



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky**

Tištěné RC a RLC obvody

Inkjet printed RC and RLC circuits

Bakalářská práce

Studijní program: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Laposá

Dalibor Dobeš

Praha 2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dobeš** Jméno: **Dalibor** Osobní číslo: **466265**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Tištěné RC a RLC obvody

Název bakalářské práce anglicky:

Inkjet printed RC and RLC circuits

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši na téma tištěné pasivní elektronické součástky (zaměřte se zejména na technologii inkjet).
2. Navrhněte technologický postup výroby základních typů pasivních součástek a použijte jej pro realizaci sady RC a RLC obvodů.
3. Experimentálně připravené elektronické obvody charakterizujte.
4. Dosažené výsledky vyhodnoťte, porovnejte s výsledky udávanými v literatuře a diskutujte další postup.

Seznam doporučené literatury:

- [1] W. Zapka, Ed., Handbook of Industrial Inkjet Printing. 2017, ISBN 9783527687169.
- [2] B. J. Kang, C. K. Lee, and J. H. Oh, "All-inkjet-printed electrical components and circuit fabrication on a plastic substrate," Microelectron. Eng., vol. 97, no. 4023, pp. 251–254, 2012.
- [3] G. Ashebir, S. Zambou, U. Männl, R. Setshedi, M. Härtling, and D. T. Britton, "Fully screen printed LRC resonant circuit," Microelectron. Eng., vol. 162, pp. 6–11, 2016.
- [4] V. Correia et al., "Design and fabrication of multilayer inkjet-printed passive components for printed electronics circuit development," J. Manuf. Process., vol. 31, pp. 364–371, 2018.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Alexandr Lapos, katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **08.02.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Alexandr Lapos
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

iii

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 13.3.2019

.....

Dalibor Dobeš

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Alexandru Laposovi za věnování svého času ohledně konzultací a práci v laboratoři. Dále musím poděkovat Bc. Vojtěchu Povolnému za výpomoc s obsluhou materiálové tiskárny a v neposlední řadě své rodině, která mi byla vždy oporou.

Abstrakt

Tato práce se zabývá tiskem pasivních elektronických součástek pomocí inkjet technologie na ohebnou PET fólii. Po teoretickém úvodu a seznámením se s touto technologií bylo natištěno několik typů jednotlivých součástek, a to konkrétně rezistor, kondenzátor a induktor. Z jednotlivých navržených součástek byly natištěny RC a RLC obvody a následně charakterizovány. Na základě dosažených výsledků byl navržen postup pro další optimalizaci.

Klíčová slova: tištěná elektronika, Inkjet, PET fólie, pasivní součástky, RC a RLC obvody

Abstract

This thesis deals with printing of passive electronic components using inkjet technology on flexible PET foil. After the theoretical introduction and familiarization with this technology, several types of individual components were printed, namely a resistor, a capacitor and an inductor. RC and RLC circuits were printed from individual components and then characterized. Based on achieved results, an optimization process has been proposed.

Key words: printed electronics, Inkjet, PET foil, passive components, RC and RLC circuits

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Cíle práce	2
1.2 Tištěná elektronika	3
1.2.1 Technologie Inkjet	3
1.2.2 Výhody a Nevýhody Inkjet	5
1.2.3 Tiskárna Dimatix	6
2 Pasivní elektronické součástky	7
2.1 Rezistor	7
2.2 Kondenzátor	9
2.3 Induktor	11
3 RC a RLC obvody	15
3.1 RC obvod	15
3.2 RLC obvod	17
4 Praktická část	19
4.1 Příprava před tiskem	19
4.2 Návrh motivů	25
4.3 Tisk pasivních součástek	26
4.3.1 Rezistor	28
4.3.2 Kondenzátor	33
4.3.3 Induktor	36
4.4 RC obvod	39
4.5 RLC obvod	44
4.6 Návrh optimalizace	48
5 Závěr	49
A Příloha	55
A.1 Vybavení laboratoře	55
A.2 Experimenty	59
A.3 Ukázky natištěných struktur	61

Seznam obrázků

1	Ukázka Roll-to-roll, převzato z [3]	3
2	Úprava povrchu za použití plasmu, upraveno z [5]	4
3	Změna struktury částic stříbra při spékání, převzato z [7]	5
4	Tiskárna dimatix DMP 2831, převzato z [8]	6
5	Závislost odporu na délce a počtu vrstev, převzato z [10]	8
6	Závislost plošného odporu na teplotě a době, převzato z [11]	9
7	Postup tisku MIM kondenzátoru, upraveno z [11]	10
8	Interdigitální kondenzátor	11
9	Meandrový induktor	12
10	Tištěný induktor, upraveno z [12]	13
11	Zapojení a) integračního b) derivačního článku	15
12	Kmitočtová charakteristika DP, upraveno z [9]	16
13	Zapojení a) SRO b) PRO	17
14	Rezonanční křivka PRO, upraveno z [15]	18
15	Tiskárna Dimatix v laboratoři	19
16	Umísťovací hlava a samotná cartridge s ANP Silverjet	20
17	Drop watcher pro sledování kapek 1	22
18	Drop watcher pro sledování kapek 2	22
19	Waveform editor pro nastavení průběhu dávkování	23
20	Nastavení cartridge	24
21	Okno orientační kamery	24
22	Návrhový software CleWin	25
23	První vrstva	26
24	Druhá vrstva posunutá dolů	27
25	Třetí vrstva posunutá nahoru	27
26	Okno se základními parametry tisku před jeho zahájením	28
27	Lineární rezistory sada 1 a sada 2	29
28	Lineární rezistory sada 1 a sada 2, verze 1.	30
29	Lineární rezistory sada 1 a sada 2, verze 2.	31
30	Meandrový rezistor	32
31	Meandrová struktura pod mikroskopem	33
32	Interdigitální kondenzátory sada 1	34
33	Interdigitální kondenzátory sada 2	34
34	Interdigitální kondenzátory sada 1 a sada 2	35
35	Interdigitální kondenzátor pod mikroskopem	35
36	Tištěné indukty - spirála	36
37	Induktor pod mikroskopem	38
38	Tištěné RC - Sada 1 (2k/19p)	39

39	Tištěné RC - Sada 2 (2k/9p)	39
40	Kmitočtová charakteristika DP - sada 1	40
41	Kmitočtová charakteristika DP - sada 2	41
42	Časová konstanta sady 1 - 45,45 ns	42
43	Časová konstanta sady 2 - 35,36 ns	42
44	Tištěné RLC - PRO	44
45	Tištěné RLC - SRO	44
46	Nabíjení a vybíjení kondenzátoru sady 1	45
47	Nabíjení a vybíjení kondenzátoru sady 1	46
48	Nabíjení a vybíjení kondenzátoru sady 1	46
49	Nabíjení a vybíjení kondenzátoru sady 1	47

Seznam tabulek

1	Základní informace k tiskárně [20]	19
2	Základní vlastnosti cartridge [20]	20
3	Základní vlastnosti ANP Silverjet DGP-40LT-15C [17]	21
4	Ideální vlastnosti inkoustu pro tisk [22]	21
5	Rezistory - rozměry sady 1 a sady 2	29
6	Naměřené hodnoty odporu u sady 1 a sady 2 / pec 120°C, 1,5h	29
7	Naměřené hodnoty odporu u sady 1 a sady 2 / pec 130°C, 1h	30
8	Rezistory meandrové - parametry	32
9	Naměřené hodnoty meandrových rezistorů / pec 130°C, 1h	32
10	Kondenzátory - rozměry sady 1 a sady 2	34
11	Hodnoty kondenzátorů u sady 1 a sady 2	34
12	Induktory - rozměry sady 1 a sady 2	36
13	Naměřené hodnoty induktorů 4 cm - 6 vrstev	37
14	Naměřené hodnoty induktorů 16 cm - 6 vrstev	37
15	RC články - předpokládané parametry dle průměrných hodnot	40
16	RC články - změřené parametry	40
17	RLC obvody - parametry	44

Seznam zkratek

dB decibel. 15, 16

DOD drop on demand. 4, 19

DP dolní propust. 15, 16

dpi dots per inch (počet teček na palec). 25

DPS deska plošných spojů. 3

HP horní propust. 15, 16

MIM metal-insulator-metal (kov-izolant-kov. 10, 11, 33, 45, 48, 49

OLED organic light emitting diode (organická svítivka). 1, 3

PEN polyetylnaftalát. 8

PET polyetylentereftalát. 1, 2, 4, 5, 21

PRO paralelní rezonanční obvod. 17, 18, 44, 45, 49

RFID radio frequency identification (identifikace na rádiové frekvenci). 1

SRO sériový rezonanční obvod. 17, 44, 45, 49

1 Úvod

Elektronika je v dnešní době nedílnou součástí našeho každodenního života a většina lidí si ani nedokáže představit, že by bez ní byla byt' jediný den. Stejně jako mnoho vědních oborů tak i elektronika zaznamenala prudký vzestup v minulém století a během pár let se stala nepostradatelnou pro mnoho oblastí jako zdravotnictví, doprava, telekomunikace a mnoho dalších.

V současnosti je drtivá většina elektroniky vyráběna metodou litografie, která umožňuje vysokou integraci, což je směr, kterým se vylepšují současná zařízení. Důvodem využívání litografie je právě vysoká integrace, díky níž je možné vytvořit miliony součástek, jako je tranzistor, na velice malou plochu. Její nevýhodou je nicméně vysoká pořizovací investice do výrobního procesu. Díky tomu je pro mnoho aplikací příliš drahá a někdy i vzhledem ke své nekomfortnosti nevhodná.

Tady přichází na řadu tištěná elektronika, která sice neposkytuje takovou míru integrace, ale je více než vhodnou metodou na výrobu nízkonákladových a „jednoduchých“ zařízení, jako jsou například senzory nebo RFID. Samozřejmě tištěná elektronika není jen lacinější variantou konvenčně využívané litografie, ale nabízí i zajímavé možnosti, které budou mít v budoucnu vysoké uplatnění. Řeč je o tištěných organických světelných diodách OLED. Ty jsou základem ohebných displejů, které mají oproti současné LCD technologii mnoho výhod, jako je pozorovací úhel, odezva a lepší účinnost. Další využití nabízí tisk ohebných fotovoltaických článků, jejichž hlavními výhodami jsou nižší cena než u současných výrobních procesů a dále možnost umístění na jinak špatně dostupná místa.

Tato práce se zabývá tiskem pasivních součástek na ohebnou PET fólii, následně jejich kombinací v podobě RC a RLC obvodů a možnou optimalizaci při výrobním procesu k zajištění lepších výsledků. Pro realizaci těchto obvodů byla využívána technologie inkjet dostupná na katedře mikroelektroniky na ČVUT.

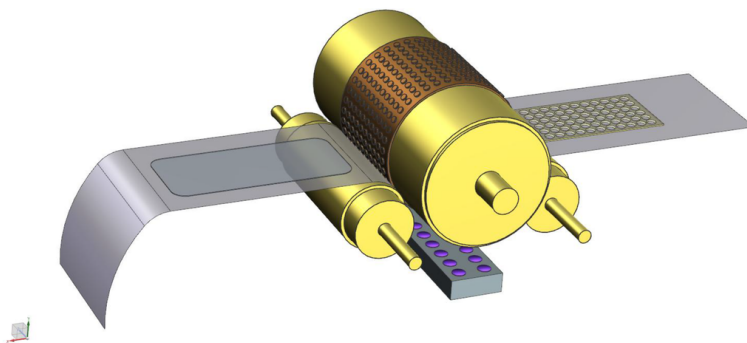
1.1 Cíle práce

1. Seznámení se s technologií inkjet, jejím aktuálním stavem a výhodami.
2. Vyhledání způsobů a metod tisku pasivních součástek a obvodů pomocí inkjet na PET fólii.
3. Navržení, zrealizování a charakterizování základních pasivních součástek.
4. Z navržených základních pasivních součástek realizace RC a RLC obvodů a odměření jejich kmitočtových charakteristik.
5. Navržení možných vylepšení výroby vedoucí k lepším výsledkům.

1.2 Tištěná elektronika

Tištěnou elektronikou se rozumí nanášení materiálů s požadovanými elektrickými vlastnostmi na různé substráty, jako jsou fólie a papír, které mají své výhody oproti běžně užívaným DPS. Zásadní výhodou, kterou nabízí tištěná elektronika oproti litografii, je přístup vytváření elektronických součástí a vodivých spojů. Místo vytváření různých masek a zbavování se neužitečného materiálu za pomoci chemických látek, kdy dochází k zbytečnému plýtvání materiálu, jsou tištěny pouze užitečné části, a tím dochází k velké úspoře. Další výhodou je možnost tisknout různými materiály, a to i organickými, které jsou základem pro OLED.[1]

V současné době existuje několik způsobů tisku elektronických obvodů a součástek. Jednu skupinu tvoří metody využívající tlak k přilnutí materiálu za pomoci rotačních válců, které natlačí požadovaný materiál na ohebný substrát. Tato metoda se nazývá roll-to-roll a je znázorněna na obrázku 1. Do této skupiny patří flexotisk, ofset a hlubotisk. Tyto metody umožňují velkoobjemovou výrobu. Druhou skupinou jsou metody nevyužívající tlak k nanesení materiálu a jsou použity spíše k tisku na rovnou plochu. Jedním z nich je například sítotisk. Dalším důležitým odvětvím je technologie inkjet, které se budeme věnovat v další kapitole.[1][2]



Obrázek 1: Ukázka Roll-to-roll, převzato z [3]

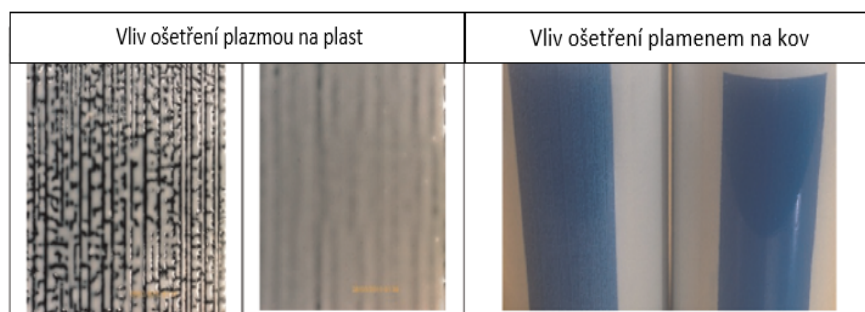
1.2.1 Technologie Inkjet

Technologie inkjet neboli inkoustový tisk je typem digitálního tisku, kde se využívá digitálního motivu, který je posléze natištěn na daný substrát. Oproti ostatním metodám má velkou výhodu jak v možnosti výběru sub-

strátu, tak materiálu, které mohou dále snižovat cenu výroby, a proto se předpokládá jeho významná pozice v budoucnu.[1][4]

Co se nanášení materiálu týče, existují dva způsoby. Prvním je teplotní drop on demand (DOD). Ten využívá rychlého ohřátí inkoustu v komoře, který se vypaří a vytvoří bublinu, která vytlačí určitou část z trysky. Druhým způsob DOD využívá piezoelektrického jevu, který způsobí změnu tvaru daného materiálu umístěného za tryskou po přivedení napětí. Tím se vytvoří tlak na vytlačení inkoustu.

Nedílnou součástí této technologie k dosažení požadované a hlavně konzistentní kvality jsou procesy před a po tisku. Ne všechny substráty jsou okamžitě vhodné k tisku nebo již ošetřené od výrobce a natištěné materiály nemají ihned po natištění požadované vlastnosti. Existuje mnoho postupů, které se od sebe liší jak svou náročností, tak dosaženém výsledku. Na ukázkou je na následujícím obrázku 2 porovnání povrchu před a po použití úpravy substrátu pomocí plazmy.[1][5]

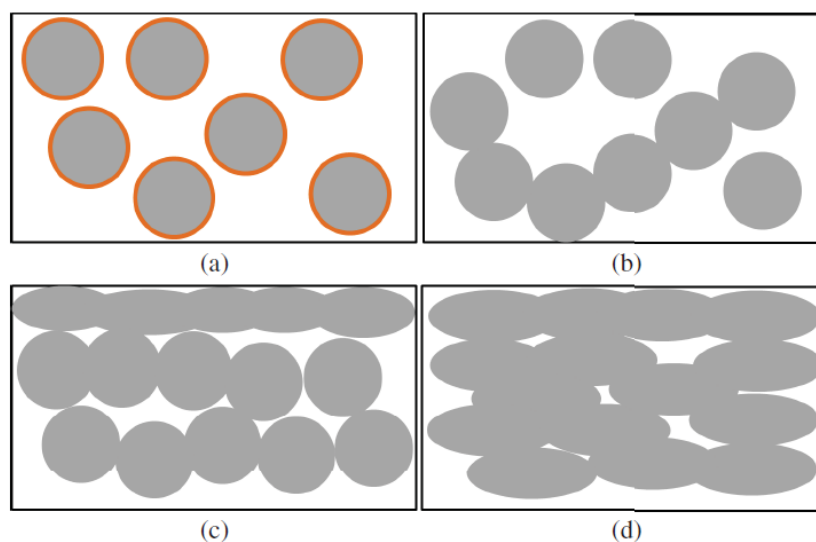


Obrázek 2: Úprava povrchu za použití plazmy, upraveno z [5]

V této práci byla jako substrát používána PET fólie Novale IJ-220 o tloušťce 140 μm Novacentrix [6], která již má potřebnou úpravu povrchu od výrobce, a tudíž povrchové ošetření nebylo nutné řešit.

Důležitá je i úprava po tisku. Jednou z nich je sintrování neboli spékání. To slouží k odpaření činidla a slnutí nanočástic a teprve poté má natištěný materiál požadovanou vodivost[7]. Využívá se opět mnoho metod, z níž v této práci bude využíváno spékání v troubě. Doba spékání se pohybuje řádově v desítkách minut a teplota okolo 120°C. Výška teploty a doba spékání bude konkretizovaná v další kapitole. Při teplotách vyšších než 150°C do-

chází k deformaci PET fólie a její následné degradaci. Na následujícím obrázku 3 je ilustrativní ukázka změny struktury částic stříbra během spékání, kdy dochází ke slinutí nanočástic stříbra, což vede k vyšší vodivosti.



Obrázek 3: Změna struktury částic stříbra při spékání, převzato z [7]

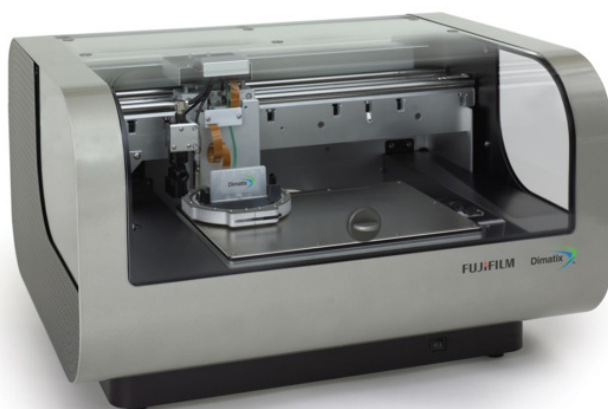
1.2.2 Výhody a Nevýhody Inkjet

Jak již bylo zmíněno, inkjet jakožto jedna z tiskových metod, má mnohé výhody oproti litografii, kterými jsou nízká spotřeba materiálu a nižší náklady na údržbu než u litografických zařízení. Dále pak vysoká produktivita, tudíž rychlá návratnost investice a přesná kontrola nad dávkováním použitého materiálu. Jakožto bezkontaktní tisk se dokáže přizpůsobit různým substrátům po jejich ošetření viz odstavec výše, měnitelnost rozlišení a v neposlední řadě šetrnost k životnímu prostředí.

Samozřejmě jako každá technologie má i inkjet své nevýhody. Jednou z hlavních je, že inkjet je nastupující technikou tisku a bude potřebovat ještě nějaký čas k plné optimalizaci. Dalším nedostatkem je nutnost ošetření substrátu kvůli požadované kvalitě. Zásadním problémem je také nastavení a ucpávání trysek, které může vést k znehodnocení výrobku a v další řadě potřeba kvalifikovaného personálu k obsluze.[1][5]

1.2.3 Tiskárna Dimatix

K této práci bude použita tiskárna od firmy Fujifilm Dimatix, konkrétně s označením Fujifilm Dimatix material printer DMP 2831. Jedná se o tiskárnu navrženou k vývoji, testování a optimalizaci vzorků. Velikost očekávaného substrátu je standardní formát A4 s možností výhřevu substrátu až na 60°C, což umožňuje rychlejší vysychání materiálu, a zabraňuje tak nechtěnému roztékání. Substrát je zajištěn vakuovým přichycením, které zaručuje, že se nastavená vzdálenost hlavy od substrátu během tisku nezmění. Na obrázku 4 je tiskárna od firmy Fujifilm Dimatix.



Obrázek 4: Tiskárna dimatix DMP 2831, převzato z [8]

Dále obsahuje sledovač kapek k optimalizaci trysek, zdali nejsou některé ucpané nebo nepracují správně. Dále naváděcí kameru k určení počátku tisku, sledování průběžných kroků a možností měření vzdáleností. Také slouží k zarovnání plotny. Hnací technologie cartridge je piezoelektrická s integrovaným vyhříváním. Hlava obsahuje 16 trysek s možností dávkování kapek 10 pl na jednu trysku s možností výměny hlavy s dávkováním 1 pl.

2 Pasivní elektronické součástky

Pasivní součástky by se daly definovat několika způsoby. Prvním je, že nevytváří energii, tudíž se nechovají jako zdroj, ale pouze upravují procházející signál. Další vlastností je, že k provozu sami nepotřebují externí zdroj a k jejich činnosti jim postačuje pouze samotný signál.

Mezi pasivní součástky patří zejména rezistory, kondenzátory a indukty. V následujících kapitolách budou tyto součástky jednotlivě obecně popsány a následně provedena rešerše na způsoby tisku pomocí inkjet.

2.1 Rezistor

Rezistor je jednou z nejzákladnějších elektronických součástek a jeho primární vlastností je elektrický odpor. Parazitní vlastnosti jako indukčnost a kapacita lze většinou zanedbat. Hlavním účelem rezistoru je snížení proudu v obvodu nebo vytvoření úbytku napětí. Klasické rezistory se vyrábí nanesením rezistivního materiálu na keramické tělíčko a následné nanesení ochranného laku a přivaření kovových kontaktů. Dalším způsobem je navinutí drátu do šroubovice. Základní rovnicí pro návrh nebo výpočet odporu je rovnice (1)

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1)$$

kde R je počítaný odpor, ρ je měrný odpor, l je délka vodiče a S průřez.

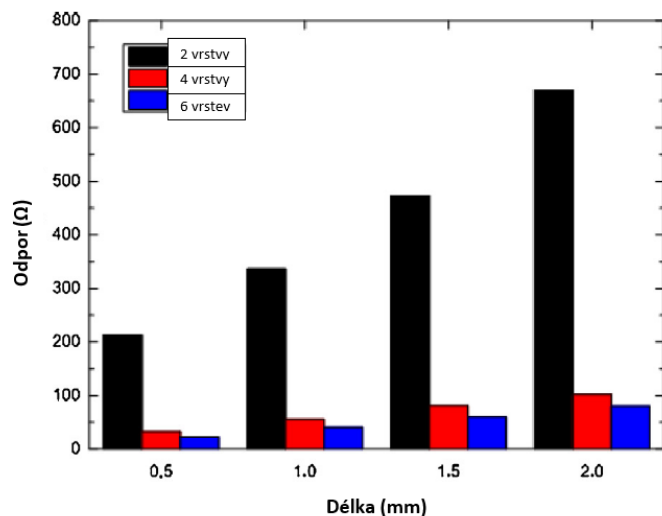
Co se tvorby rezistorů pomocí inkjet tisku týče, je zde mnoho faktorů, které mohou výrazně ovlivnit požadovaný výsledek. V první řadě samozřejmě samotná rezistivita použitého materiálu. Příkladem může být vědecký tým z Hanyang University, který použil PEDOT:PSS, vyznačující se vysokou rezistivitou až v řádu $M\Omega$. [9]. Nejdříve byly natištěny obě postranní elektrody, které nebyly propojeny, a následně byl do mezery a lehce přes již natištěné části použit výše zmíněný rezistivní materiál.

Další faktor výrazně ovlivňující výsledek je počet použitých vrstev nanášeného materiálu. Předchozí rovnici (1) lze upravit na rovnici (2)

$$R = \rho \cdot \frac{l}{d \cdot W} \quad (2)$$

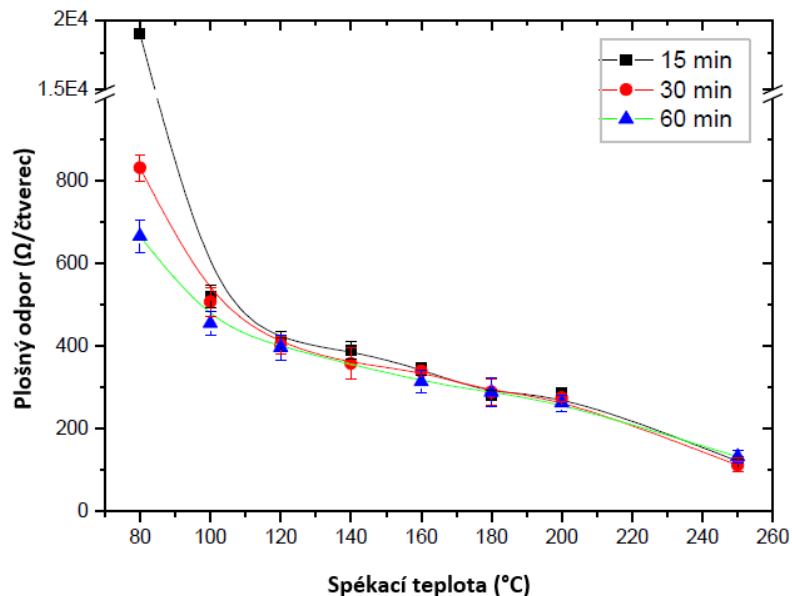
kde R je odpor, ρ je měrný odpor, l je délka, d natištěná tloušťka a W šířka.

Z rovnice (2) je patrné, že natištěná tloušťka materiálu nepřímou úměrou ovlivňuje výsledný odpor. Díky této úpravě se dospělo k dalšímu potřebnému zlomku a to délka ku šířce, díky níž můžeme navrhovaný vzor rozdělit na dílčí čtverce a po natištění jednoho vzoru je možné z naměřené hodnoty a počtu jednotlivých čtverců zjistit plošný odpor neboli „ohm na čtverec“. Na následujícím obrázku 5 je znázorněna závislost odporu na délce l a počtu vrstev.



Obrázek 5: Závislost odporu na délce a počtu vrstev, převzato z [10]

Poslední z hlavních faktorů ovlivňující výsledný odpor je spékání materiálu po tisku. Jak již bylo zmíněno výše, během spékání se zbavujeme rozpouštědla a částice nesoucí náboj se slévají k sobě, čímž se odpor snižuje. Hlavními parametry jsou teplota a čas spékání. Na následujícím obrázku 6 je ukázka vlivu doby a teploty na plošném odporu inkoustu obsahující stříbro na PEN substrátu.[10]



Obrázek 6: Závislost plošného odporu na teplotě a době, převzato z [11]

2.2 Kondenzátor

Kondenzátor je elektronická součástka uchovávající energii v elektrickém poli. Hlavní vlastností kondenzátoru je kapacita, která udává množství uchovávaného náboje. Základní provedení se skládá ze dvou vodivých desek oddělených od sebe izolační vrstvou nebo dielektrickým materiálem. Po přivedení napětí se na jedné elektrodě hromadí kladný náboj a na druhé záporný. Po odebrání zdroje napětí se kondenzátor začne vybíjet a doba, po kterou se bude vybíjet při určitém odběru proudu, závisí právě na kapacitě. Proud u ideálního kondenzátoru fázově předbíhá napětí o 90°. Následující rovnice (3) popisuje vztah náboje, kapacity a napětí a rovnice (4) výpočet kapacity z vlastností a rozměrů.

$$Q = C \cdot U \quad (3)$$

kde Q je náboj, C kapacita a U přiložené napětí.

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (4)$$

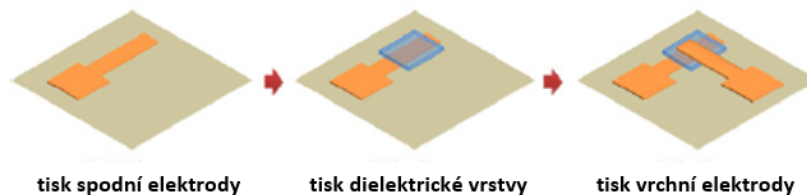
kde C je kapacita, ϵ_r relativní permitivita, ϵ_0 permitivita vakua, S plocha elektrod a d vzdálenost mezi nimi.

Další důležitou rovnicí je výpočet kapacitní reaktance, což je imaginární část impedance neboli zdánlivý odpor. Ta nepřímou úměrou závisí na kmitočtu signálu a kapacitě daného kondenzátoru viz rovnice (5)

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (5)$$

kde X_C je reaktance, f je kmitočet signálu a C kapacita kondenzátoru.

Pomocí inkjet technologie můžeme tisknout dva typy kondenzátorů. Prvním z nich je deskový kondenzátor typu MIM, který se svou strukturou velice podobá klasickému. Nejdříve je natištěna první elektroda, poté dielektrický materiál a následně horní elektroda. Následující obrázek 7 ilustruje tento proces.

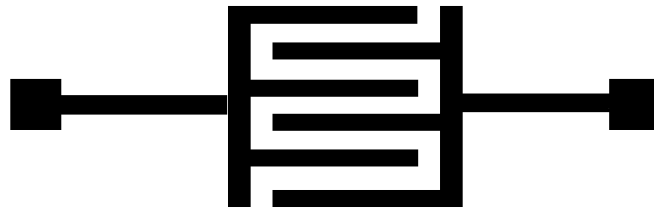


Obrázek 7: Postup tisku MIM kondenzátoru, upraveno z [11]

Postup se však může lišit ať už v použitých materiálech, tak délce nebo úplné absenci spékacích procesů. Příkladem mohou být články [9] a [12]. V prvním bylo provedeno spékání po natištění spodní elektrody, aby se následně dielektrická vrstva nedostala skrz neupravenou vrstvu. Následoval tisk obou dalších vrstev a teprve poté započalo spékání. Rozdíl v postupu uvedeném v druhém článku bylo ošetření každé jednotlivé vrstvy zvlášť.

Další možností je tisk takzvaného interdigitálního kondenzátoru, který se skládá ze dvou „hřebenů“ zaklesnutých mezi sebe. Výsledná kapacita

sice nedosahuje řádově takových hodnot jako u MIM kondenzátoru při podobně využití ploše, ale jeho tisk je výrazně rychlejší a hlavně jednodušší díky absenci nutnosti nanášení různých vrstev. Obrázek 8 znázorňuje tuto strukturu.



Obrázek 8: Interdigitální kondenzátor

2.3 Induktor

Stejně jako kondenzátor, tak i induktor neboli cívka, uchovává energii, ale na rozdíl od kondenzátoru do magnetického pole. Hlavní vlastností je vlastní indukčnost. Na rozdíl od kondenzátoru se u reálného induktoru nemůže zanedbat parazitní odpor způsobený odporem vodiče, který je v základním provedení navinut do šroubovice. Funkce induktoru je, že po přivedení napětí jím protéká proud a induktor ukládá do sebe energii. Po přerušení přívodu proudu se induktor brání této změně a prohodí předchozí polaritu napětí, aby zachoval směr proudu, a energie uchovaná v magnetickém poli se vybije. U ideálního induktoru je napětí fázově posunuto od proudu a předbíhá ho o 90° . Základní rovnice pro určení vlastní indukčnosti z rozměrů je (6).

$$L = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{N^2 S}{l} \quad (6)$$

kde L je vlastní indukčnost, μ_0 permeabilita vakua, μ_r relativní permeabilita, N počet závitů, S je průřez induktoru a l délka induktoru.

Další ze základních rovnic je určení vlastní indukčnosti induktoru znázorněna v následující rovnici (7), kde vlastní indukčnost je výsledek poměru magnetického toku a proudu, který jej vyvolal.

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (7)$$

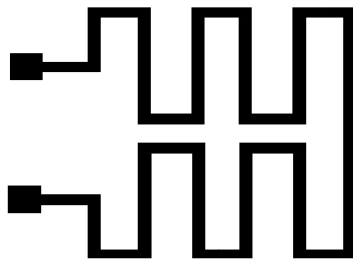
kde L je vlastní indukčnost, Φ magnetický tok a I protékající proud.

Stejně jako kondenzátor i induktor vykazuje svoji reaktanci, která ale se zvyšujícím se kmitočtem neklesá, ale roste. Vztah popisuje následující rovnice (8)

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \quad (8)$$

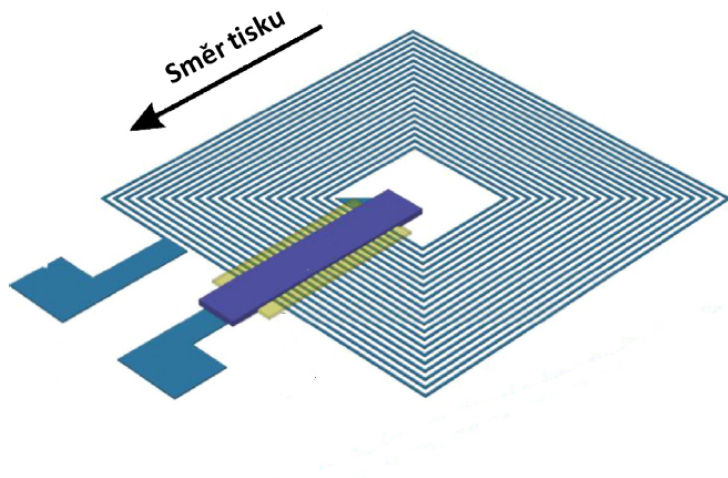
kde X_L je induktivní reaktance, f kmitočet signálu a L vlastní indukčnost induktoru.

Tištěné induktoři se dají realizovat více způsoby. Jedním z nich je vytvoření meandrové struktury. Nevýhodou je nižší vlastní indukčnost při využití stejné plochy oproti spirálové struktuře [12][13]. Obrázek 9 ilustruje možnou realizaci meandrového induktoru.



Obrázek 9: Meandrový induktor

Spirálová realizace zvyšuje náročnost výroby díky nutnosti přemostění kontaktu uvnitř spirály přes natištěné závity. To lze provést natištěním nevodivého materiálu a následné propojení vodivým materiálem přes tuto oblast. Pro tisk je ale výhodnější použít hranatou spirálu kvůli kvalitnějšímu tisku, kde polovina vzoru je v horizontálním směru, což je optimální pro rastrový tisk. V článku [12] byl pomocí inkjet technologie natištěn induktor s rozměry 14x14 mm, tloušťkou linie 100 μm , šířkou mezery 75 μm a byl tvořen 25 závitů. Tento induktor měl hodnotu vlastní indukčnosti 5,4 μH a parazitní odpor 12,7 $\text{k}\Omega$. Ke zvýšení vlastní indukčnosti je možné natisknout feritovou vrstvu, která má vyšší permeabilitu než vzduch a navíc slouží i jako ochranná vrstva. Na následujícím obrázku 10 je znázorněn výše uvedený postup.



Obrázek 10: Tištěný induktor, upraveno z [12]

3 RC a RLC obvody

3.1 RC obvod

RC obvod je kombinací výše zmíněného rezistoru a kondenzátoru. Je to nejjednodušší filtr střídavého signálu, který ovlivňuje přenos podle aktuálního kmitočtu signálu, který prochází tímto zapojením. Přenos je definován jako podíl obrazů výstupního napětí ku vstupnímu. Tento vztah udává rovnice (9) a udává se v jednotce decibel (dB).

$$P = 20 \cdot \log \frac{U_2}{U_1} \quad (9)$$

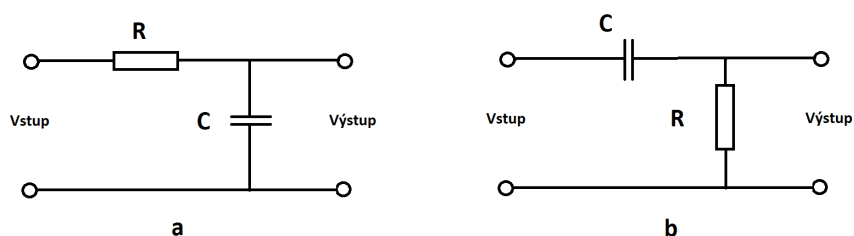
kde P je přenos, U_2 výstupní napětí a U_1 vstupní napětí.

Když signál prochází tímto obvodem, tak se neustále díky střídavému signálu nabíjí a vybíjí kondenzátor přes rezistor. Doba, za kterou se signál z obvodu po přivedení signálu dostane na 63,2 % hodnoty, se nazývá časová konstanta τ . Tento vztah je znázorněn na následující rovnici (10)

$$\tau = R \cdot C \quad (10)$$

kde τ je časová konstanta, R je odpor rezistoru a C kapacita kondenzátoru.

Podle zapojení generátoru a výstupních svorek můžeme získat buďto integrační článek neboli dolní propust (DP), anebo derivační článek jako horní propust (HP). Význam těchto označení bude rozebrán níže. Rozdíl mezi těmito články je v zapojení vstupu a výstupu mezi koncové a společné svorky rezistoru a kondenzátoru viz obrázek 11.



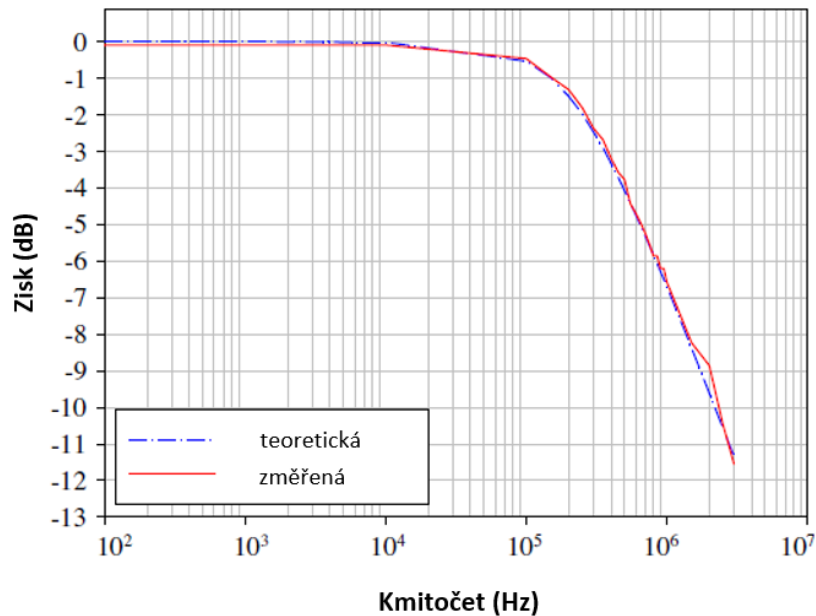
Obrázek 11: Zapojení a) integračního b) derivačního čláнку

Význam DP a HP souvisí s tvarem křivky kmitočtových charakteristik těchto dvou zapojení. Obě zapojení za podmínky, že jejich hodnoty rezistoru a kondenzátoru jsou stejné, mají totožný takzvaný mezní kmitočet. Ten se spočítá podle rovnice (11).

$$f_m = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (11)$$

kde f_m je mezní kmitočet, R je odpor rezistoru a C kapacita kondenzátoru.

Tento kmitočet udává, kdy je zisk roven hodnotě -3dB, což odpovídá přibližně 70% hodnotě vstupního signálu. Integrovní článek od této hodnoty začne klesat a naopak derivační článek se začne blížit hodnotě 0dB. Na následujícím obrázku je ukázka průběhu integračního článku s mezním kmitočtem okolo 500 kHz a zde je patrné, odkud pochází označení DP, protože na výstupu dostáváme signál na „rozumné“ úrovni do mezního kmitočtu a dále od něj je výrazně utlumen. Na obrázku 12 je kmitočtová charakteristika DP. HP je jen opačným případem. Práce o tisku RC obvodů pomocí inkjet technologie jsou [9] a [14], kde v první zmíněné natiskly kondenzátor o kapacitě 66,7 pF a rezistor s odporem 4,35 kΩ.



Obrázek 12: Kmitočtová charakteristika DP, upraveno z [9]

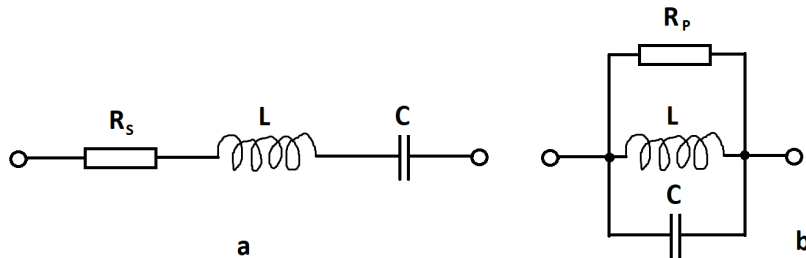
3.2 RLC obvod

Jak již název vypovídá, RLC obvod je tvořen spojením rezistoru, induktoru a kondenzátoru. Dalším názvem pro toto zapojení je rezonanční obvod. Rezonance je stav při specifickém kmitočtu, který je dán vlastní indukčností a kapacitou náležitých prvků, při kterém se induktivní a kapacitní reaktance vyrovnají a zapojení se chová jako čistý odpor. Následující rovnice (12) vychází z takzvaného Thomsonova vztahu, kde se dají do rovnosti výše zmíněné reaktance prvků.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (12)$$

kde f_0 je rezonanční kmitočet, L vlastní indukčnost induktoru a C kapacita kondenzátoru.

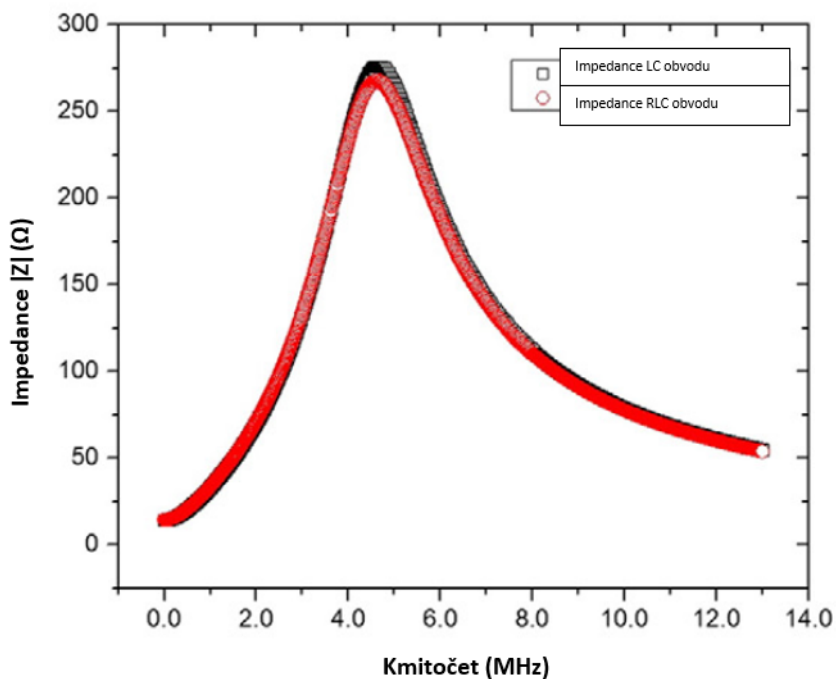
Induktor a kondenzátor mohou být spojeny buďto sériově nebo paralelně, čímž vznikne paralelní rezonanční obvod (PRO) nebo sériový rezonanční obvod (SRO) viz obrázek 13. Obě zapojení sdílejí stejný rezonanční kmitočet.



Obrázek 13: Zapojení a) SRO b) PRO

Odpor rezistoru nemá vliv na rezonanční kmitočet, ale ovlivňuje tvar křivky. Rozdíl v různých zapojeních induktoru a kondenzátoru je ten, že PRO má při tomto kmitočtu nejvyšší impedanci a SRO nejnižší. Práce zabývající se tištěním RLC obvodů jsou [15][16]. Nutno zmínit, že obě tyto práce nevyužívají inkjet, ale sítotisk. Rezonanční kmitočty dosažené v těchto pracích jsou 4,65 MHz a 112 MHz. Na následujícím obrázku 14 je ukázka průběhu impedance PRO, který se zcela skládá z komponentů vytištěných sí-

totiskem, jak již bylo zmíněno výše.



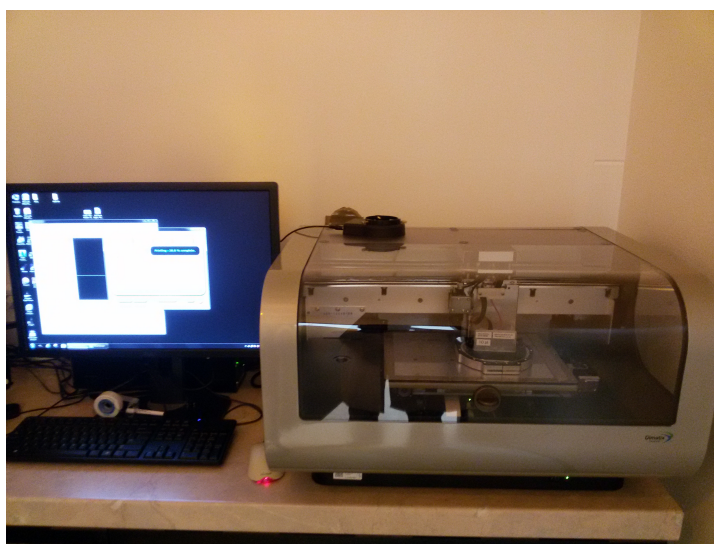
Obrázek 14: Rezonanční křivka PRO, upraveno z [15]

PRO má další zajímavou vlastnost, a to tlumenou oscilaci. Nabije-li se například kondenzátor na určité napětí, začne ze záporně nabitých elektrod protékat proud do kladně nabitých přes induktor. V okamžiku kdy se kondenzátor vybil a přestane téci proud, induktor se brání této změně a změní polaritu napětí. Na tuto obrácenou polaritu se začne nabíjet kondenzátor, dokud proud není opět minimální. Poté opět nastává vybíjení kondenzátoru přes induktor, ale tentokrát v opačném směru nežli na začátku. Tento jev se opakuje dokud se výměna energie mezi kondenzátorem a induktorem neztratí především v parazitním odporu induktoru.

4 Praktická část

4.1 Příprava před tiskem

K veškerému tisku se využívala tiskárna Dimatix DMP 2831, která je dostupná v laboratoři Nanolit na katedře mikroelektroniky. Tato tiskárna využívá piezoelektrického DOD, zmíněného v kapitole 1.2.1 a je zachycena na obrázku 15. Základní informace pak v tabulce 1.

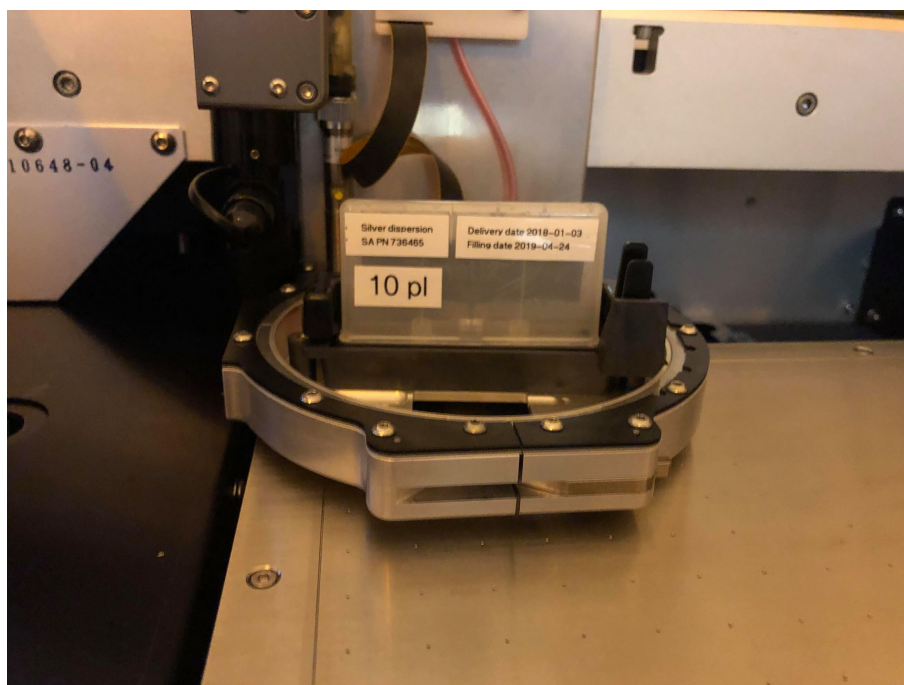


Obrázek 15: Tiskárna Dimatix v laboratoři

Tabulka 1: Základní informace k tiskárně [20]

Rozměry	673 mm X 584 mm / 419 mm
Tisková plocha	210 mm x 315 mm (do 0,5 mm)
Hmotnost	43 kg
Opakovatelnost posuvu	$\pm 25 \mu\text{m}$
Zajištění substrátu	pomocí vakua
Výhřev substrátu	až do 60 °C
Výhřev tiskové jednotky	až do 70 °C
Frekvence nanášení kapek	1 - 20 kHz
Formát vstupních dat	soubory konvertované do bitmapy

K veškerému tisku se využíval inkoust obsahující nanočástice stříbra, konkrétně pro naše aplikace ANP Silverjet DGP-40LT-15C (Sigma Aldrich PN 736465). Tento materiál se plní do takzvaných cartridge, který se skládá z vyměnitelného zásobníku a tiskové hlavy. V této práci byl použit cartridge s dávkováním 10 pl. Na obrázku 16 je zasazená cartridge v tiskárně a v tabulce 2 základní informace. V dalších dvou tabulkách 3 a 4 jsou uvedeny základní informace o použitém inkoustu a jeho ideální vlastnosti pro tisk.



Obrázek 16: Umisťovací hlava a samotná cartridge s ANP Silverjet

Tabulka 2: Základní vlastnosti cartridge [20]

Trysky	16 piezoelektrických, rozteč 254 μm
Objem kapky	10 pl
Objem	1,5 ml

Tabulka 3: Základní vlastnosti ANP Silverjet DGP-40LT-15C [17]

Obsah pevných částic [%]	30 - 35
Povrchové napětí [dyn / cm]	35 - 38
Viskozita [cPs]	10 - 17
Vytvrzovací teplota [°C]	120 - 150
Rezistivita [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]	11 - 12
Substrát	plastický film

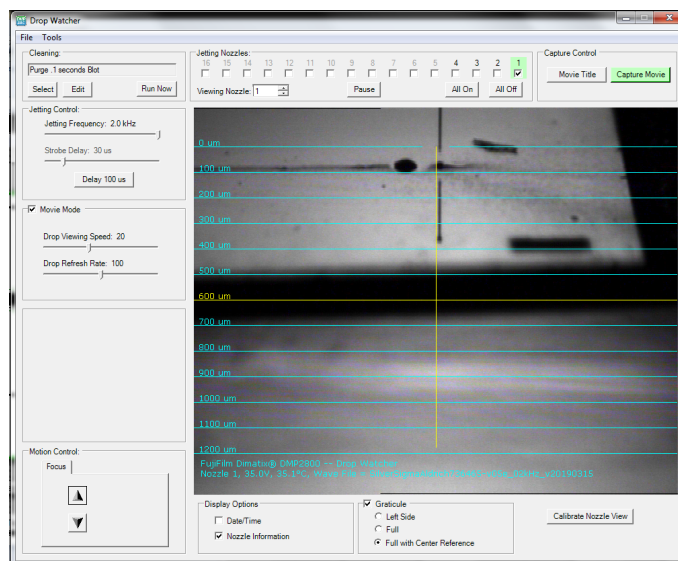
Tabulka 4: Ideální vlastnosti inkoustu pro tisk [22]

Viskozita [cPs]	10 - 12
Povrchové napětí [dyn / cm]	28 - 42
ph (potenciál vodíku)	4 - 9
Hustota [g / cm^3]	> 1
Teplota tání [°C]	> 100
Velikost částic [μm]	< 0,2 μm (1/100 velikosti trysky)

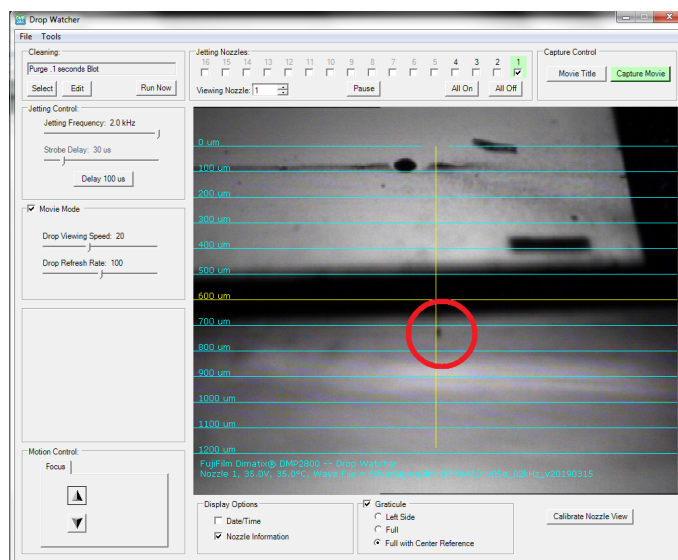
Cartridge s inkoustem ANP Silverjet DGP-40LT-15C musí být skladován v chladničce při teplotě 6 - 8°C, aby nedocházelo k degradaci materiálu. Před instalací cartridge je nutné jej nechat odstát ve svislé poloze přibližně 20 minut, aby inkoust mohl stéci do jednotlivých trysek a také kvůli přizpůsobení teploty na okolí. Dále se provádí vizuální kontrola pinů, zdali nejsou zanesené nebo trysky ucpané. Není-li vše v pořádku, je nutné očistit spodní část cartridge isopropylalkoholem o vysoké čistotě (čistota pro mikroelektroniku). Po instalaci cartridge do tiskárny vybereme substrát, na který chceme tisknout. Všechny návrhy byly natištěny na substrát s označením PET kvůli již provedené úpravě povrchu od výrobce. Software tiskárny umožňuje několik možností optimalizace tisku. Prvním z nich je takzvaný drop watcher, umožňující kontrolu jednotlivých trysek, jejich čisticí cykly a nastavení frekvence.

Na následujících obrázcích, konkrétně obrázek 17 a obrázek 18, lze vidět trajektorie kapky vycházející z trysky číslo 1. Lze samozřejmě zkontrolovat a přenastavit všech 16 trysek. Na prvním obrázku lze vidět, že tryska číslo 1 není ucpaná a vystřelená kapka se pohybuje po přímce. Na druhém obrázku lze odečíst rychlost kapky, která je okolo 7 m/s, což se pro tisk osvědčilo. Při tisku více tryskami je nutné používat pouze sousední trysky a

je potřeba každou z nich takto zkontrolovat, aby nedošlo ke zhoršení kvality tisku.

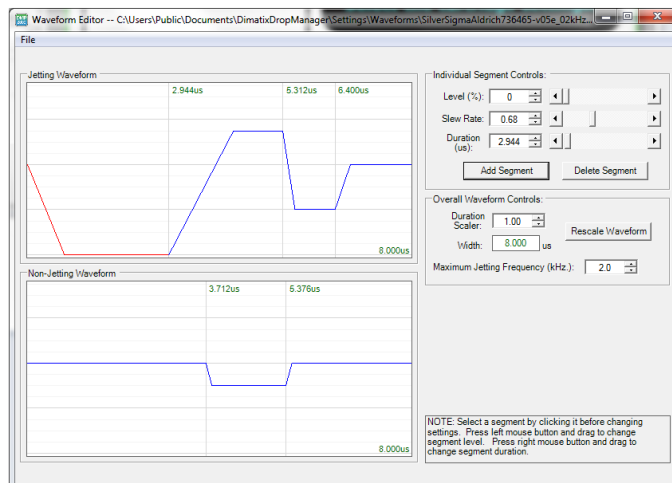


Obrázek 17: Drop watcher pro sledování kapek 1



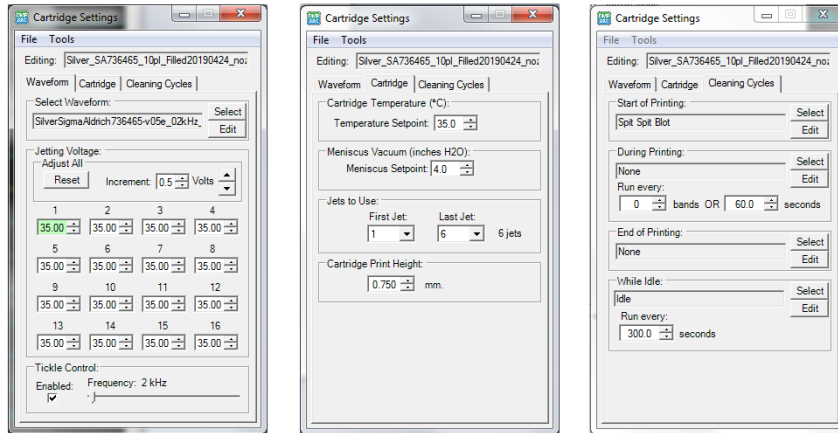
Obrázek 18: Drop watcher pro sledování kapek 2

Pro každý inkoust je potřeba lehce rozdílné nastavení dle jeho vlastností, jakou je třeba viskozita. K tomu slouží waveform editor, kde je možné nastavit nejen výšku napětí, ale i jeho trvání a dobu přeběhu. Následující obrázek 19 zachycuje průběh napětí při tisku.



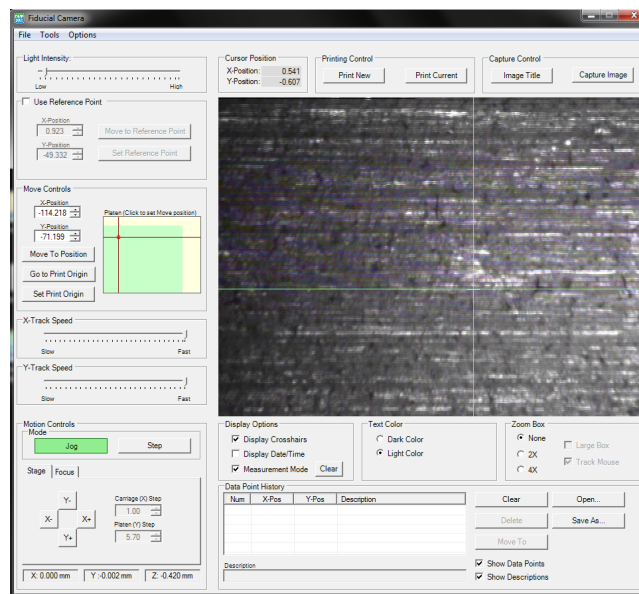
Obrázek 19: Waveform editor pro nastavení průběhu dávkování

Těsně před samotným tiskem lze ještě měnit některé parametry, a to v Cartridge settings. V tomto nastavení lze měnit globální nastavení waveformu pro jednotlivé trysky jako napětí a frekvenci, ale je možné měnit i teplotu, výšku nad substrátem nebo počet a intervaly čistících procesů. Na obrázku 20 lze vidět možnosti nastavení cartridge. Například ke stejné rychlosti téměř prázdného a plného zásobníku je třeba u staršího nutno použít vyšší napětí.



Obrázek 20: Nastavení cartridge

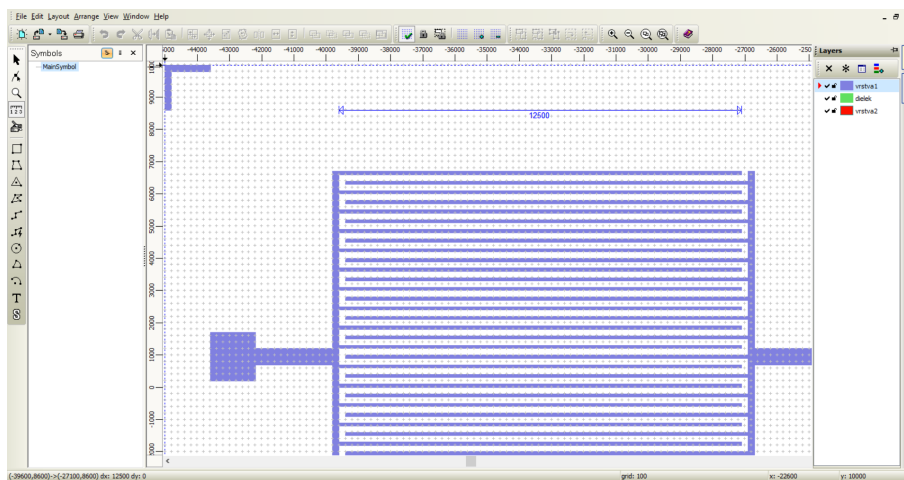
Posledním krokem je nastavení počátku tisku pomocí orientační kamery, pomocí níž je možné měřit vzdálenosti, úhly a pořizovat fotky. Na obrázku 21 je snímek okna orientační kamery s výše popsánymi možnostmi.



Obrázek 21: Okno orientační kamery

4.2 Návrh motivů

Návrh veškerých motivů probíhal ve vývojovém prostředí CleWin, konkrétně ve verzi 5.4.8.0. Práce s tímto softwarem nebyla složitá díky jednoduchému a intuitivnímu ovládání. Nejdůležitějším aspektem je nastavení rozlišení mřížky. Rozlišení pro tisk většiny motivů bylo nastaveno na 100 μm a pro tisk meandrových rezistorů na 5 μm . Lišta pro volbu tvaru pro návrh se nachází vlevo spolu s nástroji jako pravítko a lupa. V pravé části se nachází záložka Layers, kde lze jednoduše přepínat mezi použitými vrstvami. Výsledný návrh se dá exportovat do formátu .bmp, který je vhodný pro software tiskárny k finální konverzi na formát určený k tisku. Při výběru plochy, která má být exportována, je zde možnost nastavení rozlišení. Pro všechny motivy byla zvolena hodnota 25 μm , což odpovídá 1016 dpi. Na obrázku 22 lze vidět základní plochu pro návrh, konkrétně interdigitální kondenzátor.

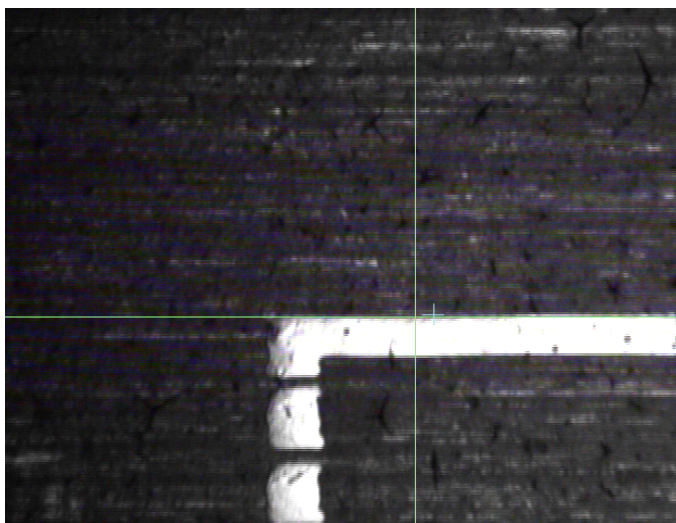


Obrázek 22: Návrhový software CleWin

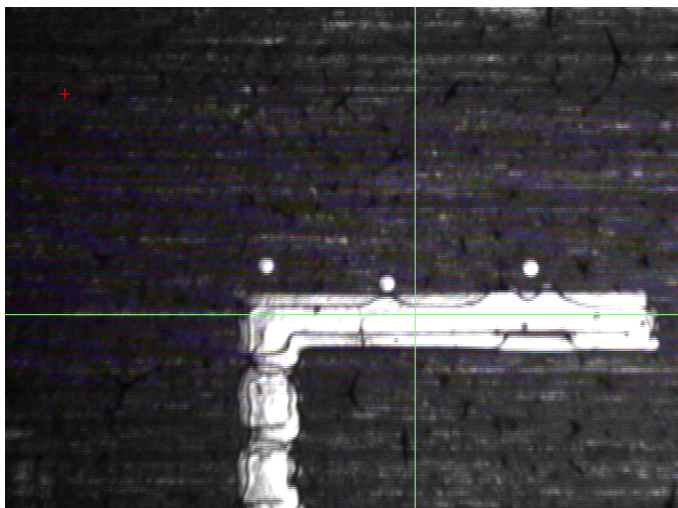
4.3 Tisk pasivních součástek

Tisk níže zmíněných struktur probíhal pro většinu případů za použití 6 trysek, konkrétně první až šesté s vyhříváním substrátu na 40°C a teplotou cartridge 35°C. Veškeré natištěné motivy byly natištěny minimálně dvěma vrstvami kvůli zajištění spolehlivosti a také snížení odporu vodivého inkoustu viz [18]. Počet trysek přímo ovlivňuje dobu tisku. Ta by za použití jedné trysky byla příliš dlouhá pro větší motivy nebo více sad. Použití jedné trysky má výhodu, že použitý motiv má minimální počet defektů. Při použití více trysek může docházet k tvorbě mezer mezi přejezdy (způsobeno interakcí inkoustu a povrchu).

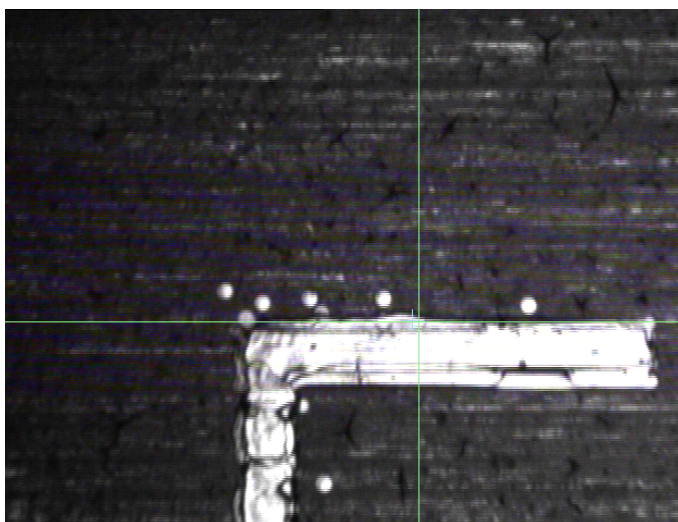
Při tisku pomocí více trysek se musí detailněji nastavit více parametrů zmíněných v kapitole 4.1, což je velmi časově náročné. Pro snížení časové náročnosti byl zvolen kompromis, kdy se tisklo 6 tryskami a každá vrstva se tiskla s jemným posunutím od předešlé vrstvy, aby se vzniklé mezery zaplnili. Vznikla tím sice nehomogenita povrchu, ale při udržení počtu trysek a velikosti posunu zůstávají návrhy vůči sobě stejné. Na následujících obrázcích 23, 24 a 25 lze vidět posunutí tisku o 35 μm dolů od první a 50 μm nahoru od druhé vrstvy.



Obrázek 23: První vrstva



Obrázek 24: Druhá vrstva posunutá dolů

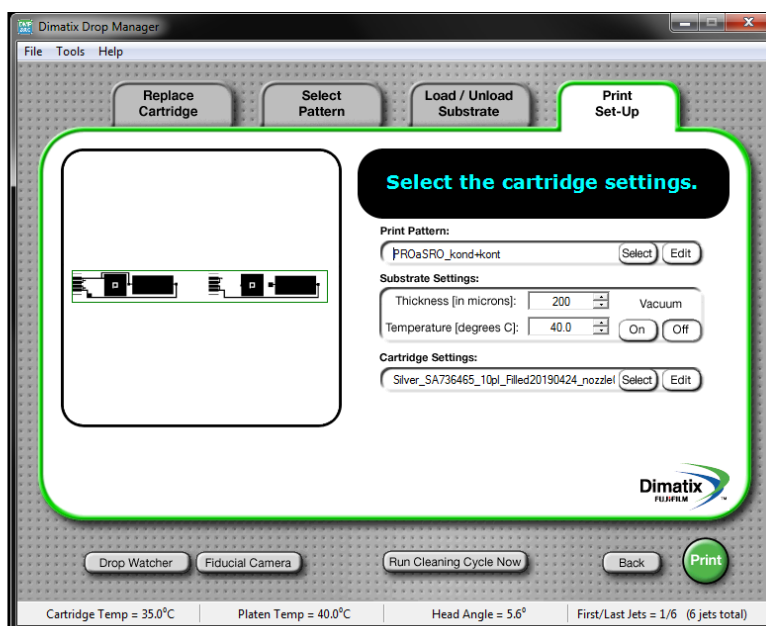


Obrázek 25: Třetí vrstva posunutá nahoru

Tímto způsobem jsou sice navrhované struktury širší než je plánováno, ale odchylka ve většině případů nepřevyšuje 50 μm , což se může stát i při špatně upraveném substrátu, při jeho poškození nebo ohybu.

Dále dobu tisku výrazně ovlivňuje rozložení motivu. Ten se nejrychleji

natiskne, pokud odpovídá směru tisku, což je horizontální rovina. Proto je snaha u veškerých struktur co možná nejnižší výška. Na následujícím obrázku 26 je zobrazeno okno s možností změny zásadních parametrů a možností začátku tisku.



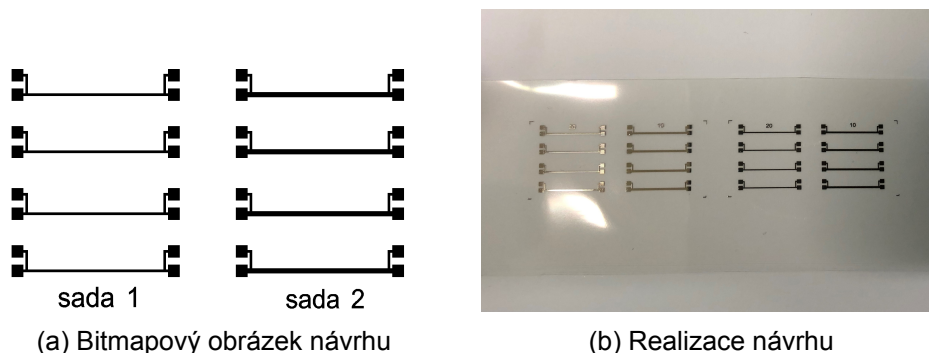
Obrázek 26: Okno se základními parametry tisku před jeho zahájením

4.3.1 Rezistor

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1, většinou se rezistory technologií inkjet tisknou pomocí rezistivních materiálů, konkrétně PEDOT:PSS, které se mísí s více vodivými materiály k úpravě jejich vysokých hodnot. Tyto materiály ale jsou velmi drahé a vyžadují delší přípravu pro tisk a navíc degradují s časem. Proto byl využit opačný způsob a veškeré rezistory byly tištěny pomocí vodivého materiálu zmíněného výše a jeho rezistivita byla měněna především délkou a šířkou motivu, jak bylo popsáno v rovnici (2).

K veškerému tisku lineárních rezistorů byly použity tři nanosené vrstvy. Díky navrhovaným malým hodnotám postačovala lineární struktura. Dle experimentálních vzorků byly navrženy dvě sady, a to konkrétně pro hodnoty 20Ω a 10Ω . Veškeré výrobky byly měřeny na multimetru KEYSIGHT

34465A. Následující obrázek 27 zachycuje digitální návrh a natištěný výrobek a tabulka 5 konkrétní parametry těchto dvou sad.



Obrázek 27: Lineární rezistory sada 1 a sada 2

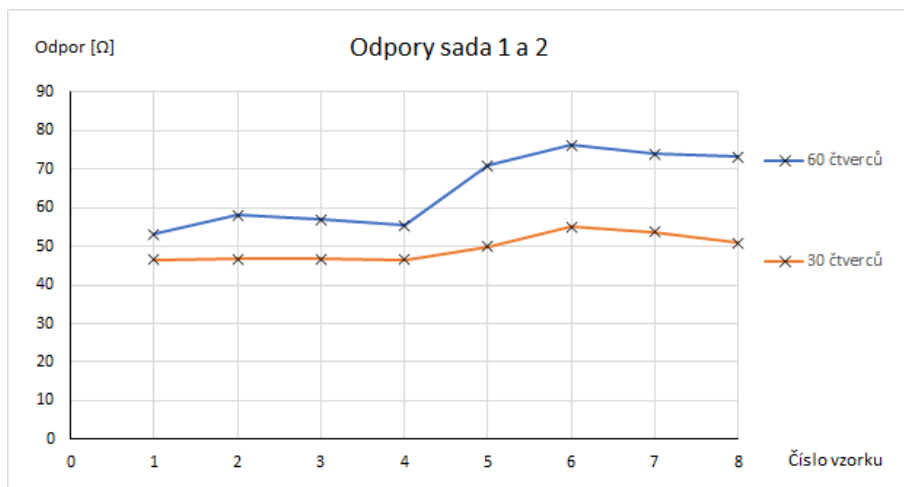
Tabulka 5: Rezistory - rozměry sady 1 a sady 2

Sada	Délka [cm]	Tloušťka [μm]	Vrstvy	Počet čtverců
1	1,2	200	3	60
2	1,2	400	3	30

Následující tabulka 6 a graf v obrázku 28 zahrnují dvakrát natištěný vzor vedle sebe viz obrázek 27 s použitím šesti trysek a natištěním tří vrstev tohoto vzoru. V tabulce je taky počítána průměrná hodnota, směrodatná odchylka a výsledný odpor na čtverec. Očekávaná hodnota odporu měla být podle experimentálních vzorků přibližně 20Ω pro sadu 1 a 10Ω pro sadu 2. Tyto hodnoty vychází z plošného odporu přibližně $0,3 \Omega$ na čtverec. Byla použita stejná teplota a doba spékání jako u experimentálních vzorků, která byla 120°C po dobu 1,5 hodiny, ale u experimentálních vzorků byl použit jiný počet trysek, a to 8.

Tabulka 6: Naměřené hodnoty odporu u sady 1 a sady 2 / pec 120°C , 1,5h

Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	Průměr	σ	$\Omega/\text{čt.}$
S1 [Ω]	53,2	58,1	57	55,4	71	76,2	74	73,1	64,75	9,02	1,08
S2 [Ω]	46,6	46,7	46,8	46,6	50	55	53,7	50,8	49,53	3,2	1,65



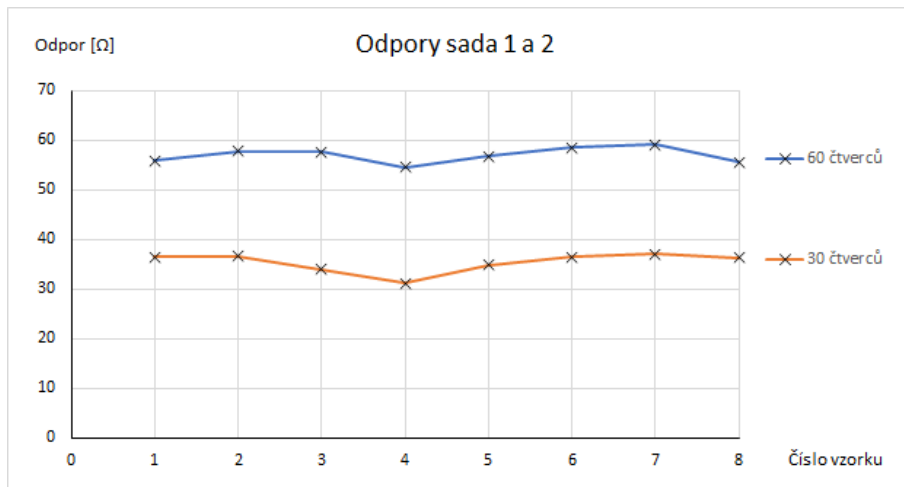
Obrázek 28: Lineární rezistory sada 1 a sada 2, verze 1.

Výsledky neodpovídají navrhovaným hodnotám a ani se od sebe neliší v poměru 2:1 podle návrhu. Problém byl nejspíše v okamžitém nevyjmutí vzorků z pece po skončení procesu a použití jiného počtu trysek u experimentálních vzorků. Další problém je v rozdílu naneseného objemu, kdy větší struktury reagují pomaleji.

Proto byla pro následující výrobky použita teplota 130°C po dobu 1 hodiny. Výsledky jsou zachyceny v následující tabulce 7 a na obrázku 29.

Tabulka 7: Naměřené hodnoty odporu u sady 1 a sady 2 / pec 130°C, 1h

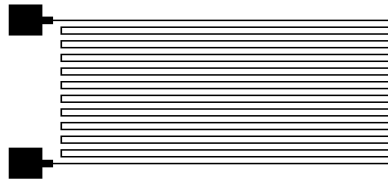
Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	Průměr	σ	$\Omega/\text{čt.}$
S1 [Ω]	55,8	57,7	57,6	54,6	56,8	58,5	59	55,6	56,95	1,43	0,95
S2 [Ω]	36,5	36,6	34	31,2	34,9	36,4	37	36,3	35,36	1,83	1,18



Obrázek 29: Lineární rezistory sada 1 a sada 2, verze 2.

Je patrné, že při zvýšení teploty se zlepšila stabilita vzorků což udává směrodatná odchylka a zlepšil se i poměr hodnot ku poměru čtverců. Tisk návrhu znázorněného na obrázku 27b trval přibližně 30 minut. Dále tištěné struktury s danou šířkou by tedy měly mít plošný odpor viz tabulka 7.

Pro další aplikace bylo třeba rezistorů s vyšším odporem kvůli meznímu kmitočtu u RC článků. Pro získání vyšších rezistivních hodnot je třeba zvětšit délku a zmenšit šířku, jinak by navržené struktury při výše použité šířce byly příliš rozsáhlé. K tomu poslouží meandrová struktura. Tiskárna dokáže jednou tryškou natisknout minimální velikost 25 μm , což postačuje. K tisku těchto cest byla použita tryška číslo 6. Tisk kontaktních ploch by jednou tryškou trval příliš dlouho, a proto tato zakončení byla tištěna více tryškami jako lineární rezistory. Byla vytištěna jedna sada meandrových rezistorů po 4 kusech. Následující obrázek 30b zachycuje návrh a realizaci, tabulka 8 parametry a tabulka 9 změřené hodnoty.



(a) Bitmapový obrázek návrhu



(b) Realizace návrhu

Obrázek 30: Meandrový rezistor

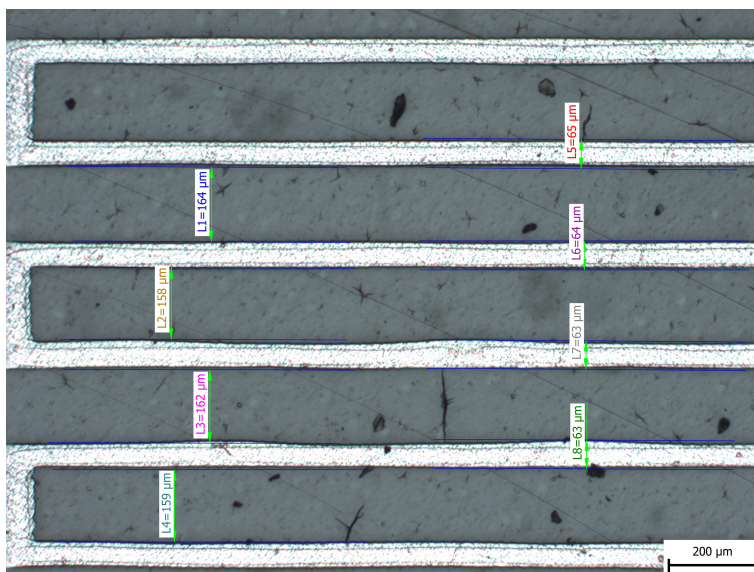
Tabulka 8: Rezistory meandrové - parametry

Délka [cm]	Tloušťka [μm]	Vrstvy	Doba tisku jedné vrstvy [min]
22,5	25	2	20

Tabulka 9: Naměřené hodnoty meandrových rezistorů / pec 130°C, 1h

Vzorek	1	2	3	4	Průměr	σ
R [$\text{k}\Omega$]	1,949	1,942	1,941	1,951	1,9457	$1 \cdot 10^{-5}$

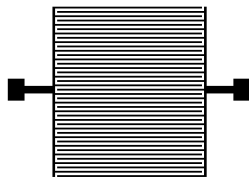
Ačkoliv čtyři vzorky a jedno měření není běžně dostatečný počet pro řádnou statistiku, tisk dalších vzorků by zabral mnoho času a opakovaným měřením by docházelo k dalšímu poškození vlivem měřicích hrotů. Tyto motivy meandrových rezistorů byly dále použity k realizaci RC a RLC obvodů. Na následujícím obrázku 31 je detail pořízený mikroskopem.



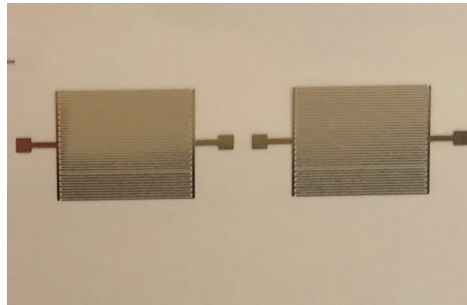
Obrázek 31: Meandrová struktura pod mikroskopem

4.3.2 Kondenzátor

První pokusy se týkaly realizace MIM kondenzátoru, ale problémem byla dielektrická vrstva, která po spékání nevytvořila vhodný povrch pro tisk následující vrstvy, a došlo tak ke zkratu. Optimalizace přípravy toho typu kondenzátorů se ukázala jako velmi časově náročná a proto se přešlo k realizaci výhradně interdigitálního typu. Návrh této struktury není tak přímočarý jako návrh MIM, který se odvíjí od rovnice (4). Byly navrženy dvě experimentální sady, kdy sada 2 se liší od sady 1 dvojnásobnou délkou žebra. Podle [13] a jiných zdrojů, závisí výsledná kapacita na počtu, délce a šířce žebíř. Všechny struktury obsahují 3 vrstvy, byly opět tištěny pomocí 6 trysek a spékány v peci při 130° po dobu 1 hodiny. Výrobky byly odměřeny na LCR metru Hameg HM8118. Následující obrázky 32 a 33 znázorňují návrh a realizaci, tabulka 10 rozměry těchto struktur, tabulka 11 naměřené hodnoty a obrázek 34 jejich zanesení do grafu.

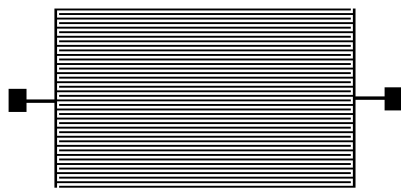


(a) Bitmapový obrázek návrhu

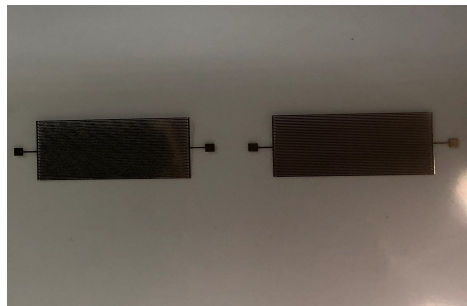


(b) Realizace návrhu

Obrázek 32: Interdigitální kondenzátory sada 1



(a) Bitmapový obrázek návrhu



(b) Realizace návrhu

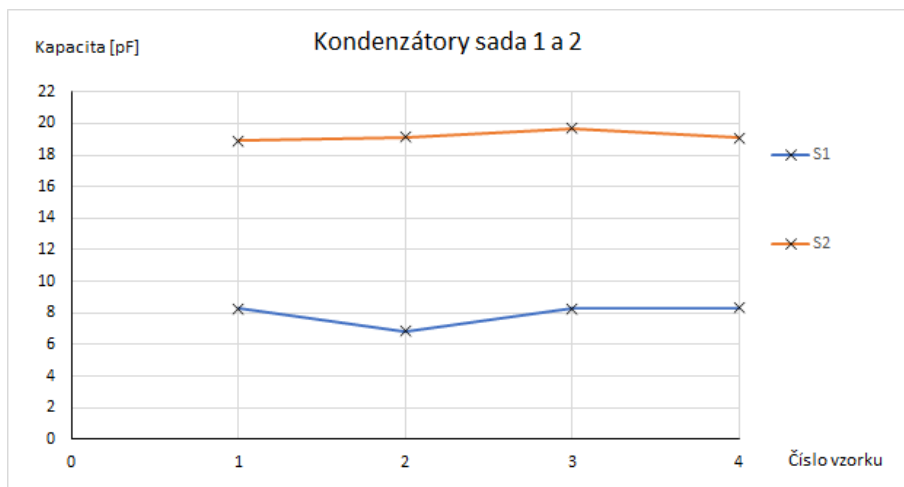
Obrázek 33: Interdigitální kondenzátory sada 2

Tabulka 10: Kondenzátory - rozměry sady 1 a sady 2

Sada	Délka žebra [cm]	Tloušťka ž. [μm]	Vrstvy	Počet ž.	Šířka mezery [μm]
1	2,5	100	3	40	200
2	1,25	100	3	40	200

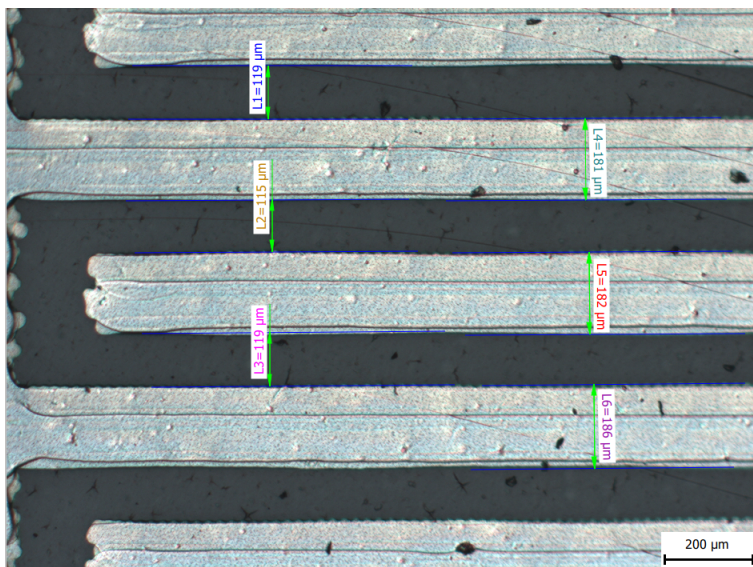
Tabulka 11: Hodnoty kondenzátorů u sady 1 a sady 2

Vzorek	1	2	3	4	Průměr	σ
S1 C [pF]	8,3	7,83	8,28	8,35	8,19	0,21
S2 C [pF]	18,91	19,12	19,71	19,07	19,2	0,303



Obrázek 34: Interdigitální kondenzátory sada 1 a sada 2

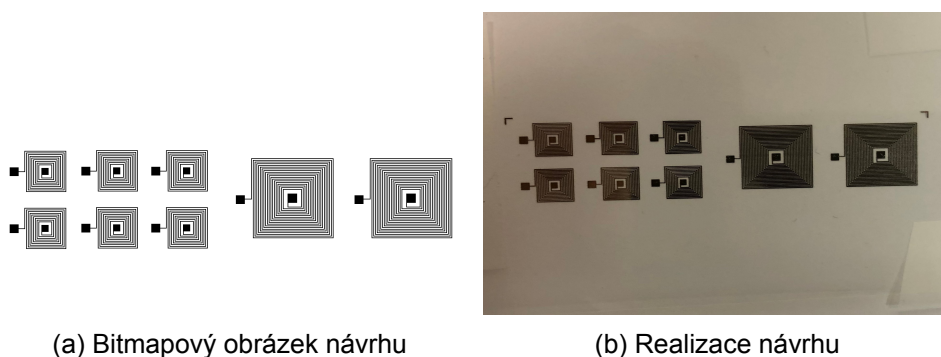
Dle navržených struktur lze usoudit, že dvojnásobná délka žebra odpovídá přibližně stejné změně kapacity. Tisk čtyř kondenzátorů s délkou žebra 1,25 cm trval přibližně 30 minut. Díky zachování výšky, tisk čtyř kondenzátorů s délkou žebra 2,5 cm trval přibližně jen o 5 minut déle. Následující obrázek 35 zachycuje detail na interdigitální kondenzátor.



Obrázek 35: Interdigitální kondenzátor pod mikroskopem

4.3.3 Induktor

Poslední pasivní součástkou je induktor. Byly navrženy dva typy, a to první s délkou vinutí přibližně 4 cm a velikostí 0,7x0,7 cm a druhý s délkou vinutí 16 cm a velikostí 1,4x1,4 cm. Od prvního typu bylo natištěno 12 kusů označované (a) a od druhého 4 kusy označované (b). Tisk probíhal pomocí 6 trysek jako výše zmíněný kondenzátor. Stejně jako kondenzátory tak i indukory byly měřeny LCR metrem Hameg HM8118. Obrázek 36 zachycuje návrh a realizaci induktorů a tabulka 12 jejich rozměry.



Obrázek 36: Tištěné indukory - spirála

Tabulka 12: Indukory - rozměry sady 1 a sady 2

Sada	Délka [cm]	Délka strany [cm]	Tloušťka [μm]	Mezera [μm]	Vrstvy	Závity
1	4	0,7	100	200	3	9
2	16	1,4	100	200	3	19

Při charakterizaci induktorů nedocházelo k ustálení hodnoty, která oscilovala i v několika řádech, a proto se tyto výsledky nedají považovat za věrohodné. I při zvýšení měřicí frekvence na 100kHz nešlo vzorky odměřit. To bylo nejspíše způsobeno vysokým parazitním odporem, který dosahoval hodnot až 4 k Ω . K dosažení stability by také mohla pomoci feritová vrstva zmíněná v kapitole 2.3. K určení alespoň přibližné hodnoty byla použita rovnice (13) [20]. Následující rovnice platí pro stejnou šířku mezery a nanesené vrstvy, což při použití posunu přibližně odpovídá.

$$L = 85 \cdot 10^{-10} l \cdot N^{\frac{5}{3}} \quad (13)$$

kde L je vlastní indukčnost, D je délka strany v cm a N počet závitů.

Při zadání hodnot pro indukctory 1,4x1,4 cm vyšla vlastní indukčnost přibližně $1,61 \mu H$.

Návrh induktorů byl zopakován, ale místo 3 vrstev bylo natištěno 6. Po natištění byly tyto vzorky v peci na 135° po dobu 1 hodiny. Tyto změny snížily parazitní odpor přibližně na polovinu a bylo již možné změřit vlastní indukčnost navržených induktorů při měřicí frekvenci 100kHz. Na následujících tabulkách 13 a 14 jsou změřené hodnoty.

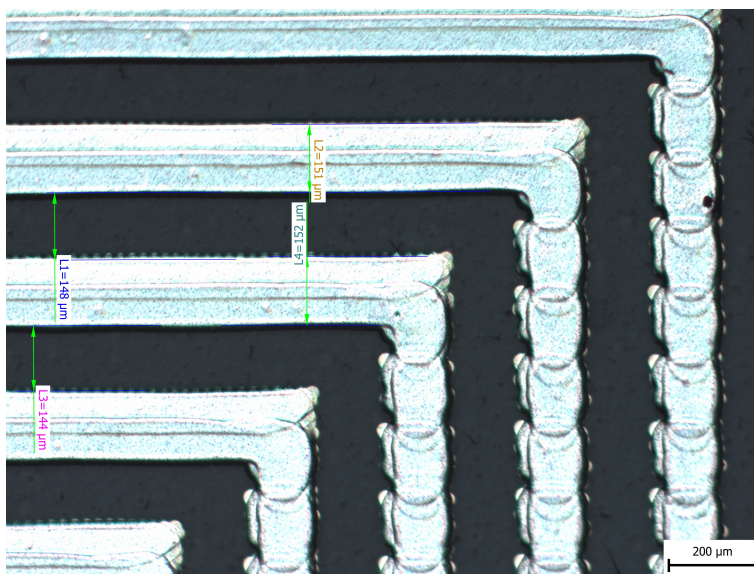
Tabulka 13: Naměřené hodnoty induktorů 4 cm - 6 vrstev

Vzorek	1	2	3	4	5	6	Průměr	σ
S1a [μH]	1,43	1,35	1,33	1,44	1,27	1,34	1,36	0,059
S1a [Ω]	447	466	483	438	476	475	464,2	16,3
S1b [μH]	1,16	1,12	1,08	1,1	1,12	1,1	1,11	0,025
S1b [Ω]	454	470	465	468	475	480	468,7	8,16

Tabulka 14: Naměřené hodnoty induktorů 16 cm - 6 vrstev

Vzorek	1	2	3	4	Průměr	σ
S2a,b [μH]	1,79	1,62	1,58	1,83	1,705	0,107
S2a,b [Ω]	1975	1937	1902	1941	1939	25,85

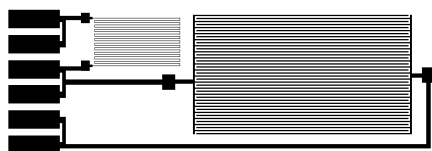
Vlastní indukčnost sice neodpovídá návrhu, kdy by vzor (b) měl mít téměř čtyřnásobnou hodnotu než vzor (a), ale teoreticky určená hodnota pro typ (b) se velice blíží naměřené. Motiv (b) byl dále použit k realizaci RLC. Následující obrázek 37 zachycuje detail navrženého induktoru.



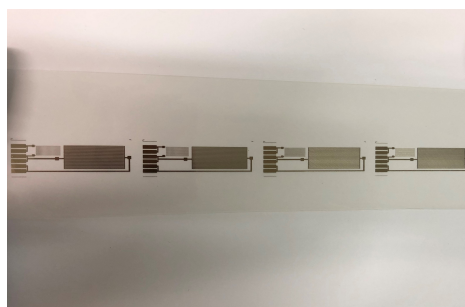
Obrázek 37: Induktor pod mikroskopem

4.4 RC obvod

K vytvoření RC obvodů byl použit meandrový rezistor s předpokládanou hodnotou odporu $2\text{ k}\Omega$ a oba interdigitální kondenzátory s hodnotami 19 pF a 9 pF . Mezní kmitočet sady 1 s 19 pF kondenzátorem by měl být přibližně $4,2\text{ MHz}$ a sady 2 s 9 pF přibližně $8,8\text{ MHz}$. Tisk probíhal stejně jako dílčí části zmíněné výše, a to rezistor tištěný jednou tryskou číslo 6 a zbytek pomocí šesti trysek. K odměření byl použit speciální 6 pinový konektor CLINCHER™ výrobce Amphenol[19], podle jehož rozměrů byly natištěny kontaktní plošky. Návrh umožňuje realizaci jak integračního tak derivačního článku podle zapojení vstupu a výstupu. Následující obrázky 38 a 39 zachycují návrh a realizaci, tabulka 15 určené hodnoty dle předešlých průměrných výsledků a tabulka 16 skutečné naměřené hodnoty.

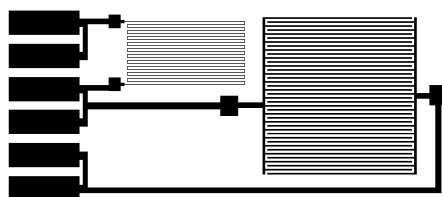


(a) Bitmapový obrázek návrhu



(b) Realizace návrhu

Obrázek 38: Tištěné RC - Sada 1 (2k/19p)



(a) Bitmapový obrázek návrhu



(b) Realizace návrhu

Obrázek 39: Tištěné RC - Sada 2 (2k/9p)

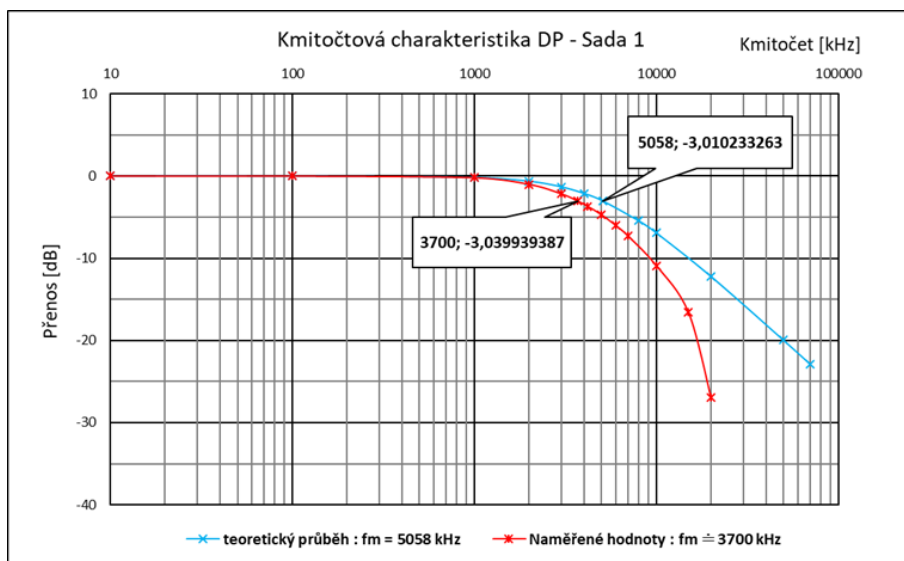
Tabulka 15: RC články - předpokládané parametry dle průměrných hodnot

Sada	R [kΩ]	C [pF]	τ [ns]	f_m [MHz]	Doba tisku sady [min]
1	1,946	19,2	37,36	4,26	90
2	1,946	8,19	15,93	9,98	85

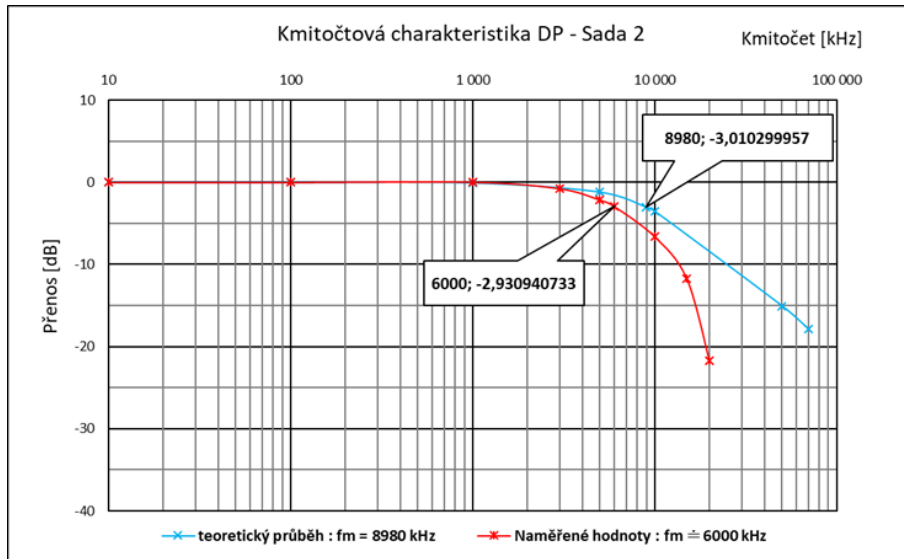
Tabulka 16: RC články - změřené parametry

Vzorek	1	2	3	4
Sada 1 R [kΩ]	1,65	1,59	1,9	1,95
Sada 1 R [pF]	19,1	18,62	20,4	20,2
Sada 2 R [kΩ]	1,76	1,958	2,09	2,07
Sada 2 C [pF]	10,07	9,55	10,47	10,3

Pomocí funkčního generátoru RIGOL DG1022 a osciloskopu AGILENT infinium 54833D byly změřeny kmitočtové charakteristiky vzorků číslo 1 obou sad. Napětí bylo nastaveno na 2 V_{pp} a na osciloskopu byla měřena efektivní hodnota. Sonda na výstupu byla nastavena na poměr 1/10 kvůli omezení parazitní kapacity. Ze získaných dat byly sestrojeny charakteristiky na obrázcích 41 a 40, kde je porovnáván naměřený a teoretický průběh.



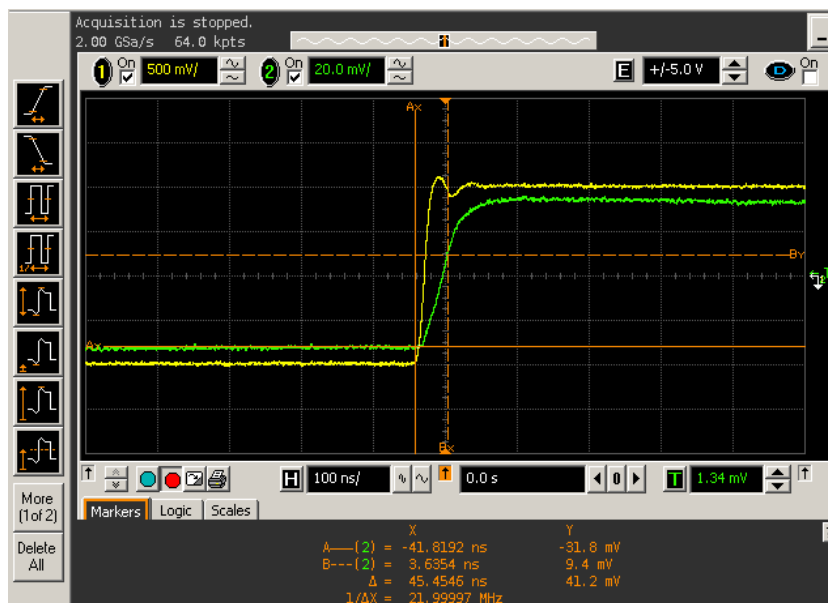
Obrázek 40: Kmitočtová charakteristika DP - sada 1



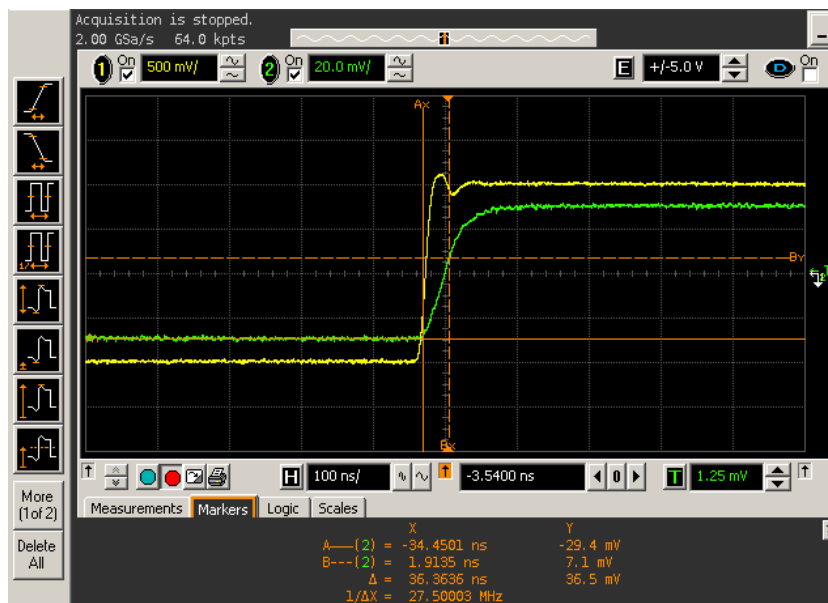
Obrázek 41: Kmitočtová charakteristika DP - sada 2

Z grafů je patrné, že mezní kmitočet je u zrealizovaných článků nižší, než by měl být podle naměřených hodnot. To je nejspíše následkem zbylých parazitních jevů, konkrétně paralelní kapacity. Časová konstanta je přibližně 1,36krát vyšší u sady 1 a 1,78krát vyšší u sady 2, než skutečné hodnoty.

Dále byla za použití osciloskopu změřena časová konstanta τ obou článků a průběhy jsou vyfoceny na obrázcích 42 a 43, kde je za pomoci kurzorů měřena zmíněná časová konstanta.



Obrázek 42: Časová konstanta sady 1 - 45,45 ns

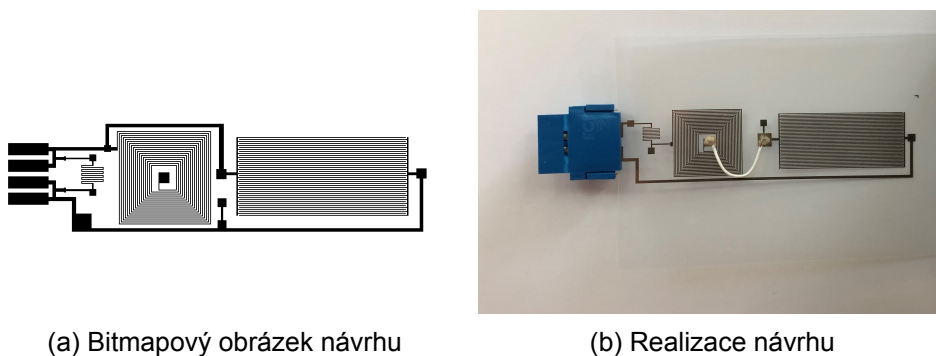


Obrázek 43: Časová konstanta sady 2 - 35,36 ns

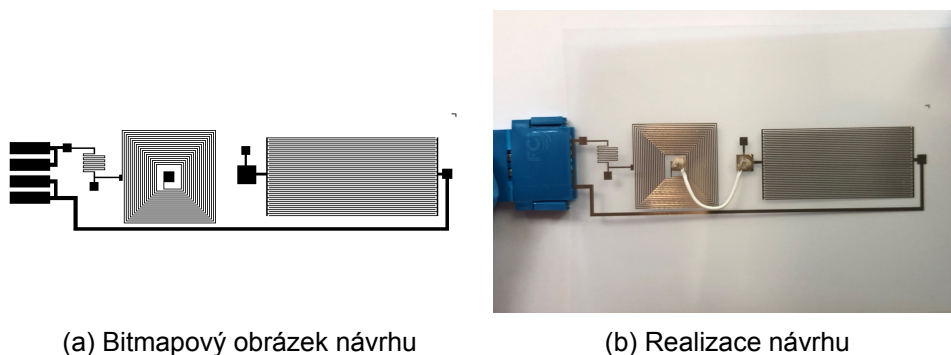
Z obrázků je patrné, že u sady 1 se potvrdila časová konstanta a koresponduje s naměřeným mezním kmitočtem. U sady 2 došlo k předpokládané nižší hodnotě časové konstanty ale naměřená je mírně vyšší než předpokládaná. Pro lepší výsledky v dalším návrhu je třeba kondenzátorů s vyšší kapacitou, dostatečně velkou vůči parazitní hodnotě. K tomu ale je třeba využít MIM struktury, jelikož interdigitální kondenzátory s těmito vyššími hodnotami by byli příliš rozsáhlé.

4.5 RLC obvod

Byly navrženy dvě sady RLC obvodů a to PRO a SRO se stejnými parametry, a to meandrovým rezistorem s odporem přibližně 100Ω , interdigitálním kondenzátorem s kapacitou 19 pF a induktorem s rozměry $1,4 \times 1,4$ s 6 vrstvami. Tisk probíhal 6 tryskami natištěním 3 vrstev celého motivu a následně dotištěním 3 vrstev induktoru. Následující obrázky 44 a 45 zachycují návrh a realizaci a tabulka 17 určené hodnoty dle předešlých výsledků.



Obrázek 44: Tištěné RLC - PRO



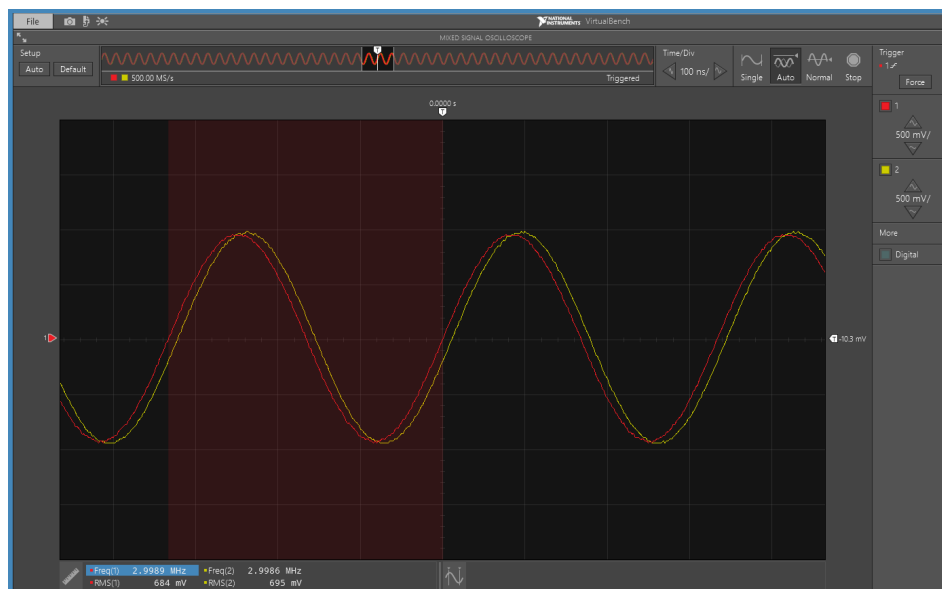
Obrázek 45: Tištěné RLC - SRO

Tabulka 17: RLC obvody - parametry

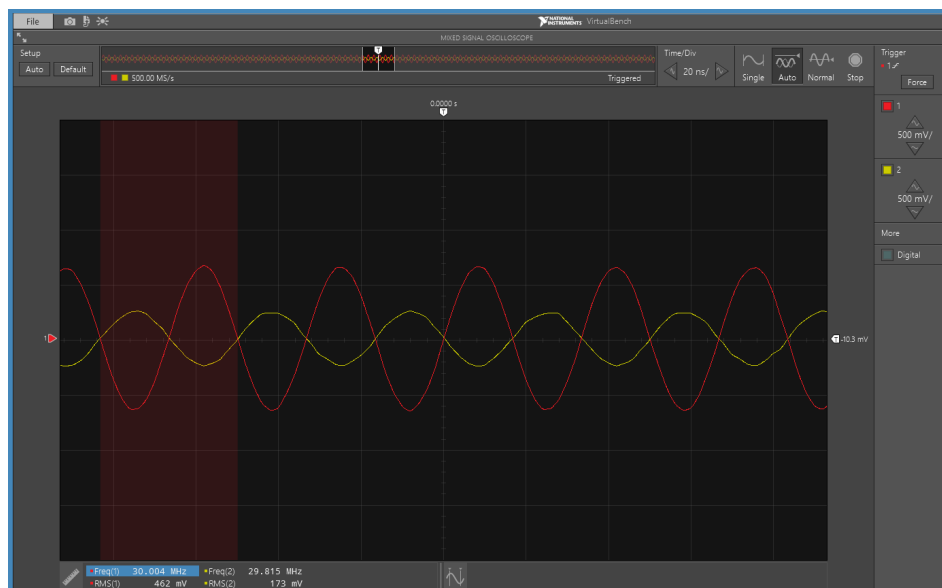
R [k Ω]	L [μH]	C [pF]	f_0 [MHz]	Doba tisku sady [min]
87,5	1,705	19,2	27,82	65

Jelikož se nezdařila realizace MIM kondenzátoru, tak ani nebylo možné použít přemostění vnitřního kontaktu induktoru přes závity nanášením nevodivé vrstvy. Místo toho byl použit poniklovaný měděný drátek AWG 34/1/34 NPC o průměru 160 μm s izolací. K vytvoření vodivého kontaktu bylo použito vodivé lepidlo ELPOX ER 55MN. Jeho výhodou je přesné dávkování a nízký odpor. Po nanesení je třeba jej dát do pece na 150°C po dobu 20 minut.

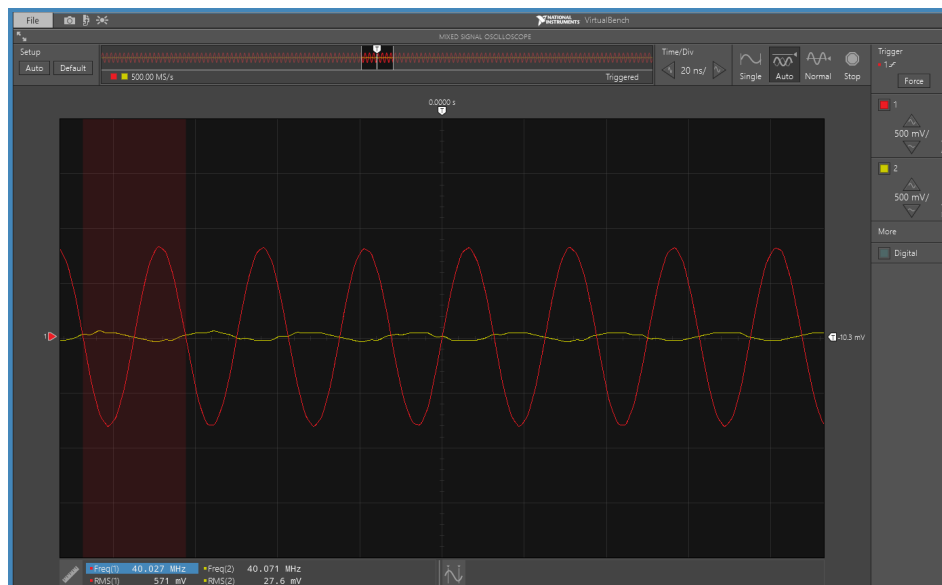
Jelikož nebyl k dispozici měřicí přístroj schopný změřit impedanci v řádech MHz, k proměření PRO a SRO byl použit funkční generátor KEYSIGHT 3390 s nastavitelným kmitočtem až 50 MHz a osciloskopem NI VB-8012 bylo měřeno napětí. Jelikož měření napětí a impedance není totéž, byly změřeny pouze klíčové body a to 3, 30, 40 a 50 MHz. První kmitočet je nízký a signál z RLC se téměř rovná signálu z generátoru. Druhý je kmitočet, kdy fáze mezi signály je 180°. 40 MHz odpovídá nejnižší hodnotě signálu z obvodu a dal by se brát jako rezonanční a 50 MHz je maximální hodnota z generátoru, kdy signál opět roste. Na následujících obrázcích 46, 47, 48 a 49 lze vidět získané hodnoty, kde červená sinusovka je signál z generátoru a žlutá signál z RLC obvodu.



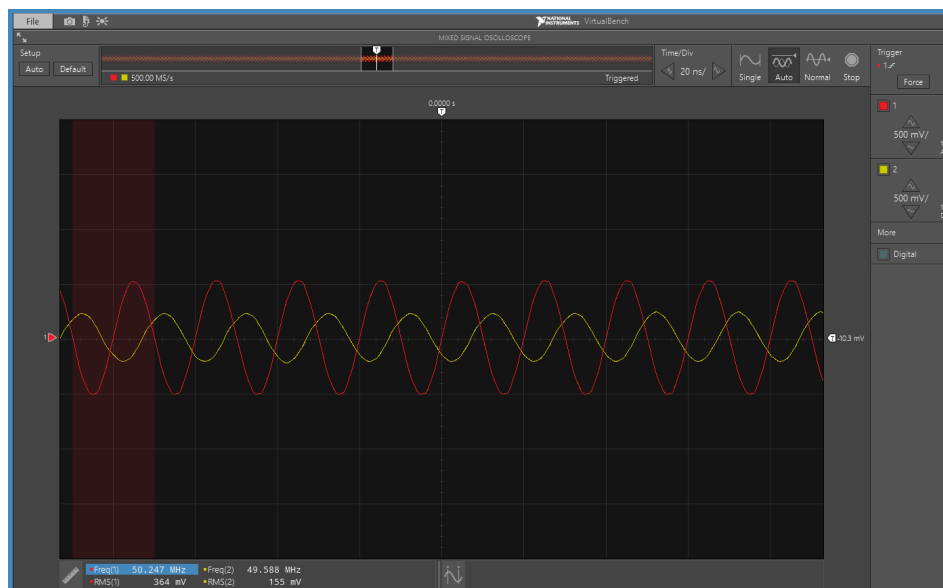
Obrázek 46: Nabíjení a vybíjení kondenzátoru sady 1



Obrázek 47: Nabíjení a vybíjení kondenzátoru sady 1



Obrázek 48: Nabíjení a vybíjení kondenzátoru sady 1



Obrázek 49: Nabíjení a vybíjení kondenzátoru sady 1

4.6 Návrh optimalizace

Optimalizace RC a RLC obvodů souvisí s optimalizací jednotlivých prvků, ze kterých se skládají. K docílení nižších mezních kmitočtů u RC článku by se nejlépe dospělo vyšším odporem a to konkrétně použitím PEDOT:PSS. Ten po přidání určitého množství ethylenglykolu sníží svoji rezistivitu na řádově $k\Omega$ viz [9].

Další možností by bylo použití MIM kondenzátoru. Nicméně realizace tohoto typu kondenzátoru je technologicky náročnější a od toho se odvíjí i časová náročnost (v řádu jednotek hodin). K docílení nepropustné vrstvy mezi elektrodami by mohlo pomoci několikanásobné natištění izolační vrstvy a spékání po každém nanesení. Získání přibližně dvojnásobných hodnot u obou prvků by mělo výrazně omezit vliv parazitních hodnot při měření.

Co se optimalizace RLC obvodů týče, stejně jako u RC obvodů i zde je nutné zvýšit žádané parametry, konkrétně vlastní indukčnost induktoru a kapacitu kondenzátoru. Při zachování rozměrů induktoru se zvýšení vlastní indukčnosti docílí nejsnáze zmenšením mezery mezi závity, čímž se zvýší jejich počet. Dále by bylo vhodné natisknout ještě další vrstvy pro další snížení odporu. Tímto způsobem by se teoreticky dalo docílit hodnoty okolo 3 μH a při použití MIM kondenzátoru o hodnotě 50 pF by se rezonanční kmitočet posunul přibližně na 13 MHz, což je již hodnota dosažitelná na většině funkčních generátorů a tím by se velice usnadnila charakterizace.

5 Závěr

Cílem této práce byl tisk pasivních elektronických součástek pomocí technologie inkjet a seznámení se s touto technologií. Po seznámení se s materiálovou tiskárnou zahrnující přípravu inkoustu, ovládání softwaru, návrhu a konverzí dat pro tisk a nastavení optimálních parametrů tisku byly vytištěny rezistory a testoval se jejich odpor v závislosti na délce, šířce a počtu použitých trysek. Nejlepších výsledků se dosáhlo za použití 6 trysek, což bylo optimum pro dobu a kvalitu tisku. Pro budoucí využití však bylo nutné natisknout rezistor s minimální hodnotou $1\text{ k}\Omega$, čehož se úspěšně dosáhlo natištěním meandrové struktury.

Další součástí byla kondenzátor struktury MIM, která byla často použita v literatuře. Při experimentálním návrhu ale došlo k proniknutí vrchní vodivé vrstvy skrze izolační a muselo se přejít k struktuře interdigitální. Ta sice nedosahuje takových kapacit jako MIM struktura, ale její tisk probíhal s nízkou časovou náročností, bez problémů a s vysokou konzistencí různých vzorků do 20 pF .

Poslední probíhal tisk induktoru, kde byla zvolena pravoúhlá spirála k dosažení co nejvyšší vlastní indukčnosti a kvality tisku. První vzorky za použití 3 vrstev stříbra vykazovaly vysoký sériový odpor a při měření nedocházelo k ustálení hodnoty. K snížení odporu byly natištěny další 3 vrstvy (celkově 6 vrstev stříbra), což vedlo k úspěšnému snížení odporu a následnému odměření. Hodnota natištěných induktorů byla přibližně $1,6\text{ }\mu\text{H}$.

K realizaci RC článků byl použit meandrový rezistor a oba navržené interdigitální kondenzátory. Byly změřeny kmitočtové charakteristiky a změřena časová konstanta. Dosažené výsledky souhlasili s předpokládanými průběhy, kde za odchylky mohla převážně kapacita měřicích vodičů, která je velice blízká hodnotě natištěného kondenzátoru.

Byly natištěny dva typy RLC obvodů a to SRO a PRO. S použitím výše zmíněných prvků se rezonanční kmitočet pohybuje nad 20 MHz , což je maximální hodnota pro funkční generátory nacházejících se v laboratoři. K proměření byl zapůjčen funkční generátor do 50 MHz a s dostupným osciloskopem bylo měřeno napětí v tomto frekvenčním rozsahu. Ačkoliv se měření napětí nerovná měření impedance, z naměřených dat byl zachycen trend poklesu do 40 MHz a opětovný růst od této hodnoty.

V kapitole Návrh optimalizace zmiňuji kroky vedoucí k zlepšení parametrů jednotlivých součástek, které povedou k zvýšení potřebných hodnot a tím dojde k snížení klíčových kmitočtů pro RC a RLC obvody.

Reference

- [1] KANTOLA, Vesa, Jakke KULOVESI, Lauri LAHTI, Ranran LIN a Marina ZAVODCHIKOVA, 2009. Printed Electronics, Now and Future. ISBN 9789522480781.
- [2] LEE, Gwangyong, Gyoujin CHO, Namsoo LIM, Minhun JUNG, Jaeyoung KIM, Junseok KIM, Hwiwon KANG, James M. TOUR, Chamin LIM, Jinsoo NOH, Kyunghwan JUNG a Ashley D. LEONARD, 2010. All-Printed and Roll-to-Roll-Printable 13.56-MHz-Operated 1-bit RF Tag on Plastic Foils. IEEE Transactions on Electron Devices [online]. B.m.: IEEE, 57(3), 571–580. ISSN 0018-9383. Dostupné z: doi:10.1109/ted.2009.2039541
- [3] BUSKENS, Pascal, Joris DE RIET, Zeger VROON, Marieke BURGHOORN, Dorrit ROOSEN-MELSEN, Iryna YAKIMETS a Sami SABIK, 2013. Single Layer Broadband Anti-Reflective Coatings for Plastic Substrates Produced by Full Wafer and Roll-to-Roll Step-and-Flash Nano-Imprint Lithography. Materials [online]. 6(9), 3710–3726. Dostupné z: doi:10.3390/ma6093710
- [4] ALAMÁN, Jorge, Raquel ALICANTE, Jose Ignacio PEÑA a Carlos SÁNCHEZ-SOMOLINOS, 2016. Inkjet printing of functional materials for optical and photonic applications. Materials [online]. 9(11). ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma9110910
- [5] *Handbook of Industrial Inkjet Printing*, Germany: Wiley-VCH, 2018. Edited by Werner Zapka Handbook of Industrial Inkjet Printing. ISBN 9783527338320. Dostupné z: <http://dnb.d-nb.de>
- [6] *Novele™ IJ-220 Printed Electronics Substrate-Inkjet Receptive*. [online]. Novacentrix. Dostupné z: https://store.novacentrix.com/v/vspfiles/assets/images/novele%20ij-220_2212.2.pdf
- [7] HALONEN, Eerik, Tanja VIIRU, Kauko ÖSTMAN, Ana Lopez CABEZAS a Matti MANTYSALO, 2013. Oven sintering process optimization for inkjet-printed Ag Nanoparticle ink. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology [online]. B.m.: IEEE, 3(2), 350–356. ISSN 21563950. Dostupné z: doi:10.1109/TCPMT.2012.2226458

- [8] *Dimatix Material Printer DMP-2850* [online]. [vid.12.Dubna 2019]. Dostupné z: <https://www.printingnews.com/digital-inkjet/product/12232165/fujifilm-dimatix-inc-dimatix-material-printer-dmp2850>
- [9] KANG, Byung Ju, Chang Kyu LEE a Je Hoon OH, 2012. All-inkjet-printed electrical components and circuit fabrication on a plastic substrate. *Microelectronic Engineering* [online]. B.m.: Elsevier B.V., 97(4023), 251–254. ISSN 01679317. Dostupné z: doi:10.1016/j.mee.2012.03.032
- [10] CORREIA, V., K. Y. MITRA, H. CASTRO, J. G. ROCHA, E. SOWADE, R. R. BAUMANN a S. LANCEROS-MENDEZ, 2018. Design and fabrication of multilayer inkjet-printed passive components for printed electronics circuit development. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. B.m.: The Society of Manufacturing Engineers, 31, 364–371. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2017.11.016
- [11] SUPERVISOR:, Eloi Ramon i Garcia a THESIS, 2014. *Inkjet Printed Microelectronic Devices and Circuits*. (September), 314.
- [12] CORREIA, V., K. Y. MITRA, H. CASTRO, J. G. ROCHA, E. SOWADE, R. R. BAUMANN a S. LANCEROS-MENDEZ, 2018. Design and fabrication of multilayer inkjet-printed passive components for printed electronics circuit development. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. B.m.: The Society of Manufacturing Engineers, 31, 364–371. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2017.11.016
- [13] SHLYKEVICH, Alexey, Tomas BYSTRICKY a Tomas BLECHA, 2016. High Frequency Properties of RF Planar Passive Components. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science* [online]. (1), 48–53. ISSN 20645260. Dostupné z: doi:10.3311/ppee.9734
- [14] CASTRO, H. F., V. CORREIA, E. SOWADE, K. Y. MITRA, J. G. ROCHA, R. R. BAUMANN a S. LANCEROS-MÉNDEZ, 2016. All-inkjet-printed low-pass filters with adjustable cutoff frequency consisting of resistors, inductors and transistors for sensor applications. *Organic Electronics: physics, materials, applications* [online]. 38, 205–212. ISSN 15661199. Dostupné z: doi:10.1016/j.orgel.2016.08.025
- [15] ASHEBIR, Getinet, Serges ZAMBOU, Ulrich MÄNNL, Rhyme SETSHEDI, Margit HÄRTING a David T. BRITTON, 2016. Fully

screen printed LRC resonant circuit. *Microelectronic Engineering* [online]. B.m.: Elsevier B.V., 162, 6–11. ISSN 01679317. Dostupné z: doi:10.1016/j.mee.2016.04.021

- [16] SHLYKEVICH, Alexey, Tomas BYSTRICKY a Tomas BLECHA, 2016. High Frequency Properties of RF Planar Passive Components. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science* [online]. (1), 48–53. ISSN 20645260. Dostupné z: doi:10.3311/ppee.9734
- [17] silver_inkjet_ink @ anapro.com. (n.d.). Retrieved from http://anapro.com/eng/product/silver_inkjet_ink.html
- [18] POVOLNÝ Vojtěch, 2017. Příprava organických a tištěných elektronických součástek. [vid. 2.3.2019]
- [19] *CLINCHER conector for flexible Circuitry*[online]. Amphenol. [vid 12. 5. 2019]. Dostupné z: <http://www.heilind.com/products/amphenol/fci/news/FCI%20Flex%20Clincher.pdf>
- [20] *Inductor Sizing Equation*[online]. [vid. 26. Dubna 2019]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/reference/chpt-1/inductor-sizing-equation/>
- [21] *Datasheet tiskárna*[online]. [vid. 22. Března 2019]. Dostupné z: https://www.fujifilmusa.com/shared/bin/DMP-2831_Datasheet_05-13.pdf
- [22] FUJIFILM DIMATIX INC. FUJIFILM Dimatix Ink Tutorial. 2008

A Příloha

A.1 Vybavení laboratoře

Níže jsou uvedené fotografie zařízení v laboratoři Nanolit a Cemis, kde byly výrobky této práce vyrobeny a charakterizovány.



Obrázek 50: Tiskárna Fujifilm Dimatix 2831



Obrázek 51: Sušárna Memmert UF30plus



Obrázek 52: Flow box s odvětráním



Obrázek 53: Osciloskop Agilent infiniium 54833D



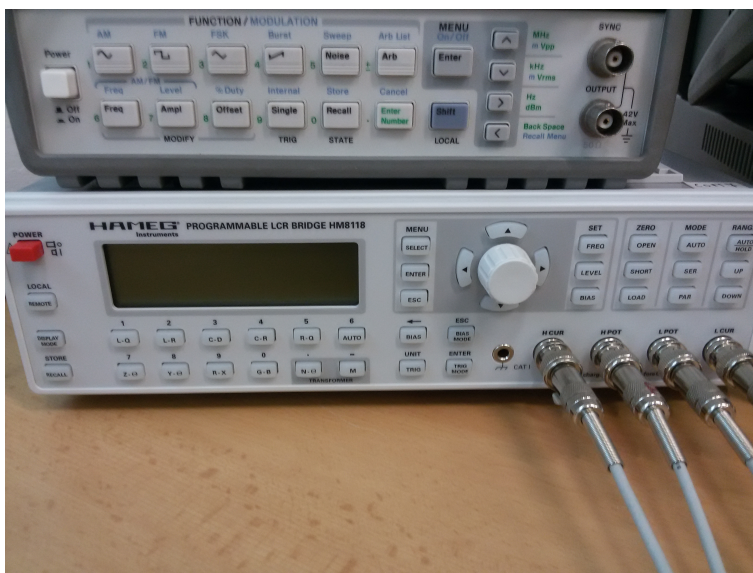
Obrázek 54: Osciloskop NI VB-8012



Obrázek 55: Multimetr KEYSIGHT 34465A



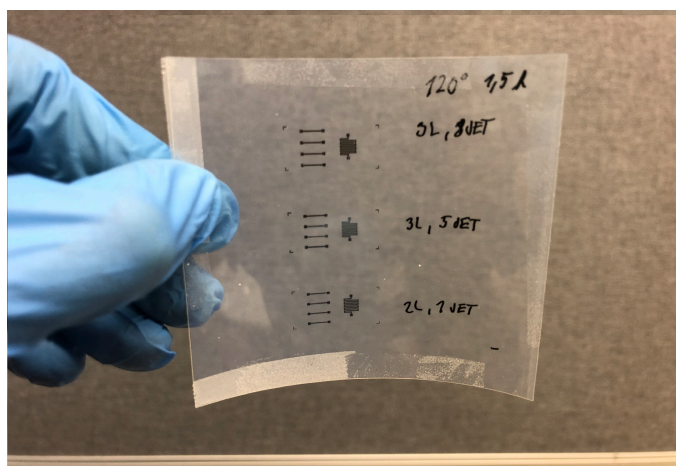
Obrázek 56: Funkční generátor RIGOL DG1022



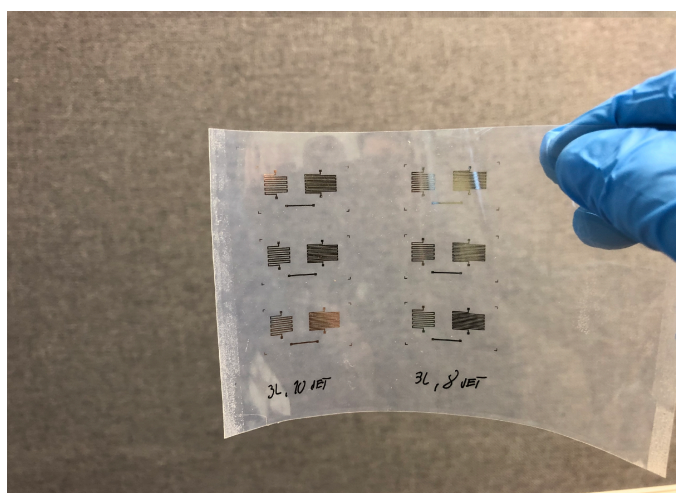
Obrázek 57: LCR metr Hameg HM8118

A.2 Experimenty

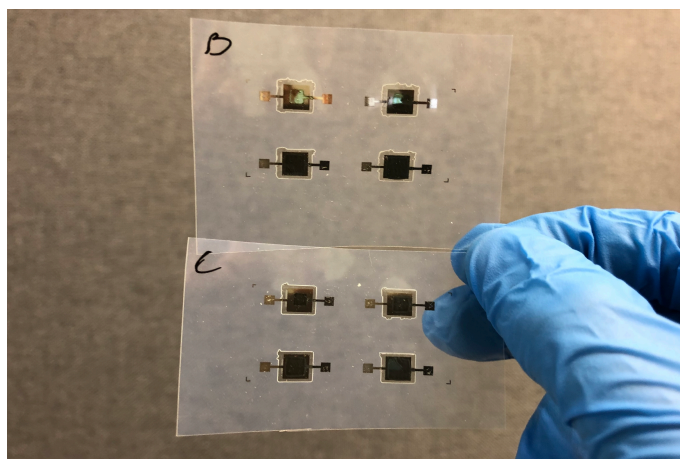
Zde jsou natištěné experimentální vzorky, které sloužily k dalšímu návrhu.



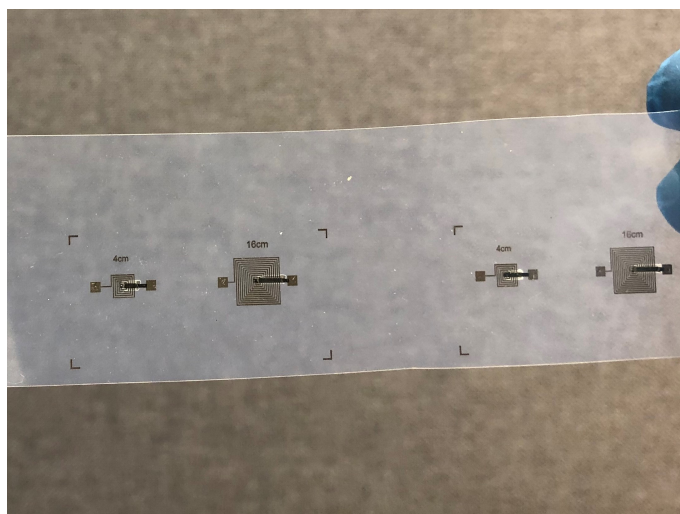
Obrázek 58: Experimentální rezistory 1



Obrázek 59: Experimentální rezistory 2

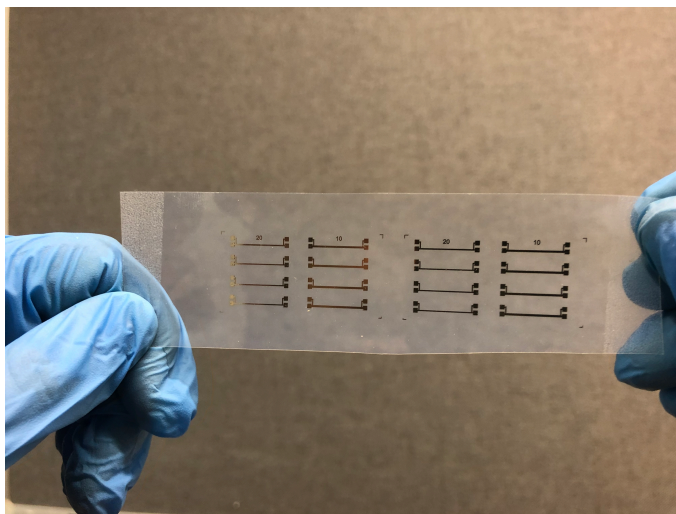


Obrázek 60: Experimentální MIM kondenzátory



Obrázek 61: Experimentální přemostění induktorů

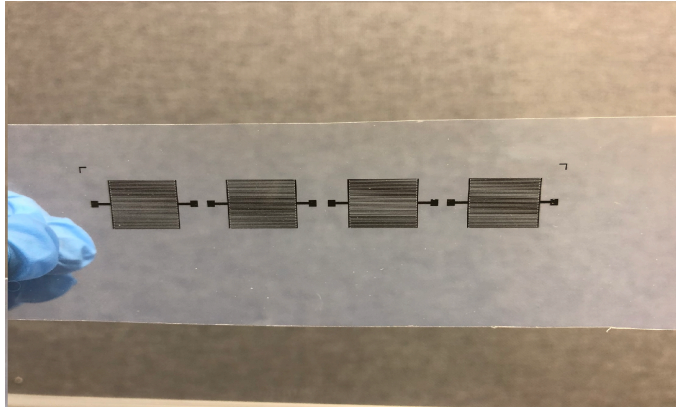
A.3 Ukázky natištěných struktur



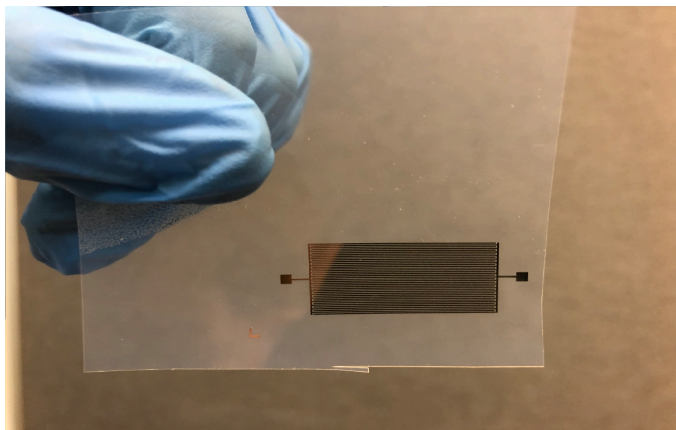
Obrázek 62: Lineární rezistory



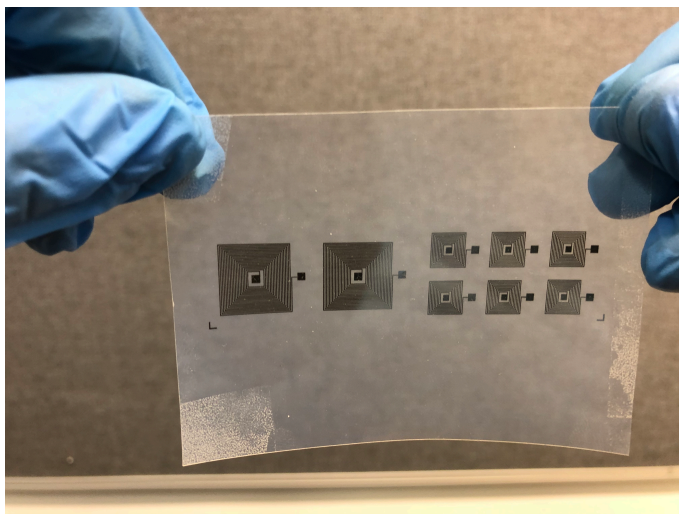
Obrázek 63: Meandrové rezistory



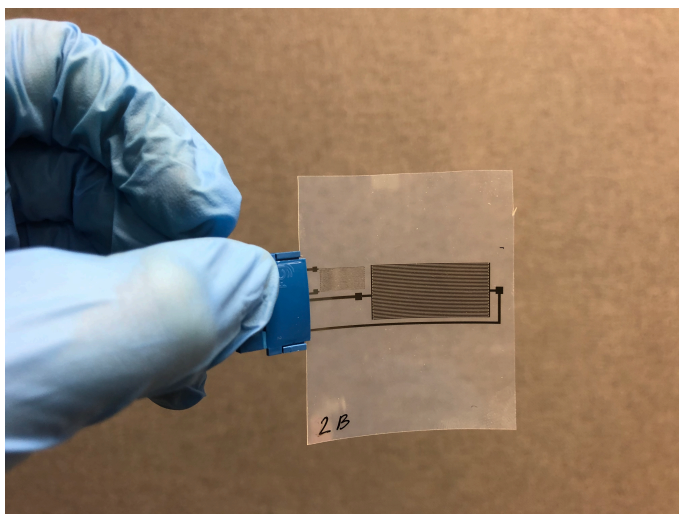
Obrázek 64: Interdigitální kondenzátory - 9 pF



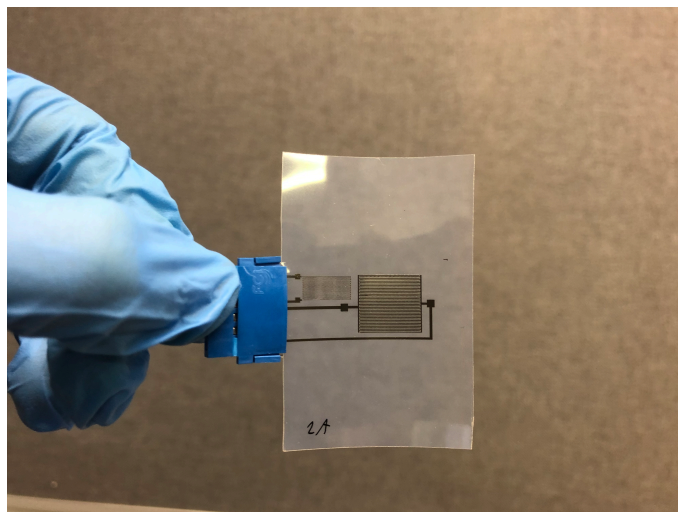
Obrázek 65: Interdigitální kondenzátory - 19 pF



Obrázek 66: Spirálové induktory



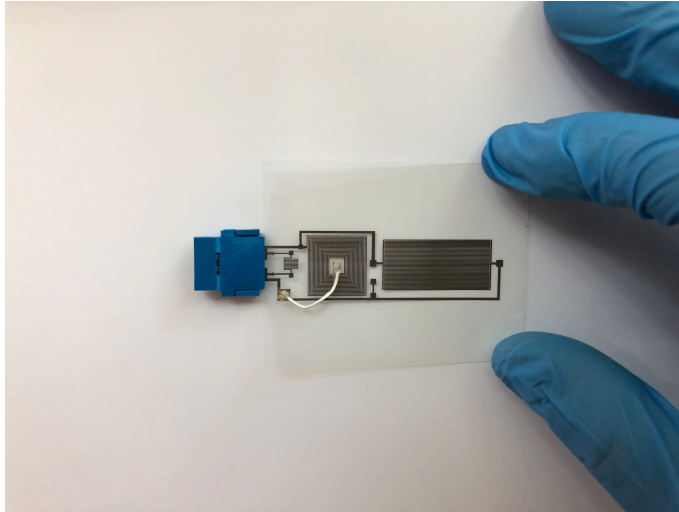
Obrázek 67: RC článek Sada 1



Obrázek 68: RC článek sada 2



Obrázek 69: RLC obvod - SRO



Obrázek 70: RLC obvod - PRO