

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Elektronické filtry a oscilátory realizované pomocí proudových  
aktivních prvků**

**Electronic Filters and Oscillators Realized Using Current Active  
Elements**

**2016**

**Bc. Jiří Linhart**

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Linhart**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Elektronické filtry a oscilátory realizované pomocí proudových  
aktivních prvků  
Electronic Filters and Oscillators Realized Using Current Active  
Elements**

Jazyk vypracování: čeština

## Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte přehled obvodových řešení, modelů a parametrů komerčně dostupných aktivních proudových prvků.
2. Analyzujte a upravte obvodová řešení univerzálních ARC bikvadů typu KHN a TT pro realizaci multifunkčních filtrů 2. řádu pomocí těchto aktivních prvků.
3. Analyzujte vliv podkritické kladné zpětné vazby při realizaci pásmových propustí a oscilátorů harmonického signálu s proudovými aktivními prvky.
4. Parametry navržených zapojení experimentálně ověřte.

## Seznam doporučené odborné literatury:

[1]DOSTÁL, Tomáš, AXMAN, Vladimír. *Elektrické filtry*. Brno : FEKT VUT, 2002. 343 s. ISBN REL 002.

[2]PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače - historie a současnost*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2002. 68 s. ISBN 80-7300-047-4.

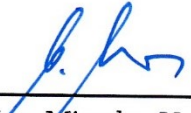
Vlastní literární rešerše k řešené problematice.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Tesař**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



---

doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



---

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *25. dubna 2016*

*Linhart*  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Zdeňku Tesařovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá popisem komerčně dostupných aktivních proudových prvků typu proudový konvektor, návrhem a podrobnou analýzou filtrů typu pásmová propust, elektronických oscilátorů a univerzálních filtrů KHN a TT. Pro realizaci elektronických filtrů a oscilátorů jsou použity transimpedanční operační zesilovače AD844, které v sobě obsahují pozitivní proudové konvejory druhé generace (CCII+). Charakteristiky pásmových propustí byly experimentálně ověřeny měřeními frekvenčních charakteristik. Funkce oscilátorů byla ověřena zobrazením časového průběhu a frekvenčního spektra generovaného signálu.

## **Klíčová slova**

Proudový konvektor; CCII+; filtr; oscilátor; AD844; OPA860; OPA861; frekvenční charakteristika; impulzní charakteristika; frekvenční spektrum; podkritická kladná zpětná vazba

## **Abstract**

This master's thesis describes commercially available current active elements such as current conveyor, design and detailed analysis of band-pass filters, electronic oscillators and universal KHN and TT filters. For the realization of electronic filters and oscillators are used transimpedance operational amplifiers AD844, which contain the positive second generation current conveyors (CCII+). Bandpass characteristics were experimentally verified by measuring the frequency characteristics. Function of oscillators was verified by displaying time waveform and frequency spectrum of the generated signal.

## **Key words**

Current conveyor; CCII+; filter; oscillator; AD844; OPA860; OPA861; frequency characteristic; pulse characteristic; frequency spectrum; subcritical positive feedback

# Obsah

|   |        |
|---|--------|
| Seznam použitých symbolů.....   | - 10 - |
| Seznam použitých zkratek.....   | - 11 - |
| Seznam ilustrací a seznam tabulek.....  | - 12 - |
| Úvod.....   | - 16 - |
| 1 Komerčně dostupné aktivní proudové prvky .....                              | - 17 - |
| 1.1 Transimpedanční operační zesilovač AD844.....                             | - 17 - |
| 1.2 Transkonduktanční operační zesilovač OPA860/OPA861 .....                  | - 19 - |
| 2 Analýza pásmových propustí .....  | - 21 - |
| 2.1 Pásmová propust se zpětnou vazbou.....                                    | - 21 - |
| 2.2 Pásmová propust realizovaná aktivním prvkem CCII+ .....                   | - 23 - |
| 2.2.1 Návrh součástí pro pásmovou propust.....                                | - 27 - |
| 2.2.2 Frekvenční charakteristiky zapojení.....                                | - 28 - |
| 2.3 Pásmová propust realizovaná CCII+ s podkritickou kladnou zpětnou vazbou - | 29 -   |
| 2.3.1 Návrh součástí pro pásmovou propust se zpětnou vazbou .....             | - 30 - |
| 2.3.2 Frekvenční charakteristiky zapojení.....                                | - 32 - |
| 2.4 RLC modifikovaná pásmová propust s podkritickou kladnou zpětnou vazbou-   | 33 -   |
| 2.4.1 Návrh součástí pro RLC modifikovanou propust .....                      | - 35 - |
| 2.4.2 Frekvenční charakteristiky zapojení.....                                | - 37 - |
| 2.5 Pásmová propust realizovaná 3 aktivními prvky .....                       | - 37 - |
| 2.5.1 Návrh součástí PP realizované 3 aktivními prvky .....                   | - 38 - |
| 2.5.2 Frekvenční charakteristiky zapojení.....                                | - 39 - |
| 2.6 Pásmová propust realizovaná dvěma CCII+ s podkritickou kladnou ZV .....   | - 40 - |
| 2.6.1 Návrh součástí pro pásmovou propust.....                                | - 41 - |
| 2.6.2 Frekvenční charakteristiky zapojení.....                                | - 42 - |
| 3 Analýza oscilátorů.....   | - 44 - |
| 3.1 1. modifikace RC oscilátoru.....  | - 44 - |
| 3.1.1 Návrh součástí pro RC oscilátor .....                                   | - 46 - |
| 3.1.2 Frekvenční a impulzní charakteristika zapojení .....                    | - 47 - |
| 3.2 2. modifikace RC oscilátoru.....  | - 48 - |
| 3.2.1 Návrh součástí pro RC oscilátor .....                                   | - 48 - |
| 3.2.2 Frekvenční a impulzní charakteristika zapojení .....                    | - 49 - |



|       |   |        |
|-------|---|--------|
| 3.3   | 3. modifikace RC oscilátoru s proudovým výstupem .....                    | - 50 - |
| 3.3.1 | Návrh součástek pro RC oscilátor .....                                    | - 51 - |
| 3.3.2 | Frekvenční a impulzní charakteristika zapojení .....                      | - 52 - |
| 3.4   | 4. modifikace RC oscilátoru.....  | - 53 - |
| 3.4.1 | Návrh součástek pro RC oscilátor .....                                    | - 55 - |
| 3.4.2 | Frekvenční a impulzní charakteristika zapojení .....                      | - 56 - |
| 3.5   | 5. modifikace RC oscilátoru s proudovým výstupem .....                    | - 57 - |
| 3.5.1 | Návrh součástek pro RC oscilátor .....                                    | - 58 - |
| 3.5.2 | Frekvenční a impulzní charakteristika zapojení .....                      | - 59 - |
| 3.6   | 6. modifikace RC oscilátoru.....  | - 60 - |
| 3.6.1 | Návrh součástek pro RC oscilátor:.....                                    | - 61 - |
| 3.6.2 | Frekvenční a impulzní charakteristika zapojení .....                      | - 62 - |
| 4     | Analýza ARC bikvadů KHN a TT .....  | - 64 - |
| 4.1   | KHN filtr realizovaný třemi CCII+ .....                                   | - 64 - |
| 4.1.1 | Návrh součástek pro KHN filtr.....  | - 65 - |
| 4.1.2 | Amplitudové frekvenční charakteristiky zapojení.....                      | - 66 - |
| 4.2   | TT filtr realizovaný dvěma CCII+ .....                                    | - 67 - |
| 4.2.1 | Návrh součástek pro TT filtr .....  | - 68 - |
| 4.2.2 | Amplitudové frekvenční charakteristiky zapojení.....                      | - 69 - |
| 5     | Experimentální ověření .....  | - 71 - |
| 5.1   | Pásmová propust realizovaná aktivním prvkem CCII+ .....                   | - 71 - |
| 5.2   | Pásmová propust realizovaná CCII+ s podkritickou kladnou zpětnou vazbou - | 72 -   |
| 5.3   | Pásmová propust se syntetickým induktorem s podkritickou kladnou ZV ..... | - 72 - |
| 5.4   | KHN filtr realizovaný třemi CCII+.....                                    | - 73 - |
| 5.5   | TT filtr realizovaný dvěma CCII+ .....                                    | - 75 - |
| 5.6   | 1. modifikace RC oscilátoru.....  | - 76 - |
| 5.7   | 2. modifikace RC oscilátoru.....  | - 77 - |
| 5.8   | 6. modifikace RC oscilátoru.....  | - 79 - |
|       | Závěr .....   | - 81 - |
|       | Použitá literatura .....  | - 82 - |
|       | Seznam příloh.....  | - 83 - |

## Seznam použitých symbolů

| Symbol     | Jednotky | Význam symbolu            |
|------------|----------|---------------------------|
| $B$        | Hz       | Šířka pásma               |
| $C$        | F        | Kondenzátor               |
| $F(p)$     | —        | Přenosová funkce          |
| $K$        | —        | Přenos středního kmitočtu |
| $L$        | H        | Cívka                     |
| $Q$        | —        | Činitel jakosti           |
| $R$        | $\Omega$ | Rezistor                  |
| $Z$        | $\Omega$ | Impedance                 |
| $f_0$      | Hz       | Mezní kmitočet            |
| $i$        | A        | Proud                     |
| $m$        | —        | Pomocná veličina          |
| $n$        | —        | Pomocná veličina          |
| $u$        | V        | Napětí                    |
| $\beta$    | —        | Přenos zpětné vazby       |
| $\omega_0$ | Hz       | Střední kmitočet          |

---

## Seznam použitých zkratk

| Zkratka       | Význam                                      |
|---------------|---|
| <b>AD844</b>  | Transimpedanční operační zesilovač          |
| <b>ARC</b>    | Aktivní filtry RC                           |
| <b>CCII+</b>  | Proudový konvektor druhé generace pozitivní |
| <b>DP</b>     | Dolní propust                               |
| <b>HP</b>     | Horní propust                               |
| <b>KHN</b>    | Univerzální filtr                           |
| <b>OPA820</b> | Širokopásmový operační zesilovač            |
| <b>OPA860</b> | Transkonduktanční operační zesilovač        |
| <b>OPA861</b> | Transkonduktanční operační zesilovač        |
| <b>PP</b>     | Pásmová propust                             |
| <b>TT</b>     | Univerzální filtr                           |
| <b>VCA810</b> | Napěťový zesilovač                          |

---

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

| Číslo ilustrace | Název ilustrace   | Číslo stránky |
|-----------------|---|---------------|
| 1.1             | Model první úrovně AD844  | 17            |
| 1.2             | Model druhé úrovně AD844  | 17            |
| 1.3             | Model třetí úrovně AD844  | 17            |
| 1.4             | Vnitřní zjednodušené zapojení transimpedančního OZ AD844            | 18            |
| 1.5             | Model první úrovně OPA860   | 19            |
| 1.6             | Model druhé úrovně OPA860   | 19            |
| 1.7             | Model třetí úrovně OPA860   | 19            |
| 1.8             | Vnitřní zjednodušené zapojení transkonduktančního OZ OPA861         | 20            |
| 2.1             | Pásmová propust se zpětnou vazbou                                   | 21            |
| 2.2             | Zjednodušení obvodu pomocí superpozice                              | 21            |
| 2.3             | Zjednodušení obvodu pomocí superpozice                              | 22            |
| 2.4             | Pásmová propust s aktivním prvkem CCII+                             | 23            |
| 2.5             | Pásmová propust nahrazená impedancemi                               | 24            |
| 2.6             | 1. varianta zapojení pásmové propusti                               | 28            |
| 2.7             | 2. varianta zapojení pásmové propusti                               | 28            |
| 2.8             | Amplitudová frekvenční charakteristika pásmové propusti             | 29            |
| 2.9             | Fázová frekvenční charakteristika pásmové propusti                  | 29            |
| 2.10            | Pásmová propust realizovaná aktivním prvkem CCII+ se zpětnou vazbou | 30            |
| 2.11            | 1. varianta zapojení  | 31            |
| 2.12            | 2. varianta zapojení  | 32            |
| 2.13            | Amplitudové frekvenční charakteristiky pásmové propusti             | 32            |
| 2.14            | Fázové frekvenční charakteristiky pásmové propusti                  | 33            |
| 2.15            | RLC modifikovaná pásmová propust se zpětnou vazbou                  | 33            |
| 2.16            | RLC zapojení nahrazeno impedancemi                                  | 34            |
| 2.17            | Nahrazení cívky a rezistoru syntetickým induktorem                  | 35            |

---

---

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.18 | Zapojení pásmové propusti s navrhnutými součástkami                  | 36 |
| 2.19 | Amplitudové frekvenční charakteristiky pásmové propusti              | 37 |
| 2.20 | Fázové frekvenční charakteristiky pásmové propusti                   | 37 |
| 2.21 | Pásmová propust realizovaná 3 aktivními prvky                        | 38 |
| 2.22 | Zapojení s navrhnutými součástkami                                   | 39 |
| 2.23 | Amplitudová frekvenční charakteristika pásmové propusti              | 40 |
| 2.24 | Fázová frekvenční charakteristika pásmové propusti                   | 40 |
| 2.25 | Pásmová propust realizovaná 2 CCII+ s podkritickou kladnou ZV        | 41 |
| 2.26 | Zapojení pásmové propusti s navrhnutými součástkami                  | 42 |
| 2.27 | Amplitudové frekvenční charakteristiky pásmové propusti              | 43 |
| 2.28 | Fázové frekvenční charakteristiky pásmové propusti                   | 43 |
| 3.1  | Zapojení RC oscilátoru   | 44 |
| 3.2  | Zapojení s navrhnutými součástkami                                   | 46 |
| 3.3  | Amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu oscilátoru | 47 |
| 3.4  | Impulzní charakteristika oscilátoru                                  | 47 |
| 3.5  | Zapojení RC oscilátoru   | 48 |
| 3.6  | Zapojení s navrhnutými součástkami                                   | 49 |
| 3.7  | Amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu oscilátoru | 50 |
| 3.8  | Impulzní charakteristika oscilátoru                                  | 50 |
| 3.9  | Zapojení RC oscilátoru s proudovým výstupem                          | 51 |
| 3.10 | Zapojení s navrhnutými součástkami                                   | 52 |
| 3.11 | Amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu oscilátoru | 53 |
| 3.12 | Impulzní charakteristika oscilátoru                                  | 53 |
| 3.13 | Zapojení RC oscilátoru   | 54 |
| 3.14 | Zapojení s navrhnutými součástkami                                   | 56 |
| 3.15 | Amplitudová frekvenční charakteristika autonomního                   | 56 |

---

---

|      |  |    |
|------|--|----|
|      | obvodu oscilátoru  |    |
| 3.16 | Impulzní charakteristika oscilátoru  | 57 |
| 3.17 | Zapojení RC oscilátoru s proudovým výstupem                                  | 57 |
| 3.18 | Zapojení s navrhnutými součástkami   | 58 |
| 3.19 | Amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu oscilátoru         | 59 |
| 3.20 | Impulzní charakteristika oscilátoru  | 59 |
| 3.21 | Zapojení RC oscilátoru   | 60 |
| 3.22 | Zapojení s navrhnutými součástkami   | 61 |
| 3.23 | 1. varianta zesilovače řízeného výstupním signálem                           | 62 |
| 3.24 | 2. varianta zesilovače řízeného výstupním signálem                           | 62 |
| 3.25 | Amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu oscilátoru         | 63 |
| 3.26 | Impulzní charakteristika oscilátoru  | 63 |
| 4.1  | Zapojení KHN filtru s operačními zesilovači                                  | 64 |
| 4.2  | Zapojení KHN filtru s proudovými konvejory CCII+                             | 64 |
| 4.3  | Zapojení KHN filtru s navrhnutými součástkami                                | 66 |
| 4.4  | Amplitudové frekvenční charakteristiky KHN filtru pro $Q = 0,707$            | 66 |
| 4.5  | Amplitudové frekvenční charakteristiky KHN filtru pro $Q = 5$                | 67 |
| 4.6  | Amplitudové frekvenční charakteristiky KHN filtru pro $Q = 10$               | 67 |
| 4.7  | Zapojení filtru TT s proudovými konvejory CCII+                              | 68 |
| 4.8  | Zapojení filtru TT s navrhnutými součástkami                                 | 69 |
| 4.9  | Amplitudové frekvenční charakteristiky pásmové propusti TT filtru            | 69 |
| 4.10 | Amplitudové frekvenční charakteristiky dolní propusti TT filtru              | 70 |
| 5.1  | Realizované zapojené pásmové propusti  | 71 |
| 5.2  | Amplitudová frekvenční charakteristika pásmové propusti                      | 71 |
| 5.3  | Realizované zapojení pásmové propusti s podkritickou kladnou ZV pro $Q = 10$ | 72 |

---

|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.4  | Amplitudové frekvenční charakteristiky pásmové propusti                      | 72 |
| 5.5  | Realizované zapojení pásmové propusti se syntetickým induktorem pro $Q = 11$ | 73 |
| 5.6  | Amplitudové frekvenční charakteristiky pásmové propusti                      | 73 |
| 5.7  | Realizované zapojení filtru KHN pro $Q = 0,707$                              | 74 |
| 5.8  | Amplitudové frekvenční charakteristiky KHN filtru pro $Q = 0,707$            | 74 |
| 5.9  | Amplitudové frekvenční charakteristiky KHN filtru pro $Q = 5$                | 74 |
| 5.10 | Realizované zapojení TT filtru pro $Q = 0,707$                               | 75 |
| 5.11 | Amplitudové frekvenční charakteristiky TT filtru pro $Q = 0,707$             | 75 |
| 5.12 | Amplitudové frekvenční charakteristiky TT filtru pro $Q = 5$                 | 76 |
| 5.13 | Realizované zapojení oscilátoru  | 76 |
| 5.14 | Časový průběh výstupního signálu oscilátoru                                  | 77 |
| 5.15 | Frekvenční spektrum generovaného signálu oscilátorem                         | 77 |
| 5.16 | Realizované zapojení oscilátoru  | 78 |
| 5.17 | Časový průběh výstupního signálu oscilátoru                                  | 78 |
| 5.18 | Frekvenční spektrum generovaného signálu oscilátorem                         | 78 |
| 5.19 | Realizované zapojení oscilátoru  | 79 |
| 5.20 | Časový průběh výstupních signálů oscilátoru                                  | 79 |
| 5.21 | Frekvenční spektrum generovaného signálu oscilátorem                         | 80 |

| Číslo tabulky | Název tabulky               | Číslo stránky |
|---------------|-----------------------------|---------------|
| 1.1           | Parametry zesilovače AD844  | 18            |
| 1.2           | Parametry zesilovače OPA860 | 20            |

## Úvod

Cílem této diplomové práce je navrhnout, analyzovat a ověřit funkčnost různých zapojení elektronických filtrů a oscilátorů. Stavební prvek pro elektronické filtry a oscilátory byl použit proudový aktivní prvek CCII+. Hlavním důvodem volby tohoto aktivního proudového prvku namísto klasických operačních zesilovačů jsou lepší dynamické vlastnosti pro vysoké kmitočty. Někdy se také označuje obchodním názvem diamantový tranzistor s napěťovým, vysokoimpedančním vstupem značeným B (u CCII+ je značen Y), proudovým, nízkoimpedančním vstupem značeným E (X) a proudovým, vysokoimpedančním výstupem označeným C (Z). Jelikož se CCII+ nikdy samostatně nevyráběl, je nutné sáhnout po univerzálních komerčně dostupných integrovaných obvodech např. AD844, OPA860 nebo OPA861, ve kterých je tento proudový aktivní prvek obsažen. Pro realizaci elektronických filtrů a oscilátorů jsem si vybral transimpedanční operační zesilovač AD844.

První kapitola se věnuje komerčně dostupným aktivním proudovým prvkům AD844, OPA860 a OPA861, které realizují pozitivní proudový konvektor druhé generace CCII+. Každý komerčně dostupný aktivní proudový prvek je popsán, dále jsou zde uvedeny tři úrovně modelů, jejich vnitřní zjednodušená zapojení, parametry a vlastnosti.

V druhé kapitole se zabývám vlivem podkritické kladné zpětné vazby na parametry elektronických filtrů typu pásmová propust. Nejdříve je stručně popsán princip filtru typu pásmová propust. Následuje zapojení základní pásmové propusti s podkritickou kladnou napěťovou zpětnou vazbou, kde je odvozen vztah pro přenos a činitel jakosti, pomocí kterého se volili hodnoty zpětnovazebních rezistorů. Dále byla navržena a analyzována 4 zapojení pásmových propustí s podkritickou napěťovou zpětnou vazbou a 1 zapojení bez zpětné vazby.

Třetí kapitola se zabývá elektronickými oscilátory harmonického signálu. Nejprve je popsán princip oscilátoru a podmínky oscilací. Dále jsou zde uvedena navržená a analyzovaná zapojení elektronických oscilátorů s nadkritickou kladnou napěťovou zpětnou vazbou.

Čtvrtá kapitola se zabývá univerzálními elektronickými filtry KHN a TT. Jejich univerzálnost spočívá v realizaci více typů filtrů. Filtr KHN realizuje pásmovou, dolní a horní propust a filtr TT realizuje pouze dolní a pásmovou propust. V práci je uvedeno jedno navržené a analyzované zapojení filtru KHN a jedno zapojení filtru TT.

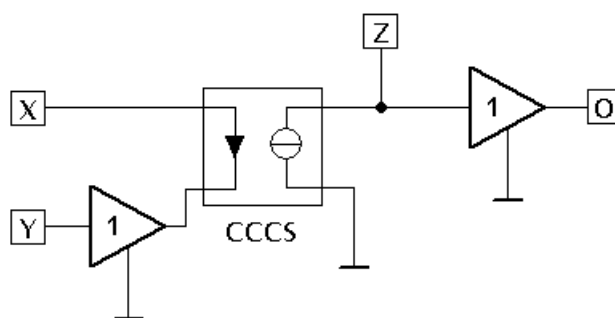
V poslední kapitole se zabývám měřením navržených zapojení a porovnáním se simulovanými výsledky.



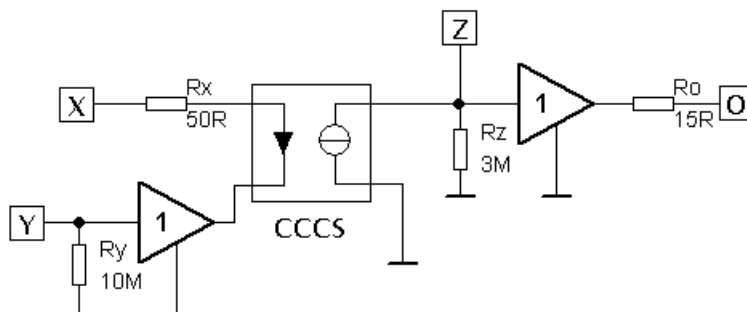
# 1 Komerčně dostupné aktivní proudové prvky

## 1.1 Transimpedanční operační zesilovač AD844

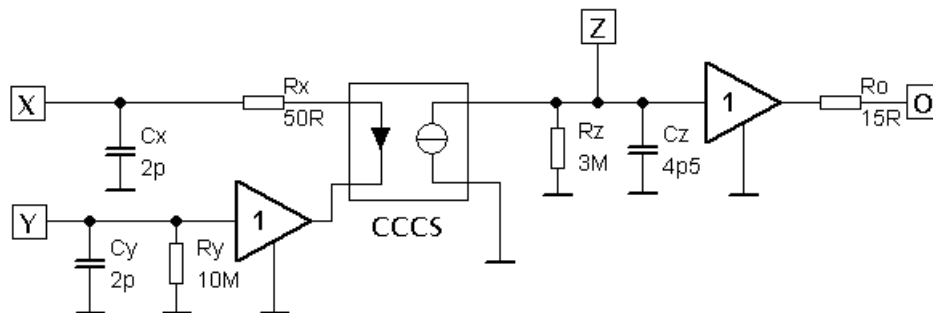
AD844 vyráběný společností Analog Devices je vysokorychlostní monolitický operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou. Vyznačuje se vysokou šířkou pásma (60MHz se ziskem -1 a 33MHz s nastaveným ziskem -10), rychlou odezvou signálu, nízkým zkreslením, nízkým šumem, vysokou rychlostí přeběhu typicky 2000V/ $\mu$ s a nízkou cenou. Používá se jako převodník proudu na napětí, invertující zesilovač, neinvertující zesilovač, vyrovnávací paměť ve video technice, vstupní zesilovač pro komparační AD převodník apod. Může být použit jako náhrada tradičních operačních zesilovačů ve vysokofrekvenční oblasti, protože má výbornou impulzní odezvu [12]. Na obrázcích 1.1, 1.2 a 1.3 jsou zobrazeny tři úrovně modelů AD844.



Obrázek 1.1: Model první úrovně AD844



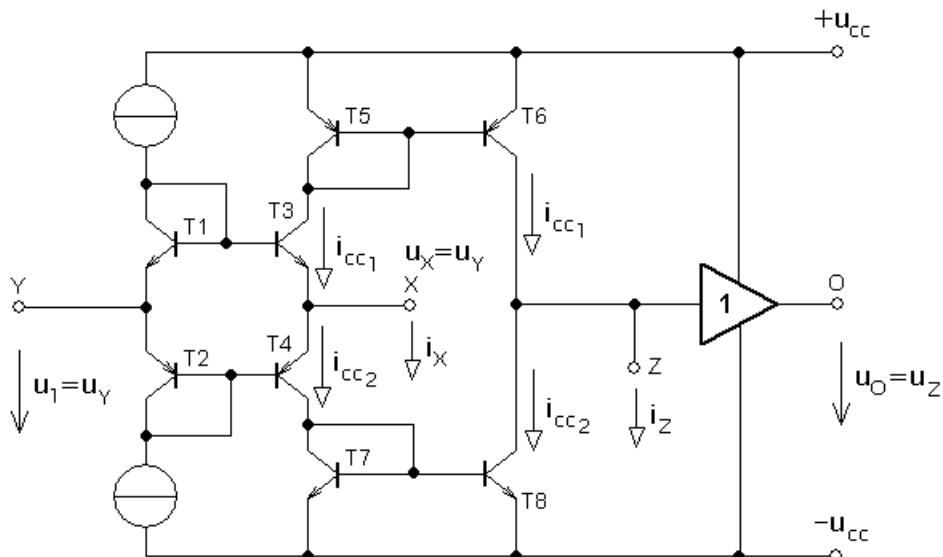
Obrázek 1.2: Model druhé úrovně AD844



Obrázek 1.3: Model třetí úrovně AD844

Model první úrovně je tvořen dvěma oddělovacími zesilovači, zdrojem proudu řízeným proudem a reprezentuje také ideální zapojení CCII+. Model druhé úrovně je charakterizován

parazitními rezistory  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  a  $R_o$ . Na třetí úrovni je model doplněn o parazitní kondenzátory  $C_x$ ,  $C_y$  a  $C_z$ . Dále existuje model čtvrté úrovně, který respektuje nelinearity modelovaného obvodu, model páté úrovně reprezentuje profesionální makro model (SPICE modely dodávané výrobcem) a šestý model je na úrovni součástek (tranzistory). Pro nejčastější aplikace, které mají charakter lineárních obvodů, se využívají modely do třetí úrovně. Na obrázku 1.4 je zobrazeno vnitřní zjednodušené zapojení transimpedančního operačního zesilovače AD844, které realizuje CCII+.



Obrázek 1.4: Vnitřní zjednodušené zapojení transimpedančního OZ AD844

Tranzistory T5 a T6 tvoří proudové zrcadlo pro kladnou polaritu, zatímco tranzistory T7 a T8 tvoří proudové zrcadlo pro zápornou polaritu napětí. Tranzistory T1, T2, T3 a T4 tvoří oddělovací zesilovač. Proudů  $i_x$  a  $i_z$  se rovnají a platí pro ně vztah:

$$i_x = i_z = i_{cc1} - i_{cc2} \quad (1.1)$$

V tabulce 1.1 jsou uvedeny parametry zesilovače AD844:

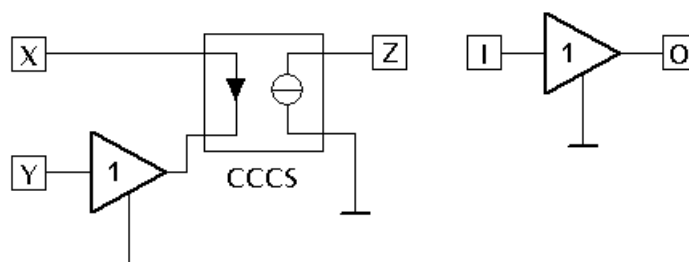
Tabulka 1.1: Parametry zesilovače AD844

|   | Hodnoty           |
|---|-------------------|
| <b>Vstupní napěťová nesymetrie</b>              | 50 - 150 $\mu$ V  |
| <b>Napájecí napětí</b>                          | 5 - 18V           |
| <b>Záporný vstupní klidový proud (svorka X)</b> | 150 - 250nA       |
| <b>Kladný vstupní klidový proud (svorka Y)</b>  | 100 - 200nA       |
| <b>Vstupní odpor (svorka X)</b>                 | 50 - 65 $\Omega$  |
| <b>Vstupní odpor (svorka Y)</b>                 | 7 - 10M $\Omega$  |
| <b>Vstupní kapacita (svorka X)</b>              | 2pF               |
| <b>Vstupní kapacita (svorka Y)</b>              | 2pF               |
| <b>Výstupní odpor (svorka Z)</b>                | 2,8 - 3M $\Omega$ |

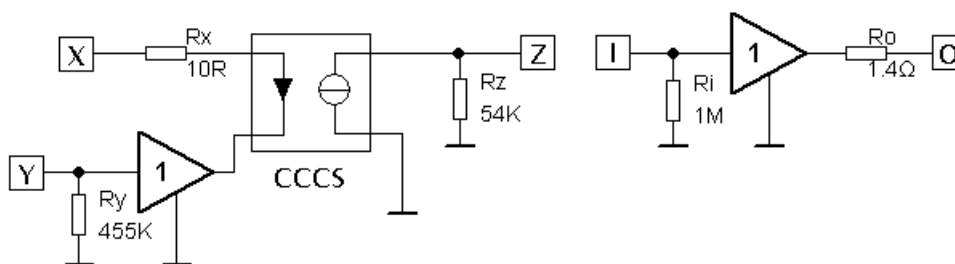
|                              |                 |
|------------------------------|-----------------|
| Výstupní kapacita (svorka Z) | 4,5pF           |
| Klidový proud                | 6,5 – 7,5mA     |
| Výstupní rychlost přeběhu    | 1200 – 2000V/μs |
| Zesílení                     | 60000           |
| Trvalý proud (vstup X)       | 5mA             |
| Krátkodobý proud (vstup X)   | 10mA            |

## 1.2 Transkonduktanční operační zesilovač OPA860/OPA861

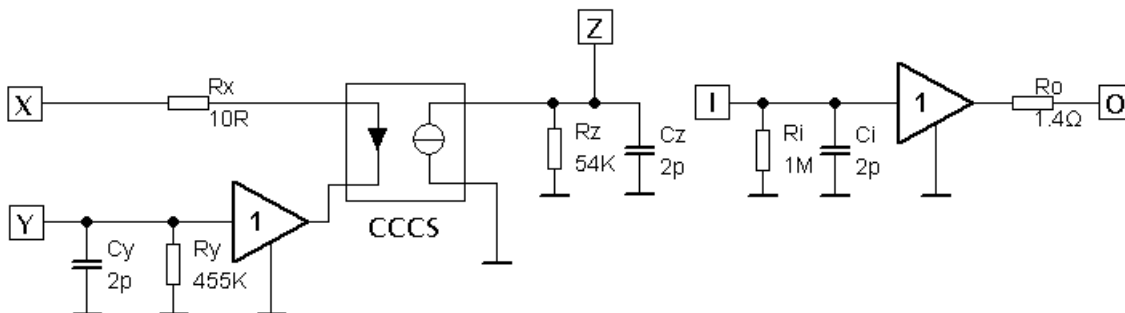
OPA860/OPA861 vyráběny společností Texas Instruments jsou monolitické operační zesilovače tvořeny transkonduktančním operačním zesilovačem, OPA860 navíc obsahuje napěťový sledovač (buffer). Šířka pásma je u OTA uváděna 80MHz a rychlost přeběhu 900V/μs. U napěťového sledovače, který je součástí OPA860 je šířka pásma až 1600MHz a rychlost přeběhu 4000V/μs. Používají se k realizaci napěťových a proudových zesilovačů, převodníků U/I, převodníků I/U, filtrů, oscilátorů apod. [13], [14]. Na obrázcích 1.5, 1.6 a 1.7 jsou zobrazeny tři úrovně modelů OPA860.



Obrázek 1.5: Model první úrovně OPA860

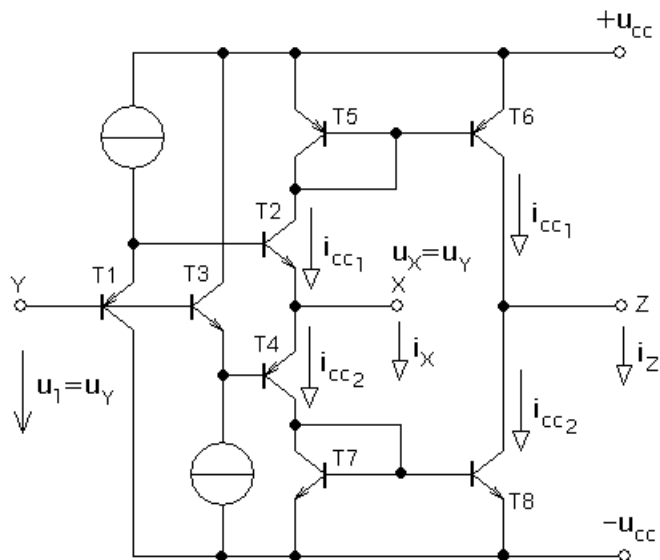


Obrázek 1.6: Model druhé úrovně OPA860



Obrázek 1.7: Model třetí úrovně OPA860

Modely oproti transimpedančnímu operačnímu zesilovači AD844 nemají oddělovací zesilovač spojen s výstupní svorkou Z. Model druhé úrovně je charakterizován parazitními rezistory  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ,  $R_i$  a  $R_o$  s rozdílnými hodnotami oproti AD844. Na třetí úrovni je model doplněn o parazitní kondenzátory  $C_y$ ,  $C_z$  a  $C_i$ . Na obrázku 1.8 je zobrazeno vnitřní zjednodušené zapojení transkonduktančního operačního zesilovače OPA861 (oproti OPA860 neobsahuje oddělovací zesilovač), které realizuje CCII+.



Obrázek 1.8: Vnitřní zjednodušené zapojení transkonduktančního OZ OPA861

Tranzistory T5 a T6 tvoří proudové zrcadlo pro kladnou polaritu, zatímco tranzistory T7 a T8 tvoří proudové zrcadlo pro zápornou polaritu napětí. T1, T2 a T3, T4 tvoří dvě komplementární dvojice tranzistorů. Proudů  $i_x$  a  $i_z$  se rovnají a opět zde platí vztah:

$$i_x = i_z = i_{cc1} - i_{cc2} \quad (1.2)$$

V tabulce 1.2 jsou uvedeny parametry zesilovače OPA860/OPA861:

Tabulka 1.2: Parametry zesilovače OPA860/OPA861

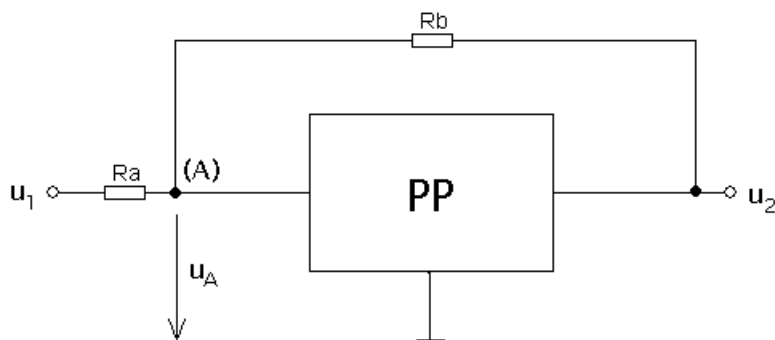
|                                  | Hodnoty              |
|----------------------------------|----------------------|
| Napájecí napětí                  | $\pm 6,5V$           |
| Vstupní napěťová nesymetrie      | 12 – 20mV            |
| Vstupní klidový proud (svorka X) | 5 – 6,6 $\mu$ A      |
| Vstupní klidový proud (svorka Y) | 100 - 140 $\mu$ A    |
| Vstupní impedance (svorka X)     | 10,5 – 13,3 $\Omega$ |
| Vstupní odpor (svorka Y)         | 455k $\Omega$        |
| Vstupní kapacita (svorka Y)      | 2,1pF                |
| Výstupní odpor (svorka Z)        | 54k $\Omega$         |
| Výstupní kapacita (svorka Z)     | 2,1pF                |

## 2 Analýza pásmových propustí

Pásmová propust neboli lineární filtr je zařízení složené z dolní a horní propusti, které propouští signál v určitém pásmu mezi dvěma mezními frekvencemi, označovanými horní a dolní frekvence a zadržuje všechny frekvence mimo toto pásmo. Pásmové propusti složené pouze s pasivních prvků, jako jsou rezistory, kondenzátory a cívky se nazývají pasivní pásmové propusti. Výhody pasivních propustí jsou cena, jednoduché řešení filtrace a není potřeba napájení pro aktivní prvky. Za nevýhody lze označit nízký přenos, který může být maximálně roven jedné a nízkou hodnotu činitele jakosti, to má za následek přetlumení obvodů. Pásmové propusti obsahující navíc aktivní prvek, jako je operační zesilovač, tranzistor, current conveyor a podobně se nazývají aktivní pásmové propusti. Jejich výhodou je mnohem vyšší přenos a vyšší činitel jakosti. Nevýhodou je nutnost napájení aktivních prvků a frekvenční rozsah závisí na šířce pásma daného aktivního prvku [1], [2].

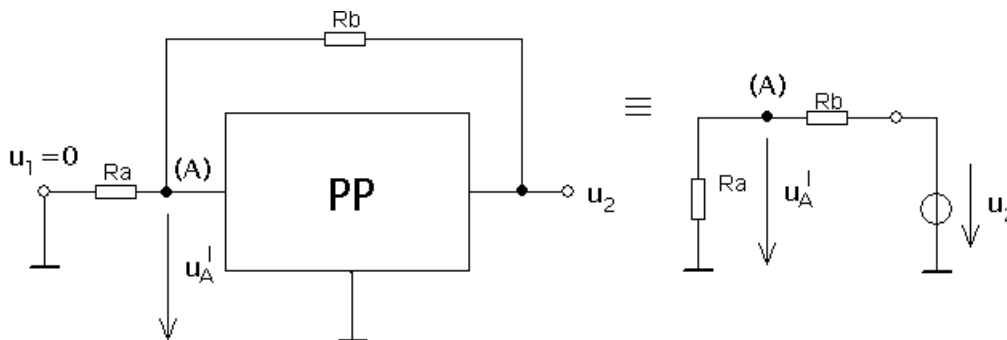
### 2.1 Pásmová propust se zpětnou vazbou

Zpětnou vazbu můžeme přesněji nazvat jako podkritická kladná paralelní napěťová zpětná vazba. Podkritická, protože nechceme zpětnovazební obvod rozkmitat, nýbrž vyžadujeme stabilitu. Obvod se skládá z pásmové propusti, dvou zpětnovazebních rezistorů  $R_a$ ,  $R_b$ , vstupní napětí je označeno  $u_1$ , výstupní napětí  $u_2$  a vstupní napětí do pásmové propusti, jež označíme  $u_A$ . Potřebujeme zjistit napětí  $u_A$  a jelikož je pásmová propust lineární obvod, platí zde princip superpozice.



Obrázek 2.1: Pásmová propust se zpětnou vazbou

V prvním kroku obvod zjednodušíme tak, že napětí  $u_1$  zkratujeme, ale necháme napětí  $u_2$ , jak si lze všimnout na obrázku 2.2. Napětí na uzlu (A) označíme  $u_A'$ . Nyní můžeme odvodit vztah pro  $u_A'$  a zároveň odvodit přenos zpětnovazebního obvodu  $\beta$ .



Obrázek 2.2: Zjednodušení obvodu pomocí superpozice

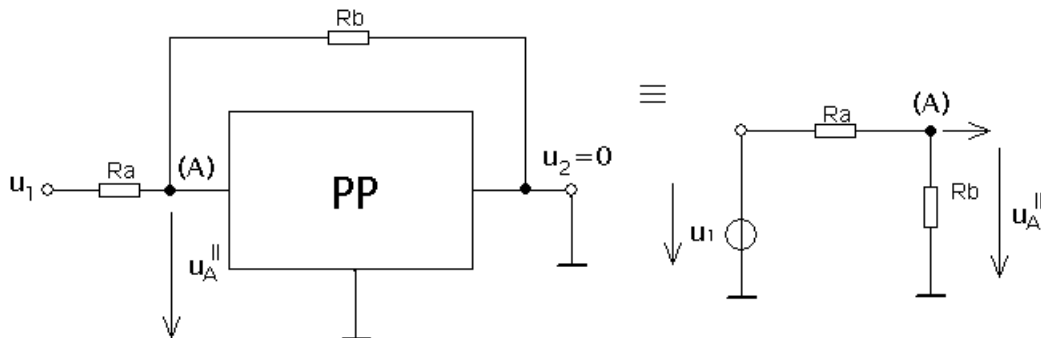
Vztah pro napětí  $u_A'$ :

$$u_A' = \frac{R_a}{R_a + R_b} \cdot u_2 \quad (2.1)$$

Vztah pro přenos zpětnovazebního obvodu  $\beta$  je:

$$\beta = \frac{R_a}{R_a + R_b} < 1 \quad (2.2)$$

V druhém kroku opět upravíme obvod z obrázku 2.1. Tentokrát zkratujeme napětí  $u_2$  a ponecháme napětí  $u_1$ . Napětí na uzlu (A) označíme  $u_A''$ .



Obrázek 2.3: Zjednodušení obvodu pomocí superpozice

Vztah pro napětí  $u_A''$ :

$$u_A'' = \frac{R_b}{R_a + R_b} \cdot u_1 \quad (2.3)$$

Vztah pro napětí  $u_A''$  vyjádřený pomocí přenosu zpětnovazebního obvodu  $\beta$ :

$$\frac{u_A''}{u_1} = \frac{R_b}{R_a + R_b} = 1 - \frac{R_a}{R_a + R_b} = 1 - \beta \quad (2.4)$$

Vztah pro výsledné  $u_A$  je:

$$u_A = u_A' + u_A'' \quad (2.5)$$

$$u_A = \frac{R_a}{R_a + R_b} \cdot u_2 + \frac{R_b}{R_a + R_b} \cdot u_1 \rightarrow u_A = \beta \cdot u_2 + (1 - \beta) \cdot u_1 \quad (2.6)$$

Obecný vztah pro výpočet přenosové funkce základní pásmové propusti PP 2. řádu [3] viz obr. 2.1:

$$F_{PP}(p) = \frac{a_1 \cdot p}{b_2 \cdot p^2 + b_1 \cdot p + b_0} = \frac{K \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot p}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot p + \omega_0^2} \quad (2.7)$$

Postup výpočtu přenosu celé pásmové propusti s podkritickou kladnou ZV:

$$F_{PP}(p) = \frac{u_2}{u_A} \rightarrow u_A = \frac{u_2}{F(p)} \quad (2.8)$$

$$u_A = \frac{u_2}{F_{PP}(p)} = \frac{1}{\frac{K \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot p}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot p + \omega_0^2}} \cdot u_2 = \frac{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot p + \omega_0^2}{K \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot p} \cdot u_2 \quad (2.9)$$

Dosadíme za  $u_A$  vztah z rovnice 2.6 a dostaneme:

$$\beta \cdot u_2 + (1 - \beta) \cdot u_1 = \frac{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} p + \omega_0^2}{K \cdot \frac{\omega_0}{Q} p} \cdot u_2 \quad (2.10)$$

$$K \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot p \cdot (1 - \beta) \cdot u_1 + K \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot p \cdot \beta \cdot u_2 = \left( p^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot p + \omega_0^2 \right) \cdot u_2 \quad (2.11)$$

$$K \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot p \cdot (1 - \beta) \cdot u_1 = \left( p^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot p + \omega_0^2 \right) \cdot u_2 - K \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot p \cdot \beta \cdot u_2 \quad (2.12)$$

$$K \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot p \cdot (1 - \beta) \cdot u_1 = \left( p^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot p + \omega_0^2 - K \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot p \cdot \beta \right) \cdot u_2 \quad (2.13)$$

$$K \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot p \cdot (1 - \beta) \cdot u_1 = \left[ p^2 + \left( \frac{\omega_0}{Q} - K \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot \beta \right) \cdot p + \omega_0^2 \right] \cdot u_2 \quad (2.14)$$

Převědeme poměr obou napětí na levou stranu rovnice a dostáváme celkový přenos pásmové propusti s podkritickou kladnou ZV:

$$F(p) = \frac{u_2}{u_1} = \frac{K \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot p \cdot (1 - \beta)}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot (1 - K \cdot \beta) \cdot p + \omega_0^2} \quad (2.15)$$

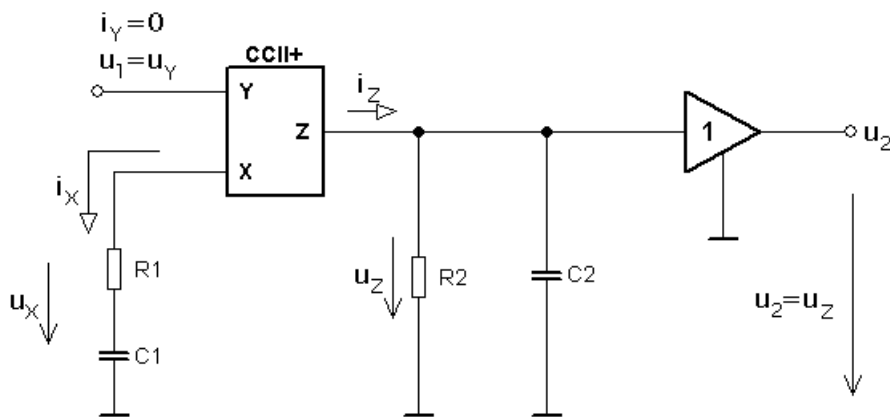
Pro zajištění stability pásmové propusti s podkritickou kladnou ZV musí být všechny koeficienty charakteristické rovnice kladné, proto volíme přenos na středním kmitočtu  $K = 1$ :

$$F(p) = \frac{\frac{\omega_0}{Q} \cdot p \cdot (1 - \beta)}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot (1 - \beta) \cdot p + \omega_0^2} = \frac{\frac{\frac{\omega_0}{Q} \cdot p}{1 - \beta}}{p^2 + \frac{\frac{\omega_0}{Q} \cdot p}{1 - \beta} + \omega_0^2} \quad (2.16)$$

Porovnáním přenosové funkce  $F(p)$  této pásmové propusti s obecným tvarem dostáváme vztah pro činitel jakosti  $Q_{ekv}$ , pomocí něho můžeme později vypočítat zpětnovazební rezistory  $R_a$  a  $R_b$ :

$$Q_{ekv} = \frac{Q}{1 - \beta} = \frac{Q}{\frac{R_b}{R_a + R_b}} = Q \cdot \frac{R_a + R_b}{R_b} = Q \cdot \left( 1 + \frac{R_a}{R_b} \right) \quad (2.17)$$

## 2.2 Pásmová propust realizovaná aktivním prvkem CCII+



Obrázek 2.4: Pásmová propust s aktivním prvkem CCII+

Na obrázku 2.4 je uvedeno zapojení pásmové propusti s aktivním prvkem CCII+ a napěťovým sledovačem pracujících v napěťovém režimu. Zapojení je modifikací pasivní pásmové propusti (Wienův článek).

Ze schématu lze odvodit následující vztahy:

$$u_x = u_y = u_1 \quad (2.18)$$

$$i_z = i_x \quad (2.19)$$

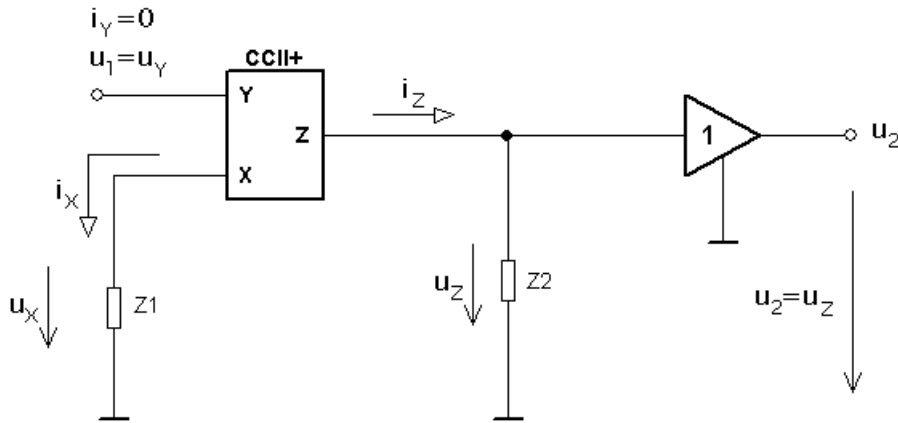
$$u_2 = u_z \quad (2.20)$$

Impedance kondenzátoru a rezistoru v operátorovém tvaru se vyjádří jako [3]:

$$Z_C(p) = \frac{1}{p \cdot C} \quad (2.21)$$

$$Z_R(p) = R \quad (2.22)$$

Pro jednodušší počítání, nahradíme sériovou kombinací rezistoru  $R_1$  a kondenzátoru  $C_1$  impedancí  $Z_1$  a paralelní kombinací rezistoru  $R_2$  a kondenzátoru  $C_2$  impedancí  $Z_2$ .



Obrázek 2.5: Pásmová propust nahrazená impedancemi

Vztahy pro impedance  $Z_1$  a  $Z_2$ :

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{p \cdot C_1} = \frac{p \cdot C_1 \cdot R_1 + 1}{p \cdot C_1} \quad (2.23)$$

$$Z_2 = \frac{R_2 \cdot \frac{1}{p \cdot C_2}}{R_2 + \frac{1}{p \cdot C_2}} = \frac{\frac{R_2}{p \cdot C_2}}{\frac{p \cdot C_2 \cdot R_2 + 1}{p \cdot C_2}} = \frac{R_2}{p \cdot C_2 \cdot R_2 + 1} \quad (2.24)$$

Potom musí platit:

$$i_x = \frac{u_x}{Z_1} = \frac{u_1}{Z_1} \quad (2.25)$$

$$i_z = i_x = \frac{u_1}{Z_1} \quad (2.26)$$

$$u_z = Z_2 \cdot i_z = Z_2 \cdot \frac{u_1}{Z_1} = \frac{Z_2}{Z_1} \cdot u_1 \quad (2.27)$$

$$u_2 = \frac{Z_2}{Z_1} \cdot u_1 \quad (2.28)$$



Obecný vztah pro výpočet přenosové funkce pásmové propusti 2. řádu:

$$F(p) = \frac{a_1 \cdot p}{b_2 \cdot p^2 + b_1 \cdot p + b_0} = \frac{K \cdot \frac{\omega_0}{Q} \cdot p}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q} \cdot p + \omega_0^2} \quad (2.29)$$

Výpočet přenosu pásmové propusti se dá vyjádřit také:

$$F(p) = \frac{u_2}{u_1} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (2.30)$$

Dosadíme vztah pro impedanci  $Z_1$  z rovnice 2.23 do jmenovatele a vztah pro impedanci  $Z_2$  z rovnice 2.24 do čitatele a dostaneme:

$$F(p) = \frac{\frac{R_2}{\frac{p \cdot C_2 \cdot R_2 + 1}{p \cdot C_1}}}{\frac{R_2}{p \cdot C_2 \cdot R_2 + 1} \cdot \frac{p \cdot C_1}{p \cdot C_1 \cdot R_1 + 1}} = \frac{p \cdot C_1 \cdot R_2}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 + p \cdot C_1 \cdot R_1 + p \cdot C_2 \cdot R_2 + 1} =$$

$$\frac{p \cdot C_1 \cdot R_2}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 + p \cdot (C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2) + 1} = \frac{p \cdot \frac{1}{C_2 \cdot R_1}}{p^2 + p \cdot \frac{(C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2)}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} + \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} \quad (2.31)$$

V posledním kroku odvozování rovnice, jsme ve jmenovateli osamostatnili parametr  $p^2$ , vydělením rovnice  $C_1 C_2 R_1 R_2$ , abychom mohli určit vztahy pro střední kmitočet  $\omega_0$ , šířku pásma  $B$ , přenos na středním kmitočtu  $K$  a činitel jakosti  $Q$ . Poslední člen ve jmenovateli odpovídá vztahu pro  $\omega_0^2$ , kde po odmocnění dostáváme vztah pro  $\omega_0$ . Druhý člen ve jmenovateli odpovídá vztahu pro  $B$ , což je poměr  $\omega_0$  a  $Q$ . Nakonec pomocí těchto vztahů určíme vztah pro  $Q$ .

Odvozování vztahu pro  $\omega_0$ :

$$\omega_0^2 = \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} \quad (2.32)$$

Odvozený vztah pro  $B$ :

$$B = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \quad (2.33)$$

Odvozování vztahu pro  $Q$ :

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \rightarrow Q = \frac{\omega_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}{C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2} = \frac{\frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}{C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2} = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \cdot (C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2)} =$$

$$\frac{C_1^2 \cdot C_2^2 \cdot R_1^2 \cdot R_2^2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \cdot \frac{1}{(C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2)^2} = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}{1} \cdot \frac{1}{(C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2)^2} = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}{(C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2)^2} = \frac{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}}{C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2} \quad (2.34)$$

Odvozování vztahu pro  $K$ :

$$K \cdot \frac{\omega_0}{Q} = \frac{1}{C_2 \cdot R_1} \rightarrow K = \frac{1}{C_2 \cdot R_1} \cdot \frac{Q}{\omega_0} = \frac{1}{C_2 \cdot R_1} \cdot \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}{C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2} = \frac{C_1 \cdot R_2}{C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2} \quad (2.35)$$

Abychom mohli zvolit hodnoty součástek, zavedeme si pomocné veličiny  $n$  a  $m$  a zvolíme:

$$R_1 = n \cdot R_2 \quad (2.36)$$

$$C_1 = m \cdot C_2 \quad (2.37)$$

$$C_2 = C \quad (2.38)$$

$$R_2 = R \quad (2.39)$$

Z toho vyplívá:

$$C_1 = m \cdot C \quad (2.40)$$

$$R_1 = n \cdot R \quad (2.41)$$

Dosadíme do vztahů pro  $\omega_0$ ,  $Q$ ,  $B$  a  $K$ :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m \cdot C \cdot C \cdot n R \cdot R}} = \frac{1}{\sqrt{n \cdot m \cdot C^2 \cdot R^2}} = \frac{1}{R \cdot C \cdot \sqrt{n \cdot m}} \quad (2.42)$$

$$Q = \frac{R \cdot C \cdot \sqrt{n \cdot m}}{m \cdot C \cdot n \cdot R + R \cdot C} = \frac{\sqrt{n \cdot m}}{n \cdot m + 1} \quad (2.43)$$

$$B = \frac{n \cdot R \cdot C + R \cdot m \cdot C}{n \cdot R \cdot R \cdot m \cdot C \cdot C} = \frac{(n+m) \cdot R \cdot C}{n \cdot m \cdot R^2 \cdot C^2} = \frac{n+m}{n \cdot m \cdot R \cdot C} \quad (2.44)$$

$$K = \frac{m \cdot C \cdot R}{m \cdot n \cdot C \cdot R + R \cdot C} = \frac{m}{n \cdot m + 1} \quad (2.45)$$

Vztah pro jaké  $m$  a  $n$  se  $Q$  rovná maximu:

$$\frac{dQ}{dn} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{n \cdot m}} \cdot m \cdot (n \cdot m + 1) - \sqrt{n \cdot m} \cdot m}{(n \cdot m + 1)^2} = \frac{\frac{m}{2 \cdot \sqrt{n \cdot m}} \cdot (n \cdot m + 1) - m \sqrt{n \cdot m}}{(n \cdot m + 1)^2} = 0 \quad (2.46)$$

$$\frac{n \cdot m + 1}{2 \cdot \sqrt{n \cdot m}} - \sqrt{n \cdot m} = 0 \quad (2.47)$$

$$\frac{1}{2 \cdot \sqrt{n \cdot m}} \cdot [(n \cdot m + 1) - 2 \cdot \sqrt{n \cdot m} \cdot \sqrt{n \cdot m}] = 0 \quad (2.48)$$

$$n \cdot m + 1 - 2 \cdot n \cdot m = 0 \quad (2.49)$$

$$1 - n \cdot m = 0 \quad (2.50)$$

$$n \cdot m = 1 \quad (2.51)$$

$$n = \frac{1}{m} \rightarrow m = \frac{1}{n} \quad (2.52)$$

Dosazením  $n$  do rovnice 2.43 dostaneme  $Q_{max}$ :

$$Q_{max} = \frac{\sqrt{\frac{m}{m+1}}}{\frac{m}{m+1}} = \frac{1}{2} \quad (2.53)$$

Pomocí vztahu pro  $K$  odvodíme vztah pro  $n$ , při  $K = 1$ :

$$K = \frac{m}{n \cdot m + 1} \quad (2.54)$$

$$1 = \frac{m}{n \cdot m + 1} \quad (2.55)$$

$$m = n \cdot m + 1 \quad (2.56)$$

$$n \cdot m = m - 1 \quad (2.57)$$

$$n = \frac{m-1}{m} \quad (2.58)$$

Do vztahu z rovnice 2.58 dosadíme vztah pro  $m$  z rovnice 2.52, tím zjistíme hodnotu  $n$ :

$$n = \frac{\frac{1}{\frac{1}{n}} - 1}{\frac{1}{n}} \quad (2.59)$$

$$n = n \cdot \left(\frac{1}{n} - 1\right) \quad (2.60)$$

$$1 = \frac{1}{n} - 1 \quad (2.61)$$

$$2 = \frac{1}{n} \quad (2.62)$$

$$n = \frac{1}{2} \quad (2.63)$$

Nyní do rovnice 2.52 dosadíme  $n$  z rovnice 2.63 a zjistíme hodnotu  $m$ :

$$m = \frac{1}{\frac{1}{2}} = 2 \quad (2.64)$$

### 2.2.1 Návrh součástek pro pásmovou propust

Po dosazení hodnot  $m$  z rovnice 2.64 a  $n$  z rovnice 2.63 do zvolených rovnic 2.40 a 2.41 zjistíme, že rezistor  $R_1$  je polovinou rezistoru  $R_2$  ( $R$ ) a kondenzátor  $C_1$  je dvojnásobně větší jako kondenzátor  $C_2$  ( $C$ ):

$$R_1 = \frac{R}{2} \quad (2.65)$$

$$C_1 = 2 \cdot C \quad (2.66)$$

Pro pásmovou propust si zvolíme kmitočet  $f_0$  a kondenzátor  $C$ . Tyto hodnoty dosadíme do vztahu pro  $f_0$  a vypočítáme hodnotu rezistoru  $R$ .

Zvolený kmitočet  $f_0$ :

$$f_0 = 10\text{kHz} \quad (2.67)$$

Zvolený kondenzátor  $C$ :

$$C = 1\text{n} \quad (2.68)$$

Ze vztahu pro kmitočet  $f_0$  odvodíme vztah pro rezistor  $R$ :

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \rightarrow R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C} \quad (2.69)$$

Vypočítáme hodnotu rezistoru  $R$  pro kmitočet  $f_0 = 10\text{kHz}$  a kondenzátor  $C = 1\text{n}$ :

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10^4 \cdot 10^{-9}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot 10^5 = 0,159 \cdot 10^5 = 15,9\text{k}\Omega \quad (2.70)$$

Nyní můžeme určit hodnoty součástek pásmové propusti:

$$R_1 = \frac{R}{2} = \frac{15,9}{2} = 7,95\text{k}\Omega \quad (2.71)$$

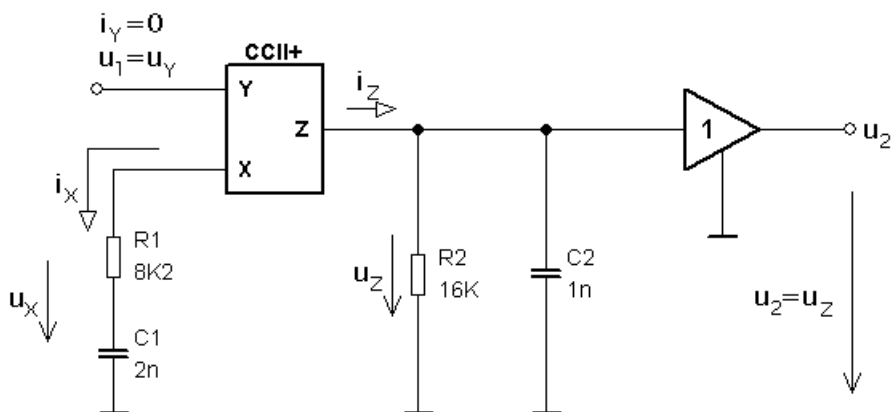
$$R_2 = R = 15,9\text{k}\Omega \quad (2.72)$$

$$C_1 = 2 \cdot C = 2 \cdot 1 = 2\text{n} \quad (2.73)$$

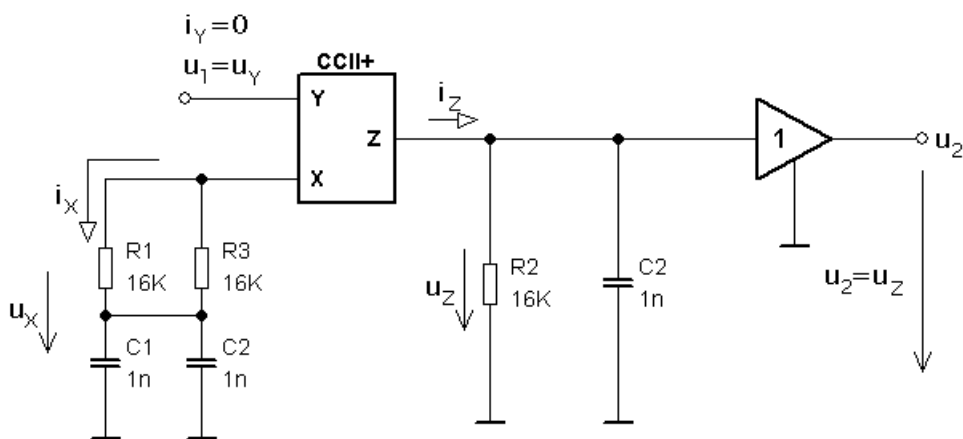
$$C_2 = C = 1\text{n} \quad (2.74)$$

Jelikož hodnoty rezistorů neodpovídají hodnotám odporové řady, vybereme ty, které se jim nejvíce přiblíží. Vybíráme z odporové řady E24. Nejbližší rezistoru  $R_1$  odpovídá hodnota 8k2 a rezistoru  $R_2$  odpovídá hodnota 16k. Můžeme si všimnout, že vypočítaná hodnota rezistoru  $R_1$  se liší

od zvolené hodnoty z odporové řady o  $250\Omega$ , zatímco vypočítaná hodnota rezistoru  $R_2$  se liší od zvolené hodnoty z odporové řady pouze o  $100\Omega$ . Nabízí se zde možnost nahradit rezistor  $R_1$  dvěma paralelně zapojenými rezistory, přičemž oba budou mít odpor  $16k\Omega$ , abychom zredukovali rozdílnost vypočítaných a naměřených výsledků. Na přesnosti použitých rezistorů a kondenzátorů je závislá přesnost středního kmitočtu  $f_0$ . Obě varianty zapojení jsou zobrazeny na obrázku č. 2.6 a na obrázku č. 2.7.



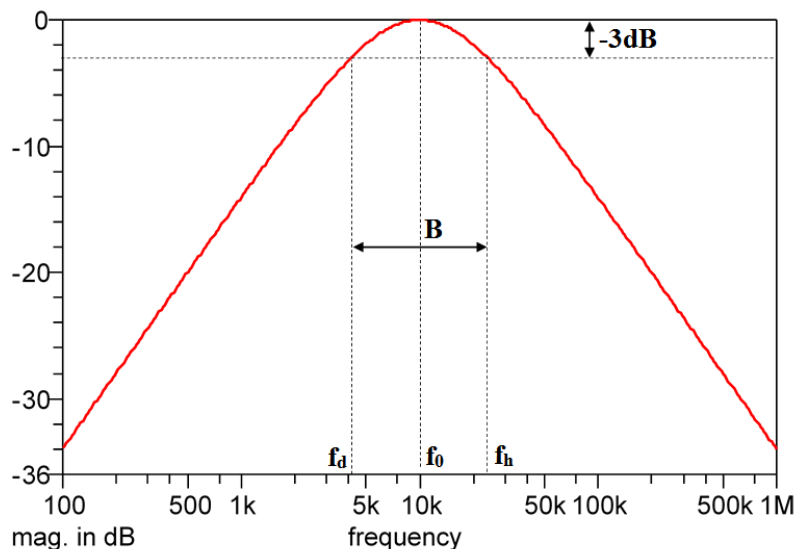
Obrázek 2.6: 1. varianta zapojení pásmové propusti



Obrázek 2.7: 2. varianta zapojení pásmové propusti

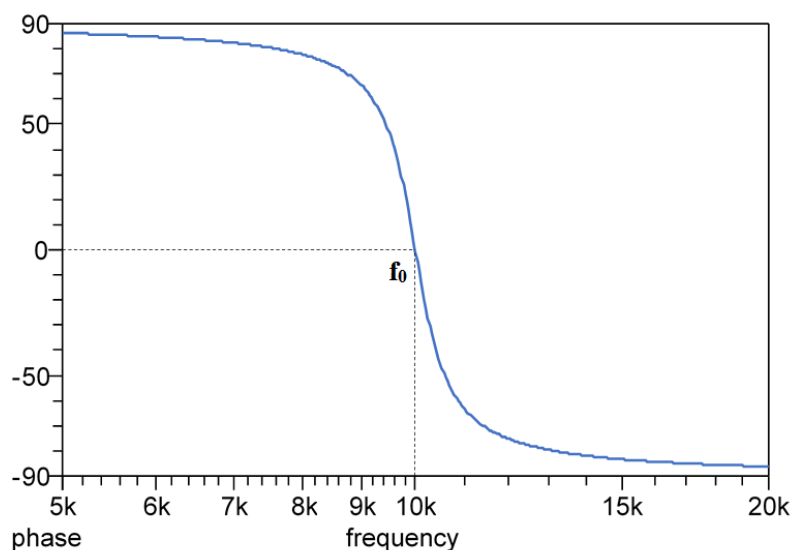
### 2.2.2 Frekvenční charakteristiky zapojení

Pro simulaci zapojení byl použit program SNAP. Na obrázku 2.8 je vyobrazena amplitudová frekvenční charakteristika a na obrázku 2.9 je zobrazena fázová frekvenční charakteristika.



Obrázek 2.8: Amplitudová frekvenční charakteristika pásmové propusti

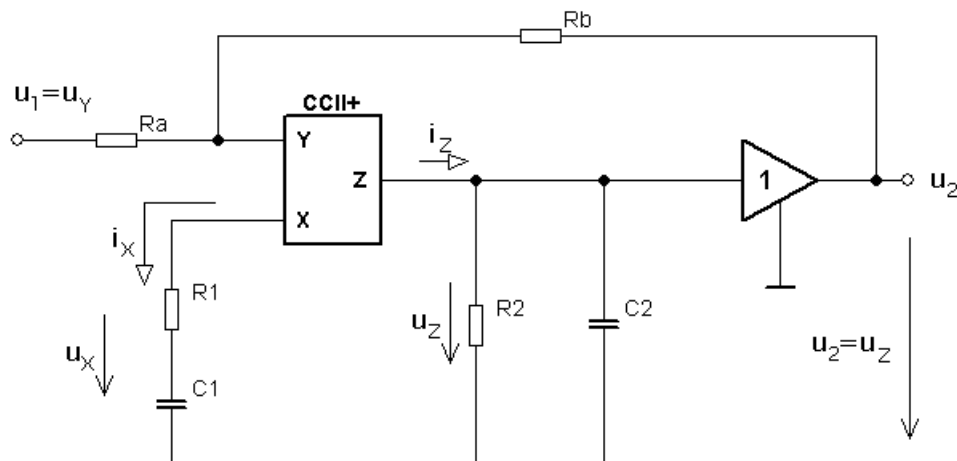
Z charakteristiky si můžeme všimnout, že dolní frekvence  $f_a$  se přibližně rovná 4,1kHz a horní frekvence  $f_h$  je rovna přibližně 24,1kHz. Šířka pásma neboli frekvenční pásmo, které pásmová propust efektivně propouští má tedy hodnotu 20kHz.



Obrázek 2.9: Fázová frekvenční charakteristika pásmové propusti

### 2.3 Pásmová propust realizovaná CCII+ s podkritickou kladnou zpětnou vazbou

Základní pásmová propust z obr. 2.4 je doplněná dvěma zpětnovazebními rezistory  $R_a$  a  $R_b$ , které vytvářejí podkritickou kladnou zpětnou vazbu. Analýzou zapojení odvodíme vztahy pro přenosovou funkci  $F(p)$ ,  $Q_{ekv}$ ,  $B$  a  $\omega_0$ .



Obrázek 2.10: Pásmová propust realizovaná aktivním prvkem CCII+ se zpětnou vazbou

Ze schématu lze odvodit následující vztahy:

$$u_x = u_y = u_1 \quad (2.75)$$

$$i_z = i_x \quad (2.76)$$

$$u_2 = u_z \quad (2.77)$$

Vztah pro  $Q_{ekv}$  použijeme stejný z rovnice 2.17 a jelikož  $Q_{max} = Q$  dosadíme hodnotu z rovnice 2.53:

$$Q_{ekv} = Q \cdot \left(1 + \frac{R_a}{R_b}\right) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_a}{R_b}\right) \quad (2.78)$$

Vztah přenosové funkce bude tedy:

$$F(p) = \frac{\frac{\omega_0}{Q \cdot \left(1 + \frac{R_a}{R_b}\right)} p}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q \cdot \left(1 + \frac{R_a}{R_b}\right)} p + \omega_0^2} \quad (2.79)$$

Vztahu pro  $\omega_0$  odpovídá stejný vztah jako v předchozí pásmové propusti. Dosazením pomocných veličin  $m = 2$  a  $n = 1/2$  z rovnic 2.63 a 2.64 dostáváme:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} = \frac{1}{R \cdot C \cdot \sqrt{n \cdot m}} = \frac{1}{R \cdot C} \quad (2.80)$$

Odvození vztahu pro  $B$ :

$$B = \frac{\omega_0}{Q_{ekv}} = \frac{\omega_0}{Q \cdot \left(1 + \frac{R_a}{R_b}\right)} = \frac{2 \cdot \omega_0}{1 + \frac{R_a}{R_b}} \quad (2.81)$$

### 2.3.1 Návrh součástek pro pásmovou propust se zpětnou vazbou

Hodnoty součástek  $R_1, R_2, C_1, C_2$  a frekvenci  $f_0$  zvolíme stejné z předchozí pásmové propusti (podkapitola 2.2.1). Abychom mohli vykreslit frekvenční charakteristiky, potřebujeme vypočítat hodnoty rezistorů  $R_a$  a  $R_b$ .

Vypočítané hodnoty součástek  $R_1, R_2, C_1, C_2$ :

$$R_1 = \frac{R}{2} = \frac{15,9}{2} = 7,95k\Omega \quad (2.82)$$

$$R_2 = R = 15,9k\Omega \quad (2.83)$$

$$C_1 = 2 \cdot C = 2 \cdot 1 = 2n \quad (2.84)$$

$$C_2 = C = 1n \quad (2.85)$$

Pro výpočet rezistorů  $R_a$  a  $R_b$  si zvolíme  $Q_{ekv} = 10$ :

$$Q_{ekv} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_a}{R_b}\right) \quad (2.86)$$

$$10 = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_a}{R_b}\right) \quad (2.87)$$

$$10 = \frac{1}{2} + \frac{R_a}{2 \cdot R_b} \quad (2.88)$$

$$10 - \frac{1}{2} = \frac{R_a}{2 \cdot R_b} \quad (2.89)$$

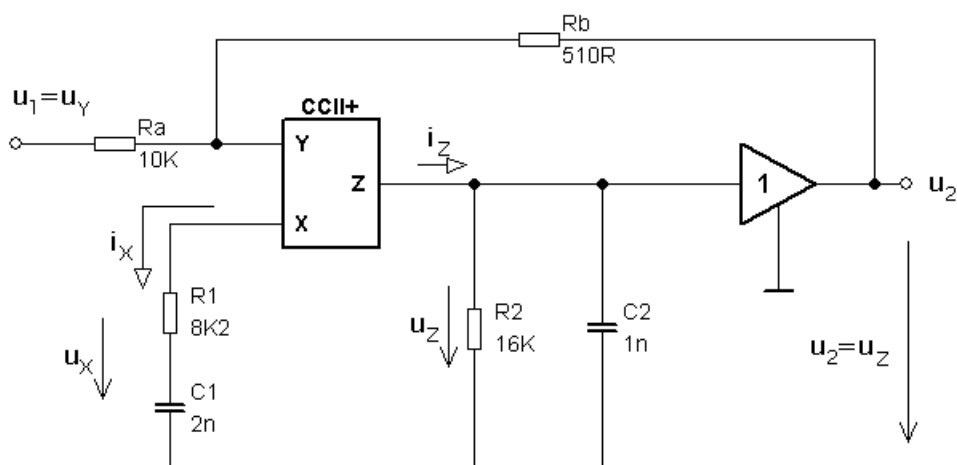
$$2 \cdot \left(10 - \frac{1}{2}\right) = \frac{R_a}{R_b} \quad (2.90)$$

$$\frac{R_a}{R_b} = 19 \quad (2.91)$$

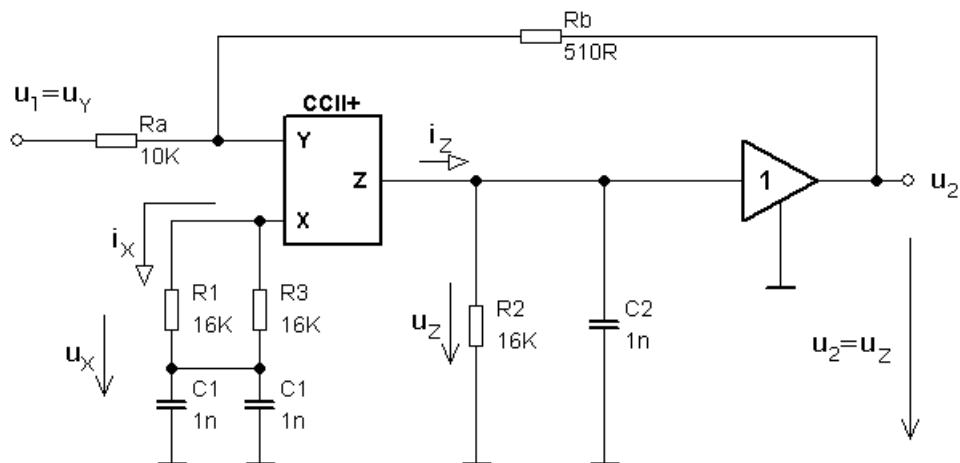
Výsledná hodnota poměru rezistorů  $R_a$  a  $R_b = 19$ , což znamená, že rezistor  $R_a$  musí být devatenáctkrát větší, než rezistor  $R_b$ . Zvolíme  $R_a = 10k\Omega$  a dopočítáme rezistor  $R_b$ :

$$R_b = \frac{R_a}{19} = \frac{10 \cdot 10^3}{19} = 526,3\Omega \quad (2.92)$$

Rezistor takové hodnoty se nevyskytuje v odporové řadě E24 a proto zvolíme nejbližší hodnotu, která mu odpovídá  $R_b = 510R$ . Rezistory  $R_1$  a  $R_2$  budou také upraveny do odporové řady E24 stejně jako v podkapitole 3.2.1. Opět uvedeme pro ukázkou 2 možné varianty zapojení s navrženými součástkami. U první varianty zapojení na obrázku 2.11 je zvolen rezistor  $R_1 = 8k2$ , kdežto ve druhé variantě (obrázek 2.12) se rezistor  $R_1$  nahradil dvěma paralelně zapojenými rezistory, přičemž oba budou mít odpor  $16k\Omega$ .



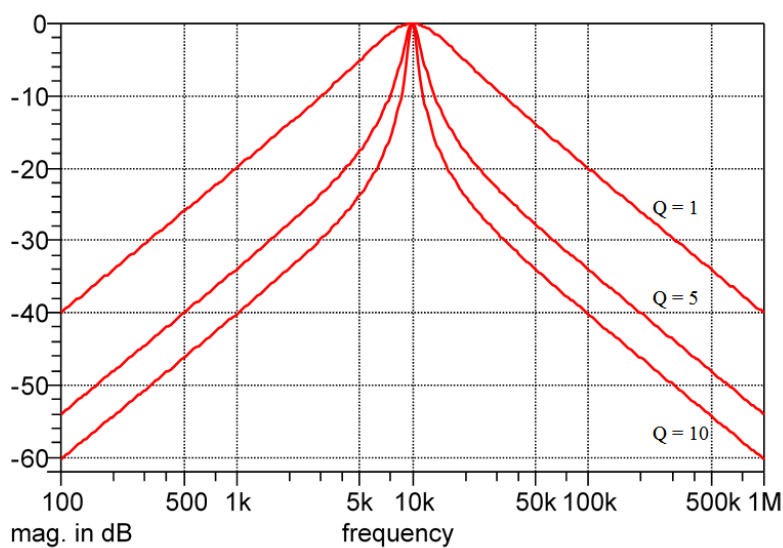
Obrázek 2.11: 1. varianta zapojení



Obrázek 2.12: 2. varianta zapojení

### 2.3.2 Frekvenční charakteristiky zapojení

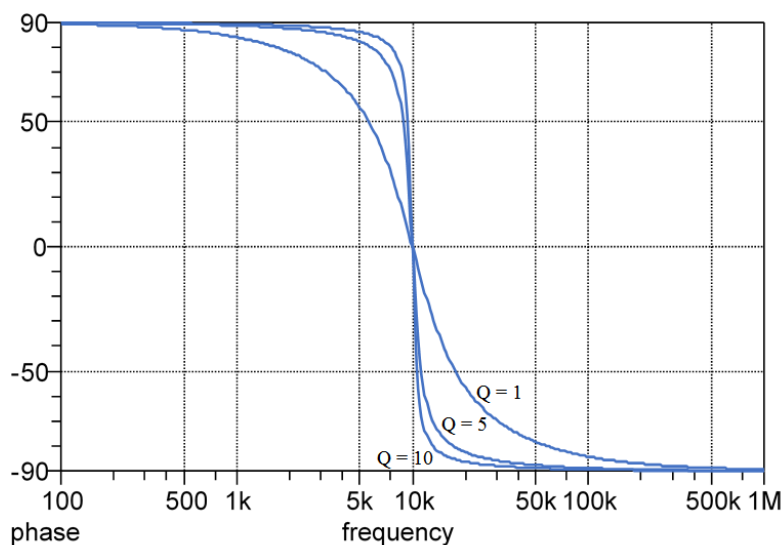
Simulace byla provedena s přesnými vypočítanými hodnotami součástek. Na obrázku 2.13 jsou zobrazeny amplitudové frekvenční charakteristiky pro tři hodnoty činitele jakosti  $Q = 1; 5$  a  $10$ . Fázové frekvenční charakteristiky pro stejné hodnoty  $Q$  jsou na obrázku 2.14.



Obrázek 2.13: Amplitudové frekvenční charakteristiky pásmové propusti

Z charakteristiky si můžeme všimnout, že pro  $Q = 10$  se dolní frekvence  $f_d$  přibližně rovná  $9,5\text{kHz}$  a horní frekvence  $f_h$  je rovna přibližně  $10,5\text{kHz}$ . Šířka pásma neboli frekvenční pásmo, které pásmová propust efektivně propouští má tedy hodnotu  $1\text{kHz}$ . Porovnáním frekvenčních charakteristik zjistíme, že s vyšší hodnotou činitele jakosti je amplitudová frekvenční charakteristika strmější a tedy propouští menší frekvenční pásmo.

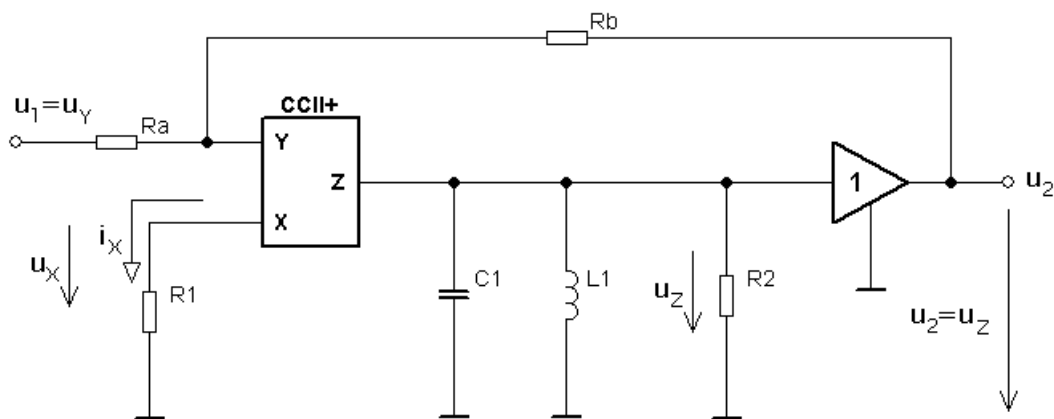




Obrázek 2.14: Fázové frekvenční charakteristiky pásmové propusti

## 2.4 RLC modifikovaná pásmová propust s podkritickou kladnou zpětnou vazbou

Zapojení je modifikací předcházejícího zapojení pásmové propusti. Obvod je složen z aktivního prvku CCII+, dvou zpětnovazebních rezistorů  $R_a$ ,  $R_b$ , na svorce X z rezistoru  $R_1$ , do svorky Z je zapojeno paralelní zapojení rezistoru  $R_2$ , kondenzátoru  $C_1$  a cívky  $L_1$  (paralelní rezonanční obvod) a oddělovací zesilovač.



Obrázek 2.15: RLC modifikovaná pásmová propust se zpětnou vazbou

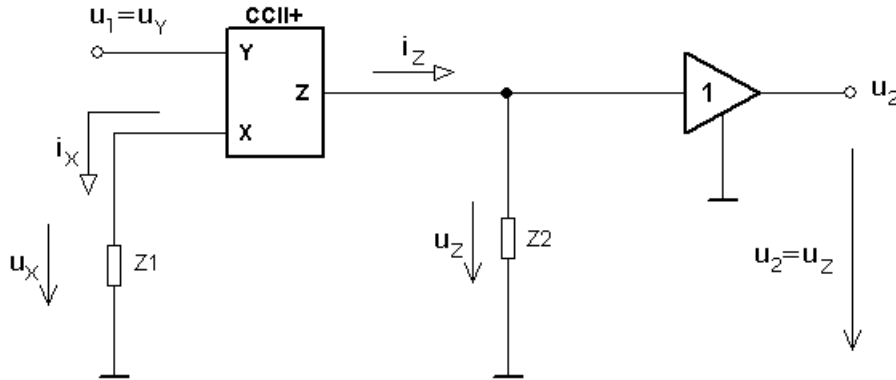
Ze schématu lze odvodit následující vztahy:

$$u_x = u_y = u_1 \quad (2.93)$$

$$i_z = i_x \quad (2.94)$$

$$u_2 = u_z \quad (2.95)$$

Pro jednodušší počítání, nahradíme rezistor  $R_1$  impedancí  $Z_1$  a paralelní kombinaci rezistoru  $R_2$ , cívky  $L_1$  a kondenzátoru  $C_1$  impedancí  $Z_2$  a nebudeme uvažovat rezistory  $R_a$  a  $R_b$ .



Obrázek 2.16: RLC zapojení nahrazeno impedancemi

Z rovnic 2.21 a 2.22 víme, čemu se rovná operátorový tvar impedance rezistoru a kondenzátoru. Nyní vyjádříme operátorový tvar impedance cívky [3]:

$$Z_{L(p)} = p \cdot L \quad (2.96)$$

Vztahy pro impedance  $Z_1$  a  $Z_2$ :

$$Z_1 = R_1 \quad (2.97)$$

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{p \cdot L_1} + p \cdot C_1 \rightarrow Z_2 = \frac{p \cdot R_2 \cdot L_1}{p^2 \cdot R_2 \cdot L_1 \cdot C_1 + p \cdot L_1 + R_2} \quad (2.98)$$

Potom musí platit:

$$i_x = \frac{u_x}{Z_1} = \frac{u_1}{Z_1} \quad (2.99)$$

$$i_z = i_x = \frac{u_1}{Z_1} \quad (2.100)$$

$$u_z = Z_2 \cdot i_z = Z_2 \cdot \frac{u_1}{Z_1} = \frac{Z_2}{Z_1} \cdot u_1 \quad (2.101)$$

$$u_2 = \frac{Z_2}{Z_1} \cdot u_1 \quad (2.102)$$

$$F(p) = \frac{u_2}{u_1} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (2.103)$$

Odvození vztahu pro přenosovou funkci:

$$F(p) = \frac{\frac{p \cdot R_2 \cdot L_1}{p^2 \cdot R_2 \cdot L_1 \cdot C_1 + p \cdot L_1 + R_2}}{R_1} = \frac{p \cdot R_2 \cdot L_1}{p^2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot L_1 \cdot C_1 + p \cdot R_1 \cdot L_1 + R_1 \cdot R_2} = \frac{p \cdot \frac{R_2 \cdot L_1}{R_1 \cdot R_2 \cdot L_1 \cdot C_1}}{p^2 + p \cdot \frac{R_1 \cdot L_1}{R_1 \cdot R_2 \cdot L_1 \cdot C_1} + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot L_1 \cdot C_1}} = \frac{p \cdot \frac{1}{R_1 \cdot C_1}}{p^2 + p \cdot \frac{1}{R_2 \cdot C_1} + \frac{1}{L_1 \cdot C_1}} \quad (2.104)$$

Odvozování vztahu pro  $\omega_0$ :

$$\omega_0^2 = \frac{1}{C_1 \cdot L_1} \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot L_1}} \quad (2.105)$$

Odvozený vztah pro  $B$ :

$$B = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{1}{R_2 \cdot C_1} \quad (2.106)$$

Odvození vztahu pro  $Q$ :

$$Q = \frac{\omega_0}{B} = \frac{\frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot L_1}}}{\frac{1}{R_2 \cdot C_1}} = \frac{R_2 \cdot C_1}{\sqrt{C_1 \cdot L_1}} = \frac{\sqrt{R_2 \cdot C_1} \cdot \sqrt{R_2 \cdot C_1}}{\sqrt{C_1 \cdot L_1}} = \sqrt{\frac{R_2^2 \cdot C_1^2}{C_1 \cdot L_1}} = R_2 \cdot \sqrt{\frac{C_1}{L_1}} \quad (2.107)$$

Odvození vztahu pro  $K$ :

$$K \cdot \frac{\omega_0}{Q} = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \rightarrow K = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \cdot \frac{Q}{\omega_0} = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} \cdot \frac{R_2 \cdot C_1}{1} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.108)$$

#### 2.4.1 Návrh součástek pro RLC modifikovanou propust

Pro pásmovou propust si zvolíme opět kmitočet  $f_0 = 10 \text{ kHz}$  a kondenzátor  $C_1 = 10 \text{ n}$ . Tyto hodnoty dosadíme do vztahu pro  $\omega_0$  a vypočítáme hodnotu cívky  $L_1$ :

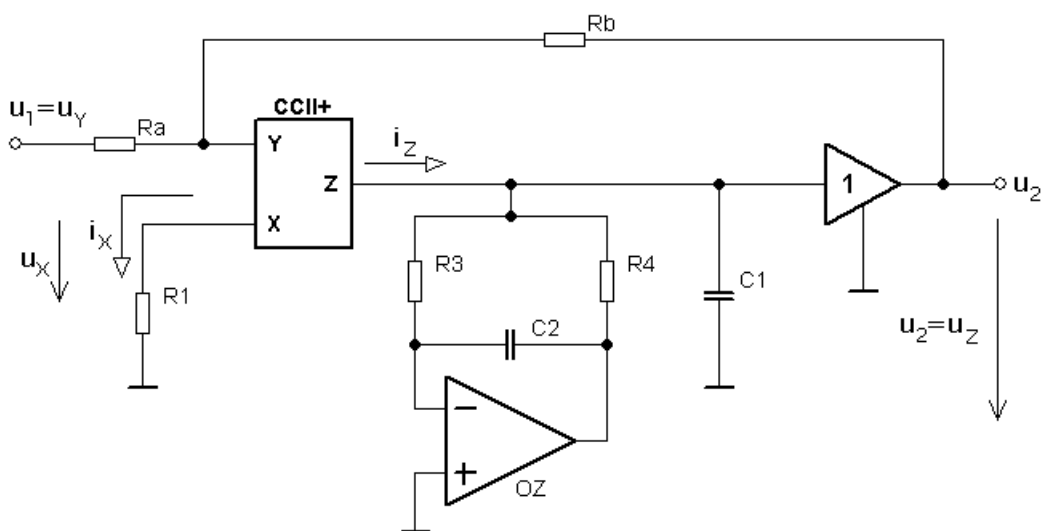
$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot L_1}} \rightarrow L_1 = \frac{1}{C_1 \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_0)^2} \quad (2.109)$$

$$L_1 = \frac{1}{1 \cdot 10^{-8} \cdot 2^2 \cdot \pi^2 \cdot 10^8} = 25,36 \text{ mH} \quad (2.110)$$

Dosažením do vzorce pro  $Q$  vypočítáme hodnotu rezistoru  $R_2$ , při zvolení  $Q = 1$ :

$$R_2 = Q \cdot \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = 1 \cdot \sqrt{\frac{25,36 \cdot 10^{-3}}{10^{-8}}} = 1 \cdot \sqrt{25,36 \cdot 10^5} = 1592,5 \Omega \quad (2.111)$$

Jelikož jsou cívky objemné, drahé a obtížně integrovatelné součástky hlavně pro nižší kmitočty, nahradíme cívku  $L_1$  a rezistor  $R_2$  syntetickým induktorem s paralelním ztrátovým rezistorem složeným ze dvou rezistorů  $R_3$  a  $R_4$ , kondenzátoru  $C_2$  a operačního zesilovače  $OZ$  [4].



Obrázek 2.17: Nahrazení cívky a rezistoru syntetickým induktorem

Pro syntetický induktor platí:

$$L_1 = R_3 \cdot R_4 \cdot C_2 \quad (2.112)$$

$$R_2 = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} \quad (2.113)$$

Zvolením rezistorů  $R_3 = R_4 = R$  dostáváme:

$$R_2 = \frac{R}{2} \quad (2.114)$$

$$L_1 = R^2 \cdot C_2 \quad (2.115)$$

Vypočítáme hodnotu rezistoru  $R$ :

$$R = 2 \cdot R_2 = 2 \cdot 1592,5 = 3185\Omega \quad (2.116)$$

Vypočítáme hodnotu kondenzátoru  $C_2$ :

$$C_2 = \frac{L_1}{R^2} = \frac{25,36 \cdot 10^{-3}}{3185^2} = 2,5nF \quad (2.117)$$

Pro  $K = 1$  platí  $R_1 = R_2 = \frac{R}{2} = 1592,5\Omega$ .

Pro výpočet rezistorů  $R_a$  a  $R_b$  si zvolíme  $Q_{ekv} = 10$  při  $Q = 1$ :

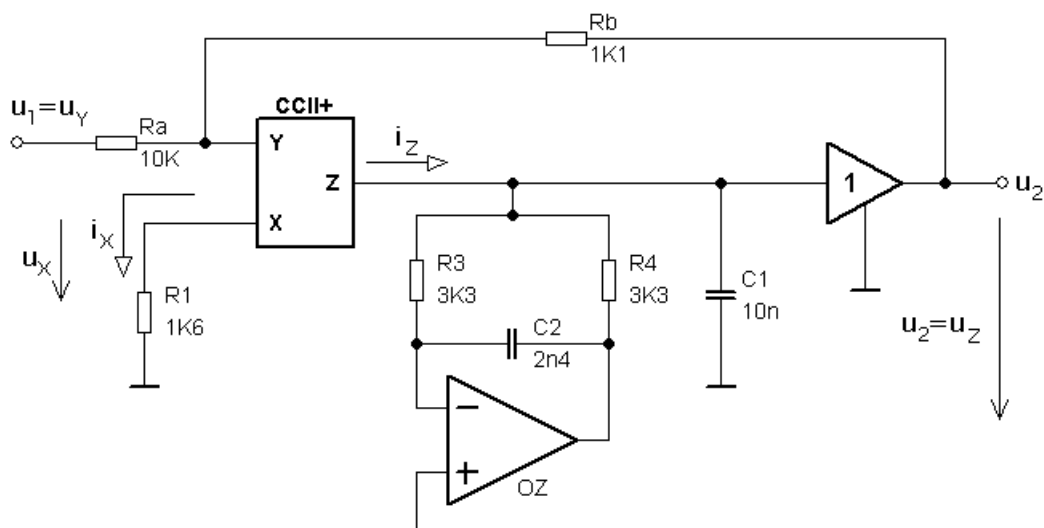
$$Q_{ekv} = Q \cdot \left(1 + \frac{R_a}{R_b}\right) \quad (2.118)$$

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{Q_{ekv}}{Q} - 1 = \frac{10}{1} - 1 = 9 \quad (2.119)$$

Výsledná hodnota poměru rezistorů  $R_a$  a  $R_b = 9$ , což znamená, že rezistor  $R_a$  musí být devětkrát větší, než rezistor  $R_b$ . Zvolíme  $R_a = 10k\Omega$  a dopočítáme rezistor  $R_b$ :

$$R_b = \frac{R_a}{9} = \frac{10 \cdot 10^3}{9} = 1,11k\Omega \quad (2.120)$$

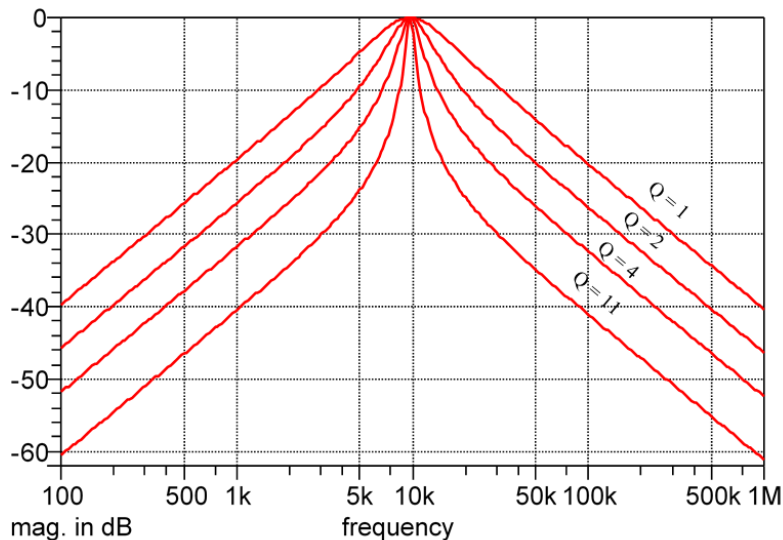
Součástky  $C_2$ ,  $R_b$ ,  $R_1$ ,  $R_3$  a  $R_4$  zvolíme podle odporové řady E24 následovně  $R_3 = R_4 = 3k3$ . Rezistor  $R_1$  můžeme zvolit 1k6 nebo nahradit dvěma paralelně zapojenými rezistory, přičemž oba budou mít odpor 3k3. Rezistor  $R_b$  volíme 1k1 a kondenzátor  $C_2$  zvolíme 2n4.



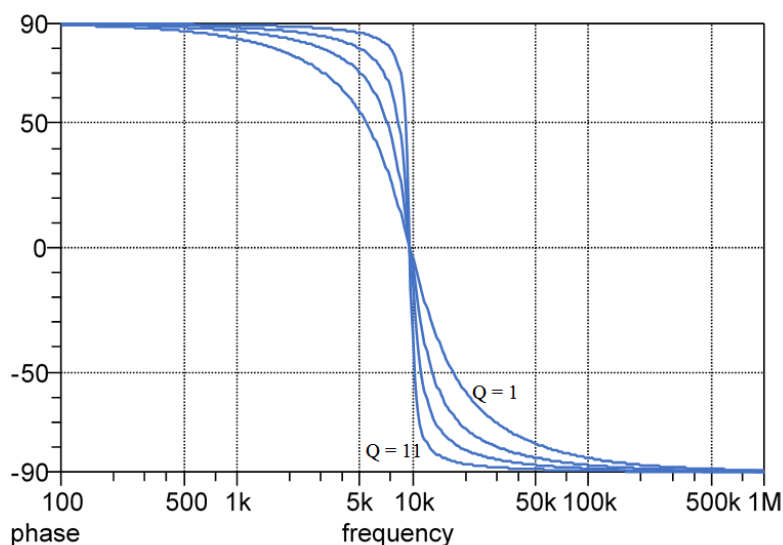
Obrázek 2.18: Zapojení pásmové propusti s navrhnutými součástkami

### 2.4.2 Frekvenční charakteristiky zapojení

Simulace byla provedena se zvolenými hodnotami součástek podle odporové řady E24. Na obrázku 2.19 jsou zobrazeny amplitudové frekvenční charakteristiky pro čtyři hodnoty činitele jakosti  $Q = 1; 2; 4$  a  $11$ . Fázové frekvenční charakteristiky pro stejné hodnoty  $Q$  jsou na obrázku 2.20.



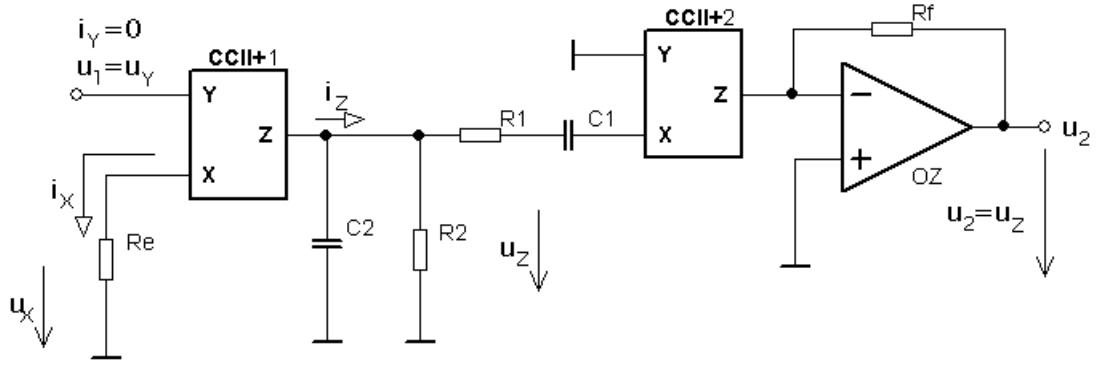
Obrázek 2.19: Amplitudové frekvenční charakteristiky pásmové propusti



Obrázek 2.20: Fázové frekvenční charakteristiky pásmové propusti

## 2.5 Pásmová propust realizovaná 3 aktivními prvky

Obvod je tvořen dvěma proudovými konvejory CCII+ a operačním zesilovačem OZ. První realizuje převodník napětí proud, druhý realizuje proudový zesilovač a operační zesilovač OZ realizuje převodník proud napětí. Wienův článek ve funkci pásmové propusti pracuje v proudovém režimu.



Obrázek 2.21: Pásmová propust realizovaná 3 aktivními prvky

Ze schématu lze odvodit následující vztahy:

$$u_x = u_y = u_1 \quad (2.121)$$

$$i_z = i_x \quad (2.122)$$

$$u_2 = u_z \quad (2.123)$$

K odvození přenosové funkce použijeme program pro symbolickou analýzu SNAP:

$$F(p) = \frac{p \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot R_b}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_a + p \cdot (C_2 \cdot R_2 \cdot R_a + C_1 \cdot R_1 \cdot R_a + C_1 \cdot R_2 \cdot R_a) + R_a} = \frac{p \cdot \frac{R_b}{C_2 \cdot R_1 \cdot R_a}}{p^2 + p \cdot \frac{R_a \cdot (C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2) + R_a}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_a}} = \frac{p \cdot \frac{R_b}{C_2 \cdot R_1 \cdot R_a}}{p^2 + p \cdot \frac{C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} + \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} \quad (2.124)$$

Porovnáním přenosové funkce vygenerované SNAPem a obecného tvaru přenosu pásmové propusti odvodíme vztahy pro  $\omega_0$ ,  $B$ ,  $Q$  a  $K$ :

$$\omega_0^2 = \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} \quad (2.125)$$

$$B = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \quad (2.126)$$

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}{C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2} = \frac{\frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}{C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2} = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \cdot (C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2)} = \frac{C_1^2 \cdot C_2^2 \cdot R_1^2 \cdot R_2^2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \cdot \frac{1}{(C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2)^2} = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}{1} \cdot \frac{1}{(C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2)^2} = \frac{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}}{C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2} \quad (2.127)$$

$$K = \frac{\frac{R_b}{C_2 \cdot R_1 \cdot R_a}}{\frac{C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} = \frac{R_b}{C_2 \cdot R_1 \cdot R_a} \cdot \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}{C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2} = \frac{R_b}{R_a} \cdot \frac{C_1 \cdot R_2}{C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2} = \frac{R_b}{R_a} \cdot \frac{C_1 \cdot R_2}{C_1 \cdot R_2 \cdot \left( \frac{C_2 \cdot R_2}{C_1 \cdot R_2} + \frac{C_1 \cdot R_1}{C_1 \cdot R_2} + 1 \right)} = \frac{R_b}{R_a} \cdot \frac{1}{\frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2} + 1} \quad (2.128)$$

### 2.5.1 Návrh součástek PP realizované 3 aktivními prvky

Pro pásmovou propust si zvolíme opět kmitočet  $f_0 = 10\text{kHz}$ , stejné hodnoty součástek  $C_1 = C_2 = C$  a  $R_1 = R_2 = R$ . Hodnoty použijeme z podkapitoly 2.2.1:

$$C = 1n \quad (2.129)$$

$$R = 15,9k\Omega \quad (2.130)$$

Vypočítáme hodnotu  $Q$ :

$$Q = \frac{\sqrt{10^{-9} \cdot 10^{-9} \cdot 15,9 \cdot 10^3 \cdot 15,9 \cdot 10^3}}{10^{-9} \cdot 15,9 \cdot 10^3 + 10^{-9} \cdot 15,9 \cdot 10^3 + 10^{-9} \cdot 15,9 \cdot 10^3} = \frac{1}{3} \quad (2.131)$$

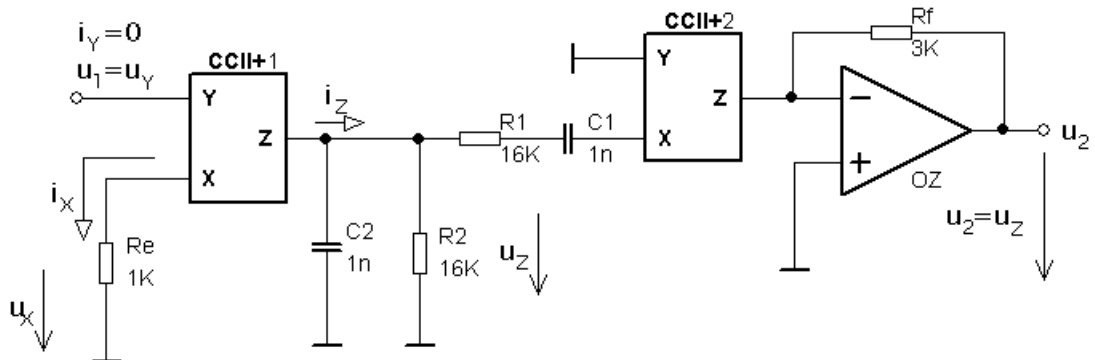
Zbývá vypočítat hodnoty rezistorů  $R_e$  a  $R_f$ , které zjistíme, když dosadíme vypočítané hodnoty  $C$  a  $R$  do vztahu pro  $K = 1$ :

$$K = \frac{R_f}{R_e} \cdot \frac{1}{\frac{10^{-9}}{10^{-9} + \frac{15,9 \cdot 10^3}{15,9 \cdot 10^3} + 1}} = \frac{R_f}{R_e} \cdot \frac{1}{1+1+1} = \frac{R_f}{R_e} \cdot \frac{1}{3} \quad (2.132)$$

$$3 \cdot K = \frac{R_f}{R_e} \quad (2.133)$$

$$\frac{R_f}{R_e} = 3 \quad (2.134)$$

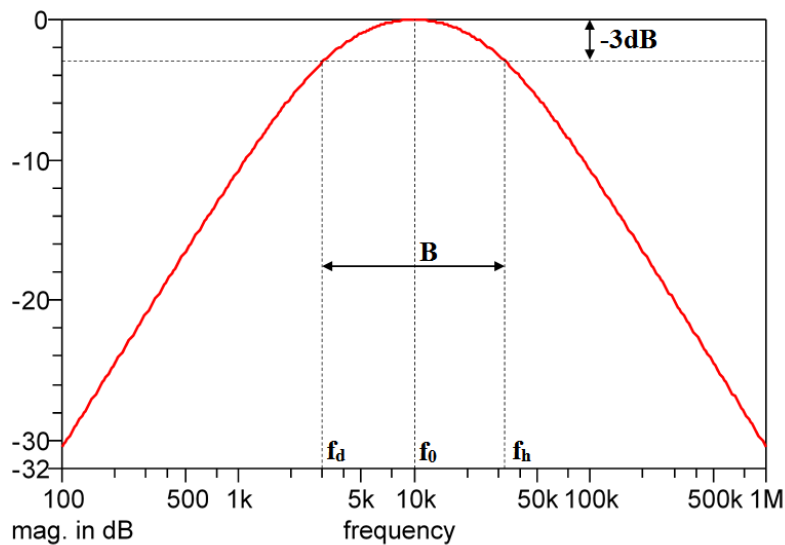
Výsledná hodnota poměru rezistorů  $R_f$  a  $R_e = 3$ , což znamená, že rezistor  $R_f$  musí být třikrát větší, než rezistor  $R_e$ . Zvolíme  $R_e = 1k\Omega$  a dopočítáme rezistor  $R_f = 3k\Omega$ . Rezistory ještě upravíme podle odporové řady E24 následovně  $R_1 = R_2 = 16k\Omega$ . Rezistory  $R_e = 1k\Omega$  a  $R_f = 3k\Omega$  se v odporové řadě E24 nachází a proto není nutné je měnit. Na obrázku 2.20 je uvedeno zapojení s navrženými součástkami.



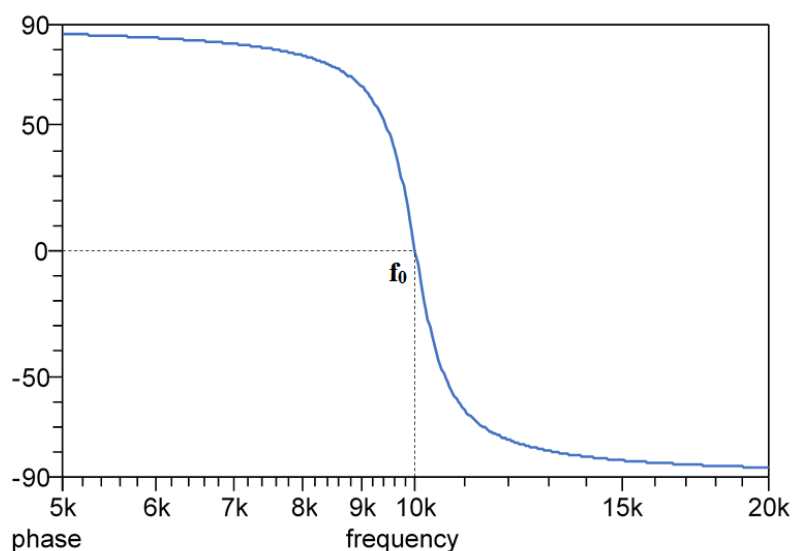
Obrázek 2.22: Zapojení s navrženými součástkami

## 2.5.2 Frekvenční charakteristiky zapojení

Simulace byla provedena s přesnými vypočítanými hodnotami součástek. Na obrázku 2.23 je zobrazena amplitudová frekvenční charakteristika a fázová frekvenční charakteristika na obrázku 2.24. Z amplitudové frekvenční charakteristiky si můžeme všimnout, že dolní frekvence  $f_d$  se přibližně rovná 3kHz a horní frekvence  $f_h$  je rovna přibližně 33kHz. Šířka pásma neboli frekvenční pásmo, které pásmová propust efektivně propouští má tedy hodnotu 30kHz. Plošší tvar frekvenční charakteristiky oproti pásmové propusti z podkapitoly 2.2 je dán nižší hodnotou činitele jakosti  $Q = 1/3$ . Obdobně jako v předcházejících případech je možno zvýšit činitel jakosti filtru zavedením podkritické zpětné vazby ( $R_a$  a  $R_b$ ). Uvedený typ filtru bude v následující kapitole použit k realizaci oscilátoru.



Obrázek 2.23: Amplitudová frekvenční charakteristika pásmové propusti

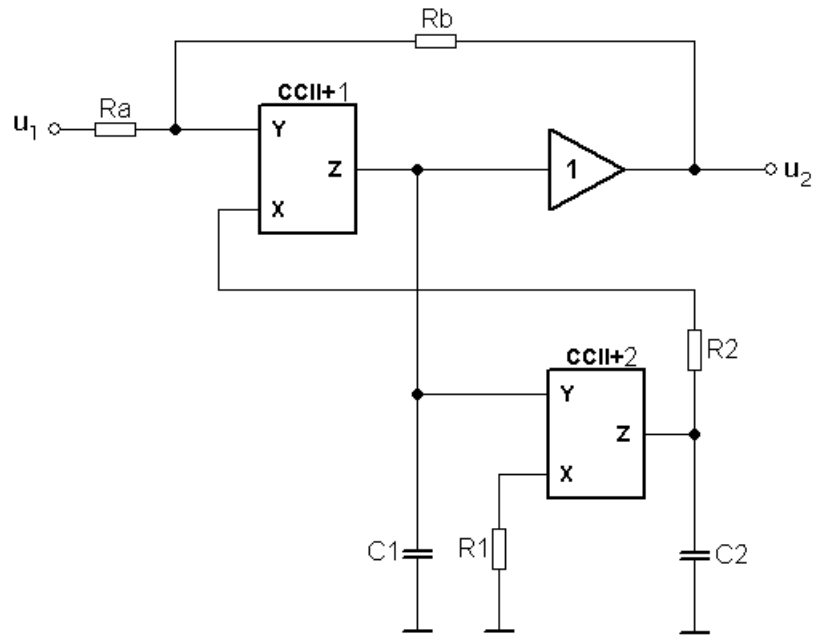


Obrázek 2.24: Fázová frekvenční charakteristika pásmové propusti

## 2.6 Pásmová propust realizovaná dvěma CCII+ s podkritickou kladnou ZV

Obvod je tvořen dvěma proudovými konvejory CCII+ a podkritickou kladnou zpětnou vazbou tvořenou dvěma zpětnovazebními rezistory  $R_a$  a  $R_b$  [7], [8].





Obrázek 2.25: Pásmová propust realizovaná 2 CCII+ s podkritickou kladnou ZV

Pro přenosovou funkci pásmové propusti platí vztah [8]:

$$F(p) = \frac{p \cdot \frac{1}{C_1 R_2} (1 - \beta)}{p^2 + p \cdot \frac{1}{C_2 R_2} \left(1 - \frac{C_2 \beta}{C_1}\right) + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (2.135)$$

Pro  $\omega_0$ ,  $Q$ ,  $Q_{ekv}$  a  $K$  platí vztahy [8]:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (2.136)$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_2 R_2}{C_1 R_1}} \quad (2.137)$$

$$Q_{ekv} = \frac{1}{1 - \frac{C_2 \beta}{C_1}} \cdot Q \quad (2.138)$$

$$K = \frac{C_2}{C_1} \quad (2.139)$$

### 2.6.1 Návrh součástek pro pásmovou propust

Pro pásmovou propust si zvolíme opět kmitočet  $f_0 = 10\text{kHz}$ . Abychom vypočítaly hodnoty rezistorů  $R_1$  a  $R_2$ , zvolíme  $Q = 0,5$ ,  $K = 1$  a dosadíme do vzorců:

$$K = \frac{C_2}{C_1} \rightarrow \frac{C_2}{C_1} = 1 \quad (2.140)$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_2 R_2}{C_1 R_1}} \rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 0,5^2 = \frac{1}{4} \quad (2.141)$$

Poměr rezistorů  $R_2$  a  $R_1 = 1/4$ , což znamená, že rezistor  $R_1$  musí být čtyřikrát větší, než rezistor  $R_2$ . Zvolíme  $R_1 = 3\text{k}\Omega$  podle odporové řady E24, dopočítáme rezistor  $R_2 = 825\Omega$ , který také upravíme podle odporové řady E24 na hodnotu  $820R$ .

Podle rovnice 2.140 zvolíme kondenzátory  $C_1 = C_2 = C$  a vypočítáme  $C$ :

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10^4 \cdot \sqrt{820 \cdot 3300}} = 9,68 \text{ nF} \approx 10 \text{ nF} \quad (2.142)$$

Pro výpočet zpětnovazebních rezistorů  $R_a$  a  $R_b$  si zvolíme  $Q_{ekv} = 10$  při  $Q = 0,5$ :

$$Q_{ekv} = \frac{1}{1 - \frac{C_2 \cdot \beta}{C_1}} \cdot Q \quad (2.143)$$

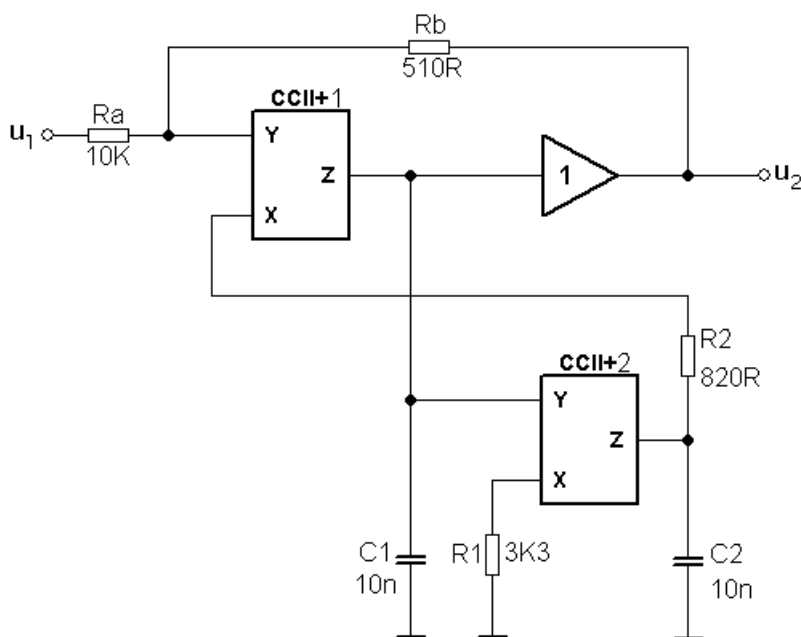
$$10 = \frac{1}{\frac{R_b}{R_a + R_b}} \cdot 0,5 \quad (2.144)$$

$$\frac{10}{0,5} = \frac{R_a + R_b}{R_b} \quad (2.145)$$

$$\frac{10}{0,5} = 1 + \frac{R_a}{R_b} \quad (2.146)$$

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{10}{0,5} - 1 = 19 \quad (2.147)$$

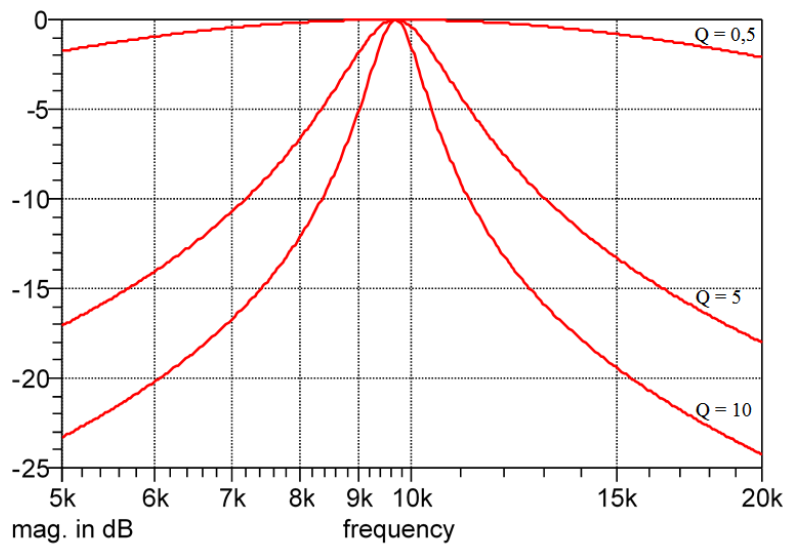
Výsledná hodnota poměru zpětnovazebních rezistorů  $R_a$  a  $R_b = 19$ , což znamená, že rezistor  $R_a$  musí být devatenáctkrát větší, než rezistor  $R_b$ . Zvolíme  $R_a = 10 \text{ k}\Omega$  a dopočítáme rezistor  $R_b = 526,3 \Omega$ , který upravíme podle odporové řady E24 na hodnotu  $510 \Omega$ . Na obrázku 2.26 je zobrazeno zapojení pásmové propusti s navrženými hodnotami součástek.



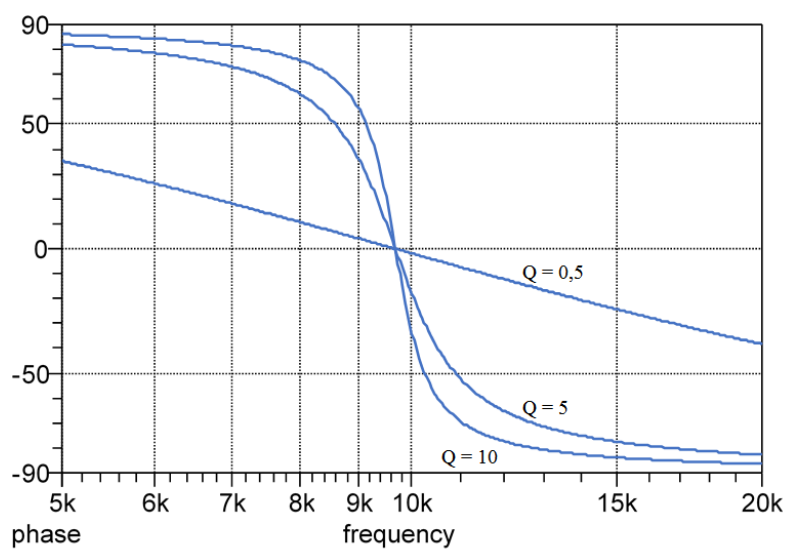
Obrázek 2.26: Zapojení pásmové propusti s navrženými součástkami

## 2.6.2 Frekvenční charakteristiky zapojení

Simulace byla provedena se zvolenými hodnotami součástek podle odporové řady E24. Na obrázku 2.27 jsou zobrazeny amplitudové frekvenční charakteristiky pro tři hodnoty činitele jakosti  $Q = 0,5$ ; 5 a 10. Fázové frekvenční charakteristiky pro stejné hodnoty  $Q$  jsou na obrázku 2.28.



Obrázek 2.27: Amplitudové frekvenční charakteristiky pásmové propusti



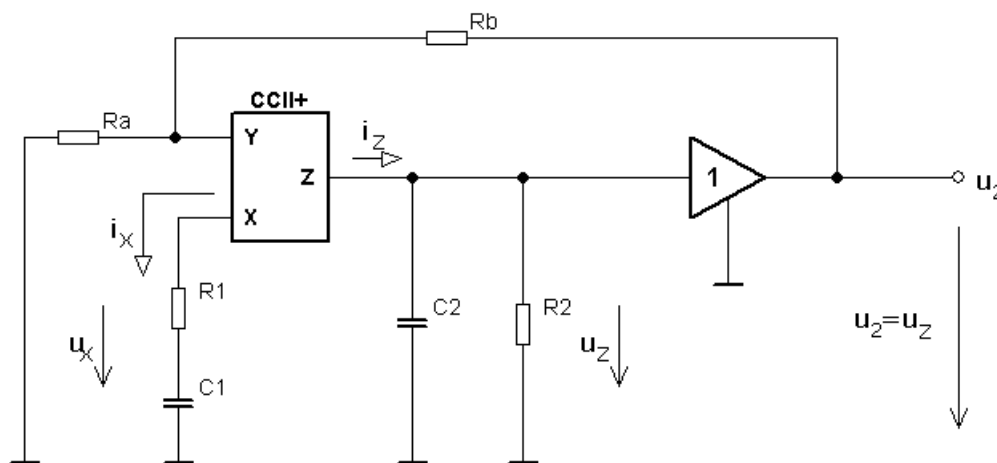
Obrázek 2.28: Fázové frekvenční charakteristiky pásmové propusti

### 3 Analýza oscilátorů

Oscilátor je charakterizován převážně zesilovačem a filtrem typu pásmová propust s kladnou zpětnou vazbou, který generuje střídavý periodický signál a nezpracovává vstupní signál (je zdrojem signálu). Zesilovač slouží k doplňování ztrát vznikajících v obvodu, aby nezanikly oscilace. Pomocí zpětné vazby zesilovač napájí svůj vstup, čímž si zajistí signál, který zpracovává. Protože ve zpětné vazbě dochází ke ztrátám energie, musí být zesílení zesilovače blízké nebo rovno těmto ztrátám – amplitudová podmínka oscilací. Se zesílením  $A < A_{krit}$  bude amplituda s přibývajícím časem klesat, až zcela zanikne. V opačném případě, kdy zesílení  $A > A_{krit}$  bude amplituda stoupat až do saturace. Fázová podmínka oscilací říká, že výstupní signál ze zpětné vazby musí být ve fázi se vstupním signálem zesilovače. Oscilátory rozdělujeme na harmonické, které vyrábějí sinusový signál s určitou frekvencí a na neharmonické s např. obdélníkovými, pilovými, trojúhelníkovými průběhy. Dále je dělíme na oscilátory RC a LC, jejichž frekvence je závislá na pasivních prvcích. RC oscilátory se používají pro nízké a střední kmitočty. LC oscilátory jsou vhodné pro vysoké kmitočty [5], [9].

#### 3.1 1. modifikace RC oscilátoru

K realizaci RC oscilátoru využijeme zapojení filtru z kapitoly 2. Kladná zpětná vazba je tvořena rezistory  $R_a$  a  $R_b$ . Pomocí programu SNAP stanovíme charakteristickou rovnici autonomního systému. Ke stanovení kmitočtu oscilací a podmínky vzniku oscilací řešíme kořeny charakteristické rovnice.



Obrázek 3.1: Zapojení RC oscilátoru

Rovnici pro přenosovou funkci získáme pomocí programu SNAP:

$$F(p) = \frac{p \cdot (R_2 \cdot R_a \cdot R_b \cdot C_1)}{p^2 \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_a + C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_b) + p \cdot (C_1 \cdot R_1 \cdot R_a + C_2 \cdot R_2 \cdot R_b + C_1 \cdot R_1 \cdot R_b + C_2 \cdot R_2 \cdot R_a - C_1 \cdot R_2 \cdot R_a) + R_a + R_b} \quad (3.1)$$

Jmenovatel přenosové funkce (charakteristická rovnice) rozdělíme na dvě části, imaginární a reálnou, přičemž se obě části musí rovnat nule. Kmitočtet oscilací  $\omega_0$  získáme z reálné části, položíme-li reálnou část rovnu nule a podmínku vzniku oscilací získáme z části imaginární. Nejdříve si určíme vztah pro komplexní proměnnou  $p$ :

$$p = j \cdot \omega \rightarrow p^2 = (j \cdot \omega)^2 = -\omega^2 \quad (3.2)$$

Odvodíme imaginární složku:

$$\omega \cdot [(C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2) \cdot R_a + (C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2) \cdot R_b - C_1 \cdot R_2 \cdot R_a] \leq 0 \quad (3.3)$$

$$\omega \cdot [(C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2) \cdot (R_a + R_b) - C_1 \cdot R_2 \cdot R_a] \leq 0 \quad (3.4)$$

$$\omega \cdot (R_a + R_b) \cdot \left( C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2 - C_1 \cdot R_2 \cdot \frac{R_a}{R_a + R_b} \right) \leq 0 \quad (3.5)$$

$$C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2 - C_1 \cdot R_2 \cdot \frac{R_a}{R_a + R_b} \leq 0 \quad (3.6)$$

$$C_1 \cdot R_1 + C_2 \cdot R_2 \leq C_1 \cdot R_2 \cdot \frac{R_a}{R_a + R_b} \quad (3.7)$$

$$\frac{R_a}{R_a + R_b} \geq \frac{C_1 \cdot R_1}{C_1 \cdot R_2} + \frac{C_2 \cdot R_2}{C_1 \cdot R_2} \quad (3.8)$$

$$\frac{R_a}{R_a + R_b} \geq \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} \quad (3.9)$$

$$\beta \geq \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} \quad (3.10)$$

Abychom mohli zvolit hodnoty součástek, zavedeme si pomocné veličiny  $n$  a  $m$  a zvolíme:

$$R_1 = n \cdot R \quad (3.11)$$

$$C_1 = m \cdot C \quad (3.12)$$

$$R_2 = R \quad (3.13)$$

$$C_2 = C \quad (3.14)$$

Potom dostáváme vztah pro  $\beta$ :

$$\beta \geq \frac{n \cdot R}{R} + \frac{C}{m \cdot C} = n + \frac{1}{m} \quad (3.15)$$

Zvolením  $Q = 1/2$  můžeme zároveň použít vztah pro  $n$  z předchozí kapitoly (rovnice 2.52), dosadit do vztahu pro  $\beta$  a tím si určit podmínky, při kterých se obvod rozkmitá:

$$n = \frac{1}{m} \rightarrow \beta \geq \frac{1}{m} + \frac{1}{m} \geq \frac{2}{m} \quad (3.16)$$

$$\beta \leq 1 \quad (3.17)$$

$$\frac{2}{m} \leq \beta \leq 1 \quad (3.18)$$

Proto, aby se obvod rozkmital, je nutné volit hodnoty  $m = 3$  a větší. Hodnotu  $m = 2$  zvolit nelze, jelikož by hodnota rezistoru  $R_a$  byla rovna nekonečnu a rezistor  $R_b$  roven 0. V našem případě zvolíme  $m = 3$ ,  $n = 1/3$  a pomocí vztahu z rovnice 3.15 vypočítáme přenos  $\beta$ :

$$\beta = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = \frac{2}{3} \quad (3.19)$$

Nyní odvodíme reálnou složku z rovnice 3.1 a dostaneme vztah pro  $\omega_0$ :

$$-\omega^2 \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_a + C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_b) + R_a + R_b = 0 \quad (3.20)$$

$$R_a + R_b - \omega^2 \cdot (R_a + R_b) \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 = 0 \quad (3.21)$$

$$(R_a + R_b) \cdot (1 - \omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2) = 0 \quad (3.22)$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} \quad (3.23)$$

### 3.1.1 Návrh součástek pro RC oscilátor

Po dosazení hodnot  $m$  a  $n$  do zvolených rovnic 3.11 a 3.12 zjistíme, že rezistor  $R_1$  je třetinou rezistoru  $R_2$  ( $R$ ) a kondenzátor  $C_1$  je trojnásobně větší jako kondenzátor  $C_2$  ( $C$ ):

$$R_1 = \frac{R}{3} \quad (3.24)$$

$$C_1 = 3 \cdot C \quad (3.25)$$

Hodnoty součástek  $R_2, C_2$  a frekvenci  $f_0$  zvolíme stejné z pásmové propusti (podkapitola 2.2.1). Abychom mohli vykreslit frekvenční a přechodovou charakteristiku, potřebujeme vypočítat hodnoty rezistorů  $R_1, R_a, R_b$  a kondenzátoru  $C_1$ .

Vypočítané hodnoty součástek  $R_1, R_2, C_1, C_2$ :

$$R_1 = \frac{15,9}{3} = 5,3k\Omega \quad (3.26)$$

$$R_2 = R = 15,9k\Omega \quad (3.27)$$

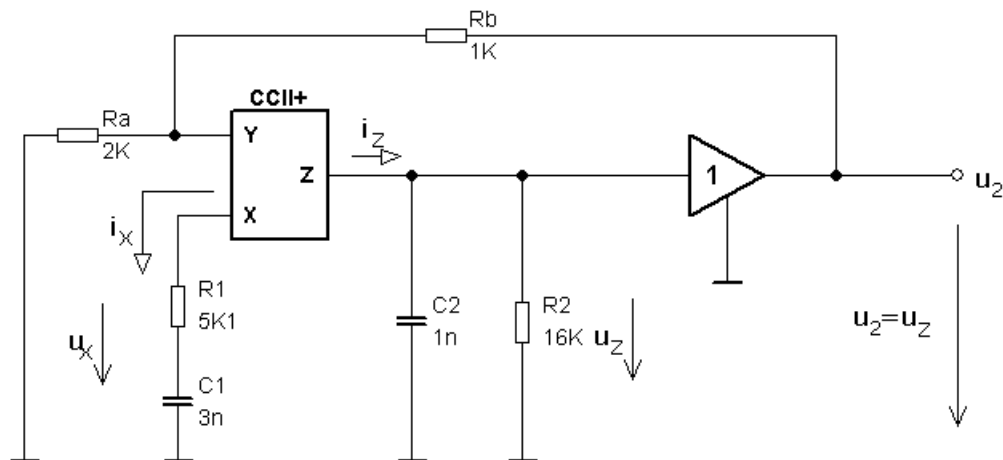
$$C_1 = 3 \cdot 1 = 3n \quad (3.28)$$

$$C_2 = C = 1n \quad (3.29)$$

Zbývá vypočítat rezistory  $R_a$  a  $R_b$ , k tomu použijeme následující vztah:

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{\beta}{1-\beta} = \frac{\frac{2}{3}}{1-\frac{2}{3}} = \frac{\frac{2}{3}}{\frac{1}{3}} = 2 \quad (3.30)$$

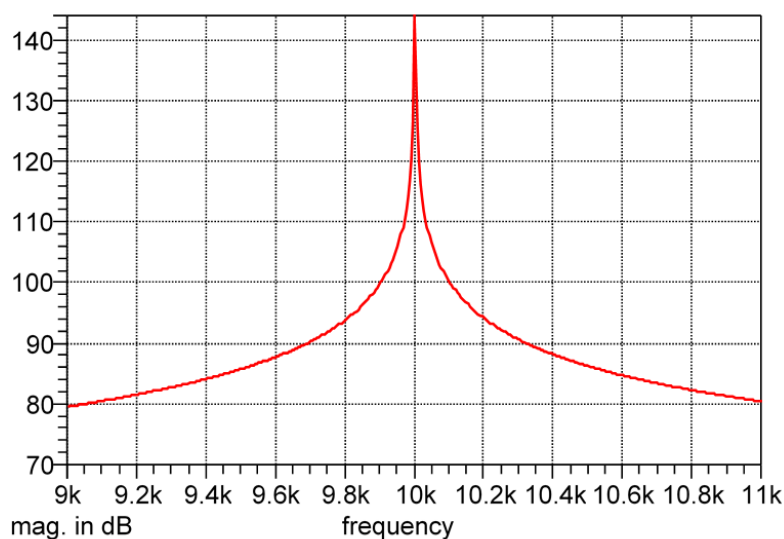
Výsledná hodnota poměru rezistorů  $R_a$  a  $R_b = 2$ , což znamená, že rezistor  $R_a$  musí být dvakrát větší, než rezistor  $R_b$ . Zvolíme  $R_a = 2k\Omega$  a dopočítáme rezistor  $R_b = 1k\Omega$ . Rezistory ještě upravíme podle odporové řady E24 následovně  $R_1 = 5k1$  a  $R_2 = 16k$ . Rezistory  $R_a = 2k\Omega$  a  $R_b = 1k\Omega$  se v odporové řadě E24 nachází a proto není nutné je měnit. Na obrázku 3.2 je uvedeno zapojení s navrženými součástkami.



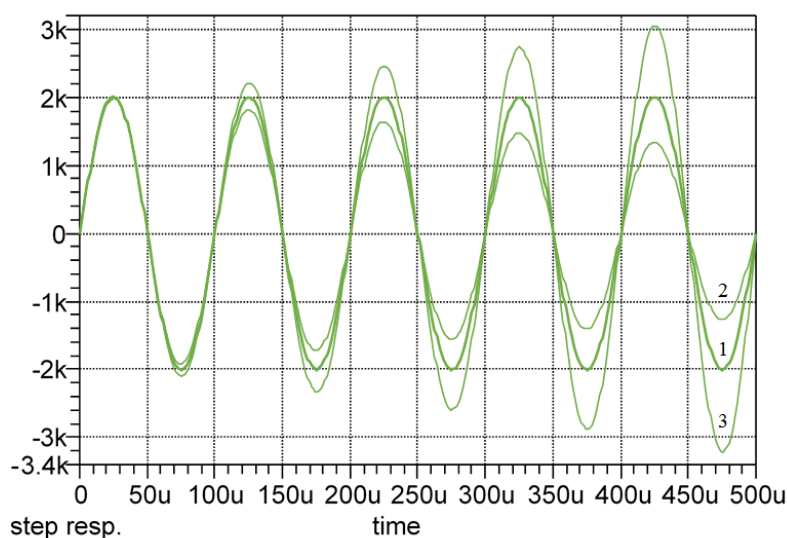
Obrázek 3.2: Zapojení s navrženými součástkami

### 3.1.2 Frekvenční a impulzní charakteristika zapojení

Simulace byla provedena s přesnými vypočítanými hodnotami součástek. Na obrázku 3.3 je zobrazena amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu s velice strmým tvarem. Impulzní charakteristika na obrázku 3.4 byla znázorněna se třemi hodnotami rezistoru  $R_b$  v rozmezí od  $950\Omega$  do  $1050\Omega$ . Na sinusovém průběhu označeném v obrázku číslem 1 je nastavena hodnota rezistoru na vypočtenou tedy  $1k\Omega$ . Amplituda je stabilní, jelikož je splněna amplitudová podmínka. Na sinusovém průběhu označeném číslem 2 je hodnota rezistoru  $R_b$  zvolena  $1050\Omega$  ( $R_a/R_b < 2$ ). Protože je hodnota větší než vypočítaná, amplituda se bude s přibývajícím časem neustále zmenšovat, až zcela zmizí. Na sinusovém průběhu číslo 3 jsme zvolili hodnotu rezistoru  $R_b = 950\Omega$  ( $R_a/R_b > 2$ ). Se zmenšenou hodnotou rezistoru stoupá i amplituda signálu, která v ideálním případě bude stoupat do nekonečna. Reálně stoupá do určité hodnoty, kde se ustálí a závisí na saturaci výstupního signálu aktivního prvku.



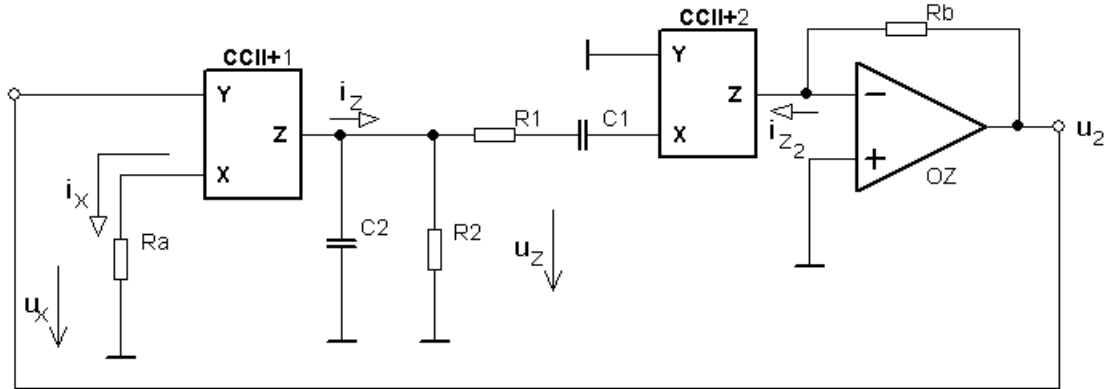
Obrázek 3.3: Amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu oscilátoru



Obrázek 3.4: Impulzní charakteristika oscilátoru

### 3.2 2. modifikace RC oscilátoru

Obvod je složen z aktivních prvků CCII+ a jednoho aktivního prvku OZ. CCII+1 realizuje neinvertující převodník napětí proud, CCII+2 s OZ tvoří neinvetrující převodník proud napětí. Pasivní prvky  $R_1, R_2, C_1, C_2$  tvoří Wienův článek pracující v proudovém režimu.



Obrázek 3.5: Zapojení RC oscilátoru

Rovnici pro přenosovou funkci získáme pomocí programu SNAP:

$$F(p) = \frac{p \cdot (R_2 \cdot R_a \cdot R_b \cdot C_1)}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_a + p \cdot (C_1 \cdot R_1 \cdot R_a + C_2 \cdot R_2 \cdot R_a - C_1 \cdot R_2 \cdot R_b + C_1 \cdot R_2 \cdot R_a) + R_a} \quad (3.37)$$

Odvodíme imaginární složku:

$$\omega \cdot (C_1 \cdot R_1 \cdot R_a + C_2 \cdot R_2 \cdot R_a - C_1 \cdot R_2 \cdot R_b + C_1 \cdot R_2 \cdot R_a) = 0 \quad (3.38)$$

$$R_a \cdot (C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2) - C_1 \cdot R_2 \cdot R_b \leq 0 \quad (3.39)$$

$$R_a \cdot (C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2) \leq C_1 \cdot R_2 \cdot R_b \quad (3.40)$$

$$\frac{R_a}{R_b} \leq \frac{C_1 \cdot R_2}{C_2 \cdot R_2 + C_1 \cdot R_1 + C_1 \cdot R_2} \quad (3.41)$$

Odvodíme reálnou složku a dostaneme vztah pro  $\omega_0$ :

$$-\omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_a + R_a = 0 \quad (3.42)$$

$$-\omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 + 1 = 0 \quad (3.43)$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} \quad (3.44)$$

#### 3.2.1 Návrh součástek pro RC oscilátor

Pro RC oscilátor si zvolíme opět kmitočet  $f_0 = 10\text{kHz}$ , stejné hodnoty součástek  $C_1 = C_2 = C$  a  $R_1 = R_2 = R$ . Hodnoty použijeme z podkapitoly 2.2.1:

$$C = 1\text{n} \quad (3.45)$$

$$R = 15,9\text{k}\Omega \quad (3.46)$$

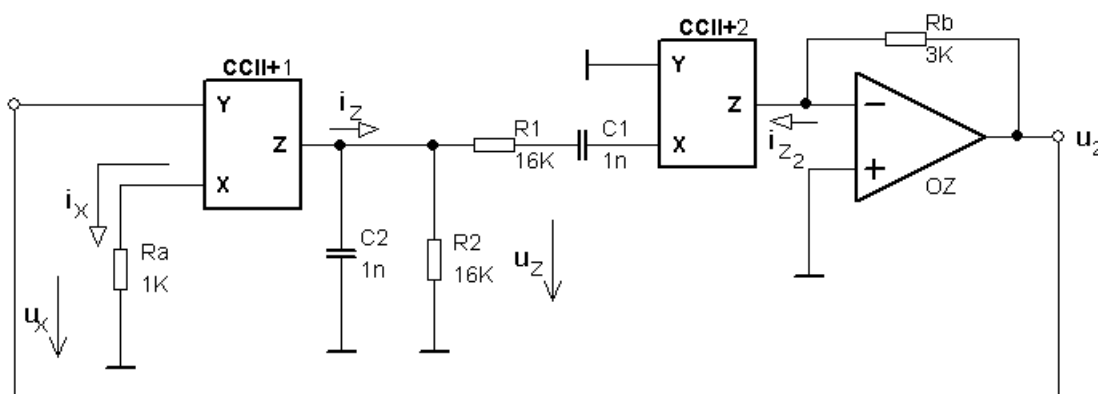
Zbývá vypočítat hodnoty rezistorů  $R_a$  a  $R_b$ , které zjistíme, když dosadíme vypočítané hodnoty  $C$  a  $R$  do vztahu z rovnice 3.41:



$$\frac{R_a}{R_b} \leq \frac{10^{-9} \cdot 15,9 \cdot 10^3}{10^{-9} \cdot 15,9 \cdot 10^3 + 10^{-9} \cdot 15,9 \cdot 10^3 + 10^{-9} \cdot 15,9 \cdot 10^3} \quad (3.47)$$

$$\frac{R_a}{R_b} \leq \frac{1}{3} \quad (3.48)$$

Poměr rezistorů  $R_a$  a  $R_b \leq 1/3$ , což znamená, že rezistor  $R_b$  musí být alespoň třikrát větší, než rezistor  $R_a$ . Zvolíme  $R_a = 1k\Omega$  a dopočítáme rezistor  $R_b = 3k\Omega$ . Rezistory ještě upravíme podle odporové řady E24 následovně  $R_1 = R_2 = 16k$ . Rezistory  $R_a = 1k\Omega$  a  $R_b = 3k\Omega$  se v odporové řadě E24 nachází a proto není nutné je měnit. Na obrázku 3.6 je uvedeno zapojení s navrhnutými součástkami.

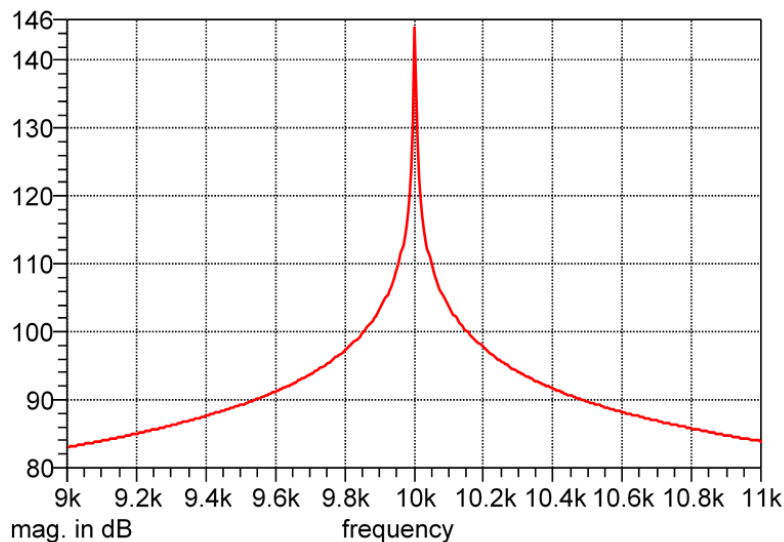


Obrázek 3.6: Zapojení s navrhnutými součástkami

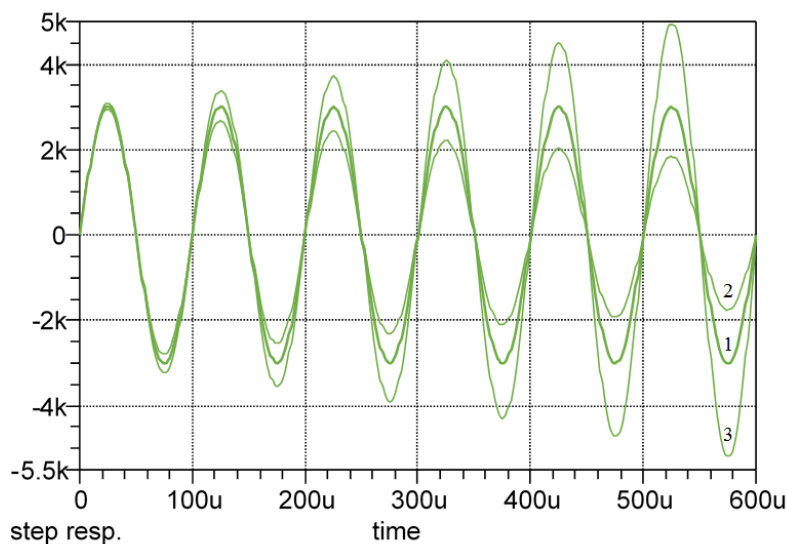
### 3.2.2 Frekvenční a impulzní charakteristika zapojení

Simulace byla provedena s přesnými vypočítanými hodnotami součástek. Na obrázku 3.7 je zobrazena amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu s velice strmým tvarem.

Impulzní charakteristika na obrázku 3.8 byla znázorněna se třemi hodnotami rezistoru  $R_a$  v rozmezí od  $990\Omega$  do  $1010\Omega$ . Na sinusovém průběhu označeném v obrázku číslem 1 je nastavena hodnota rezistoru na vypočtenou, tedy  $1k\Omega$ . Amplituda je stabilní, jelikož je splněna amplitudová podmínka. Na sinusovém průběhu označeném číslem 2 je hodnota rezistoru zvolena  $1010\Omega$  ( $R_a/R_b > 1/3$ ). Protože je hodnota větší než vypočítaná, amplituda se bude s přibývajícím časem neustále zmenšovat, až zcela zmizí. Na sinusovém průběhu číslo 3 jsme zvolili hodnotu rezistoru  $990\Omega$  ( $R_a/R_b < 1/3$ ). Se zmenšenou hodnotou rezistoru stoupá i amplituda signálu, která v ideálním případě bude stoupat do nekonečna. Reálně stoupá do určité hodnoty, kde se ustálí a závisí na saturaci výstupního signálu aktivního prvku.



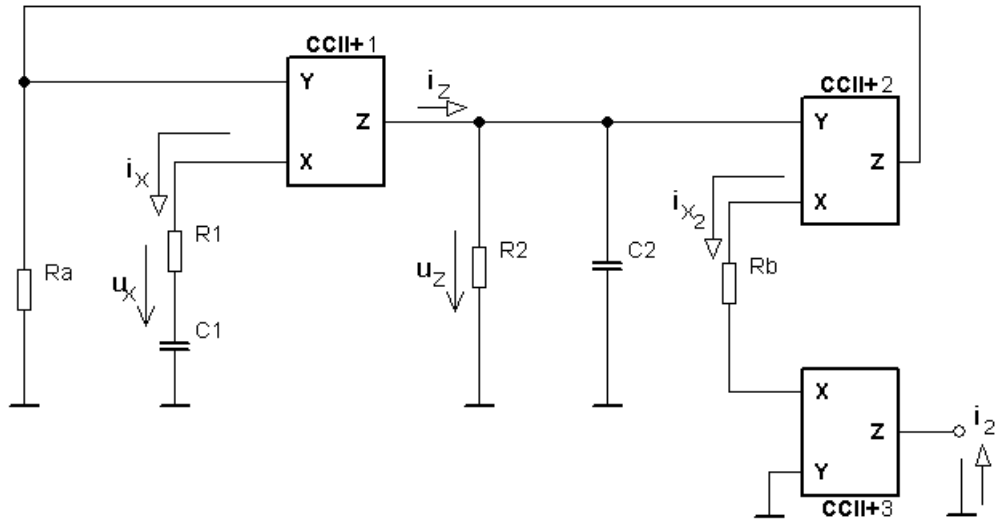
Obrázek 3.7: *Amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu oscilátoru*



Obrázek 3.8: *Impulzní charakteristika oscilátoru*

### 3.3 3. modifikace RC oscilátoru s proudovým výstupem

Obvod je složen ze tří aktivních prvků CCII+, CCII+1 pracuje jako pásmová propust s modifikovaným Wienovým článkem ( $R_1, R_2, C_1, C_2$ ). CCII+2 a CCII+3 realizují převodník napětí proud se symetrickým výstupem. Poměr rezistorů  $R_a, R_b$  určuje podmínku vzniku oscilací.



Obrázek 3.9: Zapojení RC oscilátoru s proudovým výstupem

Rovnici pro přenosovou funkci získáme pomocí programu SNAP:

$$F(p) = \frac{p \cdot (R_2 \cdot R_a \cdot C_1)}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_b + p \cdot (C_1 \cdot R_1 \cdot R_b + C_2 \cdot R_2 \cdot R_b - C_1 \cdot R_2 \cdot R_a) + R_b} \quad (3.52)$$

Odvodíme imaginární složku:

$$\omega \cdot (C_1 \cdot R_1 \cdot R_b + C_2 \cdot R_2 \cdot R_b - C_1 \cdot R_2 \cdot R_a) = 0 \quad (3.53)$$

$$R_2 \cdot C_2 + R_1 \cdot C_1 - R_2 \cdot C_1 \cdot \frac{R_a}{R_b} \leq 0 \quad (3.54)$$

$$R_2 \cdot C_1 \cdot \left( \frac{R_2 \cdot C_2}{R_2 \cdot C_1} + \frac{R_1 \cdot C_1}{R_2 \cdot C_1} - \frac{R_a}{R_b} \right) \leq 0 \quad (3.55)$$

$$\frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} - \frac{R_a}{R_b} \leq 0 \quad (3.56)$$

$$\frac{R_a}{R_b} \geq \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} \quad (3.57)$$

Odvodíme reálnou složku a dostaneme vztah pro  $\omega_0$ :

$$-\omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_b + R_b = 0 \quad (3.58)$$

$$-\omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 + 1 = 0 \quad (3.59)$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} \quad (3.60)$$

### 3.3.1 Návrh součástek pro RC oscilátor

Pro RC oscilátor si zvolíme opět kmitočet  $f_0 = 10\text{kHz}$  a protože máme stejnou pásmovou propust jako v podkapitole 2.2.1, použijeme stejné hodnoty součástek. Rezistor  $R_1$  je polovinou rezistoru  $R_2$  ( $R$ ) a kondenzátor  $C_1$  je dvojnásobně větší jako kondenzátor  $C_2$  ( $C$ ):

$$R_1 = 7,95\text{k}\Omega \quad (3.61)$$

$$R_2 = 15,9\text{k}\Omega \quad (3.62)$$

$$C_1 = 2\text{n} \quad (3.63)$$

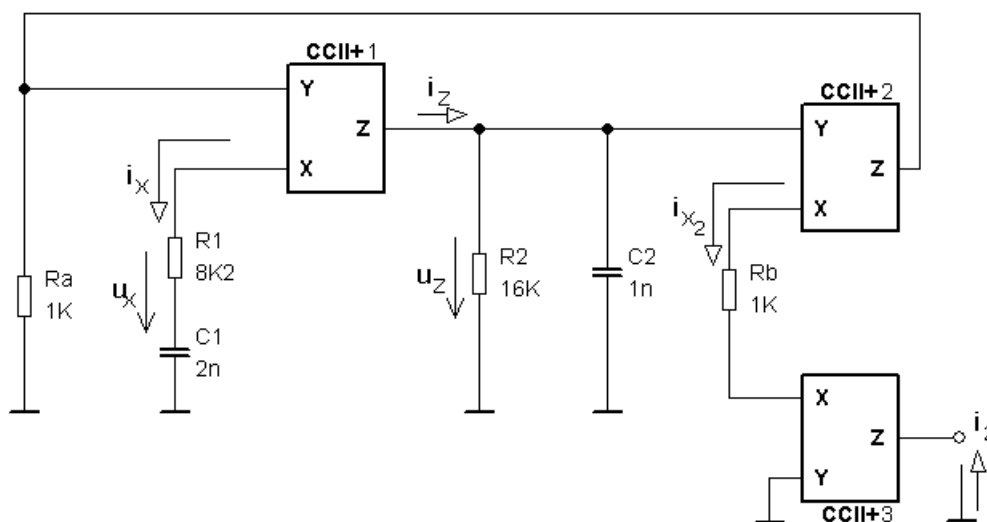
$$C_2 = 1n \quad (3.64)$$

Zbývá vypočítat hodnoty rezistorů  $R_a$  a  $R_b$ , které zjistíme, když dosadíme vypočítané hodnoty  $C_1, C_2, R_1, R_2$  do vztahu z rovnice 3.57:

$$\frac{R_a}{R_b} \geq \frac{7,95 \cdot 10^3}{15,9 \cdot 10^3} + \frac{1 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-9}} \quad (3.65)$$

$$\frac{R_a}{R_b} \geq 1 \quad (3.66)$$

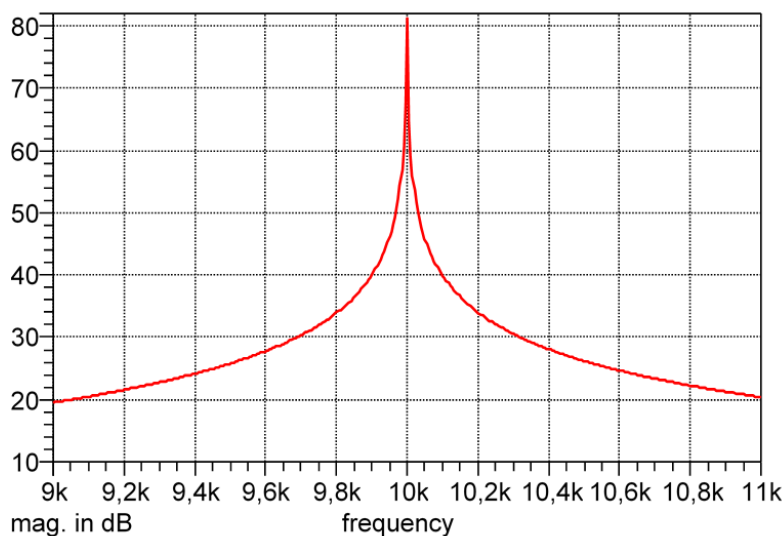
Poměr rezistorů  $R_a$  a  $R_b \geq 1$ , což znamená, že rezistor  $R_a$  musí mít stejný nebo větší odpor, než rezistor  $R_b$ . Zvolíme  $R_a = R_b = 1k\Omega$ . Rezistory ještě upravíme podle odporové řady E24 následovně  $R_1 = 8k2$ ,  $R_2 = 16k$ . Rezistory  $R_a = R_b = 1k\Omega$  se v odporové řadě E24 nachází a proto není nutné je měnit. Na obrázku 3.10 je uvedeno zapojení s navrženými součástkami.



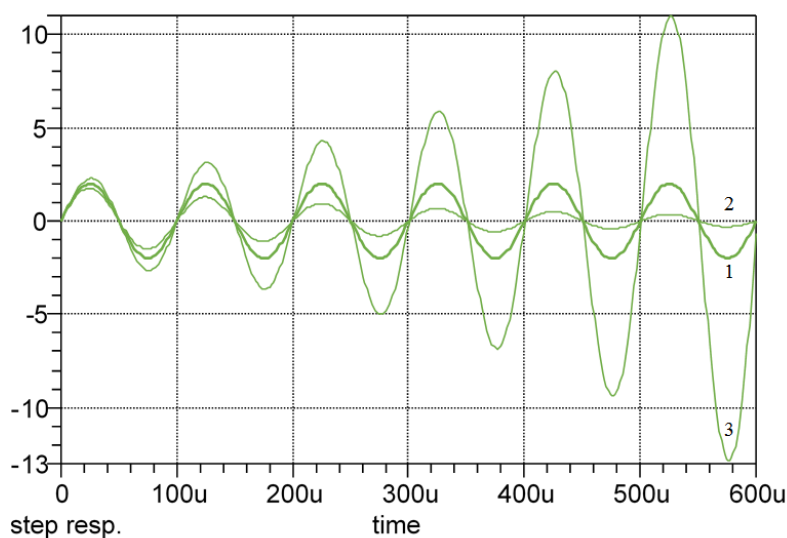
Obrázek 3.10: Zapojení s navrženými součástkami

### 3.3.2 Frekvenční a impulzní charakteristika zapojení

Simulace byla provedena s přesnými vypočítanými hodnotami součástek. Na obrázku 3.11 je zobrazena amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu s velice strmým tvarem. Impulzní charakteristika na obrázku 3.12 byla znázorněna se třemi hodnotami rezistoru  $R_a$  v rozmezí od  $950\Omega$  do  $1050\Omega$ . Na sinusovém průběhu označeném v obrázku číslem 1 je nastavena hodnota rezistoru na vypočtenou, tedy  $1k\Omega$ . Amplituda je stabilní, jelikož je splněna amplitudová podmínka. Na sinusovém průběhu označeném číslem 2 je hodnota rezistoru zvolena  $950\Omega$  ( $R_a/R_b < 1$ ). Protože je hodnota menší než vypočítaná, amplituda se bude s přibývajícím časem neustále zmenšovat, až zcela zmizí. Na sinusovém průběhu číslo 3 jsme zvolili hodnotu rezistoru  $1050\Omega$  ( $R_a/R_b > 1$ ). Se zvětšenou hodnotou rezistoru stoupá i amplituda signálu, která v ideálním případě bude stoupat do nekonečna. Reálně stoupá do určité hodnoty, kde se ustálí a závisí na saturaci výstupního signálu aktivního prvku.



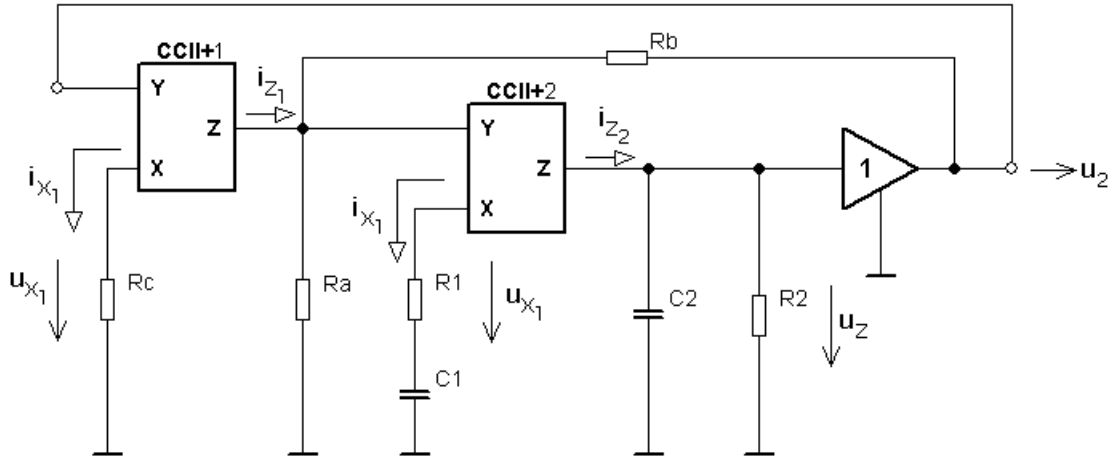
Obrázek 3.11: Amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu oscilátoru



Obrázek 3.12: Impulzní charakteristika oscilátoru

### 3.4 4. modifikace RC oscilátoru

CCII+2 pracuje jako pásmová propust s modifikovaným Wienovým článkem ( $R_1, R_2, C_1, C_2$ ) s podkritickou zpětnou vazbou ( $R_a, R_b$ ). Obvod je doplněn převodníkem napětí proud CCII+1. Na jeho vstup je přiveden výstupní signál z napěťového výstupu oscilátoru (celkové kladná zpětná vazba).



Obrázek 3.13: Zapojení RC oscilátoru

Rovnici pro přenosovou funkci získáme pomocí programu SNAP:

$$F(p) = \frac{p \cdot (R_2 \cdot R_a \cdot C_1 \cdot R_c \cdot R_b)}{p^2 \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_b \cdot R_c + C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_a \cdot R_c) + R_b \cdot R_c + R_a \cdot R_c + p \cdot (C_2 \cdot R_2 \cdot R_b \cdot R_c + C_2 \cdot R_2 \cdot R_a \cdot R_c + C_1 \cdot R_1 \cdot R_a \cdot R_c + C_1 \cdot R_1 \cdot R_b \cdot R_c - C_1 \cdot R_2 \cdot R_b \cdot R_a - C_1 \cdot R_2 \cdot R_a \cdot R_c)} \quad (3.67)$$

Odvodíme imaginární složku:

$$\omega \cdot \left( C_2 \cdot R_2 \cdot R_b \cdot R_c + C_2 \cdot R_2 \cdot R_a \cdot R_c + C_1 \cdot R_1 \cdot R_a \cdot R_c + C_1 \cdot R_1 \cdot R_b \cdot R_c - C_1 \cdot R_2 \cdot R_b \cdot R_a - C_1 \cdot R_2 \cdot R_a \cdot R_c \right) = 0 \quad (3.68)$$

$$C_2 \cdot R_2 \cdot R_b + C_2 \cdot R_2 \cdot R_a + C_1 \cdot R_1 \cdot R_a + C_1 \cdot R_1 \cdot R_b - \left( \frac{C_1 \cdot R_2 \cdot R_b \cdot R_a}{R_c} + C_1 \cdot R_2 \cdot R_a \right) \leq 0 \quad (3.69)$$

$$R_a \cdot (R_2 \cdot C_2 + R_1 \cdot C_1) + R_b \cdot (R_2 \cdot C_2 + R_1 \cdot C_1) - R_2 \cdot C_1 \cdot \left( \frac{R_a \cdot R_b}{R_c} + R_a \right) \leq 0 \quad (3.70)$$

$$(R_a + R_b) \cdot (R_2 \cdot C_2 + R_1 \cdot C_1) - R_2 \cdot C_1 \cdot R_a \cdot \left( \frac{R_b}{R_c} + 1 \right) \leq 0 \quad (3.71)$$

$$\frac{R_a + R_b}{R_a} \cdot (R_2 \cdot C_2 + R_1 \cdot C_1) - R_2 \cdot C_1 \cdot \left( \frac{R_b}{R_c} + 1 \right) \leq 0 \quad (3.72)$$

$$\left( 1 + \frac{R_b}{R_a} \right) \cdot (R_2 \cdot C_2 + R_1 \cdot C_1) \leq \left( 1 + \frac{R_b}{R_c} \right) \cdot R_2 \cdot C_1 \quad (3.73)$$

$$\left( 1 + \frac{R_b}{R_a} \right) \cdot \frac{R_2 \cdot C_2 + R_1 \cdot C_1}{R_2 \cdot C_1} \leq \left( 1 + \frac{R_b}{R_c} \right) \quad (3.74)$$

$$\left( 1 + \frac{R_b}{R_a} \right) \cdot \left( \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2} \right) \leq \left( 1 + \frac{R_b}{R_c} \right) \quad (3.75)$$

$$\frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2} \leq \frac{1 + \frac{R_b}{R_c}}{1 + \frac{R_b}{R_a}} \quad (3.76)$$

Odvodíme reálnou složku a dostaneme vztah pro  $\omega_0$ :

$$-\omega^2 \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_a \cdot R_c + C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_b \cdot R_c) + R_a + R_b = 0 \quad (3.77)$$

$$\omega^2 \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_a + C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_b) = R_a + R_b \quad (3.78)$$

$$\omega^2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot (R_a + R_b) = R_a + R_b \quad (3.79)$$

$$\omega^2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 = 1 \quad (3.80)$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} \quad (3.81)$$

### 3.4.1 Návrh součástek pro RC oscilátor

Pro RC oscilátor si zvolíme opět kmitočet  $f_0 = 10\text{kHz}$  a protože máme stejnou pásmovou propust jako v podkapitole 2.2.1, použijeme stejné hodnoty součástek. Rezistor  $R_1$  je polovinou rezistoru  $R_2$  ( $R$ ) a kondenzátor  $C_1$  je dvojnásobně větší jako kondenzátor  $C_2$  ( $C$ ):

$$R_1 = 7,95\text{k}\Omega \quad (3.82)$$

$$R_2 = 15,9\text{k}\Omega \quad (3.83)$$

$$C_1 = 2\text{n} \quad (3.84)$$

$$C_2 = 1\text{n} \quad (3.85)$$

Hodnoty rezistorů  $R_a$  a  $R_c$  zjistíme dosazením vypočítaných hodnot  $C_1, C_2, R_1, R_2$  do vztahu z rovnice 3.76:

$$\frac{7,95 \cdot 10^3}{15,9 \cdot 10^3} + \frac{1 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-9}} \leq \frac{1 + \frac{R_b}{R_c}}{1 + \frac{R_b}{R_a}} \quad (3.86)$$

$$1 + \frac{R_b}{R_a} \leq 1 + \frac{R_b}{R_c} \quad (3.87)$$

$$\frac{1}{R_a} \leq \frac{1}{R_c} \rightarrow \frac{R_c}{R_a} \leq 1 \quad (3.88)$$

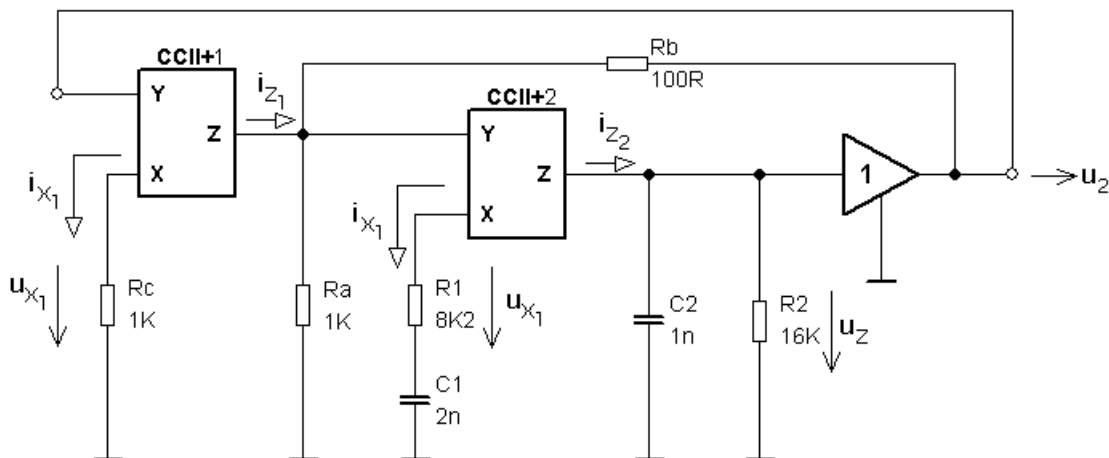
Poměr rezistorů  $R_c$  a  $R_a \leq 1$ , což znamená, že rezistor  $R_c$  musí mít stejný nebo menší odpor, než rezistor  $R_a$ . Zvolíme  $R_a = R_c = 1\text{k}\Omega$ . Pro výpočet zpětnovazebního rezistoru  $R_b$  si zvolíme  $Q_{ekv} = 5,5$  při  $Q = 0,5$ :

$$Q_{ekv} = Q \cdot \left(1 + \frac{R_a}{R_b}\right) \quad (3.89)$$

$$5,5 \cdot R_b = 0,5 \cdot R_b + \frac{500 \cdot R_b}{R_b} \quad (3.90)$$

$$R_b = 100\Omega \quad (3.91)$$

Rezistory ještě upravíme podle odporové řady E24 následovně  $R_1 = 8\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 16\text{k}\Omega$ . Rezistory  $R_a = R_c = 1\text{k}\Omega$  a  $R_b = 100\Omega$  se v odporové řadě E24 nachází a proto není nutné je měnit. Na obrázku 3.14 je uvedeno zapojení s navrhnutými součástkami.

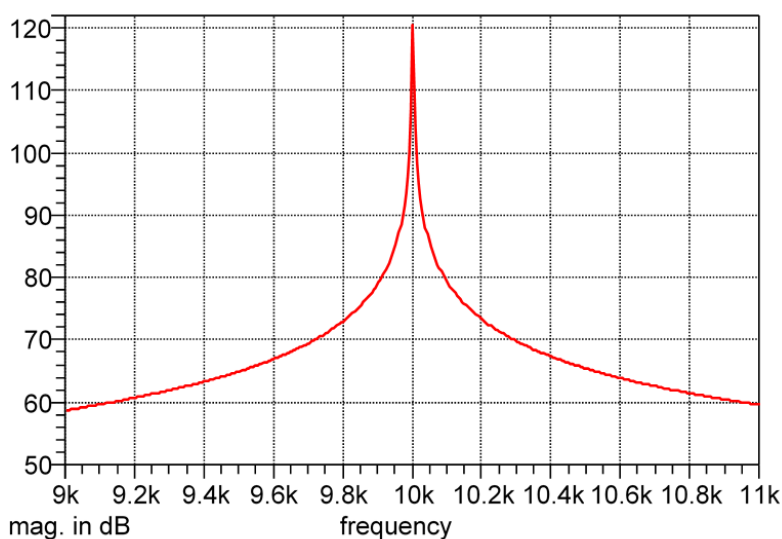


Obrázek 3.14: Zapojení s navrhnutými součástkami

### 3.4.2 Frekvenční a impulzní charakteristika zapojení

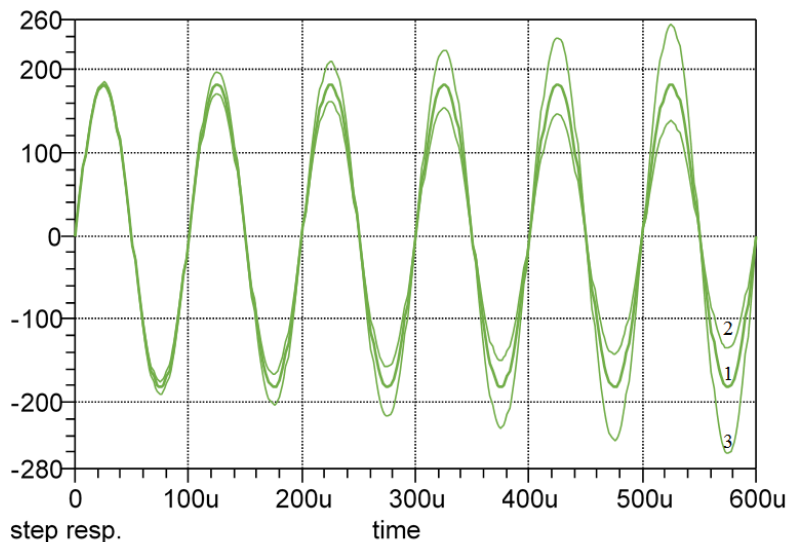
Simulace byla provedena s přesnými vypočítanými hodnotami součástek. Na obrázku 3.15 je zobrazena amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu s velice strmým tvarem.

Impulzní charakteristika na obrázku 3.16 byla znázorněna se třemi hodnotami rezistoru  $R_c$  v rozmezí od  $900\Omega$  do  $1100\Omega$ . Na sinusovém průběhu označeném v obrázku číslem 1 je nastavena hodnota rezistoru na vypočtenou tedy  $1k\Omega$ . Amplituda je stabilní, jelikož je splněna amplitudová podmínka. Na sinusovém průběhu označeném číslem 2 je hodnota rezistoru zvolena  $1100\Omega$  ( $R_c/R_a > 1$ ). Protože je hodnota větší než vypočítaná, amplituda se bude s přibývajícím časem neustále zmenšovat, až zcela zmizí. Na sinusovém průběhu číslo 3 jsme zvolili hodnotu rezistoru  $900\Omega$  ( $R_c/R_a < 1$ ). Se zmenšenou hodnotou rezistoru stoupá i amplituda signálu, která v ideálním případě bude stoupat do nekonečna. Reálně stoupá do určité hodnoty, kde se ustálí a závisí na saturaci výstupního signálu aktivního prvku.



Obrázek 3.15: Amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu oscilátoru

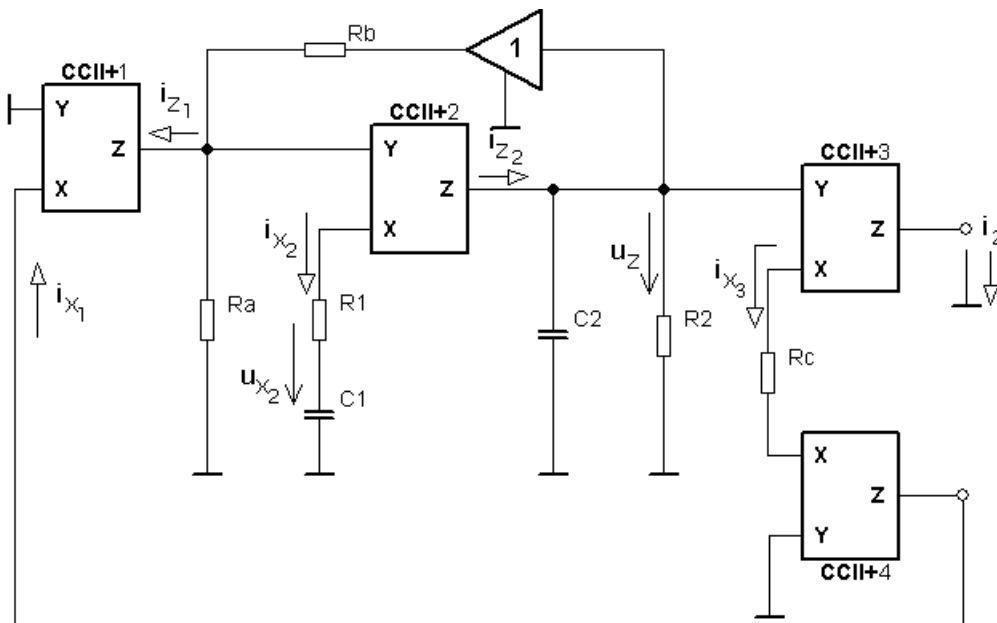




Obrázek 3.16: Impulzní charakteristika oscilátoru

### 3.5 5. modifikace RC oscilátoru s proudovým výstupem

Obvod je složen ze čtyř aktivních prvků CCII+, CCII+2 pracuje jako pásmová propust s modifikovaným Wienovým článkem ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ). CCII+3 a CCII+4 realizují převodník napětí proud se symetrickým výstupem. Poměr rezistorů  $R_a$ ,  $R_c$  určuje podmínku vzniku oscilací.



Obrázek 3.17: Zapojení RC oscilátoru s proudovým výstupem

Rovnici pro přenosovou funkci získáme pomocí programu SNAP:

$$F(p) = - \frac{p \cdot (R_2 \cdot R_a \cdot C_1 \cdot R_b)}{p^2 \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_b \cdot R_c + C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_a \cdot R_c) + R_b \cdot R_c + R_a \cdot R_c + p \cdot (C_2 \cdot R_2 \cdot R_b \cdot R_c + C_2 \cdot R_2 \cdot R_a \cdot R_c + C_1 \cdot R_1 \cdot R_a \cdot R_c + C_1 \cdot R_1 \cdot R_b \cdot R_c - C_1 \cdot R_2 \cdot R_b \cdot R_a - C_1 \cdot R_2 \cdot R_a \cdot R_c)} \quad (3.92)$$

Jelikož je jmenovatel přenosové funkce shodný s přenosovou funkcí oscilátoru z podkapitoly 3.4, musí platit stejný vztah pro oscilační podmínku i střední kmitočet  $\omega_0$ . Vztah pro podmínku oscilací:

$$\frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2} \leq \frac{1 + \frac{R_b}{R_c}}{1 + \frac{R_b}{R_a}} \quad (3.93)$$

Vztah pro  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} \quad (3.94)$$

### 3.5.1 Návrh součástek pro RC oscilátor

Pro RC oscilátor si zvolíme opět kmitočet  $f_0 = 10\text{kHz}$  a protože máme stejnou pásmovou propust jako v podkapitole 2.2.1, použijeme stejné hodnoty součástek. Rezistor  $R_1$  je polovinou rezistoru  $R_2$  ( $R$ ) a kondenzátor  $C_1$  je dvojnásobně větší jako kondenzátor  $C_2$  ( $C$ ):

$$R_1 = 7,95\text{k}\Omega \quad (3.95)$$

$$R_2 = 15,9\text{k}\Omega \quad (3.96)$$

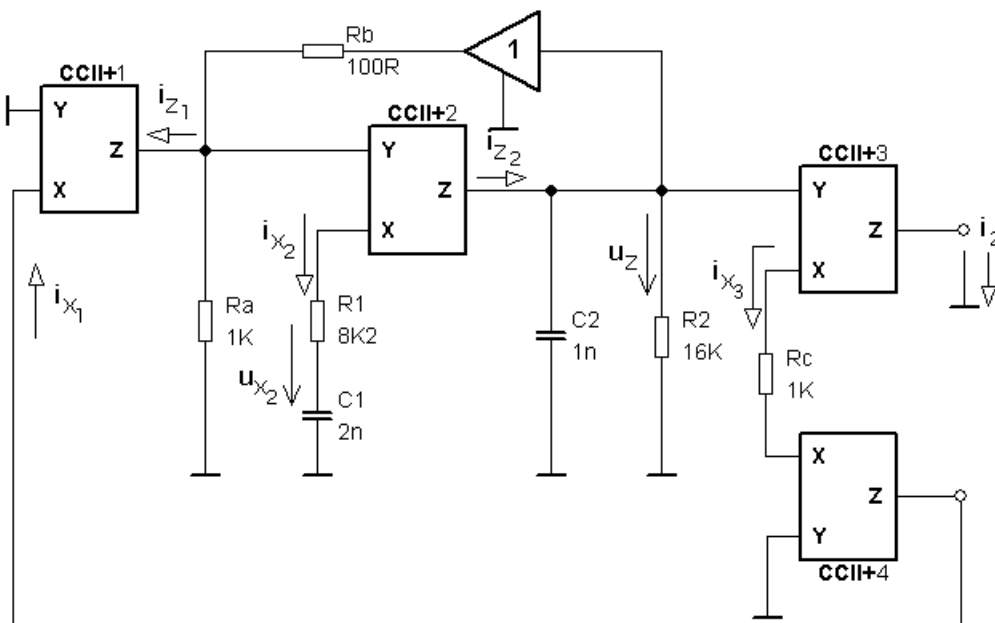
$$C_1 = 2\text{n} \quad (3.97)$$

$$C_2 = 1\text{n} \quad (3.98)$$

Poměr rezistorů  $R_a$  a  $R_c$  je shodný s oscilátorem v podkapitole 3.4:

$$\frac{R_c}{R_a} \leq 1 \quad (3.99)$$

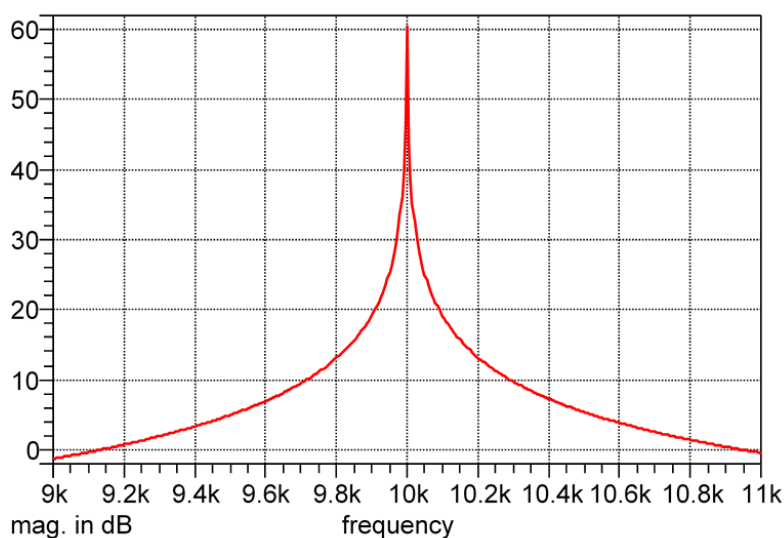
Poměr rezistorů  $R_c$  a  $R_a \leq 1$ , což znamená, že rezistor  $R_c$  musí mít stejný nebo menší odpor, než rezistor  $R_a$ . Zvolíme  $R_a = R_c = 1\text{k}\Omega$ . Zvolením  $Q_{ekv} = 5,5$  a  $Q = 0,5$  zjistíme hodnotu rezistoru zpětnovazebního rezistoru  $R_b = 100\Omega$  viz podkapitola 3.4.1.



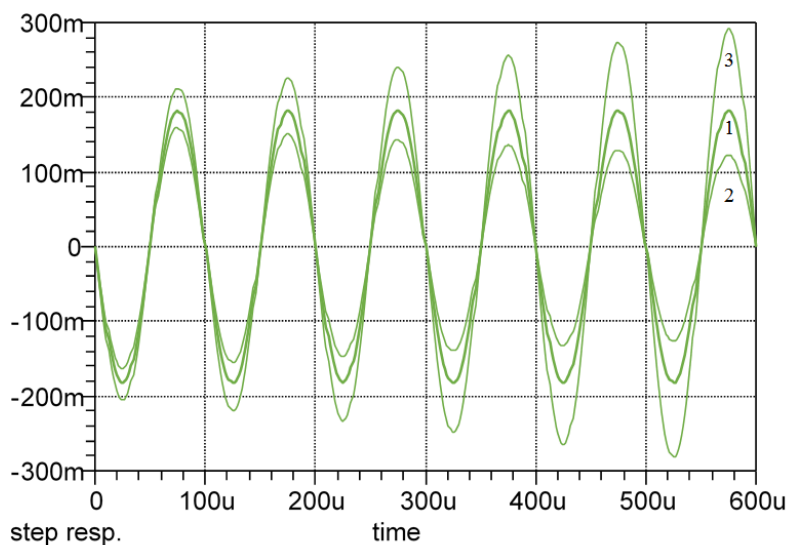
Obrázek 3.18: Zapojení s navrhnutými součástkami

### 3.5.2 Frekvenční a impulzní charakteristika zapojení

Simulace byla provedena s přesnými vypočítanými hodnotami součástek. Na obrázku 3.19 je zobrazena amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu s velice strmým tvarem. Impulzní charakteristika na obrázku 3.20 byla znázorněna se třemi hodnotami rezistoru  $R_c$  v rozmezí od  $900\Omega$  do  $1100\Omega$ . Na sinusovém průběhu označeném v obrázku číslem 1 je nastavena hodnota rezistoru na vypočtenou tedy  $1k\Omega$ . Amplituda je stabilní, jelikož je splněna amplitudová podmínka. Na sinusovém průběhu označeném číslem 2 je hodnota rezistoru zvolena  $1100\Omega$  ( $R_c/R_a > 1$ ). Protože je hodnota větší než vypočítaná, amplituda se bude s přibývajícím časem neustále zmenšovat, až zcela zmizí. Na sinusovém průběhu číslo 3 jsme zvolili hodnotu rezistoru  $900\Omega$  ( $R_c/R_a < 1$ ). Se zmenšenou hodnotou rezistoru stoupá i amplituda signálu, která v ideálním případě bude stoupat do nekonečna. Reálně stoupá do určité hodnoty, kde se ustálí a závisí na saturaci výstupního signálu aktivního prvku.



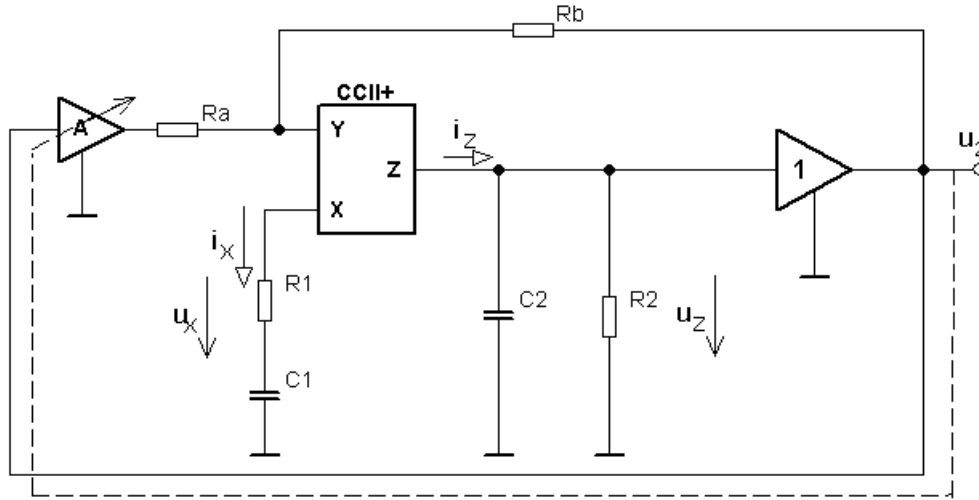
Obrázek 3.19: Amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu oscilátoru



Obrázek 3.20: Impulzní charakteristika oscilátoru

### 3.6 6. modifikace RC oscilátoru

Obvod je tvořen jedním CCII+, který pracuje jako pásmová propust s modifikovaným Wienovým článkem ( $R_1, R_2, C_1, C_2$ ). Podkritická kladná zpětná vazba filtru je tvořena rezistory  $R_a$  a  $R_b$ . Dále zesilovačem řízeným výstupním signálem (stabilizace amplitudy výstupního signálu). V podkapitole 3.6.1 jsou uvedeny 2 varianty zapojení řízeného zesilovače, první je realizováno zesilovačem s napěťově řízeným zesilovačem VCA810 doplněným servosmyčkou OPA820, které bylo převzato z katalogu [6]. Další zapojení zesilovače s řízeným zesílením je realizováno CCII+ s nelineárním rezistorem ( $R_{d1}, R_{d2}, D1, D2$ ).



Obrázek 3.21: Zapojení RC oscilátoru

Rovnici pro přenosovou funkci získáme pomocí programu SNAP:

$$F(p) = - \frac{p \cdot (R_1 \cdot R_2 \cdot R_b \cdot C_1 + R_1 \cdot R_2 \cdot R_a \cdot C_1) + R_2 \cdot R_b + R_2 \cdot R_a}{p^2 \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_a + C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_b) + R_a + R_b + p \cdot (C_1 \cdot R_1 \cdot R_a + C_2 \cdot R_2 \cdot R_b + C_1 \cdot R_1 \cdot R_b + C_2 \cdot R_2 \cdot R_a - C_1 \cdot R_2 \cdot R_a - C_1 \cdot R_2 \cdot R_b \cdot A)} \quad (3.100)$$

Odvodíme imaginární složku:

$$\omega \cdot \left( C_1 \cdot R_1 \cdot R_a + C_2 \cdot R_2 \cdot R_b + C_1 \cdot R_1 \cdot R_b + C_2 \cdot R_2 \cdot R_a - C_1 \cdot R_2 \cdot R_a \right) - C_1 \cdot R_2 \cdot R_b \cdot A = 0 \quad (3.101)$$

$$(R_1 \cdot C_1 + R_2 \cdot C_2) \cdot (R_a + R_b) - R_2 \cdot C_1 \cdot (R_a + R_b \cdot A) \leq 0 \quad (3.102)$$

$$(R_1 \cdot C_1 + R_2 \cdot C_2) \cdot (R_a + R_b) \leq R_2 \cdot C_1 \cdot (R_a + R_b \cdot A) \quad (3.103)$$

$$\left( \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} \right) \cdot (R_a + R_b) \leq R_a + R_b \cdot A \quad (3.104)$$

$$\frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} \leq \frac{R_a + R_b \cdot A}{R_a + R_b} \quad (3.105)$$

Odvodíme reálnou složku a dostaneme vztah pro  $\omega_0$ :

$$-\omega^2 \cdot (C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_a + C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_b) + R_a + R_b = 0 \quad (3.106)$$

$$R_a + R_b - \omega^2 \cdot (R_a + R_b) \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 = 0 \quad (3.107)$$

$$(R_a + R_b) \cdot (1 - \omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2) = 0 \quad (3.108)$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2}} \quad (3.109)$$

### 3.6.1 Návrh součástek pro RC oscilátor:

Pro RC oscilátor si zvolíme opět kmitočet  $f_0 = 10\text{kHz}$  a protože máme stejnou pásmovou propust jako v podkapitole 2.2.1, použijeme stejné hodnoty součástek. Rezistor  $R_1$  je polovinou rezistoru  $R_2$  ( $R$ ) a kondenzátor  $C_1$  je dvojnásobně větší jako kondenzátor  $C_2$  ( $C$ ):

$$R_1 = 7,95\text{k}\Omega \quad (3.110)$$

$$R_2 = 15,9\text{k}\Omega \quad (3.111)$$

$$C_1 = 2\text{n} \quad (3.112)$$

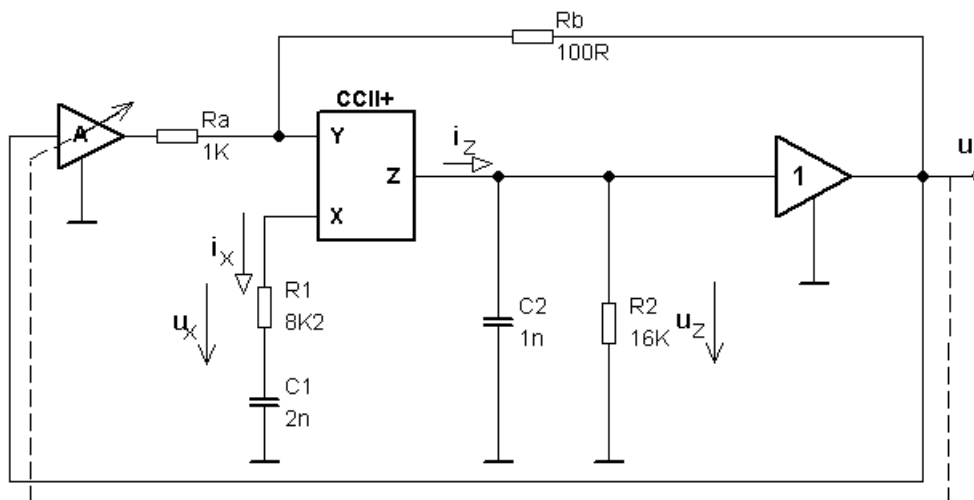
$$C_2 = 1\text{n} \quad (3.113)$$

Hodnoty rezistorů  $R_a, R_b$  zvolíme stejné jako v předchozím oscilátoru (podkapitola 3.5.1) tedy  $R_a = 1\text{k}\Omega$  a  $R_b = 100\Omega$ . Určíme podmínku oscilací, která je závislá na řízeném zesilovači dosazením vypočítaných hodnot  $C_1, C_2, R_1, R_2, R_a, R_b$  do vztahu z rovnice 3.105:

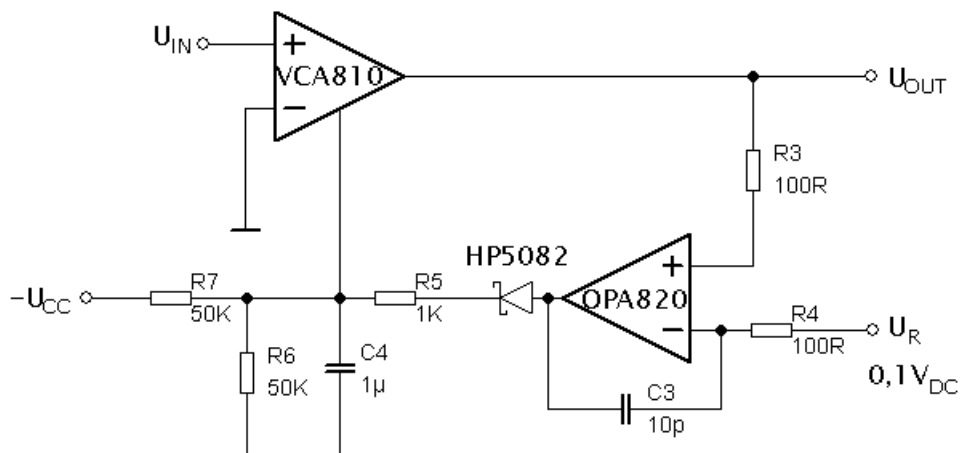
$$\frac{7,95 \cdot 10^3}{15,9 \cdot 10^3} + \frac{1 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-9}} \leq \frac{10^3 + 100 \cdot A}{10^3 + 100} \quad (3.114)$$

$$A \geq 1 \quad (3.115)$$

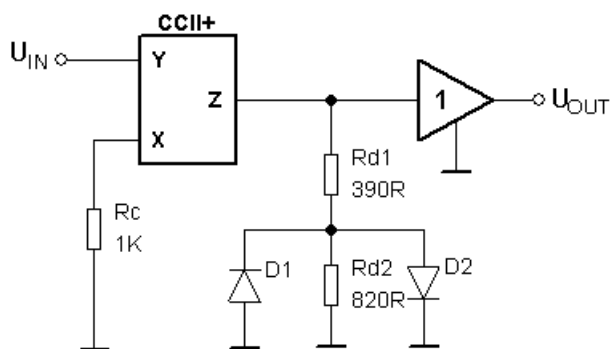
Podmínka oscilací bude splněna, když hodnota zesílení  $A \geq 1$ . Rezistory upravíme podle odporové řady E24 následovně  $R_1 = 8\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 16\text{k}\Omega$ . Rezistory  $R_a = 1\text{k}\Omega$  a  $R_b = 100\Omega$  se v odporové řadě E24 nachází a proto není nutné je měnit. Na obrázku 3.22 je uvedeno zapojení s navrženými součástkami a na obrázcích 3.23, 3.24 jsou zobrazeny dvě varianty zapojení zesilovače řízeného výstupním signálem.



Obrázek 3.22: Zapojení s navrženými součástkami



Obrázek 3.23: 1. varianta zesilovače řízeného výstupním signálem

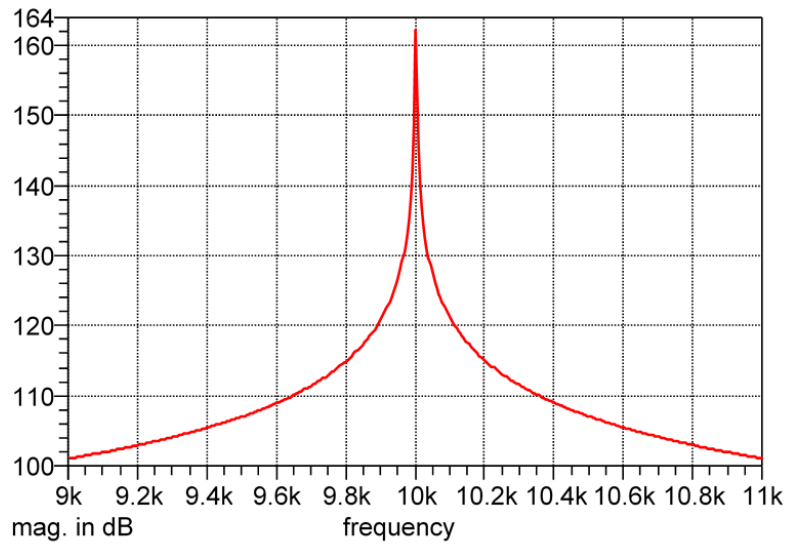


Obrázek 3.24: 2. varianta zesilovače řízeného výstupním signálem

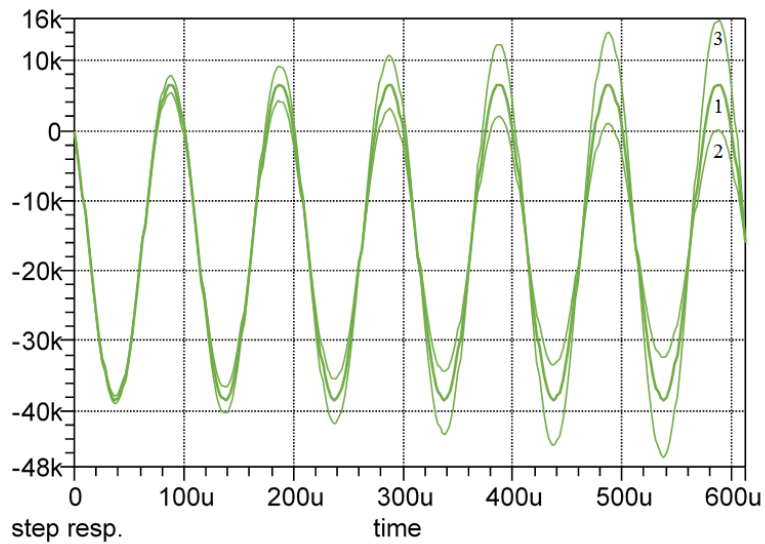
### 3.6.2 Frekvenční a impulzní charakteristika zapojení

Simulace byla provedena s přesnými vypočítanými hodnotami součástek. Na obrázku 3.25 je zobrazena amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu s velice strmým tvarem.

Impulzní charakteristika na obrázku 3.26 byla znázorněna se třemi hodnotami zesílení řízeného zesilovače  $A$  v rozmezí od 0,9 do 1,1. Na sinusovém průběhu označeném v obrázku číslem 1 je nastaveno zesílení na hodnotu 1. Amplituda je stabilní, jelikož je splněna amplitudová podmínka. Na sinusovém průběhu označeném číslem 2 je nastaveno zesílení na hodnotu 0,9. S menším zesílením bude amplituda s přibývajícím časem klesat, až zcela zanikne. Na sinusovém průběhu číslo 3 jsme nastavili zesílení na hodnotu 1,1. Se zvyšujícím se zesílením stoupá i amplituda signálu, která v ideálním případě bude stoupat do nekonečna. Reálně stoupá do určité hodnoty, kde se ustálí a závisí na saturaci výstupního signálu aktivního prvku.



Obrázek 3.25: Amplitudová frekvenční charakteristika autonomního obvodu oscilátoru



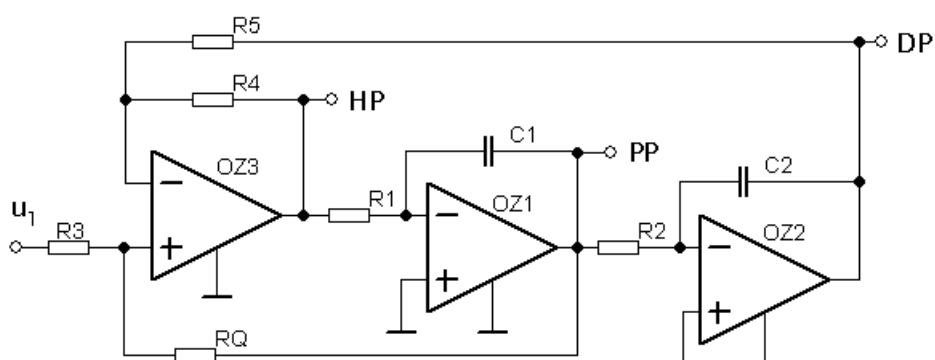
Obrázek 3.26: Impulzní charakteristika oscilátoru

## 4 Analýza ARC bkvadů KHN a TT

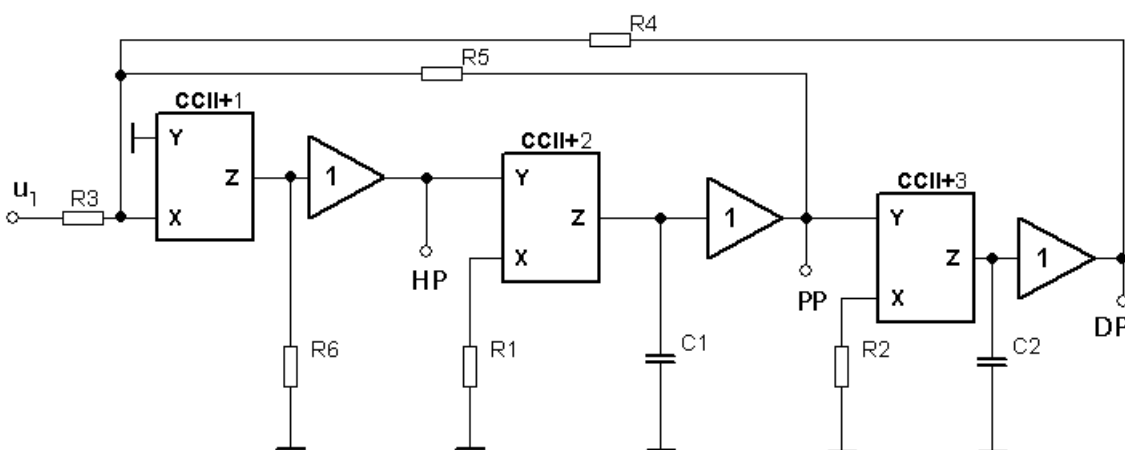
KHN filtr pojmenovaný podle tří autorů W. J. Kerwin, L. P. Huelsman a R. W. Newcomb je často používán v praxi. Důvodem je nízká citlivost na změnu pasivních prvků, nastavitelnost činitele jakosti  $Q$ , šířky pásma  $B$ , středního kmitočtu  $\omega_0$  a přenosu  $K$ . Filtr složený ze tří aktivních prvků představuje přenosové funkce pásmovou propust, dolní propust a horní propust. Přidáním čtvrtého aktivního prvku lze realizovat i pásmovou zadrž. Další filtr TT (Tow-Thomas) je modifikací filtru KHN. Oproti filtru KHN nerealizuje přenosovou funkci horní propust a lze jej realizovat pouze dvěma aktivními prvky CCII+ [10], [11].

### 4.1 KHN filtr realizovaný třemi CCII+

Obvod je modifikací známého zapojení KHN filtru s operačními zesilovači (obrázek 4.1), které jsme nahradili proudovými konvejory CCII+ (obrázek 4.2). Tvoří ho součtový zesilovač, dva integrátory a dvě zpětné vazby tvořeny rezistory  $R_4$  a  $R_5$ . Svorka PP představuje přenosovou funkci pásmová propust, přenosovou funkci dolní propust představuje svorka DP a horní propust představuje svorka HP.



Obrázek 4.1: Zapojení KHN filtru s operačními zesilovači



Obrázek 4.2: Zapojení KHN filtru s proudovými konvejory CCII+

K odvození přenosových funkcí PP, DP a HP použijeme program pro symbolickou analýzu SNAP:



$$F_{PP}(p) = -\frac{p \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 + p \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_6 + R_3 \cdot R_5 \cdot R_6} =$$

$$-\frac{\frac{p \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5}}{p^2 + p \cdot \frac{C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_6}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5} + \frac{R_3 \cdot R_5 \cdot R_6}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5}} = -\frac{\frac{p \cdot R_6}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_3}}{p^2 + p \cdot \frac{R_6}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_5} + \frac{R_6}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_4}} \quad (4.1)$$

$$F_{DP}(p) = -\frac{R_4 \cdot R_5 \cdot R_6}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 + p \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_6 + R_3 \cdot R_5 \cdot R_6} =$$

$$-\frac{\frac{R_6}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}}{p^2 + p \cdot \frac{R_6}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_5} + \frac{R_6}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_4}} \quad (4.2)$$

$$F_{HP}(p) = -\frac{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 + p \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_6 + R_3 \cdot R_5 \cdot R_6} =$$

$$-\frac{\frac{p^2 \cdot R_6}{R_3}}{p^2 + p \cdot \frac{R_6}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_5} + \frac{R_6}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_4}} \quad (4.3)$$

Odvodíme vztahy pro  $\omega_0$ ,  $B$ ,  $K$  a  $Q$ :

$$\omega_0^2 = \frac{R_6}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_4} \rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{R_6}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_4}} \quad (4.4)$$

$$B = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{R_6}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_5} \quad (4.5)$$

$$K = -\frac{\frac{R_6}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_3}}{\frac{R_6}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_5}} = -\frac{C_1 \cdot R_1 \cdot R_5 \cdot R_6}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot R_6} = -\frac{R_5}{R_3} \quad (4.6)$$

$$Q = \frac{\omega_0}{B} = \frac{\sqrt{\frac{R_6}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_4}}}{\frac{R_6}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_5}} = \frac{\sqrt{\frac{R_6}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_4}} \cdot C_1 \cdot R_1 \cdot R_5}{R_6} = \frac{R_6 \cdot C_1^2 \cdot R_1^2 \cdot R_5^2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_4} \cdot \frac{1}{R_6^2} =$$

$$\frac{R_1 \cdot R_5^2 \cdot C_1}{C_2 \cdot R_2 \cdot R_4 \cdot R_6} = R_5 \cdot \sqrt{\frac{R_1 \cdot C_1}{R_2 \cdot R_4 \cdot R_6 \cdot C_2}} = R_5 \cdot \sqrt{\frac{R_1 \cdot C_1}{R_2 \cdot C_2} \cdot \frac{1}{R_4 \cdot R_6}} \quad (4.7)$$

#### 4.1.1 Návrh součástek pro KHN filtr

Pro KHN filtr si zvolíme kmitočet  $f_0 = 10 \text{ kHz}$ . Abychom určili hodnoty rezistorů  $R_3$  a  $R_5$ , zvolíme přenos na středním kmitočtu  $K = 1$ :

$$K = -\frac{R_5}{R_3} = 1 \quad (4.8)$$

Protože poměr rezistorů  $R_5$  a  $R_3 = 1$ , zvolíme rezistory  $R_3 = R_5 = R_A = 10 \text{ k}\Omega$ . Prvky CCII+2,  $R_1$ ,  $C_1$  a CCII+3  $R_2$ ,  $C_2$  tvoří integrátory, proto můžeme zvolit  $R_1 = R_2 = R = 15,9 \text{ k}\Omega$  a  $C_1 = C_2 = C = 1 \text{ n}$  (hodnoty byly převzaty z podkapitoly 2.2.1), jelikož platí vztah:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 15,9 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} \approx 10 \text{ kHz} \quad (4.9)$$

Hodnoty rezistorů  $R_4$  a  $R_6$  vypočítáme dosazením do vztahu pro  $Q$ , kde zvolíme  $Q = 1/\sqrt{2}$  a  $R_4 = R_6 = R_B$ :

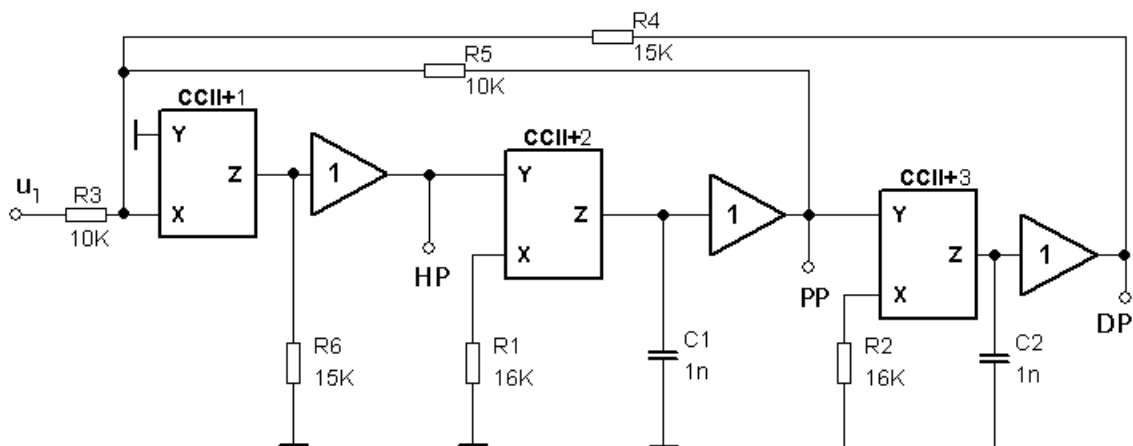
$$Q = R_5 \cdot \sqrt{\frac{R_1 \cdot C_1}{R_2 \cdot C_2} \cdot \frac{1}{R_4 \cdot R_6}} \quad (4.10)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = 10 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{1 \cdot \frac{1}{R_B^2}} \quad (4.11)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{10 \cdot 10^3}{R_B} \quad (4.12)$$

$$R_B = 10 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{2} = 14,14k\Omega \quad (4.13)$$

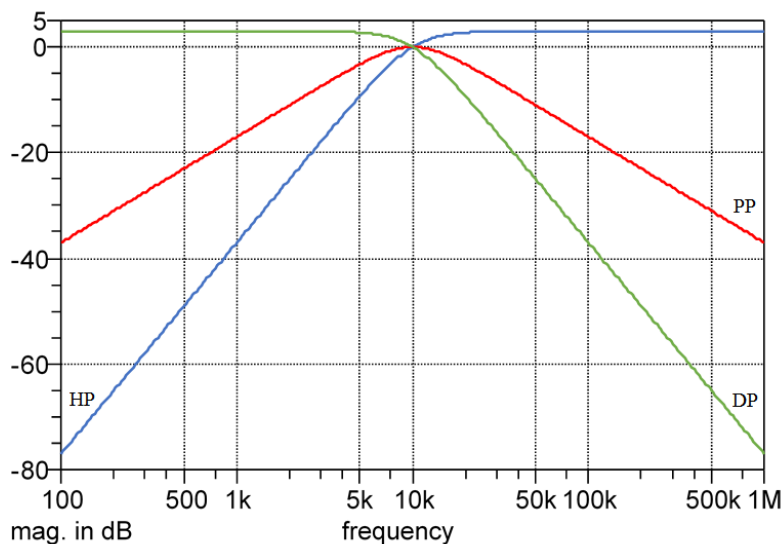
Rezistory upravíme podle odporové řady E24 následovně  $R_1 = R_2 = 16k$ ,  $R_4 = R_6 = 15k$ . Ostatní pasivní prvky se v odporové řadě E24 nachází a proto není nutné je měnit. Na obrázku 4.3 je uvedeno zapojení s navrhnutými součástkami.



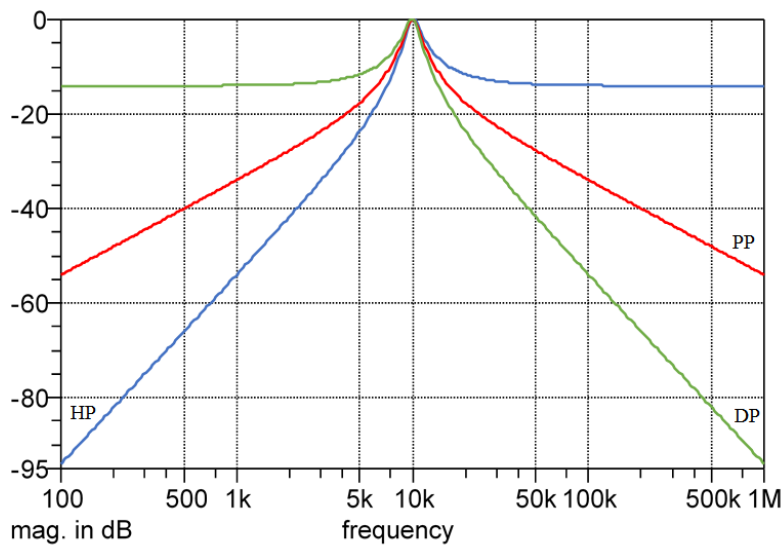
Obrázek 4.3: Zapojení KHN filtru s navrhnutými součástkami

#### 4.1.2 Amplitudové frekvenční charakteristiky zapojení

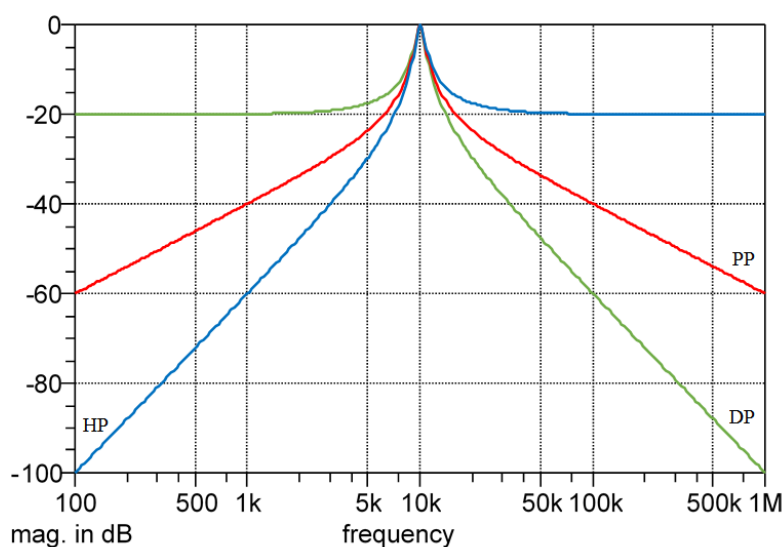
Simulace byla provedena s přesnými vypočítanými hodnotami součástek. Na obrázcích 4.4, 4.5 a 4.6 jsou zobrazeny amplitudové frekvenční charakteristiky horní propusti (modře), dolní propusti (zeleně) a pásmové propusti (červeně) pro tři hodnoty činitele jakosti  $Q = 0,707$ ; 5 a 10.



Obrázek 4.4: Amplitudové frekvenční charakteristiky KHN filtru pro  $Q = 0,707$



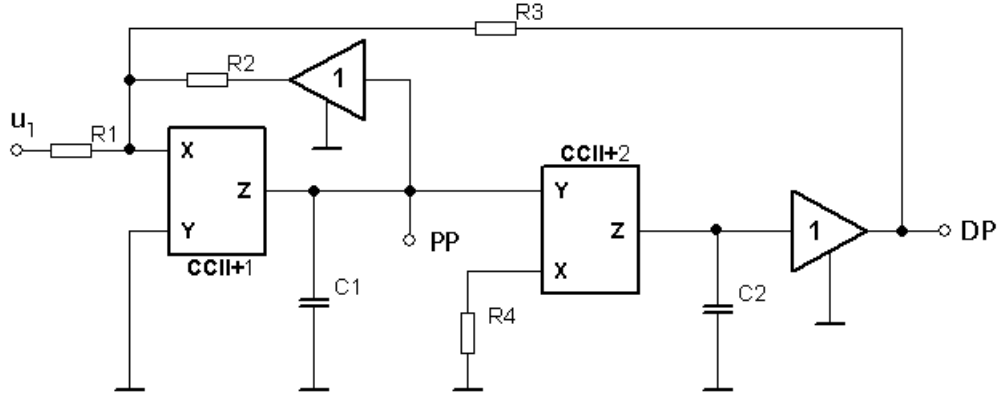
Obrázek 4.5: Amplitudové frekvenční charakteristiky KHN filtru pro  $Q = 5$



Obrázek 4.6: Amplitudové frekvenční charakteristiky KHN filtru pro  $Q = 10$

## 4.2 TT filtr realizovaný dvěma CCII+

Obvod je tvořen dvěma integrátory a dvěma zpětnými vazbami tvořenými rezistory  $R_2$  a  $R_3$ . Svorka PP představuje přenosovou funkci pásmová propust, přenosovou funkci dolní propust představuje svorka DP.



Obrázek 4.7: Zapojení filtru TT s proudovými konvejory CCII+

K odvození přenosových funkcí PP a DP použijeme program pro symbolickou analýzu SNAP:

$$F_{PP}(p) = -\frac{p \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 + p \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot R_4 + R_1 \cdot R_2} = -\frac{\frac{p \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4}}{p^2 + p \cdot \frac{C_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot R_4}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4} + \frac{R_1 \cdot R_2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4}} = -\frac{\frac{p}{C_1 \cdot R_1}}{p^2 + p \cdot \frac{1}{C_1 \cdot R_2} + \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_3 \cdot R_4}} \quad (4.14)$$

$$F_{DP}(p) = -\frac{R_2 \cdot R_3}{p^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 + p \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot R_4 + R_1 \cdot R_2} = -\frac{\frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4}}{p^2 + p \cdot \frac{1}{C_1 \cdot R_2} + \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_3 \cdot R_4}} \quad (4.15)$$

Odvodíme vztahy pro  $\omega_0$ ,  $B$ ,  $K$  a  $Q$ :

$$\omega_0^2 = \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_3 \cdot R_4} \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_3 \cdot R_4}} \quad (4.16)$$

$$B = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{1}{C_1 \cdot R_2} \quad (4.17)$$

$$K = -\frac{\frac{1}{C_1 \cdot R_1}}{\frac{1}{C_1 \cdot R_2}} = -\frac{C_1 \cdot R_2}{C_1 \cdot R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4.18)$$

$$Q = \frac{\omega_0}{B} = \frac{\frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_3 \cdot R_4}}}{\frac{1}{C_1 \cdot R_2}} = \frac{C_1 \cdot R_2}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_3 \cdot R_4}} = \frac{C_1^2 \cdot R_2^2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_3 \cdot R_4} = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{R_2^2}{R_3 \cdot R_4} = R_2 \cdot \sqrt{\frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1}{R_3 \cdot R_4}} \quad (4.19)$$

#### 4.2.1 Návrh součástek pro TT filtr

Pro KHN filtr si zvolíme kmitočet  $f_0 = 10\text{kHz}$ , rezistory  $R_3 = R_4 = R = 1,6\text{k}\Omega$  a kondenzátory  $C_1 = C_2 = C = 10\text{n}$ . Abychom určili hodnoty rezistorů  $R_1$  a  $R_2$ , zvolíme přenos na středním kmitočtu  $K = 1$ :

$$K = -\frac{R_2}{R_1} = 1 \quad (4.20)$$

Protože poměr rezistorů  $R_2$  a  $R_1 = 1$ , zvolíme rezistory  $R_1 = R_2$ . Hodnoty dosadíme do vztahu pro  $Q$ , kde zvolíme  $Q = 1/\sqrt{2}$ , 5, 10. Výpočet obvodových prvků pro  $Q = 10$ :

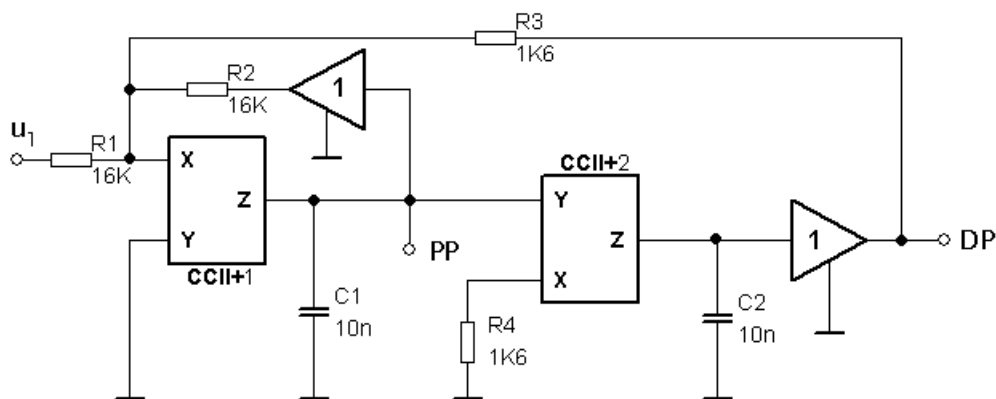
$$Q = R_2 \cdot \sqrt{\frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1}{R_3 \cdot R_4}} \quad (4.21)$$

$$10 = R_2 \cdot \sqrt{1 \cdot \frac{1}{1600^2}} \quad (4.22)$$

$$10 = R_2 \cdot \frac{1}{1600} \quad (4.23)$$

$$R_2 = R_1 = 1600 \cdot 10 = 16k\Omega \quad (4.24)$$

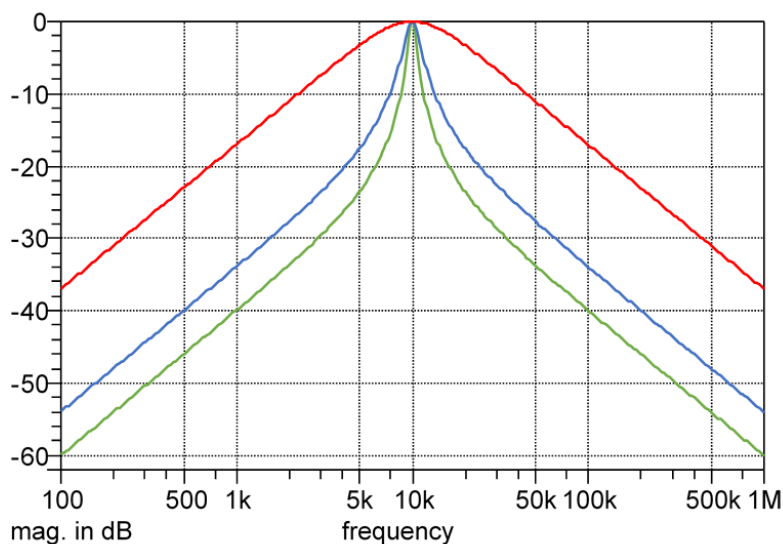
Všechny hodnoty rezistorů se nachází v odporové řadě E24. Na obrázku 4.8 je uvedeno zapojení TT filtru s navrhnutými součástkami.



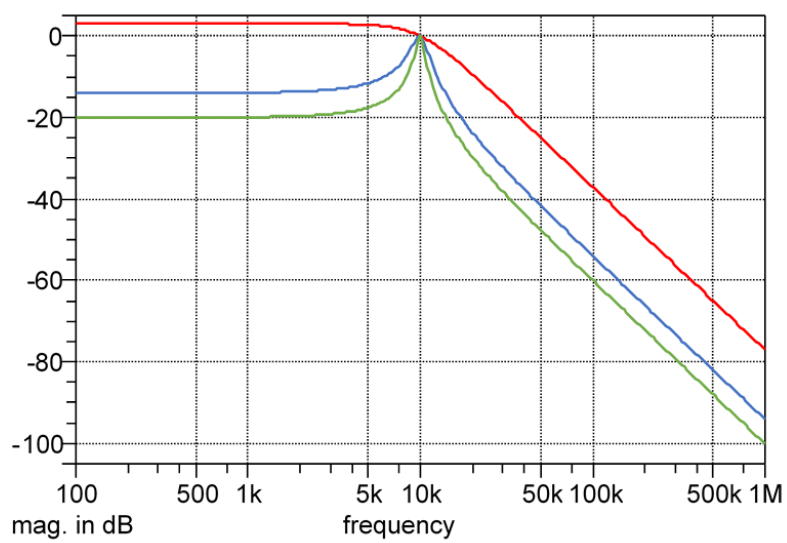
Obrázek 4.8: Zapojení filtru TT s navrhnutými součástkami

#### 4.2.2 Amplitudové frekvenční charakteristiky zapojení

Simulace byla provedena s přesnými vypočítanými hodnotami součástek. Na obrázcích 4.9 a 4.11 jsou zobrazeny amplitudové frekvenční charakteristiky dolní propusti a pásmové propusti pro tři hodnoty činitele jakosti  $Q = 0,707$  (červeně),  $Q = 5$  (modře) a  $Q = 10$  (zeleně).



Obrázek 4.9: Amplitudové frekvenční charakteristiky pásmové propusti TT filtru



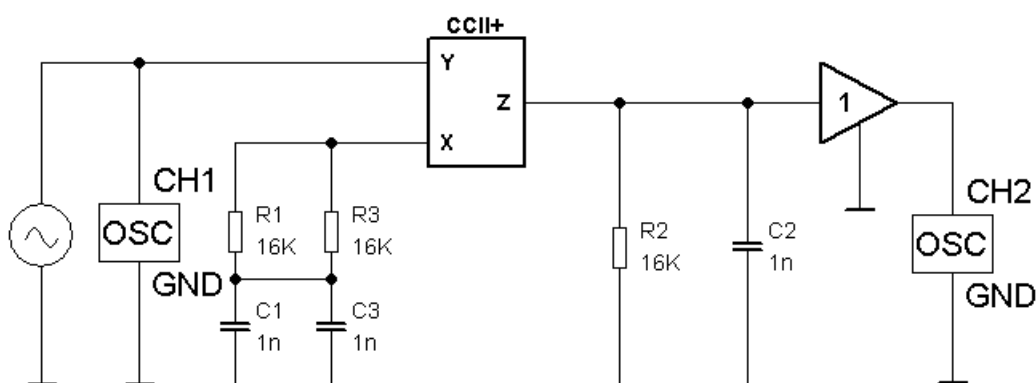
Obrázek 4.10: Amplitudové frekvenční charakteristiky dolní propusti TT filtru

## 5 Experimentální ověření

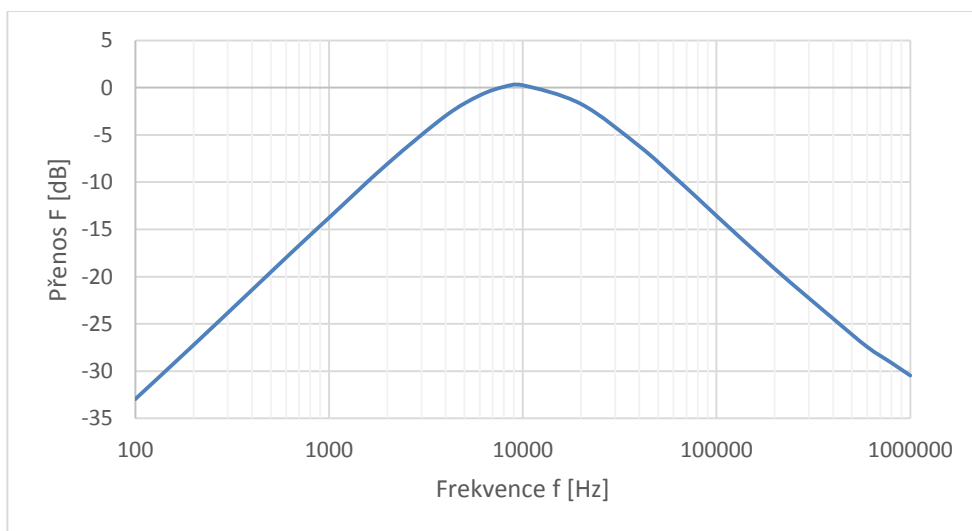
Zapojení pásmových propustí a oscilátorů byla napájena na plošný spoj. Filtry KHN a TT byly realizovány na nepájivém poli. Komerční aktivní prvek, který realizoval CCII+, byl zvolen AD844. Použité přístroje: digitální osciloskop Tektronix TDS 2002B, funkční generátor Agilent 33210A a napájecí zdroj Diametral P230R51D.

### 5.1 Pásmová propust realizovaná aktivním prvkem CCII+

Na CCII+ se přivádí napájecí napětí  $+U_{cc} = 15V$  a  $-U_{cc} = 15V$ , vstupní napětí  $U_{1pp}$  se pohybovalo od 400 do 412mV. Tabulka naměřených hodnot je uvedena v příloze A (tabulka A.1). Popis zapojení je uveden v kapitole 2.2.



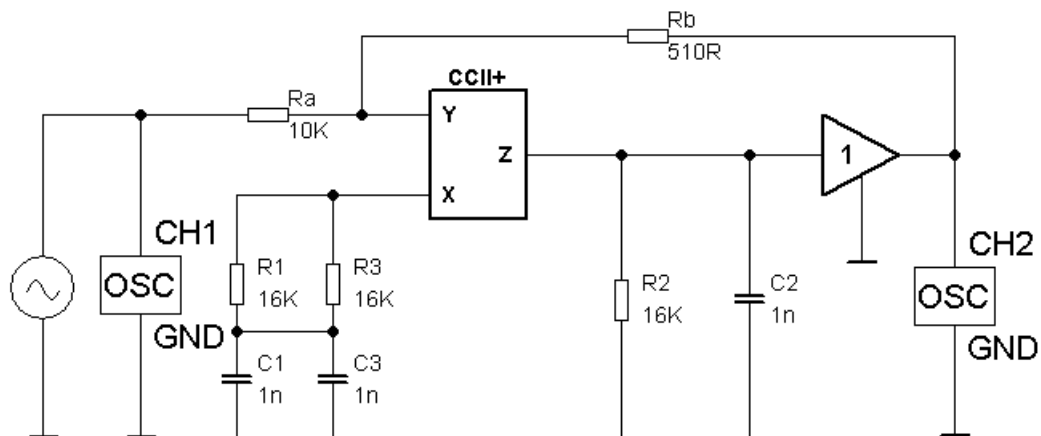
Obrázek 5.1: Realizované zapojení pásmové propusti



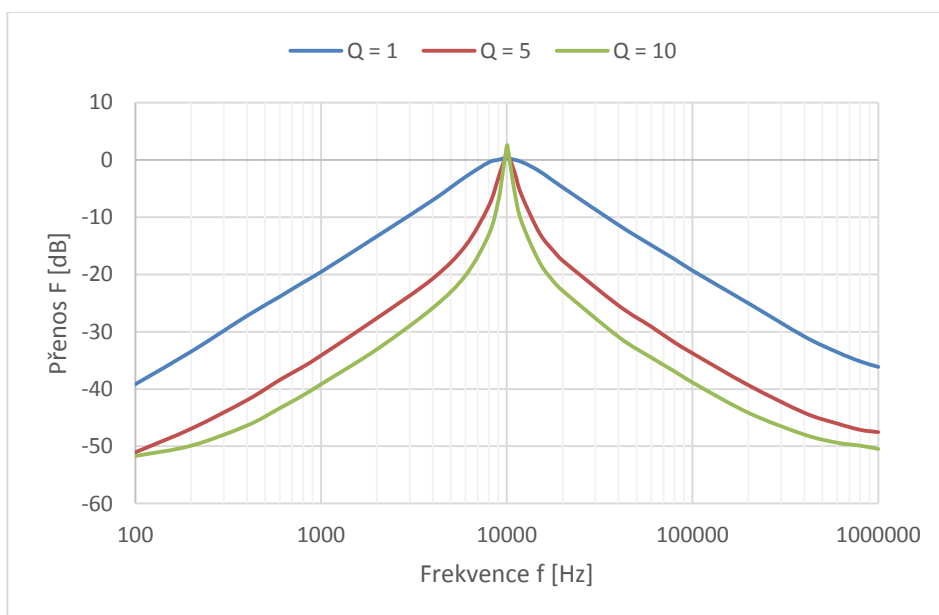
Obrázek 5.2: Amplitudová frekvenční charakteristika pásmové propusti

## 5.2 Pásmová propust realizovaná CCII+ s podkritickou kladnou zpětnou vazbou

Na CCII+ se přivádí opět napájecí napětí  $+U_{cc} = 15V$  a  $-U_{cc} = 15V$ , vstupní napětí  $U_{1pp}$  se pohybovalo od 400 do 408mV. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze A (tabulka A.2, A.3, A.4). Zapojení bylo změřeno pro činitele jakosti  $Q = 1$  ( $R_b = 10k\Omega$ ),  $Q = 5$  ( $R_b = 1k\Omega$ ) a  $Q = 10$  ( $R_b = 510\Omega$ ). Popis zapojení je uveden v kapitole 2.3.



Obrázek 5.3: Realizované zapojení pásmové propusti s podkritickou kladnou ZV pro  $Q = 10$



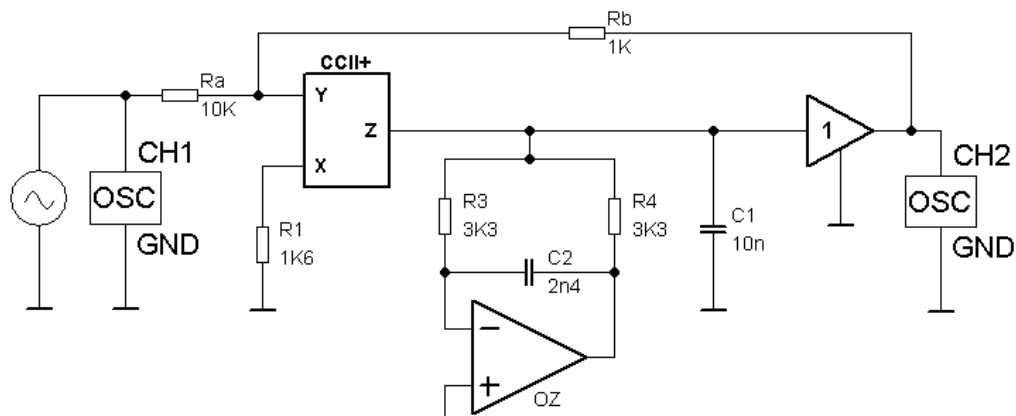
Obrázek 5.4: Amplitudové frekvenční charakteristiky pásmové propusti

## 5.3 Pásmová propust se syntetickým induktorem s podkritickou kladnou ZV

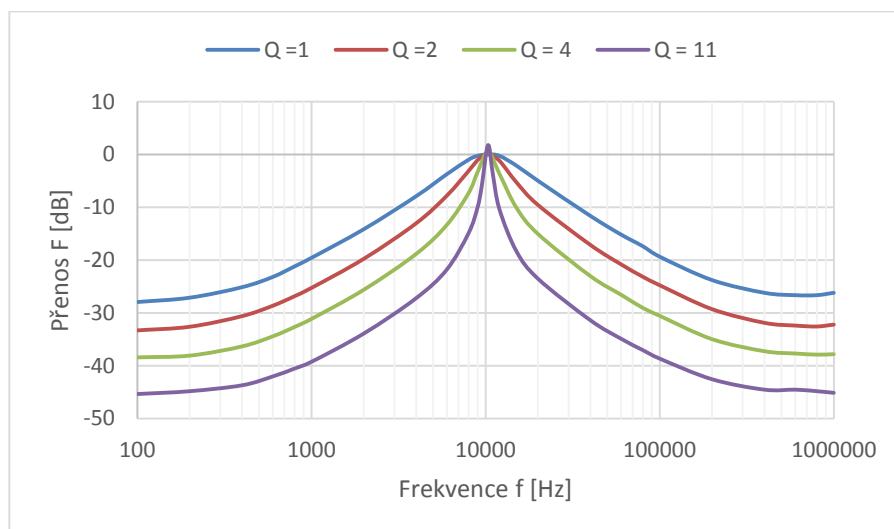
Na CCII+ se přivádí opět napájecí napětí  $+U_{cc} = 15V$  a  $-U_{cc} = 15V$ , vstupní napětí  $U_{1pp}$  se pohybovalo od 396 do 408mV. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze A (tabulka A.5,



A.6, A.7 a A.8). Zapojení bylo změřeno pro činitele jakosti  $Q = 1$  (bez zpětné vazby),  $Q = 2$  ( $R_b = 10k\Omega$ ),  $Q = 4$  ( $R_b = 3,3k\Omega$ ) a  $Q = 11$  ( $R_b = 1k\Omega$ ). Popis zapojení je uveden v kapitole 2.4.



Obrázek 5.5: Realizované zapojení pásmové propusti se syntetickým induktorem pro  $Q = 11$

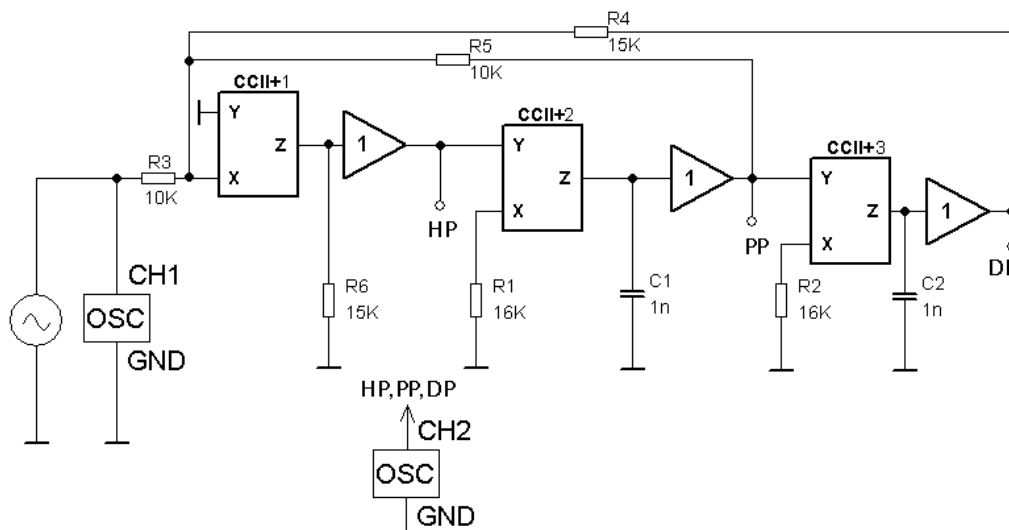


Obrázek 5.6: Amplitudové frekvenční charakteristiky pásmové propusti

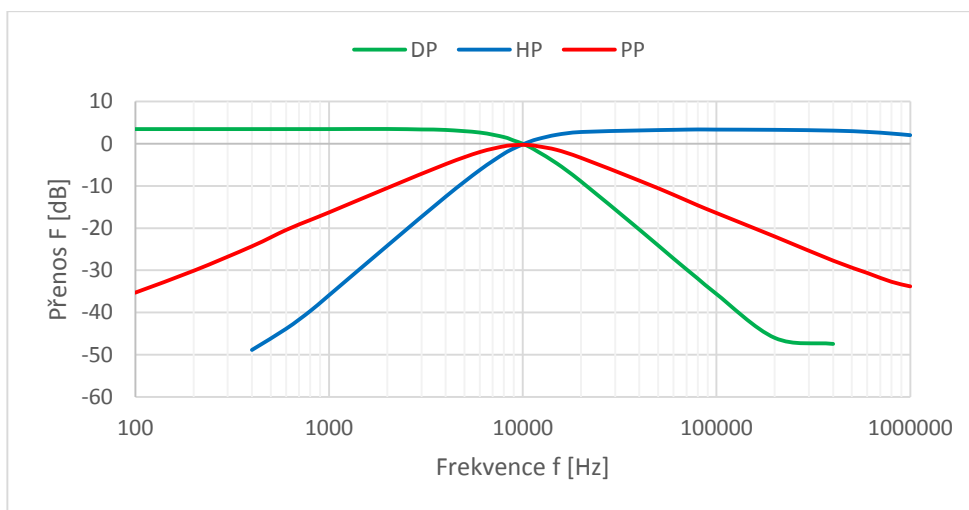
#### 5.4 KHN filtr realizovaný třemi CCII+

Na CCII+1, CCII+2 a CCII+3 se přivádí opět napájecí napětí  $+U_{cc} = 15V$  a  $-U_{cc} = 15V$ , vstupní napětí  $U_{1pp}$  se pohybovalo od 198 do 206mV. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze A (tabulka A.9, A.10, A.11, A.12, A.13 a A.14). Zapojení bylo změřeno pro činitele jakosti  $Q = 0,707$  ( $R_4 = R_6 = 15k\Omega$ ) a  $Q = 5$  ( $R_4 = R_6 = 2k\Omega$ ). Popis zapojení je uveden v kapitole 4.1.

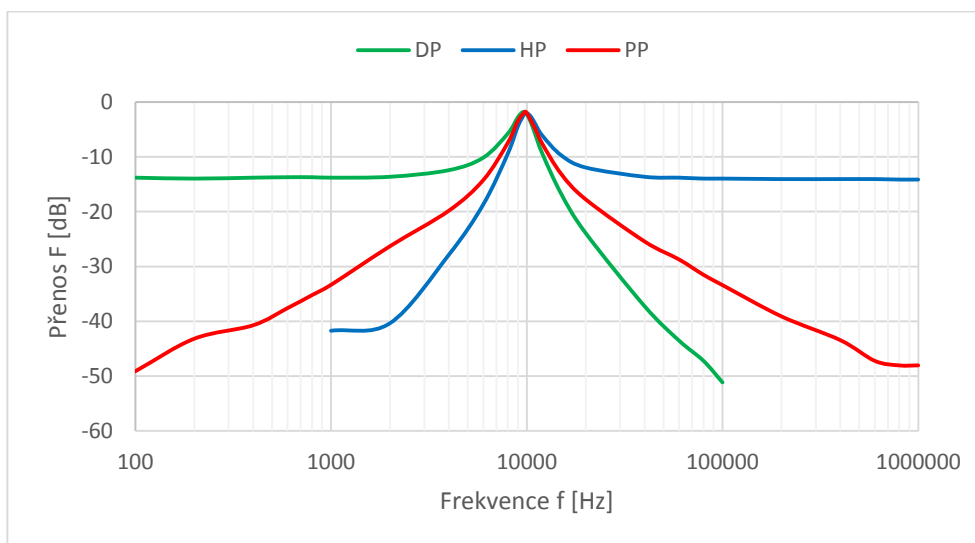
Horní propust s činitelem jakosti  $Q = 5$  se nepodařilo změřit pro frekvence 1000Hz a menší. Dolní propust byla změřena pouze do frekvence 100kHz. Důvodem bylo, že amplituda výstupního signálu  $U_{2pp}$  byla na hranici rozlišovací schopnosti osciloskopu. Horní propust s činitelem jakosti  $Q = 0,707$  nebylo možné změřit v rozmezí 100-400Hz a dolní propust v rozmezí 0,4MHz-1MHz. Pásmová propust s oběma činiteli jakosti byla měřitelná od 100Hz do 1MHz.



Obrázek 5.7: Realizované zapojení filtru KHN pro  $Q = 0,707$



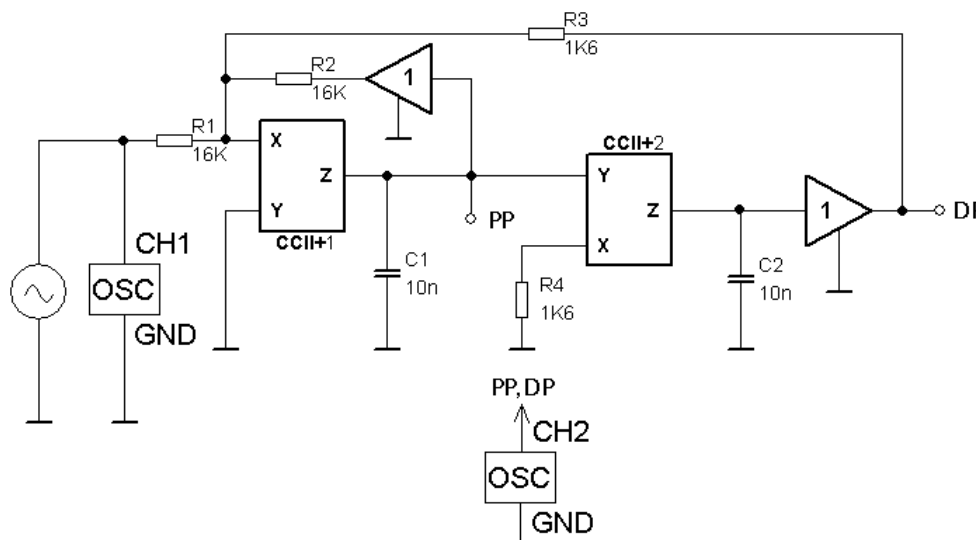
Obrázek 5.8: Amplitudové frekvenční charakteristiky KHN filtru pro  $Q = 0,707$



Obrázek 5.9: Amplitudové frekvenční charakteristiky KHN filtru pro  $Q = 5$

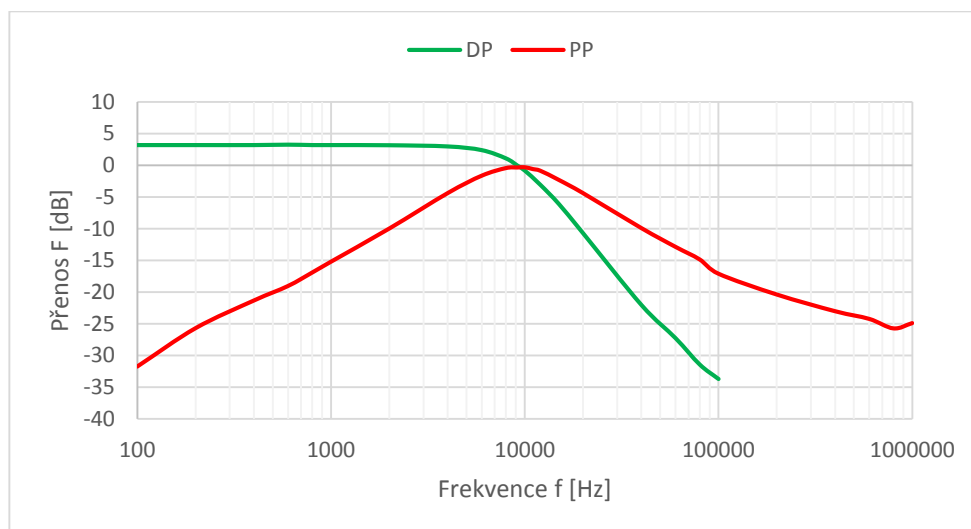
## 5.5 TT filtr realizovaný dvěma CCII+

Na CCII+1 a CCII+2 se přivádí opět napájecí napětí  $+U_{cc} = 15V$  a  $-U_{cc} = 15V$ , vstupní napětí  $U_{1pp}$  se pohybovalo od 388 do 408mV. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze A (tabulka A.15, A.16, A.17 a A.18). Zapojení bylo změřeno pro činitele jakosti  $Q = 0,707$  ( $R_1 = R_2 = 16k\Omega$ ) a  $Q = 5$  ( $R_1 = R_2 = 8,2k\Omega$ ). Popis zapojení je uveden v kapitole 4.2.



Obrázek 5.10: Realizované zapojení TT filtru pro  $Q = 0,707$

Pásmovou propust s činitelem jakosti  $Q = 5$  se nepodařilo změřit pro frekvence 1000Hz a menší stejně jako u KHN filtru a dále byla neměřitelná od 600kHz. Dolní propust byla změřena pouze do frekvence 100kHz. Pásmová propust s činitelem jakosti  $Q = 0,707$  vykazuje od 800kHz zkreslené hodnoty, jelikož jsme přesáhli rozlišovací schopnosti osciloskopu. Dolní propust nebylo možné změřit v rozmezí 0,1-1MHz.



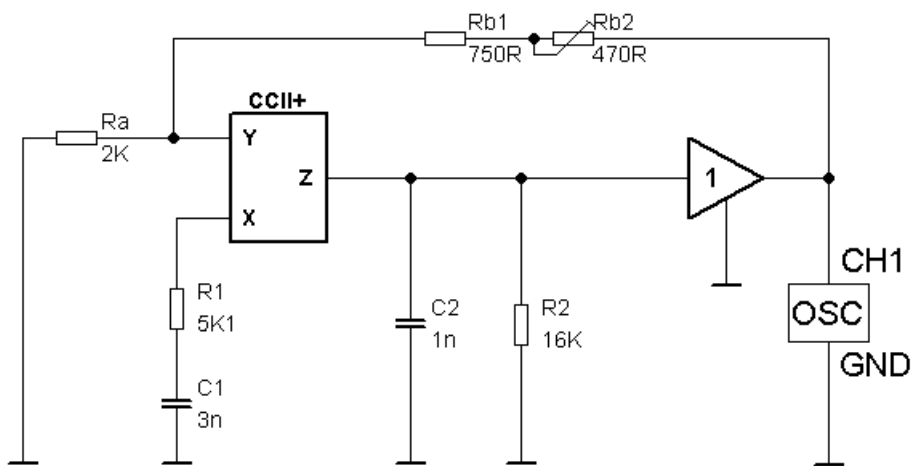
Obrázek 5.11: Amplitudové frekvenční charakteristiky TT filtru pro  $Q = 0,707$



Obrázek 5.12: Amplitudové frekvenční charakteristiky TT filtru pro  $Q = 5$

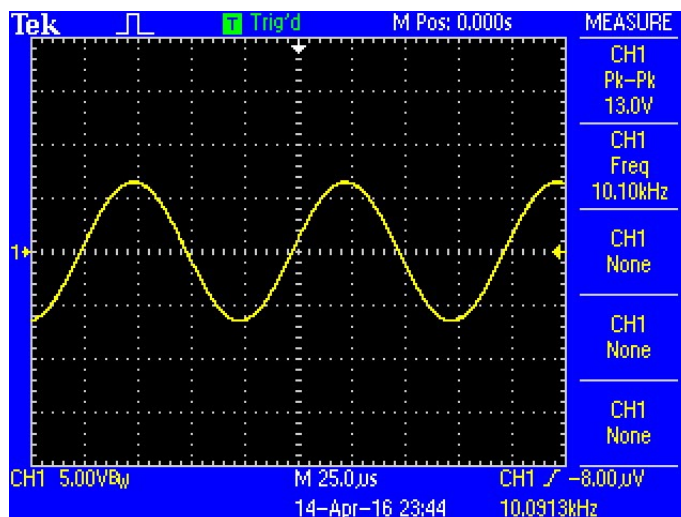
### 5.6 1. modifikace RC oscilátoru

Na CCII+ se přivádí opět napájecí napětí  $+U_{cc} = 15V$  a  $-U_{cc} = 15V$ . Zpětnovazební rezistor  $R_b$  byl nahrazen rezistorem  $R_{b1} = 750\Omega$  a trimrem  $R_{b2} = 470\Omega$ , kterým dostavujeme obvod, aby se rozkmital. Popis zapojení je uveden v kapitole 3.1.

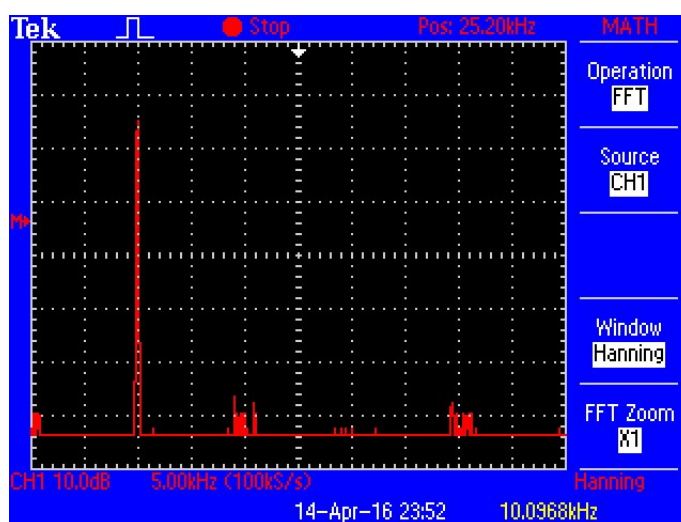


Obrázek 5.13: Realizované zapojení oscilátoru

Na obrázku 5.14 je zobrazen časový průběh oscilátoru. Změřený mezní kmitočet má hodnotu  $f_0 = 10,1kHz$  a napětí  $U_{2pp} = 13V$ . Amplituda sinusového signálu je tedy  $6,5V$ . Na obrázku 5.15 je zobrazeno frekvenční spektrum generovaného signálu oscilátorem. Základní harmonická frekvence je  $f_0 = 10,1kHz$ , v oblasti kolem  $20kHz$  a  $40kHz$  vidíme další harmonické složky (druhá a čtvrtá).



Obrázek 5.14: Časový průběh výstupního signálu oscilátoru

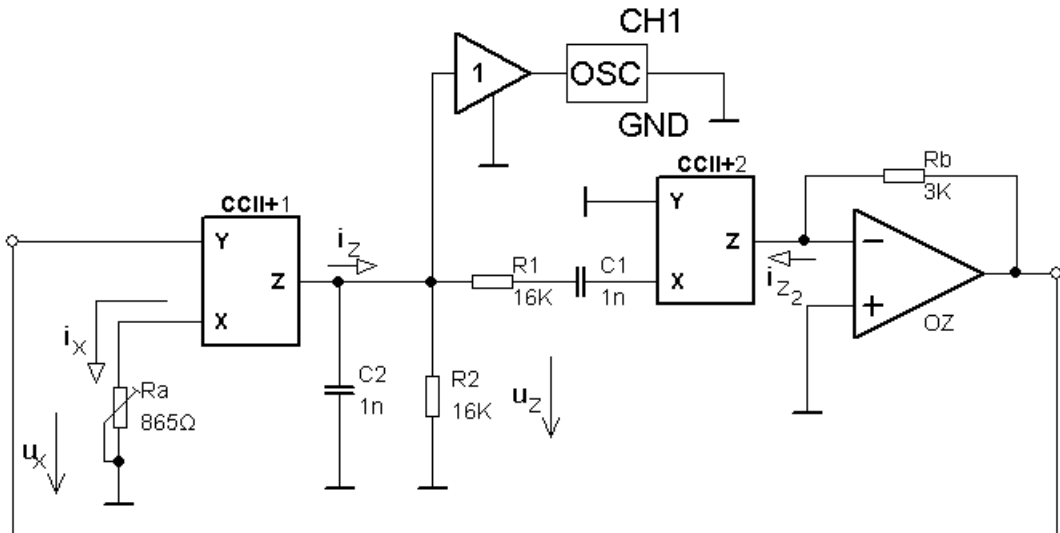


Obrázek 5.15: Frekvenční spektrum generovaného signálu oscilátorem

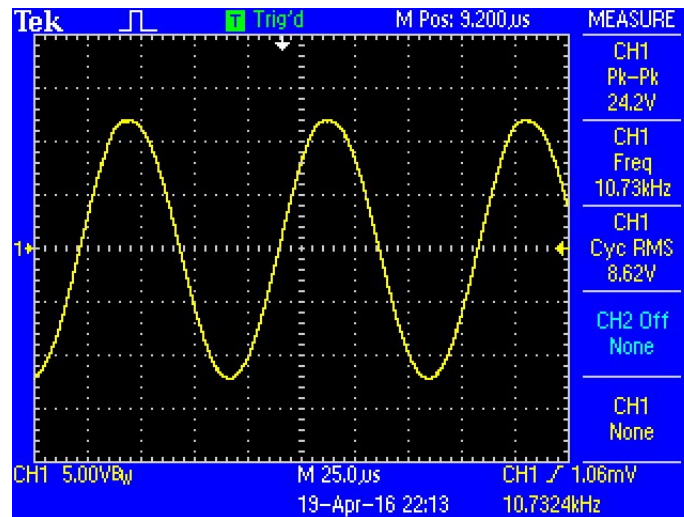
## 5.7 2. modifikace RC oscilátoru

Na CCII+1 a CCII+2 se přivádí opět napájecí napětí  $+U_{cc} = 15V$  a  $-U_{cc} = 15V$ . Rezistor  $R_a = 1k\Omega$  byl nahrazen trimrem  $R_a = 865\Omega$ , kterým dostavujeme obvod, aby se rozkmital. Zesílení musí být rovno 3 nebo lehce přes hodnotu, aby signál nedosáhl saturace. Popis zapojení je uveden v kapitole 3.2.

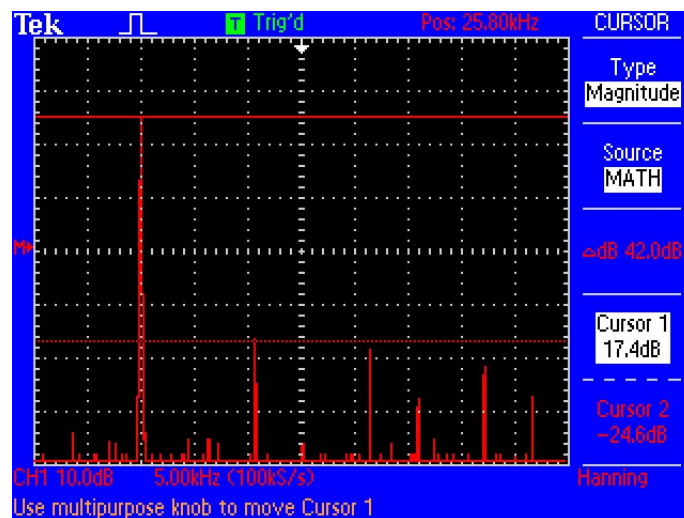
Na obrázku 5.17 je zobrazen časový průběh oscilátoru. Změřený mezní kmitočet má hodnotu  $f_0 = 10,73kHz$  a napětí  $U_{2pp} = 24,2V$ . Amplituda sinusového signálu je tedy  $12,1V$  a je lehce zkreslená. Na obrázku 5.18 je zobrazeno frekvenční spektrum generovaného signálu oscilátorem. Základní harmonická frekvence je  $f_0 = 10,73kHz$ , vyšší harmonické složky druhá, třetí a čtvrtá jsou výraznější než u předcházejícího zapojení oscilátoru.



Obrázek 5.16: Realizované zapojení oscilátoru



Obrázek 5.17: Časový průběh výstupního signálu oscilátoru

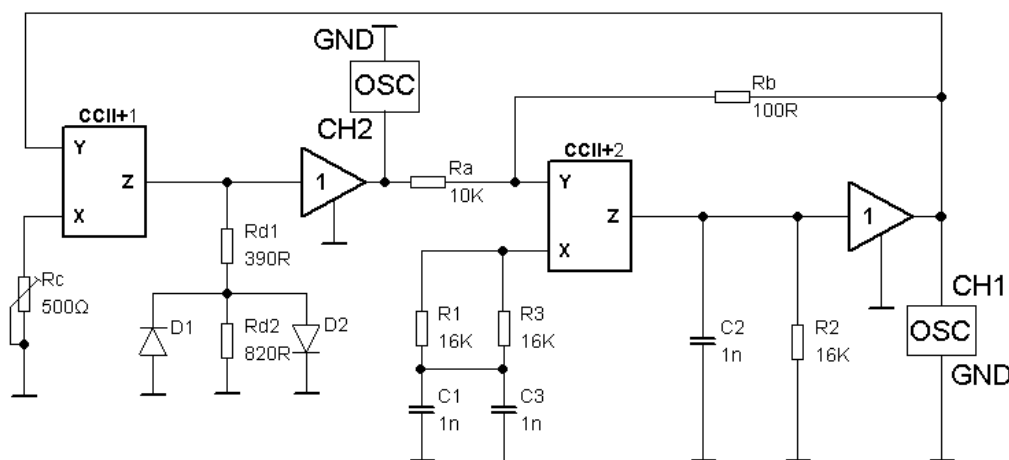


Obrázek 5.18: Frekvenční spektrum generovaného signálu oscilátorem

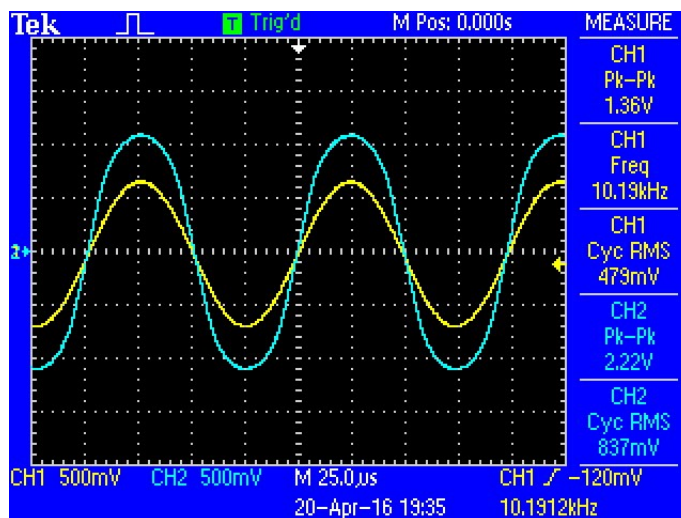
## 5.8 6. modifikace RC oscilátoru

Na CCII+1 a CCII+2 se přivádí opět napájecí napětí  $+U_{cc} = 15V$  a  $-U_{cc} = 15V$ . Rezistor  $R_c$  byl nahrazen trimrem  $R_c = 500\Omega$ , kterým dostavujeme obvod, aby se rozkmital. Popis zapojení je uveden v kapitole 3.6.

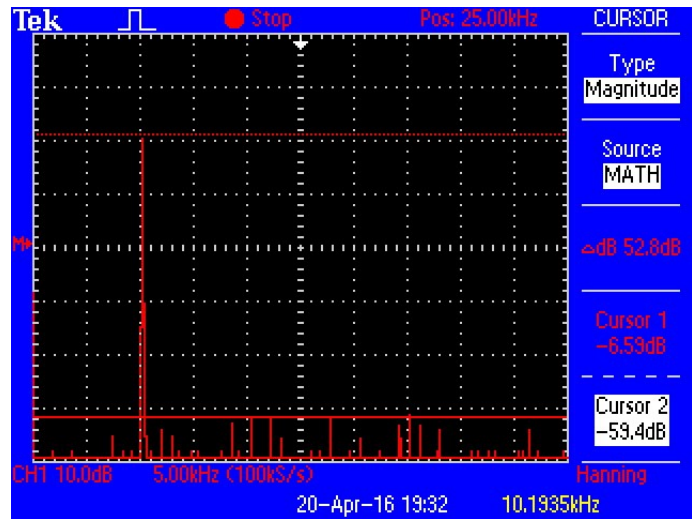
Na obrázku 5.20 je zobrazen časový průběh oscilátoru. Změřený mezní kmitočet má hodnotu  $f_0 = 10,19kHz$ , napětí zobrazené kanálem CH1  $U_{2pp} = 1,36V$  a napětí zobrazené kanálem CH2  $U_{2pp} = 2,22V$ . Amplituda sinusového signálu  $U_{2pp}$  je tedy  $0,68V$  a  $U_{2pp}$  je  $1,11V$ . Na obrázku 5.21 je zobrazeno frekvenční spektrum generovaného signálu oscilátorem. V oblasti frekvence  $f_0 = 10,19kHz$  vidíme hlavní harmonickou, ostatní harmonické složky jsou na úrovni šumu. Odstup první harmonické od šumu je  $-52dB$ .



Obrázek 5.19: Realizace zapojení oscilátoru



Obrázek 5.20: Časový průběh výstupních signálů oscilátoru



Obrázek 5.21: Frekvenční spektrum generovaného signálu oscilátorem



## Závěr

V práci bylo prezentováno několik moderních komerčně dostupných aktivních prvků představujících pozitivní proudový konvektor druhé generace, dále zapojení filtrů typu pásmová propust, RC oscilátorů a univerzálních filtrů KHN a TT. Všechny tyto zapojení byly navrženy pro kmitočty 10kHz a aktivní prvek realizující CCII+ byl zvolen AD844.

Pásmové propusti byly doplněny o podkritickou kladnou zpětnou vazbu a zkoumalo se, jaký má vliv na tyto filtry. Podkritická vazba slouží ke zvýšení činitele jakosti při zachování dynamického rozsahu zpracovaného signálu. Výhody jsou, že přenos na středním kmitočtu a střední kmitočet se nebudou měnit v závislosti na změně činitele jakosti. Činitel jakosti nastavujeme změnou poměru zpětnovazebních rezistorů. Pro zajištění stability pásmových propustí s podkritickou kladnou zpětnou vazbou musí být všechny koeficienty charakteristické rovnice kladné, proto volíme přenos na středním kmitočtu  $K = 1$ . Stejný přenos byl také zvolen při návrhu univerzálních filtrů KHN a TT.

Zapojení pásmových propustí a oscilátorů byla napájena na plošný spoj. Filtry KHN a TT byly realizovány na nepájivém poli. Nejprve bylo změřeno zapojení pásmové propusti bez podkritické kladné zpětné vazby (podkapitola 5.1). Porovnáním nasimulované a naměřené amplitudové frekvenční charakteristiky bylo zjištěno, že se charakteristiky shodují, filtr tedy pracuje ve frekvenčním pásmu 20kHz tak, jak byl i navržen. Další zapojení pásmové propusti s podkritickou kladnou zpětnou vazbou (podkapitola 5.2) bylo změřeno pro tři hodnoty činitele jakosti. Při nastavení  $Q = 1$  a  $5$  se filtr choval podobně, jako byl navržen. U  $Q = 10$  již přenos -60dB neodpovídal frekvenci 100Hz. Důvodem bylo, že amplituda výstupního signálu na osciloskopu byla dosti zkreslená. Zapojení pásmové propusti se syntetickým induktorem (podkapitola 5.3) se chovalo stejně podle simulace v rozmezí kmitočtů 600Hz-200kHz pro zvolené činitele jakosti. Vyšší a nižší kmitočty již neodpovídaly hodnotám přenosu. Na vině byla opět slabá rozlišovací schopnost osciloskopu. Stejně tak filtry KHN a TT vykazovaly rozdílné výsledky při nižších a vyšších kmitočtech nebo byly dokonce tyto úrovně signálu na těchto kmitočtech neměřitelné.

Přínosem diplomové práce je analýza a odvození návrhových vztahů filtrů a oscilátorů s aktivními prvky typu CCII+ a praktické ověření jejich parametrů (frekvenční charakteristiky a frekvenční spektra).

## Použitá literatura

- [1] Elektrické filtry: pasivní filtry [online]. 2009 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTEO/belf/pasivni%20filtry.pdf>
- [2] Bandpass filter [online]. WhatIs, 2006 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://whatis.techtarget.com/definition/bandpass-filter>
- [3] HÁJEK, Karel a Jiří SEDLÁČEK. Kmitočtové filtry. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-023-7.
- [4] DOSTÁL, Tomáš. Elektrické filtry: přednášky a numerická cvičení. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2004. ISBN 80-214-2561-X.
- [5] BERNKOPF, Jaroslav. Elektronika [online]. Valašské Meziříčí, 2014 [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://www.bernkopf.cz/skola/predmety/elektronika/materialy/skripta/elektronika.pdf>
- [6] VCA810 High Gain Adjust Range, Wideband and Variable Gain Amplifier [online]. Texas Instruments, 2015 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/vca810.pdf>
- [7] FABRE, A. High Input Impedance Insensitive Second-Order Filters Implemented from CCs. IEEE Trans. CAS-I, Vol. 41 No. 12, 1994, 918-921.
- [8] TESAŘ, Zdeněk a Iva PETŘÍKOVÁ. Optimalizace dynamického rozsahu vstupního signálu pásmové propusti s obvody CCII+. Konference RTT, Ostravice, 2015 [cit. 2016-03-22].
- [9] LC Oscillator Basics [online]. Electronics Tutorials, 2016 [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://www.electronics-tutorials.ws/oscillator/oscillators.html>
- [10] SUN, Yichuang. Design of high frequency integrated analogue filters. London: Institution of Electrical Engineers, c2002. ISBN 0852969767.
- [11] SOLIMAN, Ahmed M. Generation of Kerwin-Huelsman-Newcomb biquad filter circuits using nodal admittance matrix expansion. International Journal of Circuit Theory and Applications [online]. 2011, 39(7), 697-717 [cit. 2016-04-01]. DOI: 10.1002/cta.654. ISSN 00989886. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/cta.654>
- [12] AD844: 60 MHz, 2000 V/ $\mu$ s Monolithic Op Amp Data Sheet. Analog Devices [online]. Norwood, 2009 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD844.pdf>
- [13] OPA860: Wide Bandwidth Operational Transconductance Amplifier and Buffer [online]. Texas Instruments, 2008 [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa860.pdf>
- [14] OPA861: Wide Bandwidth Operational Transconductance Amplifier [online]. Texas Instruments, 2013 [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa861.pdf>

# Seznam příloh

Příloha A: Naměřené hodnoty ..... I

Součástí DP je příloha na CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

- Schemata ProfiCAD/ - schémata kreslená v programu ProfiCAD
- Schemata SNAP/ - schémata kreslená v programu SNAP
- Namerene vysledky.xlsx – naměřené charakteristiky a tabulky hodnot

Tabulka A.1: *Tabulka naměřených hodnot pásmové propusti*

| Frekvence | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|-------------------|--------|
| 10kHz     | 412            | 1,03              | 0,26   |
| 8kHz      | 404            | 1,01              | 0,09   |
| 6kHz      | 364            | 0,91              | -0,82  |
| 4kHz      | 284            | 0,71              | -2,97  |
| 2kHz      | 158            | 0,40              | -8,07  |
| 1kHz      | 82             | 0,21              | -13,76 |
| 800Hz     | 66,4           | 0,17              | -15,60 |
| 600Hz     | 50,4           | 0,13              | -17,99 |
| 400Hz     | 34             | 0,09              | -21,41 |
| 200Hz     | 17,4           | 0,04              | -27,23 |
| 100Hz     | 9              | 0,02              | -32,96 |
| 20kHz     | 328            | 0,82              | -1,72  |
| 40kHz     | 196            | 0,49              | -6,20  |
| 60kHz     | 136            | 0,34              | -9,37  |
| 80kHz     | 104            | 0,26              | -11,70 |
| 100kHz    | 84             | 0,21              | -13,56 |
| 200kHz    | 44             | 0,11              | -19,17 |
| 400kHz    | 24             | 0,06              | -24,44 |
| 600kHz    | 17             | 0,04              | -27,43 |
| 800kHz    | 14             | 0,04              | -29,12 |
| 1MHz      | 12             | 0,03              | -30,46 |

Tabulka A.2: *Tabulka naměřených hodnot pásmové propusti se ZV ( $Q = 1$ )*

| Frekvence | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 4,4            | 0,01              | -39,17 |
| 200Hz     | 8,48           | 0,02              | -33,47 |
| 400Hz     | 17,4           | 0,04              | -27,23 |
| 600Hz     | 25,6           | 0,06              | -23,88 |
| 800Hz     | 34             | 0,09              | -21,41 |
| 1kHz      | 42             | 0,11              | -19,58 |
| 2kHz      | 86             | 0,22              | -13,35 |
| 4kHz      | 178            | 0,45              | -7,03  |
| 6kHz      | 284            | 0,71              | -2,97  |
| 8kHz      | 380            | 0,95              | -0,45  |
| 9kHz      | 400            | 1,00              | 0,00   |
| 10kHz     | 412            | 1,03              | 0,26   |
| 12kHz     | 384            | 0,96              | -0,35  |
| 15kHz     | 318            | 0,80              | -1,99  |

|        |      |      |        |
|--------|------|------|--------|
| 20kHz  | 230  | 0,58 | -4,81  |
| 40kHz  | 108  | 0,27 | -11,37 |
| 60kHz  | 72   | 0,18 | -14,89 |
| 80kHz  | 54,4 | 0,14 | -17,33 |
| 100kHz | 43,2 | 0,11 | -19,33 |
| 200kHz | 22,4 | 0,06 | -25,04 |
| 400kHz | 11,5 | 0,03 | -30,83 |
| 600kHz | 8,4  | 0,02 | -33,56 |
| 800kHz | 6,96 | 0,02 | -35,19 |
| 1MHz   | 6,24 | 0,02 | -36,14 |

Tabulka A.3: *Tabulka naměřených hodnot pásmové propusti se ZV ( $Q = 5$ )*

| Frekvence | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 1,12           | 0,00              | -51,06 |
| 200Hz     | 1,8            | 0,00              | -46,94 |
| 400Hz     | 3,2            | 0,01              | -41,94 |
| 600Hz     | 4,8            | 0,01              | -38,42 |
| 800Hz     | 6,24           | 0,02              | -36,14 |
| 1kHz      | 7,84           | 0,02              | -34,15 |
| 2kHz      | 16,6           | 0,04              | -27,64 |
| 4kHz      | 36,8           | 0,09              | -20,72 |
| 6kHz      | 71,2           | 0,18              | -14,99 |
| 8kHz      | 158            | 0,40              | -8,07  |
| 9kHz      | 276            | 0,69              | -3,22  |
| 10kHz     | 460            | 1,15              | 1,21   |
| 10,1kHz   | 460            | 1,15              | 1,21   |
| 11kHz     | 314            | 0,79              | -2,10  |
| 12kHz     | 198            | 0,50              | -6,11  |
| 15kHz     | 92             | 0,23              | -12,77 |
| 18kHz     | 63,2           | 0,16              | -16,03 |
| 20kHz     | 52,8           | 0,13              | -17,59 |
| 40kHz     | 21,4           | 0,05              | -25,43 |
| 60kHz     | 14             | 0,04              | -29,12 |
| 80kHz     | 10,2           | 0,03              | -31,87 |
| 100kHz    | 8,2            | 0,02              | -33,76 |
| 200kHz    | 4,32           | 0,01              | -39,33 |
| 400kHz    | 2,48           | 0,01              | -44,15 |
| 600kHz    | 2              | 0,01              | -46,02 |
| 800kHz    | 1,76           | 0,00              | -47,13 |
| 1MHz      | 1,68           | 0,00              | -47,54 |

Tabulka A.4: *Tabulka naměřených hodnot pásmové propusti se ZV ( $Q = 10$ )*

| Frekvence | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 1,04           | 0,00              | -51,70 |
| 200Hz     | 1,28           | 0,00              | -49,90 |
| 400Hz     | 1,92           | 0,00              | -46,38 |
| 600Hz     | 2,72           | 0,01              | -43,35 |
| 800Hz     | 3,52           | 0,01              | -41,11 |
| 1kHz      | 4,4            | 0,01              | -39,17 |
| 2kHz      | 8,88           | 0,02              | -33,07 |
| 4kHz      | 20,4           | 0,05              | -25,85 |
| 6kHz      | 39,2           | 0,10              | -20,18 |
| 8kHz      | 88,8           | 0,22              | -13,07 |
| 9kHz      | 174            | 0,44              | -7,23  |
| 9,5kHz    | 300            | 0,75              | -2,50  |
| 10kHz     | 524            | 1,31              | 2,35   |
| 10,08kHz  | 536            | 1,34              | 2,54   |
| 11kHz     | 214            | 0,54              | -5,43  |
| 12kHz     | 116            | 0,29              | -10,75 |
| 15kHz     | 51,2           | 0,13              | -17,86 |
| 18kHz     | 34,2           | 0,09              | -21,36 |
| 20kHz     | 28,8           | 0,07              | -22,85 |
| 40kHz     | 11,4           | 0,03              | -30,90 |
| 60kHz     | 7,52           | 0,02              | -34,52 |
| 80kHz     | 5,7            | 0,01              | -36,92 |
| 100kHz    | 4,56           | 0,01              | -38,86 |
| 200kHz    | 2,48           | 0,01              | -44,15 |
| 400kHz    | 1,6            | 0,00              | -47,96 |
| 600kHz    | 1,36           | 0,00              | -49,37 |
| 800kHz    | 1,28           | 0,00              | -49,90 |
| 1MHz      | 1,2            | 0,00              | -50,46 |

Tabulka A.5: *Tabulka naměřených hodnot RLC modifikované pásmové propusti ( $Q = 1$ )*

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 404            | 16,2           | 0,04              | -27,94 |
| 200Hz     | 404            | 17,8           | 0,04              | -27,12 |
| 400Hz     | 404            | 22,4           | 0,06              | -25,12 |
| 600Hz     | 404            | 28             | 0,07              | -23,18 |
| 800Hz     | 404            | 35,2           | 0,09              | -21,20 |
| 1kHz      | 404            | 42,4           | 0,10              | -19,58 |
| 2kHz      | 412            | 80,8           | 0,20              | -14,15 |
| 4kHz      | 412            | 166            | 0,40              | -7,90  |
| 6kHz      | 412            | 268            | 0,65              | -3,74  |
| 8kHz      | 408            | 364            | 0,89              | -0,99  |

|          |     |      |      |        |
|----------|-----|------|------|--------|
| 9kHz     | 408 | 396  | 0,97 | -0,26  |
| 10,35kHz | 412 | 412  | 1,00 | 0,00   |
| 12kHz    | 408 | 396  | 0,97 | -0,26  |
| 15kHz    | 412 | 324  | 0,79 | -2,09  |
| 20kHz    | 412 | 232  | 0,56 | -4,99  |
| 40kHz    | 412 | 108  | 0,26 | -11,63 |
| 60kHz    | 408 | 71,2 | 0,17 | -15,16 |
| 80kHz    | 408 | 55,2 | 0,14 | -17,37 |
| 100kHz   | 412 | 44,4 | 0,11 | -19,35 |
| 200kHz   | 408 | 26,4 | 0,06 | -23,78 |
| 400kHz   | 408 | 20   | 0,05 | -26,19 |
| 600kHz   | 408 | 19   | 0,05 | -26,64 |
| 800kHz   | 408 | 19   | 0,05 | -26,64 |
| 1MHz     | 408 | 20   | 0,05 | -26,19 |

Tabulka A.6: Tabulka naměřených hodnot RLC modifikované pásmové propusti ( $Q = 2$ )

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 396            | 8,56           | 0,02              | -33,30 |
| 200Hz     | 400            | 9,36           | 0,02              | -32,62 |
| 400Hz     | 400            | 11,8           | 0,03              | -30,60 |
| 600Hz     | 400            | 14,8           | 0,04              | -28,64 |
| 800Hz     | 400            | 18,2           | 0,05              | -26,84 |
| 1kHz      | 400            | 21,8           | 0,05              | -25,27 |
| 2kHz      | 412            | 42,4           | 0,10              | -19,75 |
| 4kHz      | 412            | 92             | 0,22              | -13,02 |
| 6kHz      | 412            | 168            | 0,41              | -7,79  |
| 8kHz      | 412            | 288            | 0,70              | -3,11  |
| 9kHz      | 412            | 364            | 0,88              | -1,08  |
| 10kHz     | 412            | 416            | 1,01              | 0,08   |
| 10,34kHz  | 412            | 420            | 1,02              | 0,17   |
| 12kHz     | 412            | 360            | 0,87              | -1,17  |
| 15kHz     | 412            | 226            | 0,55              | -5,22  |
| 20kHz     | 412            | 137            | 0,33              | -9,56  |
| 40kHz     | 408            | 56,8           | 0,14              | -17,13 |
| 60kHz     | 408            | 37,2           | 0,09              | -20,80 |
| 80kHz     | 408            | 28,4           | 0,07              | -23,15 |
| 100kHz    | 408            | 23,6           | 0,06              | -24,75 |
| 200kHz    | 408            | 14             | 0,03              | -29,29 |
| 400kHz    | 408            | 10,4           | 0,03              | -31,87 |
| 600kHz    | 408            | 9,8            | 0,02              | -32,39 |
| 800kHz    | 408            | 9,6            | 0,02              | -32,57 |
| 1MHz      | 408            | 10             | 0,02              | -32,21 |

Tabulka A.7: *Tabulka naměřených hodnot RLC modifikované pásmové propusti ( $Q = 4$ )*

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 400            | 4,8            | 0,01              | -38,42 |
| 200Hz     | 404            | 5,04           | 0,01              | -38,08 |
| 400Hz     | 404            | 6,16           | 0,02              | -36,34 |
| 600Hz     | 404            | 7,67           | 0,02              | -34,43 |
| 800Hz     | 404            | 9,4            | 0,02              | -32,67 |
| 1kHz      | 404            | 11,2           | 0,03              | -31,14 |
| 2kHz      | 412            | 21,6           | 0,05              | -25,61 |
| 4kHz      | 412            | 47,2           | 0,11              | -18,82 |
| 6kHz      | 412            | 88,8           | 0,22              | -13,33 |
| 8kHz      | 412            | 178            | 0,43              | -7,29  |
| 9kHz      | 412            | 280            | 0,68              | -3,35  |
| 10,34kHz  | 412            | 436            | 1,06              | 0,49   |
| 12kHz     | 412            | 272            | 0,66              | -3,61  |
| 15kHz     | 412            | 130            | 0,32              | -10,02 |
| 20kHz     | 412            | 72,8           | 0,18              | -15,06 |
| 40kHz     | 408            | 28,8           | 0,07              | -23,03 |
| 60kHz     | 408            | 19,2           | 0,05              | -26,55 |
| 80kHz     | 408            | 14,4           | 0,04              | -29,05 |
| 100kHz    | 404            | 12             | 0,03              | -30,54 |
| 200kHz    | 408            | 7,28           | 0,02              | -34,97 |
| 400kHz    | 408            | 5,6            | 0,01              | -37,25 |
| 600kHz    | 404            | 5,28           | 0,01              | -37,67 |
| 800kHz    | 408            | 5,2            | 0,01              | -37,89 |
| 1MHz      | 404            | 5,2            | 0,01              | -37,81 |

Tabulka A.8: *Tabulka naměřených hodnot RLC modifikované pásmové propusti ( $Q = 11$ )*

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 400            | 2,16           | 0,01              | -45,35 |
| 200Hz     | 404            | 2,32           | 0,01              | -44,82 |
| 400Hz     | 404            | 2,64           | 0,01              | -43,70 |
| 600Hz     | 404            | 3,2            | 0,01              | -42,02 |
| 800Hz     | 404            | 3,8            | 0,01              | -40,53 |
| 1kHz      | 404            | 4,4            | 0,01              | -39,26 |
| 2kHz      | 412            | 8,32           | 0,02              | -33,90 |
| 4kHz      | 412            | 18             | 0,04              | -27,19 |
| 6kHz      | 412            | 33,6           | 0,08              | -21,77 |
| 8kHz      | 412            | 74,4           | 0,18              | -14,87 |
| 9kHz      | 412            | 130            | 0,32              | -10,02 |
| 9,5kHz    | 412            | 204            | 0,50              | -6,11  |
| 10,33kHz  | 412            | 504            | 1,22              | 1,75   |
| 11kHz     | 412            | 272            | 0,66              | -3,61  |



|        |     |      |      |        |
|--------|-----|------|------|--------|
| 12kHz  | 412 | 126  | 0,31 | -10,29 |
| 15kHz  | 412 | 50,4 | 0,12 | -18,25 |
| 20kHz  | 408 | 27,2 | 0,07 | -23,52 |
| 40kHz  | 408 | 11   | 0,03 | -31,39 |
| 60kHz  | 404 | 7,28 | 0,02 | -34,88 |
| 80kHz  | 404 | 5,68 | 0,01 | -37,04 |
| 100kHz | 404 | 4,72 | 0,01 | -38,65 |
| 200kHz | 408 | 3,04 | 0,01 | -42,56 |
| 400kHz | 404 | 2,4  | 0,01 | -44,52 |
| 600kHz | 404 | 2,4  | 0,01 | -44,52 |
| 800kHz | 404 | 2,32 | 0,01 | -44,82 |
| 1MHz   | 404 | 2,24 | 0,01 | -45,12 |

Tabulka A.9: *Tabulka naměřených hodnot filtru KHN (dolní propust,  $Q = 0,707$ )*

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 200            | 298            | 1,49              | 3,46   |
| 200Hz     | 200            | 298            | 1,49              | 3,46   |
| 400Hz     | 200            | 298            | 1,49              | 3,46   |
| 600Hz     | 200            | 298            | 1,49              | 3,46   |
| 800Hz     | 200            | 298            | 1,49              | 3,46   |
| 1kHz      | 200            | 298            | 1,49              | 3,46   |
| 2kHz      | 202            | 302            | 1,50              | 3,49   |
| 3kHz      | 202            | 298            | 1,48              | 3,38   |
| 4kHz      | 202            | 294            | 1,46              | 3,26   |
| 6kHz      | 202            | 274            | 1,36              | 2,65   |
| 8kHz      | 202            | 242            | 1,20              | 1,57   |
| 9kHz      | 202            | 220            | 1,09              | 0,74   |
| 10kHz     | 202            | 202            | 1,00              | 0,00   |
| 11kHz     | 202            | 182            | 0,90              | -0,91  |
| 12kHz     | 202            | 162            | 0,80              | -1,92  |
| 15kHz     | 202            | 118            | 0,58              | -4,67  |
| 20kHz     | 202            | 72             | 0,36              | -8,96  |
| 40kHz     | 202            | 19,4           | 0,10              | -20,35 |
| 60kHz     | 200            | 8,72           | 0,04              | -27,21 |
| 80kHz     | 198            | 5              | 0,03              | -31,95 |
| 100kHz    | 198            | 3,28           | 0,02              | -35,62 |
| 200kHz    | 200            | 1              | 0,01              | -46,02 |
| 400kHz    | 198            | 0,84           | 0,00              | -47,45 |

Tabulka A.10: *Tabulka naměřených hodnot filtru KHN (horní propust,  $Q = 0,707$ )*

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 400Hz     | 200            | 0,72           | 0,00              | -48,87 |
| 600Hz     | 200            | 1,28           | 0,01              | -43,88 |

|        |     |      |      |        |
|--------|-----|------|------|--------|
| 800Hz  | 200 | 2,08 | 0,01 | -39,66 |
| 1kHz   | 200 | 3,2  | 0,02 | -35,92 |
| 2kHz   | 202 | 12,5 | 0,06 | -24,17 |
| 4kHz   | 202 | 47,6 | 0,24 | -12,55 |
| 6kHz   | 202 | 98,4 | 0,49 | -6,25  |
| 8kHz   | 202 | 154  | 0,76 | -2,36  |
| 9kHz   | 202 | 178  | 0,88 | -1,10  |
| 10kHz  | 202 | 198  | 0,98 | -0,17  |
| 11kHz  | 202 | 216  | 1,07 | 0,58   |
| 12kHz  | 202 | 230  | 1,14 | 1,13   |
| 15kHz  | 202 | 258  | 1,28 | 2,13   |
| 20kHz  | 202 | 278  | 1,38 | 2,77   |
| 40kHz  | 202 | 290  | 1,44 | 3,14   |
| 60kHz  | 200 | 292  | 1,46 | 3,29   |
| 80kHz  | 198 | 292  | 1,47 | 3,37   |
| 100kHz | 200 | 294  | 1,47 | 3,35   |
| 200kHz | 200 | 292  | 1,46 | 3,29   |
| 400kHz | 200 | 286  | 1,43 | 3,11   |
| 600kHz | 200 | 276  | 1,38 | 2,80   |
| 800kHz | 200 | 264  | 1,32 | 2,41   |
| 1MHz   | 198 | 250  | 1,26 | 2,03   |

Tabulka A.11: *Tabulka naměřených hodnot filtru KHN (pásmová propust,  $Q = 0,707$ )*

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 200            | 3,44           | 0,02              | -35,29 |
| 200Hz     | 202            | 6,3            | 0,03              | -30,12 |
| 400Hz     | 202            | 12,3           | 0,06              | -24,31 |
| 600Hz     | 200            | 19             | 0,10              | -20,45 |
| 800Hz     | 202            | 25,2           | 0,12              | -18,08 |
| 1kHz      | 202            | 31             | 0,15              | -16,28 |
| 2kHz      | 206            | 61,6           | 0,30              | -10,49 |
| 4kHz      | 206            | 118            | 0,57              | -4,84  |
| 6kHz      | 206            | 164            | 0,80              | -1,98  |
| 8kHz      | 206            | 192            | 0,93              | -0,61  |
| 9kHz      | 206            | 198            | 0,96              | -0,34  |
| 9,92kHz   | 202            | 196            | 0,97              | -0,26  |
| 10kHz     | 202            | 196            | 0,97              | -0,26  |
| 11kHz     | 206            | 198            | 0,96              | -0,34  |
| 12kHz     | 206            | 192            | 0,93              | -0,61  |
| 15kHz     | 206            | 174            | 0,84              | -1,47  |
| 20kHz     | 206            | 140            | 0,68              | -3,35  |
| 40kHz     | 206            | 75,2           | 0,37              | -8,75  |
| 60kHz     | 206            | 51,2           | 0,25              | -12,09 |

|        |     |      |      |        |
|--------|-----|------|------|--------|
| 80kHz  | 204 | 38   | 0,19 | -14,60 |
| 100kHz | 204 | 30,8 | 0,15 | -16,42 |
| 200kHz | 204 | 16,2 | 0,08 | -22,00 |
| 400kHz | 204 | 8,4  | 0,04 | -27,71 |
| 600kHz | 204 | 6    | 0,03 | -30,63 |
| 800kHz | 204 | 4,72 | 0,02 | -32,71 |
| 1MHz   | 204 | 4,16 | 0,02 | -33,81 |

Tabulka A.12: *Tabulka naměřených hodnot filtru KHN (dolní propust,  $Q = 5$ )*

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 200            | 40,8           | 0,20              | -13,81 |
| 200Hz     | 202            | 40,4           | 0,20              | -13,98 |
| 400Hz     | 200            | 40,8           | 0,20              | -13,81 |
| 600Hz     | 200            | 41,2           | 0,21              | -13,72 |
| 800Hz     | 200            | 41,2           | 0,21              | -13,72 |
| 1kHz      | 202            | 41,2           | 0,20              | -13,81 |
| 2kHz      | 206            | 42,8           | 0,21              | -13,65 |
| 4kHz      | 206            | 49,2           | 0,24              | -12,44 |
| 6kHz      | 206            | 64             | 0,31              | -10,15 |
| 8kHz      | 206            | 106            | 0,51              | -5,77  |
| 9kHz      | 206            | 149            | 0,72              | -2,81  |
| 9,5kHz    | 206            | 166            | 0,81              | -1,88  |
| 9,8kHz    | 206            | 166            | 0,81              | -1,88  |
| 10kHz     | 206            | 160            | 0,78              | -2,19  |
| 10,5kHz   | 206            | 134            | 0,65              | -3,74  |
| 11kHz     | 204            | 106            | 0,52              | -5,69  |
| 12kHz     | 206            | 70             | 0,34              | -9,38  |
| 15kHz     | 204            | 29,6           | 0,15              | -16,77 |
| 20kHz     | 204            | 13             | 0,06              | -23,91 |
| 40kHz     | 204            | 2,8            | 0,01              | -37,25 |
| 60kHz     | 204            | 1,36           | 0,01              | -43,52 |
| 80kHz     | 202            | 0,88           | 0,00              | -47,22 |
| 100kHz    | 202            | 0,56           | 0,00              | -51,14 |

Tabulka A.13: *Tabulka naměřených hodnot filtru KHN (horní propust,  $Q = 5$ )*

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 1kHz      | 200            | 1,64           | 0,01              | -41,72 |
| 2kHz      | 200            | 1,92           | 0,01              | -40,35 |
| 4kHz      | 204            | 8,24           | 0,04              | -27,87 |
| 6kHz      | 206            | 24             | 0,12              | -18,67 |
| 8kHz      | 204            | 68,8           | 0,34              | -9,44  |
| 9kHz      | 206            | 123            | 0,60              | -4,48  |

|         |     |      |      |        |
|---------|-----|------|------|--------|
| 9,8kHz  | 204 | 162  | 0,79 | -2,00  |
| 10kHz   | 206 | 164  | 0,80 | -1,98  |
| 10,5kHz | 204 | 150  | 0,74 | -2,67  |
| 11kHz   | 206 | 132  | 0,64 | -3,87  |
| 12kHz   | 206 | 102  | 0,50 | -6,11  |
| 15kHz   | 206 | 67,2 | 0,33 | -9,73  |
| 20kHz   | 206 | 52   | 0,25 | -11,96 |
| 40kHz   | 204 | 42,4 | 0,21 | -13,65 |
| 60kHz   | 202 | 41,2 | 0,20 | -13,81 |
| 80kHz   | 202 | 40,4 | 0,20 | -13,98 |
| 100kHz  | 202 | 40,4 | 0,20 | -13,98 |
| 200kHz  | 204 | 40,4 | 0,20 | -14,06 |
| 400kHz  | 204 | 40,4 | 0,20 | -14,06 |
| 600kHz  | 204 | 40,4 | 0,20 | -14,06 |
| 800kHz  | 204 | 40   | 0,20 | -14,15 |
| 1MHz    | 204 | 40   | 0,20 | -14,15 |

Tabulka A.14: Tabulka naměřených hodnot filtru KHN (pásmová propust,  $Q = 5$ )

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 200            | 0,7            | 0,00              | -49,12 |
| 200Hz     | 202            | 1,4            | 0,01              | -43,18 |
| 400Hz     | 200            | 1,84           | 0,01              | -40,72 |
| 600Hz     | 200            | 2,64           | 0,01              | -37,59 |
| 800Hz     | 202            | 3,5            | 0,02              | -35,23 |
| 1kHz      | 200            | 4,3            | 0,02              | -33,35 |
| 2kHz      | 206            | 9,96           | 0,05              | -26,31 |
| 4kHz      | 206            | 21             | 0,10              | -19,83 |
| 6kHz      | 204            | 39,6           | 0,19              | -14,24 |
| 8kHz      | 206            | 87,2           | 0,42              | -7,47  |
| 9kHz      | 206            | 138            | 0,67              | -3,48  |
| 9,8kHz    | 204            | 166            | 0,81              | -1,79  |
| 10kHz     | 204            | 162            | 0,79              | -2,00  |
| 11kHz     | 204            | 118            | 0,58              | -4,75  |
| 12kHz     | 204            | 85             | 0,42              | -7,60  |
| 15kHz     | 204            | 45             | 0,22              | -13,13 |
| 20kHz     | 204            | 26,4           | 0,13              | -17,76 |
| 40kHz     | 204            | 10,9           | 0,05              | -25,44 |
| 60kHz     | 202            | 7,4            | 0,04              | -28,72 |
| 80kHz     | 202            | 5,36           | 0,03              | -31,52 |
| 100kHz    | 202            | 4,32           | 0,02              | -33,40 |
| 200kHz    | 202            | 2,24           | 0,01              | -39,10 |
| 400kHz    | 202            | 1,36           | 0,01              | -43,44 |
| 600kHz    | 202            | 0,88           | 0,00              | -47,22 |

|        |     |     |      |        |
|--------|-----|-----|------|--------|
| 800kHz | 202 | 0,8 | 0,00 | -48,05 |
| 1MHz   | 202 | 0,8 | 0,00 | -48,05 |

Tabulka A.15: *Tabulka naměřených hodnot filtru TT (pásmová propust,  $Q = 0,707$ )*

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 388            | 10             | 0,03              | -31,78 |
| 200Hz     | 388            | 20,08          | 0,05              | -25,72 |
| 400Hz     | 388            | 33,2           | 0,09              | -21,35 |
| 600Hz     | 388            | 43,2           | 0,11              | -19,07 |
| 800Hz     | 388            | 55,2           | 0,14              | -16,94 |
| 1kHz      | 388            | 67,2           | 0,17              | -15,23 |
| 2kHz      | 392            | 124            | 0,32              | -10,00 |
| 4kHz      | 392            | 236            | 0,60              | -4,41  |
| 6kHz      | 392            | 324            | 0,83              | -1,65  |
| 8kHz      | 392            | 372            | 0,95              | -0,45  |
| 9,2kHz    | 392            | 376            | 0,96              | -0,36  |
| 10kHz     | 384            | 370            | 0,96              | -0,32  |
| 11kHz     | 382            | 356            | 0,93              | -0,61  |
| 12kHz     | 382            | 346            | 0,91              | -0,86  |
| 15kHz     | 392            | 300            | 0,77              | -2,32  |
| 20kHz     | 392            | 236            | 0,60              | -4,41  |
| 40kHz     | 392            | 125            | 0,32              | -9,93  |
| 60kHz     | 388            | 88             | 0,23              | -12,89 |
| 80kHz     | 388            | 70             | 0,18              | -14,87 |
| 100kHz    | 388            | 54             | 0,14              | -17,13 |
| 200kHz    | 388            | 37             | 0,10              | -20,41 |
| 400kHz    | 392            | 27,6           | 0,07              | -23,05 |
| 600kHz    | 392            | 24             | 0,06              | -24,26 |
| 800kHz    | 388            | 20             | 0,05              | -25,76 |
| 1MHz      | 388            | 22             | 0,06              | -24,93 |

Tabulka A.16: *Tabulka naměřených hodnot filtru TT (dolní propust,  $Q = 0,707$ )*

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 388            | 560            | 1,44              | 3,19   |
| 200Hz     | 388            | 560            | 1,44              | 3,19   |
| 400Hz     | 388            | 560            | 1,44              | 3,19   |
| 600Hz     | 388            | 564            | 1,45              | 3,25   |
| 800Hz     | 388            | 560            | 1,44              | 3,19   |
| 1kHz      | 388            | 560            | 1,44              | 3,19   |
| 2kHz      | 392            | 564            | 1,44              | 3,16   |
| 4kHz      | 392            | 552            | 1,41              | 2,97   |
| 6kHz      | 392            | 516            | 1,32              | 2,39   |

|        |     |      |      |        |
|--------|-----|------|------|--------|
| 8kHz   | 392 | 444  | 1,13 | 1,08   |
| 9,2kHz | 392 | 388  | 0,99 | -0,09  |
| 10kHz  | 392 | 356  | 0,91 | -0,84  |
| 12kHz  | 392 | 276  | 0,70 | -3,05  |
| 15kHz  | 392 | 194  | 0,49 | -6,11  |
| 20kHz  | 392 | 114  | 0,29 | -10,73 |
| 40kHz  | 392 | 31   | 0,08 | -22,04 |
| 60kHz  | 388 | 16,8 | 0,04 | -27,27 |
| 80kHz  | 388 | 10,4 | 0,03 | -31,44 |
| 100kHz | 388 | 8    | 0,02 | -33,71 |

Tabulka A.17: Tabulka naměřených hodnot filtru TT (pásmová propust,  $Q = 5$ )

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 1kHz      | 396            | 18,4           | 0,05              | -26,66 |
| 2kHz      | 408            | 24             | 0,06              | -24,61 |
| 4kHz      | 408            | 46,4           | 0,11              | -18,88 |
| 6kHz      | 408            | 87,2           | 0,21              | -13,40 |
| 8kHz      | 408            | 182            | 0,45              | -7,01  |
| 9kHz      | 408            | 272            | 0,67              | -3,52  |
| 9,6kHz    | 408            | 294            | 0,72              | -2,85  |
| 10kHz     | 408            | 284            | 0,70              | -3,15  |
| 11kHz     | 408            | 208            | 0,51              | -5,85  |
| 12kHz     | 408            | 154            | 0,38              | -8,46  |
| 15kHz     | 404            | 88             | 0,22              | -13,24 |
| 20kHz     | 408            | 53             | 0,13              | -17,73 |
| 40kHz     | 404            | 24             | 0,06              | -24,52 |
| 60kHz     | 404            | 20             | 0,05              | -26,11 |
| 80kHz     | 400            | 15             | 0,04              | -28,52 |
| 100kHz    | 404            | 11             | 0,03              | -31,30 |
| 200kHz    | 400            | 6              | 0,02              | -36,48 |
| 400kHz    | 400            | 4,7            | 0,01              | -38,60 |
| 600kHz    | 400            | 4              | 0,01              | -40,00 |

Tabulka A.18: Tabulka naměřených hodnot filtru TT (dolní propust,  $Q = 5$ )

| Frekvence | $U_{1pp}$ [mV] | $U_{2pp}$ [mV] | $U_{2pp}/U_{1pp}$ | F [dB] |
|-----------|----------------|----------------|-------------------|--------|
| 100Hz     | 396            | 84             | 0,21              | -13,47 |
| 200Hz     | 396            | 82             | 0,21              | -13,68 |
| 400Hz     | 396            | 82             | 0,21              | -13,68 |
| 600Hz     | 396            | 82             | 0,21              | -13,68 |
| 800Hz     | 396            | 82             | 0,21              | -13,68 |
| 1kHz      | 396            | 82             | 0,21              | -13,68 |
| 2kHz      | 408            | 86             | 0,21              | -13,52 |
| 4kHz      | 408            | 96             | 0,24              | -12,57 |

Naměřené hodnoty

---

|        |     |      |      |        |
|--------|-----|------|------|--------|
| 6kHz   | 408 | 127  | 0,31 | -10,14 |
| 8kHz   | 408 | 214  | 0,52 | -5,60  |
| 9kHz   | 408 | 290  | 0,71 | -2,97  |
| 9,8kHz | 408 | 284  | 0,70 | -3,15  |
| 10kHz  | 408 | 268  | 0,66 | -3,65  |
| 11kHz  | 408 | 178  | 0,44 | -7,20  |
| 12kHz  | 408 | 120  | 0,29 | -10,63 |
| 15kHz  | 404 | 54,4 | 0,13 | -17,42 |
| 20kHz  | 404 | 24,4 | 0,06 | -24,38 |
| 40kHz  | 404 | 6,3  | 0,02 | -36,14 |
| 60kHz  | 404 | 3,2  | 0,01 | -42,02 |
| 80kHz  | 400 | 2,64 | 0,01 | -43,61 |
| 100kHz | 400 | 2    | 0,01 | -46,02 |