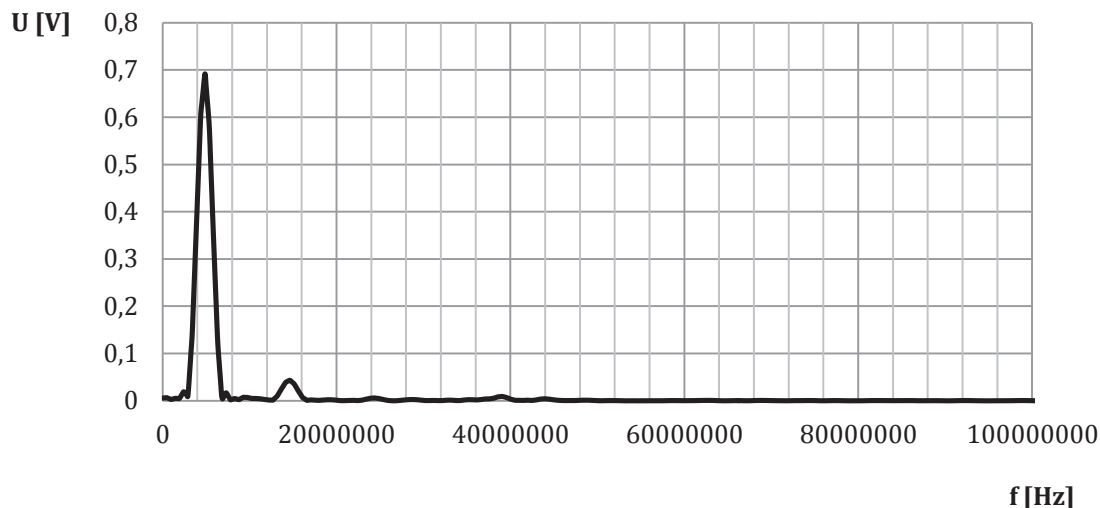
Obr. 7.11: Časový průběh napětí na výstupu oscilátoru OSC\_VCA

Teoreticky by mělo být možno řídit oscilační kmitočet v rozsahu 4 MHz až 8 MHz. Činitel harmonického zkreslení THD by měl být přibližně 5,436 %.

Prakticky se tato hodnota liší. Kmitočet je sice možno řídit změnou hodnoty trimru, nicméně pouze v rozsahu 2,8 MHz až 5,29 MHz. Řídicím napětím v rozsahu -1,752 V až -1,864 V lze navíc měnit amplitudu signálu v malém rozsahu, což při simulacích možné nebylo. Při nastavení  $U_{set}$  na nižší hodnotu se ze sinusového průběhu stává obdélník. Jedná se o nechtěný jev, kterého by se možná dalo, při bližším zkoumání, využít

například k návrhu multifunkčního generátoru, přičemž napětím  $U_{\text{set}}$  by se dal volit tvar generovaného signálu.

Následující obrázek je spektrem výše uvedeného signálu. Oscilační kmitočet je v tomto případě přibližně 5,1 MHz.



Obr. 7.12: Spektrum signálu na výstupu oscilátoru OSC\_VCA

Z obrázku jsou patrné některé vyšší harmonické složky, které ovlivňují hodnotu THD. Jejich změřené napěťové úrovně jsou v následující tabulce.

Tab. 7.3: Přehled napěťových úrovní harmonických složek spektra OSC\_VCA

Harmonická složka	Úroveň napětí [V]
1.	0,6925
2.	0,0457
3.	0,0137

Dle následujícího výpočtu je činitel harmonického zkreslení roven 6,89 %, což je na sinusový průběh vysoká hodnota. Zřejmě je to způsobenou deformací signálu (viz Obr. 7.11).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (7.7)$$

$$THD = \frac{\sqrt{0,0457^2 + 0,0137^2}}{0,6925} \cdot 100 \quad (7.8)$$

$$THD = \underline{\underline{6,89 \%}} \quad (7.9)$$

## 7.4 Oscilátor s DACA a VCA

Toto zapojení bylo navrženo a realizováno ve dvou variantách. Jedna s osazeným integrovaným obvodem a druhá, kde byl DACA nahrazen šesti-pinovým konektorem pro připojení externí desky DACA. Tato byla již dříve realizována Ing. Jeřábkem a byla poskytnuta na měřicím pracovišti vedoucím práce.

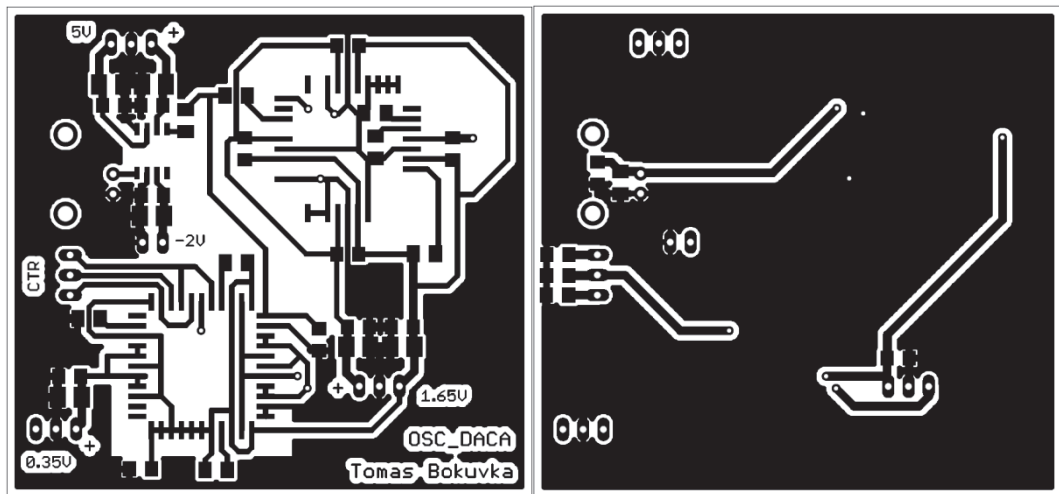
Obecně je tato externí deska, která plní funkci čipu DACA, realizována třemi hlavními komponenty. Jedná se o univerzální napěťový konvektor UVC (Universal Voltage Conveyor), univerzální proudový konvektor UCC (Universal Current Conveyor) a integrovaný obvod EL2082, jehož prostřednictvím je pak realizována změna zesílení.

Ukázka realizace obou již osazených DPS je na obrázcích 8, 9, 11 a 12 v kapitole 8.4 v přílohách na konci práce.

V práci byl kladen důraz spíše na zprovoznění první uvedené varianty s reálným čipem DACA. Proto bude dále rozebráno jen toto zapojení a jeho vlastnosti.

Obecné schéma oscilátoru je uvedeno na Obr. 5.21. Jak již bylo uvedeno u simulací, obvod se skládá z napětím řízeného zesilovače VCA, který je zodpovědný za vznik oscilací a DACA, kterým je pak realizována změna zesílení. Posledním prvkem je UCC který plní funkci DO-CF a tím pouze na výstupech vytváří kopie proudu přicházejícího na vstup.

Schéma zapojení z Eaglu je zařazeno v přílohách (viz Obr. 8.10). Horní a spodní strana navržené desky plošných spojů je na Obr. 7.13.



(a)

(b)

Obr. 7.13: Horní (a) a spodní (b) strana navržené DPS

UCC je napájen symetrickým napětím  $\pm 1,65$  V. DACA rovněž, pouze je zde navíc pomocné napájení  $0,35$  V. Změna zesílení je realizována dle postupu uvedeného v kapitole „Měření“. Všechny napájecí přívody a pouzdra jsou opatřeny blokovacími kapacitami podle Basic connections v kapitole 3.3.

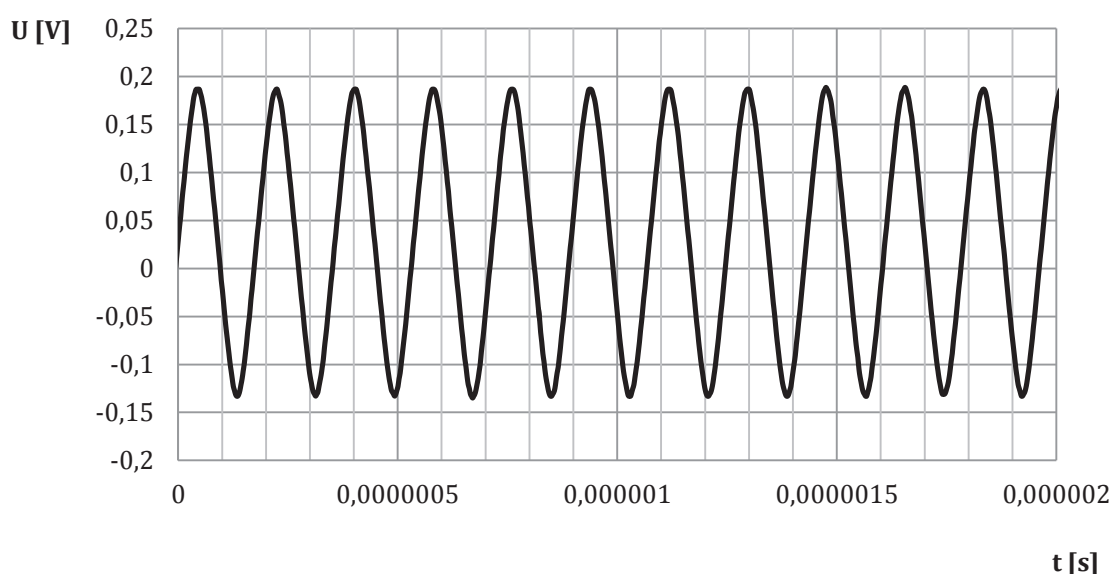
Změna zisku u zesilovače VCA810 [17] je realizována záporným řídicím napětím

v rozsahu 0 až -2 V. K tomu byl použit nesymetrický zdroj 0 – 6 V s přepólovanými kontakty.

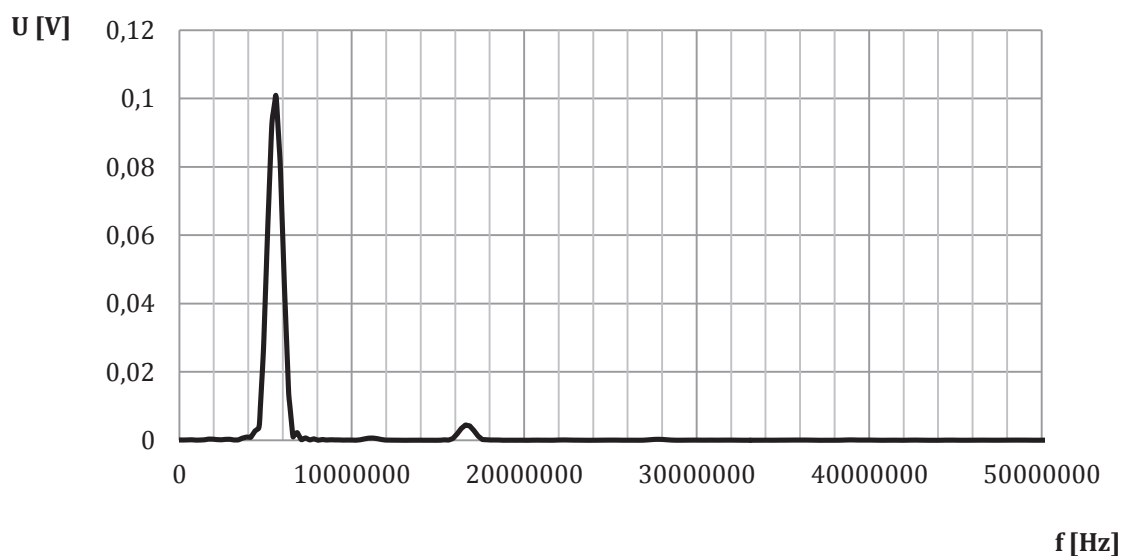
Proudová ochranná pojistka všech napájecích zdrojů byla nastavena na 100 mA. Proudový odběr v obou napájecích větvích se pohyboval kolem 48 mA.

Při měření byla využita zařízení číslo 1, 2, 3, 4 z tabulky měřicích přístrojů (viz Tab. 7.11).

Po připojení napájení, řídicích kontaktů DACA (nastaveno zesílení  $A=1$ , čemu odpovídá binární hodnota 000) a nastavení řídicího napětí VCA na  $U_{set} = -0,967$  V, se na výstupu oscilátoru objevil harmonický signál. Jeho časový průběh a spektrum jsou na následujících obrázcích. Tomu odpovídající průběhy z osciloskopu jsou uvedeny v přílohách (viz Obr. 8.11 a Obr. 8.12).



Obr. 7.14: Průběh na výstupu OSC\_DACA\_VCA pro nastavené  $A=1$



Obr. 7.15: Spektrum signálu na výstupu OSC\_DACA\_VCA pro nastavené  $A=1$

Zesílení prvku DACA bylo možno měnit pouze v rozsahu 1 – 8, nicméně při nastavení vyšší hodnoty než 4 začínal být signál deformovaný a jeho spektrum se rovnalo spektru trojúhelníku.

Jednotlivé časové průběhy a jejich spektra pro ostatní zesílení jsou uvedeny v přílohách (viz Obr. 8.13 až Obr. 8.18).

V následující tabulce jsou parametry jednotlivých časových průběhů v závislosti na nastaveném zesílení prvku DACA.

Tab. 7.4: Parametry výstupních signálů v závislosti na zesílení DACA

Zesílení DACA	Binárně	Řídící napětí	Amplituda	Kmitočet
-	-	V	V	MHz
1	0 0 0	0,967	0,33	6,42
2	0 0 1	0,602	0,94	4,38
3	0 1 0	0,675	1,37	2,225
4	0 1 1	0,609	1,39	1,452

Tab. 7.5 pak uvádí přehled vlastností jednotlivých spekter pro různá zesílení DACA. Jsou zde naměřené hodnoty jednotlivých harmonických složek spektra a, dle vzorce z kapitoly 1.4, vypočítán činitel harmonického zkreslení THD.

Tab. 7.5: Přehled vlastností jednotlivých spekter

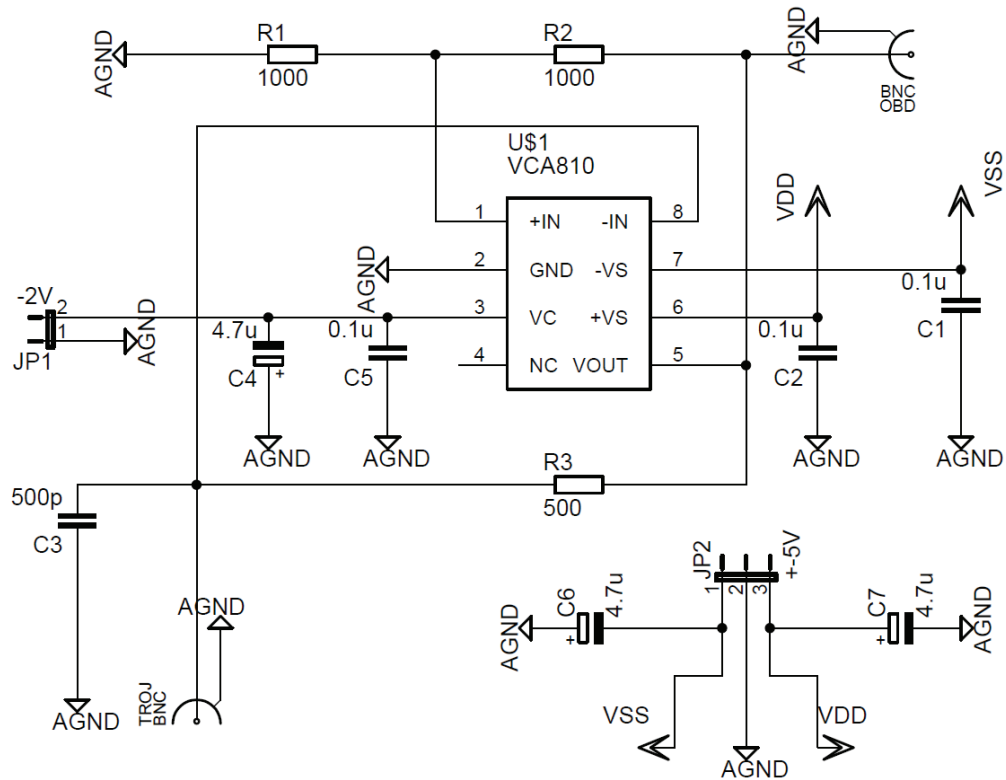
Zesílení DACA	Binárně	1. Harmonická	2. Harmonická	3. Harmonická	THD
-	-	V	V	V	%
1	0 0 0	0,1008	0,00425	-	4,22
2	0 0 1	0,271	0,01875	0,00688	7,37
3	0 1 0	0,398	0,01717	0,00937	4,91
4	0 1 1	0,393	0,01872	0,00936	5,33

Jak je z výše uvedené tabulky patrné, nejvyšší hodnoty nabýval THD pro nastavené zesílení A=2. Nejedná se o nijak přehnaně vysoké hodnoty, které se přibližně shodují se simulovanými vlastnostmi.

## 7.5 Generátor s VCA

Obecné schéma zapojení generátoru je uvedeno na Obr. 5.13. Zapojení z programu Eagle je pak na následujícím obrázku. Základem je již dříve používaný integrovaný obvod VCA810 [17]. Pro obvod byla v Eaglu vytvořena knihovna. Je zařazena v přílohách mezi soubory na CD.

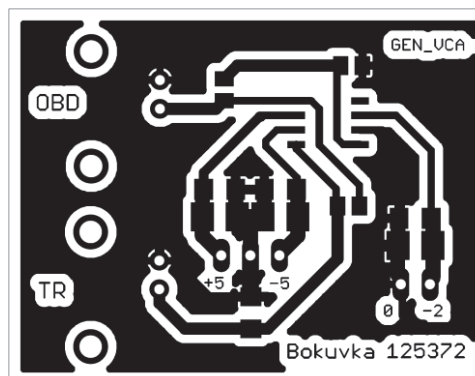
Úplný seznam součástek je uveden v přílohách na konci práce (viz kapitola 8.5).



Obr. 7.16: Schéma zapojení generátoru s VCA z programu Eagle

Napájecí vývody i vývody pouzdra jsou doplněny o blokovací kapacity dle Basic connections (viz 3.3.2).

Navržená deska plošných spojů je uvedena na následujícím obrázku.



Obr. 7.17: Horní strana navržené DPS generátoru s VCA z programu Eagle

Napájení obvodu je  $\pm 5$  V. Třetí pin pouzdra, označený VC, slouží k připojení řídicího napětí  $U_{set}$  v rozsahu 0 až -2 V. Výstupy generátoru jsou zakončeny BNC konektory k připojení k osciloskopu. Rezistor  $R_1$  byl dodatečně nahrazen odporovým trimrem 10 k $\Omega$  pro řízení kmitočtu.

Při měření byla použita zařízení číslo 1, 3, 4 z tabulky měřicích přístrojů (viz Tab. 7.11). Na napájecím zdroji byla nastavena proudová pojistka na 100 mA. Proudový odběr v obou větvích napájení se pohyboval kolem 17 mA.

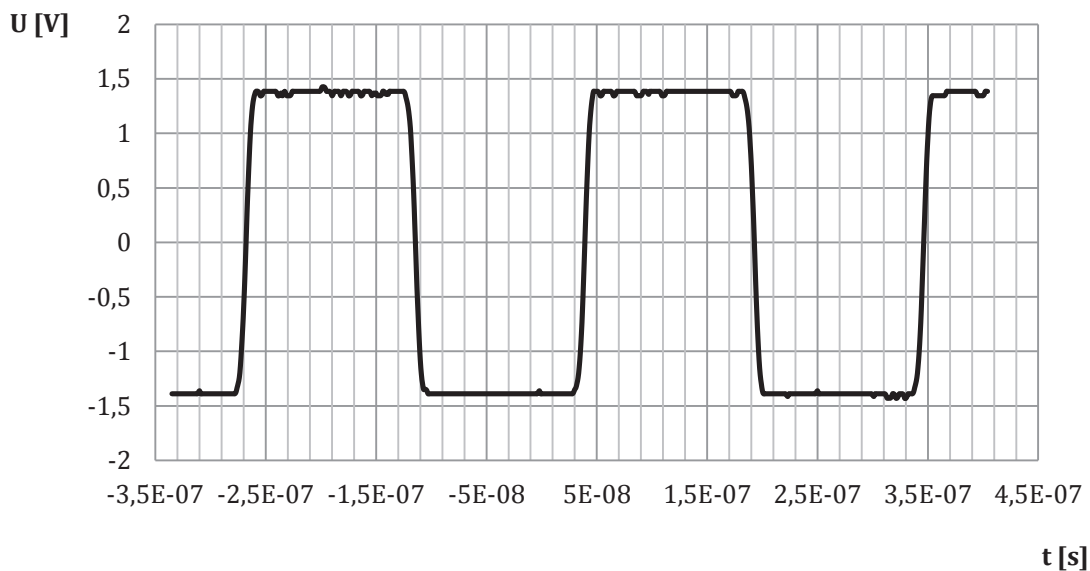
Záporné řídicí napětí bylo realizováno nesymetrickým zdrojem 0 až 6 V a následným přepólováním kontaktů.

Po připojení napájecího napětí a nastavení  $U_{set}$  na -1,167 V, se na výstupu trojúhelníku začínají objevovat harmonické kmitočty s kmitočtem 3,74 MHz a amplitudou 100 mV. Jejich amplituda jde zvyšovat přibližně do 0,7V, čemuž odpovídá nastavené  $U_{set} = -1,245$  V. Zapojení je tedy navíc schopno generovat i harmonický signál.

Výstupní průběhy napětí jsou na následujících obrázcích (Obr. 7.18 a Obr. 7.19). Výsledky jsou uvedeny odděleně, jelikož při současném připojení obou BNC kabelů vedle sebe docházelo k velkému ovlivňování signálů. Z toho důvodu by bylo vhodné řešit DPS konstrukčně jinak.

Obdélník se navíc se změnou amplitudy hodně deformoval. Docházelo k velkým zákmitům, které se při simulacích neprojevovaly. Zřejmě se jedná o konstrukční chybu nebo by mohlo jít o zákmity z některé kapacitní vazby. Ukázka zákmitů je uvedena v přílohách na konci práce (Obr. 8.24).

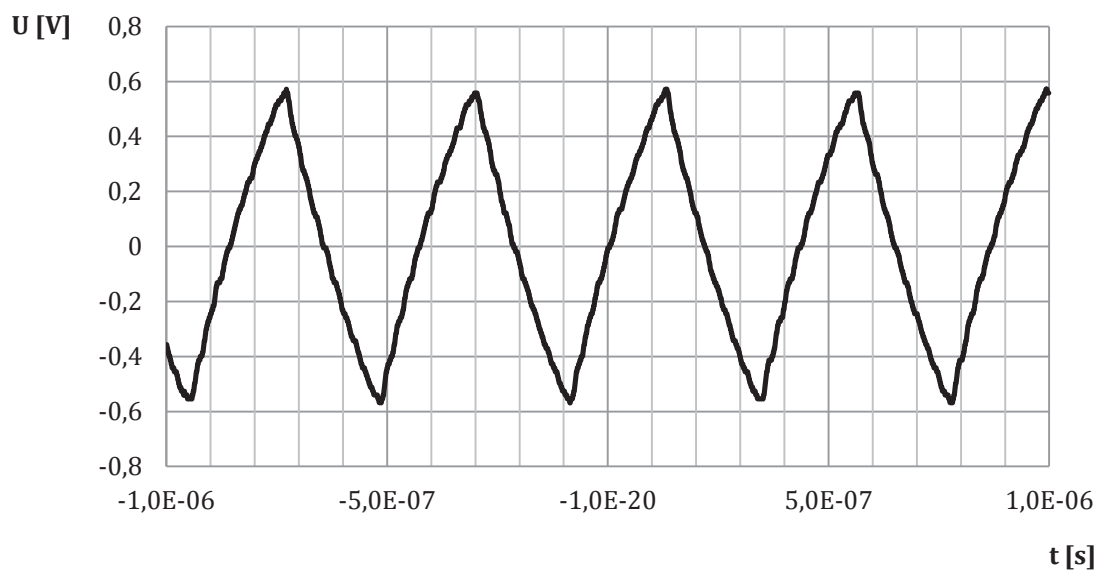
Uvedený průběh je při nastaveném  $U_{set} = -1,887$  V, kdy nedocházelo k zákmitům.



Obr. 7.18: Průběh napětí na obdélníkovém výstupu generátoru s VCA

Od  $U_{set} = -1,29$  V se objeví trojúhelníkový a obdélníkový signál. Amplituda kmitů jde měnit řídicím napětím (od cca -1,3 V až -2 V) v rozsahu 760 mV až 1,51 V.

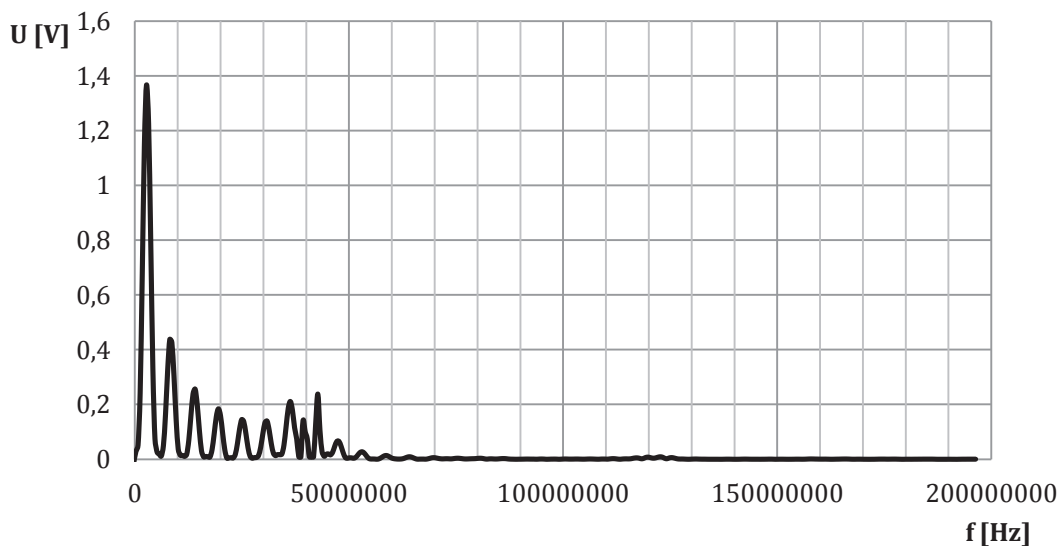
Kmitočet signálu je možno měnit změnou hodnoty trimru (v zapojení odpor  $R_1$ ) v rozsahu 1,6 MHz až 3,73 MHz. Dále nastává limitace trimrem.



Obr. 7.19: Průběh napětí na trojúhelníkovém výstupu generátoru s VCA

Signál trojúhelníkový byl bez deformací a přesně se shodoval s výstupem simulací. Ukázky průběhů z osciloskopu jsou rovněž uvedeny v přílohách (viz Obr. 8.25 a Obr. 8.26).

Na obrázku níže je uvedeno spektrum obdélníku. Trojúhelník zobrazen není. Jeho spektrum je podobné sinusovému průběhu. U vyšších složek spektra jsou patrné jisté odchylky od ideálního průběhu. Bude se jednat o následek zákmitů v signálu.



Obr. 7.20: Spektrum obdélníkového průběhu

Následující tabulka Tab. 7.6 obsahuje naměřené úrovně napětí pro prvních deset harmonických složek obdélníkového signálu z Obr. 7.20.

Tab. 7.6: Napěťové úrovně jednotlivých harmonických složek

Harmonická složka	Úroveň napětí [V]
1.	1,39
2.	0,425
3.	0,23125
4.	0,1625
5.	0,1375
6.	0,18125
7.	0,15
8.	0,2375
9.	0,05
10.	0,025

Z uvedených hodnot lze pak snadno, podle vztahu 1.7 z kapitoly 1.4, dopočítat činitele harmonického zkreslení THD.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (10.1)$$

$$THD = \frac{\sqrt{0,425^2 + 0,23125^2 + 0,1625^2 + \dots + 0,025^2}}{1,39} \cdot 100 \quad (10.2)$$

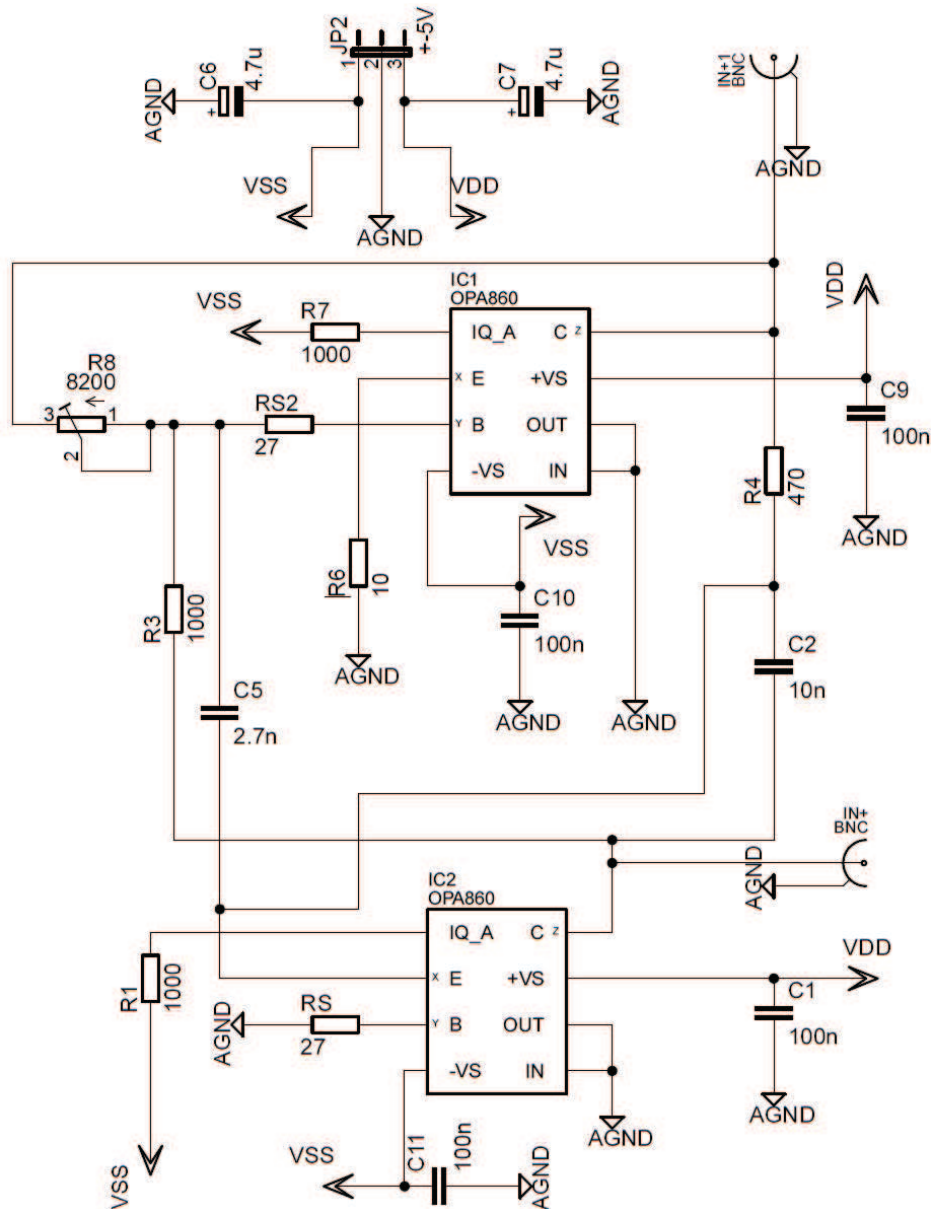
$$THD = \underline{\underline{45,18 \%}} \quad (10.3)$$

Výpočet pro signál trojúhelníkový již uveden není, ale jelikož byl signál bez deformací, hodnota THD by se pravděpodobně pohybovala kolem 12 %.

## 7.6 Generátor se dvěma OTA

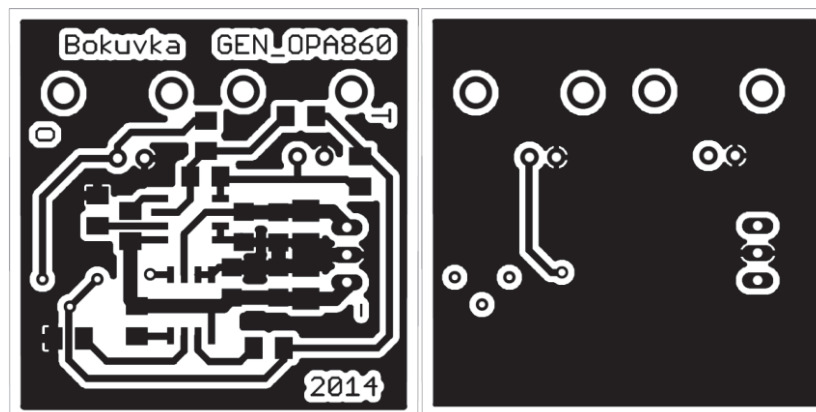
Výsledky simulací tohoto zapojení nebyly příliš uspokojivé, nicméně i přes to bylo realizováno. Obecné schéma zapojení je uvedeno na Obr. 6.5. Obvod je tvořen dvěma integrovanými obvody OPA860 [23]. Zapojení z programu Eagle je uvedeno na následujícím obrázku.

Úplný seznam součástek je uveden v přílohách na konci práce (viz kapitola 8.6).



Obr. 7.21: Schéma zapojení generátoru se dvěma OTA z programu Eagle

U napájecích vývodů a vývodů pouzdra jsou zařazeny blokové kapacity podle Basic connections v kapitole 3.3.1. Místo rezistoru  $R_1$  je použit odporový trimr sloužící ke změně kmitočtu generovaných signálů. Výstupy jsou opět zakončeny BNC konektory. Navržená deska plošných spojů je uvedena na Obr. 7.22. Fotky již osazené desky jsou uvedeny v přílohách na konci práce (viz Obr. 8.27 a Obr. 8.28).

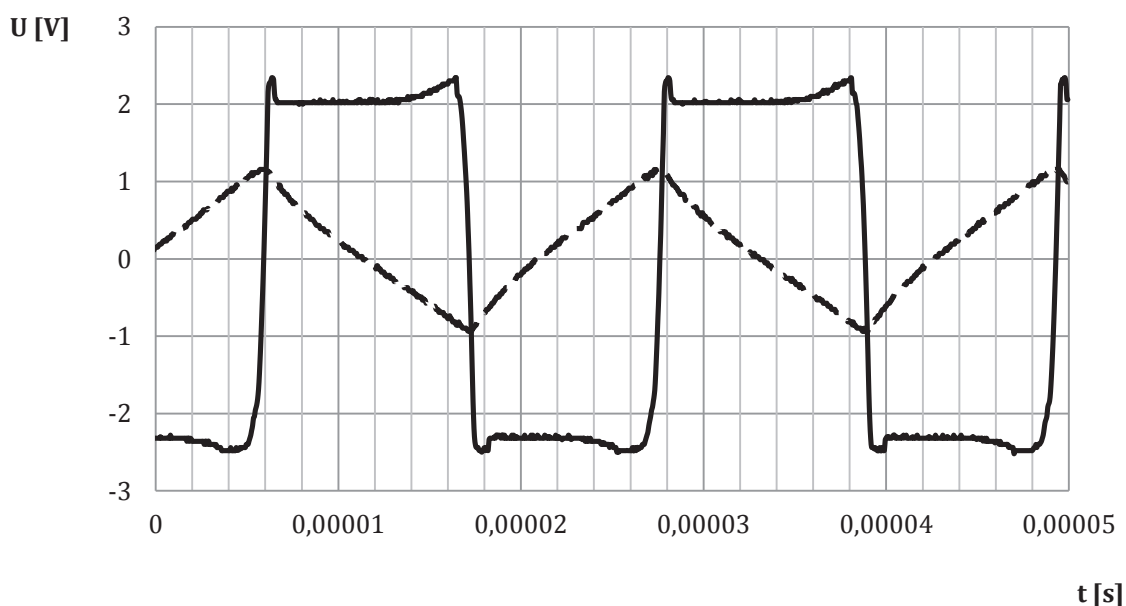


Obr. 7.22: Horní a spodní strana navržené DPS generátoru se dvěma OTA

Napájení obvodů OPA860 je symetrickým napětím  $\pm 5$  V. Proudová pojistka na zdroji byla nastavena na 100 mA, nicméně proudový odběr obou větví se pohyboval kolem 37 mA.

Při měření byla použita zařízení číslo 1, 3, 4 z tabulky měřicích přístrojů (viz Tab. 7.11).

Po připojení napájení se na výstupech objevily požadované průběhy. Trojúhelník se špičkovou hodnotou napětí  $V_{pp}=1,95$  V a obdélník s  $V_{pp}= 4,87$  V. Průběhy jsou uvedeny v následujícím obrázku.



Obr. 7.23: Naměřené průběhy na výstupu generátoru

Ukázka naměřených průběhů a spektra z osciloskopu je v přílohách na konci práce (viz Obr. 8.29 a Obr. 8.30).

Změnou odporu trimru bylo možno měnit kmitočet v rozsahu 12,2 kHz až 110 kHz. Dále již nastala limitace použitým trimrem. Amplituda zůstávala konstantní.

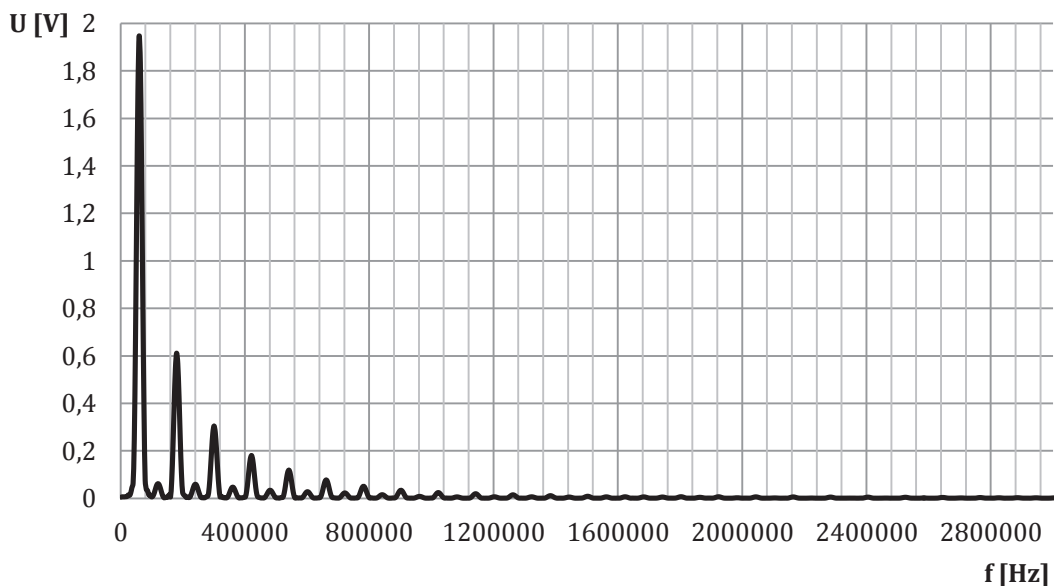
Z Obr. 7.23 jsou patrné zákmity. V kladné polovině kmitů byla jejich hodnota (preshoot) 8,8% signálu a v záporné pak (overshoot) 4,2%.

U obdélníku docházelo s rostoucím kmitočtem k mírnému zakulacování hran a tedy i k nárůstu náběžných a sestupných hran. Jejich přehled je, pro tři různé kmitočty, uveden v následující tabulce. Výhodou je, že na vyšších kmitočtech zmizely ze signálu zákmity.

Tab. 7.7: Přehled náběžných a sestupných hran obdélníku

Frekvence	$t_{\text{rise}}$	$t_{\text{fall}}$
[kHz]	[ns]	[ns]
15	348	295
61,36	729	663
105	854	812

Obdélníku z Obr. 7.23 odpovídá následující spektrum. Kmitočet byl v tomto případě 61,36 kHz.



Tab. 7.8: Napěťové úrovně jednotlivých harmonických složek pro GEN\_OTA

Harmonická složka	Úroveň napětí [V]
1.	1,998
2.	0,62536
3.	0,31862
4.	0,18225
5.	0,12012
6.	0,078
7.	0,05148
8.	0,03432
9.	0,02496
10.	0,01872

Dle vztahu uvedeného v kapitole 1.4 a výše uvedených naměřených hodnot napětí je vypočítán THD pro obdélníkový průběh z Obr. 7.23.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (10.4)$$

$$THD = \frac{\sqrt{0,6253^2 + 0,3186^2 + 0,1822^2 + \dots + 0,0187^2}}{1,998} \cdot 100 \quad (10.5)$$

$$THD = \underline{\underline{37,16 \%}} \quad (10.6)$$

Jelikož se spektrum obdélníku skládá z mnoha harmonických složek, bylo očekáváno vysoké THD. U ideálních obdélníkových signálů se běžně jeho hodnota pohybuje kolem 30%. Zde je hodnota vyšší zřejmě proto, že je signál na některých kmitočtech deformovaný.

Výpočet činitele harmonického zkreslení pro signál trojúhelníkový uveden není, nicméně jeho hodnota se typicky pohybuje někde mezi THD sinu a obdélníku. Přibližně kolem 12%.

# SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ PRAKTICKY REALIZOVANÝCH ZAPOJENÍ

První uvedené zapojení (viz kapitola 7.1) je oscilátor s jedním OTA a pasivními prvky. Obvod nebyl příliš funkční. Řízení oscilačního kmitočtu je možné pomocí odporového trimru. Rozsah přeladění je však bohužel pouze 117 kHz až asi 300 kHz. Dosažené průběhy byly místy trochu deformované. Činitel harmonického zkreslení byl pro kmitočet 253 kHz roven 1,766 %.

Druhý oscilátor se dvěma OTA a třemi kondenzátory, uvedený v kapitole 7.2, měl sice větší rozsah přeladitelnosti (3,5 MHz až 6,4 MHz), nicméně od simulovaných hodnot se také hodně liší. Také činitel harmonického zkreslení THD je oproti předchozímu zapojení mnohem vyšší, a to 5,76 % na kmitočtu 5,3 MHz. Navíc v krajní poloze trimru se na výstupu objevil nežádoucí signál na kmitočtu 52,9 MHz (viz Obr. 8.5).

Třetí realizovaný oscilátor s prvkem VCA, je popsán v kapitole 7.3. Jedná se o velice jednoduché zapojení, kde bylo původní myšlenkou měnit oscilační kmitočet řídicím napětím VCA. Kmitočet je nicméně řízen pomocí trimru v rozsahu 2,8 MHz až 5,29 MHz. Pomocí řídicího napětí přivedeného na třetí pin pouzdra VCA810 je dále možno měnit amplitudu signálu. THD bylo pro kmitočet 5,3 MHz rovno 6,89 % což je již hodně vysoká hodnota. Je to způsobeno poměrně velkou deformací signálu (viz Obr. 7.11).

V kapitole 0 je uvedeno čtvrté realizované zapojení oscilátoru s DACA a VCA. Změnou zesílení DACA se měnil oscilační kmitočet v rozsahu 1,45 MHz až 6,42 MHz. Tyto hodnoty se neshodují s výsledky simulací, nicméně zapojení by mělo být realizováno správně. Při nastavení většího zesílení než  $A=4$  byl již signál deformovaný do podoby trojúhelníku, čemuž odpovídal i tvar spektra. Změnou hodnot pasivních prvků je možno měnit rozsah přeladitelnosti. Nevýhodou zapojení je pak skoková změna kmitočtu.

Kapitola 7.5 je věnována generátoru s VCA. Obdobně jako u oscilátoru s VCA je i zde možno měnit amplitudu signálu v rozsahu téměř jednoho voltu. Změnou hodnoty použitého trimru se mění kmitočet generovaných pulzů v rozsahu přibližně 1,6 MHz až 3,73 MHz. Trojúhelníkový signál se přesně shoduje s výsledky simulací, nicméně obdélník již ne. Na vyšších kmitočtech se objevovaly velké zákmity způsobené zřejmě nějakou kapacitní vazbou nebo nechtěnými oscilacemi v některé části obvodu. Výhodou je, že při nastaveném řídicím napětí  $U_{set} = -1,167$  V je možno odebírat z trojúhelníkového výstupu i harmonický signál.

Poslední prakticky realizovaný obvod je generátor se dvěma OTA. Při simulacích bylo dosaženo podivných a nepříliš vhodných výsledků, nicméně praktická realizace je na tom mnohem lépe. Rozsah změny kmitočtu generovaných pulzů je 12,2 kHz až 110 kHz. U obdélníku byly, u některých kmitočtů, patrné zákmity.

Výše uvedené vlastnosti a hodnoty jednotlivých zapojení jsou popsány a srovnány následující tabulkou.

Tab. 7.9: Srovnání jednotlivých variant realizovaných obvodů

	Zapojení	Způsob řízení kmitočtu	Rozsah $f_{osc}$	THD [%]
OSC	1OTA_3R_2C	Změnou $R_2$	117k – 300k	1,766
	2OTA_3C	Změnou $R_{12}$ ( $R_E$ )	3,5 M - 6,4 M	5,76
	OSC_VCA	Změnou R	2,8 M - 5,29 M	6,89
	OSC_DACA_VCA	Změnou R,C + zesílením DACA	1,45 M - 6,42 M	4,22 až 7,37
GEN	GEN_VCA	Změnou $V_{SET}$	1,6 M - 3,73 M	45,18
	GEN_2OTA	Změnou $R_2$	12,2 k - 110 k	37,16

## SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ A VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

V následující tabulce je uvedeno porovnání jednotlivých variant oscilátorů a generátorů. Jsou zde uvedeny teoretické a praktické rozsahy přeladitelnosti a hodnoty činitele harmonického zkreslení THD.

Tab. 7.10: Srovnání výsledků simulací a měření pro jednotlivá zapojení

	Zapojení	Simulace		Měření	
		Rozsah $f_{osc}$	THD [%]	Rozsah $f_{osc}$	THD [%]
OSC	1OTA_3R_2C	35k - 1,5M	5,31	117k – 300 k	1,766
	2OTA_3C	4M - 23M	6,1	3,5 M - 6,4 M	5,76
	3OTA_1R_2C	6M - 35M	8,26	-	-
	OSC_VCA	4M - 8M	5,436	2,8 M - 5,29 M	6,89
	OSC_DACA	10M - 20M	2,4	-	-
	OSC_DACA_VCA	35M - 184M	2,4	1,45 M - 6,42 M	4,22 až 7,37
GEN	GEN_VCA	2M - 5M	42,08	1,6 M - 3,73 M	45,18
	GEN_2OTA	10k - 110k	43,02	12,2 k - 110 k	37,16

# MĚŘENÍ

Tato kapitola obsahuje popis měřicího pracoviště, zásady při měření a seznam použitých přístrojů.

Všechny měřené obvody byly k osciloskopu připojeny BNC kabelem, který by měl být co nejkratší. V některých případech může být měření ovlivněno například pohybem v okolí kabelu nebo vedením kabelu v blízkosti předmětů a zapnutých měřicích přístrojů. Dále také může vznikat rušení (deformace signálu) při souběžném vedení více kabelů (datových či napájecích) nebo také velkým zkrutem (ohyby) kabelu.

Dále, a to zejména u složitějších měření, je nutno vzájemně propojit jednotlivé země použitých napěťových zdrojů.

Při měření každého obvodu byly použity některé přístroje z následující tabulky.

Tab. 7.11: Všeobecná tabulka použitých měřicích přístrojů

Číslo	Přístroj	Značka	Typ	Poznámka
1	Zdroj napětí	Agilent	E3631A	(0 - 6V), 5A / (0 - $\pm 25$ V), 1A
2	Zdroj napětí	Agilent	E3642A	50 W; 8V; 5 A nebo 20 V; 2,5 A
3	Osciloskop	Agilent	DSO-X 2004A	70 MHz, 2 Gsa/s
4	Multimetr	Agilent	U1272A	True RMS digital multimeter

U většiny zapojení je sestavení měřicí soustavy víceméně intuitivní. U obvodů, které využívají VCA je, je při zapojování řídicího napětí nutno přepólovat svorky zdroje pro dosažení záporného napětí.

Při měření oscilátoru s DACA a VCA jsou využita zařízení 1, 2, 3 z výše uvedené tabulky s tím, že napěťový zdroj Agilent E3642A je použit třikrát. Je to z důvodu realizace řízení zesílení prvku DACA a postup je následující.

U všech tří zdrojů se vzájemně propojí jejich zemní svorky. Na tyto se následně připojí záporné napětí ze zdroje  $\pm 1,65$  V, čímž se vytvoří referenční potenciál  $-1,65$  V. Připojením tohoto napětí na řídicí bity sběrnice DACA je pak vyjádřena logická nula. Logická jednička se pak nastaví připojením sběrnice DACA na kladnou svorku příslušného zdroje a nastavením napětí 3,3 V. Vzhledem k referenční svorce je na kladné větvi napětí 1,65 V.

# ZÁVĚR

Zadáním práce bylo seznámit se s problematikou elektronicky říditelných aktivních prvků a jejich možností využití při konstrukci oscilátorů a generátorů funkcí.

Velkou část práce tvoří výčet elektronicky říditelných aktivních prvků, které se jeví jako vhodné pro realizaci oscilátorů a generátorů. Tyto jsou uvedeny v kapitole 3. Pro návrh byl zvolen operační transkonduktanční zesilovač OTA, digitálně říditelný proudový zesilovač DACA a napětím řízený zesilovač VCA, nicméně pro realizaci oscilátorů a generátorů by se daly využít i jiné. Jako velmi vhodné se ukázaly například proudové konvejory se kterými byly také prováděny simulace, nicméně v práci uvedeny nejsou. Nalezená zapojení většinou již byla někde prezentována. K těmto prvkům byly dále vybrány vhodné komerčně dostupné ekvivalenty obvodů, které byly v práci dále využívány při simulacích a praktické realizaci.

Bylo navrženo šest zapojení oscilátorů a dvě zapojení generátorů, která by prozatím neměla být nikde prezentována, nicméně některé z obvodových kombinací pasivních prvků jsou již známy. Jako jedna z použitých návrhových metod byla metoda autonomních obvodů.

Vytvořená zapojení byla analyzována programem OrCAD. Výsledky simulací a stručný závěr ke všem osmi obvodům je uveden na konci kapitoly 6.

U některých zapojení oscilátorů je možno měnit oscilační kmitočet pomocí změny parametru některého z aktivních prvků. Další možností je změna hodnoty některého z pasivních prvků. Tato možnost se jeví jako vhodnější, nicméně realizace potenciometrů nebo proměnných kondenzátorů může být obtížná. Jako perspektivní se jeví například zapojení oscilátoru s jedním transkonduktančním zesilovačem nebo oscilátor realizovaný s napětím řízeným zesilovačem, který umožňuje přeladění oscilačního kmitočtu přibližně v rozsahu 2,8 MHz až 5,3 MHz. Řízení je realizováno pomocí záporného napětí  $V_{set}$ . Přehled všech výsledků simulací je uveden v Tab. 6.3.

V navazující části práce bylo vybráno šest zapojení, která byla prakticky realizována a následně změřena. Všechna zapojení byla víceméně funkční (na výstupu se objevil harmonický signál), nicméně dosažené výsledky se s výsledky simulací neshodovaly a některá zapojení se nechovala příliš podle očekávání. Naproti tomu jiná zapojení, jako generátor se dvěma transkonduktory, u kterých bylo při simulacích dosaženo nepříliš přesvědčivých výsledků, se při měření ukázala být poměrně kvalitní. Praktická realizace, výsledky měření a přehled výsledků jednotlivých zapojení jsou uvedeny v kapitole 0.

Velká část práce byla věnována oscilátoru s DACA a VCA, který byl navržen ve dvou variantách. Toto zapojení je prakticky funkční, nicméně rozsah přeladění se proti očekávaným stovkám MHz pohyboval přibližně v rozsahu 1 MHz až 6,4 MHz. To by mohlo být částečně způsobeno použitím ideálních modelů při simulacích.

Na konci předchozí kapitoly je ve shrnutí uvedeno srovnání výsledků simulací a měření prakticky vyrobených obvodů (viz Tab. 7.10).

## LITERATURA

- [1] BEZDĚK, Miloslav. Elektronika I. První vydání. České Budějovice, 2006. 288 s. ISBN 80-7232-171-4.
- [2] BRANČÍK, L.; DOSTÁL, T. Analogové elektronické obvody: skripta. První vydání. Brno: FEKT VUT v Brně., 2007. 125 s. ISBN 978-80-214-3525-4.
- [3] COMER David; COMER Donald. Advanced Electronic Circuit Design. 2003, 396 s. ISBN 0-471-22828-1.
- [4] DOSTÁL, T. Teorie obvodů: elektronická skripta. Brno: FEKT VUT v Brně., 2006. 177 s.
- [5] BEČVÁŘ, D. Napěťové konvejory. Elektrovue, 2001, vol. 51. Dostupný z: [www.elektrovue.cz](http://www.elektrovue.cz).
- [6] TOMAZOU, C.; FIDGEY F. L.; HAIGH D. G. Analogue IC design: the current-mode approach. 1993, 640 s. ISBN 0 86341 297 1.
- [7] PALMISANO G.; PALUMBO G.; PENNISI S. CMOS Current amplifiers. Boston / Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1999. 159 s. ISBN 0-7923-8469-5.
- [8] FERRI, Giuseppe; GUERRINI, Nicola. *Low-Voltage Low-Power CMOS Current Conveyors*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2003. 217 s. ISBN 1-4020-7486-7.
- [9] BIOLEK, D.; SENANI, R.; BIOLKOVÁ, V.; KOLKA, Z. *Active Elements for Analog Signal Processing: Classification, Review, and New Proposals*. *Radioengineering*, 2008, roč. 17, č. 4, s. 15-32. ISSN: 1210- 2512.
- [10] KOTON, J. *Universal current conveyor (UCC) and second-generation current conveyor (CCII+/-)*. Brno University of Technology, ON Semiconductor, Czech Republic, 2010. Dostupné z WWW: <http://www.utko.feec.vutbr.cz/~koton>.
- [11] BEČVÁŘ, D.; VRBA, K. *Novel Generations of Inverting Current Conveyor Using Universal Current Conveyor*. Brno University of Technology, 2000. ISSN: 1523-9926. Dostupné z WWW: <http://technologyinterface.nmsu.edu>
- [12] JEŘÁBEK, Jan. *Kmitočtové filtry s proudovými aktivními prvky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 148 s. Vedoucí doktorské práce prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
- [13] MURALI KRISHNA, P. V. S.; KUMAR KUMAR; AVIRENI SRINIVASULU; LAL, R. K. Differential Difference Current Conveyor Based Cascadable Voltage Mode First Order All Pass Filters. Vignan University, Guntur, India. Dostupné z WWW: <http://www.wseas.us>.
- [14] TANGSRIRAT, W.; PRASERTSOM, D. Electronically tunable low-component-count current-mode biquadratic filter using dual-output current followers. *Electronical engineering*, 2006. Dostupné z WWW: <http://www.researchgate.net>.
- [15] JEŘÁBEK, Jan; VRBA, Kamil. *Řiditelný univerzální filtr s vícevýstupovými proudovými sledovači*. *Elektrovue*. 2008, vol. 3, p. 2.

- [16] ŠOTNER, R.; PETRŽELA, J. Možnosti elektronického ladění filtrů KHN struktury s různými komerčně dostupnými aktivními bloky. *Elektrorevue*. 2009, vol. 28, dostupné z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz>>.
- [17] VCA810: Datasheet. High Gain Adjust Range, Wideband, variable gain amplifier, Texas Instruments [online]. 2003, poslední aktualizace 12/2010 [cit.7.12.2013]. Dostupné z WWW: <<http://www.ti.com>>.
- [18] AXMAN, V.; MACURA, P. Přeladování aktivních filtrů pomocí napěťově řízených zesilovačů. [cit.7.12.2013]. Dostupné z WWW:<<http://radio.feld.cvut.cz>>.
- [19] JEŘÁBEK, J. *Dual wide-bandwidth digitally adjustable current amplifier (DACA)*. Brno University of Technology, ON Semiconductor, Czech Republic, 2010. Dostupné z WWW: <<http://www.utko.feec.vutbr.cz/~jerabekj/daca.pdf>>.
- [20] MICHAL, V. Vybrané vlastnosti obvodů pracujících v proudovém módu a napěťovém módu. [cit.7.12.2013]. Dostupné z WWW:<<http://www.postreh.com>>.
- [21] HERENCŠÁR, N.; VRBA, K. Obecný přístup k návrhu kmitočtových filtrů pomocí autonomních obvodů. *Elektrorevue*. 2006, dostupné z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz>>.
- [22] JEŘÁBEK, J.; LATTENBERG, I. Návrh kmitočtových filtrů s CMI vycházející z obecné admitanční sítě. *Elektrorevue*. 2006, vol. 46, dostupné z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz>>.
- [23] OPA860: Datasheet. Wide Bandwidth OPERATIONAL TRANSCONDUCTANCE AMPLIFIER (OTA) and BUFFER, Texas Instruments [online]. 2005, poslední aktualizace 8/2008 [cit.7.12.2013]. Dostupné z WWW: <<http://www.ti.com>>.
- [24] Tao, Y.; Fidler, J. K. *Generation of second-order single-OTA RC oscillators, Circuits, Devices and Systems, IEE Proceedings -*, vol.145, no.4, pp.271,277, Aug 1998 doi: 10.1049/ip-cds:19981872.
- [25] Yufei Tao; Fidler, J.K., "*Electronically tunable dual-OTA second-order sinusoidal oscillators/filters with non-interacting controls: a systematic synthesis approach,*" *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, IEEE Transactions on*, vol.47, no.2, pp.117,129, Feb 2000 doi: 10.1109/81.828566.
- [26] Šotner, R.; Jerabek, J.; Herencsar, N.; Prokop, R.; Vrba, K.; Petrzela, J.; Dostal, T., "*Simply adjustable triangular and square wave generator employing controlled gain current and differential voltage amplifier,*" *Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, 2013 23rd International Conference, vol., no., pp.109,114, 16-17 April 2013
- [27] ATTIA, A. *PSPICE and MATLAB for Electronics: An integrated approach*. Druhé vydání. London, New York. 2002. 338 s. ISBN 0-8493-1263-9.
- [28] Linares-Barranco, B.; Serrano-Gotarredona, T.; Ramos-Martos, J.; Ceballos-Caceres, J.; Mora, J.M.; Linares-Barranco, A., "*A precise 90° quadrature OTA-C oscillator tunable in the 50-130-MHz range,*" *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, vol.51, no.4, pp.649,663, April 2004
- [29] An Sang Hou; Lin, C.E., "*The new design of AGC circuit for the sinusoidal oscillator with wide oscillation frequency range,*" *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol.53, no.5, pp.1396,1401, Oct. 2004

- [30] Linares-Barranco, B.; Rodriguez-Vazquez, A.; Sanchez-Sinencio, E.; Huertas, J.L., "CMOS OTA-C high-frequency sinusoidal oscillators," *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol.26, no.2, pp.160,165, Feb 1991
- [31] J. P. Alegre Pérez et al., *Automatic Gain Control, Analog Circuits and Signal Processing*, DOI 10.1007/978-1-4614-0167-4 2, © Springer Science + Business Media, LLC 2011
- [32] ŠOTNER, Roman. *Studium elektronického řízení a reálného chování variabilních filtračních a oscilačních aplikací moderních aktivních prvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 214 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Tomáš Dostál, DrSc., Ing. Jiří Petržela, PhD.
- [33] JEŘÁBEK, J. *Universal current conveyor (UCC) and second generation current conveyor (CCII+/-)*. Brno University of Technology, ON Semiconductor, Czech Republic, 2010. Dostupné z WWW: <<http://www.utko.feec.vutbr.cz/UCC-N1B.pdf>>.

## SEZNAM ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ

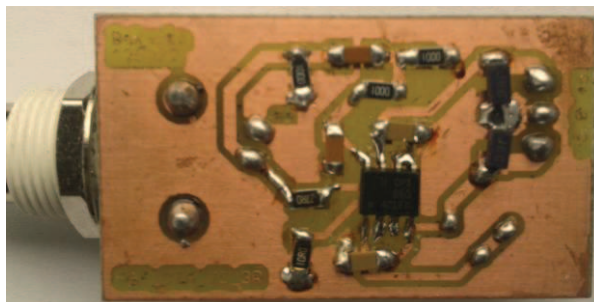
AP	Aktivní prvek
DACA	Digitálně říditelný proudový zesilovač
UCC	Univerzální proudový konvektor
OA (OZ)	Operační zesilovač
VOA	Napětíový operační zesilovač
COA	Proudový operační zesilovač
VCA	Napětím řízený zesilovač
CE	Charakteristická rovnice (Characteristic equation)
CO	Oscilační podmínka (Condition of Oscillation)
CF	Proudový sledovač
VF	Napětíový sledovač
UCC	Univerzální proudový konvektor
VCCS	Napětím řízený zdroj proudu
CCCS	Proudem řízený zdroj proudu
VCVS	Napětím řízený zdroj napětí
CCVS	Proudem řízený zdroj napětí
CCI(+)	Proudový konvektor první generace (pozitivní/negativní)
CCII(+)	Proudový konvektor druhé generace (pozitivní/negativní)
CCIII(+)	Proudový konvektor třetí generace (pozitivní/negativní)
ICCI(+)	Invertující proudový konvektor první generace (pozitivní/negativní)
ICCIII(+)	Invertující proudový druhé generace (pozitivní/negativní)
ICCIIII(+)	Invertující proudový třetí generace (pozitivní/negativní)
DOCCII	Dvouvýstupový konvektor druhé generace
DVCCII	Diferenční dvou-výstupový proudový konvektor druhé generace
DDCCII	Trojvýstupový diferenční proudový konvektor druhé generace
ZV	Zpětná vazba
UCC-N1B	Označení čipu realizujícího UCC
MO-CF	Více-výstupový proudový sledovač
DO-CF	Dvou-výstupový proudový sledovač
OTA	Operační transkonduktanční zesilovač
BOTA	Dvou-výstupový operační transkonduktanční zesilovač
MOTA	Více-výstupový operační transkonduktanční zesilovač

MO-CF	Více-výstupový proudový sledovač
$g_m$	Transkonduktance-převodní vodivost
CM	Proudový mód
VM	Napěťový mód
SNAP	Program pro symbolickou analýzu obvodu
OrCAD	Program pro simulování chování obvodu
PSpice	Program pro simulování chování obvodu (OrCAD)
Eagle	Program pro návrh desek plošných spojů
SMD	Surface Mounted Devices (součástky pro povrchovou montáž)
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor – technologie k výrobě IO
AGC	Automatická stabilizace amplitudy
VGA	Zesilovač s proměnným ziskem (Variable Gain Amplifier)
THD	Činitel harmonického zkreslení (Total Harmonic Distortion)
DPS	Deska plošných spojů
BNC	Bajonet konektor (Bayonet Neill Concelman connector)
VC	Napěťové řízení (Voltage controll)

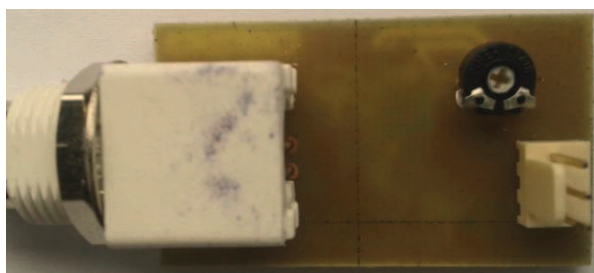
## 8 PŘÍLOHY

### 8.1 Oscilátor s jedním OTA

Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
C1	0.1u	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C2	1n	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C3	1n	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C4	0.1u	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C6	4.7u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C7	4.7u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
IC2	OPA860	OPA860	SO_8	OPA860	1
JP2	+5V	JP2E	JP2	jumper	1
OUT	BNC	BNC	BNC	Koton	1
R1	100	R-EU_M0805	M0805	resistor	1
R2	100	R-EU_M0805	M0805	resistor	1
R3	100	R-EU_M0805	M0805	resistor	1
R4	0 - 1k	R-TRIMM3339P	RTRIM3339P	resistor	1
RE	10	R-EU_M0805	M0805	resistor	1
RS	25 - 200	R-EU_M0805	M0805	resistor	1



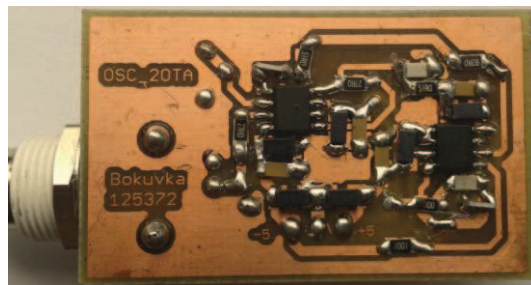
Obr. 8.1: Horní strana osazené DPS - oscilátor s jedním OTA



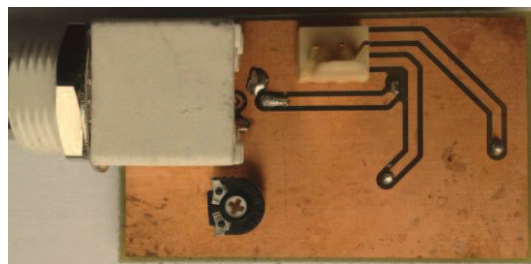
Obr. 8.2: Spodní strana osazené DPS - oscilátor s jedním OTA

## 8.2 Oscilátor se dvěma OTA

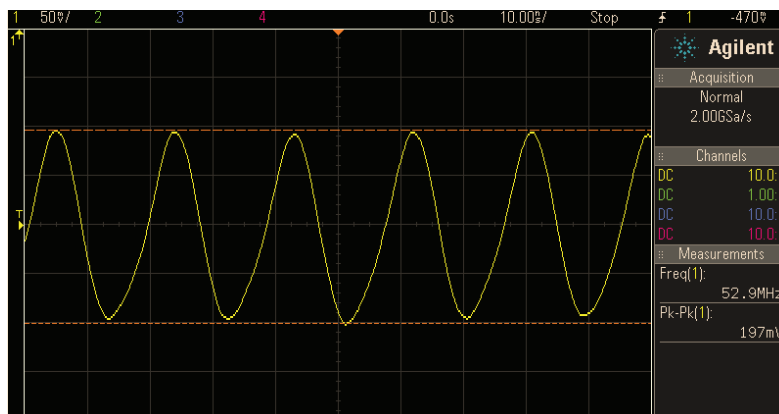
Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
C1	0.1u	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C2	100p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C3	2.2u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C4	2.2u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C5	100p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C6	4.7u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C7	4.7u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C8	2.2u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C9	0.1u	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C10	0.1u	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C11	0.1u	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C12	2.2u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
IC1	OPA860	OPA860	SO_8	OPA860	1
IC2	OPA860	OPA860	SO_8	OPA860	1
IN+	BNC	BNC	BNC	Koton	1
JP2	+-5V	JP2E	JP2	jumper	1
R1	1000	R-EU_M0805	M0805	resistor	1
R2	80	R-EU_M0805	M0805	resistor	1
R3	49.9	R-EU_M0805	M0805	resistor	1
R4	49.9	R-EU_M0805	M0805	resistor	1
R6	100	R-EU_M0805	M0805	resistor	1
R7	1000	R-EU_M0805	M0805	resistor	1
R8	0 - 10k	R-TRIMM3339P	RTRIM3339P	resistor	1
RS	25 - 200	R-EU_M0805	M0805	resistor	1
RS1	25 - 200	R-EU_M0805	M0805	resistor	1
RS2	25 - 200	R-EU_M0805	M0805	resistor	1



Obr. 8.3: Horní strana osazené DPS - oscilátor se dvěma OTA



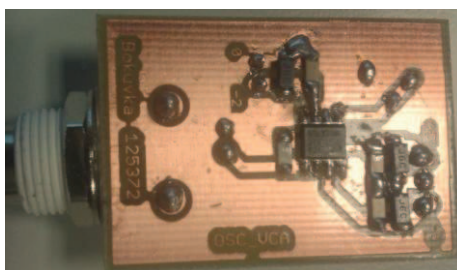
Obr. 8.4: Spodní strana osazené DPS - oscilátor se dvěma OTA



Obr. 8.5: Nežádoucí signál dosažený při měření OSC\_2OTA

### 8.3 Oscilátor s VCA

Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
C1	0.1u	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C2	0.1u	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C3	100p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C4	4.7u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C5	0.1u	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C6	4.7u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C7	4.7u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
JP1	-2V	JP1E	JP1	jumper	1
JP2	+-5V	JP2E	JP2	jumper	1
OUT	BNC	BNC	BNC	Koton	1
R1	0 - 10k	R-TRIMM3339P	RTRIM3339P	rcl	1
IC1	VCA810	VCA810	VCA810	Vca	1



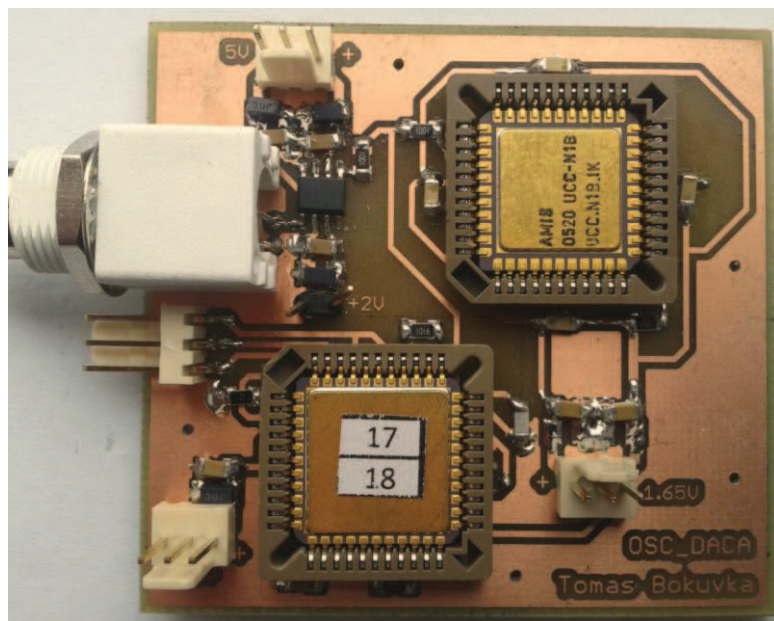
Obr. 8.6: Horní strana osazené DPS - oscilátor s VCA



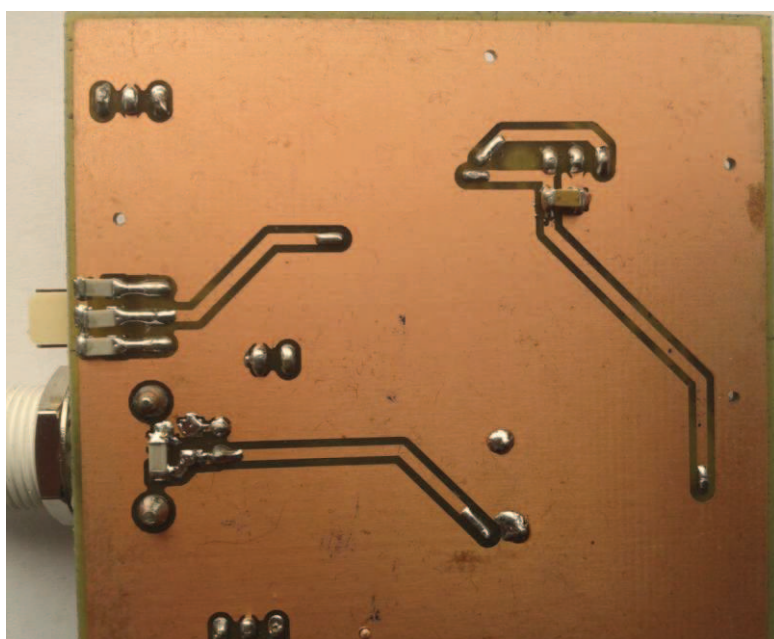
Obr. 8.7: Spodní strana osazené DPS - oscilátor s VCA

## 8.4 Oscilátor s DACA a VCA

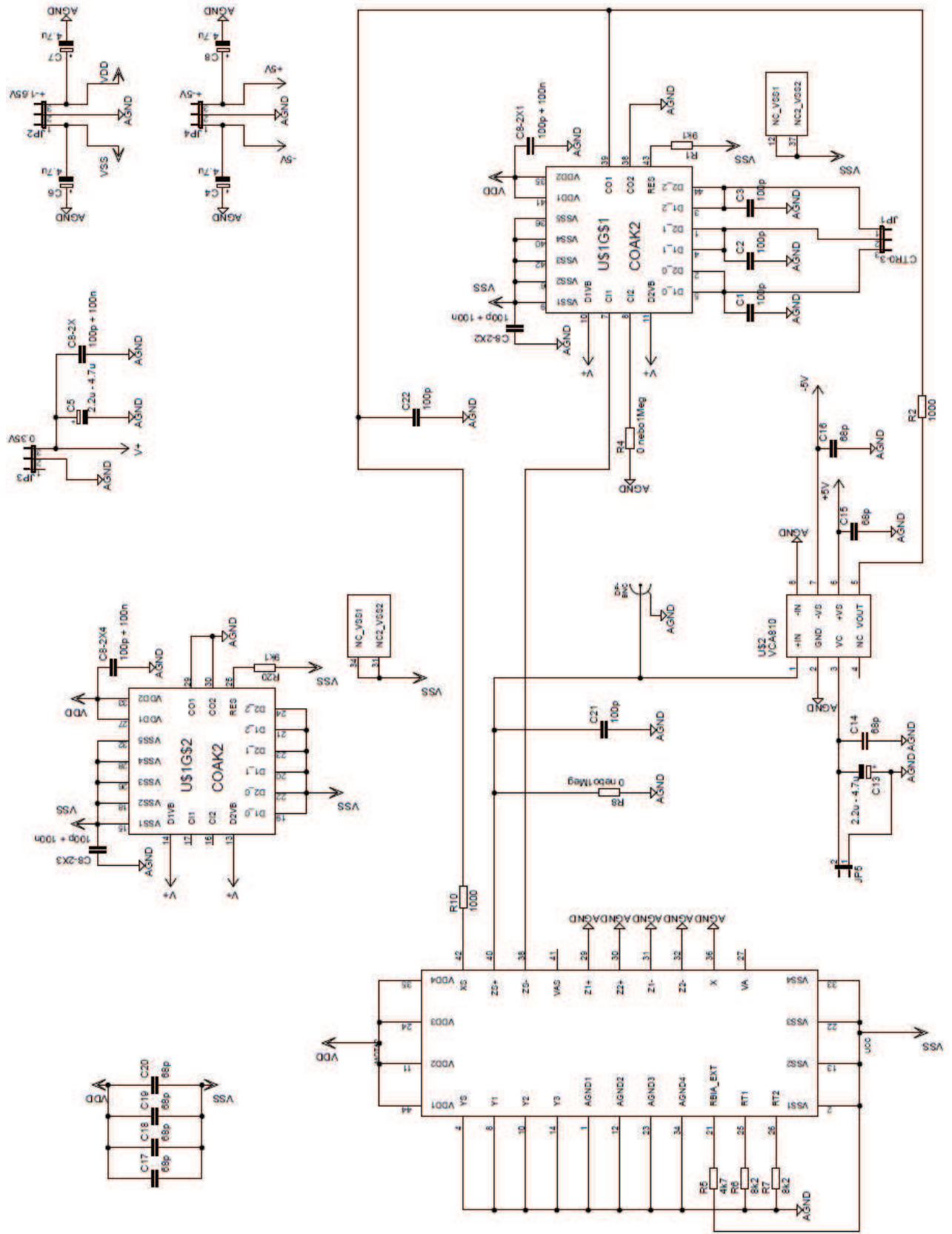
Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
C1	100p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C2	100p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C3	100p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C4	4.7u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C5	2.2u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C6	4.7u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C7	4.7u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C8	4.7u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C8-2X	100p+100n	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C8-2X1	100p+100n	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C8-2X2	100p+100n	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C8-2X3	100p+100n	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C8-2X4	100p+100n	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C13	2.2u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C14	68p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C15	68p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C16	68p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C17	68p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C18	68p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C19	68p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C20	68p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C21	10p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C22	100p	C-EUC1206	C1206	rcl	1
DP-	BNC	BNC	BNC	Koton	1
JP1	CTR0-2	JP2E	JP2	jumper	1
JP2	+ -1.65V	JP2E	JP2	jumper	1
JP3	0.35V	JP2E	JP2	jumper	1
JP4	+ -5V	JP2E	JP2	jumper	1
JP5		JP1E	JP1	jumper	1
MOTA2	UCC	UCC	PLCC44S	ucc	1
R1	9k1	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
R2	27	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
R4	0	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
R5	4k7	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
R6	8k2	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
R7	8k2	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
R8	0	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
R10	27	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
R20	9k1	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
U\$1	COAK2	COAK2	PLCC44S	coak2-dac	1
U\$2	VCA810	VCA810	VCA810	Vca	1



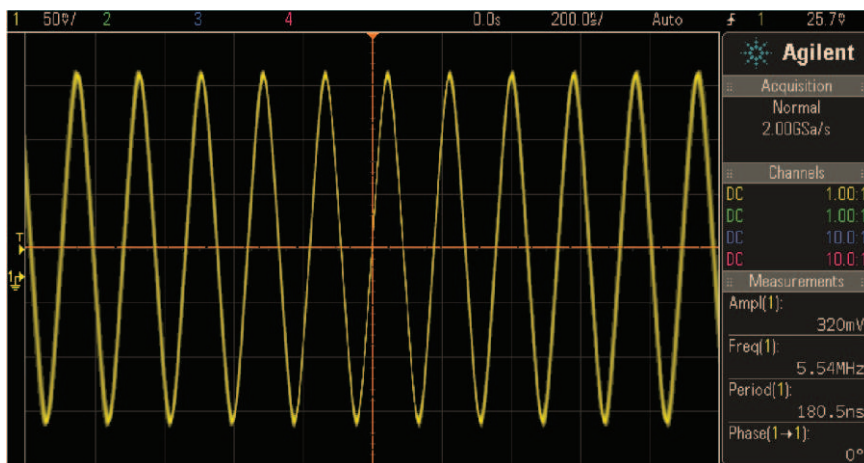
Obr. 8.8: Horní strana osazené DPS - oscilátor s DACA a VCA



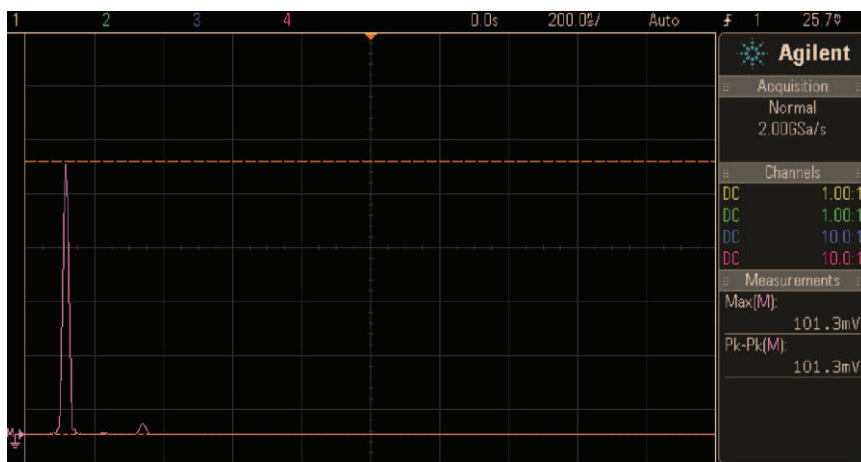
Obr. 8.9: Spodní strana osazené DPS - oscilátor s DACA a VCA



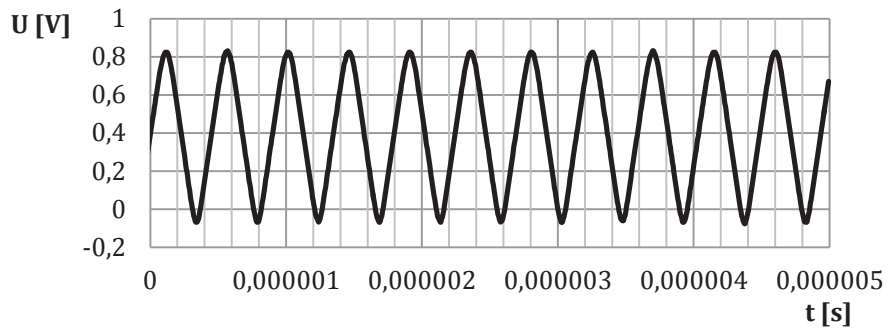
Obr. 8.10: Schéma zapojení oscilátoru s DACA a VCA z programu Eagle



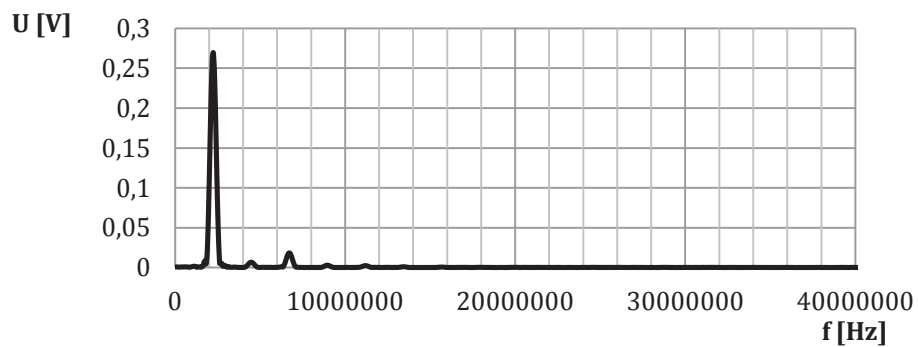
Obr. 8.11: Ukázka měření OSC\_DACA\_VCA na osciloskopu - časový průběh



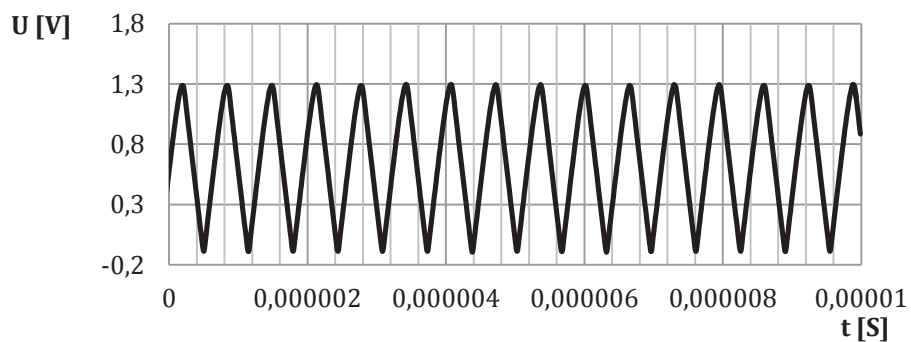
Obr. 8.12: Ukázka měření OSC\_DACA\_VCA na osciloskopu – spektrum



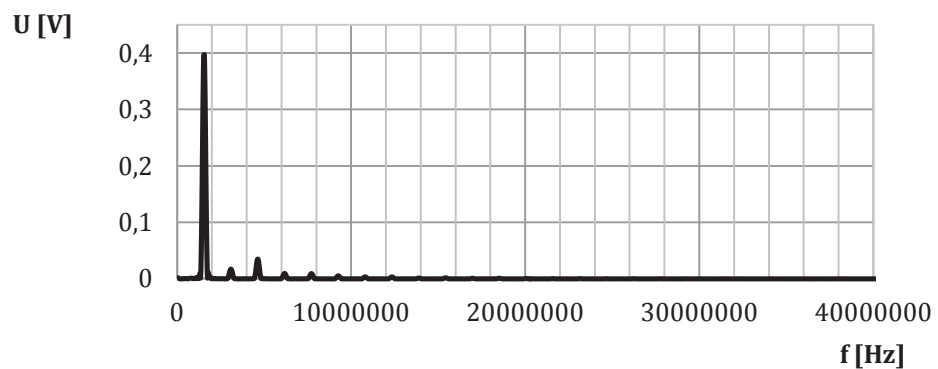
Obr. 8.13: Výstupní signál OSC\_DACA\_VCA pro nastavené A=2



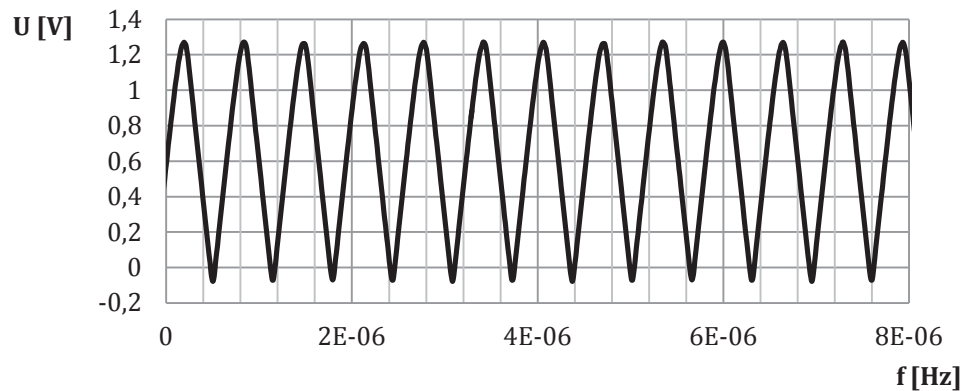
Obr. 8.14: Spektrum signálu na výstupu OSC\_DACA\_VCA pro nastavené A=2



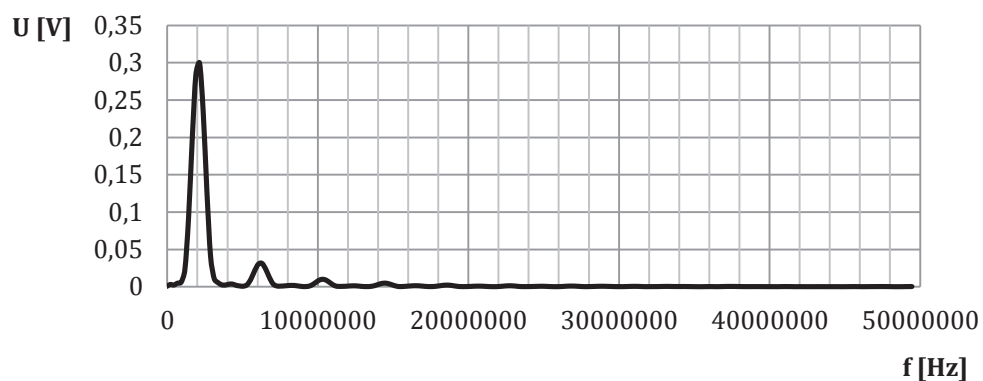
Obr. 8.15: Výstupní signál OSC\_DACA\_VCA pro nastavené A=3



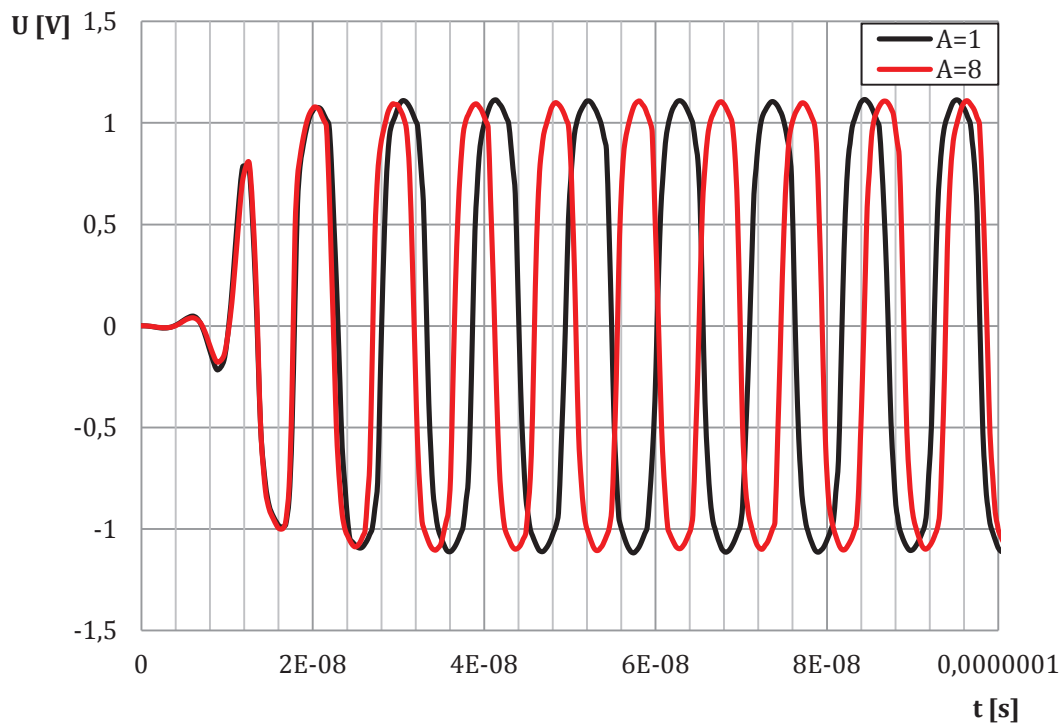
Obr. 8.16: Spektrum signálu na výstupu OSC\_DACA\_VCA pro nastavené A=3



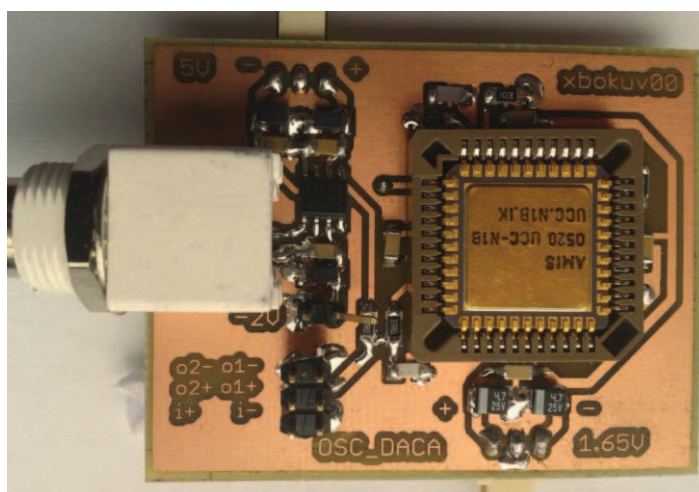
Obr. 8.17: Výstupní signál OSC\_DACA\_VCA pro nastavené A=4



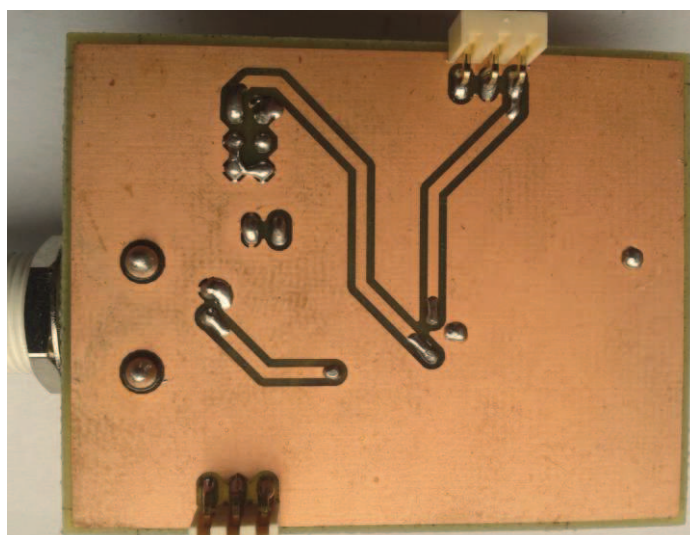
Obr. 8.18: Spektrum signálu na výstupu OSC\_DACA\_VCA pro nastavené A=4



Obr. 8.19: Srovnání průběhů na výstupu AGC pro zesílení DACA 1 a 8

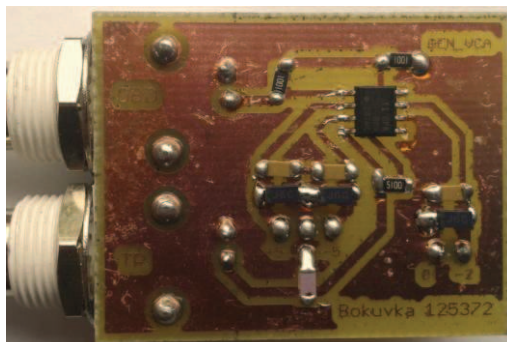


Obr. 8.20: Horní strana DPS oscilátoru s DACA a VCA – externí realizace

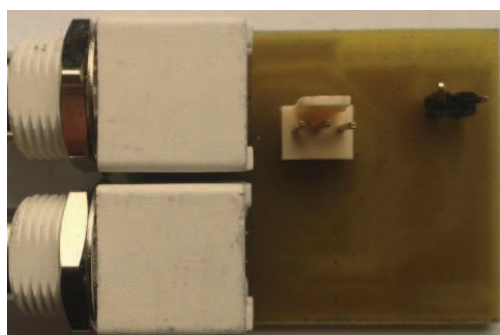


Obr. 8.21: Spodní strana DPS oscilátoru s DACA a VCA – externí realizace

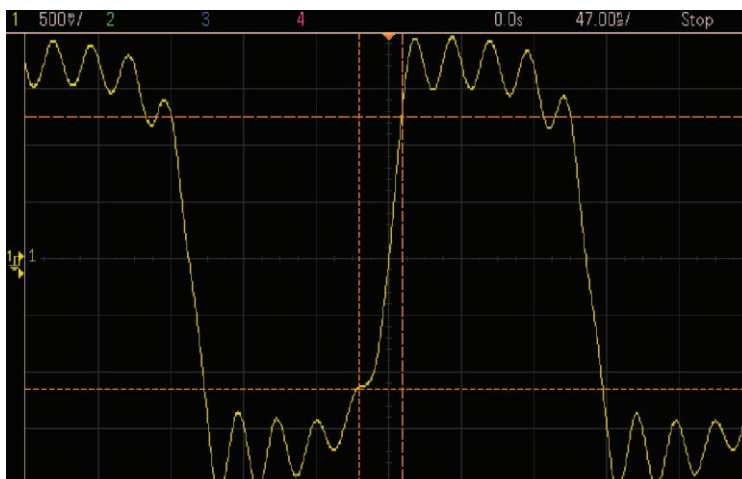
## 8.5 Generátor s VCA



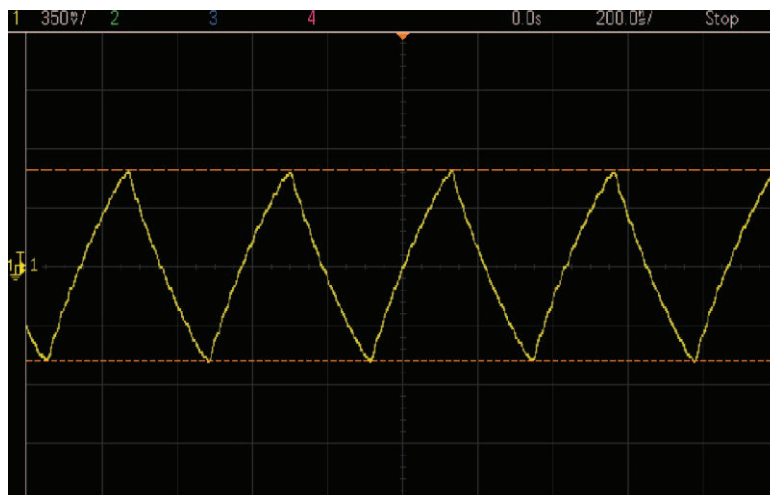
Obr. 8.22: Horní strana osazené DPS - generátor s VCA



Obr. 8.23: Dolní strana osazené DPS - generátor s VCA



Obr. 8.24: Ukázka deformace obdélníkového signálu



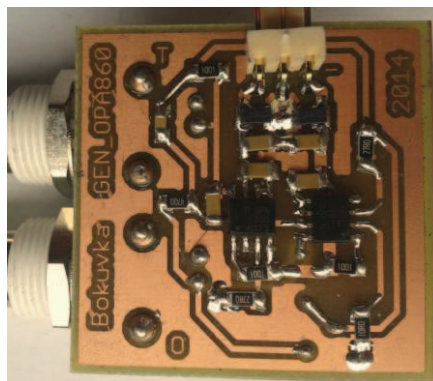
Obr. 8.25: Ukázka měření trojúhelníku na osciloskopu



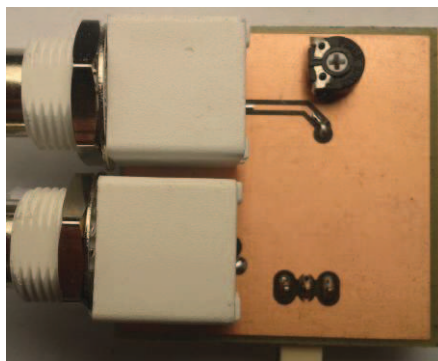
Obr. 8.26: Ukázka měření obdélníku na osciloskopu

## 8.6 Generátor se dvěma OTA

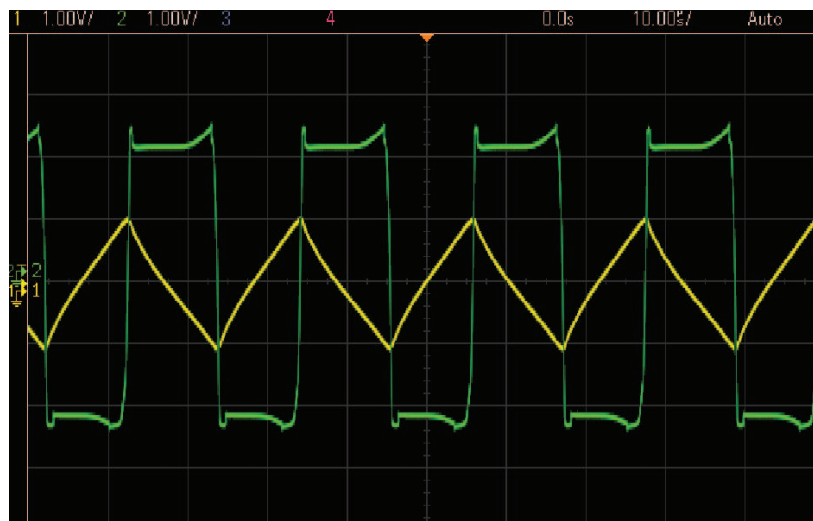
Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
C1	100n	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C2	10n	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C5	2.7n	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C6	4.7u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C7	4.7u	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	rcl	1
C9	100n	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C10	100n	C-EUC1206	C1206	rcl	1
C11	100n	C-EUC1206	C1206	rcl	1
IC1	OPA860	OPA860	SO_8	OPA860	1
IC2	OPA860	OPA860	SO_8	OPA860	1
IN+	BNC	BNC	BNC	Koton	1
IN+1	BNC	BNC	BNC	Koton	1
JP2	+ -5V	JP2E	JP2	jumper	1
R1	1000	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
R3	1000	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
R4	470	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
R6	10	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
R7	1000	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
R8	0 - 10k	R-TRIMM3339P	RTRIM3339P	resistor	1
RS	27	R-EU_M1206	M1206	resistor	1
RS2	27	R-EU_M1206	M1206	resistor	1



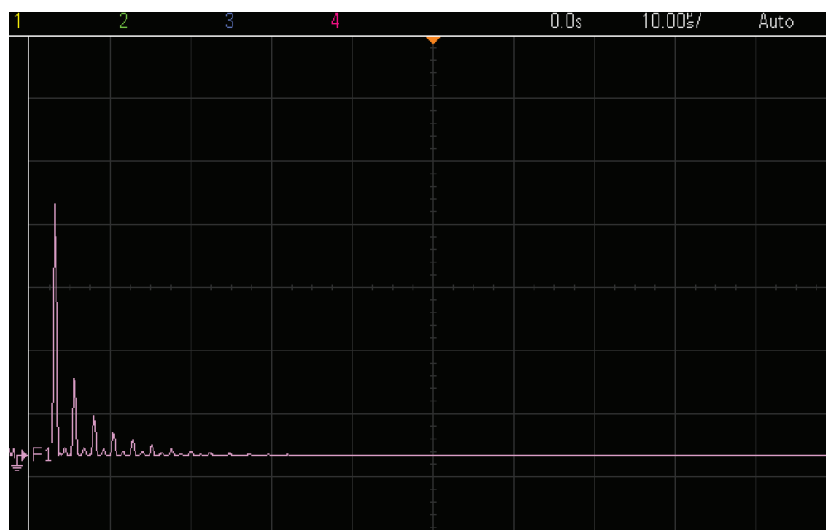
Obr. 8.27: Horní strana osazené DPS - generátor se dvěma OTA



Obr. 8.28: Dolní strana osazené DPS - generátor se dvěma OTA



Obr. 8.29: Ukázka výsledků měření generátoru na osciloskopu



Obr. 8.30: Ukázka výsledků měření generátoru na osciloskopu - spektrum OBD

## SOUBORY NA CD

Na přiloženém CD se nachází sedm hlavních složek, které obsahují materiály a podklady použité k tvorbě této práce. Struktura je následující.

### 1. Diplomová práce

Složka obsahuje diplomovou práci ve formátu PDF a s ní související dokumenty

### 2. Dokumenty

Obsahuje soubory MS office Excel s vytvořenými grafy simulovaných a měřených průběhů. Dále pak vytvořené tabulky a soubory PDF, které sloužily ke tvorbě příloh

### 3. Fotky desek plošných spojů

Nachází se zde fotografie všech prakticky vyrobených zapojení

### 4. MS Visio

Obsahuje výkresy nakreslené v programu MS Office Visio. Jsou zde simulační schémata, schematické značky a různá schémata.

### 5. SNAP

V této složce jsou soubory z programu SNAP, které sloužily pro výpočet rovnic.

### 6. OrCAD

Jsou zde obsaženy soubory z programu OrCAD, pomocí kterého byla simulována všechna uvedená zapojení oscilátorů a generátorů.

### 7. Eagle

Jsou zde uložena navržená schémata a DPS z programu Eagle verze 5.11