

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

LABORATORNÍ PŘÍPRAVEK PRO VÝUKU SYNTETICKÝCH PRVKŮ A APLIKACÍ

SYNTHETIC ELEMENTS AND THEIR APPLICATIONS IN PRACTICAL EDUCATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Hana Stolařová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Studentka: Hana Stolařová

ID: 203345

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní přípravek pro výuku syntetických prvků a aplikací

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte dvě realizace (klasickou s operačními zesilovači a nestandardní s moderním typem elektronicky říditelného aktivního prvku) variabilně sestavitelných příkladů impedančních konvertorů/invertorů (pracujících v pásmu desítek Hz až stovek kHz) pro konstrukci laditelných syntetických prvků (indukčnost, dvojný kapacitor, atd.) a připravte s nimi několik základních aplikací (ekvivalenty základních RLC filtrů, jednoduchý oscilátor), ve kterých budou sledovány vlivy změn hodnot součástek na parametry přenosových funkcí (kmitočet naladění, činitel jakosti, šířka pásma). Činnost syntetických prvků i aplikací ověřte simulacemi včetně vlivu výrobního rozptylu.

Připravte koncept přípravku a laboratorní úlohy použitelné v kurzu Návrh analogových filtrů nebo Teorie elektronických obvodů a vytvořte podklady pro budoucí výrobu. Navrhněte desky plošných spojů a předlohu panelu přípravku s vhodným rozložením připojovacích bodů a ovládacích prvků. Připravte úkoly pro experimenty s aplikacemi dostupnými na přípravku, návod a doplňovací formuláře.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ANTONIOU, A. Gyration using operational amplifiers. Electronics Letters [online]. 1967, 3(8) [cit. 2019-05-14]. DOI: 10.1049/el:19670270. ISSN 00135194. Dostupné z:

https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el_19670270

[2] HÁJEK, Karel a Jiří SEDLÁČEK. Kmitočtové filtry. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-0-3-7.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 4.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá realizacemi impedančních konvertorů pro konstrukci laditelných syntetických prvků (dvojpolů) a jejich jednoduchých aplikací při praktické výuce. Konkrétně se zaměřuje na Antoniův impedanční konvertor a s ním vytvářené realizace variabilních syntetických prvků v ARC filtrech dle standardních RLC předloh a v jednoduchém oscilátoru. Součástí práce je teoretický návrh parametrů obvodů pro zadané vlastnosti, ověření počítačovou simulací včetně vlivu výrobního rozptylu součástek. Jsou připraveny podklady pro výrobu desky plošných spojů a realizaci přípravku, spolu s návrhem laboratorní úlohy k použití při výuce v kurzech Návrh elektronických filtrů nebo Teorie elektronických obvodů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Antoniův impedanční konvertor, aplikace a výuka, impedanční konvertor, simulace, syntetické prvky

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with solutions of impedance converters suitable for construction of tunable (or adjustable - select) synthetic elements (two-terminals). Simple applications of these synthetic elements in practical education are supposed. The Antoniou impedance converter represents the core device for various solutions of variable synthetic elements applied in ARC filters (based on RLC original) and simple harmonic oscillator. This thesis includes theoretical design of parameters of circuits for required features as well as verification by computer analysis (PSPICE) including fabrication dispersion of elements. This thesis also includes design and fabrication of printed circuit board prepared for execution of a testing device with a form which can be used for educational purposes in courses Design of Electronic filters and Electronic Circuit Theory.

KEYWORDS

Antoniou impedance converter, application and teaching, impedance converter, simulation, synthetic elements

STOLAŘOVÁ, Hana. *Laboratorní přípravek pro výuku syntetických prvků a aplikací*. [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/120541>, 62 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Laboratorní přípravek pro výuku syntetických prvků a aplikací“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

[online]. Brno

.....

podpis autorky

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Romanu Šotnerovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam symbolů, veličin a zkratek | 10 |
| Úvod | 11 |
| 1 Teorie | 12 |
| 1.1 Impedanční konvertor, invertor a gyrátor | 12 |
| 1.2 Antoniův impedanční konvertor | 14 |
| 1.3 ARC filtry | 16 |
| 1.3.1 Syntetický induktor, dvojný kapacitor | 16 |
| 1.4 Oscilátor | 18 |
| 2 Návrh | 19 |
| 3 Analýza zapojení počítačovou simulací | 22 |
| 3.1 Analýza navržené syntetické cívky a dvojného kapacitoru | 22 |
| 3.2 Analýza vybraných RLC zapojení | 24 |
| 3.2.1 Vybrané filtry | 24 |
| 3.2.2 OTAs s uzemněnými impedancemi | 31 |
| 3.2.3 Oscilátor | 34 |
| Závěr | 37 |
| Literatura | 39 |
| Seznam příloh | 40 |
| A Návrh přípravku | 41 |
| A.1 Schéma zapojení | 41 |
| A.2 Deska plošného spoje | 42 |
| A.2.1 Bottom | 42 |
| A.2.2 Top | 43 |
| A.3 Vrchní panel přípravku | 44 |
| B Seznam součástek | 45 |
| C Teoretický úvod a laboratorní protokol | 48 |

Seznam obrázků

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Transformace impedance impedančním konvertorem $C \rightarrow D_{EKV}$. . . | 12 |
| 1.2 | Zapojení Antoniova impedančního konvertoru | 14 |
| 1.3 | Rozšířené zapojení Antoniova impedančního konvertoru pro n impe- dancí | 14 |
| 1.4 | Zapojení impedančního konvertoru pomocí OTAs s uzemněnými im- pedancemi | 15 |
| 1.5 | Zapojení uzemněného ztrátového syntetického induktoru | 17 |
| 1.6 | Zapojení ztrátového uzemněného dvojného kapacitoru realizované s jedním OZ | 17 |
| 1.7 | Zapojení oscilátoru s kompenzací pomocí negativního odporu (R_N) . | 18 |
| 2.1 | Zapojení syntetické cívky s Antoniovým obvodem | 20 |
| 2.2 | Zapojení dvojné cívky s Antoniovým obvodem | 21 |
| 2.3 | Zapojení dvojného kapacitoru s Antoniovým obvodem | 21 |
| 3.1 | Impedance a její fáze u syntetické cívky | 22 |
| 3.2 | Impedance a její fáze u dvojné cívky | 23 |
| 3.3 | Horní propust v zapojení se syntetickou cívkou | 24 |
| 3.4 | Pásmová propust v zapojení se syntetickou cívkou | 24 |
| 3.5 | Přenos horní propusti s krokováním $R_Q = 100 \Omega, 1 \text{ k}\Omega, 1, 59 \text{ k}\Omega$ a 10 $\text{k}\Omega$ | 25 |
| 3.6 | Fázová a modulová kmitočtová charakteristika pásmové propusti s krováním R_Q | 26 |
| 3.7 | Toleranční analýza pro pásmovou propust (tolerance R - 1%, C - 5%) | 27 |
| 3.8 | Rozptyl hodnot střední frekvence pásmové propusti | 27 |
| 3.9 | Rozptyl hodnoty Q pásmové propusti | 28 |
| 3.10 | Rozptyl šířky pásma pro pásmovou propust | 28 |
| 3.11 | Dolní propust zapojená s dvojným kapacitorem | 29 |
| 3.12 | Fázová a modulová charakteristika dolní propusti 3. řádu s kroková- ním $C_Q = 10 \text{ nF}, 1 \text{ nF}, 680 \text{ pF}, 420 \text{ pF}$ | 29 |
| 3.13 | Toleranční analýza dolní propusti (tolerance R - 1% a C - 5%) | 30 |
| 3.14 | Zobrazení fázové a modulační charakteristiky vstupní impedance syn- tetické zemněné cívky v zapojení s OTAs s krokováním proudu $U_{SET} =$ 0.5 V (nejvýše položená křivka), $5 \text{ V}, 10 \text{ V}, 13 \text{ V}$ (nejníže položená křivka) | 31 |
| 3.15 | Porovnání fázové a modulační charakteristiky syntetické cívky zapo- jené Antoniovým impedančním konvertorem a OTAs kaskádou | 32 |
| 3.16 | Toleranční analýza pro zapojení syntetické cívky s OTA kaskádou . . | 33 |
| 3.17 | Kmitající oscilátor (sledován vysokoimpedanční uzel rezonátoru) . . . | 34 |

| | |
|---|----|
| 3.18 Detail kmitajícího výstupního napětí napětí oscilátoru | 35 |
| 3.19 Frekvenční spektrum oscilátoru | 36 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Tabulka výsledných impedancí při záměně konkrétních impedancí za kapacitory | 15 |
| 3.1 | Tabulka výsledných hodnot f_c , Q a BW z krokování parametru . . . | 25 |

Seznam symbolů, veličin a zkratk

| | |
|------------|--|
| Z_{IN} | vstupní impedance |
| Z_z | zatěžovací impedance |
| k | činitel konverze, resp. inverze |
| $K(s)$ | kmitočtově závislá funkce |
| GIC | Generalized Impedance Convertor |
| $FDNR$ | Kmitočtově nezávislý odpor; anglicky Frequency dependent negative resistor |
| L_{EKV} | ekvivalentní hodnota indukčnosti na vstupní bráně syntetického induktoru |
| D_{EKV} | adekvátní hodnota admitance na vstupní bráně dvojného kapacitoru |
| OTA | Operační transkonduktanční zesilovač; Operational transconductance amplifier |
| BW | šířka pásma; anglicky Bandwidth |

Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na porozumění a následnou realizaci impedančních konvertorů/invertorů, jejich využití jako náhrada cívek tzv. syntetickými prvky a následný návrh podkladů pro výrobu konkrétního přípravku.

Výsledné obvody impedančních konvertorů byly navrženy na základě konkrétních návrhových výpočtů a následně ověřeny pomocí počítačových simulací v programu PSpice. Tyto simulace sloužily k ověření správnosti zapojení, zjištění možných chyb a doladění parametrů součástek.

Součástí práce je konkrétní návrh jednotlivých hodnot součástek pro zapojení syntetické cívky pomocí Antoniova impedančního konvertoru se stanovenou hodnotou frekvence a činitelem jakosti.

Cílem této práce bylo vytvořit návrh přípravku vhodného k výuce syntetických prvků a jejich aplikací.

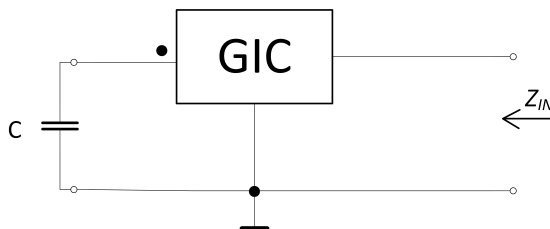
1 Teorie

1.1 Impedanční konvertor, invertor a gyrátor

Ideální impedanční konvertor je lineární dvojbran, který transformuje zatěžovací (výstupní) impedanci na vstup dle vztahu [1]:

$$Z_{IN} = \frac{a}{b} \cdot Z_z = k \cdot Z_z. \quad (1.1)$$

Hodnota impedance na vstupu Z_{IN} je tedy přímo úměrná zatěžovací impedanci Z_z . A a b jsou konstanty vázané na vstupní veličiny. Činitel konverze k je konstantní a může nabývat hodnot kladných $k > 0$, nebo záporných $k < 0$. Podle hodnoty činitele k pak rozlišujeme konvertory pozitivní ($k > 0$) a negativní ($k < 0$). Nahrazením konstantního činitele k kmitočtově závislou funkcí $K(s)$ dostáváme zobecněný impedanční konvertor - **GIC** (*Generalized Impedance Converter*) [1] [2].



Obr. 1.1: Transformace impedance impedančním konvertorem $C \rightarrow D_{EKV}$

Impedanční invertor je lineární dvojbran, který transformuje zatěžovací impedanci na vstup dle vztahu [1]:

$$Z_{IN} = \frac{a}{b} \cdot \frac{1}{Z_z} = k \cdot \frac{1}{Z_z}. \quad (1.2)$$

Impedance na vstupu Z_{IN} je tedy inverzí hodnoty zatěžovací impedance Z_z . Jak je popsáno výše, nabývá činitel inverze k pozitivní a negativní hodnoty a nahradíme-li ho kmitočtově závislou funkcí $K(s)$, dostaneme zobecněný imitační invertor [1] [2].

Gyrátor je pozitivním impedančním invertorem, užívaným k náhradě cívek. Bývá definován gyračními odpory (r) [2]:

$$U_2 = r_1 \cdot I_1, U_1 = -r_2 \cdot I_2. \quad (1.3)$$

Zpravidla se dělá gyrátor symetrický, platí proto $r_1 = r_2 = r$. Cívka se simuluje zatížením výstupu gyrátoru pomocí kapacitoru. Následně je tedy vstupní impedance [2]:

$$Z_{vst} = p \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot C_z = p \cdot L_{EKV}. \quad (1.4)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že impedance na vstupu je ryze induktivního charakteru a výsledná hodnota indukčnosti je přímo určena hodnotou kapacity a velikostí gyračních rezistorů [1] [2].

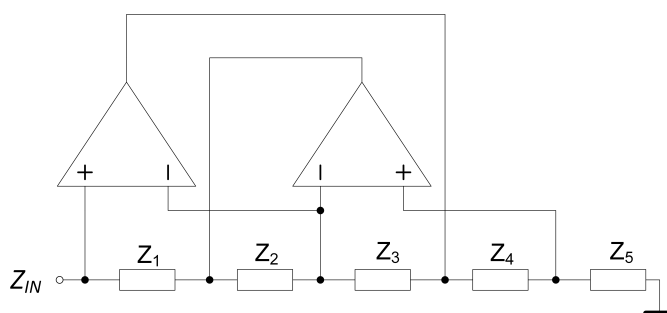
1.2 Antoniův impedanční konvertor

Také označovaný jako Antoniuův mutátor [1], je impedanční konvertor, který z jedné strany dělí a z druhé strany násobí zatěžovací impedanci kmitočtem a konstantou k . Obvod je z hlediska vstupů nesymetrický a brány je potřeba rozlišovat. Umožňuje přímou simulaci uzemněných cívek a dvojných kapacitorů [1] [2].

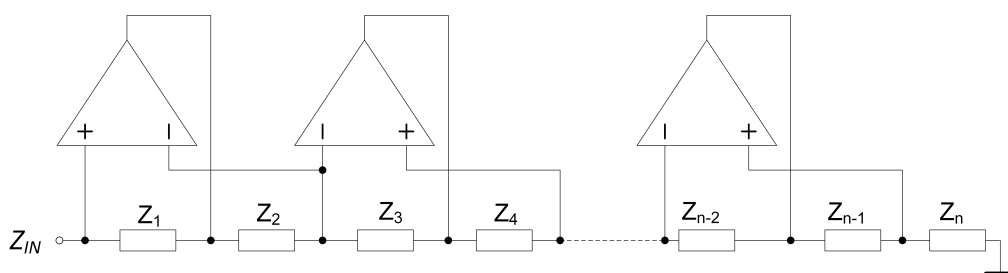
Součástí jsou dva operační zesilovače a pět pasivních prvků - impedancí (z čehož je jedna uzemněna), které lze zapojit s minimálně pěti impedancemi (obr. 1.2), chceme-li zapojení rozšířit, můžeme přidávat další operační zesilovače a impedance, přičemž koncová impedance by měla být uzemněna (obr. 1.3) [3].

Pro naše využití jsem zvolila základní zapojení s pěti impedancemi. Tato sestava nabízí limitní počet násobených prvků (pět), a platí pro ni tato rovnice celkové vstupní impedance [3]:

$$Z_{IN}(s) = \frac{Z_1(s) \cdot Z_3(s) \cdot Z_5}{Z_2(s) \cdot Z_4(s)}. \quad (1.5)$$



Obr. 1.2: Zapojení Antoniova impedančního konvertoru



Obr. 1.3: Rozšířené zapojení Antoniova impedančního konvertoru pro n impedancí

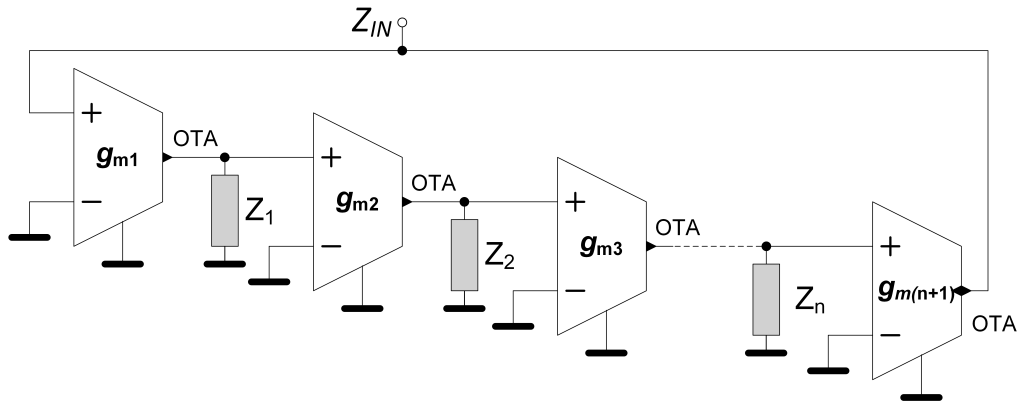
Záměnou různých impedancí za kondenzátory dostaneme induktivní vstupní impedanci obvodu nebo kapacitní vstupní impedanci obvodu. Hodnota výsledné

vstupní impedance se záměnou kondenzátorů a impedancí se mění podle tabulky 1.1 [2].

| $Z_1(s)$ | $Z_2(s)$ | $Z_3(s)$ | $Z_4(s)$ | $Z_5(s)$ | $Z_{IN}(s)$ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|
| $a \cdot R$ | R | $a \cdot R$ | R | $\frac{1}{sC}$ | $\frac{a^2}{sC}$ |
| R | R | R | $\frac{1}{sC}$ | R | $R^2 sC$ |
| R | $\frac{1}{sC}$ | R | $\frac{1}{sC}$ | R | $R^3 (sC)^2$ |
| R | R | $\frac{1}{sC}$ | R | $\frac{1}{sC}$ | $\frac{1}{Rs^2 C^2}$ |
| $\frac{1}{sC}$ | R | $\frac{1}{sC}$ | R | $\frac{1}{sC}$ | $\frac{1}{R^2 s^2 C^2}$ |

Tab. 1.1: Tabulka výsledných impedancí při záměně konkrétních impedancí za kapacitory

Rozšířením zapojení z obr. 1.3 se rychle zvyšuje počet potřebných součástek zároveň se složitostí rovnice vstupní impedance a zároveň operační zesilovače neumožňují cívku ladit. Těmto komplikacím a se dá vyhnout využijeme-li zapojení s elektronicky říditelnými aktivními prvky OTA a uzemněnými impedancemi (obr. 1.4), kde se využívá jiný způsob násobení impedancí [3] [4].



Obr. 1.4: Zapojení impedančního konvertoru pomocí OTAs s uzemněnými impedancemi

Výhoda tohoto zapojení oproti předchozímu Antoniovu obvodu je uzemnění všech impedancí a snadné elektronické řízení parametrů. Jejich uzemněním se všechny impedance dostanou do jmenovatele zlomku výsledné vstupní impedance [4]:

$$Z_{IN} = \frac{1}{g_{m1} \cdot g_{m2} \cdot g_{m3} \cdots g_{m(n+1)} \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdots Z_n}. \quad (1.6)$$

1.3 ARC filtry

Realizace cívky v zapojeních RLC filtrů přináší své problémy (hmotnost, rozměry, kvalita, cena) především v nízkofrekvenčních pásmech. Tyto důvody vedly ke snaze nahradit cívku jinými součástkami tak, aby byl induktivní charakter stále zachován. To se časem vědcům podařilo zapojením aktivního prvku s určitou kombinací rezistorů a kapacitorů. Zkratka ARC znamená, že obvod obsahuje rezistory, kondenzátory a aktivní prvky.

Fyzickou cívku (vinutí s nevýhodnými vlastnostmi pro předpokládané kmitočtové pásmo - hmotnost, rozměry) lze v ARC filtrech řešit formou nepřímé náhrady právě syntetickým ekvivalentem (obecným dvojpólem s induktivním charakterem, který používá aktivní prvky, rezistory a kondenzátory). Tyto syntetické prvky mohou mít i jiný charakter než indukčnost - např. dvojný kapacitor [1] [2].

Uváděný způsob má kromě vlivů reálných aktivních prvků (kmitočtové a parazitní omezení) na činnost výsledné aplikace taky ještě jedno omezení, a to pokud cívku musí téct velké proudy a jsou tam velké úbytky napětí (velké výkony - např. reproduktorové výhybky). V tomto případě se syntetické prvky moc nepoužívají.

1.3.1 Syntetický induktor, dvojný kapacitor

Syntetický induktor slouží k přímé simulaci cívek. Simulují se pomocí dvojpólů se složitějším zapojením (aktivní prvky, rezistory a kapacitory), které mají na vstupních svorkách induktivní reaktanci. Indukčnost daného dvojpólu závisí především na hodnotách impedancí R_1 a R_2 , od kterých se po té odvíjí narůstající modul impedance. Ten začíná na hodnotě $R_1 + R_2$ a roste s kmitočtem. Výsledná indukčnost dvojpólu se vypočítá pomocí vztahu [1] [2]:

$$L_{EKV} = R_1 \cdot R_2 \cdot C, \quad (1.7)$$

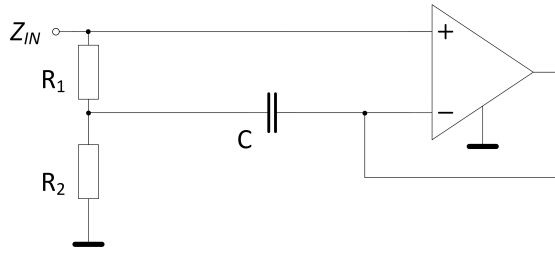
protože platí

$$Z_{IN}(s) = L_{EKV} \cdot (s) + R_{ZT}, \quad (1.8)$$

kde R_{ZT} je ztráta.

Toto je velice výhodné, jelikož lze správně zvolenými hodnotami součástek teoreticky simulovat i indukčnosti velice vysoké hodnoty, v řádech stovek, tisíců i dokonce milionů Henry [1]. Zde však mohou nastat problémy například se saturací operačních zesilovačů.

Realizovat tyto dvojpóly lze jednodušším zapojením - např. jedním OZ. Dvojpóly s jedním OZ nazýváme ztrátové uzemněné syntetické induktory (obr. 1.5). Složitější obvody, realizované s dvěma OZ, lze považovat až za ideální bezztrátové uzemněné syntetické induktory. Neuzemněné syntetické induktory je složitější realizovat, zpravidla je pro ně potřeba dvojnásob obvodů oproti uzemněným zapojením [1] [2].



Obr. 1.5: Zapojení uzemněného ztrátového syntetického induktoru

Dvojný kapacitor, *FDNR* (Frequency dependent negative resistor), někdy nazýván bicistor [2] [5] [6], je obdoba ztrátového induktoru. Využívá se převážně v nenáročných filtrech a zapojuje se záměnou rezistoru za kapacitor, a naopak, v zapojení syntetických induktorů. Nedodržíme-li podmínku pro kapacity $C_1 = C_2$ nebo zesílení $A = 1$, stanou se parametry $D(\omega)$, $C_p(\omega)$ kmitočtově závislé [2]. Realizace je obdobná s realizací syntetického induktoru, až na jeden rezistor a dva kapacitory; vstupní impedance:

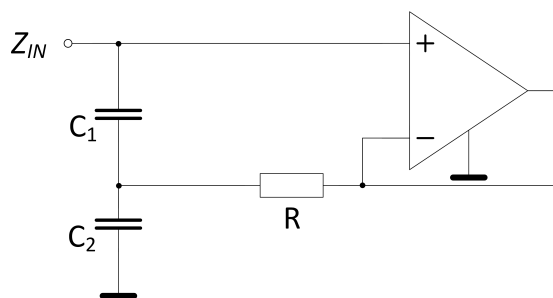
$$Z_{IN}(s) = D_{ekv}(s^2) + C_p(s), \quad (1.9)$$

kde

$$D_{ekv} = C_1 \cdot C_2 \cdot R \quad (1.10)$$

a C_p vyjadřující zde ztráty.

Dále stejně jako u syntetického induktoru uvažujeme ztrátové uzemněné dvojný kapacitor realizované s jedním OZ (obr. 1.7), ideální bezztrátový uzemněný dvojný kapacitor realizovaný dvěma OZ, a těžko realizovatelný neuzemněný dvojný kapacitor [1].



Obr. 1.6: Zapojení ztrátového uzemněného dvojného kapacitoru realizované s jedním OZ

1.4 Oscilátor

Základním obvodem oscilátoru je rezonátor RLC (rezonanční paralelní obvod), jehož impedance za rezonance je dána kladným odporem R_P .

V případě, že se k rezonátoru připojí negativní odpor, je tento prvek schopen ztrátu vykompenzovat a tím odtlumit rezonátor, tedy platí $|R_P| = |R_N|$, kde R_N je odpor negativního rezistoru. Charakteristická rovnice je jmenovatel impedance rezonátoru:

$$Z_{IN} = \frac{s \cdot \frac{1}{C}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_P \cdot C} - \frac{R_A}{C \cdot R_B \cdot R_X}\right) + \frac{1}{L \cdot C}} \quad (1.11)$$

Rezonátor kmitá na kmitočtu daném Thompsonovým vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}. \quad (1.12)$$

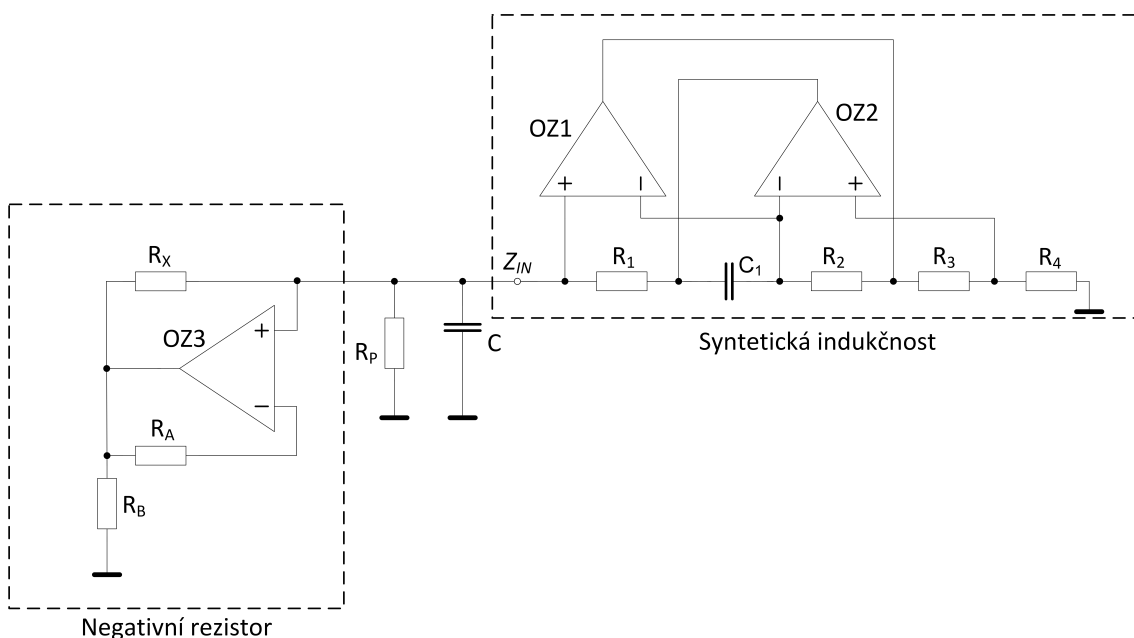
K rozkmitání napětí ve výše zmíněných zapojeních je využito zapojení s negativním rezistorem (obr. 1.8). Pro rozkmitání obvodu platí tento vzorec:

$$R_P = \frac{R_x}{1 - \frac{R_A + R_B}{R_B}}, \quad (1.13)$$

ze kterého vyplývá přímá závislost poměrů impedancí:

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{R_X}{R_P}. \quad (1.14)$$

Zajistíme-li podmínku (1.14), zapojený obvod bude kmitat.



Obr. 1.7: Zapojení oscilátoru s kompenzací pomocí negativního odporu (R_N)

2 Návrh

Pro návrh konkrétních hodnot součástek jsem si prvně odvodila přenosovou funkci $K(s)$, konkrétně pro horní propust RCL (kmitočtově závislý dělič tvořený kondenzátorem v podélné větvi a rezistorem s cívku paralelně v příčné větvi na zem):

$$K(s) = \frac{s^2 \cdot L_{ekv} \cdot R_Q \cdot C}{s^2 \cdot L_{ekv} \cdot R_Q \cdot C + s \cdot L_{ekv} + R_Q} \quad (2.1)$$

Následnou matematickou úpravou tohoto vzorce:

$$\begin{aligned} K(s) &= \frac{s^2 \cdot L_{ekv} \cdot R_Q \cdot C}{s^2 \cdot L_{ekv} \cdot R_Q \cdot C + s \cdot L_{ekv} + R_Q} = \frac{s^2}{s^2 + \frac{s \cdot L_{ekv}}{L_{ekv} \cdot R_Q} + \frac{R_Q}{L_{ekv} \cdot R_Q \cdot C}} = \\ &= \frac{s^2}{s^2 + \frac{1}{R_Q \cdot C} \cdot s + \frac{1}{L_{ekv} \cdot C}}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

a porovnáním s obecným tvarem přenosové funkce

$$\frac{s^2}{s^2 + \frac{1}{R_Q \cdot C} \cdot s + \frac{1}{L_{ekv} \cdot C}} = \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega}{Q} \cdot s + \omega^2}, \quad (2.3)$$

kde Q je činitel jakosti a ω úhlový kmitočet, dostaneme vztahy pro výpočet ω a Q pro daný obvod:

$$\frac{\omega}{Q} = \frac{1}{R_Q \cdot C} \rightarrow Q = \omega \cdot R_Q \cdot C, \quad (2.4)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{L_{ekv} \cdot C} \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{1}{L_{ekv} \cdot C}}. \quad (2.5)$$

Dosažením obou rovnic vyplývá vztah pro činitel jakosti Q :

$$Q = \sqrt{\frac{1}{L_{ekv} \cdot C}} \cdot R_Q \cdot C. \quad (2.6)$$

Za počáteční parametry jsem zvolila $Q = 10$, $f_0 = 10\text{kHz}$, $R_3 = R_4 = 1\text{k}\Omega$, $C = 100\text{nF}$, $C_1 = 10\text{nF}$. Dopočítávám odpovídající L_{EKV} , R_Q , R_1 a R_2 , přičemž $R_1 = R_2 = R$. Zapojení syntetické cívky s Antoniovým obvodem je ukázáno na obr. 2.1.

$$\begin{aligned} \omega &= \sqrt{\frac{1}{L_{ekv} \cdot C}} \rightarrow L_{ekv} = \frac{1}{\omega^2 \cdot C} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_0)^2 \cdot C} = \\ &= \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^3)^2 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = 2,53 \cdot 10^{-3} \text{H} = \underline{2,53 \text{ mH}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$L_{ekv} = R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \rightarrow L_{ekv} = R^2 \cdot C_1$$

$$\rightarrow R = \sqrt{\frac{L_{ekv}}{C_1}} = \sqrt{\frac{2,53 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-9}}} = \underline{500 \Omega} \quad (2.8)$$

$$Q = \sqrt{\frac{1}{L_{ekv} \cdot C}} \cdot R_Q \cdot C = \sqrt{\frac{C}{L_{ekv}}} \cdot R_Q$$

$$\rightarrow R_Q = \frac{Q}{\sqrt{\frac{C}{L_{ekv}}}} = \frac{10}{\sqrt{\frac{100 \cdot 10^{-9}}{2,53 \cdot 10^{-3}}}} = 1591 \Omega = \underline{1,59 k\Omega} \quad (2.9)$$

Pro návrh oscilátoru:

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{R_X}{R_P} \rightarrow R_A = R_B = R_X = R_P = R, \quad (2.10)$$

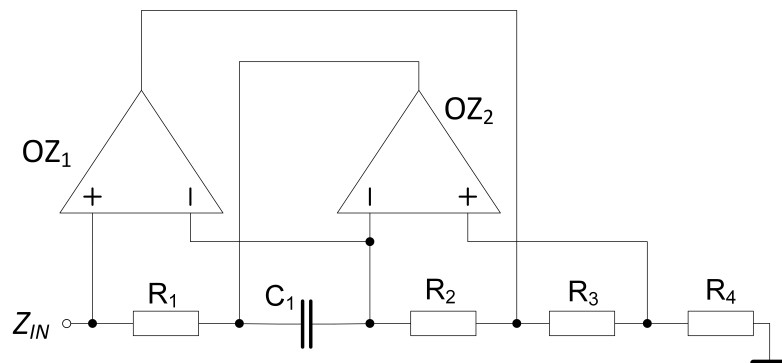
tedy jako hodnotu odporů zvolím $R = 1 \text{ k}\Omega$ a pro nastavení hodnoty cívky využiji výše vypočítané hodnoty.

Pro dvojnou cívku (obr. 2.2) vychází hodnota vstupní impedance:

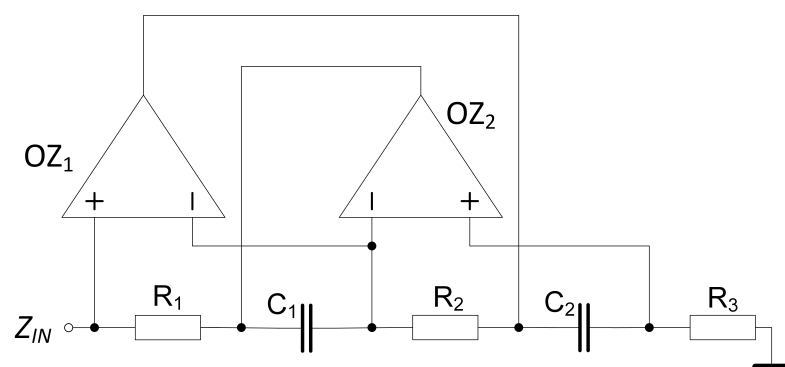
$$Z_{IN}(s) = s^2 \cdot D \quad (2.11)$$

$$Z_{IN}(s) = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{\frac{1}{C(s)} \cdot \frac{1}{C(s)}} \rightarrow D = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2 =$$

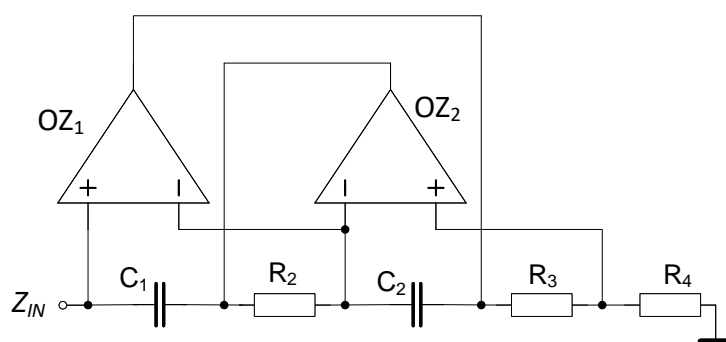
$$= 1 \cdot 10^3 \cdot 500 \cdot 500 \cdot (10 \cdot 10^{-9})^2 = 25 \cdot 10^{-9} \text{ F}^2 \Omega^3 \quad (2.12)$$



Obr. 2.1: Zapojení syntetické cívky s Antoniovým obvodem



Obr. 2.2: Zapojení dvojné cívky s Antoniovým obvodem



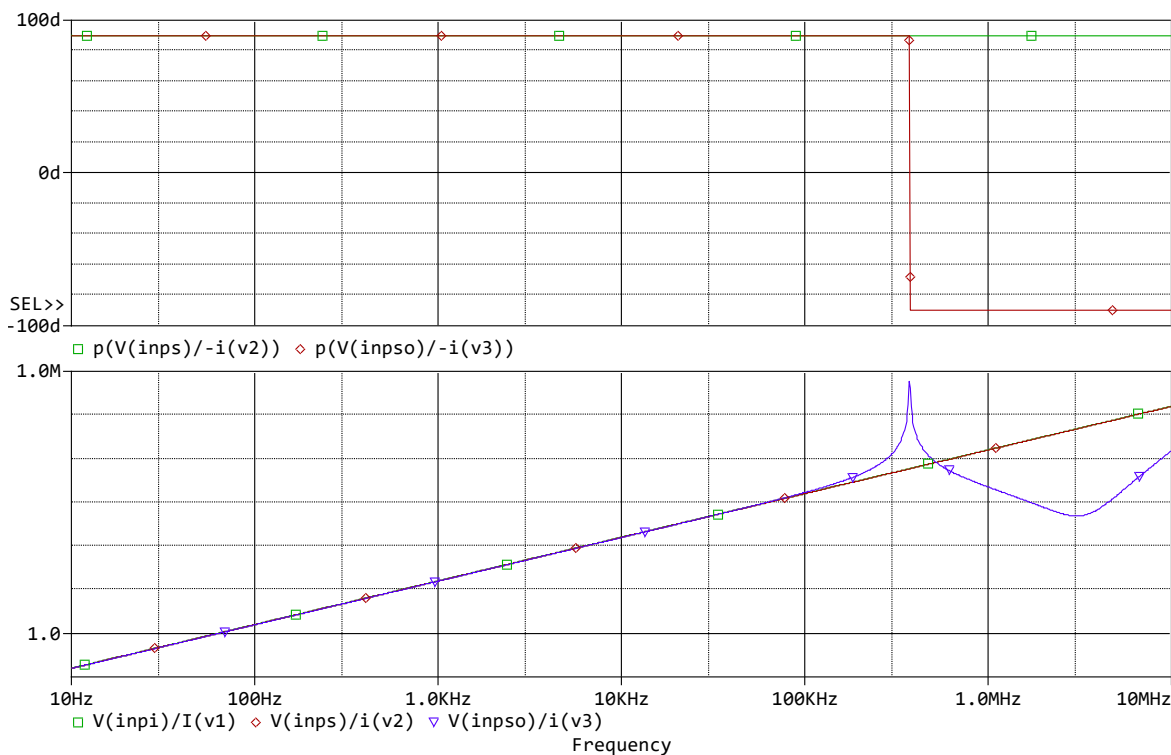
Obr. 2.3: Zapojení dvojného kapacitoru s Antoniovým obvodem

3 Analýza zapojení počítačovou simulací

3.1 Analýza navržené syntetické cívky a dvojného kapacitoru

Na základě návrhu hodnot součástek z předchozí kapitoly ($2,53 \text{ mH}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$, $R_1 = R_2 = 500 \Omega$, $Q = 10$, $R_Q = 1,59 \text{ k}\Omega$) jsem provedla všechny simulace.

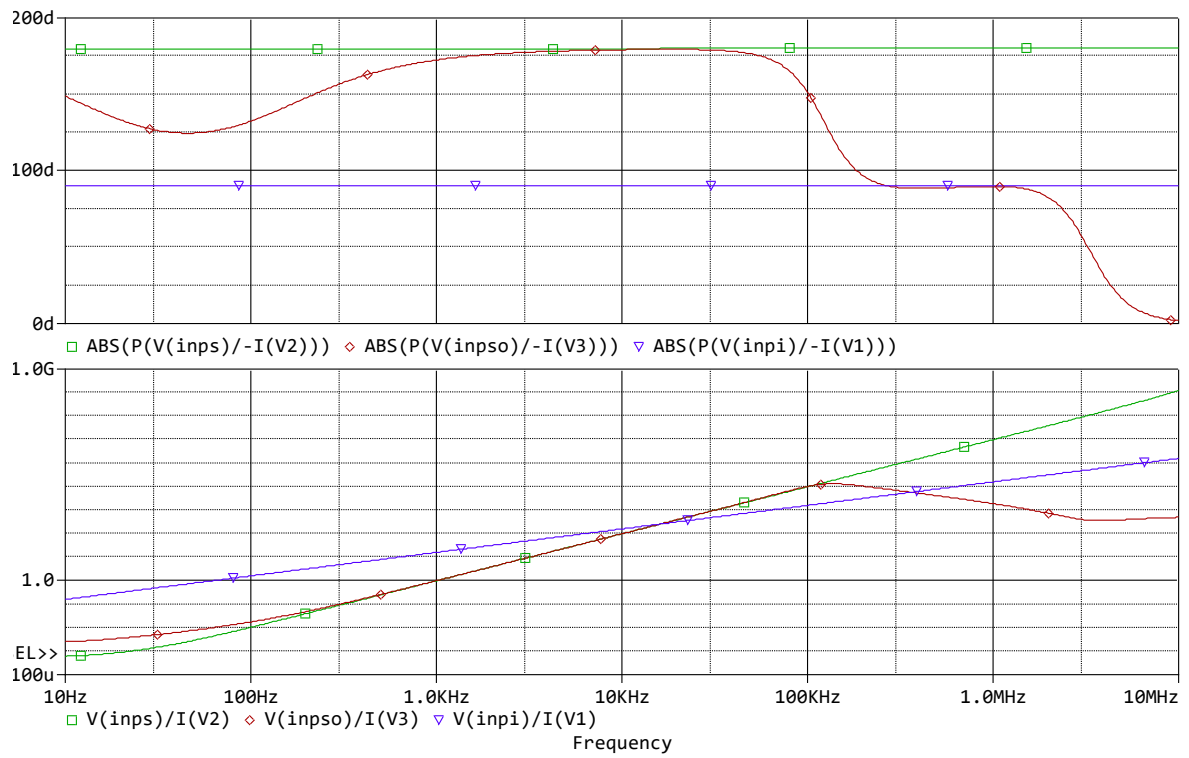
Mezi prvními simulacemi je průběh vstupní impedance syntetické cívky (obr. 3.1), a to pro zapojení s ideální cívkou (inpi - zelená barva), s náhradou cívky ideálními operačními zesilovači (inps - červená barva) a s náhradou cívky pomocí modelů reálných operačních zesilovačů (TL084 [7], dále makromodely) (inps0 - modrá barva). Z výsledného průběhu lze vidět, že všechny tři varianty cívky mají shodný průběh vstupní impedance až do hodnoty okolo 100 kHz .



Obr. 3.1: Impedance a její fáze u syntetické cívky

Simulací dvojné cívky (obr. 3.2) se potvrdil předpoklad větší strmosti vstupní impedance oproti strmosti vstupní impedance syntetické cívky. Graf opět znázorňuje zapojení s ideálními OZ (inps) a makromodely OZ (inps0), a na porovnání strmostí ještě průběh vstupní impedance cívky (inpi). Z průběhu lze opět vyčíst stejné chování

s ideálními i makromodely OZ do hodnoty zhruba 100 kHz, přičemž konečná hodnota vstupní impedance limituje pásmo použitelnosti i na nízkých kmitočtech (pod 100 Hz),

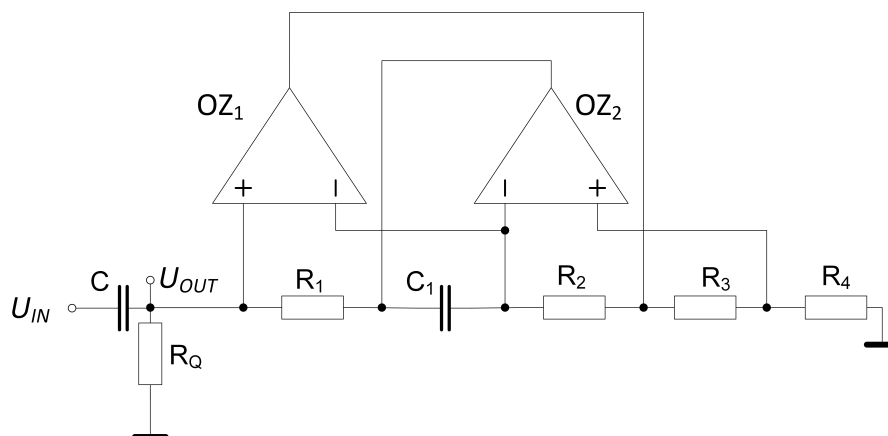


Obr. 3.2: Impedance a její fáze u dvojné cívky

3.2 Analýza vybraných RLC zapojení

3.2.1 Vybrané filtry

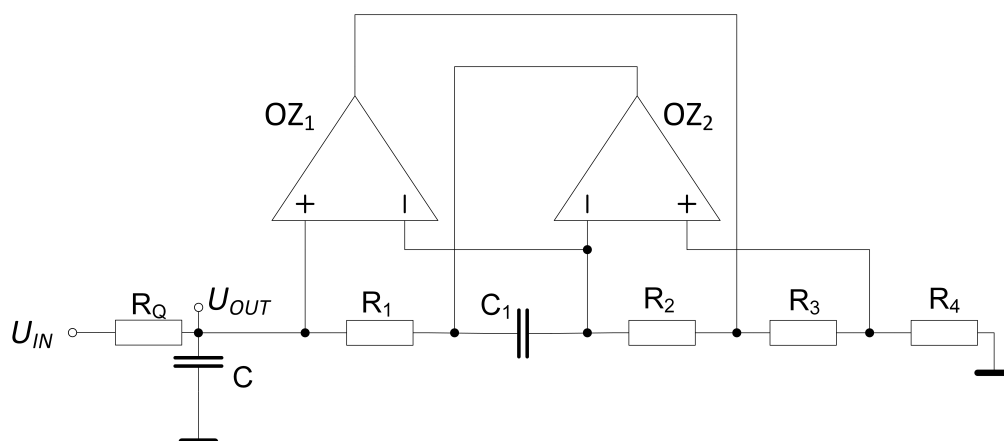
Ze zapojení se syntetickou cívkou jsem vybrala horní propust (obr. 3.3) a pásmovou propust 2. řádu (obr. 3.4.).



Obr. 3.3: Horní propust v zapojení se syntetickou cívkou

Pro přenos horní propusti platí:

$$K(s) = \frac{s^2}{s^2 + s \cdot \frac{1}{R_Q \cdot C} + \frac{R_3}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_4 \cdot C_1 \cdot C}} \quad (3.1)$$



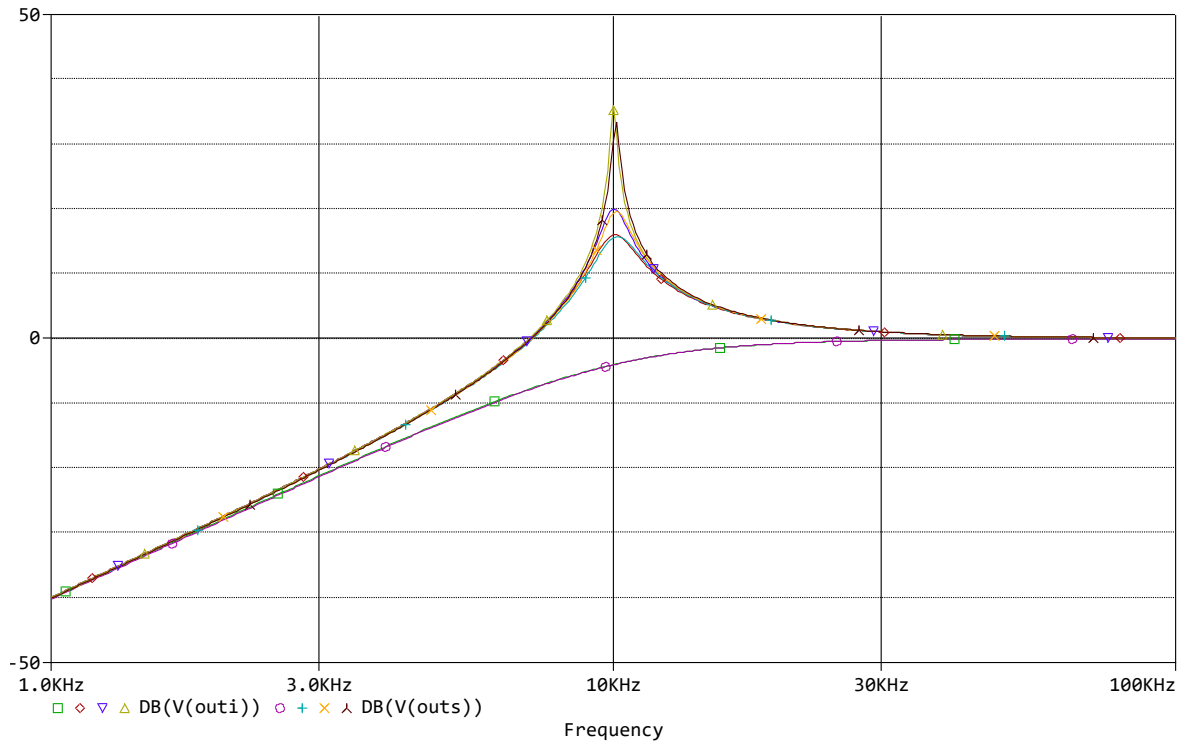
Obr. 3.4: Pásmová propust v zapojení se syntetickou cívkou

Pro přenos pásmové propusti platí:

$$K(s) = \frac{s \cdot \frac{1}{R_Q \cdot C}}{s^2 + s \cdot \frac{1}{R_Q \cdot C} + \frac{R_3}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_4 \cdot C}} \quad (3.2)$$

V grafu je zobrazen přenos horní propusti (obr. 3.5). Na začátku jsem si volila hodnotu činitele jakosti $Q = 10$, jehož hodnota se odvíjí od hodnoty odporu R_Q . Z tohoto důvodu jsem zvolila krokování odporu R_Q o krocích $100\ \Omega$, $1\ \text{k}\Omega$, $1,59\ \text{k}\Omega$ a $10\ \text{k}\Omega$, abych zjistila, jak ovlivní různě velké hodnoty Q a R_Q přenos.

Z výsledného průběhu přenosu lze odvodit, že s rostoucím odporem roste činitel jakosti, snižuje se šířka pásma a rezonance se vyostřuje.



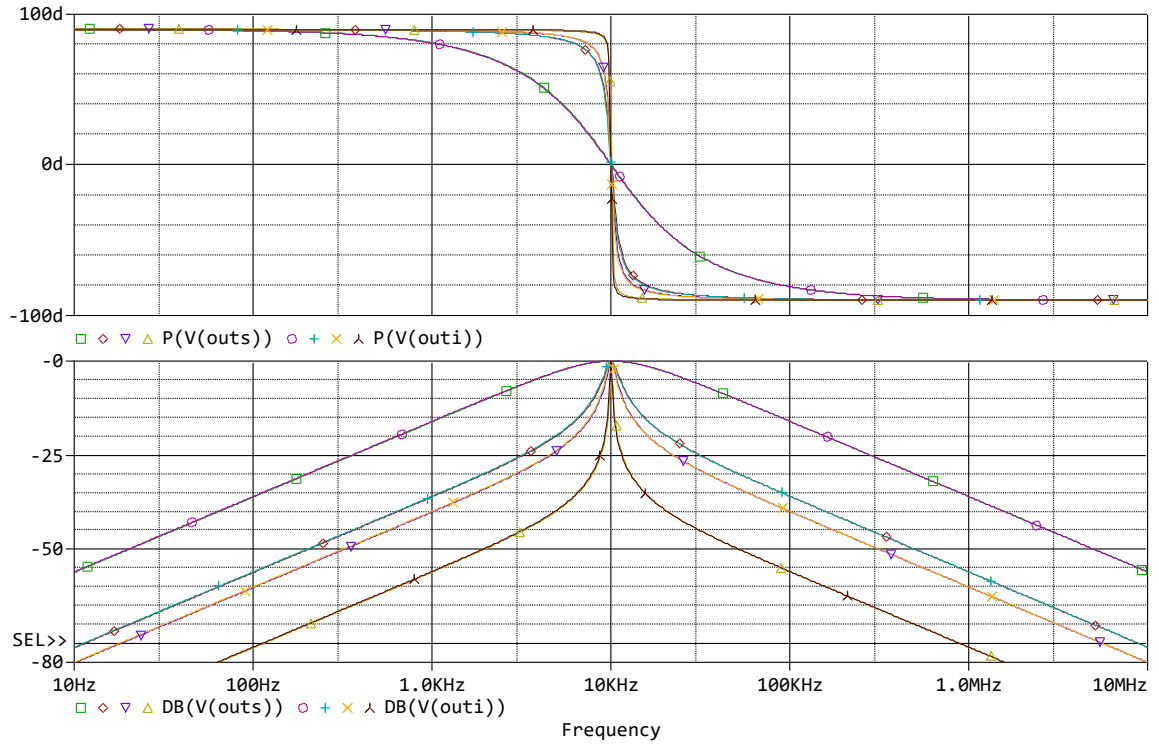
Obr. 3.5: Přenos horní propusti s krokováním $R_Q = 100\ \Omega$, $1\ \text{k}\Omega$, $1,59\ \text{k}\Omega$ a $10\ \text{k}\Omega$

Ze simulace přenosu a fáze pro pásmovou propust lze při krokování R_Q vidět velký vliv Q a R_Q na šířku pásma průběhu. S rostoucím R_Q se zmenšovala šířka pásma (z $10\ \text{kHz}$ pro $R_Q = 500\ \Omega$ na $380\ \text{Hz}$ pro $R_Q = 10\ \text{k}\Omega$) a rezonance se vyostřovala.

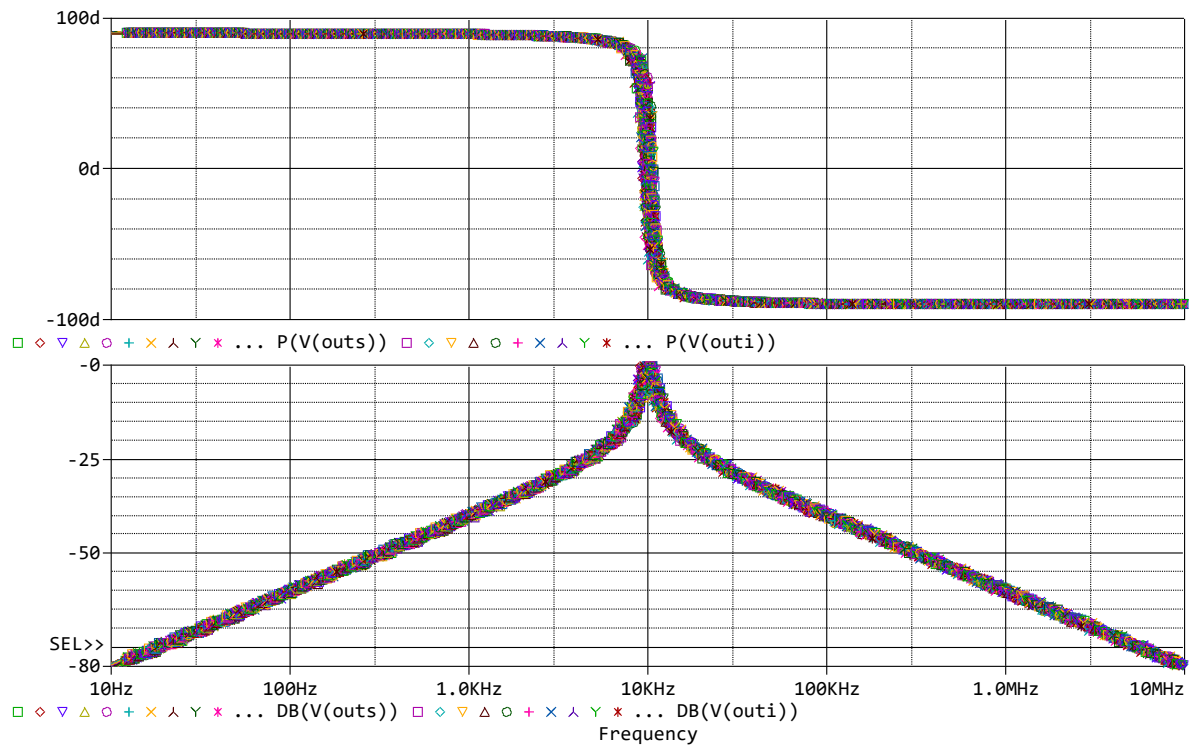
| Měřeno pro odpor R_Q : | $100\ \Omega$ | $1\ \text{k}\Omega$ | $1,59\ \text{k}\Omega$ | $10\ \text{k}\Omega$ |
|--------------------------|---------------|---------------------|------------------------|----------------------|
| f_c [Hz] | 10,1k | 10k | 10k | 10k |
| Q [-] | 0,8 | 6 | 9,3 | 25,6 |
| BW [Hz] | 15,9k | 1,7k | 1k | 394 |

Tab. 3.1: Tabulka výsledných hodnot f_c , Q a BW z krokování parametru

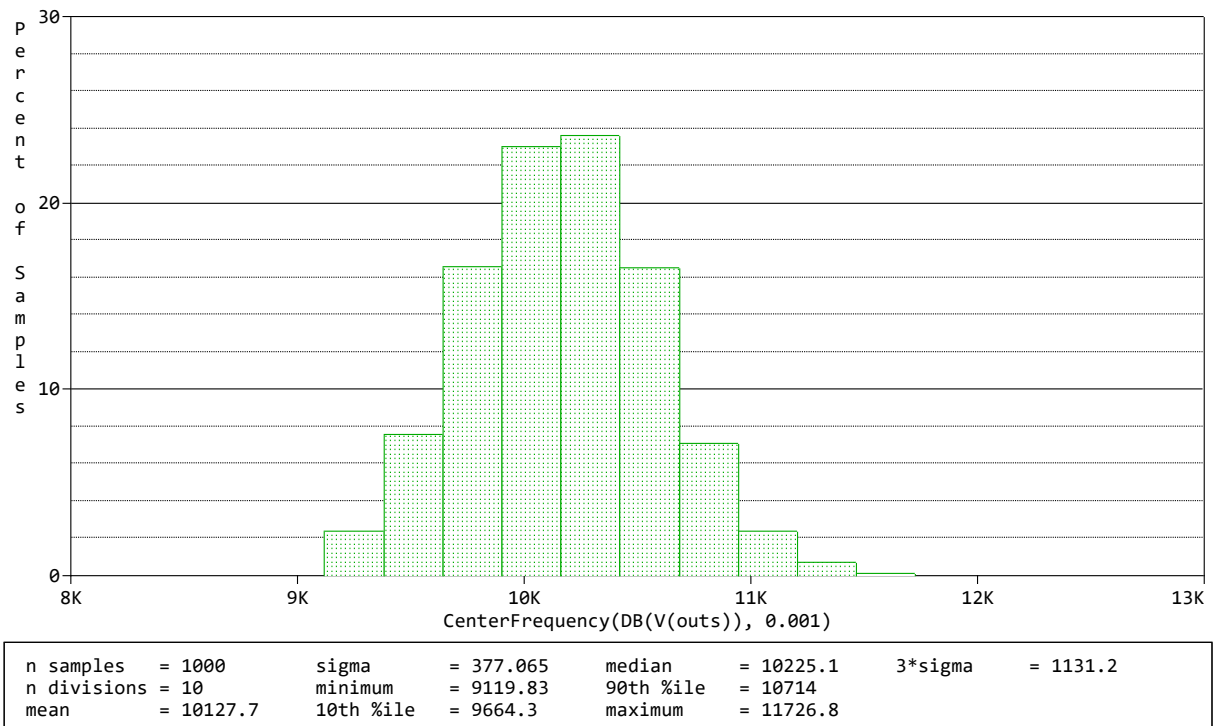
Pro pásmovou propust jsem také udělala toleranční analýzu pro zapojení s makro-modely OZ [7], kde byla pro R tolerance 1% a pro C tolerance 5%. Rozptyl střední frekvence $f_c = (10128 \pm 1131)$ Hz, šířky pásma $BW = (1073 \pm 165)$ Hz a činitele jakosti $Q = (9,5 \pm 1)$. Porovnáním s výsledky obvodu s drátovou cívkou se rozptyl drží přesněji na stanovené hodnotě ($f_c = (10042 \pm 1809)$ Hz, $Q = (9,9 \pm 1,8)$, $BW = (1016 \pm 99)$ Hz).



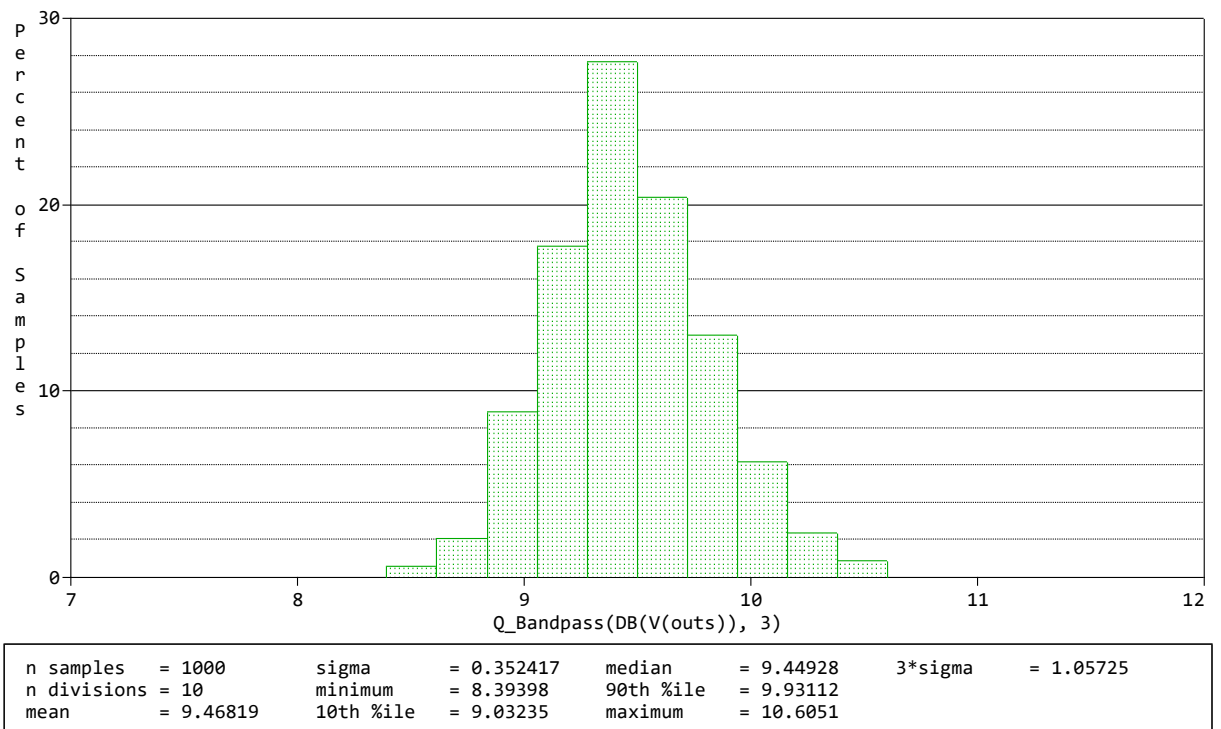
Obr. 3.6: Fázová a modulová kmitočtová charakteristika pásmové propusti s krokováním R_Q



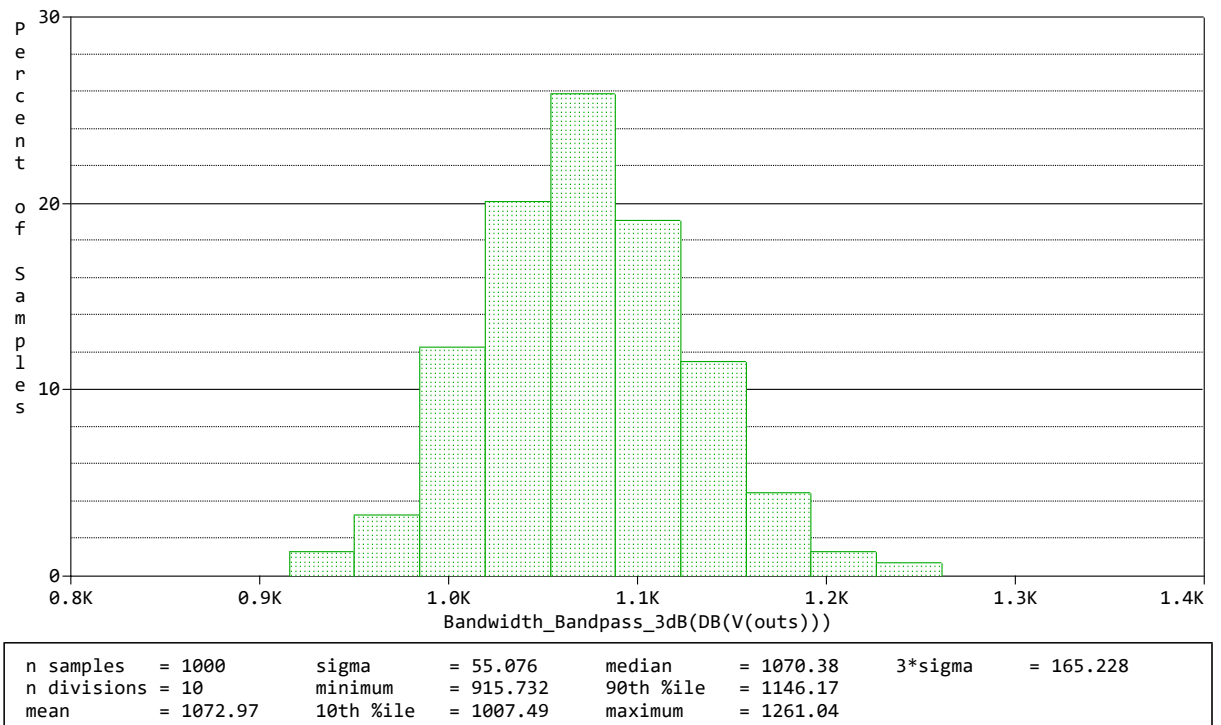
Obr. 3.7: Toleranční analýza pro pásmovou propust (tolerance R - 1%, C - 5%)



Obr. 3.8: Rozptyl hodnot střední frekvence pásmové propusti

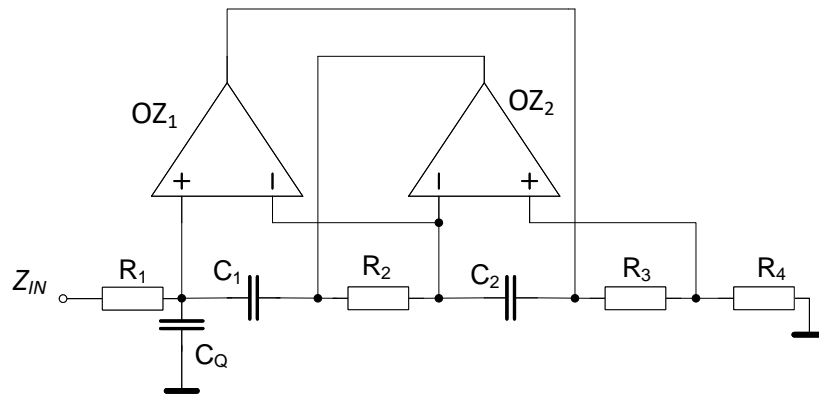


Obr. 3.9: Rozptyl hodnoty Q pásmové propusti



Obr. 3.10: Rozptyl šířky pásma pro pásmovou propust

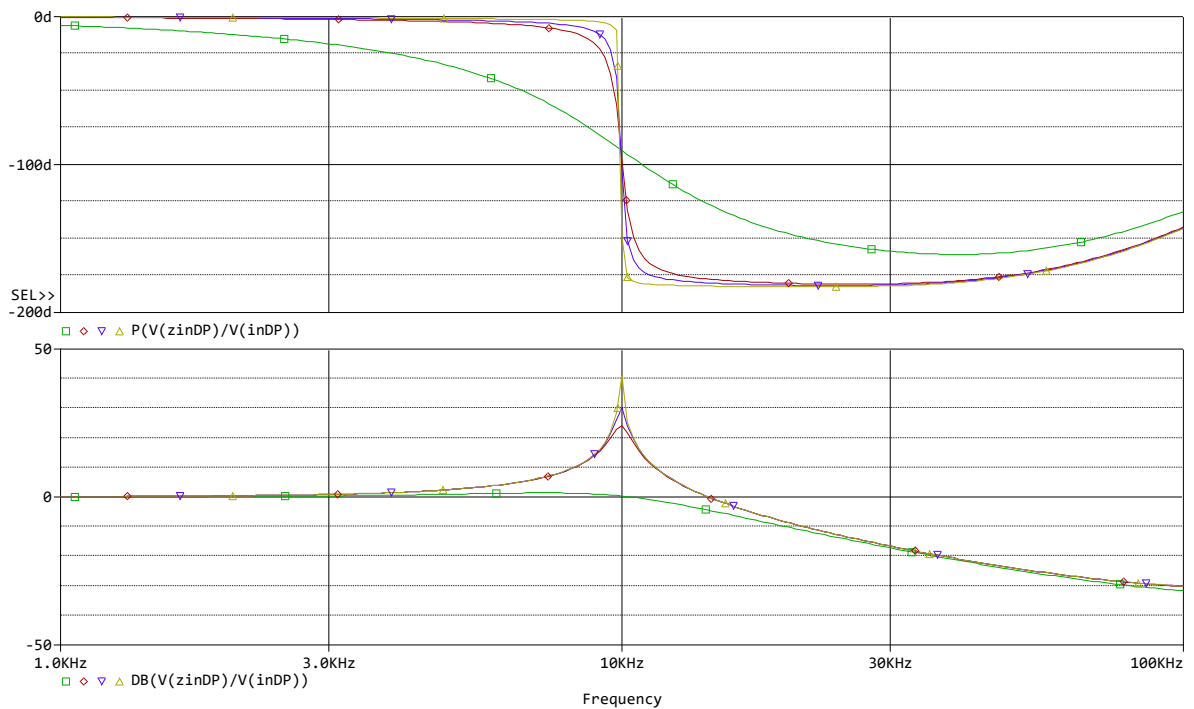
Pro získání filtru dolní propusti 3. řádu je potřeba nahradit syntetickou cívku dvojným kapacitorem (obr 2.3). Následné zapojení pro filtr dolní propusti:



Obr. 3.11: Dolní propust zapojená s dvojným kapacitorem

Zapojení má tvar:

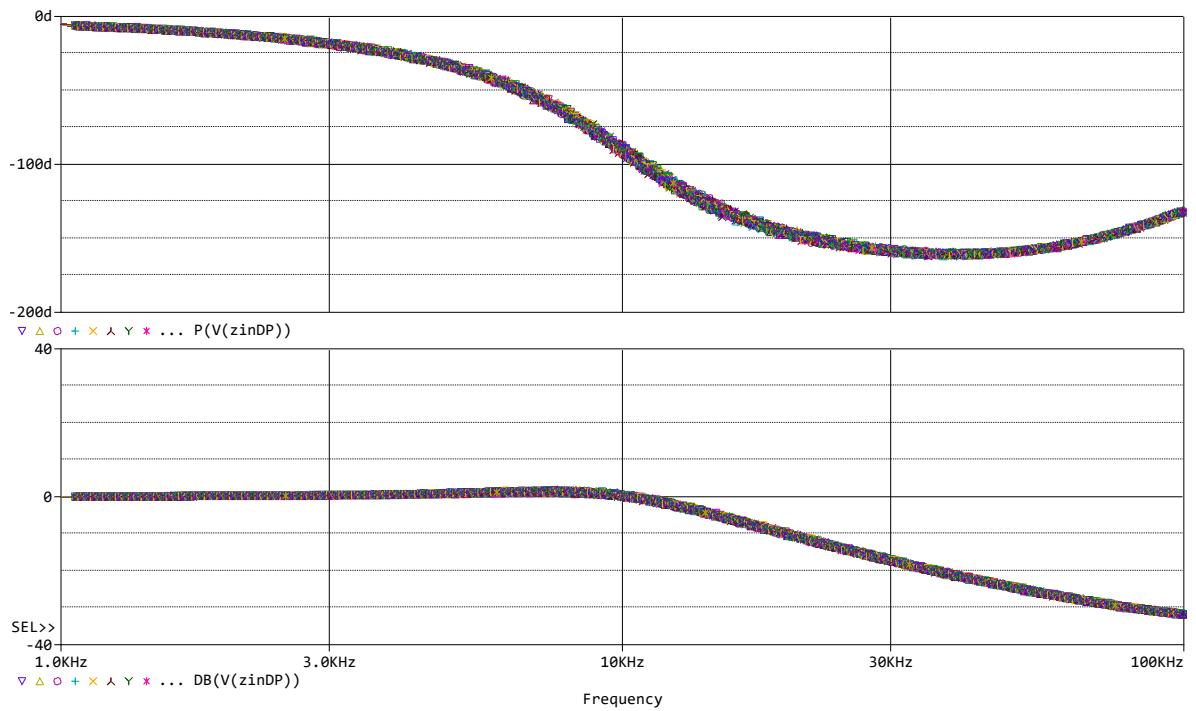
$$K(s) = \frac{\frac{R_4}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2}}{\frac{R_4}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2} + s \cdot \frac{R_4 \cdot C_Q}{R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2} + s^2} \quad (3.3)$$



Obr. 3.12: Fázová a modulová charakteristika dolní propusti 3. řádu s krokováním $C_Q = 10 \text{ nF}, 1 \text{ nF}, 680 \text{ pF}, 420 \text{ pF}$

Na rozdíl od horní a pásmové propusti, u zapojení filtru dolní propusti je součástka ovlivňující rezonanci kondenzátor C_Q . Z obr. 3.12 lze usoudit, že s klesající hodnotou C_Q se zmenšuje šířka pásma a vyostřuje rezonance.

Fázová charakteristika dolní propusti odpovídá v určitém intervalu frekvencí téměř dokonale RL obvodu. Od určité frekvence (přibližně $f = 33,5$ kHz) lze sledovat, jak se fáze opět stáčí zpět z -180° směrem k -90° . Tato změna je zapříčiněna frekvenční závislostí aktivních prvků v Antoniovém impedančním konvertoru.



Obr. 3.13: Toleranční analýza dolní propusti (tolerance R - 1% a C - 5%)

3.2.2 OTAs s uzemněnými impedancemi

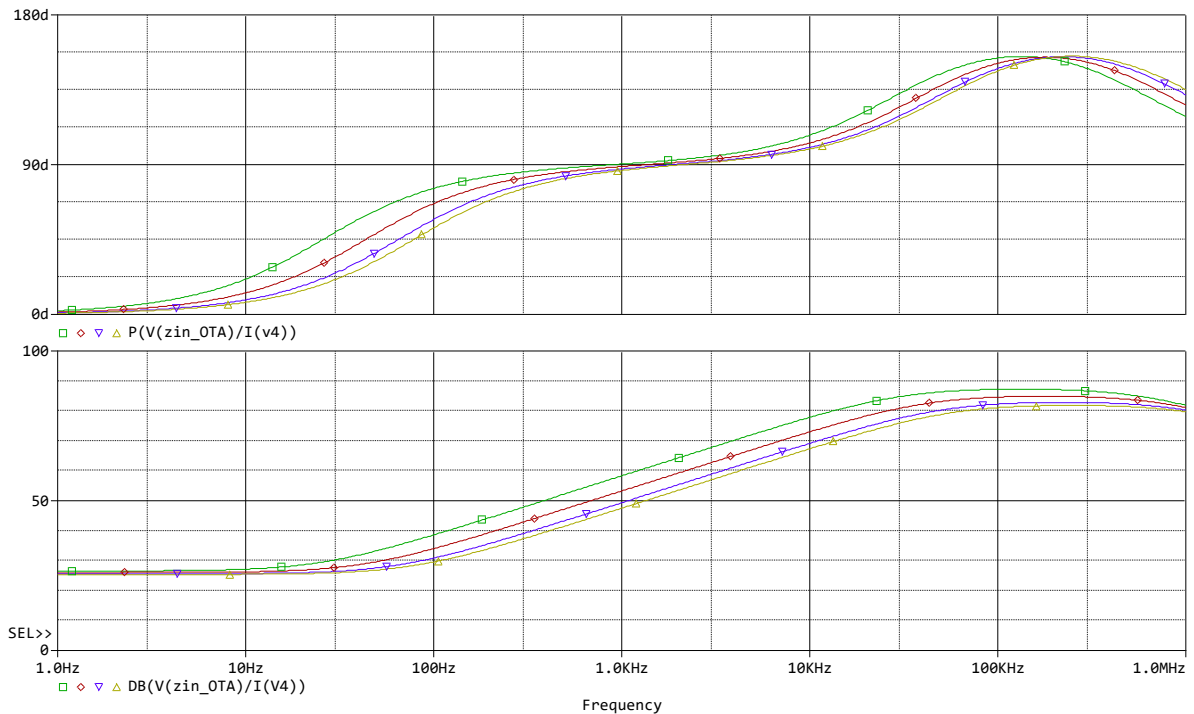
Kaskádní zapojení OTAs (obr. 1.4) umožňuje stejně jako Antoniiův obvod násobení impedancí. Toto konkrétní zapojení násobí impedance ve jmenovateli zlomku (1.6), spolu s transkonduktancemi daných OTA. Transkonduktance, neboli strmost, daných operačních zesilovačů je dána datasheetem [8]:

$$g_m \approx 19,2 \cdot I_{ABC}, \quad (3.4)$$

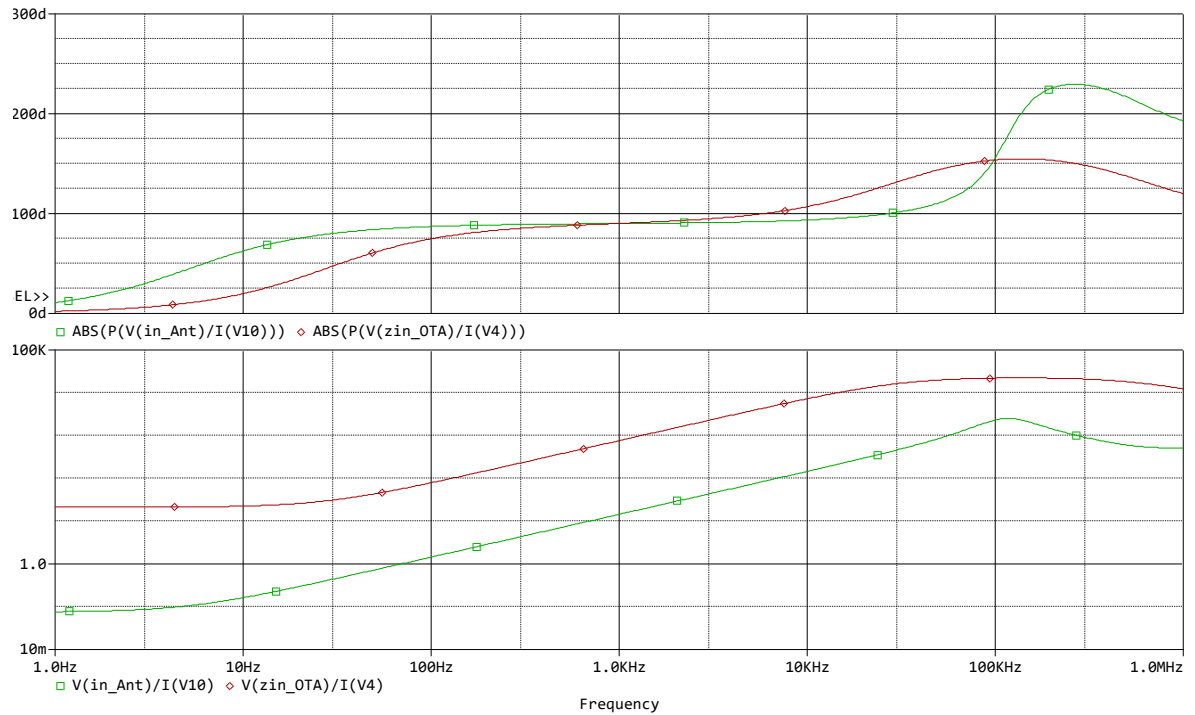
kde I_{ABC} je Bias proud.

Pro simulace syntetické cívky jsem zvolila hodnoty impedancí $Z_1 = R$ ($R = 10\text{k}\Omega$) a $Z_2 = 1/sC$ ($C = 100\text{ nF}$). Následná rovnice impedance:

$$Z_{IN} = \frac{s \cdot C}{g_{m1} \cdot g_{m2} \cdot g_{m3} \cdot R} \quad (3.5)$$

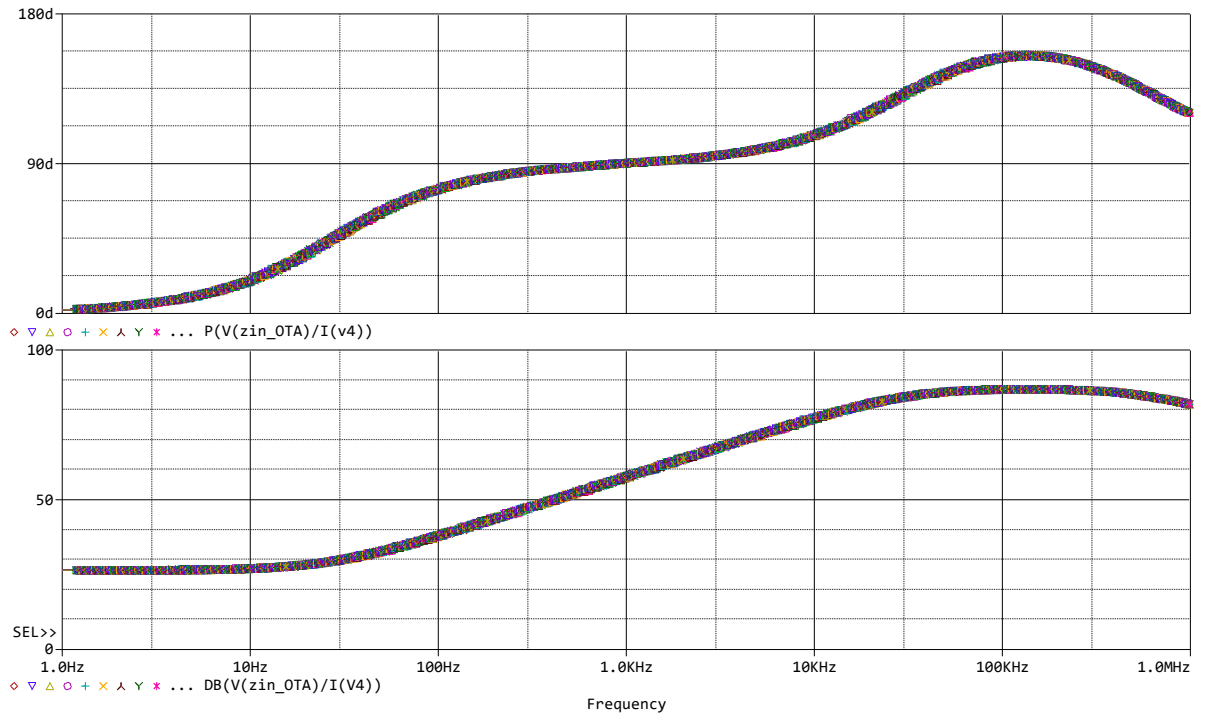


Obr. 3.14: Zobrazení fázové a modulační charakteristiky vstupní impedance syntetické zemněné cívky v zapojení s OTAs s krokovaním proudu $U_{SET} = 0.5\text{ V}$ (nejvýše položená křivka), 5 V, 10 V, 13 V (nejníže položená křivka)



Obr. 3.15: Porovnání fázové a modulační charakteristiky syntetické cívky zapojené Antoniovým impedančním konvertorem a OTAs kaskádou

Pro porovnání jsem udělala simulaci syntetické cívky obvodu s Antoniovým impedančním konvertorem (zelená barva) a s OTAs kaskádou (červená barva). Z průběhu lze vidět lineární chování modulové charakteristiky obou obvodů v rozsahu 10 Hz až přibližně 50 kHz. Z fázové charakteristiky je patrný značný vliv parazitní vstupní impedance obvodu a parazitní rezistivní složky, jelikož ideální průběh fáze by byl konstantní (+90deg). V tomto případě je konstantní průběh u OTAs v rozmezí 300 Hz až 3 kHz, a u Antoniova obvodu je to 50 Hz až 50 kHz. Z tohoto porovnání lze usoudit, že OTA kaskáda může být považována za ideální v malém rozmezí frekvencí (300 Hz až 3 kHz) oproti Antoniovu obvodu, který má skoro trojnásobný rozsah, ve kterém se dá považovat za téměř ideální.

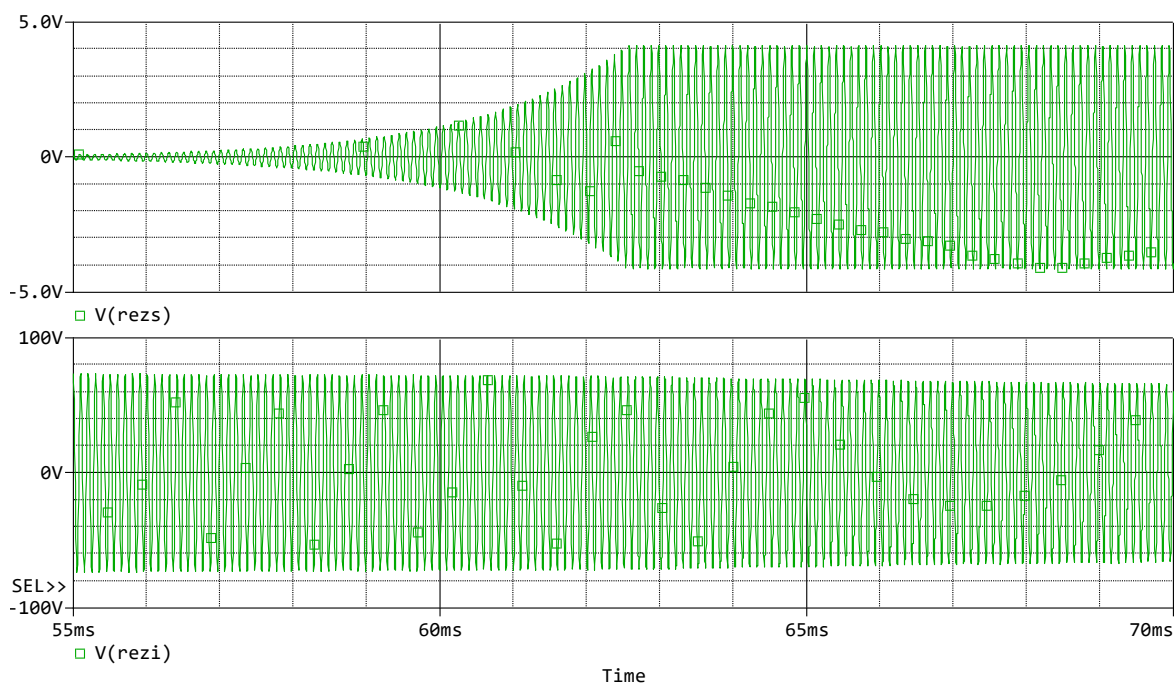


Obr. 3.16: Toleranční analýza pro zapojení syntetické cívky s OTA kaskádou

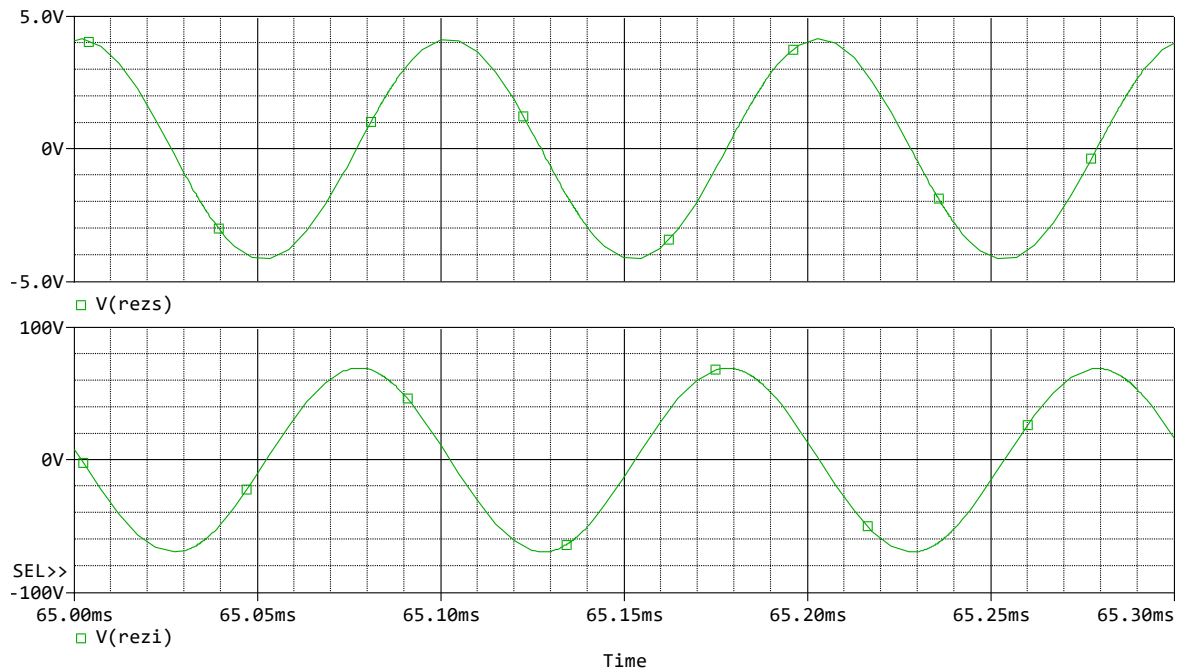
3.2.3 Oscilátor

Aby výsledný obvod oscilloval, je potřeba zajistit podmínku poměru odporů (1.13). Hodnoty odporů jsem zvolila $R_A = R_B = R_X = R_P = 1 \text{ k}\Omega$, kondenzátor $C = 100 \text{ nF}$.

Teoretickou simulací jsem zjistila, že poměr (1.13) neodpovídá návrhu. Je třeba ho upravit tak, aby levá strana byla větší než 1, přesněji pokusem byl zjištěn poměr 1,1. Pouze při tomto poměru se daný obvod rozkmitá a kmitá s frekvencí 1 kHz. Náběh oscilací a jejich detail jsou zobrazeny na obr. 3.11 a 3.12, kde *rezs* je průběh s makromodely OZ a průběh *rezi* je simulace ideálního obvodu s drátovou cívkou, pro ověření splnění podmínky oscilací v ideálním případě.

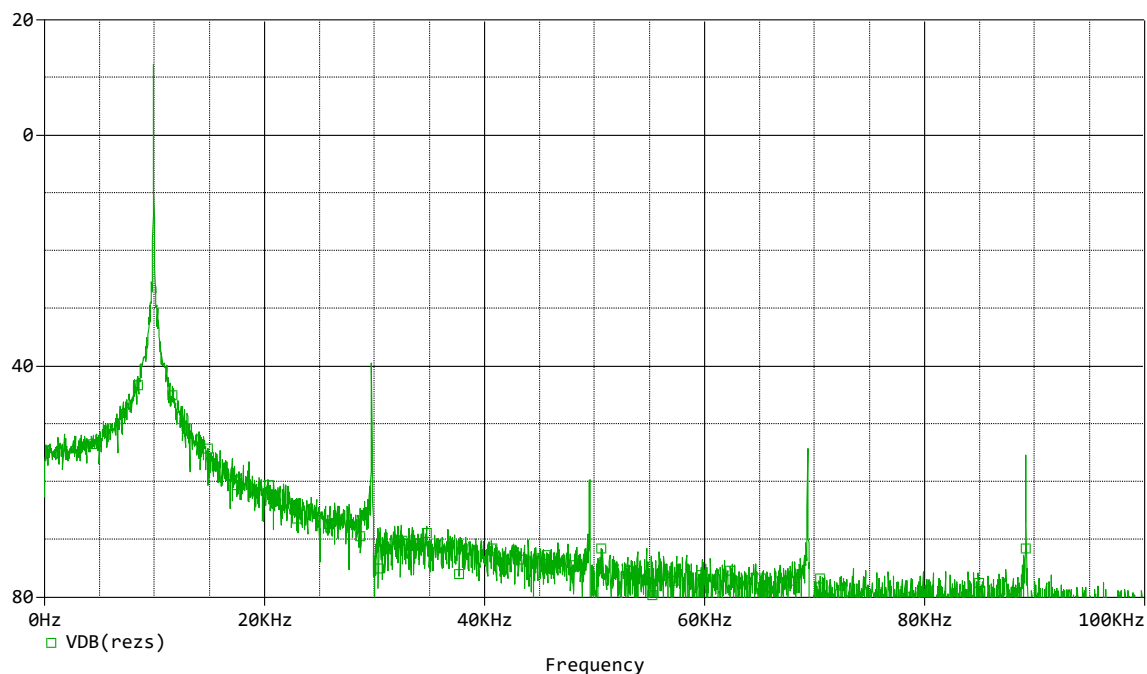


Obr. 3.17: Kmitající oscilátor (sledován vysokoimpedanční uzel rezonátoru)



Obr. 3.18: Detail kmitajícího výstupního napětí napětí oscilátoru

U oscilátoru jsem také udělala analýzu spektra, kde jsem porovnávala odstup vyšších harmonických složek. Jednotlivé odstupy překračují hodnotu 40 dB, v případě prvních dvou harmonických je to až přes 50 dB (51,5 dB), očekávám tedy nízké harmonické zkreslení, hluboko pod 1%.



Obr. 3.19: Frekvenční spektrum oscilátoru

Závěr

Tato práce řeší zapojení s Antoniovým obvodem, jeho možné využití jako syntetické cívky a dvojně indukčnosti/kapacitoru a možnost záměnou kondenzátorů a rezistorů simulovat RLC filtry. Na základě zvolených počátečních hodnot $Q = 10$ a $f_0 = 10$ kHz jsem zvolila a vypočetla adekvátní hodnoty ostatních součástek: $2,53$ mH, $R_3 = R_4 = 1$ k Ω , $R_1 = R_2 = 500$ Ω , $R_Q = 1,59$ k Ω , $C = 100$ nF, $C_1 = 10$ nF v obvodech pro syntetickou cívku, dvojný kapacitor/indukčnost, RLC filtry a oscilátor.

Simulace syntetických prvků s cívkou jako součástí, zapojením s ideálními OZ a simulačními firemními makromodely OZ potvrdily totožnou vstupní impedanci, která se do 100 kHz nelišila. Průběh pro cívku jako součástku a zapojení s ideálními OZ pokračovalo do jednotek MHz, zatím co pro obvod s makromodely OZ se začalo projevovat kmitočtové omezení OZ a další parazitní jevy spojené s přidanou vstupní impedancí způsobenou malosignálovými parazitními parametry konvertoru. Porovnáním vstupních impedancí syntetické cívky a dvojně cívky se potvrdilo, že dvojná cívka má dvakrát strmější charakteristiku impedance, než běžná cívka.

Z RLC filtrů jsem se konkrétně věnovala horní propusti, u které jsem krokovala odpor R_Q a sledovala změnu převýšení nad základní přenos 0 dB. S rostoucím R_Q (tedy rostoucím činitelem jakosti) se převýšení zvyšovalo z 15 dB pro $R_Q = 1$ k Ω až na 31 dB pro $R_Q = 10$ k Ω .

Pro pásmovou propust jsem stejně jako pro horní propust měnila hodnotu R_Q (činitele jakosti) - s rostoucím R_Q z 100 Ω na 10 k Ω se zmenšovala šířka pásma (z 10 kHz na 380 Hz) a rezonance se vyostřovala. Simulace výrobního rozptylu poskytuje výsledky říkající, že pasivní prvky ovlivní svou tolerancí funkci obvodu v pásmu nízkých desítek Hz minimálně (pro BW rozptyl ± 165 Hz, u $f_c \pm 1130$ Hz a u $Q \pm 1$). Nominální hodnoty nastavení filtru byly $f_c = 10$ kHz, $Q = 10$, $BW = 1$ kHz.

Pro ukázkou jsem také zařadila filtr dolní propust, který je sestaven z dvojného kapacitoru. Zde jsem krokovala hodnotu kapacitoru C_Q , přičemž s jeho klesající hodnotou rostla velikost činitele jakosti a výsledné převýšení vzrostlo z 1 dB ($C_Q = 10$ nF) na 40 dB ($C_Q = 420$ pF).

Pro porovnání jsem zařadila také simulace syntetické cívky, zapojené jak Antoniovým impedančním konvertorem, tak zapojení s OTA impedančním násobičem. Výsledné průběhy se lišily převážně intervalem frekvencí, kde se dají považovat za ideální - Antoniov obvod ho měl téměř dvacetinásobně větší (50 Hz až 50 kHz) než OTA násobič (300 až 3 kHz).

Navržený oscilátor dle teoretického předpokladu nekmital a tak jsem experimentálně zjistila, že pro zapojení s makromodely OZ je třeba poměr odporů R_A a R_B

zvýšit na 1,1.

Vypočtené hodnoty součástek a simulace obvodů jsem použila jako základ pro návrh desky plošných spojů. Na desce se nachází tři samostatné obvody (Antoniův impedanční obvod, zapojení negativního rezistoru, zapojení OTA impedančního násobiče), které lze libovolně propojovat se součástkami navíc, přidělané pevně na panel.

Spolu s deskou plošných spojů jsem také vytvořila předlohu vrchního panelu přípravku a návrh laboratorní úlohy, které bude možné využít v předmětech Návrh analogových filtrů nebo Teorie elektronických obvodů.

Literatura

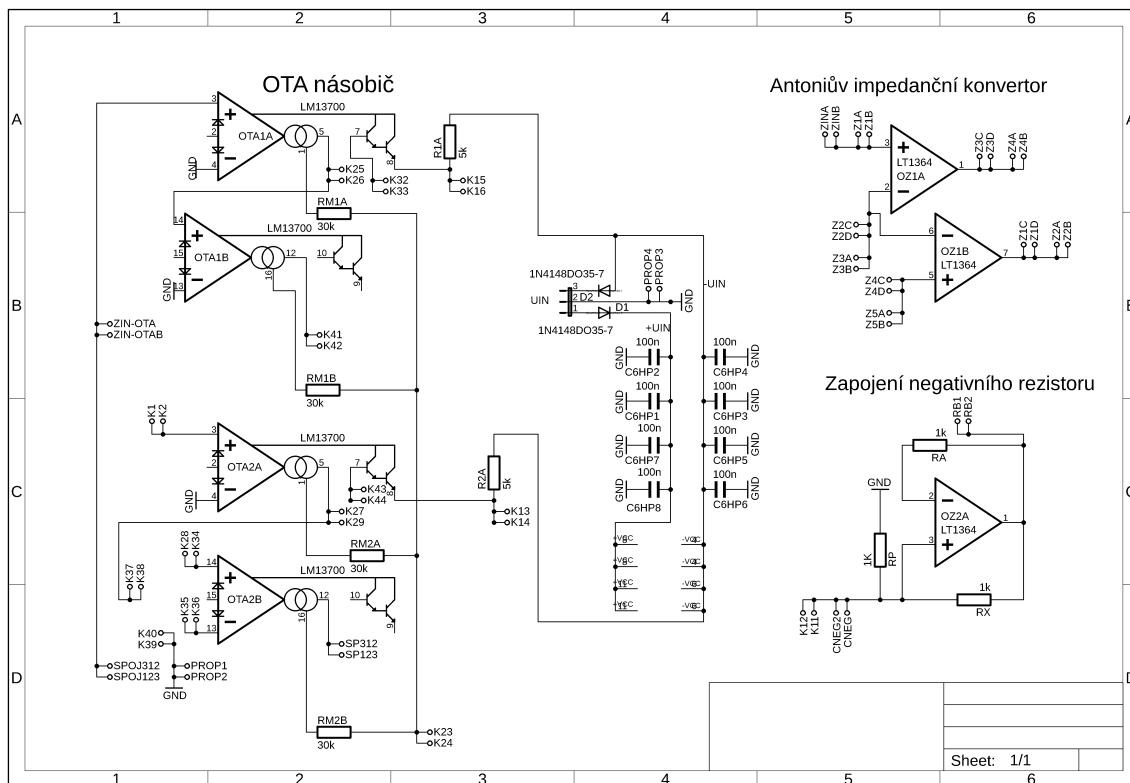
- [1] HÁJEK, Karel a Jiří SEDLÁČEK. *Kmitočtové filtry*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-023-7.
- [2] DOSTÁL T. *Elektrické filtry*, Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007, Elektronické skriptum
- [3] SOTNER, Roman, Jan JERABEK, Jiri PETRZELA a Tomas DOSTAL. Simple approach for synthesis of fractional-order grounded immittances based on OTAs. In: *2016 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)* [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 563-568 [cit. 2019-11-08]. DOI: 10.1109/TSP.2016.7760944. ISBN 978-1-5090-1288-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7760944/>
- [4] SOTNER, Roman, Jan JERABEK, Jiri PETRZELA, Ondrej DOMANSKY, Georgia TSIRIMOKOU a Costas PSYCHALINOS. Synthesis and design of constant phase elements based on the multiplication of electronically controllable bilinear immittances in practice. *AEU - International Journal of Electronics and Communications* [online]. 2017, 78, 98-113 [cit. 2019-11-08]. DOI: 10.1016/j.aeue.2017.05.013. ISSN 14348411. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1434841117303102>
- [5] CALVERT J. B. *The Gyrator*, 2008, [cit. 2019-11-08] Dostupné z: <http://mysite.du.edu/~etuttle/electron/elect66.htm>
- [6] SOTNER, Roman, Jan JERABEK, Ondrej DOMANSKY, Norbert HERENC SAR, Aslihan KARTCI a Jan DVORAK. Practical Design of Fractional-Order Oscillator Employing Simple Resonator and Negative Resistor. In: *2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)* [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 1-4 [cit. 2019-11-08]. DOI: 10.1109/ICUMT.2018.8631226. ISBN 978-1-5386-9361-2. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8631226/>
- [7] STMicroelectronics [online katalogový list]. TL084 Datasheet. 2017 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/CD00000493.pdf>
- [8] Texas Instruments [online katalogový list]. LM13700 datasheet 2015 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm13700.pdf>

Seznam příloh

| | | |
|----------|---|-----------|
| A | Návrh přípravku | 41 |
| A.1 | Schéma zapojení | 41 |
| A.2 | Deska plošného spoje | 42 |
| A.2.1 | Bottom | 42 |
| A.2.2 | Top | 43 |
| A.3 | Vrchní panel přípravku | 44 |
| B | Seznam součástí | 45 |
| C | Teoretický úvod a laboratorní protokol | 48 |

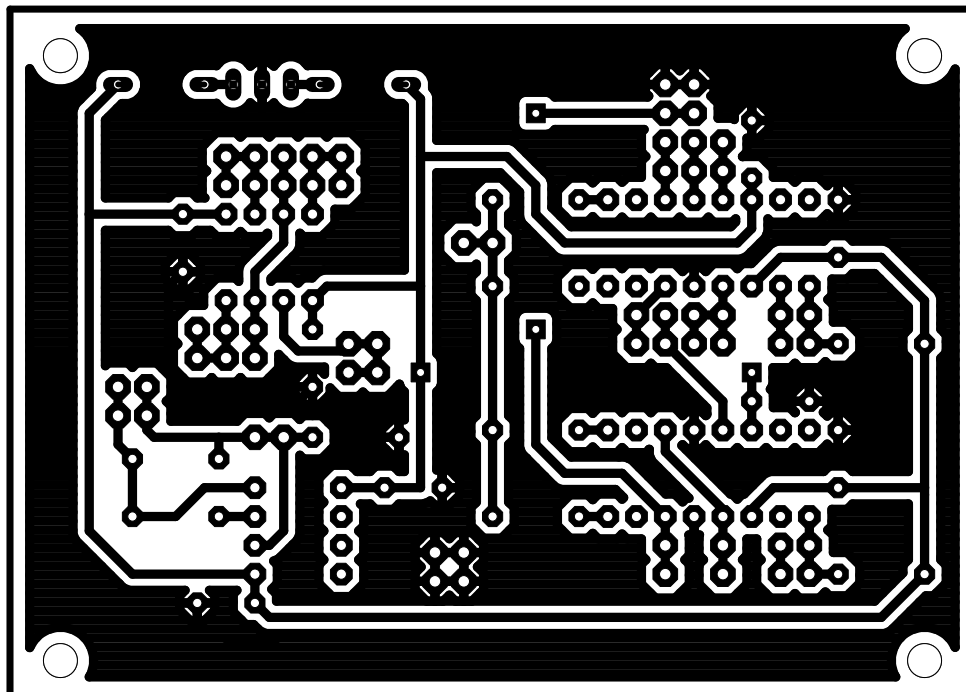
A Návrh přípravku

A.1 Schéma zapojení

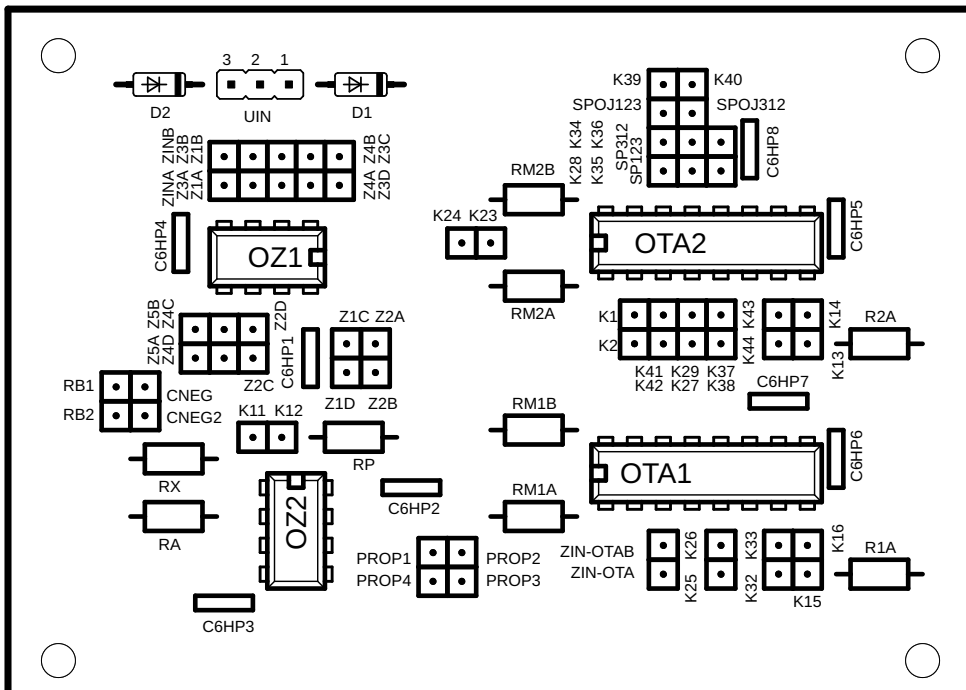
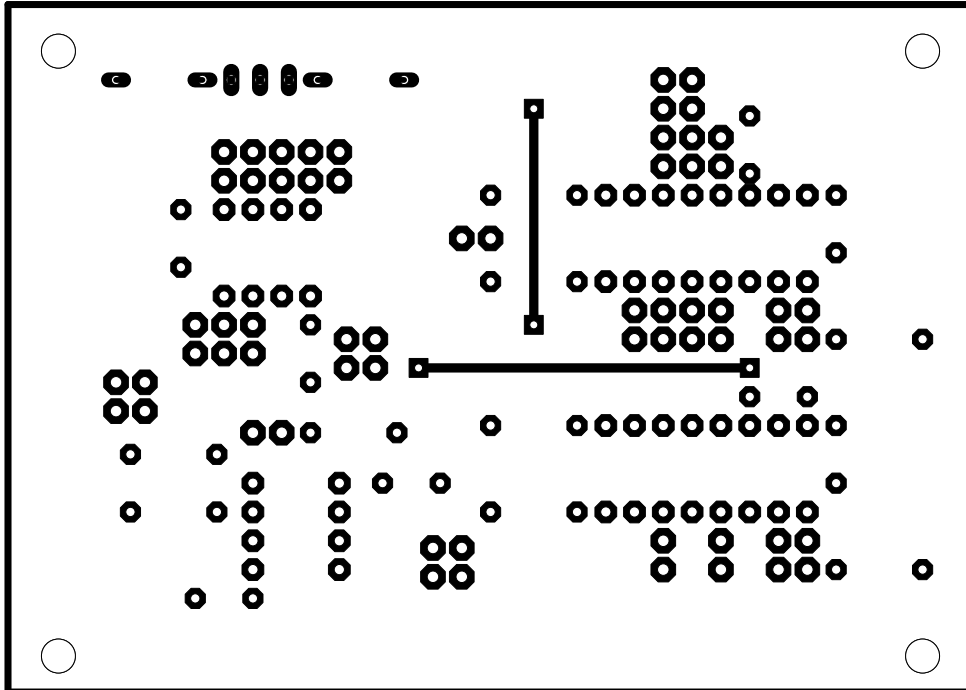


A.2 Deska plošného spoje

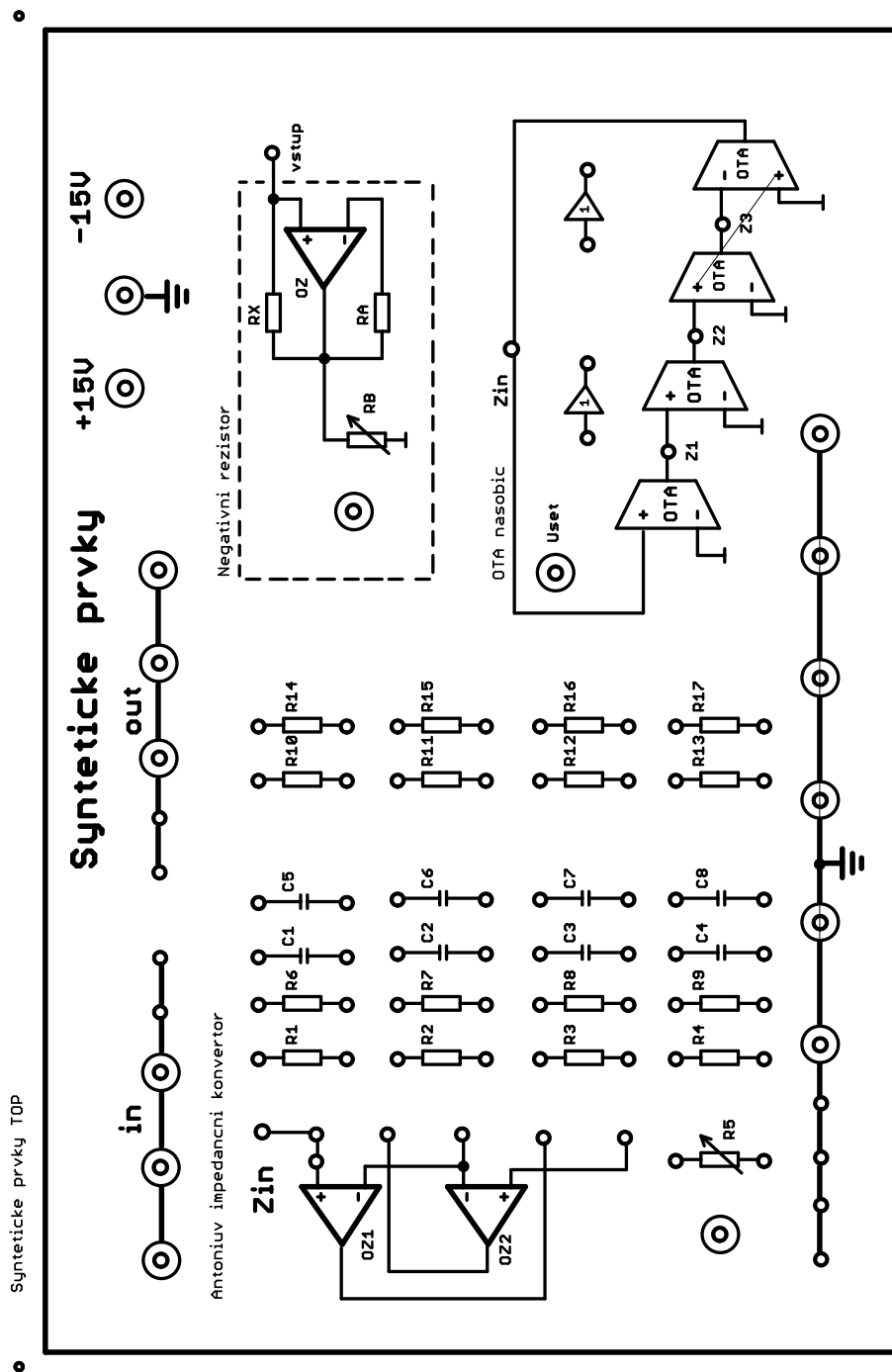
A.2.1 Bottom



A.2.2 Top



A.3 Vrchní panel přípravku



B Seznam součástek

| Part | Value | Device | Package | Description |
|-------|-------|--------------|---------|-------------|
| C6HP1 | 100n | C_K2,5B | C_K_2 | CAPACITOR |
| C6HP2 | 100n | C_K2,5B | C_K_2 | CAPACITOR |
| C6HP3 | 100n | C_K2,5B | C_K_2 | CAPACITOR |
| C6HP4 | 100n | C_K2,5B | C_K_2 | CAPACITOR |
| C6HP5 | 100n | C_K2,5B | C_K_2 | CAPACITOR |
| C6HP6 | 100n | C_K2,5B | C_K_2 | CAPACITOR |
| C6HP7 | 100n | C_K2,5B | C_K_2 | CAPACITOR |
| C6HP8 | 100n | C_K2,5B | C_K_2 | CAPACITOR |
| CNEG | | BOD | KON_1 | |
| CNEG2 | | BOD | KON_1 | |
| D1 | | 1N4148DO35-7 | DO35-7 | DIODE |
| D2 | | 1N4148DO35-7 | DO35-7 | DIODE |
| K11 | | BOD | KON_1 | |
| K12 | | BOD | KON_1 | |
| K13 | | BOD | KON_1 | |
| K14 | | BOD | KON_1 | |
| K15 | | BOD | KON_1 | |
| K16 | | BOD | KON_1 | |
| K23 | | BOD | KON_1 | |
| K24 | | BOD | KON_1 | |
| K25 | | BOD | KON_1 | |
| K26 | | BOD | KON_1 | |
| K27 | | BOD | KON_1 | |
| K28 | | BOD | KON_1 | |
| K29 | | BOD | KON_1 | |
| K32 | | BOD | KON_1 | |
| K33 | | BOD | KON_1 | |
| K34 | | BOD | KON_1 | |
| K35 | | BOD | KON_1 | |
| K36 | | BOD | KON_1 | |
| K37 | | BOD | KON_1 | |
| K38 | | BOD | KON_1 | |

| | | | | |
|---------|---------|---------|-------|----------|
| K39 | | BOD | KON_1 | |
| K40 | | BOD | KON_1 | |
| K41 | | BOD | KON_1 | |
| K42 | | BOD | KON_1 | |
| K43 | | BOD | KON_1 | |
| K44 | | BOD | KON_1 | |
| OTA1 | LM13700 | LM13700 | DIL16 | |
| OTA2 | LM13700 | LM13700 | DIL16 | |
| OZ1 | LT1364 | LT1364 | DIL8 | |
| OZ2 | LT1364 | LT1364 | DIL8 | |
| PROP1 | | BOD | KON_1 | |
| PROP2 | | BOD | KON_1 | |
| PROP3 | | BOD | KON_1 | |
| PROP4 | | BOD | KON_1 | |
| R1A | 5k | R | R_MRR | RESISTOR |
| R2A | 5k | R | R_MRR | RESISTOR |
| RA | 1k | R | R_MRR | RESISTOR |
| RB1 | | BOD | KON_1 | |
| RB2 | | BOD | KON_1 | |
| RM1A | 30k | R | R_MRR | RESISTOR |
| RM1B | 30k | R | R_MRR | RESISTOR |
| RM2A | 30k | R | R_MRR | RESISTOR |
| RM2B | 30k | R | R_MRR | RESISTOR |
| RP | 1k | R | R_MRR | RESISTOR |
| RX | 1k | R | R_MRR | RESISTOR |
| SP123 | | BOD | KON_1 | |
| SP312 | | BOD | KON_1 | |
| SPOJ123 | | BOD | KON_1 | |
| SPOJ312 | | BOD | KON_1 | |
| UIN | | JP2E | JP2 | JUMPER |
| Z1A | | BOD | KON_1 | |
| Z1B | | BOD | KON_1 | |
| Z1C | | BOD | KON_1 | |
| Z1D | | BOD | KON_1 | |
| Z2A | | BOD | KON_1 | |
| Z2B | | BOD | KON_1 | |

| | | | | |
|----------|--|-----|-------|--|
| Z2C | | BOD | KON_1 | |
| Z2D | | BOD | KON_1 | |
| Z3A | | BOD | KON_1 | |
| Z3B | | BOD | KON_1 | |
| Z3C | | BOD | KON_1 | |
| Z3D | | BOD | KON_1 | |
| Z4A | | BOD | KON_1 | |
| Z4B | | BOD | KON_1 | |
| Z4C | | BOD | KON_1 | |
| Z4D | | BOD | KON_1 | |
| Z5A | | BOD | KON_1 | |
| Z5B | | BOD | KON_1 | |
| ZIN-OTA | | BOD | KON_1 | |
| ZIN-OTAB | | BOD | KON_1 | |
| ZINA | | BOD | KON_1 | |
| ZINB | | BOD | KON_1 | |

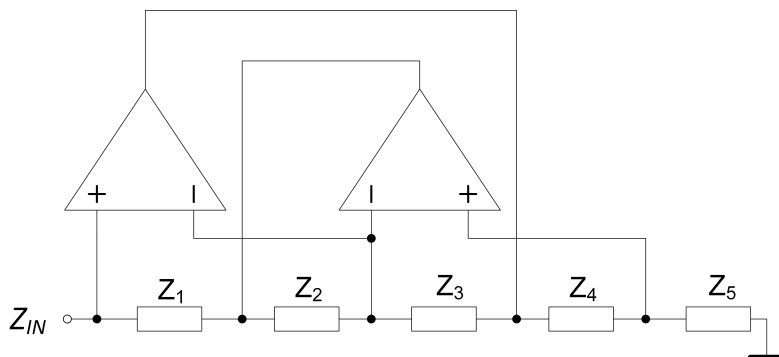
C Teoretický úvod a laboratorní protokol

Syntetické prvky a jejich aplikace

Vzhledem ke konstrukčním nevýhodám cívek je snaha nahradit funkci těchto součástí obvodem s aktivními prvky. Tyto obvody nejsou vhodné pro zpracování vysokých proudů a výkonů. Nás zajímá zpracování signálu o nízké úrovni a nízkém výkonu, kde protékají nízké proudy. Existuje mnoho druhů tzv. impedančních konvertorů (invertorů), které změnou hodnoty impedancí v obvodu mění charakter vstupní impedance Z_{IN} . V této laboratorní úloze se zaměříme na Antoniův impedanční konvertor (obr.1), jehož vstupní impedanci určíme podle vztahu:

$$Z_{IN}(s) = \frac{Z_1(s) \cdot Z_3(s) \cdot Z_5}{Z_2(s) \cdot Z_4(s)} \quad (\text{C1.1})$$

Kde $Z_1(s)$ až $Z_4(s)$ jsou impedance o charakteru $Z = R$ nebo $Z = 1/Cs$. Impedance Z_5 je vždy rovna $Z_5 = R$ a měla by být vždy uzemněna. Zaměníme-li impedanci $Z_2 = R$ za $Z = 1/Cs$, dostaneme induktivní charakter impedance. Obvod se chová jako cívka \rightarrow syntetická cívka. Přidáme-li $Z_2 = Z_4 = 1/Cs$, dostaneme tzv. dvojnou cívku. Její vstupní impedance má dvojnásobně strmou charakteristiku a fázi.



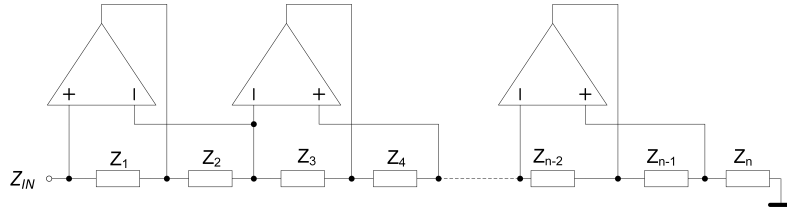
Obr. 1.1 Antoniův impedanční konvertor

Připojením RC článku před, popř. za Antoniův impedanční obvod vytvoříme filtr. Dle kombinace můžeme zapojit CR – horní propust, RC – pásmovou propust, R-C – dolní propust, R-C pásmovou zadrž.

Dalším typem impedančního konvertoru je zapojení pomocí elektronicky říditelných aktivních prvků OTA s uzemněnými impedancemi (Obr. 1.2). Toto zapojení se chová stejně jako výše zmíněný Antoniův obvod, který má ale určité nevýhody – chceme-li obvod rozšířit, obnáší to značný nárůst součástek a zvýší se složitost

vztahu pro výpočet vstupní impedance (1.1). U zapojení OTAs jsou všechny hodnoty impedancí ve jmenovateli a vstupní impedance se vypočítá pomocí vztahu:

$$Z_{IN} = \frac{1}{g_{m1} \cdot g_{m2} \cdot g_{m3} \dots g_{m(n+1)} \cdot Z_1 \cdot Z_2 \dots Z_n} \quad (C1.2)$$



Obr. 1.2 Zapojení impedančního konvertoru s OTAs a uzemněnými impedancemi

Oscilátor

Jsou známé rezonanční vlastnosti RLC obvodů. Zde se prvek L nahradí syntetickou cívku a jako kompenzaci kladného odporu RP použijeme tzv. negativní odpor. Negativní odpor je schopen vykompenzovat ztrátu, která je dána výše zmíněným kladným odporem RP, tím se odtlumí rezonátor. Kmitočet rezonátoru je pak dán Thompsonovým vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (C1.3)$$

Podmínka, která zajistí, že obvod bude kmitat:

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{R_X}{R_P} \quad (C1.4)$$

Cíle úlohy

- Studenti se seznámí s uvedenými druhy impedančních konvertorů (invertorů) a možnostmi jejich zapojení.
- Studenti se seznámí s využitím impedančních konvertorů v zapojení filtrů a využití negativního odporu v zapojení oscilátoru.

Přínos úlohy

V této úloze je ukázána možnost nahraditelnosti cívky aktivním obvodem v nízkofrekvenční technice. Syntetická cívka je zapojena pomocí Antoniova impedančního obvodu, se kterým se dají kombinovat zapojení filtrů pomocí RC článku - horní, dolní a pásmová propust, případně i pásmová zadrž. Pro porovnání je zde ukázán i impedanční konvertor OTAs s uzemněnými impedancemi, který impedance násobí pouze v čitateli.



ÚREL

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

Název kurzu:

Laboratorní úloha číslo ____ - návod k měření a protokol k vypracování úlohy

Syntetické prvky a jejich aplikace

Jméno a příjmení:

Skupina:

Datum a čas měření:

Příprava

Uveďte vstupní impedanci syntetické cívky, a vypočtěte hodnotu její indukčnosti, je-li:

$$f_0 = 10\text{kHz}, Q = 10, R_1 = R_2 = 500\Omega, R_4 = R_5 = 1\text{k}\Omega, C_1 = 10\text{nF}$$

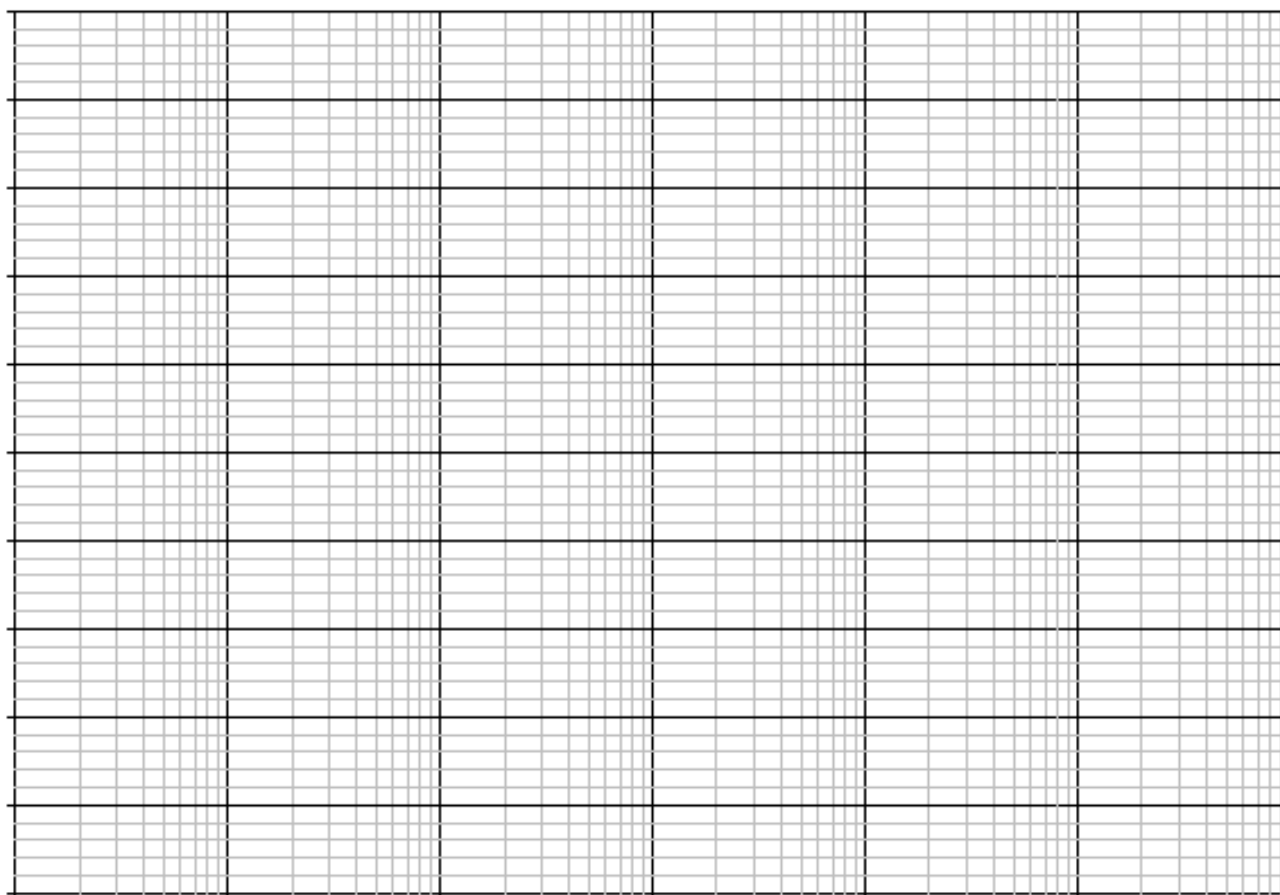
$$\text{(pozn. } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, Q = \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot R_Q, f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{)}$$

Úkol 1:

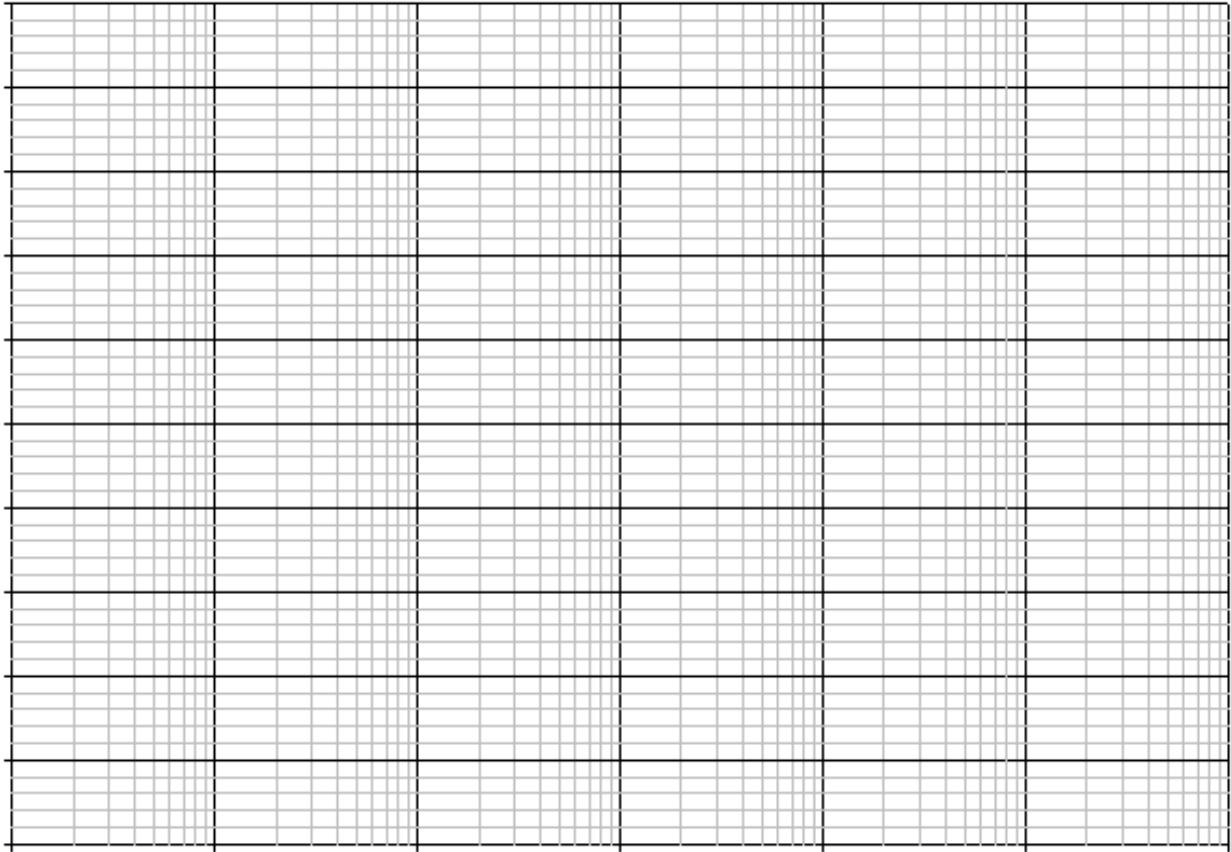
Změřte závislost modulu a fáze vstupní impedance syntetické cívky z přípravy na kmitočtu.

| f[Hz] | | | K_U | fáze φ [°] |
|-------|--|--|-------|-----------------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

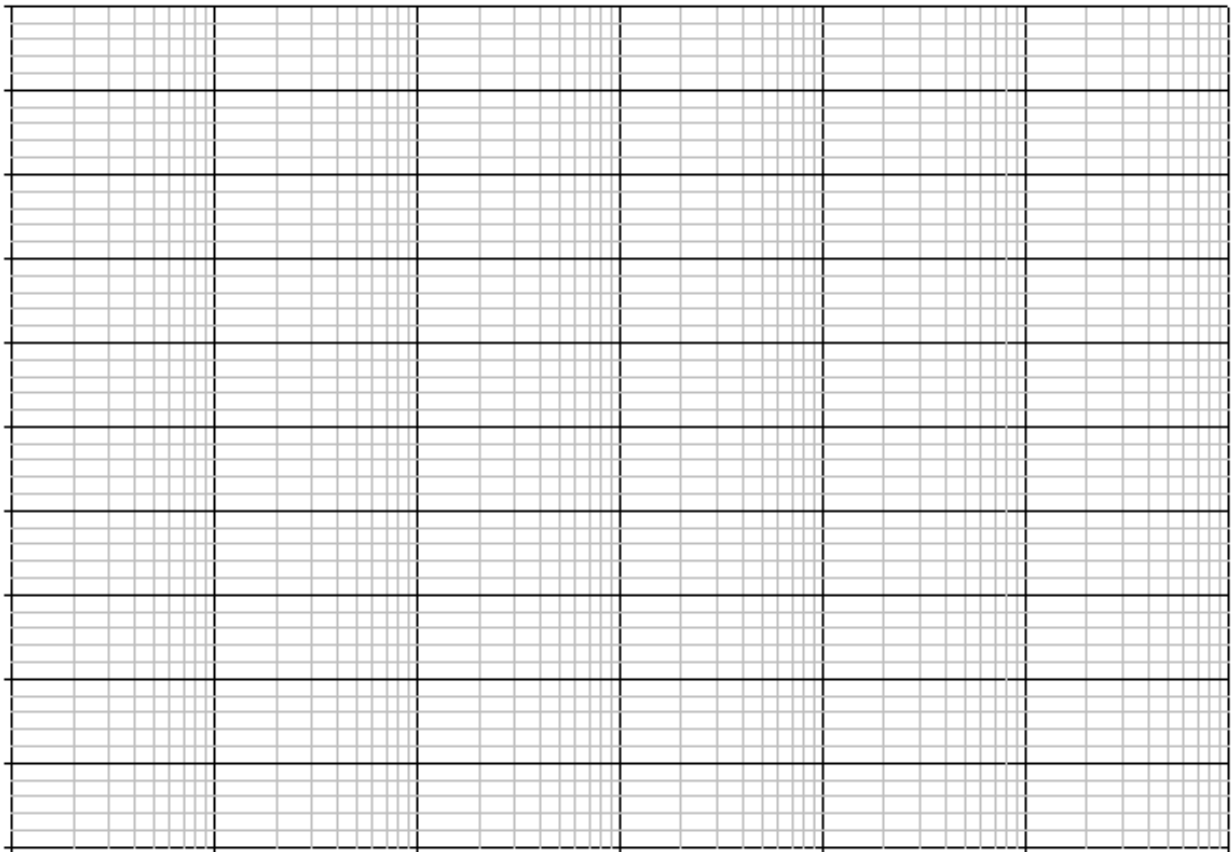
Tab.1. Modulová a fázová charakteristika



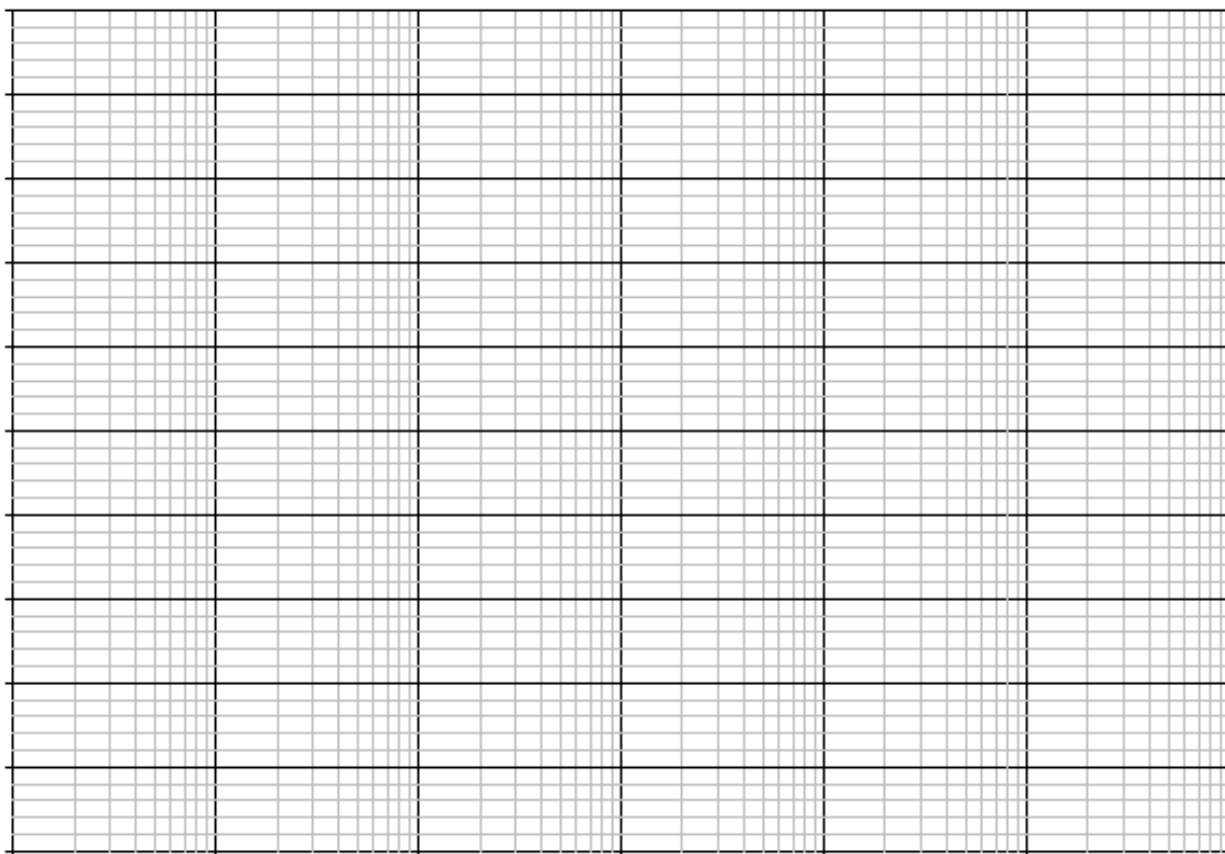
Graf 1. Modulová a fázová charakteristika syntetické cívky



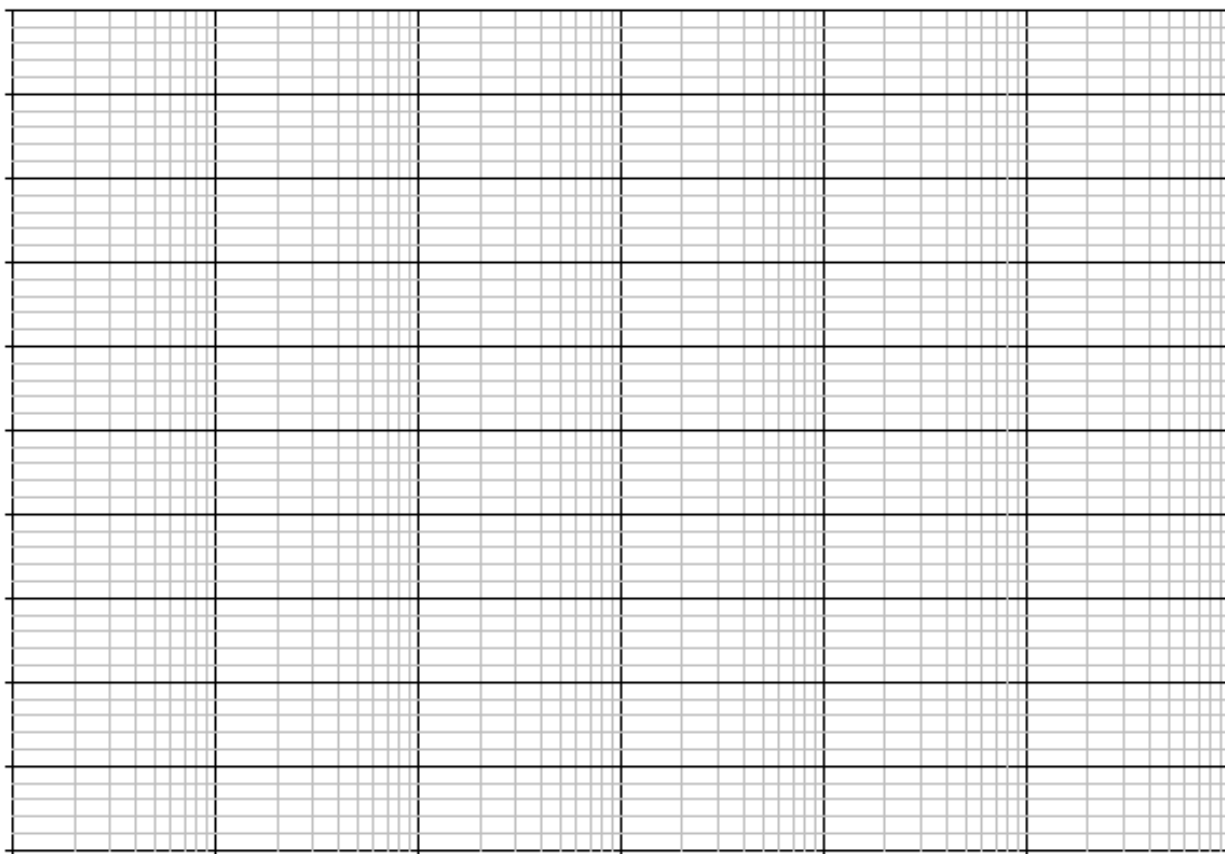
Graf 2A. Modulová charakteristika horní propusti (nezapomeňte na popis jednotlivých os a významných bodů charakteristik)



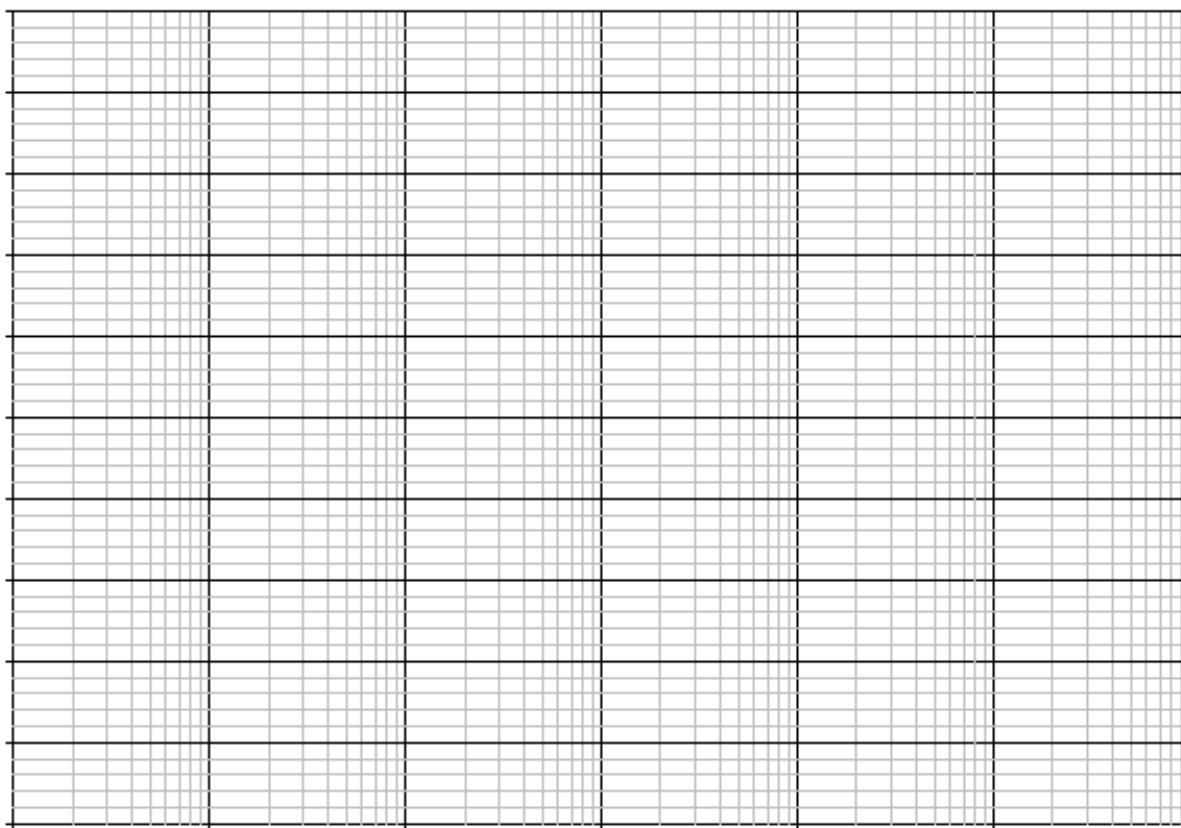
Graf 2B: Fázová charakteristika horní propusti (nezapomeňte na popis jednotlivých os a významných bodů charakteristik)



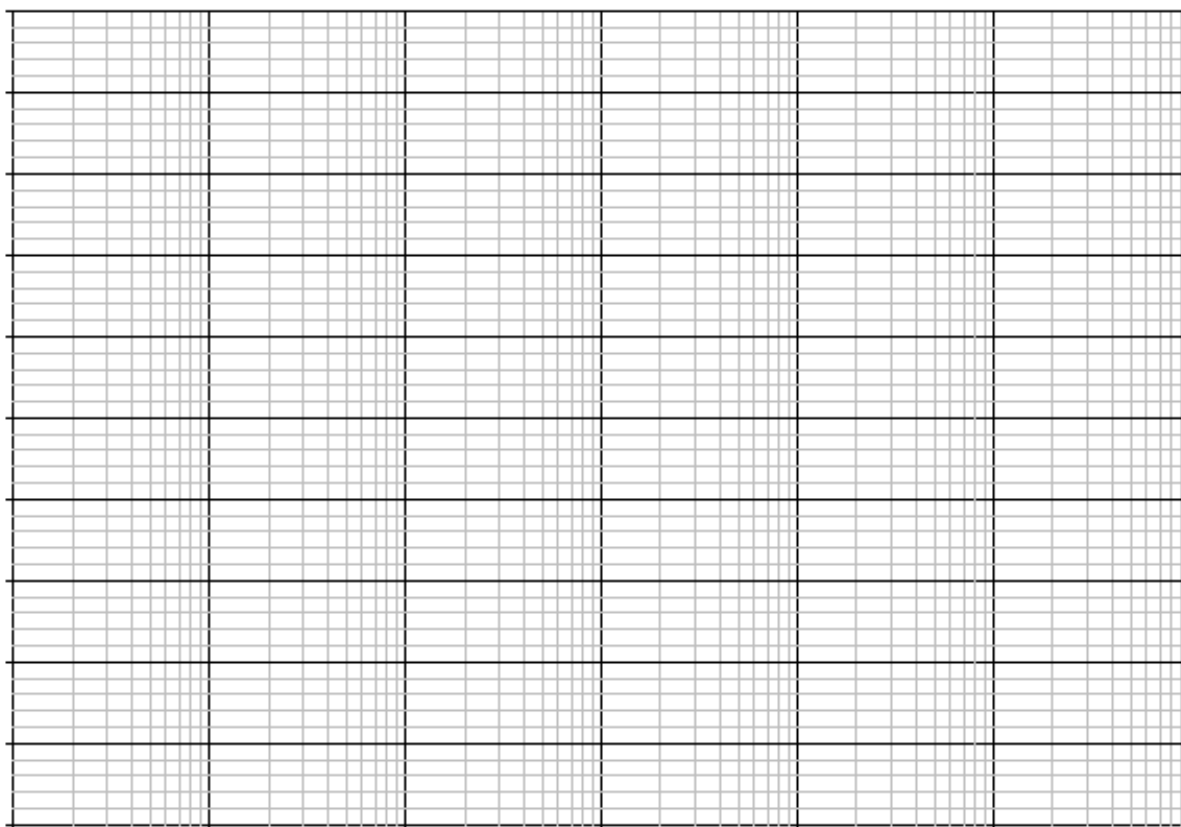
Graf 3A: Modulová charakteristika horní propusti (nezapomeňte na popis jednotlivých os a významných bodů charakteristik)



Graf 3B: Fázová charakteristika horní propusti (nezapomeňte na popis jednotlivých os a významných bodů charakteristik)



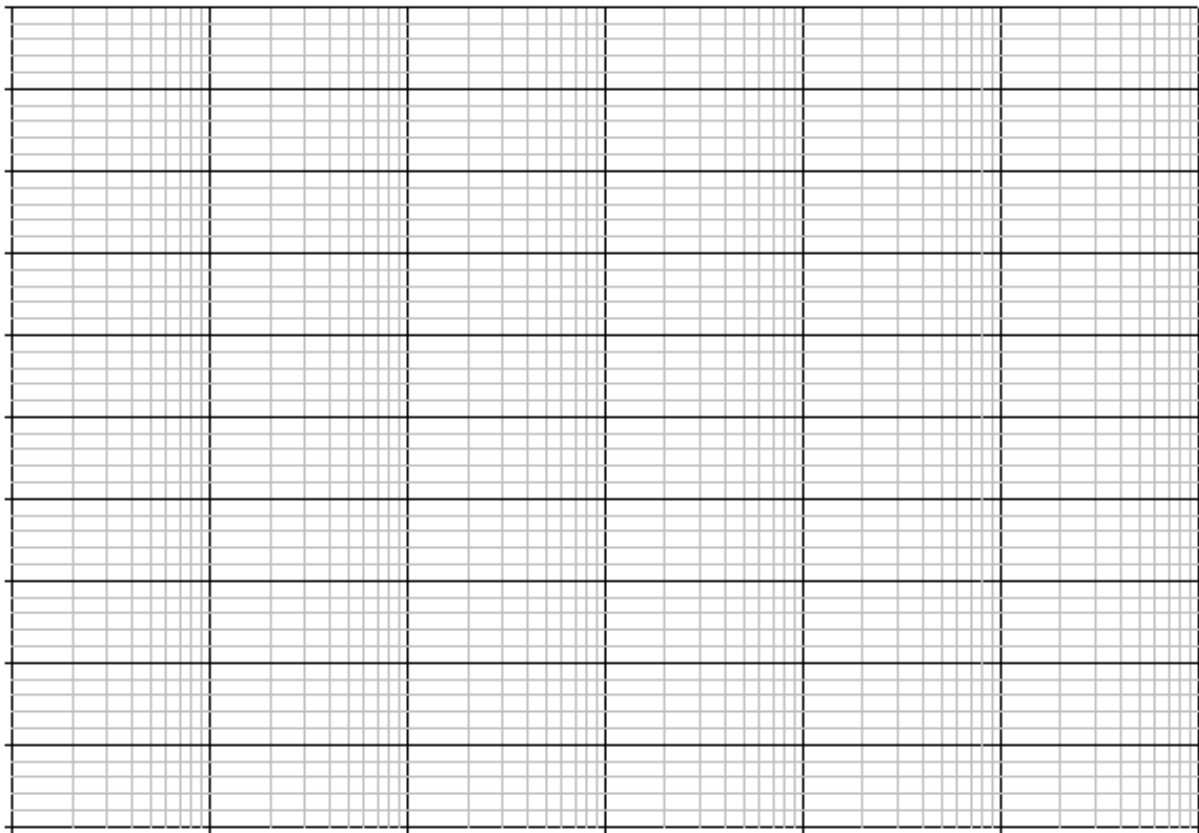
Graf 4A: Modulová charakteristika dolní propusti (nezapomeňte na popis jednotlivých os a významných bodů charakteristik)



Graf 4B: Fázová charakteristika dolní propusti (nezapomeňte na popis jednotlivých os a významných bodů charakteristik)

Úkol 3:

Vyberte si jeden z výše uvedených filtrů a zaměřte hodnotu kondenzátoru na vstupu. Popište, jak se modulová charakteristika změní při změně vstupního C.

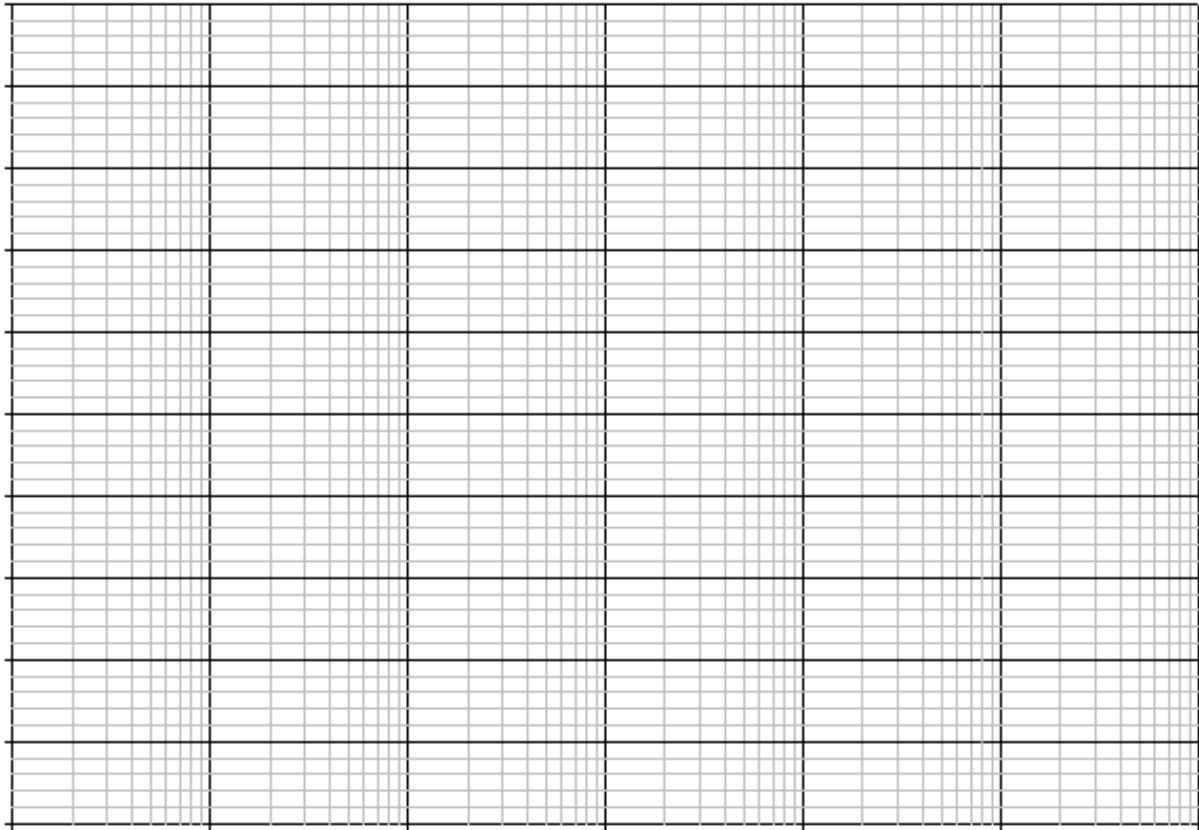


Graf 5. Změna modulové charakteristiky při změně vstupního C (nezapomeňte na popis jednotlivých os a významných bodů charakteristik)

Poznatky:

Úkol 4:

Zapojte OTA impedanční násobič a zakreslete charakteristiku jeho vstupní impedance. Průběh charakteristiky po té porovnejte s průběhem vstupní impedance Antoniova obvodu.



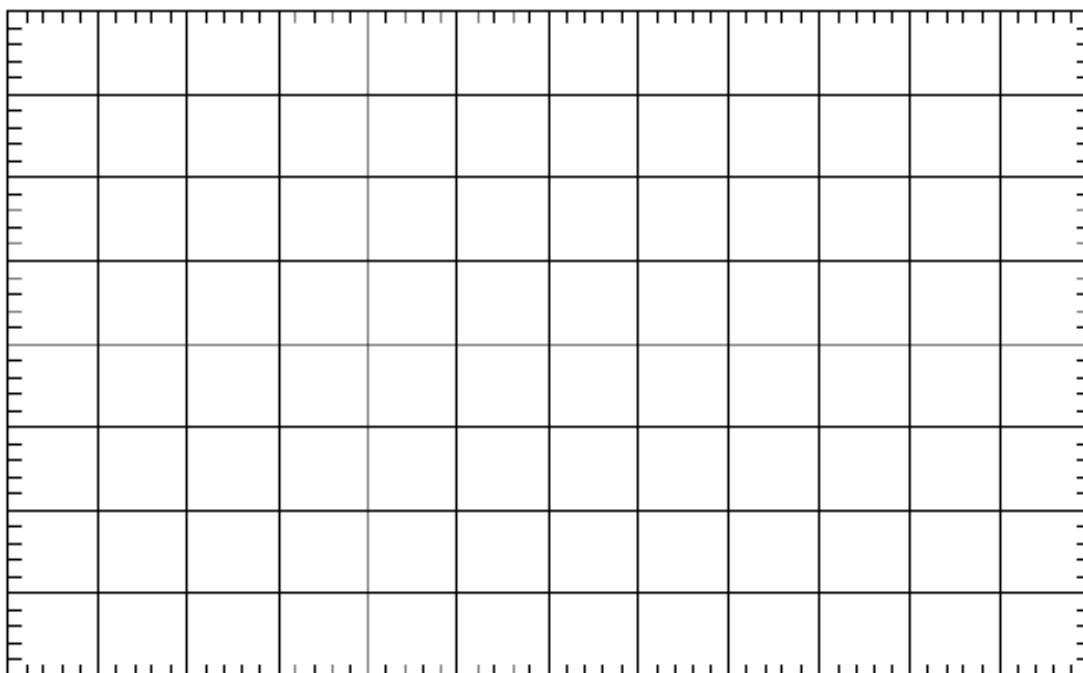
Graf 6. Charakteristika vstupní impedance OTAs a Antoniova impedančního konvertoru (nezapomeňte na popis jednotlivých os)

Poznatky:

Vypočítejte teoretickou hodnotu vstupní impedance Antoniova obvodu, a obvodu OTAs, které mají v zapojení stejné hodnoty impedancí.

Úkol 5:

Zapojte oscilátor, který splňuje podmínku pro kmitání a zakreslete jeho výstupní napětí.

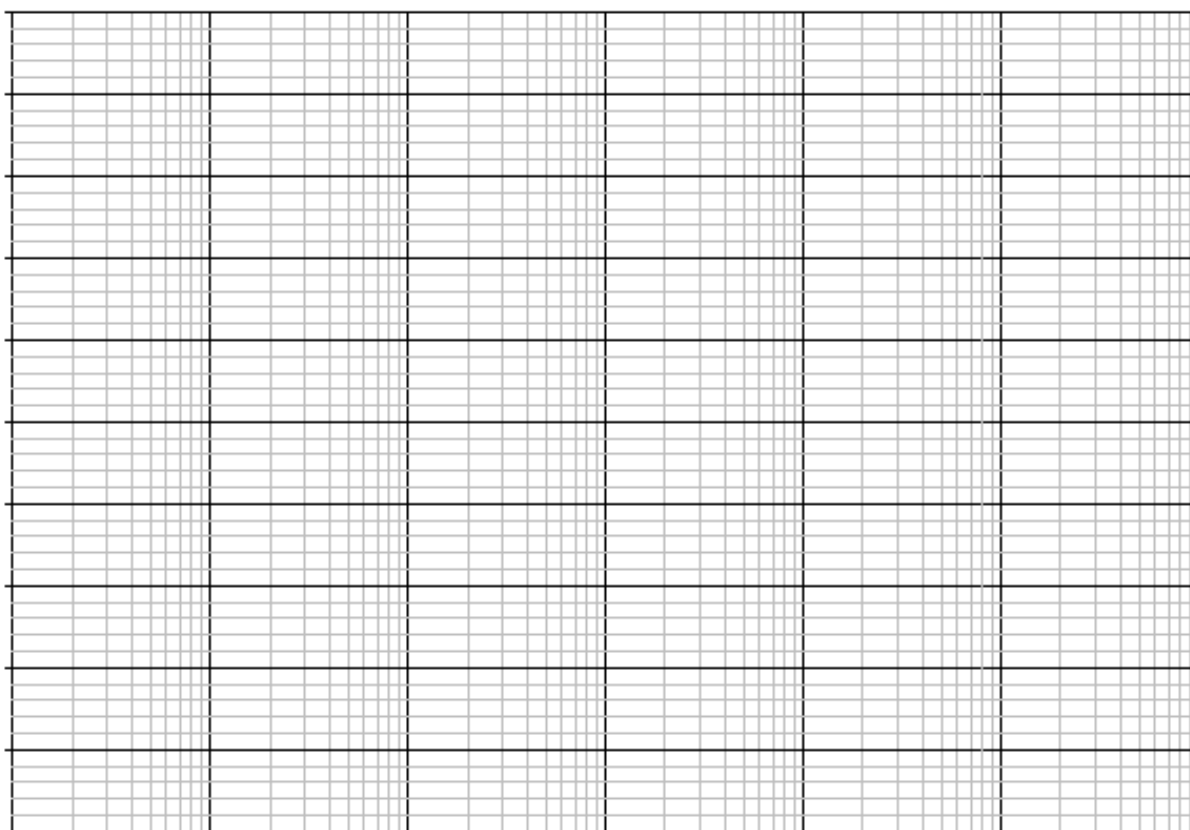


Graf 7: Průběh výstupního napětí oscilátoru (nezapomeňte na popis jednotlivých os)

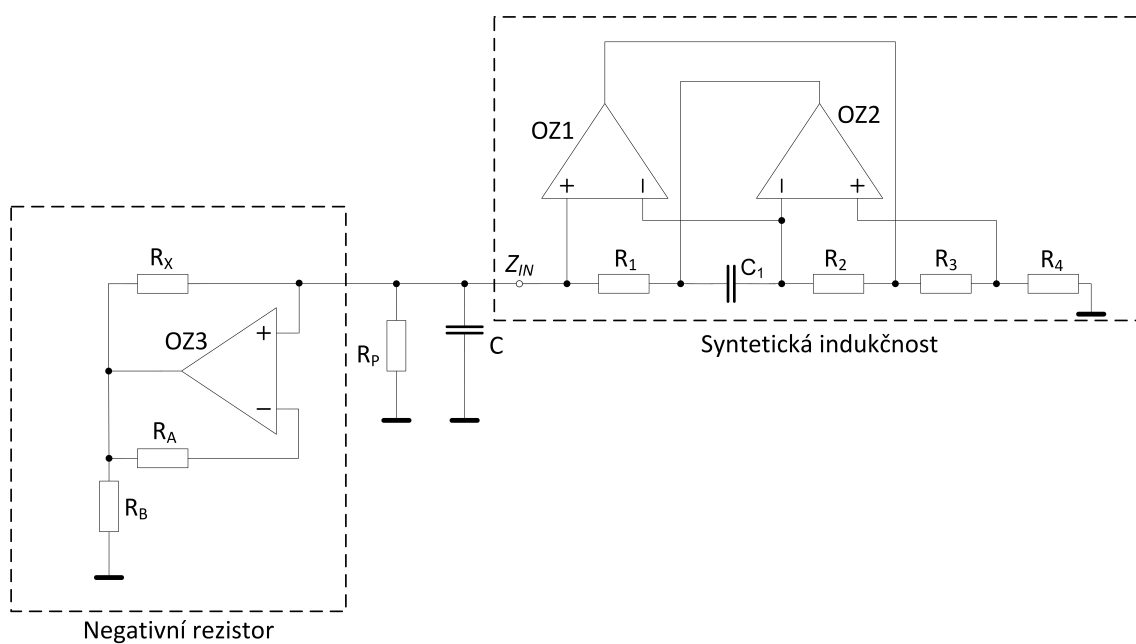
Podmínka, která platí pro kmitání oscilátoru:

Bonusový úkol

Zapojte pásmovou zadrž a změřte její modulovou charakteristiku.



Graf 8: Modulová charakteristika pásmové zadrž



Obr. 1.3 Zapojení oscilátoru pomocí syntetické indukčnosti a negativního rezistoru