

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Mgr. Martin Mierka

Autoreferát dizertačnej práce

SNÍMAČE NEELEKTRICKÝCH VELIČÍN
NA BÁZE RF MEMS

na získanie akademického titulu

„doktor“

(„philosophiae doctor“, v skratke/*abbreviated as* „PhD.“)

v doktorandskom študijnom programe

5.2.54 meracia technika

Bratislava 2021

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Mgr. Martin Mierka

Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave
Ústav elektrotechniky
Ilkovičova 2961/3
841 04 Bratislava

Školiteľ: Prof. Ing. René Harťanský, PhD.

Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave
Ústav elektrotechniky
Ilkovičova 2961/3
841 04 Bratislava

Oponenti: doc. Ing. Martin Rákus, PhD.

Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave
Ústav multimediálnych informačných a komunikačných technológií
Ilkovičova 2961/3
841 04 Bratislava

Ing. Pavol Ďurina, PhD.

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK v Bratislave
Katedra experimentálnej fyziky
Mlynská dolina F1
842 48 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:2021

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:2021 o h online

Prof. Ing. Miloš Oravec, PhD.

dekan Fakulty elektrotechniky a informatiky STU

Obsah

Zoznam použitých skratiek	4
----------------------------------	----------

Úvod	Chyba! Záložka nie je definovaná.
-------------	-----------------------------------

1. Ciele dizertačnej práce	7
-----------------------------------	----------

1.1 Návrh, overenie použitím numerickej simulácie a realizácia TEM CELL s minimálnym dosiahnuteľným koeficientom odrazu v celom pracovnom pásme MEMS.....	7
---	---

1.2 Vytvorenie náhradnej schémy TEM CELL s využitím sústredených parametrov prvkov.....	11
---	----

1.3 Návrh a vytvorenie senzora, ktorý umožní ľahšie / jednoznačnejšie určenie pôsobiacej fyzikálnej veličiny na MEMS, na základe navrhnutého numerického modelu TEM CELL.....	15
---	----

1.3.1 Návrh senzora	17
---------------------------	----

1.4 Návrh metodiky overenia senzora na snímanie fyzikálnych veličín.....	20
--	----

1.4.1 Kombinácia LC filtra a mikrokontroléra	21
--	----

1.4.2 Kombinácia VCO s MEMS a VCO s impedančným prispôbením ...	24
---	----

1.4.3 Spracovanie signálu s informáciou o neelektrickej fyzikálnej veličine	28
---	----

Záver	31
--------------	-----------

Literatúra	Chyba! Záložka nie je definovaná.
-------------------	-----------------------------------

Zoznam publikácií autora	39
---------------------------------	-----------

Summary	42
----------------	-----------

Zoznam použitých skratiek

MEMS	-	Micro-Electro-Mechanical Systems (mikromechanické systémy)
RF	-	Radio frequencies –frekvencie v rozsahu od 1 MHz do 1 GHz
VSWR	-	Voltage Standing Wave Ratio – pomer stojatých vln napätia
VF	-	frekvencie, pri ktorých musíme uvažovať s rozloženými parametrami
EUT	-	Equipment Under Test – testované zariadenie
RFID	-	Radio Frequency Identification- frekvenčná identifikácia vo frekvenčnom pásme od 1MHz do 1GHz
TEM CELL	-	Transverse ElectroMagnetic CELL – transversálna elektro- magnetická bunka
SI	-	Système International (d'Unités) – medzinárodná sústava jednotiek
DETC	-	inštitúcia „Distance Education and Training Council“
SPIE	-	inštitúcia „The international society for optics and photonics“
IEEE	-	inštitúcia „Institute of Electrical and Electronics Engineers“
WM	-	Wolfram Mathematica
DDS	-	Direct digital synthesis (priama číslicová syntéza)
SRO	-	Sériový rezonančný obvod
PRO	-	Paralelný rezonančný obvod
VCO	-	Napätím riadený oscilátor
nPRO	-	Paralelný rezonančný obvod umiestnený na napájacej svorke VCO

Zoznam použitých znakov

U_{MAX}	- maximálne napätie [V]
U_{MIN}	- minimálne napätie [V]
Z_0	- vstupná impedancia [Ω]
Z_L	- impedancia záťaže [Ω]
Γ	- koeficient odrazu [-]
c	- rýchlosť svetla ($\sim 3 \cdot 10^8$ m/s)
Z_T	- charakteristická impedancia TEM CELL [Ω]
f_c	- hraničná frekvencia [Hz]
C_f'	- okrajová kapacita [F]
ϵ_0	- permitivita vákua ($8,854 \cdot 10^{-12}$ F.m ⁻¹)
ϵ_r	- relatívna permitivita dielektrika nachádzajúceho sa medzi doskami kondenzátora [-]
A	- spoločná plocha dosiek kondenzátora [m ²]
d	- vzdialenosť medzi kondenzátorovými doskami [m]
$\dot{Z}_{in}$	- komplexná maximálna hodnota vstupnej impedancie dipólu [Ω]
$\dot{Z}_{vp}$	- vlnová impedancia voľného priestoru pre vákuum [Ω]

Úvod

Dominantným komponentom v meracom reťazci potrebným k meraniu fyzikálnych veličín je snímač. Úlohou snímača je nepretržite merať fyzikálnu veličinu v jeho pracovnom rozsahu a prostredí. Jedným z mnohých typov snímačov sú MEMS, ktoré stále ponúkajú široké možnosti k inováciám. Ich uplatnenie nachádzame v podobe mechanizmov mikro-polohovacích zariadení, aktuátorov a mikro-efektorov, čiže nástrojov pre presné mikro-manipulácie v čistom prostredí. Ich uplatnenie nachádzame aj v opto-elektronike, mikrochirurgii a iných odvetviach.

Významným činiteľom vývoja nových snímačov sú požiadavky trhu, resp. spotrebiteľov. Nároky na snímače sa zvyšujú, a taktiež zaznamenávame nárast ich aplikácie. Monitoring teploty prostredia, meranie rýchlosti výrobných linky, lokalizácia polohy automatizovaných jednotiek, meranie tlaku lisovacích strojov, snímanie frekvencie otáčok motorov a mnohé ďalšie aplikácie prinášajú so sebou nielen prínosy, ale aj negatívne dopady. Medzi negatívne dopady zaradíme elektromagnetické rušenie, presluchy, navýšenie počtu vodičov, potreba navýšenia riadiacich jednotiek, vzájomné ovplyvňovanie systémov. Trendom dnešných dní je vývoj kvalitných snímačov s minimalizáciou, resp. elimináciou negatívnych dopadov na systémy. Relevantným parametrom pri vývoji nových snímačov je aj cena, veľkosť a presnosť snímačov. Snímače MEMS fungujúce na princípe rádiových frekvencií (RF) momentálne ponúkajú vysokú presnosť za vyššiu cenu. Cena je dôsledkom potrebných súčastí meracieho reťazca, ktorý vyžaduje vysokofrekvenčné zariadenia, akými sú vysielacia anténa, prijímacia anténa a príslušné detektory. Práve tieto zariadenia vyžadujú aj isté priestorové požiadavky, z čoho vyplýva, že aj veľkosť týchto meracích reťazcov je relatívne veľká.

Predmetom dizertačnej práce je návrh novej metodiky snímania fyzikálnych veličín prostredníctvom RF MEMS. Návrh rešpektuje súčasné trendy a ponúka riešenie snímača s minimalizovaním vyššie uvedených negatívnych vplyvov.

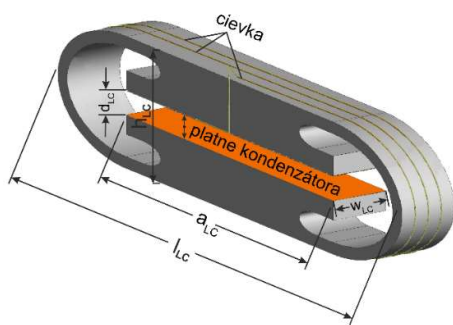
1. Ciele dizertačnej práce

Práca sa zaoberá riešením nasledujúcich téz:

1. Návrh, overenie použitím numerickej simulácie a realizácia TEM CELL s minimálnym dosiahnuteľným koeficientom odrazu v celom pracovnom pásme MEMS
2. Vytvorenie náhradnej schémy TEM CELL s využitím sústredených parametrov prvkov.
3. Návrh a vytvorenie senzora, ktorý umožní ľahšie / jednoznačnejšie určenie pôsobiacej fyzikálnej veličiny na MEMS, na základe navrhnutého numerického modelu TEM CELL.
4. Návrh metodiky overenia senzora na snímanie fyzikálnych veličín.

1.1 Návrh, overenie použitím numerickej simulácie a realizácia TEM CELL s minimálnym dosiahnuteľným koeficientom odrazu v celom pracovnom pásme MEMS

Práca sa zaoberá návrhom novej metodiky s využitím doposiaľ získaných poznatkov z oblasti MEMS (mikro-elektro-mechanické štruktúry) a ich správania sa v elektromagnetickom poli. Z tohto dôvodu je nevyhnutnou súčasťou definovanie MEMS, ktorú v dizertačnej práci využívame. Okótovaný tvar MEMS môžeme vidieť na Obr. 1. Na vonkajšom obvode MEMS je navinutý drôt, ktorý je spojený s vodivými platňami v strede MEMS. Takto vyhotovená štruktúra predstavuje rezonančný LC obvod, ktorého rezonančná frekvencia je závislá od vzdialenosti medzi platňami kondenzátora. Rozmery MEMS sú špecifikované v Tab. 1.

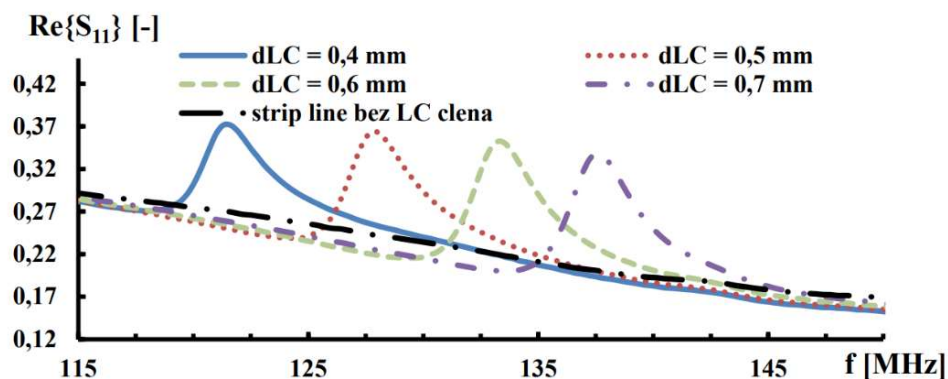


Obr. 1 Okótovaný LC člen

Označenie	Hodnota
l_{LC} [mm]	52,0
h_{LC} [mm]	10,5
w_{LC} [mm]	5,6
a_{LC} [mm]	37,0
d_{LC} [mm]	1,75
NL [-]	3

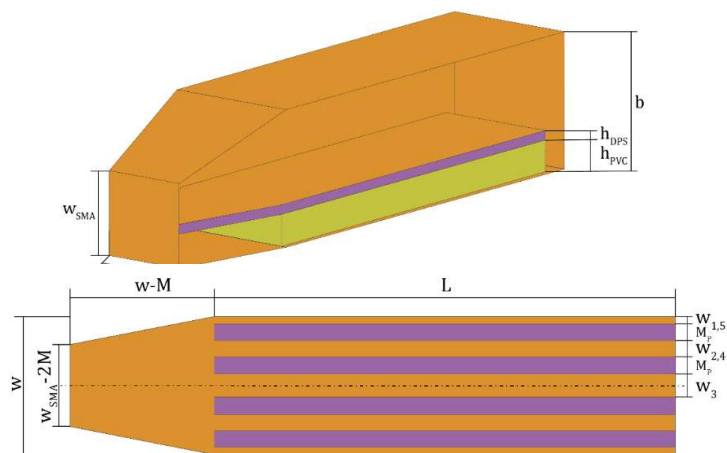
Tab. 1 Rozmery LC člena

Umiestnením MEMS do elektromagnetického poľa je na základe zistení [1] možné pozorovať zmeny charakteristickej impedancie žiariča. Aby meranie fyzikálnej veličiny pôsobiacej na MEMS prostredníctvom charakteristickej impedancie bolo korektné, je potrebné vložiť MEMS do homogénneho elektromagnetického poľa (ďalej EM pole). Jednou z vhodných možností je využitie TEM CELL (transverzálnej elektromagnetickej bunky). Tá je charakteristická svojím symetrickým tvarom, homogénnym EM poľom vo vnútornom priestore bunky, impedančným prispôbením a možnosťou umiestniť skúmané objekty do vnútra bunky. Aby TEM CELL vytvárala vo svojom vnútri EM pole, je potrebné ju napájať vysokofrekvenčným signálom, ktorého frekvencia bude rovnaká ako rezonančná frekvencia MEMS. Keďže aktuálnu frekvenciu MEMS nepoznáme, napájaný signál musí byť široko frekvenčný v rozsahu snímača MEMS. Frekvenčný rozsah MEMS môžeme vidieť na Obr. 2.



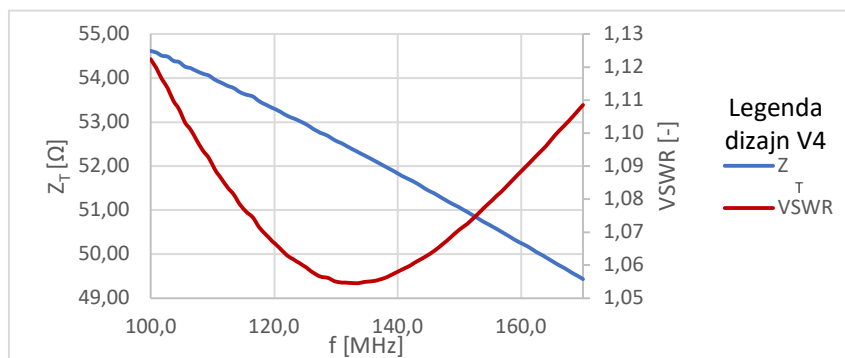
Obr. 2 Závislosť frekvenčnej polohy lokálneho maxima koeficienta S_{11} v závislosti od zmeny vzdialenosti dosiek kondenzátora [1]

V práci sa zaoberáme optimalizáciou výsledkov prostredníctvom zmeny charakteristických parametrov: rozmer bunky, tvar bunky, impedancia záťaže. V prvom rade bol navrhnutý model TEM CELL na základe [31]. Úpravou, simuláciou a vyhodnotením každého návrhu sme sa v dizertačnej práci dopracovali až k návrhu č. 4, ktorého tvar je definovaný na Obr. 3.



Obr. 3 Návrh TEM CELL – verzia č. 4 (hore - pohľad z boku, dole - pohľad zhora na žiarič)

Návrh pozostáva zo žiariča, ktorý je rozdelený na 5 pásikov rozdielnej šírky, každý zakončený $250 \, \Omega$ SMD odporom. Charakteristická impedancia TEM CELL bola stanovená na $Z_T = 50 \, \Omega$. Pre overenie vlastností navrhovanej TEM CELL sme skonštruovali jej model v prostredí FEKO. TEM CELL sme napájali vysokofrekvenčným signálom vo frekvenčnom pásme 100 – 170 MHz, ktoré vyplýva z frekvenčného pásma MEMS (viď. Obr. 2) s rezervou 10 % na obidve strany pásma. Napät'ová úroveň tohto signálu je 1 V a charakteristická impedancia generátora má hodnotu $50 \, \Omega$. V prostredí FEKO sme sa zamerali na reálnu zložku Z_T a na parameter VSWR (Voltage Standing Wave Ratio). Cieľom optimalizácie výsledkov bolo priblížiť sa v uvedenom frekvenčnom pásme čo najbližšie k $Z_T = 50 \, \Omega$ a $VSWR = 1$. Výsledky finálneho návrhu pre frekvenčnú závislosť reálnej zložky Z_T a VSWR sú zobrazené na Obr. 4.



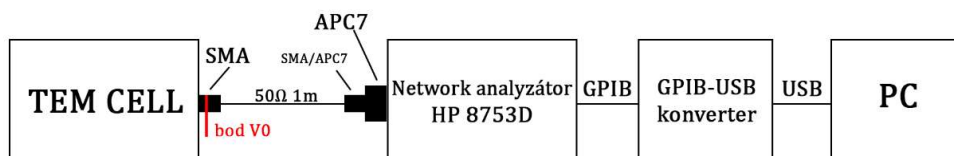
Obr. 4 Graf závislosti parametra VSWR a charakteristickej impedancie Z_T od frekvencie – simulácia verzie 4

Na základe uvedených výsledkov, ktoré sú veľmi blízke požadovaným hodnotám Z_T a VSWR, sme sa ďalej zaoberali výrobou TEM CELL a zmeraním jej vlastností. TEM CELL sme skonštruovali z mosadze, žiarič z DPS (doska plošných spojov) a ako podložku pod DPS sme použili PVC. Účelom PVC podložky je minimalizovať pružnosť DPS žiariča pri pôsobení fyzikálnej veličiny na MEMS. Aby vodivé časti LC člena sa nespojili s vodivým pásikom na žiarič sme umiestnili PVC fóliu. Finálna podoba vyrobenej TEM CELL je zobrazená na Obr. 5.

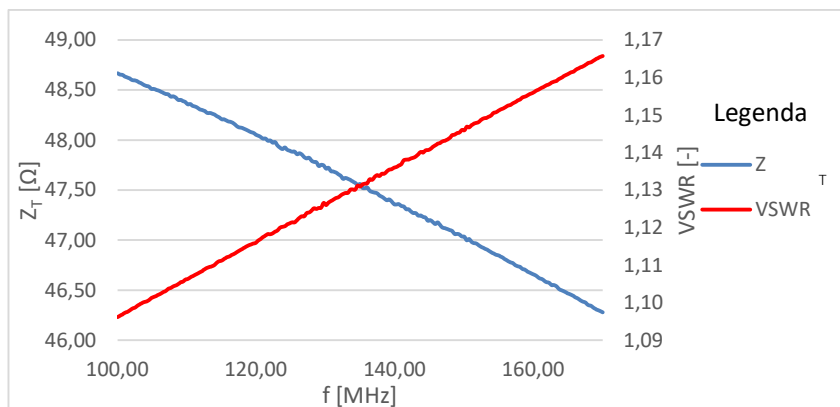


Obr. 5 Vyhotovená TEM CELL

K meraniu vlastností TEM CELL sme použili (vektorový) obvodový analyzátor HP 8753D. Meranie sme realizovali vo frekvenčnom rozsahu 100 MHz až 170 MHz. Na Obr. 6 môžeme vidieť blokovú schému meracieho reťazca a na Obr. 7 namerané dáta vyobrazené v grafickej podobe.



Obr. 6 Bloková schéma meracieho reťazca pre meranie vlastností TEM CELL



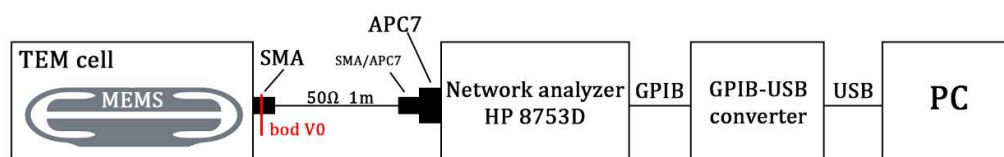
Obr. 7 Graf závislosti parametra VSWR a charakteristickej impedancie Z_T od frekvencie –namerané hodnoty zrealizovanej verzie 4

Napriek miernym odchýlkam medzi Obr. 4 a Obr. 7 môžeme konštatovať, že skonštruovaná TEM CELL má vynikajúce výsledky v nami zvolenom frekvenčnom pásme. VSWR sa pohybuje v rozpätí 1,095 až 1,165 a impedančne je TEM CELL tesne pod požadovanou hodnotou 50 Ω. S týmto modelom TEM CELL sme realizovali ďalšie merania a taktiež práve táto TEM CELL bola použitá ako súčasť snímača.

1.2 Vytvorenie náhradnej schémy TEM CELL s využitím sústredených parametrov prvkov

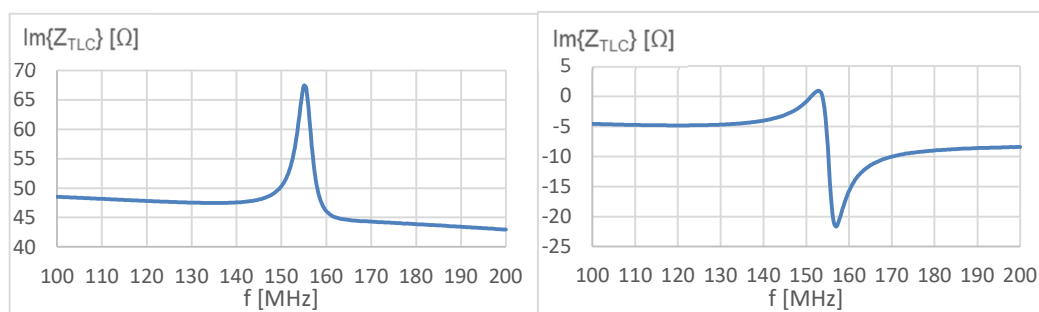
Výrobou TEM CELL a umiestením LC člena do vnútorného priestoru TEM CELL sme navrhli a zostrojili prototyp snímača, ktorého funkcionlita sa prejavuje na vstupno-výstupnom porte TEM CELL. Z úvodu dizertačnej práce vyplýva, že na generovanie vhodného vysokofrekvenčného signálu a snímanie odrazenej vlny je potrebná vysokofrekvenčná aparátúra, ktorá je priestorovo rozsiahla a cenovo bežne nedostupná. Vhodným postupom pre hľadanie riešení bez použitia aparatúry je využitie dostupných simulačných prostredí. Avšak z dostupných prostredí sa ani jedno neorientuje na kombináciu simulácie elektrických obvodov a vysokofrekvenčných prvkov v takom rozsahu, aký bol pre hľadanie riešenia potrebný, čím vznikla požiadavka konverzie vysokofrekvenčnej časti nášho systému- vyjadrený sústredenými parametrami na vyjadrenie spojitými parametrami. Následne je možné v prostredí so simulačným modelom SPICE skúmať vplyv rezonančnej frekvencie MEMS na súčasti oscilátora a potvrdiť hypotézu, že informáciu o fyzikálnej veličine pôsobiacej na MEMS môžeme merať v rôznych bodoch oscilátora.

Aby sme mohli prístupit' ku zložitej matematickej konverzii, bolo potrebné zvoliť si parametre, ktorými opíšeme TEM CELL s MEMS. Ako uvádza autor MEMS Maršálka, zmeny rezonančnej frekvencie boli spozorované pri meraní vstupnej impedancie TEM CELL s MEMS [1]. Z tohto dôvodu sa práca zaoberá skúmaním vstupnej impedancie TEM CELL s MEMS. Pre meranie komplexnej impedancie bolo potrebné zostaviť merací reťazec, ktorý bol schopný merať komplexnú impedanciu v nami zadefinovanom bode V0 (začiatok SMA konektoru TEM CELL). Navrhnutý merací reťazec je zobrazený na Obr. 8, pričom meranie sme realizovali vo frekvenčnom pásme 100 MHz až 200 MHz. Rozšírením frekvenčného pásma sme zistili tvar a hodnotu krivky nielen tesne za prekmitom (vid'. Obr. 2), čo môže neskôr pri výpočtoch dopomôcť k správnej analýze.



Obr. 8 Merací reťazec pre meranie parametra S_{11}

Na základe získaných dát vieme úpravou prostredníctvom výpočtového prostredia Wolfram Mathematica (ďalej WM) získať hodnoty reálnej a imaginárnej zložky impedancie TEM CELL s MEMS - Z_{TLC} . Graf závislosti komplexnej impedancie Z_{TLC} od vstupnej frekvencie f pre reálnu a imaginárnu zložku je zobrazený na Obr. 9.



Obr. 9 Graf závislosti reálnej zložky komplexnej impedancie Z_{TLC} (vľavo) a komplexnej impedancie Z_{TLC} (vpravo) od vstupnej frekvencie f

Hodnoty závislosti komplexnej impedancie Z_{TLC} od vstupnej frekvencie f pre nás predstavovali výsledok, ku ktorému sme sa chceli dopracovať náhradnou schémou TEM CELL s MEMS vyjadrenou súčiastkami so spojitými parametrami. Pre návrh konverzie,

respektíve pre hľadanie funkcie vyjadrujúcej uvedené priebehy sme využili teóriu signálov so všeobecnou rovnicou 1.1 pre 2 a viacportové systémy.

$$S_{11}(n, m) = \frac{b_n f^n + b_{n-1} f^{n-1} + \dots + b_1 f + b_0}{a_m f^m + a_{m-1} f^{m-1} + \dots + a_1 f + a_0} \quad 1.1$$

Ďalšou úlohou bolo zvoliť si vhodný počet rádov m a n . Môžeme konštatovať, že každý reaktančný prvok nášho modelu pridáva ďalší rád funkcie. Zároveň sme si zadefinovali, že parametre m a n budú rovnakej hodnoty. Rovnica 1.1 predstavuje len jeden z možných tvarov funkcie. Pre našu aplikáciu bolo rozumnejšie použiť lomenú funkciu používanú pri návrhu filtrov. Na základe logických úvah sme skúmali upravenú rovnicu (viď. rovnica 1.2) s parametrom $m = n = 3$ až 5. Grafickým zobrazením funkcií sme zistili, že naším priebehom sa najviac podobajú priebehy pre 4 rád funkcie.

$$Z_{11(4)} = k_0 + k_1 jF + \frac{b_0 + b_1 s(F) + b_2 s(F)^2 + b_3 s(F)^3 + b_4 s(F)^4}{a_0 + a_1 s(F) + a_2 s(F)^2 + a_3 s(F)^3 + a_4 s(F)^4} \quad 1.2$$

Keďže sme v prostredí Wolfram Mathematica čelili problému s divergenciou funkcie pri použití funkcie „FindFit“ pri frekvenciách v rádoch 10^8 , museli sme si zadefinovať pre komplexnú impedanciu Z_{TLC} v rozsahu $f = 100 - 200$ MHz, s počtom vzoriek 200 normovanú komplexnú frekvenciu.

$$s(F) = j + \frac{j}{200}(F - 1) \quad 1.3$$

Normovaním rovnice a výpočtom funkcie na základe nameraných dát sme sa dopracovali k nasledovnému predpisu:

$$Z_{11(4)} = 46,084 + 0,003jF + \frac{160,866 - 52,349s(F) - 80,877s(F)^2 - 30,305s(F)^3 - 66,918s(F)^4}{52,218 - 49,282s(F) + 39,0538s(F)^2 + 20,309s(F)^3 + 6,903s(F)^4} \quad 1.4$$

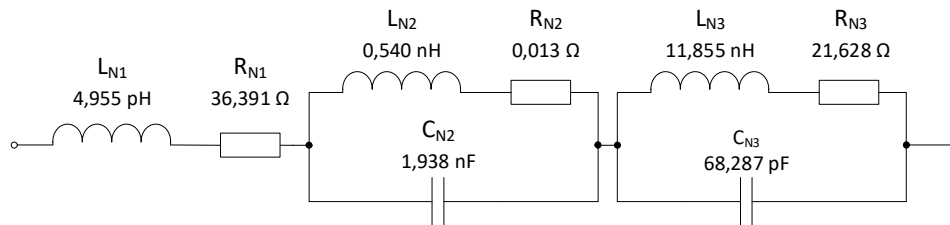
V tomto tvare nám funkcia $Z_{11(4)}$ neposkytovala dostatočné informácie o jednotlivých prvkoch náhradnej schémy. Z tohto dôvodu sme normovanú funkciu odnormovali naspäť do frekvenčnej oblasti vzťahom 1.5.

$$s(F) = j\omega * 10^{-8} * \frac{1}{2\pi} \quad 1.5$$

Aby odnormovaná funkcia bola ľahšie čitateľná, pokúsili sme sa upraviť funkciu jedného zlomku na súčet/rozdiel parciálnych zlomkov. Úpravou funkcie sme získali parciálne zlomky druhého rádu. O tých vieme, že ich reprezentuje maximálne kombinácia troch prvkov siete. Funkcia druhého rádu vzniká vďaka kombinácii dvoch reaktančných prvkov, tretí odporový prvok už rád funkcie nenavýšuje [2]. Matematickou úpravou sme odnormovali a upravili tvar funkcie 1.4 na nasledovnú podobu:

$$\begin{aligned} Z_{11(4)} = & 36,391 + 4,955 * 10^{-12}j\omega - \frac{8,053 * 10^7 + 2,580 * 10^8j}{\omega - 9,768 * 10^8 - 1,199 * 10^7j} - \\ & - \frac{1,740 * 10^9 + 7,322 * 10^9j}{\omega - 6,349 * 10^8 - 9,122 * 10^8j} + \frac{1,740 * 10^9 - 7,322 * 10^9j}{\omega + 6,349 * 10^8 - 9,122 * 10^8j} + \\ & + \frac{8,053 * 10^7 - 2,580 * 10^8j}{\omega + 9,768 * 10^8 - 1,199 * 10^7j} \end{aligned} \quad 1.6$$

Práca sa ďalej zaoberá hľadaním a úpravou jednotlivých prvkov funkcie 1.6 tak, aby v nej bolo možné nájsť tvar funkcie podobný funkciám definujúcim elektrické obvody. Analýzou sme dospeli k záveru, že prvý člen definuje kombináciu odporu a cievky, ktorá je sériovo radená so zvyškom obvodu. Úpravou 2. a 5. člena funkcie 1.6 na spoločného menovateľa, a úpravou 3. a 4. člena funkcie na spoločného menovateľa vznikli dva členy v tvare $a^2 + ab + c$. Ako sa neskôr potvrdilo, tieto dva členy reprezentovali paralelné rezonančné obvody. Na základe analógie s funkciami pre sériový a paralelný rezonančný obvod sú ďalej v práci riešené matematické úpravy pre dosiahnutie náhradnej schémy TEM CELL s MEMS, ktorá je zobrazená na Obr. 10.



Obr. 10 Náhradná schéma TEM CELL s LC členom s hodnotami súčiastok

Náročným analytickým riešením sa nám podarilo previesť rozložené parametre do spojitaj oblasti a nahradiť vysokofrekvenčný systém s rozloženými parametrami jednoduchými spojitými súčiastkami (náhrada pravdaže platí len pre zvolený bod V0). Práve nami získané riešenie otvára možnosti k ďalšej expertíze pri návrhu meracích reťazcov pre meranie fyzikálnych veličín náročnými vysokofrekvenčnými systémami.

1.3 Návrh a vytvorenie senzora, ktorý umožní ľahšie / jednoznačnejšie určenie pôsobiacej fyzikálnej veličiny na MEMS, na základe navrhnutého numerického modelu TEM CELL

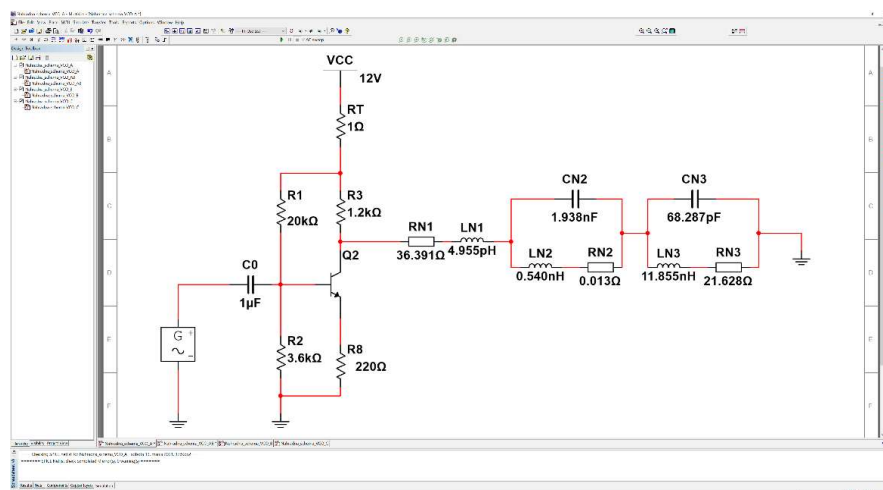
Vďaka výstupom z predošlej tézy sa práca ďalej uberá hľadaním miesta v obvode VCO, ktoré je relatívne nízko-frekvenčné a v ktorom je zahrnutá informácia o zmene pôsobiacej fyzikálnej veličiny na MEMS. V tomto bode bolo nevyhnutné zaoberať sa možnými generátormi vysokofrekvenčného signálu pre TEM CELL. Ako vhodné riešenie sa ukázalo použiť napäťovo riadený oscilátor (ďalej VCO). Žiaľ náhradnú schému VCO nie je možné dohľadať, keďže si ich výrobcovia strážia a nie sú verejne prístupné. Napriek neznalosti vnútornej schémy zapojenia obvodu VCO s určitosťou vieme povedať, že VCO pozostáva z oscilátora a zosilňovača. Keďže informáciu o zmene pôsobiacej fyzikálnej veličiny na MEMS vieme zmerať za bodom V0, jednoznačne táto informácia musí prechádzať aj pred bod V0 a teda musí prechádzať aj cez zosilňovač VCO.

V odbornej literatúre sa uvádza, že koncové zosilňovače VCO sa realizujú v zapojení triedy C alebo triedy B [3], [4]. Avšak z dnes dostupných vysokofrekvenčných operačných zosilňovačov už vieme, že zapojenie môže byť aj triedy AB [5]. Stále však môžeme predpokladať, že zosilňovač môže byť aj triedy A (vysoká linearita, malá účinnosť) [6]. Všetky zapojenia musia byť napojené na jednosmerný zdroj napätia, prostredníctvom napájacej svorky VCO. To znamená, že ak informácia v podobe prekmitu prechádza cez tranzistory zosilňovača, mali by sme ju nájsť aj na napájacej svorke VCO. Na základe uvedených úvah a faktov sme skonštruovali modely tranzistorových zapojení triedy A, AB, B a zaoberali sme sa aj zapojením triedy C. Z výsledkov simulácií vyplynulo, že naša úvaha bola správna a informácia o fyzikálnej veličine sa preniesla v prípade zosilňovača triedy A, AB a B na napájaciu svorku zosilňovačov. Pre priblíženie problematiky simulácie zosilňovačov

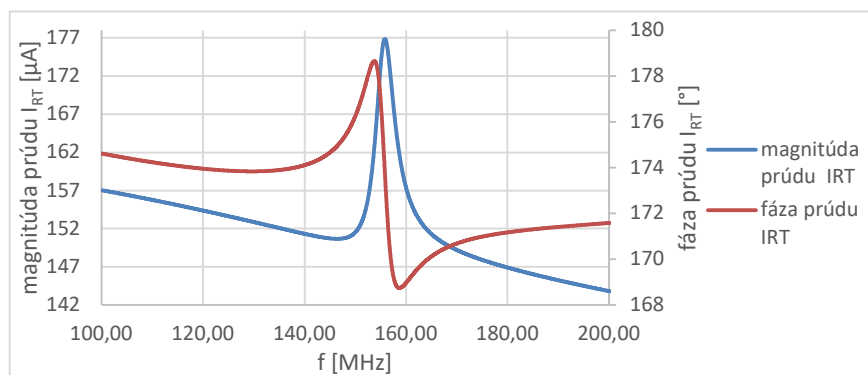
v SPICE simulátore NI Multisim, sa pozrime na jedno zo 4 zosilnení prezentovaných v práci.

Zapojenie zosilňovača triedy A

V prípade tranzistorového zapojenia triedy A, sme využili jedno z verejne dostupných zapojení s hodnotami (konkrétne [7]). V tomto zapojení autor pracoval s napájacím napätím +12 V, pričom kolektorový prúd bol veľkosti 4,58 mA. My sme doplnili zapojenie o náhradnú schému TEM CELL s LC členom (Obr. 10) a o odpor $R_T = 1 \Omega$ na napájacej svorke zosilňovača (aby sme dokázali vykresliť zaznamenaný prechyt prostredníctvom prúdovej charakteristiky na tomto odpore). Simulácia bola realizovaná v spomínanom prostredí NI Multisim so simulačným profilom „AC SWEEP“, ktorý skúma frekvenčnú odozvu obvodu. Výstupné grafy simulácie sú zobrazené na Obr. 12 a schéma zapojenia je zobrazená na Obr. 11.



Obr. 11 Simulačná schéma tranzistorového zosilňovača triedy A s náhradnou schémou VCO s LC členom a odporom R_T

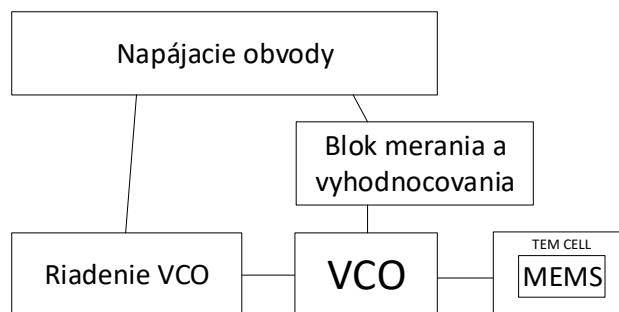


Obr. 12 Výstupné grafy magnitúdy a fázy prúdu I_{RT} pre tranzistorové zapojenie triedy A

Tvar krivky fázy prúdu I_{RT} sa zhoduje s tvarom imaginárnej zložky impedancie Z_T prezentovaným na Obr. 9. Rovnako tvar krivky magnitúdy prúdu I_{RT} je rovnaký ako tvar reálnej zložky impedancie Z_T prezentovaný na Obr. 9. Podobné výsledky sme dosiahli aj v prípade simulácie tranzistorového zapojenia triedy AB a B, avšak tvar krivky bol obrátený. Na základe tvaru kriviek prúdu I_{RT} sme dospeli k záveru, že sa informácie z výstupu VCO skutočne prenášajú na napájaciu svorku VCO. V teoretickej rovine sme všetky doposiaľ stanovené predpoklady naplnili, z tohto dôvodu sme sa rozhodli pokračovať návrhom obvodového riešenia senzora a návrhom metodiky snímania a vyhodnocovania fyzikálnej veličiny pôsobiacej na MEMS.

1.3.1 Návrh senzora

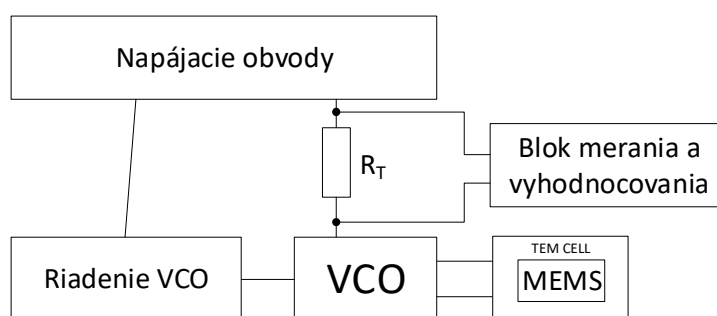
Jednou z prvých úloh, ktorými sme sa pri návrhu senzora zaoberali, je návrh obvodového riešenia generátora vysokofrekvenčného signálu. K tomu nám dopomohla bloková schéma snímača, ktorá bola postupne aktualizovaná v závislosti od výsledkov. Na základe predchádzajúcich úvah bola skonštruovaná základná bloková schéma snímača. Tá pozostáva z VCO, žiariča TEM CELL s MEMS, riadiacich obvodov VCO, bloku merania a vyhodnocovania a samozrejme napájacích obvodov.



Obr. 13 Základná bloková schéma snímača

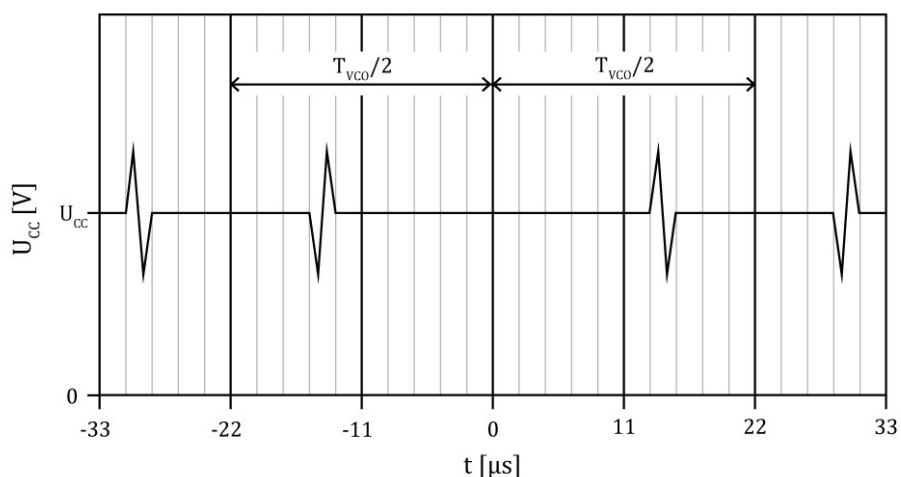
Pri riešení jednotlivých blokov sme v práci postupovali hierarchicky od navrhnutých súčastí k neznámym. Pri návrhu bloku riadenie VCO sme sa zaoberali otázkou „*S akou periódou by sme mali frekvenčné spektrum rozmietať a aký tvar a frekvenciu by mal mať riadiaci signál VCO, aby sme dosiahli požadované výsledky?*“. Z katalógového listu vybraného VCO (model ZX95-200+) vyplynulo, že napäťová úroveň riadiaceho signálu má byť v rozmedzí 0 – 17 V pre frekvencie v rozmedzí 80 – 230 MHz. Podobne z vybraného mikrokontroléra STM32 F3 Discovery vyplynulo, že maximálna vzorkovacia frekvencia mikrokontroléra je 5 MSPS. Pre snímame prechytov nesúcich informáciu o pôsobiacej fyzikálnej veličine sme si zvolili

podmienku, že prekmit chceme zaznamenať 11 vzorkami, čomu zodpovedá $2,2 \mu\text{s}$ pri vzorkovacej frekvencii 5 MSPS. Na základe týchto skutočností sme ako riešenie signálu na riadenia VCO navrhli trojuholníkový signál frekvencie 23 kHz, napäťovej hladiny 0 – 17 V, ktorý generujeme prostredníctvom DDS generátora v kombinácii s mikrokontrolérom. Keďže tento signál má v časovej rovine symetrický tvar, generovaná frekvencia VCO totožná s rezonančnou frekvenciou MEMS sa bude vyskytovať v jednej perióde riadiaceho signálu 2x. Aby sme dokázali snímať prekmity na napájacej svorke VCO, základnú blokovú schému sme rozšírili o odpor R_T medzi napájacou svorkou VCO a napájacími obvodmi.



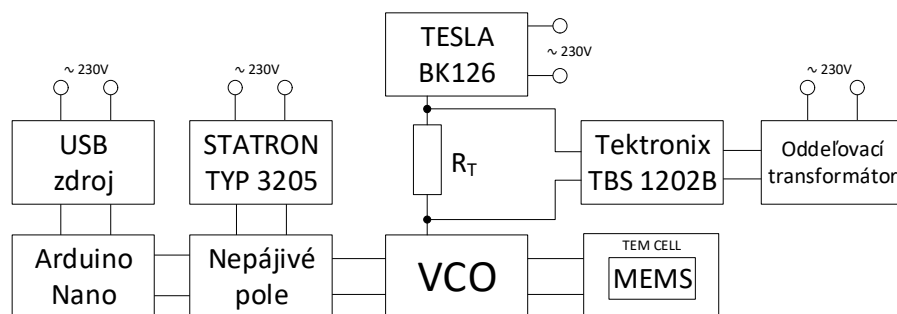
Obr. 14 Základná schéma snímača doplnená o odpor R_T

Na odpore R_T dokážeme zmerať úbytok napätia prostredníctvom mikrokontroléra. Predpokladaný napäťový priebeh, ktorý sme očakávali na odpore R_T je zobrazený na Obr. 11.



Obr. 15 Predpokladaný priebeh signálu na napájacej svorke VCO

Aby sme overili, či skutočne na odpore R_T bude uvedený priebeh, vykonali sme meranie podľa Obr. 16.



Obr. 16 Schéma zapojenia testovacie reťazca

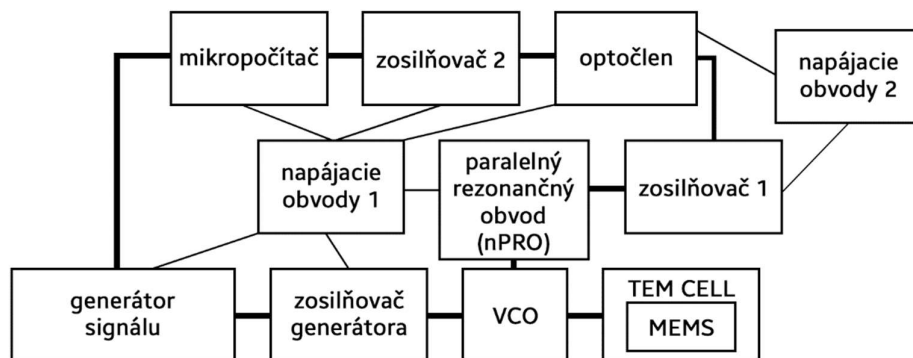
Avšak z merania vyplynulo, že tento signál je veľmi nízkej napäťovej úrovne. Za účelom zvýraznenia prekmity sme namiesto odporu R_T umiestnili paralelnú kombináciu kondenzátora a cievky (ďalej nPRO). Detailnejšia analýza výpočtu hodnôt paralelnej kombinácie je predmetom dizertačnej práce. Následne sme zopakovali meranie podľa Obr. 16 a výsledkom merania bol signál trojuholníkového tvaru s nasuperponovanými prekmitymi nesúcimi informáciu o fyzikálnej veličine (viď. Obr. 17).



Obr. 17 Priebeh meraného signálu z nPRO, prekmity zvýraznené

1.4 Návrh metodiky overenia senzora na snímanie fyzikálnych veličín

V ďalších riadkoch práce sme pracovali na doplnení blokov do blokovej schémy, ktorých účelom je snímať signál s informáciou o pôsobiacej fyzikálnej veličine a zároveň by mali byť schopné daný signál aj vyhodnocovať. V prípade časti riešenia zameranej na zaznamenanie signálu nesúceho informáciu o fyzikálnej veličine je návrh náročnejší. Vzhľadom na to, že chceme merať napät'ový priebeh na nPRO, je potrebné celý obvod na meranie galvanicky oddeliť od ostatných obvodov. Galvanickým oddelením si zabezpečíme možnosť vytvorenia novej napät'ovej referencie, ktorá bude práve na jednej zo svoriek nPRO. V tomto prípade musíme uvažovať buď o použití transformátora alebo optočlena. Vzhľadom na to, že pracujeme s rýchlym signálom (23 kHz, rovnaká frekvencia ako pílovitý signál), transformátor našej aplikácii nevyhovoval pre svoju pomalú prechodovú charakteristiku. Riešenie s optočlenom sa nám ponúkalo ako vhodné riešenie pre našu aplikáciu. Zostavená bloková schéma s optočlenom bola nasledovná:



Obr. 18 Upravená bloková schéma snímača

Prejdime si trajektóriu signálov naprieč jednotlivými blokmi. Mikropočítač riadi generátor signálu. Ten generuje riadiaci signál trojuholníkového tvaru s frekvenciou $f_{VCO} = 23 \text{ kHz}$ a napät'ovým rozsahom $U_G = 0,038 \div 0,65 \text{ V}$. Následne zosilňovač generátora upravuje riadiaci signál na signál trojuholníkového tvaru s frekvenciou $f_{VCO} = 23 \text{ kHz}$, avšak s napät'ovým rozsahom $U_{TUNE} = 0 \div 17 \text{ V}$. VCO pri uvedenom riadiacom signáli generuje vysokofrekvenčný signál v rozsahu 80 MHz až 230 MHz. Tento signál ďalej pokračuje cez koncový zosilňovač VCO do TEM CELL, kde je tento signál transformovaný prostredníctvom vodivého pásika na EM pole, ktoré sa šíri len

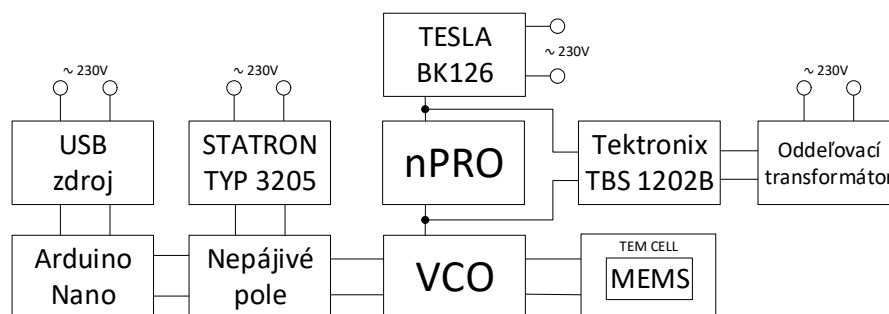
vo vnútornom priestore TEM CELL. V tomto priestore je umiestnená MEMS s určitou rezonančnou frekvenciou v závislosti od deformácie MEMS. Odrazená elektromagnetická vlna, ktorá smeruje naspäť do VCO nesie informáciu o aktuálnej rezonančnej frekvencii MEMS. Signál s informáciou prechádza cez koncové tranzistorové zapojenie VCO. Následne sa signál šíri obvodmi VCO, pričom my ho zachytávame na paralelnom rezonančnom obvode nPRO umiestnenom medzi napájacou svorkou VCO a napájacími obvodmi 1. Aby bol signál vhodný pre ďalšie spracovanie, v bloku zosilňovač 1 ho zosilníme a cez optočlen galvanicky oddelíme.

Napriek tomu, že túto alternatívu sme považovali za vhodné riešenie, nenaplnila naše očakávania. Prenášaná informácia o fyzikálnej veličine pôsobiacej na MEMS sa pri procese galvanického oddelenia prostredníctvom optočlena stratila. Dôvod, prečo sa informácia vytratila, je ten, že frekvencia prekmitu, ktorý nesie spomínanú informáciu, je ďaleko nad šírkou frekvenčného pásma vybraného optočlena HCPL-7480. Týmto riešením sme si potvrdili predpoklad, že frekvenčná závislosť informácie sa prenáša naprieč systémom a nemení sa. Taktiež sme uvažovali o nahradení optočlena za iný optočlen so širším frekvenčným pásmom, konkrétne nad frekvenciu prekmitu nesúceho informáciu o pôsobiacej fyzikálnej veličine - 454 kHz. Opäť sme narazili na neúspech tohto riešenia, vzhľadom na to, že maximálna šírka frekvenčného pásma v súčasnosti dostupných optočlenov je stále menšia ako základná harmonická frekvencia prekmitu. Na základe spomínaných skutočností výpočet ďalších prvkov prispôbovacieho obvodu pre spracovanie výstupných signálov optočlena pre mikropočítač nebol potrebný. Zároveň vznikla požiadavka na iné obvodové riešenie spracovania signálu z nPRO.

1.4.1 Kombinácia LC filtra a mikrokontroléra

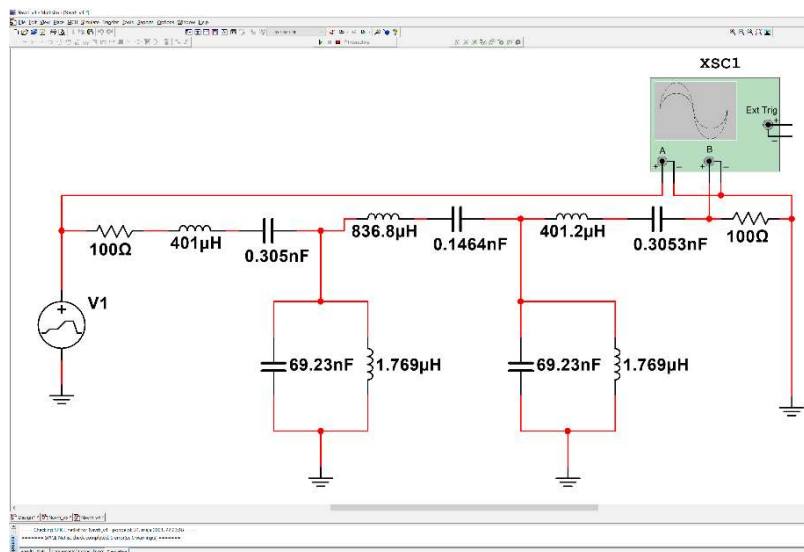
Ďalšou možnosťou ako spracovať signál nesúci informáciu o pôsobiacej fyzikálnej veličine na MEMS je kombinácia LC filtra s ďalším mikrokontrolérom. Doposiaľ sme uvažovali o využití jedného mikrokontroléra na riadenie VCO aj na navzorkovanie signálu s informáciou. V tomto riešení uvažujeme o jednom pre riadenie VCO a druhom pre zber vzoriek. Z predošlých riadkov vieme, že riadiaci signál má frekvenciu 23 kHz a trojuholníkový tvar. Tvar a frekvencia riadiaceho signálu je viditeľná aj na meraciach svorkách nPRO, kde na tomto signáli je nasuperponovaná už aj informácia o fyzikálnej veličine. Pri voľbe frekvencie riadiaceho signálu sme uvažovali s frekvenciou prekmitu $f_{LICI} = 454,55$ kHz. Ďalšou úvahou bolo použitím pasívneho LC filtra odfiltrovať

riadiaci signál a ponechať práve blízke frekvenčné pásmo prekmitu. Keďže návrh filtra nie je hlavným predmetom dizertačnej práce, pre konštrukciu filtra sme zvolili simulačné prostredie Ansys Electronics 2017, ktorého súčasťou je „Filter design tool“. Ako prvý sme vygenerovali filter typu pásmová priepusť. Aby sme overili jeho funkčnosť, rozhodli sme sa využiť prostredie NI Multisim. Aby sme mohli simulovať reálne podmienky, do ktorých bude filter aplikovaný, zostavili sme schému zapojenia testovacieho reťazca (viď. Obr. 19), pomocou ktorej sme osciloskopom zmerali a zaznamenali priebeh signálu na nPRO.

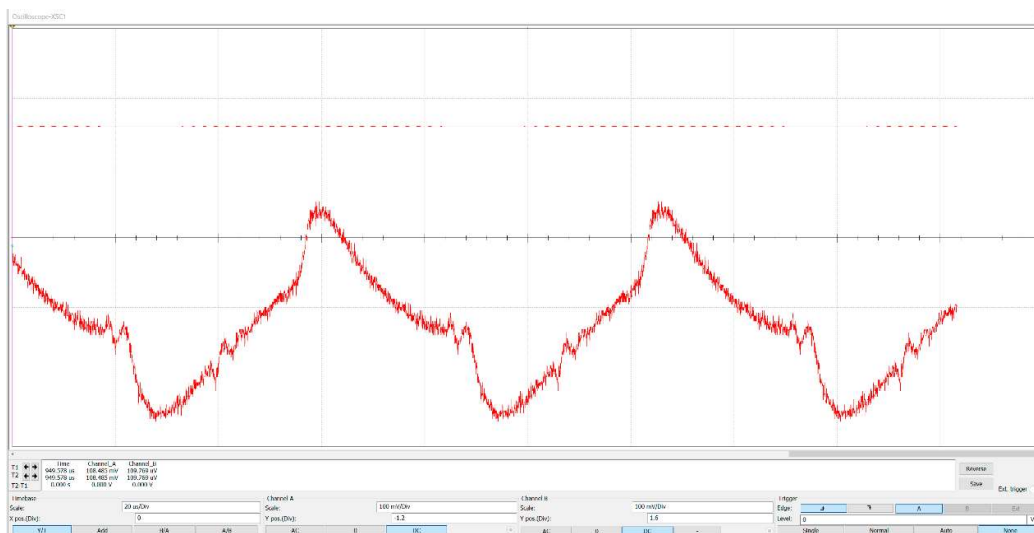


Obr. 19 Schéma zapojenia testovacieho reťazca s nPRO

Následne sme získané hodnoty vložili do „PWL voltage“ generátora a simulačnú schému sme doplnili o filter PP455 (viď. Obr. 20). Priebeh vstupného signálu do PP455 filtra a výstupného signálu z filtra sme sledovali prostredníctvom virtuálneho osciloskopu. Výstup týchto priebehov je zobrazený na Obr. 21.



Obr. 20 Schéma zapojenia filtra PP455 v prostredí Multisim



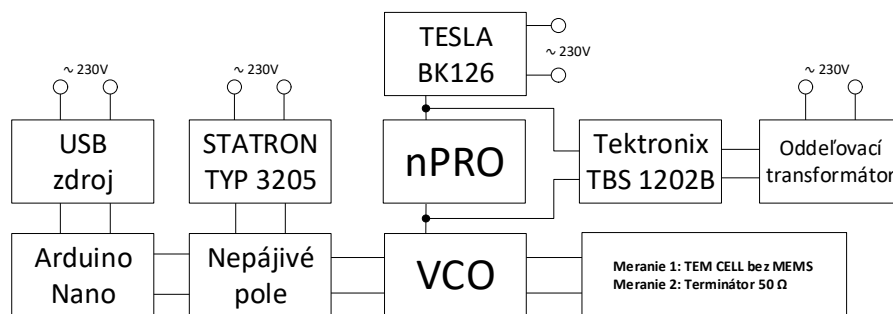
Obr. 21 Vstupný priebeh signálu do filtra PP455 (dole),
výstupný priebeh signálu z filtra PP455 (hore)

Ako môžeme vidieť na Obr. 21, filter typu pásmová priepusť nesplnil očakávania a odfiltroval aj informáciu o fyzikálnej veličine. Následne sme sa zaoberali návrhom hornopriepustného filtra s hraničnou frekvenciou 25 kHz (ďalej HP25). Dôvodom voľby tejto hraničnej frekvencie bol zámer odfiltrovať len riadiaci signál frekvencie 23 kHz. Výsledky simulácie opäť neboli dostatočné. Na základe analýzy výstupného signálu pri použití filtra HP25 sme sa rozhodli opäť zopakovať simuláciu použitím hornopriepustného filtra, avšak s hraničnou frekvenciou 130 kHz. Ani tento typ filtra nenaplnil naše očakávania.

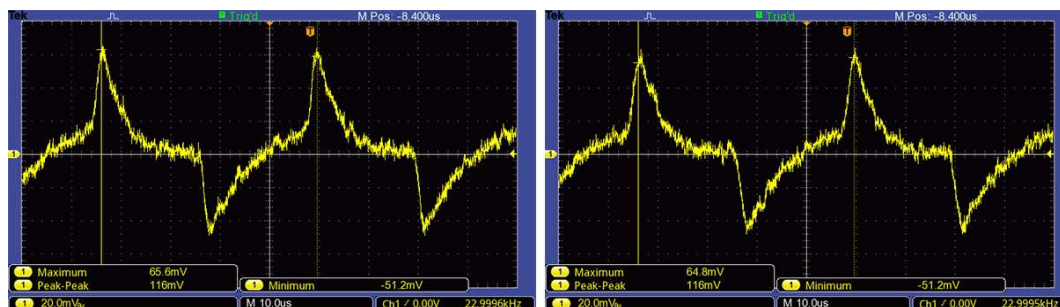
Napriek kontinuálnej úprave schémy zapojenia a obvodového riešenia sme dospeli k záveru, že riešenie s pasívnym filtrom pre odčlenenie prechytov nesúcich informáciu o fyzikálnej veličine nie je vhodné. Dôvodov je niekoľko, jedným z nich je pretrvávajúce nasuperponované signály neznámych frekvencií, ktoré skresľujú signál na spracovanie. Je veľmi náročné určiť, ktorý prechyt definuje špičku trojuholníkového signálu a ktorý definuje práve prechyt s informáciou o fyzikálnej veličine. Ďalším dôvodom je minimálna flexibilita výmeny MEMS v TEM CELL. Dospeli sme k názoru, že MEMS budeme nahrádzať inými MEMS tých istých rozmerov, avšak hlavnú konštrukciu budú tvoriť materiály rôznej pružnosti. To znamená, že vieme senzor použiť pre rôzne rozsahy pôsobiacej fyzikálnej veličiny. Napriek totožnému tvaru MEMS s určitou možnosťou môžeme povedať, že rezonančná frekvencia by sa v jednotlivých prípadoch líšila, čo by malo za následok nekompatibilitu s navrhnutým filtrom.

1.4.2 Kombinácia VCO s MEMS a VCO s impedančným prispôbením

Ako posledné riešenie, ktoré sme do práce zapracovali, je kombinácia dvoch paralelne zapojených VCO. Pokiaľ na jedno VCO zapojíme TEM CELL s MEMS a na druhé VCO zapojíme TEM CELL bez MEMS, pri totožnej schéme zapojenia dokážeme merané signály od seba odčítať a výstupom bude práve očakávaný priebeh zobrazený na Obr. 15. Aby sme túto úvahu zjednodušili, rozhodli sme sa overiť, či môžeme TEM CELL bez MEMS nahradiť za impedančné prispôbenie v podobe $50\ \Omega$ terminátora. Pre overenie sme vykonali dva merania: 1. s TEM CELL bez MEMS a 2. s $50\ \Omega$ terminátorom. Schéma zapojenia je zobrazená na Obr. 22. Výsledok oboch meraní je zobrazený na Obr. 23.



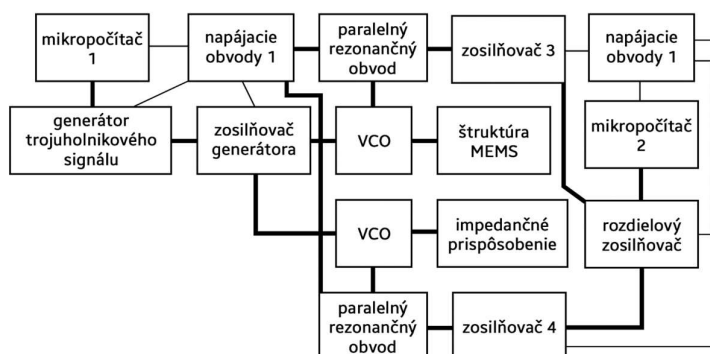
Obr. 22 Bloková schéma meracieho reťazca č. 1 s TEM CELL bez LC člena a meracieho reťazca č. 2 s $50\ \Omega$ terminátorom



Obr. 23 Priebehy na nPRO pri zapojení VCO s TEM CELL bez MEMS vľavo, pri zapojení VCO s $50\ \Omega$ terminátorom vpravo

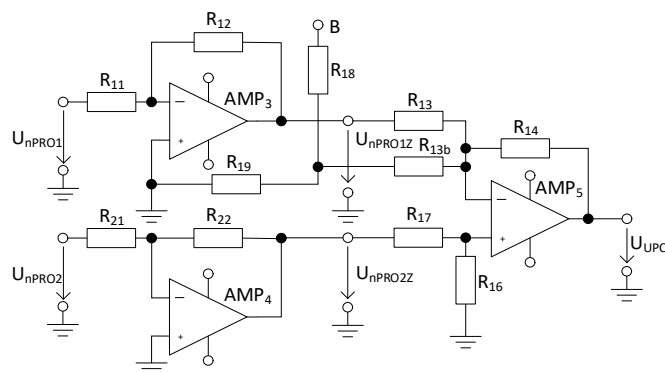
Na základe meraní môžeme konštatovať, že signál meraný na nPRO v prípade zapojenia VCO s TEM CELL bez LC člena (ďalej „signál 1“) je veľmi podobný signálu meranom na nPRO v prípade zapojenia VCO s $50\ \Omega$ terminátorom (ďalej „signál 2“). Aby sme informáciu pri procese odčítania nestratili, je potrebné signál 1 a signál 2 pred

procesom odčítania zosilniť. Tým docielime zvýraznenie prekmitu nesúceho informáciu o fyzikálnej veličine. Bloková schéma spomínaného zapojenia je zobrazená na Obr. 24.



Obr. 24 Bloková schéma kombinácie VCO s LC členom a VCO s impedančným prispôbením

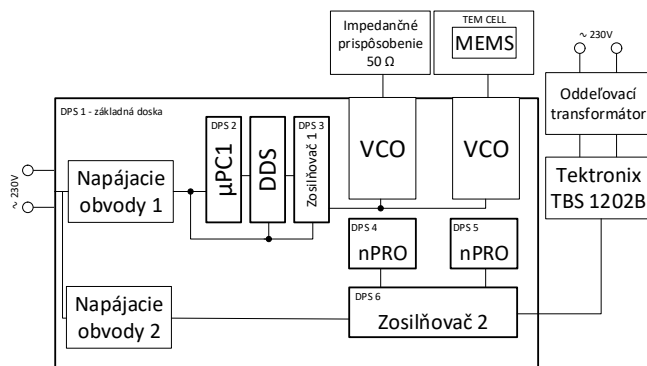
Prvou fázou návrhu meracích obvodov pri paralelnom zapojení VCO je návrh bloku zosilňovač 3 a zosilňovač 4. Tieto dva bloky budú identické, lebo ako signál 1, tak aj signál 2 je potrebné zosilniť rovnakým zosilnením. My sme si zvolili pre zosilnenie signálov 1 a 2 invertujúce zapojenie operačného zosilňovača. Následne je potrebné okrem odčítania signálov posunúť výsledný signál o zápornú napäťovú úroveň prekmitu nahor. To je možné zrealizovať doplnením napäťového deliča s paralelným vstupným odporom do diferenciálneho zosilňovača. Schéma zapojenia pre bloky „zosilňovač 3“, „zosilňovač 4“ a „rozdielový zosilňovač“ je potom nasledovná:



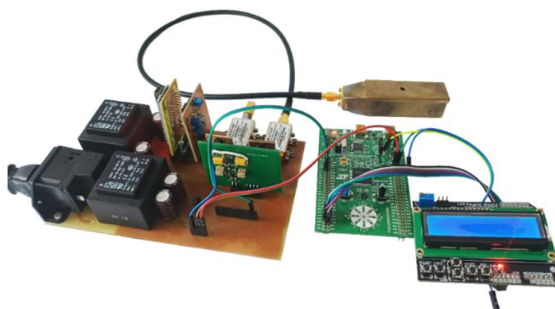
Obr. 25 Schéma zapojenia blokov „zosilňovač 3“, „zosilňovač 4“ a „rozdielový zosilňovač“

Detailný výpočet jednotlivých parametrov schémy zapojenia je predmetom dizertačnej práce. Testovanie samotného obvodu podľa blokovej schémy zapojenia

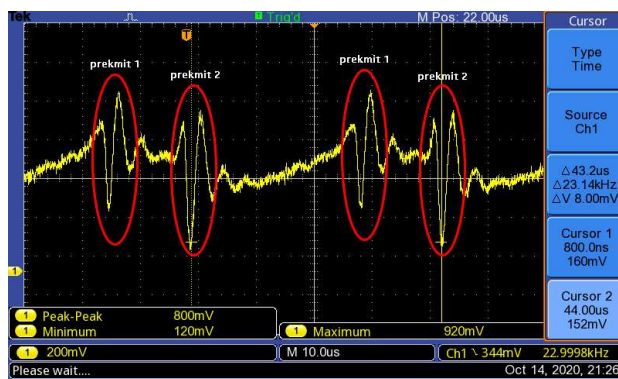
zobrazenej na Obr. 26 sme realizovali prostredníctvom modulárnych dosiek plošných spojov (DPS) a osciloskopu podľa blokovej schémy zobrazenej na Obr. 26. Vizualizácia obvodového riešenia je zobrazená na Obr. 27 a zmeraný signál prostredníctvom osciloskopu je zobrazený na Obr. 29.



Obr. 26 Bloková schéma zariadenia GEMERO LC



Obr. 27 Vizualizácia obvodového riešenia GEMERO LC



Obr. 28 Výstupný signál diferenciálneho zosilňovača, prekmity zvýraznené

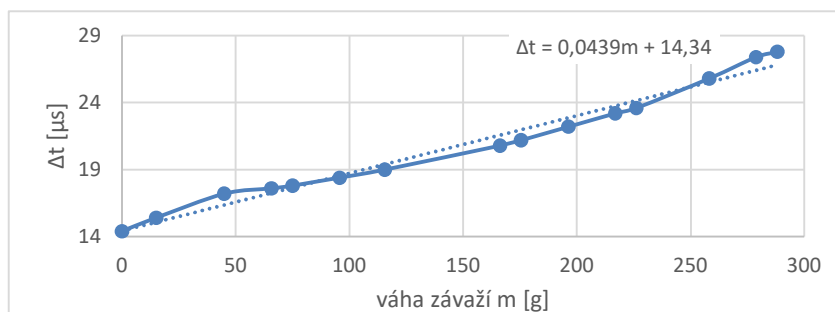
Ako môžeme vidieť na Obr. 28, výstupný signál diferenciálneho zosilňovača poskytuje zreteľne viditeľné prekmity nesúce informáciu o fyzikálnej veličine. Tvar krivky je veľmi blízky očakávanému tvaru krivky s premitmi zadefinovanom v úvode

kapitoly 1.3 na Obr. 15. Z Obr. 28 vyplýva, že prekmity sa pravidelne opakujú. Na základe tvaru krivky je evidentné, že prekmity zodpovedajú prekmitom s rovnakým označením na Obr. 17, avšak vzdialenosť medzi prekmitmi je menšia (v tomto prípade bola na LC člen vyvíjaná iná veľkosť pôsobiacej sily, z tohto dôvodu sa vzdialenosť odlišuje). Môžeme konštatovať, že tento signál je vhodný pre ďalšie spracovanie mikrokontrolérom.

Ďalšou úlohou pre definovanie veľkosti pôsobiacej veličiny na MEMS je vytvorenie grafu závislosti časovej zmeny medzi prekmitmi a pôsobiacej veličiny. Riešením realizácie spomínanej úlohy je opakované meranie podľa schémy Obr. 24 s umiestnením závaží rôznej váhy na MEMS. Použité závažia neboli certifikované. Boli vyrobené v miestnej dielni a ich hmotnosť bola overená meraniami na váhe s presnosťou 0,0001 g. Meranie závislosti hmotnosti od časovej zmeny medzi prekmitmi bolo realizované v laboratóriu pri izbovej teplote 25°C. Meraním vzdialenosti medzi minimami prekmitov prostredníctvom kurzorov osciloskopu získavame potrebné hodnoty časovej zmeny v závislosti od váhy závaží. Keď sa pozrieme na Obr. 28, kurzormi sme vyznačili opakujúci sa prekmít, čo dokazuje perióda 43,2 μ s. Medzi týmito dvoma prekmitmi je jeden prekmít, ktorý sa v závislosti od rezonančnej frekvencie MEMS posúva na časovej osi vľavo alebo vpravo. Z toho vyplýva, že existujú dve možnosti, ako môžeme časovú zmenu merať:

1. Od druhého referenčného prekmitu k presúvajúcejmu sa prekmitu
2. Od prvého referenčného prekmitu k presúvajúcejmu sa prekmitu

Je len na nás, ktorú z možností si zvolíme. Rozdiel bude spočívať len v prevodovej závislosti zmeny času od hmotnosti, ktorá v 1. prípade bude mať narastajúci charakter a v 2. prípade klesajúci. My sme sa rozhodli pre 1. možnosť merania, graf závislosti je zobrazený na Obr. 29.



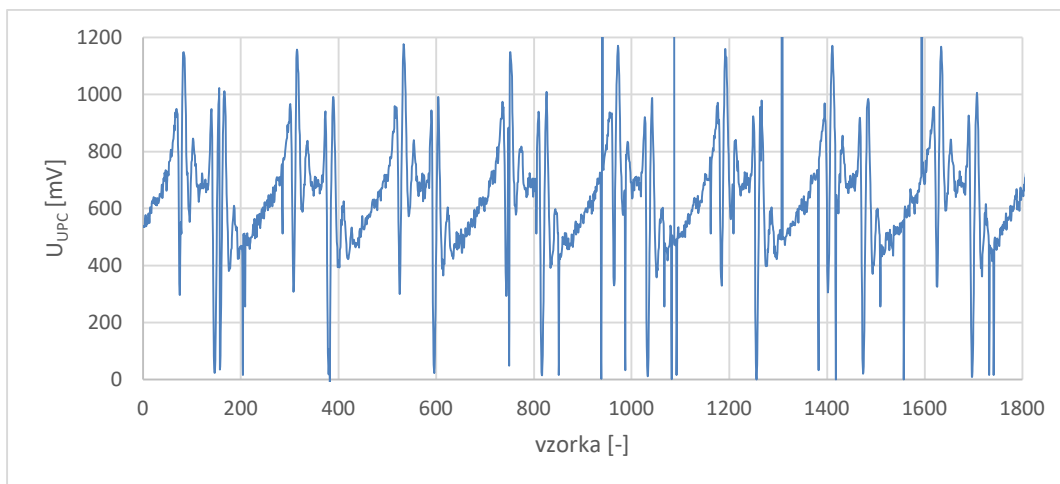
Obr. 29 Graf závislosti časovej zmeny medzi minimami prekmitov od váhy závaží (resp. gravitačnej sily závaží)

Práve meraním závislosti časovej zmeny medzi prekmitmi od závaží umiestnených na MEMS sme získali prevodovú charakteristiku, ktorá je definovaná trendovou lineárnou závislosťou $\Delta t = 0,0439m + 14,34$. Táto prevodová charakteristika je nutná pre dynamické spracovanie pôsobiacej fyzikálnej veličiny mikrokontrolérom. Meranie považujeme za korektné, avšak jeho presnosť a následné definovanie predpisu lineárnej závislosti je možné vylepšiť. Kurzory osciloskopu bolo možné posúvať len s krokom $2 \mu s$ a polohu kurzora ovplyvňoval ľudský faktor. V prípade opakovaného merania prostredníctvom mikrokontroléra je možné stanoviť lineárny predpis presnejšie a následne ho implementovať do programu k prevodu zmeny času medzi prekmitmi na veľkosť pôsobiacej fyzikálnej veličiny (v tomto prípade na veľkosť umiestnenej hmotnosti).

1.4.3 Spracovanie signálu s informáciou o neelektrickej fyzikálnej veličine

Testovaním, opakovaným návrhom, úpravou a doplnením obvodových riešení sme sa dostali do štádia, kedy môžeme upravený signál priviesť na vstupnú svorku vybraného mikrokontroléra STM32 F3 Discovery. Najrýchlejším spôsobom ako zaznamenať signál mikropočítačom je využitie DMA kontroléra (Direct Memory Access Controller). Vyplývajúc z názvu DMA umožňuje priamy prístup k pamäti mikropočítača. V praxi to znamená, že bez použitia procesora AD prevodník zapíše prednastavený počet vzoriek do pamäte mikropočítača. Práve „obchádzaním“ procesora mikrokontroléra je možné dosiahnuť rýchlosť mikrokontroléra STM32 F3 Discovery až 5 MSPS. Po výmene osciloskopu v schéme zobrazenej na Obr. 26 za mikropočítač sme signál navzorkovali do pamäte kontroléra.

Zapísaný priebeh sme prečítali prostredníctvom počítača a programového prostredia „STM32 ST-link utility“. Ten nám zobrazuje hodnoty napätia jednotlivých vzoriek v hexadecimálnom tvare. Pre vizuálne spracovanie signálu sme hodnoty skopírovali do prostredia Excel, kde jednoduchou úpravou sme hodnoty upravili do tvaru vhodného pre zostavenie grafu. Graf závislosti napätia od vzorky je zobrazený na Obr. 30.



Obr. 30 Graf závislosti napätia signálu od vzorky

Ako môžeme vidieť na Obr. 30, signál bol zaznamenaný v dostatočnej kvalite. Rýchlosť vzorkovania nami navrhnutého riešenia dokáže zachytiť prechyt v dostatočnej miere. Okrem potrebného signálu nám do merania vstupujú chyby merania spôsobené AD prevodníkom. Pre ďalšie spracovanie signálu je potrebné nevhodné vzorky zo súboru vylúčiť, respektíve ich pri vyhodnocovaní signálu nepoužívať ako referenčné. Prípadne zvoliť matematickú úpravu, pomocou ktorej budú chybné vzorky potlačené. Manuálnou úpravou súboru vzoriek (vylúčením vzoriek s vysokým rozdielom voči predchádzajúcej a nasledujúcej vzorke) a zmenšením súboru sme získali graf závislosti zobrazený na Obr. 31.



Obr. 31 Graf závislosti napätia od vzorky – upravený súbor dát

Pre vyhodnotenie signálu je potrebné nájsť dva prechyt s minimami veľmi blízkej hodnoty a medzi týmito dvoma minimami nájsť minimum ďalšieho prechytu. Toto

minimum bude nižšej napäťovej úrovne ako minimá predošlých dvoch prekmitov, určujúcich referenciu vzdialenosti. Pre zjednodušenie princípu vyhodnocovania si opäť označme jednotlivé prekmity. Minimum prvého prekmitu pri vzorke 308 ako prekmit 1. Minimum druhého prekmitu okolo vzorky 380 ako prekmit 2, minimum tretieho prekmitu okolo vzorky 525 za prekmit 3 a minimum prekmitu okolo vzorky 596 ako prekmit 4. Prekmit 2 a prekmit 4 predstavujú referenciu. Počet vzoriek medzi týmito dvoma minimami predstavuje frekvenciu riadiaceho signálu VCO 23 kHz $((596-380) / 5000000 \text{ SPS} = 43,3 \text{ } \mu\text{s})$. Podobným spôsobom vieme vypočítať časové oneskorenie medzi prekmitom 4 a prekmitom 3 $((596-525) / 5000000 \text{ SPS} = 14,2 \text{ } \mu\text{s})$. Úpravou predpisu z predošlej kapitoly: $\Delta t = 0,0439m + 14,34$, vieme vypočítať hmotnosť, ktorá na LC člen pôsobí.

$$m = \frac{\Delta t - 14,34}{0,0439} [g] \quad 2.7$$

V tomto prípade LC člen nebol zaťažný, z toho vyplýva, že dosadením hodnôt by mal byť výsledok nulový, respektíve blízky nule. Avšak už z tvaru rovnice je evidentné, že šírka časovej zmeny Δt by pri nulovej záťaži mala byť rovná 14,34 μs a nie 14,2 μs . Rozdiel týchto dvoch hodnôt je spôsobený nepresnosťou merania závislosti zmeny času Δt od váhy závažia m , na základe ktorej sme zostavili predpis konverzie časovej zmeny na váhu závažia. Avšak môžeme konštatovať, že hodnoty sú veľmi blízke a presnosť merania by sme vedeli kumulovať kalibráciou a zostavením predpisu konverzie v certifikovanom inštitúte. Riešením kalibrácie by bolo hľadanie takého predpisu, ktorého pri nulovom zaťažení závaží výsledná hodnota zodpovedá práve nule.

Záver

Cieľom tejto dizertačnej práce bolo oboznámenie sa s rôznymi metódami na meranie fyzikálnych veličín a následný návrh novej metódy na meranie fyzikálnych veličín. Dôraz práce bol kladený na štúdium metódy snímania fyzikálnych veličín prostredníctvom snímača MEMS s implementovaným paralelným LC obvodom. Táto metóda bola vyvinutá na Ústave elektrotechniky FEI STU, na rovnakom pracovisku bola taktiež realizovaná predmetná dizertačná práca. Postup návrhu a realizácie jednotlivých míľnikov snímača je bližšie opísaný v podkapitolách dizertačnej práce.

Prvé strany dizertačnej práce sú venované štúdiu snímačov na snímanie neelektrických veličín a trendom v oblasti snímačov MEMS. Tie zatiaľ nedosiahli svoje limity v oblasti výskumu a vývoja nových snímačov. Ako potencionálne použiteľný princíp pre snímanie neelektrických veličín prostredníctvom MEMS sme považovali princíp fungovania RFID. Z tohto dôvodu sa v teoretickej analýze zaoberáme aj RFID systémami. Na základe dostupných informácií o MEMS, ktorú v práci využívame, sme vedeli o potrebe žiariča s homogénnym elektromagnetickým poľom. Jednou z možností je transverzálna elektromagnetická bunka (ďalej TEM CELL), ktorej detailný popis a princíp fungovania je taktiež súčasťou teoretickej analýzy.

Po získaní dostatočného množstva informácií sa práca zaoberá stanovením téz dizertačnej práce. Následne sa práca zaoberá ich riešením. Ako prvé sme sa snažili vyriešiť otázku generovania homogénneho elektromagnetického poľa. Tento problém sme riešili návrhom TEM CELL. Analyticky návrh TEM CELL, stanovenie jej rozmerov, hodnôt impedančných prvkov, numerická simulácia v prostredí CAD FEKO a výsledky meraní na skonštruovanom exemplári sú len zlomok kapitoly zaoberajúcej sa TEM CELL. Súčasťou kapitoly je aj chronologická optimalizácia jednotlivých rozmerov, zmena tvaru žiariča, doplnenie impedančných záťaží za účelom vylepšenia charakteristických vlastností TEM CELL. Výstupom je TEM CELL s charakteristikou impedanciou okolo $47,5 \Omega$ a VSWR v rozpätí 1,095 až 1,165 vo frekvenčnom pásme 100 – 170 MHz.

Na základe meraní charakteristických vlastností TEM CELL s LC členom sme kontinuálne pokračovali v analytickom riešení snímača. Aby sme naplnili úvahu o prevedení rozložených parametrov do spojitaj oblasti, ktorú sme si v tézach stanovili, bolo potrebné hľadať takú funkciu, ktorá by definovala tvar krivky, ktorú sme namerali.

Tento cieľ sme naplnili experimentálnou metódou použitím lomenej funkcie pre návrh filtrov. Na základe získaného predpisu funkcie sme prostredníctvom prostredia Wolfram Mathematica upravili tvar funkcie na tvar zloženej funkcie z viacerých rezonančných prvkov. Podarilo sa nám definovať zapojenie pasívnych prvkov, ktorých prevodová charakteristika bola totožná s nameranou charakteristikou TEM CELL s MEMS. Tým sme si pripravili základ pre analýzu nízkofrekvenčnej oblasti snímača, keďže práve komplikovanú vysokofrekvenčnú oblasť definovanú rozloženými parametrami sme previedli do spojitnej oblasti.

Náhradnú schému TEM CELL s LC členom sme použitím pasívnych prvkov skonštruovali v prostredí NI Multisim. Aby sme v nízkofrekvenčnej oblasti našli miesto, kde je možné informáciu o zmene pôsobenia fyzikálnej veličiny spracovať, bolo potrebné analyzovať obvod pripojený k TEM CELL s LC členom. Keďže konštrukcia VCO nám nebola známa, experimentálnou metódou sme overovali použiteľnosť jednotlivých modelov. Na základe výsledkov sme usúdili, že informácia o zmene pôsobenia fyzikálnej veličiny sa prenáša na napájaciu svorku VCO, kde je relatívne jednoduché túto informáciu zachytiť a ďalej spracovať. Na prvý pohľad jednoduché riešenie si vyžadovalo komplexnejšiu expertízu, najmä v oblasti závislosti riadiaceho signálu VCO, požadovanej dĺžky a napät'ovej úrovne prekmitu pre ďalšie spracovanie mikrokontrolérom. Ako najlepšie riešenie sme vybrali kombináciu mikrokontroléra STM32 F3 Discovery so vzorkovacou frekvenciou 5 MSPS, na základe ktorej sme nastavili riadiaci signál VCO na 23kHz a jeho tvar sme si zvolili trojuholníkový. Ďalším osvedčeným riešením sa nám ukázalo snímať informáciu na paralelnom LC obvode, ktorý bol navrhnutý na frekvenciu prekmitu. V závere tretej tézy sme už mali k dispozícii nízkofrekvenčný signál nesúci informáciu o zmene pôsobiacej fyzikálnej veličiny.

Nad'alej bolo potrebné navrhnuť také obvodové riešenie, ktoré dokáže upraviť signál na parametre požadované mikrokontrolérom. Základným problémom je miesto, kde signál snímame. Keďže ho snímame na napájacej svorke VCO, pre jeho snímanie je potrebné vytvoriť novú napät'ovú referenciu. To si však vyžaduje galvanické oddelenie. Riešenie s optickým snímačom sa zdalo byť vhodným riešením, avšak súčasné vlastnosti optočlenov neumožňujú použitie v našej aplikácii. Z tohto dôvodu sme sa rozhodli ponechať testovací model (riadenie VCO prostredníctvom mikrokontroléra Arduino Nano a snímanie signálu prostredníctvom STM32 F3 Discovery) a snažili sme sa zamerať už len na úpravu signálu pre vstupnú svorku

mikrokontroléra. Úvaha o odfiltrovaní všetkých nežiadúcich frekvencií nasuperponovaných na signály s informáciou sa zdala jednoduchá a funkčná. Filter sme navrhovali v prostredí Ansys Electronics 2017. V prostredí NI Multisim sme generovali reálny signál (zosnímaný osciloskopom) a simulovali sme filtráciu filtrom navrhnutým Ansysom. Žiaľ ako sa ukázalo, toto sympatické, jednoduché riešenie našej aplikácií nevyhovovalo. Hlavným dôvodom bolo množstvo nasuperponovaných neznámych frekvencií a obmedzenie pre výmenu MEMS.

V závere sa nám podarilo nájsť také riešenie spracovania signálu s informáciou o fyzikálnej veličine, ktoré umožňuje MEMS meniť a zároveň upravuje signál na tvar a napäťovú úroveň vhodnú pre mikrokontrolér. Toto riešenie zahŕňa kombináciu dvoch VCO, pričom jedno VCO je zakončené impedančným prispôsobením veľkosti $50\ \Omega$ a na druhom VCO je pripojená TEM CELL s LC členom. Invertujúcimi zosilňovačmi a následným odčítaním signálov sme získali evidentne viditeľné prekmity v napäťovom rozsahu 800 mV.

Tézy dizertačnej práce sme naplnili, avšak my sme sa rozhodli pokračovať v návrhu systému na spracovanie a vyhodnocovanie signálu – programové riešenie mikrokontroléra. Vytvorením základného programu sme získali dátový súbor, ktorý nám poskytol reálny súbor hodnôt napätia jednotlivých zosnímaných vzoriek. Našli sme priestor pre ďalší výskum v oblasti spracovania dát („data processing“). V dátovom súbore sme okrem hodnôt definujúcich napäťovú úroveň signálu našli aj chyby merania spôsobené AD prevodníkom. Ten v niekoľkých prípadoch zaznamenal maximálnu hodnotu AD prevodníka. Je teda potrebné nájsť taký algoritmus, ktorý dôkladne prešetrí dátový súbor, nevyhovujúce vzorky zaeviduje a pri vyhodnocovaní ich bude ignorovať.

Výstupom dizertačnej práce je snímač neelektrických veličín schopný generovať vysokofrekvenčný signál vhodný pre napájanie TEM CELL s LC členom a schopný snímať a vyhodnocovať informáciu o fyzikálnej veličine v nízko-frekvenčnej oblasti snímača. Práca prináša niekoľko inovácií v oblasti meracej techniky s odôvodnením a pomenovaním problémov, riešení. Tvrdenia sú podložené výpočtami v teoretickej rovine, ako aj meraniami v rovine praktickej.

Literatúra

[1]

- [2] **Brookes, James.** Azo materials. [Online] 15. 5 2015. [Dátum: 4. 12 2019.] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12035>.
- [3] **Šturcel, Ján.** *Snímače a prevodníky*. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2002. s. 262. ISBN 80-227-1712-6.
- [4] *Senzory pre meranie elektromagnetického poľa.* **Hart'anský, René a Hallon, Jozef.** Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2016. ISBN 978-80-227-4565-9.
- [5] **Nie, Baoqing, a iní.** *A droplet-based passive force sensor for remote tactile sensing applications*. s.l. : American Institute of Physics, 15. január 2018.
- [6] **Nakazato, Yuichi a al., et.** Development of Peristaltically Propelled Active Catheter Used in Radial Artery. *Mechanisms and Machine Science: Microactuators and micromechanisms*. 2017, 45, s. 79-90.
- [7] **Libelium.** E-Health: Low Cost Sensors for Early Detection of Childhood Disease. *Libelium*. [Online] 14. február 2014. [Dátum: 07. február 2020.] <http://www.libelium.com/e-health-low-cost-sensors-for-early-detection-of-childhood-disease-inspire-project-hope/#!/prettyPhoto>.
- [8] **Howell, Larry L., Magleby, Spencer P. a Olsen, Brian M.** *Handbook of Compliant Mechanisms*. s.l. : John Wiley & Sons Ltd., 2013. s. 342. ISBN: 978-1-119-95345-6.
- [9] **Wei, Junyang, a iní.** Design and experimental evaluation of a compliant mechanism-based stepping-motion actuator with multi-mode. 2018, *Zv.* 27, 10.
- [10] **Kumar, Kaushik, a iní.** *Micro and Nano Machining of Engineering Materials*. s.l. : Springer International Publishing, 2019. ISBN 978-3-319-99899-2.
- [11] **Lu, Haojian, a iní.** Nanorobotic System for Precise In Situ Three-Dimensional Manufacture of Helical Microstructures. 2018, *Zv.* 3, 4, s. 2846-2853.
- [12] **Plander, Ivan a Stepanovsky, Michal.** Interdisciplinary considerations on the design of MEMS actuators from a perspective of their optimality. 2017, *Zv.* 269, s. 203-211.

- [13] **PRIME Faraday partnership.** *An Introduction to MEMS.* Loughborough : Loughborough University, 2002. ISBN 1-84402-020-7.
- [14] **Jackson, Roderick, a iní.** Opportunities for Energy Efficiency. s.l. : OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2015. ORNL/ TM-2015/5.
- [15] **Lant, Karla.** Stanford Scientists Are Making Wireless Electricity Transmission a Reality. *futurism.com*. [Online] 16. jún 2017. [Dátum: 5. február 2020.] <https://futurism.com/stanford-scientists-are-making-wireless-electricity-transmission-a-reality>.
- [16] **Armstrong, Shain.** Which RFID Frequency is Right for Your Application? [Online] 29. október 2012. [Dátum: 14. január 2020.] <https://blog.atlasrfidstore.com/which-rfid-frequency-is-right-for-your-application>.
- [17] **Parker, Simon.** RFID journal. *The Differences Between RFID and RTLS.* [Online] 07. december 2017. [Dátum: 14. január 2020.] <https://www.rfidjournal.com/articles/view?16948>.
- [18] **GS1 Slovakia.** Tagy. [Online] [Dátum: 3. Január 2020.] <https://www.gs1sk.org/?page=radiofrekvencny-tag>.
- [19] **components101.** Introduction to RFID Modules – Construction, Types and Working. [Online] [Dátum: 3. január 2020.] <https://components101.com/index.php/articles/introduction-rfid-modules-construction-types-and-working>.
- [20] **Microchip.** microID® 125 kHz RFID System Design Guide. [Online] [Dátum: 3. január 2020.] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/51115f.pdf>.
- [21] **Hart'anský, René.** *Ročná správa o riešení projektu za rok 2018.* 2018. APVV-14-0076.
- [22] **Maršálka, Lukáš.** Bezkontaktné meranie malých vzdialeností. Bratislava : s.n., 2013. FEI-10838-8037.
- [23] **Vimpeľ, Marek.** Vyhodnocovacie zariadenie pre MEMS snímač síl. Bratislava : s.n., 2018. FEI-104356-72580.
- [24] **Elektronics-tutorials.** Hall Effect Sensor. [Online] [Dátum: 8. január 2020.] <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>.

- [25] **Collier, Richard a Skinner, Doug.** *Microwave Measurements*. London, United Kingdom : The Institution of Engineering and Technology, 2007. s. 504. ISBN: 9780863417351.
- [26] *Analysis of Possible Short Length Measurement Using*. **Maršálka, Lukáš a Hart'anský, René.** Smolenice : s.n., 2011. Measurement 2011 : Proceedings. 8th International. s. 241-244. ISBN 978-80-969-672-4-7.
- [27] **Dvořáček, Jaroslav a kol., a.** *Vysokofrekvenčná technika*. s.l. : Alfa Bratislava, 1963. s. 365.
- [28] *Numerical modelling of sensor structure based on change of electromagnetic field parameters*. **Maršálka, Lukáš a Hart'anský, René.** Bratislava : s.n., 2013.
- [29] **Maciej, Jaroszewski, Sabu, Thomas a Ajay, Rane V.** *Advanced materials for electromagnetic shielding*. s.l. : John Wiley & Sons, Inc., 2019. ISBN: 978-1-119-12861-8.
- [30] **Fischer, Joseph F.** *Transverse electromagnetic cell*. 5,436,603 USA, 27. september 1993.
- [31] **Microwaves101.** Voltage standing wave ratio (VSWR). [Online] [Dátum: 5. február 2020.] <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/voltage-standing-wave-ratio-vswr>.
- [32] *Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells*. **Crawford, Myron L.** 16, s.l. : IEEE, 1974, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Zv. EMC, s. 189-195.
- [33] **Minhang, Bao.** *Analysis and Design Principles of MEMS Devices*,. s.l. : Elsevier Science, 2005. ISBN 9780080455624.
- [34] **Waveguide Modes.** *DAEnotes*. [Online] [Dátum: 08. február 2020.] <https://www.daenotes.com/electronics/microwave-radar/waveguide-modes-of-signal-propagation>.
- [35] **Hart'anský R., Dzuriš M.** Network analyzer calibration problem. *Techničeskije universitety: integracija s evropejskimi i mirovymi sistemami obrazovanija: materialy VIII meždunarodnoj konferencii, Rossija, Iževsk*. 23. - 24.. august 2019, s. 365-369.

- [36] **Ondráček, Oldřich.** *Signály a systavy.* s.l. : STU Bratislava, 2008. s. 341. ISBN 9788022729567.
- [37] **Electronics tutorials.** *Parallel RLC Circuit Analysis.* [Online] [Dátum: 6. marec 2021.] <https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/parallel-circuit.html>.
- [38] **Navy, Bureau of Personnel.** US. *Principles of Naval Ordnance & Gunnery.* 1959. ASIN B00GV01EV2.
- [39] *A comparative study between Class-C and Class-B quadrature voltage-controlled power oscillator for multi-standard applications.* Mansour, Marwa, a iní. 98, s.l. : Elsevier, 2020, Microelectronics Journal. ISSN 0026-2692.
- [40] **What is inside a General Purpose Operational Amplifier.** *StackExchange.* [Online] [Dátum: 13. marec 2021.] <https://electronics.stackexchange.com/questions/309912/what-is-inside-a-general-purpose-operational-amplifier>.
- [41] **Šudák, Karel.** Rozdelenie zosilňovačov podľa triedy (A, AB, D, G, H). *ahifi.* [Online] [Dátum: 13. marec 2021.] <https://www.ahifi.sk/clanky/detail/rozdelenie-zosilnovacov-podla-triedy-a-ab-d-g-h.htm>.
- [42] **Common Emitter Amplifier.** *ElectronicsTutorials.* [Online] [Dátum: 13. marec 2021.] https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amp_2.html.
- [43] **Watt Class B Amplifier.** *redcircuits.com.* [Online] [Dátum: 13. marec 2021.] <http://www.redcircuits.com/Page150.htm>.
- [44] **sharma, Ajay Di.** Class AB amplifier. *MPstudy.* [Online] [Dátum: 13. marec 2021.] <https://www.mpstudy.com/class-ab-amplifier/5/>.
- [45] **Class C power amplifier.** *CircuitToday.* [Online] [Dátum: 13. marec 2021.] <https://www.circuitstoday.com/class-c-power-amplifier>.
- [46] **Mini-Circuits.** [Online] [Dátum: 22. október 2020.] <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZX95-200+.pdf>.
- [47] **st.com.** *Datasheet STM32F3 series.* [Online] [Dátum: 7. marec 2021.] https://www.st.com/content/ccc/resource/sales_and_marketing/promotional_material/brochure/fa/7d/6f/b6/8e/c5/4e/b1/brstm32f3.pdf/files/brstm32f3.pdf/jcr:content/translations/en.brstm32f3.pdf.

- [48] **Devices, Analog.** Katalógový list AD9833. [Online] [Dátum: 21. október 2020.]
<https://cdn.sos.sk/productdata/bc/87/ee24b14e/ad-9833-brmz.pdf>.
- [49] **Radiolocman.** *Datasheet LF411CN - National Semiconductor OP AMP, JFET LOW OFFSET, DIP8, 411.* [Online] [Dátum: 27. október 2020.]
<https://www.radiolocman.com/datasheet/data.html?di=43869&/LF411CN>.
- [50] **broadcom.com.** [Online] [Dátum: 16. november 2020.]
<https://docs.broadcom.com/doc/AV02-1289EN>.
- [51] **Analog Devices.** [Online] [Dátum: 02. december 2020.]
https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4895-1_4895-2.pdf.
- [52] **Vishay.** [Online] [Dátum: 22. október 2020.]
<https://www.vishay.com/docs/88661/mb2s.pdf>.
- [53] **ON Semiconductor.** [Online] [Dátum: 22. október 2020.]
<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC78M00-D.PDF>.
- [54] **STMicroelectronics.** Datasheet STM32F3 series. *ST.com.* [Online] [Dátum: 13. marec 2021.]
https://www.st.com/content/ccc/resource/sales_and_marketing/promotional_material/brochure/fa/7d/6f/b6/8e/c5/4e/b1/brstm32f3.pdf/files/brstm32f3.pdf/jcr:content/translations/en.brstm32f3.pdf.

Zoznam publikácií autora

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- ADC01 JANČÁRIK, Vladimír - HARŤANSKÝ, René - SLÍŽIK, Jozef - MIERKA, Martin - HALGOŠ, Ján - HALLON, Jozef - HRICKO, Jaroslav. Autonomous sensor of electromagnetic field. In *Review of Scientific Instruments*. Vol. 90, Iss. 6 (2019), Art.No. 64705. ISSN 0034-6748 (2018: 1.587 - IF, Q3 - JCR Best Q, 0.659 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000474601100031 ; SCOPUS: 2-s2.0-85068196237.

ADD Vedecké práce v domácich karentovaných časopisoch

- ADD01 HARŤANSKÝ, René - MIERKA, Martin - BITTERA, Mikuláš - HALLON, Jozef - HALGOŠ, Ján - HRICKO, Jaroslav - ANDOK, Robert - RAFAJ, Michal. Novel method of contactless sensing of mechanical quantities. In *Measurement Science Review [elektronický zdroj]*. Vol. 20, no. 3 (2020), s. 150-156. ISSN 1335-8871 (2019: 0.900 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.326 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000555887000006 ; SCOPUS: 2-s2.0-85091461532.

ADM Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

- ADM01 HARŤANSKÝ, René - HRICKO, Jaroslav - MIERKA, Martin - HALGOŠ, Ján - DZURIŠ, Michal. MEMS sensor of force. In *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*. Vol. 16, No. 1 (2020), s. 85-92. ISSN 2658-5324 (2019: 0.290 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.20537/nd200107 ; SCOPUS: 2-s2.0-85084461337.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 HARŤANSKÝ, René - MIERKA, Martin - VIMPEL, Marek. Yagi-ude antenna as WiFi electromagnetic source. In *Annals of DAAAM International Week 2016 [elektronický zdroj] : 27th International symposium intelligent manufacturing and automation. Mostar, Bosnia and Herzegovina. October 23-30, 2016*. Vol. 27, No. 1 (2016), CD-ROM [4] s. ISSN 2304-1382.
- AFC02 HARŤANSKÝ, René - HALGOŠ, Ján - MIERKA, Martin. TEM cell design. In *EMD 2017 : 24th International conference on electromagnetic disturbances. Białystok, Poland. September 20-22, 2017*. Białystok : University of Technology, 2017, S. 41-42. ISBN 978-83-65596-28-4.

- AFC03 HARŤANSKÝ, René - MIERKA, Martin. New method of one-component force measurement. In *Technické univerzity: integrácia s evropskými i svetovými systémami vzdelávania : materiály VIII Medzinárodnej konferencie, Rusko, Iževsk, 23. - 24. 04. 2019. Tom 1* = Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования, материалы VIII Междунар. конф. (Россия, Ижевск, 23–24 апреля 2019 г.). 1. vyd. Iževsk : Izdatel'stvo IžGTU imeni M.T.Kalašnikova, 2019, S. 376-380. ISBN 978-5-7526-0832-2 (T.1.).

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 HARŤANSKÝ, René - HALGOŠ, Ján - MIERKA, Martin. Developed of TEM cell design. In *Electro-mechanical systems application in industry 2017 : Zliechov, Slovakia. August 30-September 1, 2017*. 1.vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2017, S. 29-34. ISBN 978-80-227-4753-0.
- AFD02 HARŤANSKÝ, René - MIERKA, Martin. A new method of measuring the physical quantities. In *Measurement 2019 : 12th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia, May 27-29, 2019*. Bratislava : Slovak academy of sciences, 2019, S. 266-269. ISBN 978-80-972629-3-8. V databáze: IEEE: 8779951.
- AFD03 KAMENSKÝ, Miroslav - KRÁLIKOVÁ, Eva - ČERVEŇOVÁ, Jozefa - MIERKA, Martin. Modular education system of remote access applications employed for filter response measurement. In *Measurement 2019 : 12th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia, May 27-29, 2019*. Bratislava : Slovak academy of sciences, 2019, S. 258-261. ISBN 978-80-972629-3-8. V databáze: IEEE: 8779972 ; WOS: 000502830700057.
- AFD04 MIERKA, Martin - HARŤANSKÝ, René. Study equipment with power elements based on half controlled rectifier. In *Electro-mechanical systems application in industry 2017 : Zliechov, Slovakia. August 30-September 1, 2017*. 1.vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2017, S. 55-58. ISBN 978-80-227-4753-0.
- AFD05 MIERKA, Martin. Controlling an alternating power source with commercial microcontroller. In *Electro-mechanical systems application in industry 2018 : Zliechov, Slovakia. August 28-31, 2018*. 1.vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, S. 57-62. ISBN 978-80-227-4870-4.
- AFD06 MIERKA, Martin. Realization of a TEM cell. In *Measurement 2019 : 12th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia, May 27-29, 2019*. Bratislava : Slovak academy of sciences, 2019, S. 162-166. ISBN 978-80-972629-3-8. V databáze: IEEE: 8779907.

AFD07 MIERKA, Martin - HARTÁNSKÝ, René. Minimalization of a TEM CELL. In *Measurement 2021 : 13th International conference on measurement. Smolenice, Slovakia, May 17-19, 2021*. Bratislava : Slovak academy of sciences, 2021, S. 228-231. ISBN 978-80-972629-4-5.

BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

BEE01 MIERKA, Martin. Design and construction of half controlled rectifier. In *Fifth forum of young researchers : Izhevsk, Russia. February 22, 2017*. Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2017, S. 75-79. ISBN 978-5-7526-0753-0.

BEF Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

BEF01 VIMPEL, Marek - MIERKA, Martin. Návrh diódového detektora pre MEMS snímač sily. In *MEMS application in industry 2016 : Zuberec, Slovakia. November 23 - 25, 2016*. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2016, S. 27-30. ISBN 978-80-227-4648-9.

Summary

The aim of this dissertation was to get acquainted with various methods for measuring physical quantities and the subsequent design of new methods for measuring physical quantities. Emphasis was placed on the study of methods for sensing physical quantities using a MEMS sensor with implemented parallel LC circuit.

The first pages of the dissertation are devoted to the study of sensors for sensing non-electrical quantities and trends in the field of MEMS sensors. After obtaining a sufficient amount of information, the work deals with the determination of the dissertation. First, we tried to solve the issue of generating a homogeneous electromagnetic field. We solved this problem with the TEM CELL proposal. Analytical design of TEM CELL, determination of its dimensions, values of impedance elements, numerical simulation in CAD FEKO environment and results of measurements on the constructed example are only fractions of chapters dealing with TEM CELL. The output is a TEM CELL with a characteristic impedance of about 47.5Ω and a VSWR in the range of 1,095 to 1,165 in the frequency band 100 - 170 MHz.

Based on the measurements of the characteristic properties of TEM CELL with an LC member, we continuously continued the analytical solution of the sensor. We managed to define the connection of passive elements, whose transmission characteristic was the same as the measured characteristic of TEM CELL with MEMS. We built the passive connection in NI Multisim environment, in order to find a place in the low-frequency domain where it is possible to process information about the change in the action of a physical quantity. Because the construction of the VCO was not known to us, we verified the applicability of individual models by an experimental method. By constructing replace scheme of VCO with LC circuit in NI Multisim, we concluded that the information about the change in the action of a physical quantity is transmitted to the VCO supply terminal. At this point it is simple enough to capture and further process this information. The final pages of the thesis are dealing with the design of measuring circuitry and programming the microcontrollers.