VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2020 Hana Stolařová

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 Hana Stolařová
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. Roman Šotner, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

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 řiditelného 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. Gyrators 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 bakalá°ská práce se zabývá realizacemi impedan£ních konvertor· pro konstrukci laditelných syntetických prvk· (dvojpol·) a jejich jednoduchých aplikací p°i praktické výuce. Konkrétn¥ se zam¥°uje na Antoni·v impedan£ní konvertor a s ním vytvá°ené realizace variabilních syntetických prvk· v ARC ltrech dle standardních RLC p°edloh a v jednoduchém oscilátoru. Sou£ástí práce je teoretický návrh parametr· obvod· pro zadané vlastnosti, ov¥°ení po£íta£ovou simulací v£etn¥ vlivu výrobního rozptylu sou£ástek. Jsou p°ipraveny podklady pro výrobu desky plo²ných spoj· a realizaci p°ípravku, spolu s návrhem laboratorní úlohy k pouºití p°i výuce v kurzech Návrh elektronických ltr· nebo Teorie elektronických obvod·.

KLÍƒOVÁ SLOVA

Antoni·v impedan£ní konvertor, aplikace a výuka, impedan£ní 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 lters (based on RLC original) and simple harmonic oscillator. This thesis includes theoretical design of parameters of circuits for required features as well as veri cation 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 wich can be used for educational purposes in courses Design of Electronic lters and Electronic Circuit Theory.

KEYWORDS

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

STOLA•OVÁ, Hana.Laboratorní p°ípravek pro výuku syntetických prvk· a aplikací [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/120541 , 62 s. Bakalá°ská práce. Vysoké u£ení technické v Brn¥, Fakulta elektrotechniky a komunika£ních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Roman ’otner, Ph.D.

Vysázeno pomocí balí£ku thesis verze 3.05; http://latex.feec.vutbr.cz

PROHLÁ'ENÍ

Prohla²uji, ºe svou bakalá°skou práci na téma Laboratorní p°ípravek pro výuku syntetických prvk· a aplikací jsem vypracovala samostatn¥ pod vedením vedoucího bakalá°ské práce a s pouºitím odborné literatury a dal²ích informa£ních zdroj·, které jsou v²echny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalá°ské práce dále prohla²uji, ºe v souvislosti s vytvo°ením této bakalá°ské práce jsem neporu²ila autorská práva t°etích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným zp·sobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si pln¥ v¥doma následk· poru²ení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona £. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o zm¥n¥ n¥kterých zákon· (autorský zákon), ve zn¥ní pozd¥j²ích p°edpis·, v£etn¥ moºných trestn¥právních d·sledk· vyplývajících z ustanovení £ásti druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku £. 40/2009 Sb.

[online]. Brno . . . .

podpis autorky

POD…KOVÁNÍ

Ráda bych pod¥kovala vedoucímu bakalá°ské práce panu doc. Ing. Romanu ’otnerovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trp¥livost a podn¥tné návrhy k práci.

Obsah

Seznam symbol·, veli£in a zkratek 10

Úvod 11

1 Teorie 12
1.1 Impedan£ní konvertor, invertor a gyrátor 12
1.2 Antoni·v impedan£ní konvertor 14
1.3 ARC ltry 16
1.3.1 Syntetický induktor, dvojný kapacitor 16
1.4 Oscilátor 18

2 Návrh 19

3 Analýza zapojení po£íta£ovou simulací 22
3.1 Analýza navrºené syntetické cívky a dvojného kapacitoru 22
3.2 Analýza vybraných RLC zapojení 24
3.2.1 Vybrané ltry 24
3.2.2 OTAs s uzemn¥nými impedancemi 31
3.2.3 Oscilátor 34

Záv¥r 37

Literatura 39

Seznam p°íloh 40

A Návrh p°ípravku 41
A.1 Schéma zapojení 41
A.2 Deska plo²ného spoje 42
A.2.1 Bottom 42
A.2.2 Top 43
A.3 Vrchní panel p°ípravku 44

B Seznam sou£ástek 45

C Teoretický úvod a laboratorní protokol 48

Seznam obrázk·

1.1 Transformace impedance impedan£ním konvertorem! D_{EKV} . . 12
1.2 Zapojení Antoniova impedan£ního konvertoru 14
1.3 Roz²í°ené zapojení Antoniova impedan£ního konvertoru pro n impedancí 14
1.4 Zapojení impedan£ního konvertoru pomocí OTAs s uzemn¥nými impedancemi 15
1.5 Zapojení uzemn¥ného ztrátového syntetického induktoru 17
1.6 Zapojení ztrátového uzemn¥ného dvojného kapacitoru realizované s jedním OZ 17
1.7 Zapojení oscilátoru s kompenzací pomoci 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 P°enos horní propusti s krokováním R_Q = 100 , 1 k , 1;59 k a 10 k 25
3.6 Fázová a modulová kmito£tová charakteristika pásmové propusti s krokováním R_Q 26
3.7 Toleran£ní analýza pro pásmovou propust (tolerance R - 1%, C - 5%) 27
3.8 Rozptyl hodnot st°ední frekvence pásmové propusti 27
3.9 Rozptyl hodnoty Q pásmové propusti 28
3.10 Rozptyl ²í°ky pásma pro pásmovou propust 28
3.11 Dolní propust zapojená s dvojným kapacitorem 29
3.12 Fázová a modulová charakteristika dolní propusti 3. °ádu s krokováním C_Q = 10 nF, 1 nF, 680 pF, 420 pF 29
3.13 Toleran£ní analýza dolní propusti (tolerance R - 1% a C - 5%) 30
3.14 Zobrazení fázové a modula£ní charakteristiky vstupní impedance syntetické zemn¥né cívky v zapojení s OTAs s krokováním proudu U_{SET} = 0:5 V (nejvý²e poloºená k°ivka), 5 V, 10 V, 13 V (nejníºe poloºená k°ivka) 31
3.15 Porovnání fázové a modula£ní charakteristiky syntetické cívky zapojené Antoniovým impedan£ním konvertorem a OTAs kaskádou 32
3.16 Toleran£ní analýza pro zapojení syntetické cívky s OTA kaskádou . . 33
3.17 Kmitající oscilátor (sledován vysokoimpedan£ní uzel rezonátoru) . . . 34

3.18 Detail kmitajícího výstupního nap¥tí nap¥tí oscilátoru 35
3.19 Frekven£ní spektrum oscilátoru 36

Seznam tabulek

1.1 Tabulka výsledných impedancí p°i zám¥n¥ konkrétních impedancí za kapacitory 15
3.1 Tabulka výsledných hodnot f_c, Q a BW z krokování parametru . . . 25

Seznam symbol·, veli£in a zkratek

Z_{IN}	vstupní impedance
Z_z	zat¥ºovací impedance
k	£initel konverze, resp. inverze
K (s)	kmito£tov¥ závislá funkce
GIC	Generalized Impedance Convertor
FDNR	Kmito£tov¥ nezávislý odpor; anglicky Frequency dependent negative resistor
L_{EKV}	ekvivalentní hodnota induk£nosti na vstupní brán¥ syntetického induktoru
D_{EKV}	adekvátní hodnota admitance na vstupní brán¥ dvojného kapacitoru
OTA	Opera£ní transkonduktan£ní zesilova£; Operational transconductance ampli er
BW	²í°ka pásma; anglicky Bandwidth

Úvod

Tato bakalá°ská práce je zam¥°ena na porozum¥ní a následnou realizaci impedan£ních konvertor·/invertor·, jejich vyuºití jako náhrada cívek tzv. syntetickými prvky a následný návrh podklad· pro výrobu konkrétního p°ípravku.

Výsledné obvody impedan£ních konvertor· byly navrºeny na základ¥ konkrétních návrhových výpo£t· a následn¥ ov¥°eny pomocí po£íta£ových simulací v programu PSpice. Tyto simulace slouºily k ov¥°ení správnosti zapojení, zji²t¥ní moºných chyb a dolad¥ní parametr· sou£ástek.

Sou£ástí práce je konkrétní návrh jednotlivých hodnot sou£ástek pro zapojení syntetické cívky pomocí Antoniova impedan£ního konvertoru se stanovenou hodnotou frekvence a £initelem jakosti.

Cílem této práce bylo vytvo°it návrh p°ípravku vhodného k výuce syntetických prvk· a jejich aplikací.

1 Teorie

1.1 Impedan£ní konvertor, invertor a gyrátor

Ideální impedan£ní konvertor je lineární dvojbran, který transformuje zat¥ºovací (výstupní) impedanci na vstup dle vztahu [1]:

$$Z_{IN} = \frac{a}{b} Z_z = k Z_z: \tag{1.1}$$

Hodnota impedance na vstupu Z_{IN} je tedy p°ímo úm¥rná zat¥ºovací impedanci Z_z. A a b jsou konstanty vázané na vstupní veli£iny. ƒinitel konverze k je konstantní a m·ºe nabývat hodnot kladných $k > 0$, nebo záporných $k < 0$. Podle hodnoty £initele k pak rozli²ujeme konvertory pozitivní (k>0) a negativní (k<0). Nahrazením konstatního £initele k kmito£tov¥ závislou funkcí $K(s)$ dostáváme zobecn¥ný impedan£ní konvertor -GIC (Generalized Impedance Converto) [1] [2].

Obr. 1.1: Transformace impedance impedan£ním konvertorem! D_{EKV}

Impedan£ní invertor je lineární dvojbran, který transformuje zat¥ºovací impedanci na vstup dle vztahu [1]:

$$Z_{IN} = \frac{a}{b} \frac{1}{Z_z} = k \frac{1}{Z_z}: \tag{1.2}$$

Impedance na vstupu Z_{IN} je tedy inverzí hodnoty zat¥ºovací impedance Z_z. Jak je popsáno vý²e, nabývá £initel inverze k pozitivní a negativní hodnoty a nahradíme-li ho kmito£tov¥ závislou funkcí $K(s)$, dostaneme zobecn¥ný imita£ní invertor [1] [2].

Gyrátor je pozitivním impedan£ním invertorem, uºívaným k náhrad¥ cívek. Bývá de nován gyra£ními odpory (r) [2]:

$$U_2 = r_1 I_1; U_1 = r_2 I_2: \tag{1.3}$$

Zpravidla se d¥lá gyrátor symetrický, platí proto $r_1 = r_2 = r$. Cívka se simuluje zatí-ºením výstupu gyrátoru pomocí kapacitoru. Následn¥ je tedy vstupní impedance [2]:

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

Z tohoto vztahu vyplývá, ºe impedance na vstupu je ryze induktivního charakteru a výsledná hodnota induk£nosti je p°ímo ur£ena hodnotou kapacity a velikostí gyra£ních rezistor· [1] [2].

1.2 Antoni·v impedan£ní konvertor

Také ozna£ovaný jako Antoniuv mutátor [1], je impedan£ní konvertor, který z jedné strany d¥lí a z druhé strany násobí zat¥ºovací impedanci kmito£tem a konstantou. Obvod je z hlediska vstup· nesymetrický a brány je pot°eba rozli²ovat. Umoº¬uje p°ímou simulaci uzemn¥ných cívek a dvojných kapacitor· [1] [2].

Sou£ástí jsou dva opera£ní zesilova£e a p¥t pasivních prvk· - impedancí(z £ehoº je jedna uzemn¥na), které lze zapojit s minimáln¥ p¥ti impedancemi (obr. 1.2), chceme-li zapojení roz²í°it, m·ºeme p°idávat dal²í opera£ní zesilova£e a impedance, p°i£emº koncová impedance by m¥la být uzemn¥na (obr. 1.3) [3].

Pro na²e vyuºití jsem zvolila základní zapojení s p¥ti impedancemi. Tato sestava nabízí limitní po£et násobených prvk· (p¥t), a platí pro ni tato rovnice celkové vstupní impedance [3]:

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

Obr. 1.2: Zapojení Antoniova impedan£ního konvertoru

Obr. 1.3: Roz²í°ené zapojení Antoniova impedan£ního konvertoru pro n impedancí

Zám¥nou r·zných impedancí za kondenzátory dostaneme induktivní vstupní impedanci obvodu nebo kapacitní vstupní impedanci obvodu. Hodnota výsledné

vstupní impedance se zám¥nou kondenzátor· a impedancí se m¥ní podle tabulky 1.1 [2].

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

Tab. 1.1: Tabulka výsledných impedancí p°i zám¥n¥ konkrétních impedancí za kapacitory

Roz²í°ením zapojení z obr. 1.3 se rychle zvy²uje po£et pot°ebných sou£ástek zárove¬ se slo°itostí rovnice vstupní impedance a zárove¬ opera£ní zesilova£e neumo°¬ují cívku ladit. T¥mto komplikacím a se dá vyhnout vyu°ijeme-li zapojení s elektronicky °iditelnými aktivními prvky OTA a uzemn¥nými impedancemi (obr. 1.4), kde se vyu°ívá jiný zp·sob násobení impedancí [3] [4].

Obr. 1.4: Zapojení impedan£ního konvertoru pomocí OTAs s uzemn¥nými impedancemi

Výhoda tohoto zapojení oproti p°edchozímu Antoniovu obvodu je uzemn¥ní v²ech impedancí a snadné elektronické °ízení parametr·. Jejich uzemn¥ním se v²echny impedance dostanou do jmenovatele zlomku výsledné vstupní impedance [4]:

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

1.3 ARC ltry

Realizace cívky v zapojeních RLC ltr· p°iná²í své problémy (hmotnost, rozm¥ry, kvalita, cena) p°edev²ím v nízkofrekven£ních pásmech. Tyto d·vody vedly ke snaze nahradit cívku jinými sou£ástkami tak, aby byl induktivní charakter stále zachován. To se £asem v¥dc·m poda°ilo zapojením aktivního prvku s ur£itou kombinací rezistor· a kapacitor·. Zkratka ARC znamená, ºe obvod obsahuje rezistory, kondenzátory a aktivní prvky.

Fyzickou cívku (vinutí s nevýhodnými vlastnostmi pro p°edpokládané kmito£tové pásmo - hmotnost, rozm¥ry) lze v ARC ltrech °e²it formou nep°ímé náhrady práv¥ syntetickým ekvivalentem (obecným dvojpólem s induktivním charakterem, který pouºívá aktivní prvky, rezistory a kondenzátory). Tyto syntetické prvky mohou mít i jiný charakter neº induk£nost - nap°. dvojný kapacitor [1] [2].

Uvád¥ný zp·sob má krom¥ vliv· reálných aktivních prvk· (kmito£tové a parazitní omezení) na £innost výsledné aplikace taky je²t¥ jedno omezení, a to pokud cívkou musí téct velké proudy a jsou tam velké úbytky nap¥tí (velké výkony - nap°. reproduktorové výhybky). V tomto p°ípadn¥ se syntetické prvky moc nepouºívají.

1.3.1 Syntetický induktor, dvojný kapacitor

Syntetický induktor slouºí k p°ímé simulaci cívek. Simulují se pomocí dvojpól· se sloºit¥j²ím zapojením (aktivní prvky, rezistory a kapacitory), které mají na vstupních svorkách induktivní reaktanci. Induk£nost daného dvojpólu závisí p°edev²ím na hodnotách impedancí R_1 a R_2, od kterých se po té odvíjí nar·stající modul impedance. Ten za£íná na hodnotě $R_1 + R_2$ a roste s kmito£tem. Výsledná induk£nost dvojpólu se vypo£ítá pomocí vztahu [1] [2]:

$$L_{EKV} = R_1 \quad R_2 \quad C; \tag{1.7}$$

protoºe platí

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

kde R_{ZT} je ztráta.

Toto je velice výhodné, jelikoº lze správn¥ zvolenými hodnotami sou£ástek teoreticky simulovat i induk£nosti velice vysoké hodnoty, v °ádech stovek, tisíc· i dokonce milion· Henry [1]. Zde v²ak mohou nastat problémy nap°íklad se saturací opera£ních zesilova£·.

Realizovat tyto dvojpóly lze jednodu²²ím zapojením - nap°. jedním OZ. Dvojpóly s jedním OZ nazýváme ztrátové uzemn¥né syntetické induktory (obr. 1.5). Sloºit¥j²í obvody, realizované s dv¥ma OZ, lze povaºovat aº za ideální bezeztrátové uzemn¥né syntetické induktory. Neuzemn¥né syntetické induktory je sloºit¥j²í realizovat, zpravidla je pro n¥ pot°eba dvojnásob obvod· oproti uzemn¥ným zapojením [1] [2].

Obr. 1.5: Zapojení uzemn¥ného ztrátového syntetického induktoru

Dvojný kapacitor, FDNR (Frequency dependent negative resistor), n¥kdy nazýván bicistor [2] [5] [6], je obdoba ztrátového induktoru. Vyuºívá se p°eváºn¥ v nenáro£ných ltrech a zapojuje se zám¥nou rezistoru za kapacitor, a naopak, v zapojení syntetických induktor·. Nedodrºíme-li podmínku pro kapacity $C_1 = C_2$ nebo zesílení $A = 1$, stanou se parametry $D(!)$; $C_p(!)$ kmito£tov¥ závislé [2]. Realizace je obdobná s realizací syntetického induktoru, aº na jeden rezistor a dva kapacitory; vstupní impedance:

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

kde

$$D_{ekv} = C_1 \quad C_2 \quad R \tag{1.10}$$

a C_p vyjad°ující zde ztráty.

Dále stejn¥ jako u syntetického induktoru uvaºujeme ztrátové uzemn¥né dvojné kapacitory realizované s jedním OZ (obr. 1.7), ideální bezeztrátový uzemn¥ný dvojný kapacitor realizovaný dv¥ma OZ, a t¥ºko realizovatelný neuzemn¥ný dvojný kapacitor [1].

Obr. 1.6: Zapojení ztrátového uzemn¥ného dvojného kapacitoru realizované s jedním OZ

1.4 Oscilátor

Základním obvodem oscilátoru je rezonátor RLC (rezonan£ní paralelní obvod), jehoº impedance za rezonance je dána kladným odporem R_P.

V p°ípad¥, ºe se k rezonátoru p°ipojí 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:

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

Rezonátor kmitá na kmito£tu daném Thompsonovým vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\,C}}. \tag{1.12}$$

K rozkmitání nap¥tí ve výº e zmín¥ných zapojeních je vyuºito zapojení s negativním rezistorem (obr. 1.8). Pro rozkmitání obvodu platí tento vzorec:

$$R_P = \frac{R_X}{1 - \frac{R_A + R_B}{R_B}}; \tag{1.13}$$

ze kterého vyplývá p°ímá závislost pom¥r· impedancí:

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{R_X}{R_P}. \tag{1.14}$$

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

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

2 Návrh

Pro návrh konkrétních hodnot sou£ástek jsem si prvn¥ odvodila p°enosovou funkci K (s), konkrétn¥ pro horní propust RCL (kmito£tov¥ závislý d¥li£ tvo°ený kondenzátorem v podélné v¥tvi a rezistorem s cívkou paraleln¥ v p°í£né v¥tvi na zem):

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

Následnou matematickou úpravou tohoto vzorce:

$$K(s) = \frac{s^2 \; L_{ekv} \; R_Q \; C}{s^2 \; L_{ekv} \; R_Q \; C + s \; L_{ekv} + R_Q} = \frac{s^2}{s^2 + \frac{s \, L_{ekv}}{L_{ekv} \; R_Q} + \frac{R_Q}{L_{ekv} \; R_Q \; C}} =$$

$$= \frac{s^2}{s^2 + \frac{1}{R_Q \; C} \; s + \frac{1}{L_{ekv} \; C}}; \tag{2.2}$$

a porovnáním s obecným tvarem p°enosové funkce

$$\frac{s^2}{s^2 + \frac{1}{R_Q \; C} \; s + \frac{1}{L_{ekv} \; C}} = \frac{s^2}{s^2 + \frac{!}{Q} \; s + !^2}; \tag{2.3}$$

kde Q je £initel jakosti a ! úhlový kmito£et, dostaneme vztahy pro výpo£et ! a Q pro daný obvod:

$$\frac{!}{Q} = \frac{1}{R_Q \; C} \quad ! \quad Q = ! \; R_Q \; C; \tag{2.4}$$

$$!^2 = \frac{1}{L_{ekv} \; C} \quad ! \quad ! = \sqrt{\frac{1}{L_{ekv} \; C}}: \tag{2.5}$$

Dosazením obou rovnic vyplývá vztah pro £initel jakosti Q:

$$Q = \sqrt{\frac{1}{L_{ekv} \; C}} \; R_Q \; C: \tag{2.6}$$

Za po£áte£ní parametry jsem zvolila $Q = 10$, $f_0 = 10\text{kHz}$, $R_3 = R_4 = 1\text{k}$, $C = 100\text{nF}$, $C_1 = 10\text{nF}$. Dopo£ítávám odpovídající L_{EKV} , R_Q, R_1 a R_2, p°i£em° $R_1 = R_2 = R$. Zapojení syntetické cívky s Antoniovým obvodem je ukázáno na obr. 2.1.

$$! = \sqrt{\frac{1}{L_{ekv} \; C}} \quad ! \quad L_{ekv} = \frac{1}{!^2 \; C} = \frac{1}{(2 \quad f_0)^2 \; C} =$$

$$= \frac{1}{(2 \quad 10 \; 10^3)^2 \; 100 \; 10^{-9}} = 2;53 \; 10^{-3}\text{H} = \underline{2;53\,\text{mH}} \tag{2.7}$$

$$L_{ekv} = R_1 \quad R_2 \quad C_1 \;! \quad L_{ekv} = R^2 \quad C_1$$

$$! \quad R = \sqrt{\frac{L_{ekv}}{C_1}} = \sqrt{\frac{2;53 \quad 10^{\;3}}{10 \quad 10^{\;9}}} = \underline{500} \tag{2.8}$$

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

$$! \quad R_Q = \frac{Q}{\sqrt{\frac{C}{L_{ekv}}}} = \frac{10}{\sqrt{\frac{100 \; 10^{\;9}}{2;53 \; 10^{\;3}}}} = 1591 \;\; = \underline{1 \;\; ;59 \, k} \tag{2.9}$$

Pro návrh oscilátoru:

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{R_X}{R_P} \;! \quad R_A = R_B = R_X = R_P = R; \tag{2.10}$$

tedy jako hodnotu odpor· zvolím $R = 1 \;\; k$ a pro nastavení hodnoty cívky vyu°iji vý²e vypo£ítané hodnoty.

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

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

$$Z_{IN}(s) = \frac{R_1 \quad R_2 \quad R_3}{\frac{1}{C(s)} \quad \frac{1}{C(s)}} \;! \quad D = R_1 \quad R_2 \quad R_3 \quad C_1 \quad C_2 =$$
$$= 1 \quad 10^3 \quad 500 \quad 500 \quad (10 \quad 10^{\;9})^2 = 25 \quad 10^{\;9} \, F^{\,2 \quad 3} \tag{2.12}$$

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 po£íta£ovou simulací

3.1 Analýza navrºené syntetické cívky a dvojného kapacitoru

Na základ¥ návrhu hodnot sou£ástek z p°edchozí kapitoly ($L = 2{,}53$ mH, $R = 1$ k , $R_1 = R_2 = 500$, $Q = 10$, $R_Q = 1{,}59$ k) jsem provedla v²echny simulace.

Mezi prvními simulacemi je pr·b¥h vstupní impedance syntetické cívky (obr. 3.1), a to pro zapojení s ideální cívkou (inpi - zelená barva), s náhradou cívky ideálními opera£ními zesilova£i (inps - £ervená barva) a s náhradou cívky pomocí model· reálných opera£ních zesilova£· (TL084 [7], dále makromodely) (inpso - modrá barva). Z výsledného pr·b¥hu lze vid¥t, ºe v²echny t°i varianty cívky mají shodný pr·b¥h vstupní impedance aº do hodnoty okolo 100 kHz.

Obr. 3.1: Impedance a její fáze u syntetické cívky

Simulací dvojné cívky (obr. 3.2) se potvrdil p°edpoklad v¥t²í strmosti vstupní impedance oproti strmosti vstupní impedance syntetické cívky. Graf op¥t znázor¬uje zapojení s ideálními OZ (inps) a makromodely OZ (inpso), a na porovnání strmostí je²t¥ pr·b¥h vstupní impedance cívky (inpi). Z pr·b¥hu lze op¥t vy£íst stejné chování

s ideálními i makromodely OZ do hodnoty zhruba 100 kHz, p°i£emº kone£ná hodnota vstupní impedance limituje pásmo pouºitelnosti i na nízkých kmito£tech (pod 100 Hz),

Obr. 3.2: Impedance a její fáze u dvojné cívky

3.2 Analýza vybraných RLC zapojení

3.2.1 Vybrané ltry

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

Obr. 3.3: Horní propust v zapojení se syntetickou cívkou

Pro p°enos horní propusti platí:

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

Obr. 3.4: Pásmová propust v zapojení se syntetickou cívkou

Pro p°enos pásmové propusti platí:

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

V grafu je zobrazen p°enos horní propusti (obr. 3.5). Na za£átku jsem si volila hodnotu £initele jakosti Q = 10, jeho° hodnota se odvíjí od hodnoty odporu R_Q. Z tohoto d·vodu jsem zvolila krokování odporu R_Q o krocích 100 , 1 k , 1;59 k a 10 k , abych zjistila, jak ovlivní r·zn¥ velké hodnoty Q a R_Q p°enos.

Z výsledného pr·b¥hu p°enosu lze odvodit, °e s rostoucím odporem roste £initel jakosti, sni°uje se ²í°ka pásma a rezonance se vyost°uje.

Obr. 3.5: P°enos horní propusti s krokováním R_Q = 100 , 1 k , 1;59 k a 10 k

Ze simulace p°enosu a fáze pro pásmovou propust lze p°i krokování R_Q vid¥t velký vliv Q a R_Q na ²í°ku pásma pr·b¥hu. S rostoucím R_Q se zmen²ovala ²í°ka pásma (z 10 kHz pro R_Q = 500 na 380 Hz pro R_Q = 10 k) a rezonance se vyost°ovala.

M¥°eno pro odpor R_Q:	100	1k	1,59k	10k
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 ud¥lala toleran£ní analýzu pro zapojení s makromodely OZ [7], kde byla pro R tolerance 1% a pro C tolerance 5%. Rozptyl st°ední frekvence f_c = (10128 1131) Hz , ²í°ky pásma BW = (1073 165) Hz a £initele jakosti Q = (9 ; 5 1). Porovnáním s výsledky obvodu s drátovou cívkou se rozptyl drºí p°esn¥ji na stanovené hodnot¥ f_c = (10042 1809) Hz, Q = (9 ; 9 1; 8), BW = (1016 99) Hz).

Obr. 3.6: Fázová a modulová kmito£tová charakteristika pásmové propusti s krokováním R_Q

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

Obr. 3.8: Rozptyl hodnot st°ední frekvence pásmové propusti

Obr. 3.9: Rozptyl hodnoty Q pásmové propusti

Obr. 3.10: Rozptyl ²í°ky pásma pro pásmovou propust

Pro získání ltru dolní propusti 3. °ádu je pot°eba nahradit syntetickou cívku dvojným kapacitorem (obr 2.3). Následné zapojení pro ltr dolní propusti:

Obr. 3.11: Dolní propust zapojená s dvojným kapacitorem

Zapojení má tvar:

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

Obr. 3.12: Fázová a modulová charakteristika dolní propusti 3. °ádu s krokováním C_Q = 10 nF, 1 nF, 680 pF, 420 pF

Na rozdíl od horní a pásmové propusti, u zapojení ltru dolní propusti je sou£ástka ovliv¬ující rezonanci kondenzátor C_Q. Z obr. 3.12 lze usoudit, ºe s klesající hodnotou C_Q se zmen²uje ²í°ka pásma a vyost°uje rezonance.

Fázová charakteristika dolní propusti odpovídá v ur£itém intervalu frekvencí tém¥° dokonale RL obvodu. Od ur£ité frekvence (p°ibliºn¥ = 33; 5 kHz) lze sledovat, jak se fáze op¥t stá£í zp¥t z 180° sm¥rem k 90°. Tato zm¥na je zap°í£in¥na frekven£ní závislostí aktivních prvk· v Antoniovém impedan£ním konvertoru.

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

3.2.2 OTAs s uzemn¥nými impedancemi

Kaskádní zapojení OTAs (obr. 1.4) umoº¬uje stejn¥ jako Antoni·v obvod násobení impedancí. Toto konkrétní zapojení násobí impedance ve jmenovateli zlomku (1.6), spolu s transkonduktancemi daných OTA. Transkonduktance, neboli strmost, daných opera£ních zesilova£· je dána datasheetem [8]:

$$g_m \quad 19{,}2 \quad I_{ABC}\,; \tag{3.4}$$

kde I_{ABC} je Bias proud.

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

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

Obr. 3.14: Zobrazení fázové a modula£ní charakteristiky vstupní impedance syntetické zemn¥né cívky v zapojení s OTAs s krokováním proudu $U_{SET} = 0{:}5$ V (nejvý²e poloºená k°ivka), 5 V, 10 V, 13 V (nejníºe poloºená k°ivka)

Obr. 3.15: Porovnání fázové a modula£ní charakteristiky syntetické cívky zapojené Antoniovým impedan£ním konvertorem a OTAs kaskádou

Pro porovnání jsem ud¥lala simulaci syntetické cívky obvodu s Antoniovým impedan£ním konvertorem (zelená barva) a s OTAs kaskádou (£ervená barva). Z pr·b¥hu lze vid¥t lineární chování modulové charakteristiky obou obvod· v rozsahu 10Hz aº p°ibliºn¥ 50 kHz. Z fázové charakteristiky je patrný zna£ný vliv parazitní vstupní impedance obvodu a parazitní rezistivní sloºky, jelikoº ideální pr·b¥h fáze by byl konstantní (+90deg). V tomto p°ípad¥ je konstantní pr·b¥h u OTAs v rozmezí 300 Hz aº 3 kHz, a u Antoniova obvodu je to 50 Hz aº 50 kHz. Z tohoto porovnání lze usoudit, ºe OTA kaskáda m·ºe být povaºována za ideální v malém rozmezí frekvencí (300 Hz aº 3 kHz) oproti Antoniovu obvodu, který má skoro trojnásobný rozsah, ve kterém se dá povaºovat za tém¥° ideální.

Obr. 3.16: Toleran£ní analýza pro zapojení syntetické cívky s OTA kaskádou