

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv prostředí na parametry tištěných elektronických
součástek**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav HARANT**
Osobní číslo: **E14N0006P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Vliv prostředí na parametry tištěných elektronických součástek**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

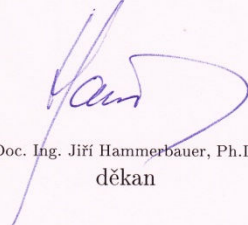
1. Seznamte se s problematikou návrhu planárních tištěných elektronických součástek.
2. Navrhněte testovací vzorky tištěných elektronických součástek.
3. Navrhněte postup a metody testování vlivu prostředí na tištěné elektronické součástky.
4. Proměřte elektrické parametry tištěných elektronických součástek v závislosti na parametrech okolního prostředí.
5. Proveďte vyhodnocení naměřených údajů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

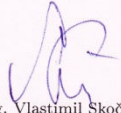
1. **Hoffmann K.: Planární mikrovlnné obvody**
2. **Záhlava V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů**
3. **Internetové zdroje**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Blecha, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku návrhu planárních pasivních elektronických součástek. V této práci jsou také popsány některé způsoby výroby těchto součástek. Hlavní částí této diplomové práce je návrh postupu a metody testování vlivu okolního prostředí na elektrické parametry planárních pasivních elektronických součástek. Dále bylo provedeno změření a vyhodnocení naměřených údajů těchto součástek.

Klíčová slova

Kapacitor, induktor, sítotisk, šablonový tisk, Aerosol Jet Printing, návrh elektronických součástek, tištěné elektronické součástky.

Abstract

This diploma thesis is focused on the design of planar passive electronic components. This thesis also describes certain methods for producing these components. The main part of this thesis is the design of process and methods for testing the influence of the environment on the electrical parameters of planar passive electronic components. Furthermore, measuring and evaluation of measured data of these components was done.

Key words

Capacitors, inductor, serigraphy, stencil printing, Aerosol Jet Printing, design of electronic components, printed electronic components.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 15.5.2016

Bc. Jaroslav Harant

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Tomášovi Blechovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, komentáře a především za pomoc při měření praktické části této práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 TECHNOLOGIE VYTVÁŘENÍ TIŠTĚNÝCH ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK	11
1.1 TLUSTOVRSTVÉ TECHNOLOGIE.....	11
1.1.1 <i>Sítotisk</i>	11
1.1.2 <i>Šablonový tisk</i>	16
1.2 TENKOVRSŤVÉ TECHNOLOGIE.....	17
1.2.1 <i>Metoda napařování</i>	17
1.2.2 <i>Metoda naprašování</i>	18
1.3 AEROSOL JET PRINTING (AJP)	20
2 PLANÁRNÍ TECHNOLOGIE	23
2.1 INDUKTORY.....	23
2.1.1 <i>Plochá smyčka</i>	23
2.1.2 <i>Čtvercová spirála</i>	26
2.1.3 <i>Meandrový induktor</i>	29
2.2 KAPACITORY	33
2.2.1 <i>Interdigitální kapacitor</i>	33
2.2.2 <i>Jednovrstvý kondenzátor MIS</i>	39
3 PRAKTICKÁ ČÁST	42
3.1 NÁVRH VZORKŮ PRO TESTOVÁNÍ	42
3.2 TESTOVÁNÍ VZORKŮ.....	43
3.3 POSTUP PŘI TESTOVÁNÍ VZORKŮ.....	44
3.4 VYHODNOCENÍ TESTOVÁNÍ.....	47
3.4.1 <i>Vyhodnocení testování z měřicího přístroje Agilent 4287A RF</i>	49
3.4.2 <i>Vyhodnocení testování z LCR měřiče MOTECH MT 4090</i>	51
ZÁVĚR	53
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	54
SEZNAM PŘÍLOH	I
PŘÍLOHY	II
PŘÍLOHA A.....	II
<i>Induktory z velmi krátkých úseků vedení</i>	II
PŘÍLOHA B.....	IV
<i>Kapacitory z velmi krátkých úseků vedení</i>	IV
PŘÍLOHA C.....	VI
<i>Mezera v mikropásku</i>	VI
<i>Tenkvrstvý kapacitor</i>	VI
<i>SMD kapacitor</i>	VII
PŘÍLOHA D	VIII
<i>Rezistory</i>	VIII
PŘÍLOHA E.....	X
<i>Agilent 4287A RF</i>	X
<i>LCR měřič MOTECH MT 4090</i>	XI
PŘÍLOHA G - GRAFY – AGILENT 4287A RF	XII
PŘÍLOHA H - GRAFY LCR MĚŘIČ MOTECH MT 4090	XXIV

Seznam symbolů a zkratk

AJP..... Aerosol Jet Printing

UI..... Virtual impactor

UA..... Ultrazvukový atomizér

PA..... Pneumatický atomizér

T..... Tryska

S..... Shutter

RICE..... Regionální inovační centrum elektrotechniky

MIS..... Metal – Insulator – Semiconductor

CAD..... Computer – Aided - Design

LCR..... Indukčnost – Kapacita – Odpor

.CSV..... Comma-Separated Values

USB..... Universal Serial Bus

SMD..... Surface Mount Device

Ag..... Stříbro

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku návrhu a výroby planárních tištěných elektronických součástek. Hlavním cílem práce je navržení postupu a metody testování vlivu prostředí na elektrické parametry těchto součástek.

První část této práce pojednává o technologii vytváření tištěných elektronických součástek. Jsou zde uvedeny nejrozšířenější způsoby výroby těchto součástek, ale je zde uveden i princip nové patentované technologie AJP (Aerosol Jet Printing). Druhá část práce se zabývá problematikou planární technologie, jsou zde především uvedena možná provedení planárních tištěných součástek a především jejich návrhy, které jsou dále použity do praktické části. Poslední část (třetí) se zabývá postupem a metodou testování vlivu prostředí na planární tištěné elektronické součástky.

Cílem této práce je seznámit se s problematikou návrhu planárních tištěných elektronických součástek, ale i součástky navrhnout jako testovací vzorky pro testování vlivu prostředí na tyto součástky. Provedení výroby elektronických součástek pomocí tištěné technologie je poměrně nové a z hlediska testování vlivu okolního prostředí na elektrické parametry těchto součástek je ne zcela ověřené.

V této práci se ověří elektrické parametry tištěných elektronických součástek v závislosti na parametrech okolního prostředí. Konkrétně byly testovací vzorky vystaveny konstantnímu vlhkému teplu a poté byly změřeny a vyhodnoceny jejich elektrické parametry. Tyto parametry jsou důležité z hlediska trvanlivosti a bezpečnosti použití těchto součástek v různém prostředí.

1 Technologie vytváření tištěných elektronických součástek

V této kapitole uvedu nejrozšířenější způsoby výroby tištěných elektronických součástek, ale i novou tiskařskou technologii AJP – Aerosol Jet Printing.

Mezi nejčastěji používané způsoby výroby tištěných elektronických součástek patří vrstvé technologie, které se dále rozdělují na:

- Tlustovrstvé technologie
 - Sítotisk
 - Šablonový tisk
- Tenkovrstvé technologie
 - Metoda napařování
 - Metoda naprašování

Hlavním rozdílem tlustovrstvé technologie od tenkovrstvé je v tloušťce, která bývá od 1 μm výše.

1.1 Tlustovrstvé technologie

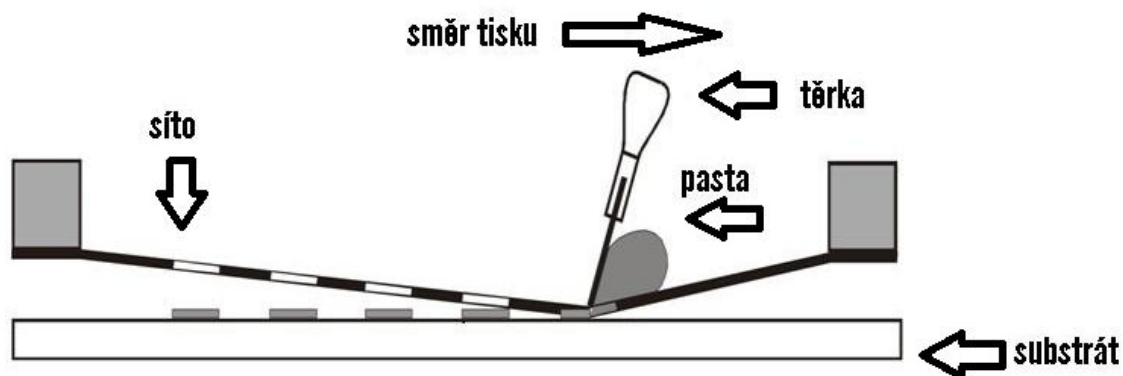
Mezi tlustovrstvé technologie patří sítotisk a šablonový tisk. Obě metody jsou velmi podobné.

Tyto metody jsou založeny na použití tiskových past nanesených na podložku přes síta nebo šablony v požadovaných schématech. Poté musí být nanesená pasta vypálena při teplotách 600 °C až 1200 °C. [1]

1.1.1 Sítotisk

Principem této metody je protlačení pasty přes prázdná oka sítky s předem vyrobeným motivem. Pasta se na substrát protlačuje pomocí těrky. V případě výroby velmi přesných

motivů je pohyb těrky dvojnásobný. V prvním pohybu těrky se pouze vyplní pasta do prázdných ok síta (nedochází ke kontaktu se substrátem) a teprve v druhém pohybu dochází ke kontaktu síta se substrátem a tím i přenesení pasty. Schéma celého procesu je vidět na obrázku č. 1.1. [2]



Obr. 1.1 Základní popis sítotisku (převzato z [3])

Při použití metody sítotisk musíme sledovat různé parametry a nastavení sítotiskového zařízení. Např. je nutné sledovat odskok síťky od substrátu tzv. „*snap off*“, tlak těrky na síťku, viskozitu pasty apod. [4]

K nanesení pasty sítotiskem je potřeba samozřejmě sítotiskový stroj, který obsahuje tři základní části [2]:

- konstrukci pro uchycení šablony,
- konstrukci pro uchycení substrátu,
- pohyblivou část pro vedení těrky.

Nanesením pasty pomocí sítotisku však celý proces výroby funkčního elektronického obvodu nekončí. V dalším kroku je nutno nanesenou pastu „zasušit“. Zde se řídíme samozřejmě pokyny výrobce pasty. Proces sušení vyrovná nehomogenity na povrchu pasty. Veškeré konečné elektrické, mechanické nebo i jiné vlastnosti vrstva dostává až po vypálení. Při vypalování se opět řídíme doporučením výrobce pasty, ale i parametry nosného substrátu. Je nutné dodržet především teplotní profil vypalování. [4]

1.1.1.1 Rám

Úkol rámu pro sítotisk je uchycení síta a držení jej v napnutém stavu. Sítotiskové rámy jsou vyráběny převážně z hliníkových a ocelových profilů. Velký důraz je kladen na mechanickou odolnost (i při vysokém mechanickém namáhání musí udržet přísnou rovinnost) a co nejmenší tepelné dilatace. [1]

1.1.1.2 Síto

Výroba síťové šablony se provede napnutím síťoviny na vhodný rám (nejčastěji hliníkový). Volba tkaniny je velmi důležitá a řídí se následujícími požadavky [1]:

- přesností rozměrů,
- tloušťkou tisku,
- ostrostí obrazce,
- velikostí částic pasty,
- jemností motivů,
- strukturou povrchu.

Používané typy tkanin a jejich základní vlastnosti [1]:

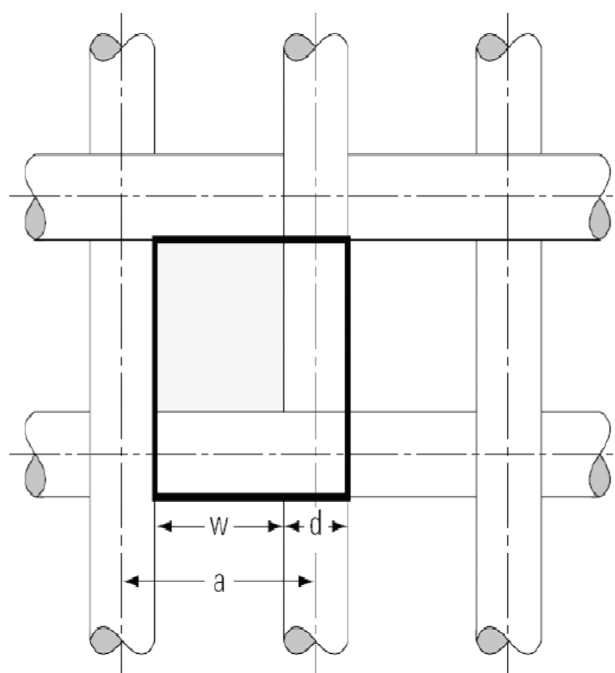
- monofilní polyesterová tkanina,
 - výborné vlastnosti pevnosti v tahu a pružnosti
 - umožňuje zotavení
 - dobrá rozměrová stálost
- VA – tkanina,
 - nulová pružnost (ocelová vlákna)
 - rozměrová stabilita
 - malá pružnost
- metalizovaná monofilní polyesterová tkanina
 - kompromis mezi kovovým a polyesterovým vláknem

- pevnější v tahu, než polyester
- vyšší elasticita než ocelové vlákno
- monofilní nylonová tkanina.

Na veškerých technických parametrech tkaniny je závislá tloušťka tisku. Mezi tyto technické parametry patří [1]:

- počet vláken na cm,
- tloušťka vlákna d ,
- velikost ok w ,
- volná plocha tkaniny F_o ,
- rozteč vláken tkaniny a .

Na obrázku 1.2 je znázorněn detail síta se základními technickými parametry.



Obr. 1.2 Detail síta (převzato z [5])

Na základě těchto parametrů se tkaniny dělí do 3 kategorií [1]:

- tkaniny s velikostí oka větší než tloušťka vlákna ($w > d$),
- tkaniny s velikostí oka stejnou jako tloušťka vlákna ($w = d$),
- tkaniny s velikostí oka menší než tloušťka vlákna ($w < d$).

Pro zajištění dobrého průchodu pasty přes tkaninu, je zapotřebí, aby velikost ok w byla 2,5 až 3 krát větší než velikost částic pasty. [1]

1.1.1.3 Napínací zařízení

Pro kvalitní tisk je jeden z hlavních předpokladů dobře napnutá tkanina. Mezi hlavní kritéria dobře napnuté tkaniny je dodržení napětí doporučeného výrobcem, dále je nutné udržení napětí tkaniny rovnoměrně po celé ploše a v poslední řadě je tkanina dobře napnutá, když je dosaženo stabilizované hodnoty napětí v čase. Pro napínání tkaniny je převážně používáno zařízení na pneumatickém nebo mechanickém principu. [1]

1.1.1.4 Vlivy na přesnost tisku

Přesnost sítotisku závisí především na těchto parametrech:

- správné volbě poměru formátu rámu a obrazce,
- šíře a délky dráhy těrky,
- vzdálenosti síta od podložky,
- elasticitě vláken síta,
- směru vláken síta a tištěného motivu.

Zvlášť důležitý parametr v kvalitě tisku je vzdálenost síta od podložky, tzv. odtrh. V případě malého nebo velkého odtrhu může nastat situace, že přenos tištěného obrazce bude zcela znemožněn. [1]

Parametry určující tloušťku nanesené vrstvy [6]:

- druh tkaniny,
- vzdálenost tkaniny od podložky,
- pasta,
- náklon a rychlost pohybu těrky,
- struktura povrchu podložky,
- nasákavosti povrchu podložky,
- průměru vlákna,
- velikosti oka tkaniny.

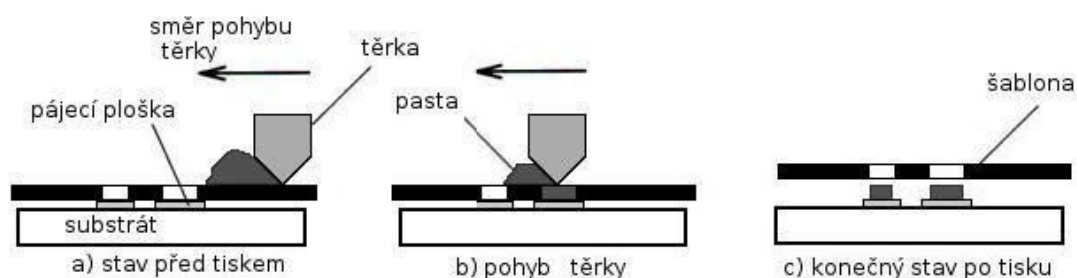
1.1.2 Šablonový tisk

Tato metoda je svým způsobem velmi podobná sítotisku. Rozdíl je především v tom, že místo síta je použita šablona s předem vytvořeným schématem (motivem). Další rozdíl je v tom, že šablona je přiložena přímo na substrátu, tzn., že výška nanesené plochy odpovídá přímo výšce šablony. Pro vytvoření dokonalé nanesené vrstvy je důležitá taky rychlost odtrhu šablony od substrátu. [2]

Hlavním nástrojem pro šablonový tisk je samozřejmě šablona. Šablona musí být vyrobena s maximální přesností a k výrobě se používají především následující metody [2]:

- chemicky leptané,
- elektrogalvanicky vytvářené,
- polymerní,
- řezané laserem.

Princip šablonového tisku je vidět na obrázku č. 1.3.



Obr. 1.3 Základní popis nanesení pasty přes šablonu: a) stav před tiskem, b) pohyb těrky, c) odtrh šablony (převzato z [7])

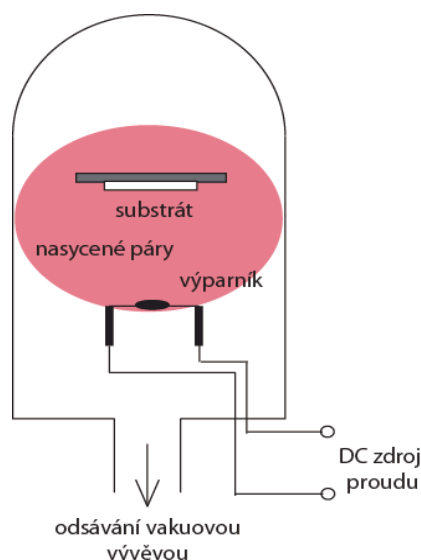
1.2 Tenkovrstvé technologie

Jedná se o tloušťky vrstev, které jsou v rozmezí desetin až jednotek μm .

Příprava tenkých vrstev je možná několika způsoby, z kapalně nebo plynné fáze. K nejrozšířenějším metodám patří metoda napařování a napařování na organické i anorganické podložky. [1]

1.2.1 Metoda napařování

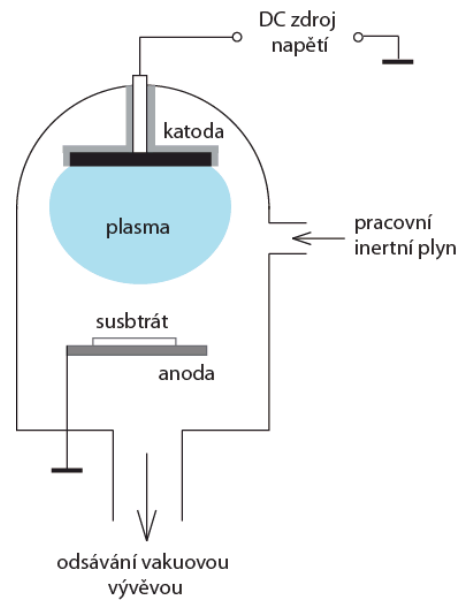
Jedná se o přípravu tenkých vrstev z plynné fáze. Princip nanášení spočívá v tom, že materiál, který má být napařen se ve vakuu zahřeje na tak vysokou teplotu, že se začne odpařovat (hovoříme tedy o vakuovém napařování). Poté páry kondenzují na podložce, na které se v první fázi vytvoří izolované zárodky – nuklea. Ty pomocí povrchové difuze a migrací se začnou zvětšovat, až se začnou dotýkat a navzájem slévat – hovoříme tedy o tzv. koalesenci. Na uvolněném povrchu současně probíhá další nukleace. Dále se vytváří kanálková struktura – síťovina, která vzniká spojením ostrůvků. Spojitá tenká vrstva vznikne přísunem dalších atomů, které zaplní nepokrytá místa. Tloušťka vrstvy se může dále zvětšovat. Schéma vakuového napařování je vidět na obrázku č. 1.4. [1]



Obr. 1.4 Schéma vakuového napařování (převzato z [8])

1.2.2 Metoda naprašování

Naprašování je druhou vakuovou metodou pro tvorbu tenkých vrstev. Je to velmi podobná metoda vakuovému napařování. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že zdrojový materiál není zahříván jako u napařování, ale je na něj přivedeno vysoké záporné napětí (elektrická katoda). Naopak substráty jsou uzemněny (elektrická anoda). Celý proces je založen na vzniku doutnavého výboje, který vznikne silou elektrického pole mezi katodou a anodou. Poté kladně nabitě ionty narážejí do katody (zdrojového materiálu) a vyrážejí z něj atomy. Následně se tyto atomy usazují na okolních tělesech, včetně substrátů a vzniká tím na něm tenká vrstva. Pro celý proces stačí vakuum s menším tlakem okolo 10^{-1} Pa. Schéma katodového naprašování je vidět na obrázku 1.5. [9]



Obr. 1.5 Schéma katodového naprašování (převzato z [8])

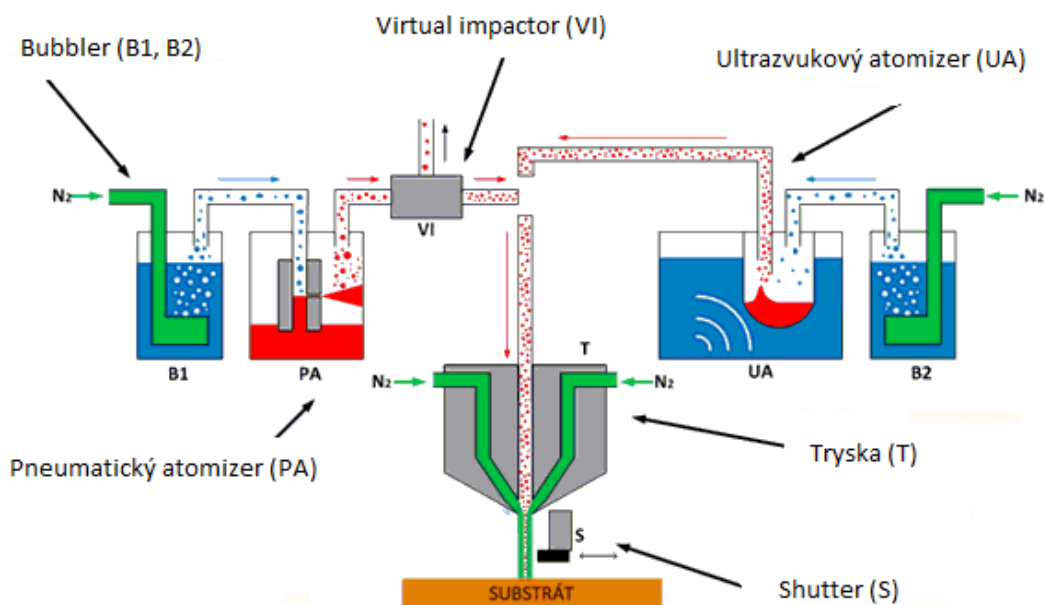
1.3 Aerosol Jet Printing (AJP)

Aerosol Jet Printing je novou patentovanou tiskařskou technologií. Výrobcem této technologie je Optomec (USA – Mexiko), v současné době je to jediný výrobce. [10]

Jedná se o aditivní, selektivní, depoziční techniku, která slouží například k výrobě velmi jemných vodivých motivů a k integraci pasivních součástek. [9] Výhodou této technologie je tisk bez nutnosti přípravy masky, filmové předlohy a možnosti tisku na širokou škálu substrátů, včetně plastů, keramiky nebo kovů. Další výhodou je možnost rychlé technické změny a to pouhou úpravou souboru návrhu. [11]

Tato patentovaná technologie využívá aerodynamického proudu nosného plynu pro soustředění aerosolu deponovaného materiálu na přesně definovanou plochu substrátu. [10]

Schéma celého systému je zachyceno na obrázku č. 1.6.



Obr. 1.6 Schéma technologie Aerosol Jet Printing (převzato z [10])

K bezkontaktnímu nanesení inkoustu na substrát je potřeba z použitého inkoustu pomocí pneumatického nebo ultrazvukového atomizéru vytvořit inkoustový aerosol, který je poté transportován a fokusován dusíkem. [10]

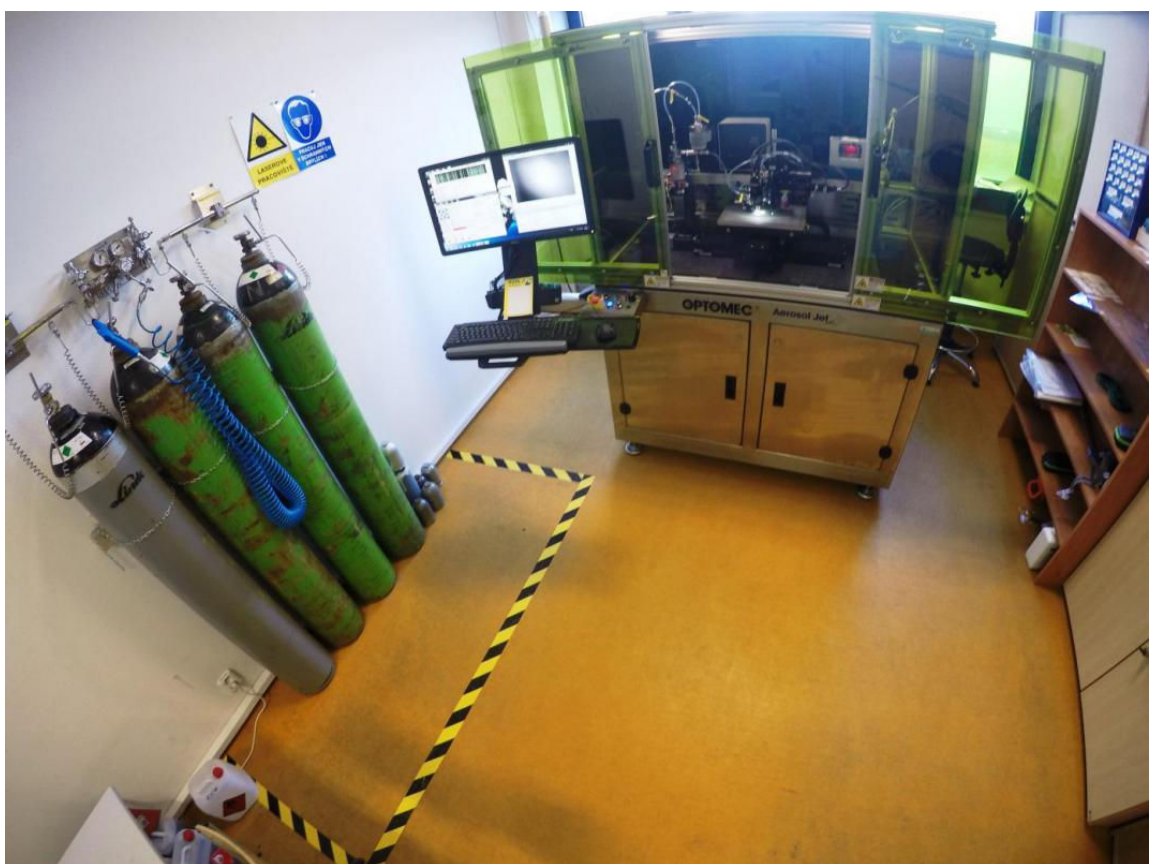
Z obrázku č. 3.1 jsou vidět jednotlivé části celého systému [10]:

- **Bubbler (B1, B2)**
 - Slouží k tvorbě aerosolu v atomizéru pomocí přivedení kapiček rozpouštědla do inkoustu
 - Mezi náplň bubblerů patří voda, isopropyl alkohol, aceton atd.
- **Virtual impactor (VI)**
 - Slouží k odtahování přebytečného dusíku a velkých částí inkoustu
- **Ultrazvukový atomizér (UA)**
 - Vyrábí aerosol rozbíjením inkoustu ultrazvukovými vlnami
 - Vhodný pro inkousty menších viskozit (1 - 5 mPas)
 - Malá potřeba inkoustu (1 ml)
- **Pneumatický atomizér (PA)**
 - Vyrábí aerosol rozbíjením inkoustu o stěnu nádoby
 - Vhodný pro inkousty větších viskozit (1 – 1000 mPas)
 - Větší spotřeba inkoustu (30 ml a více)
- **Tryska (T)**
 - Tryska, ze které vychází proud aerosolu fokusovaného dusíkem
 - Hroty trysky jsou keramické nebo ocelové
 - Možnost zvolit od tenkých hrotů pro jemné motivy až po silné hroty pro vyplňování ploch

- **Shutter (S)**

- Mechanické zařízení, které velmi rychle zastavuje depozici aerosolu pod substrát

Na obrázku č. 1.7 je vidět kompletní systém Aerosol Jet Printing včetně tlakových lahví s dusíkem, který je využíván ve výzkumném centru RICE. Jedná se o jediné zařízení tohoto typu v České republice. [12]



Obr. 1.7 Zařízení Aerosol Jet Printing včetně tlakových lahví (převzato z [10])

2 Planární technologie

Planární technologie je další alternativou pro výrobu různých elektronických součástek. Především její výhoda spočívá v uspokojení nároků dnešního trendu, a to především na zmenšení rozměrů, hmotnosti a zvětšení spolehlivosti elektronických součástek. [13]

V anglickém jazyce slovo „planar“ znamená rovinný. Jedná se tedy o součástky, které se vyznačují malou profilovou výškou. [14]

Základem součástky nebo obvodu je samozřejmě nosný materiál, nazýván substrát, na který jsou postupně nanášeny jednotlivé vrstvy – vodivé, odporové a i dielektrické. Z tohoto důvodu se můžeme setkat i s pojmem vrstvá technologie. [2]

V této kapitole jsou uvedeny součástky, včetně výpočtů, které byly použity do praktické části této diplomové práce. Dále jsou v této práci uvedeny příklady induktorů z *velmi krátkých úseků vedení (Příloha A)*, kapacitorů z *krátkých úseků vedení (Příloha B)*, další provedení kapacitorů (*Příloha C*) a rezistorů (*Příloha D*).

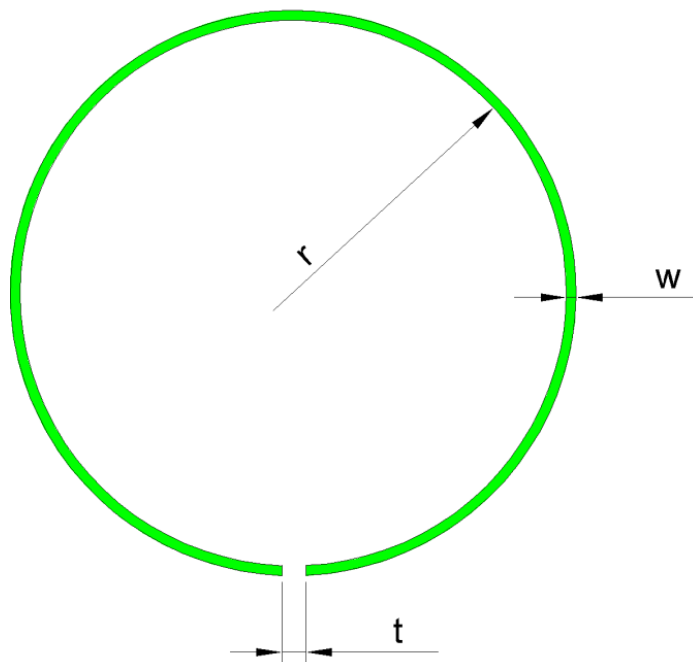
2.1 Induktory

Následující podkapitoly se zabývají pouze induktory vyráběné tištěnou technologií.

Mluvíme o induktorech, u kterých hodnota indukčnosti je od jednotek do stovek nH a je dána poměrem jejich rozměrů. [15]

2.1.1 Plochá smyčka

Hodnota indukčnosti je závislá na třech parametrech, na šířce vodivé části w , poloměru r a šířce vzduchové mezery t . [16] Geometrie ploché smyčky je vidět na obrázku č. 2.1.



Obr. 2.1 Plochá smyčka

Vztah pro výpočet indukčnosti [16]:

$$L = 0,2 * l * \left[\ln \left(\frac{l}{w+t} \right) - 1,76 \right] \quad [\text{nH}; \text{mm}] \quad (2.1)$$

kde $l = 2\pi r$

Návrh součástek pro praktickou část – plochá smyčka:

Vyrobená plochá smyčka pro praktickou část je vidět na obrázku č. 2.2.



Obr. 2.2 Plochá smyčka

- 1) Plochá smyčka: **r = 10 mm**, w = 0,75 mm, t = 0,5 mm

$$L = 0,2 * 62,83 * \left[\ln \left(\frac{62,83}{0,75+0,5} \right) - 1,76 \right] = 27,11 \text{ nH} \quad (2.2)$$

- 2) Plochá smyčka: **r = 20 mm**, w = 0,75 mm, t = 0,5 mm

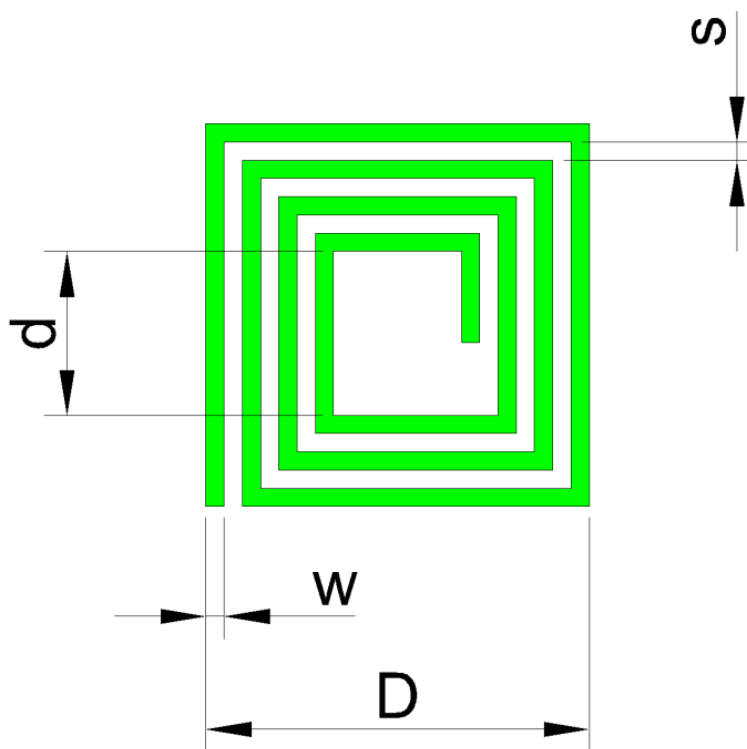
$$L = 0,2 * 125,7 * \left[\ln \left(\frac{125,7}{0,75+0,5} \right) - 1,76 \right] = 71,64 \text{ nH} \quad (2.3)$$

3) Plochá smyčka: $r = 30 \text{ mm}$, $w = 0,75 \text{ mm}$, $t = 0,5 \text{ mm}$

$$L = 0,2 * 188,5 * \left[\ln \left(\frac{188,5}{0,75+0,5} \right) - 1,76 \right] = 122,75 \text{ nH} \quad (2.4)$$

2.1.2 Čtvercová spirála

Hodnota indukčnosti je závislá na pěti parametrech D , w , d , s a počtu závitů n . [16]
Geometrie těchto parametrů je vidět na obrázku č. 2.3.



Obr. 2.3 Čtvercová spirála

Vztah pro výpočet indukčnosti [16]:

$$L = 6 * \frac{(D+d)^2 * n^2}{15D-7d} \quad [\text{nH}; \text{mm}] \quad (2.5)$$

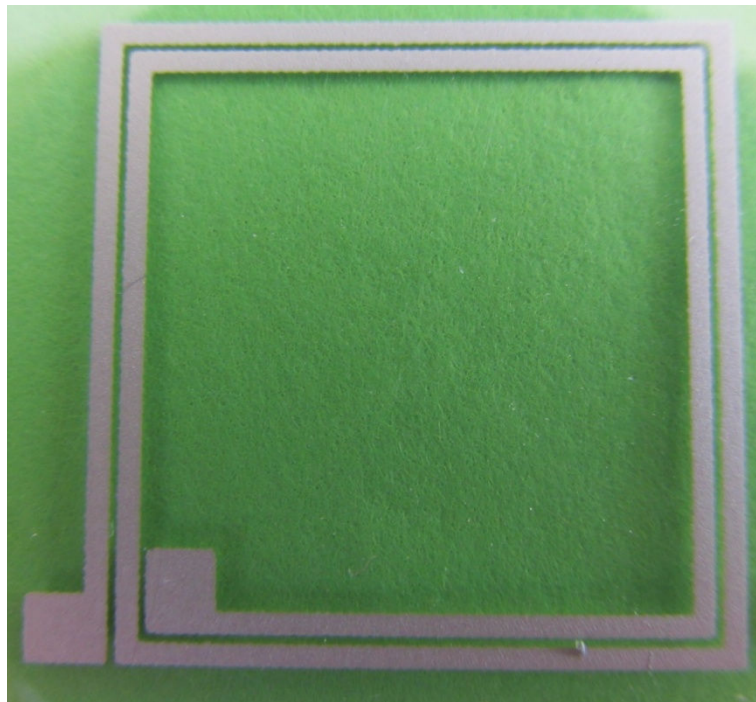
kde $D = d + 2n(w + s) + w - s$

Návrh součástek pro praktickou část – plochá smyčka:

Vyrobené čtvercové spirály pro praktickou část jsou vidět na obrázcích č. 2.4, 2.5, 2.6.

1) Čtvercová spirála: $n = 2$, $D = 21$ mm, $d = 18$ mm

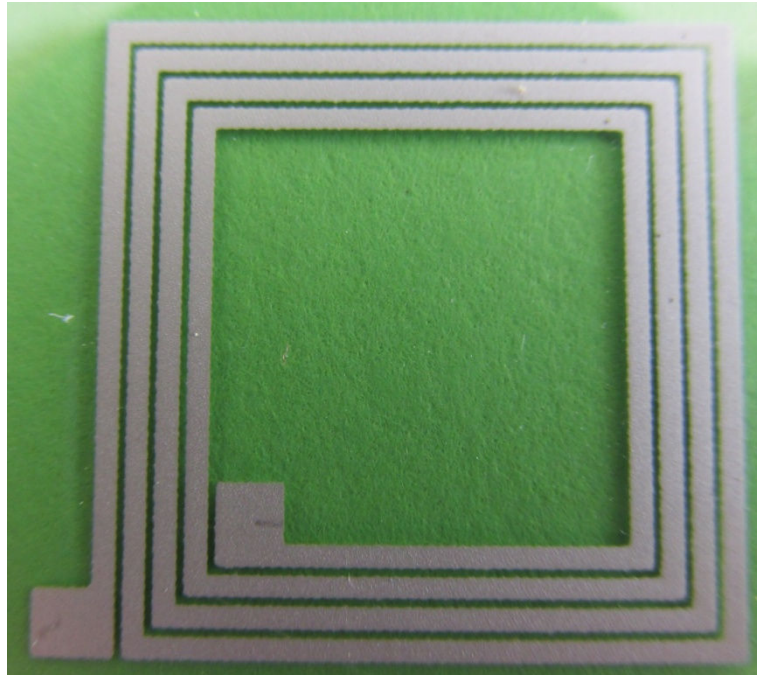
$$L = 6 * \frac{(21+18)^2 * 2^2}{15*21-7*18} = 193,15 \text{ nH} \quad (2.6)$$



Obr. 2.4 Čtvercová spirála – 4 závitů

2) Čtvercová spirála: $n = 4$, $D = 21$ mm, $d = 13,5$ mm

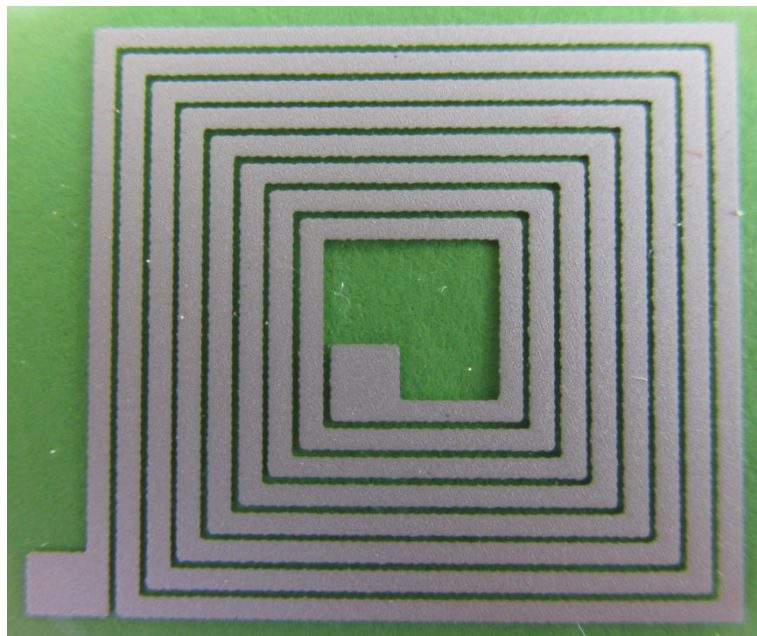
$$L = 6 * \frac{(21+13,5)^2 * 4^2}{15*21-7*13,5} = 518,2 \text{ nH} \quad (2.7)$$



Obr. 2.5 Čtvercová spirála – 6 závitů

3) Čtvercová spirála: **n = 8**, **D = 21 mm**, **d = 5,5 mm**

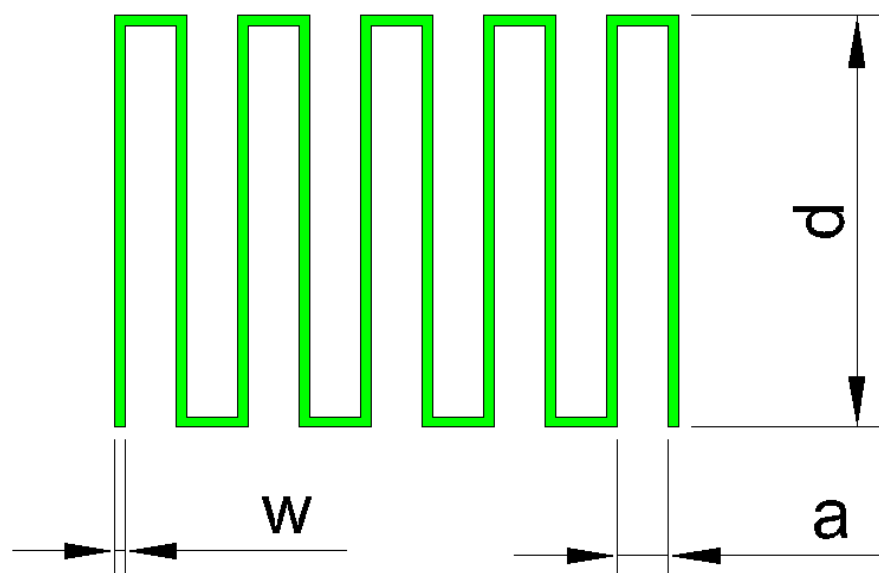
$$L = 6 * \frac{(21+5,5)^2 * 8^2}{15*21-7*5,5} = 975,28 \text{ nH} \quad (2.8)$$



Obr. 2.6 čtvercová spirála – 8 závitů

2.1.3 Meandrový induktor

Hodnota indukčnosti je závislá na pěti parametrech w , d , a a počtu úseků n . [16]
Geometrie těchto parametrů je vidět na obrázku č. 2.7.



Obr. 2.7 Meandrový induktor

Vztah pro výpočet indukčnosti [16]:

$$L = 0,1 * d * [4 * n * \ln \frac{2(a+w)}{w} - K_n] \quad [\text{nH}; \text{mm}] \quad (2.9)$$

Pro konstantu K_n platí tabulka č. 2.1. [16]:

Tab. č. 2.1 Konstanta K_n závislá na počtu úseků délky d [15]

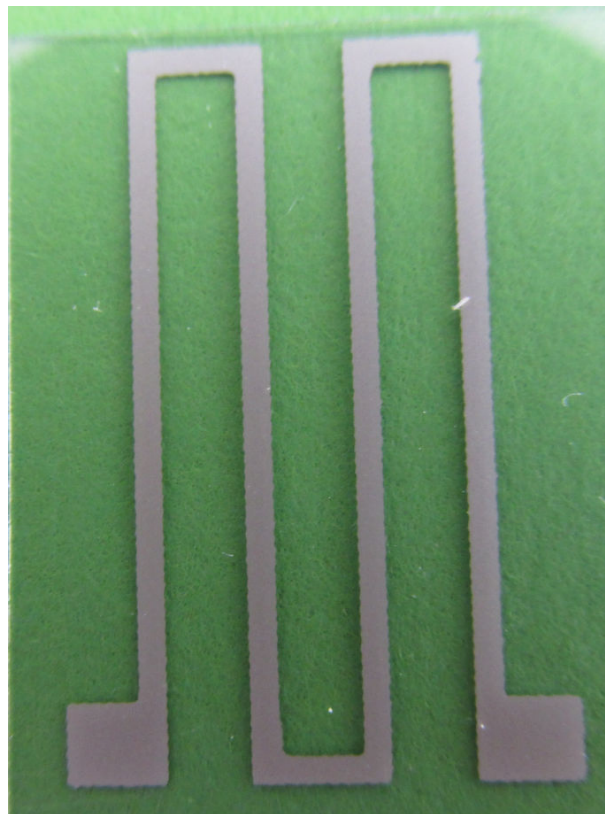
n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_n	2,76	3,92	6,22	7,6	9,7	10,92	13,38	14,92	16,86

Návrh součástek pro praktickou část – meandrový induktor:

Vyrobené meandrové induktory pro praktickou část jsou vidět na obrázcích č. 2.8, 2.9, 2.10.

1) Meandrový induktor: $n = 4$, $a = 3$ mm, $w = 0,75$ mm, $K_n = 6,22$

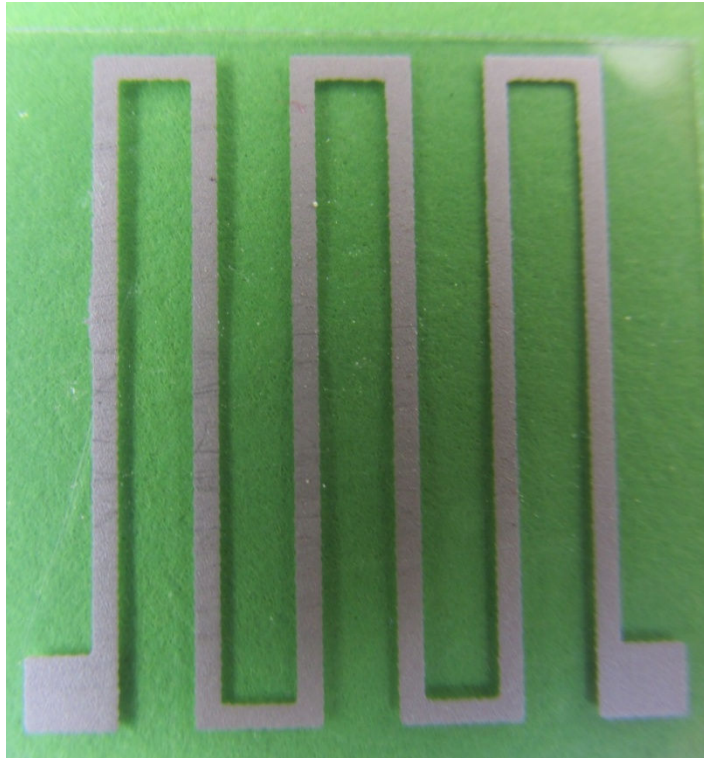
$$L = 0,1 * 20 * \left[4 * 4 * \ln \frac{2(3+0,75)}{0,75} - 6,22 \right] = 61,24 \text{ nH} \quad (2.10)$$



Obr. 2.8 Meandrový induktor – 4 úseky

2) Meandrový induktor: $n = 6$, $a = 3$ mm, $w = 0,75$ mm, $K_n = 9,7$

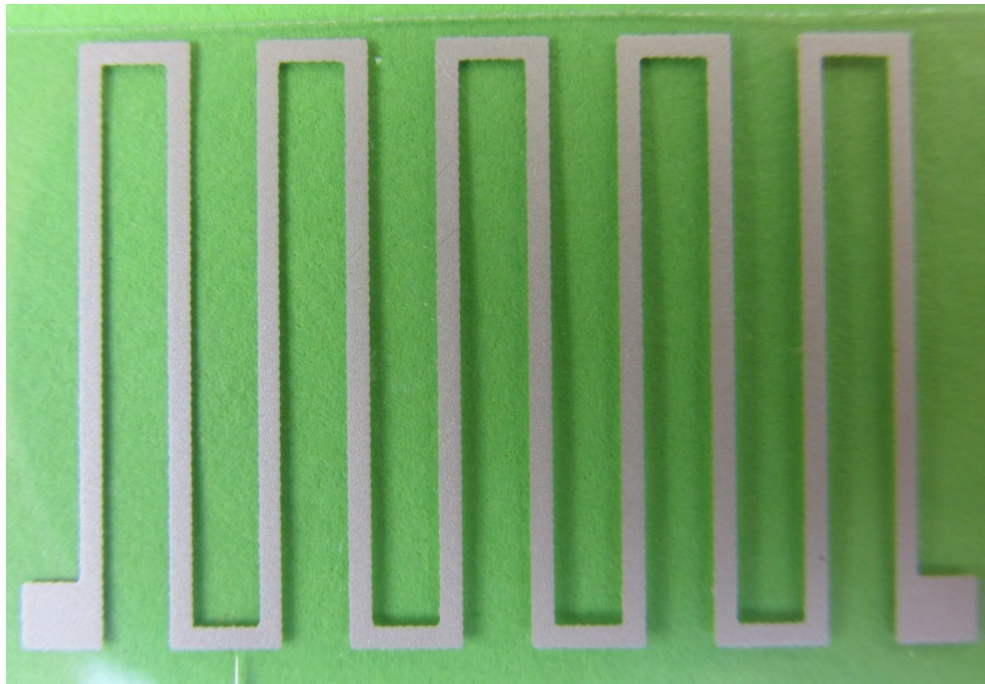
$$L = 0,1 * 20 * \left[4 * 6 * \ln \frac{2(3+0,75)}{0,75} - 9,7 \right] = 91,12 \text{ nH} \quad (2.11)$$



Obr. 2.9 Meandrový induktor – 6 úseků

3) Meandrový induktor: $n = 10$, $a = 3$ mm, $w = 0,75$ mm, $K_n = 16,86$

$$L = 0,1 * 20 * \left[4 * 10 * \ln \frac{2(3+0,75)}{0,75} - 16,86 \right] = 150,49 \text{ nH} \quad (2.12)$$



Obr. 2.10 Meandrový induktor – 10 úseků

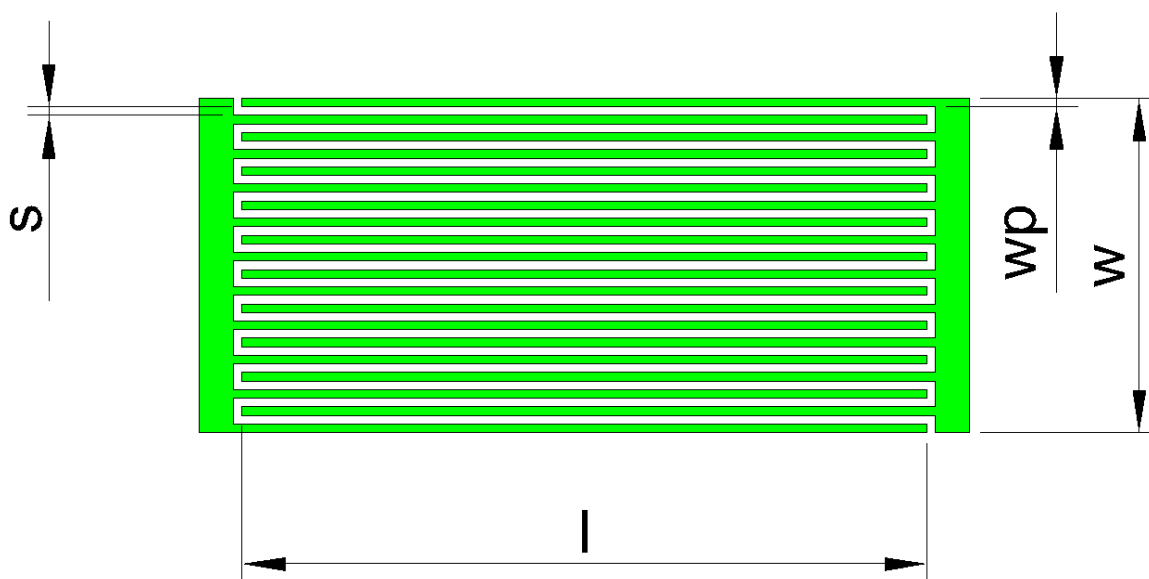
2.2 Kapacitory

Opět v následujících kapitolách se budu zabývat pouze kapacitory vyrobené tištěnou technologií.

Výsledná hodnota kapacity, u tištěných kapacitorů, je dána geometrickými rozměry motivů a použitým dielektrikem. U tištěných kapacitorů je dosahováno kapacity až stovek pF. [15] Geometrie některých dalších vybraných klasických kapacitorů se nachází v příloze (Příloha C).

2.2.1 Interdigitální kapacitor

Hodnota kapacity interdigitálního kapacitoru je dána geometrickými rozměry. [16] Geometrie těchto parametrů je vidět na obrázku č. 2.11.



Obr. 2.11 Interdigitální kapacitor

Pro $w_p = s = x$ je odvozen vztah [16]:

$$C_s = \frac{\varepsilon_r + 1}{w} * l * [(n - 3) * A_1 + A_2] \quad [\text{pF}; \text{mm}] \quad (2.13)$$

kde n je počet prstů kapacitou.

Pro konstanty A_1 a A_2 platí následující vztahy [16]:

$$A_1 = \frac{1}{25,4} * [0.3349057 - 0.15287116 * (\frac{h}{x})^{-1}]^2 \quad [\text{pF}; \text{mm}] \quad (2.14)$$

$$A_2 = \frac{1}{25,4} * [0.50133101 - 0.2282044 * (\frac{h}{x})^{-1}]^2 \quad [\text{pF}; \text{mm}] \quad (2.15)$$

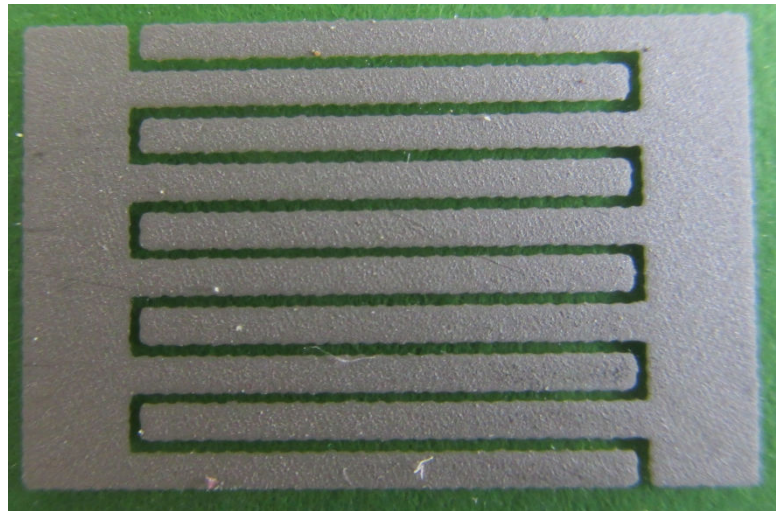
Vztahy jsou platné pro $3 \leq h/x \leq \infty$, v případě, že spodní plocha substrátu je pokovená. [16]

Návrh součástek pro praktickou část – interdigitální kapacitor:

Vyrobené interdigitální kapacitory pro praktickou část jsou vidět na obrázcích č. 2.12, 2.13, 2.14.

1) Interdigitální kapacitor: **počet prstů = 10**, $w = s = 0,75 \text{ mm}$, **$l = 10 \text{ mm}$**

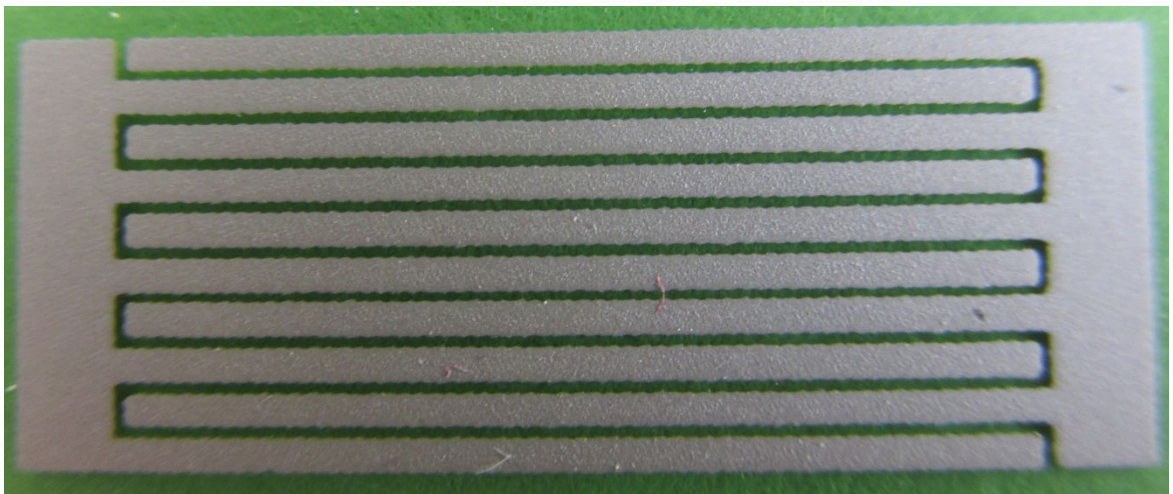
$$C_s = \frac{3,5 + 1}{0,75} * 10 * [(10 - 3) * 0,0042 + 0,01] = 0,175 \text{ pF} \quad (2.16)$$



Obr. 2.12 Interdigitální kapacitor – 10 prstů, $l = 10$ mm

2) Interdigitální kapacitor: **počet prstů = 10**, $w = s = 0,75$ mm, **$l = 20$ mm**

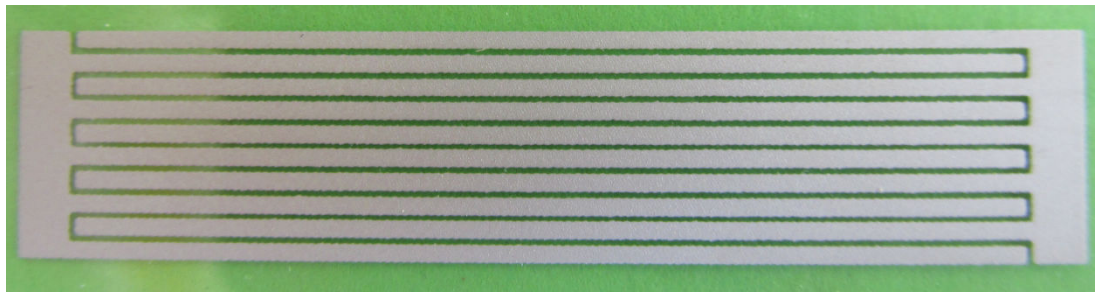
$$C_s = \frac{3,5+1}{0,75} * 20 * [(10 - 3) * 0,0042 + 0,01] = 0,351 \text{ pF} \quad (2.17)$$



Obr. 2.13 Interdigitální kapacitor – 10 prstů, $l = 20$ mm

3) Interdigitální kapacitor: **počet prstů = 10**, $w = s = 0,75$ mm, **$l = 40$ mm**

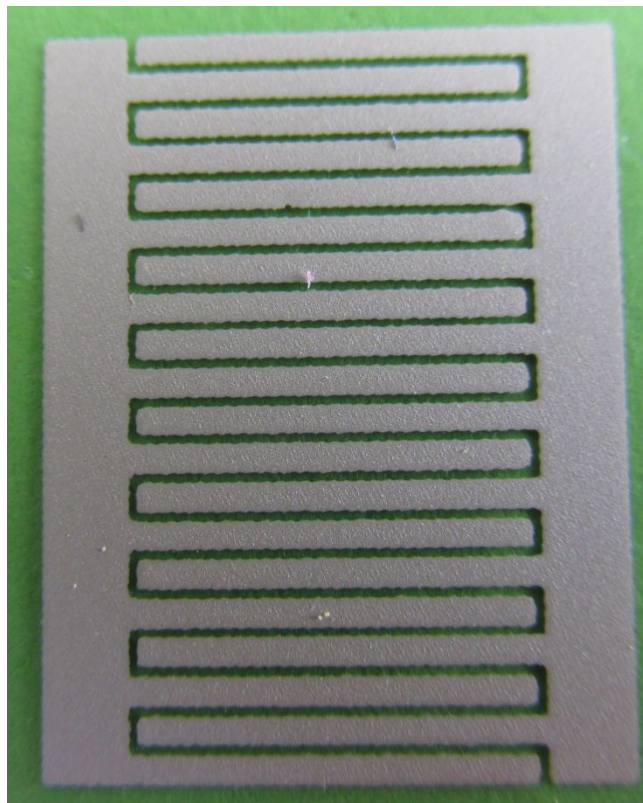
$$C_s = \frac{3,5+1}{0,75} * 40 * [(10 - 3) * 0,0042 + 0,01] = 0,701 \text{ pF} \quad (2.18)$$



Obr. 2.14 Interdigitální kapacitor – 10 prstů, $l = 40 \text{ mm}$

4) Interdigitální kapacitor: **počet prstů = 20**, $w = s = 0,75 \text{ mm}$, **$l = 10 \text{ mm}$**

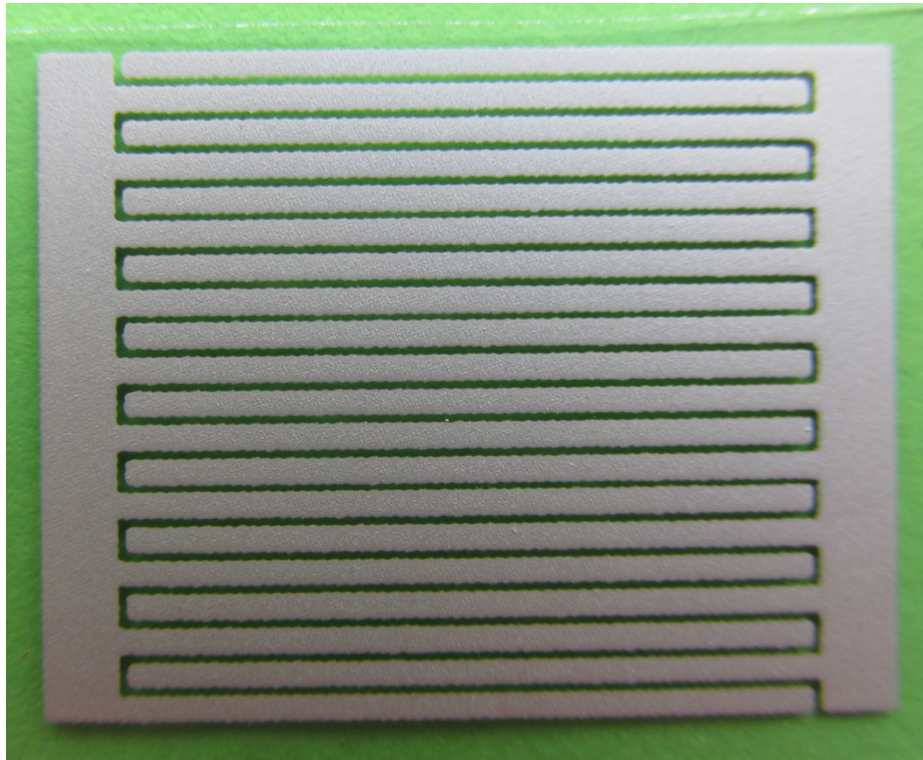
$$C_s = \frac{3,5+1}{0,75} * 10 * [(20 - 3) * 0,0042 + 0,01] = 0,365 \text{ pF} \quad (2.19)$$



Obr. 2.15 Interdigitální kapacitor – 20 prstů, $l = 10 \text{ mm}$

5) Interdigitální kapacitor: **počet prstů = 20**, $w = s = 0,75$ mm, **$l = 20$ mm**

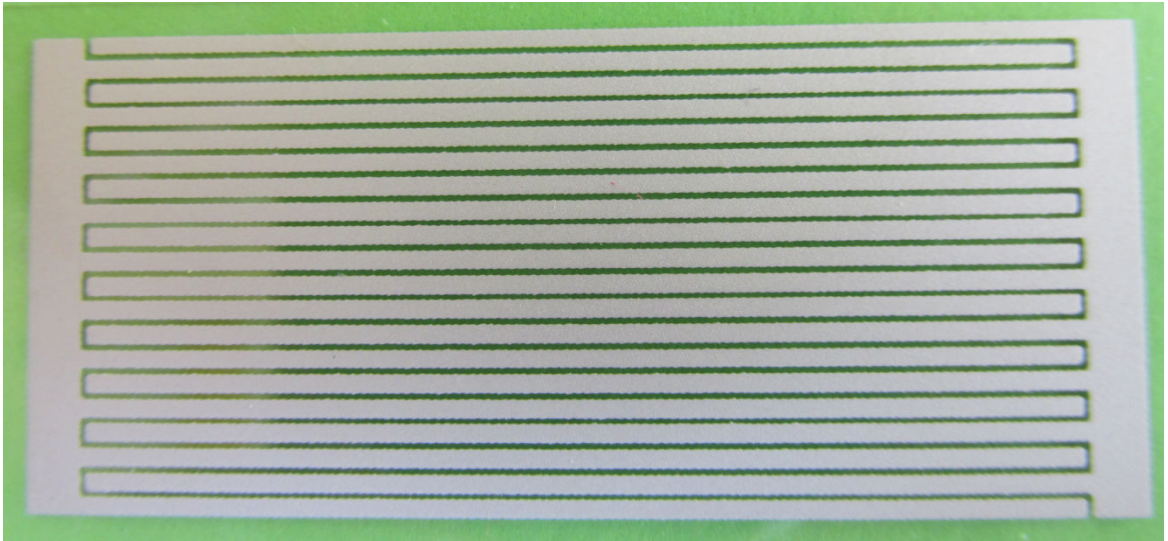
$$C_s = \frac{3,5+1}{0,75} * 20 * [(20 - 3) * 0,0042 + 0,01] = 0,730 \text{ pF} \quad (2.20)$$



Obr. 2.16 Interdigitální kapacitor – 20 prstů, $l = 20$ mm

6) Interdigitální kapacitor: **počet prstů = 20**, $w = s = 0,75$ mm, **$l = 40$ mm**

$$C_s = \frac{3,5+1}{0,75} * 40 * [(20 - 3) * 0,0042 + 0,01] = 1,460 \text{ pF} \quad (2.21)$$



Obr. 2.17 - Interdigitální kapacitor – 20 prstů, $l = 40$ mm

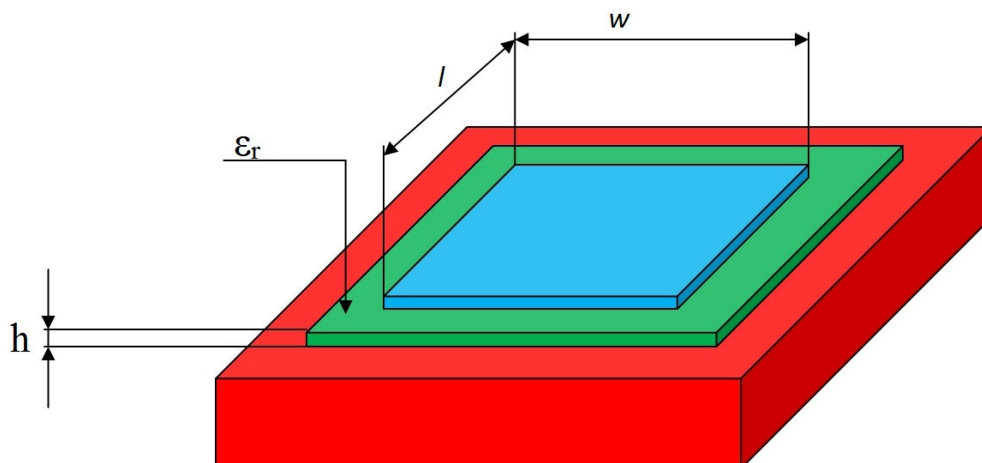
Výpočet konstant A_1 a A_2 :

$$A_1 = \frac{1}{25,4} * [0.3349057 - 0.15287116 * \left(\frac{10}{0,5}\right)^{-1}]^2 = 0,0042 \text{ pF} \quad (2.22)$$

$$A_2 = \frac{1}{25,4} * [0.50133101 - 0.2282044 * \left(\frac{10}{0,5}\right)^{-1}]^2 = 0,01 \text{ pF} \quad (2.23)$$

2.2.2 Jednovrstvý kondenzátor MIS

Hodnota kapacity jednovrstvého kondenzátoru MIS je dána geometrickými rozměry permitivitami ϵ_r a ϵ_0 . [16] Geometrie těchto parametrů je vidět na obrázku č. 2.18.



Obr. 2.18 Klasický kapacitor – jednovrstvý kapacitor MIS

Vztah pro výpočet kapacity [16]:

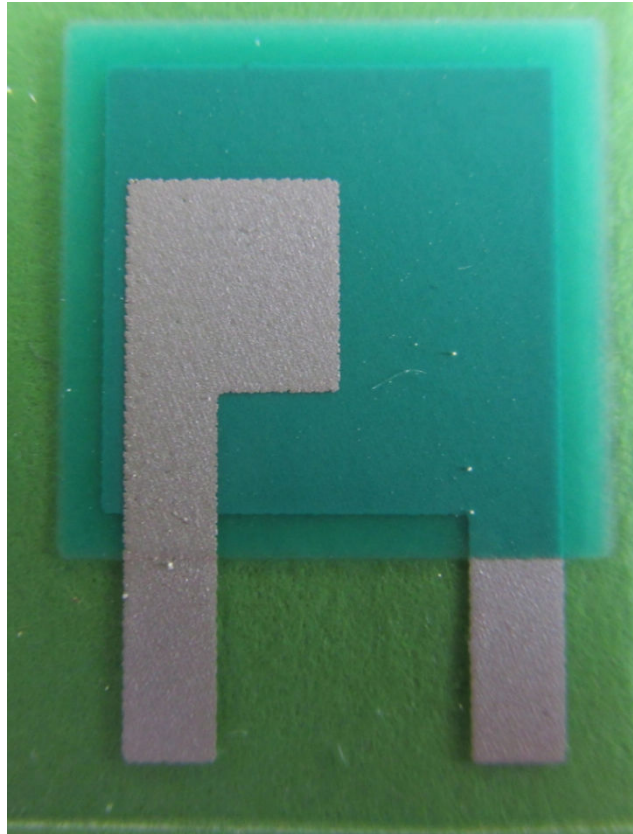
$$C = \frac{\epsilon_r * \epsilon_0 * w * l}{h} \quad (2.24)$$

Návrh součástek pro praktickou část – jednovrstvý kondenzátor MIS:

Vyrobené jednovrstvé kondenzátory MIS pro praktickou část jsou vidět na obrázcích č. 2.19, 2.20.

1) Jednovrstvý kondenzátor MIS: $w = 5 \text{ mm}$, $l = 5 \text{ mm}$, $h = 17 \text{ } \mu\text{m}$, $\epsilon_r = 3$

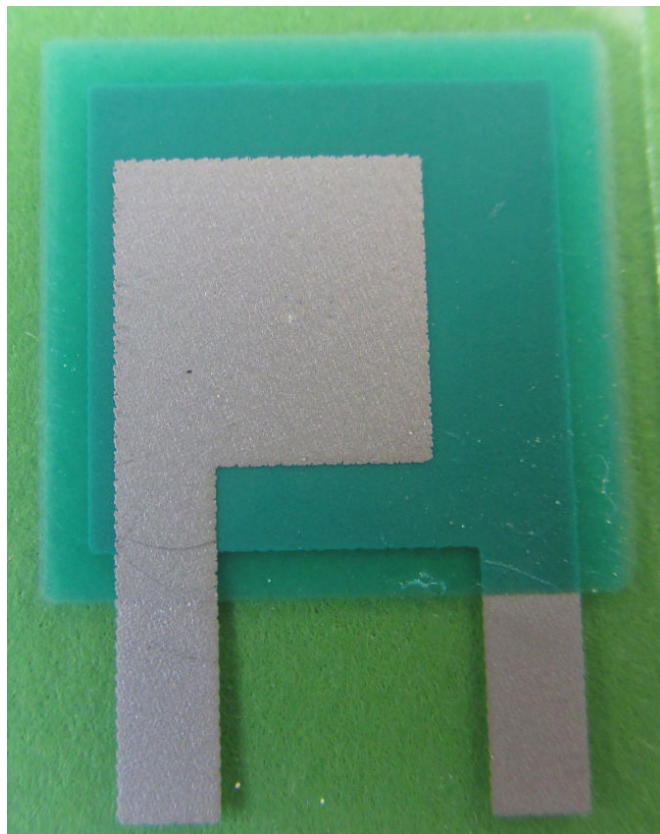
$$C = \frac{3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,005 \cdot 0,005}{17 \cdot 10^{-6}} = 39 \text{ pF} \quad (2.25)$$



Obr. 2.19 Jednovrstvý kondenzátor MIS – $S = 0,25 \text{ mm}^2$

2) Jednovrstvý kondenzátor MIS: $w = 7,5 \text{ mm}$, $l = 7,5 \text{ mm}$, $h = 17 \text{ } \mu\text{m}$, $\epsilon_r = 3$

$$C = \frac{3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,007 \cdot 0,007}{17 \cdot 10^{-6}} = 76 \text{ pF} \quad (2.25)$$



Obr. 2.20 Jednovrstvý kondenzátor MIS – $S = 0,5 \text{ mm}^2$

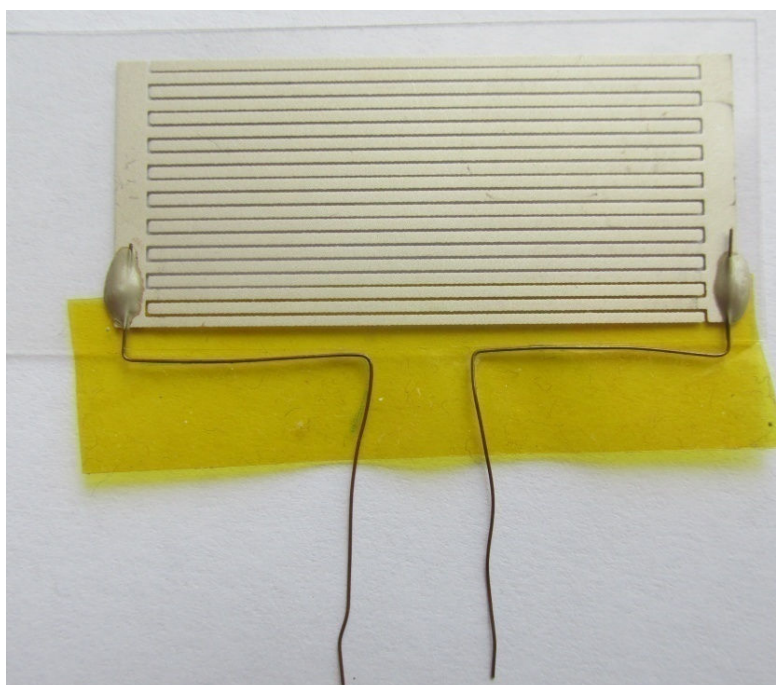
3 Praktická část

Cílem této diplomové práce je zjištění vlivů prostředí na parametry tištěných elektronických součástek.

3.1 Návrh vzorků pro testování

Pro praktickou část bylo pomocí softwaru AutoCAD navrženo celkem 17 druhů planárních tištěných součástek. Každá součástka byla sítotiskovou metodou vyrobena 5 krát, celkem bylo tedy k měření použito 85 vzorků. Součástky byly natištěné vodivou pastou, která obsahovala částičky Ag.

U některých vzorků (čtvercová spirála – 2 závitů, čtvercová spirála – 4 závitů, čtvercová spirála – 8 závitů, interdigitální kapacitor – 20 prstů, $l = 20$ mm; 20 prstů, $l = 40$ mm; 10 prstů, $l = 40$ mm, meandrový induktor – 10 úseků) bylo nutné dodatečné nakontaktování z důvodu připojení součástek do měřicí stolice přístroje Agilent 4287a. Na obrázku č. 3.1 je vidět interdigitální kapacitor, který je nakontaktován pomocí měděných drátků.



Obr. 3.1 Interdigitální kapacitor - nakontaktovaný

3.2 Testování vzorků

Samotné testování a zkoumání vlivu prostředí na parametry tištěných elektronických součástek probíhalo v laboratořích ZČU – FEL. K testování vzorků byla v této diplomové práci použita norma ČSN EN 60068 – 1 ED 2 z roku 2014 pro zkoušení a vliv prostředí a norma ČSN EN 60068 – 2 – 78 ED 2 z roku 2013, která uvádí zkoušku vlhkého konstantního tepla.

V následujících tabulkách (Tab. 4.1, 4.2, 4.3) jsou uvedeny podmínky testování navržených vzorků. Tyto podmínky jsou převzaty ze shora uvedených norem. Žlutě vyznačené buňky v tabulkách určují hodnoty (podmínky), za kterých byly vzorky během zrychleného testu testovány.

Tab. 4.1 Preferované doby trvání zkoušky [16]

Preferované doby trvání zkoušky						
12 h	16 h	24 h	2 dny	4 dny	21 dní	56 dní

Tab. 4.2 Normální podmínky pomocného sušení [17]

Teplota °C	Relativní vlhkost % RH	Tlak vzduchu ^a
55 ± 2	Nejvýše 20	86 kPa až 106 Kpa (860 mBar až 1060 mBar)
^a včetně krajních hodnot		

Tab. 4.3 Teplota a relativní vlhkost testované komory [16]

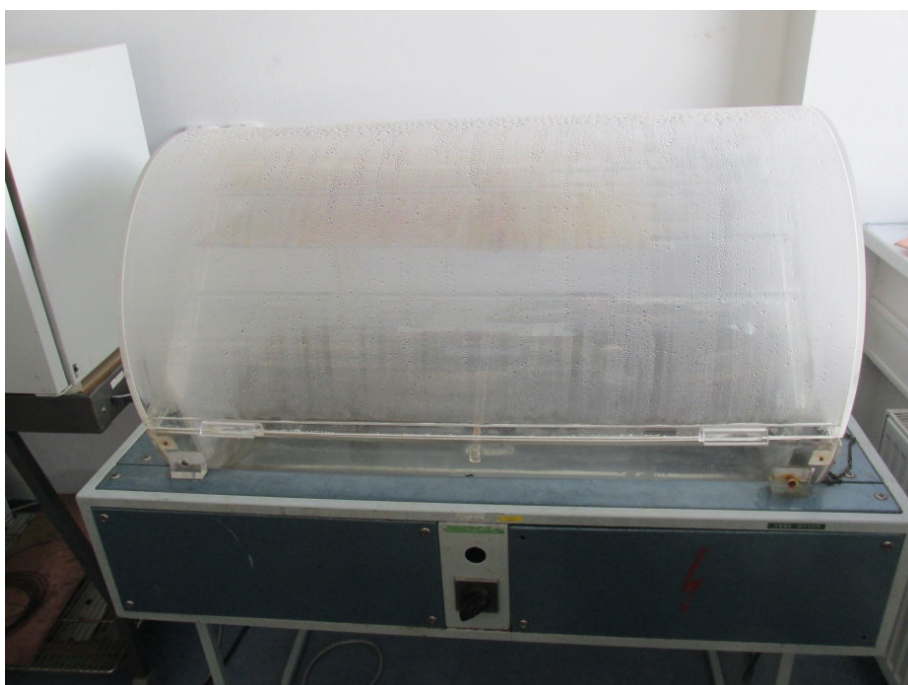
Teplota °C	Relativní vlhkost % RH
30 ± 2	93 ± 3
30 ± 2	85 ± 3
40 ± 2	93 ± 3
40 ± 2	85 ± 3

Vzorky byly testovány na dvou přístrojích, na LCR měřiči MOTECH MT 4090 a na Agilent 4287A RF LCR. Podrobnější popis použitých přístrojů se nalézá v příloze (Příloha E).

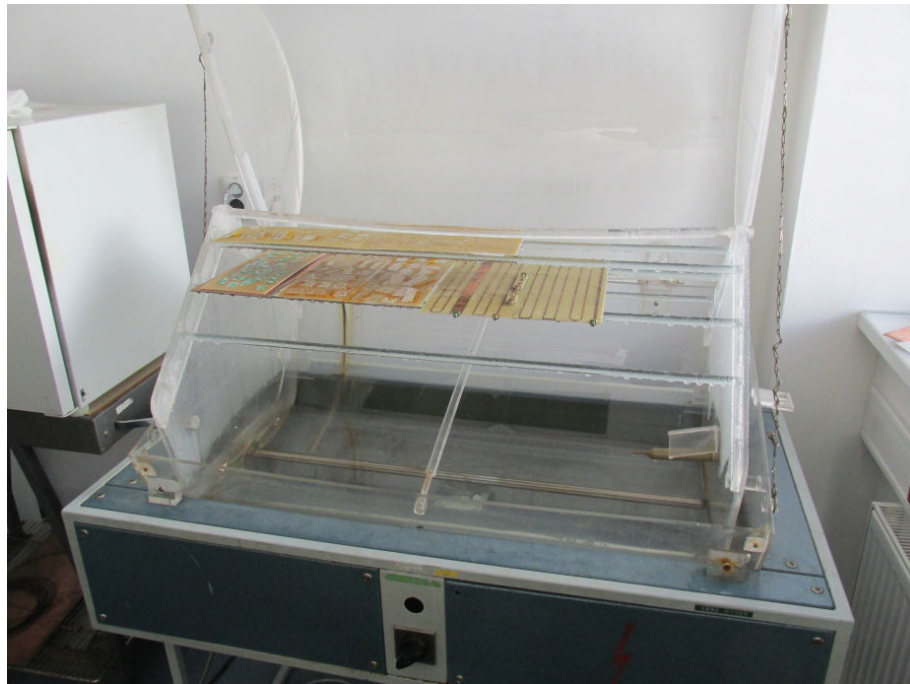
3.3 Postup při testování vzorků

Před samotným zahájením testování byly všechny vzorky změřeny na přístroji MOTECH MT 4090 a i na Agilent 4287A RF. Tyto hodnoty jsou považovány za referenční a bylo podle nich posuzováno a vyhodnocováno další měření.

Samotné testování bylo zahájeno vložení vzorků do mlžící komory, která je vidět na obrázcích č. 3.2 a 3.3, kde byly vystaveny konstantnímu vlhkému teplu (Tab. 4.3) dle preferované doby trvání zkoušky (Tab. 4.1). Po každém vystavení vzorků konstantnímu vlhkému teplu byly poté aklimatizovány na okolní teplotu prostředí. Před samotným měřením bylo nutné dle [17] nechat vzorky vysušit. Sušení probíhalo v laboratorní peci po dobu 6 hodin a při teplotě 55 °C, viz (Tab. 4.2).



Obr. 3.2 Mlžící komora



Obr. 3.3 Mlžící komora s vloženými vzorky k testování

Aklimatizované a vysušené vzorky byly poté změřeny na přístroji Agilent 4287A RF. Měřicí přístroj byl před začátkem měření plně kalibrován. Frekvenční rozsah, při kterém byly vzorky testovány byl nastaven od 1 MHz do 1 GHz. V zadaném frekvenčním rozsahu byly měřeny frekvenční závislosti následujících parametrů:

- Kapacitor
 - Z – impedance
 - C_p – paralelní kapacita
 - D – ztrátový činitel

- Induktor
 - Z – impedance
 - L_s – sériová indukčnost
 - Q – činitel jakosti

Výše uvedený přístroj disponuje rozhraním USB pro zkopírování dat k dalšímu zpracování. Výstup hodnot byl zaznamenán pomocí tabulkových dat .CSV. Výstupní hodnoty z měřicího přístroje Agilent 4287A RF byly po exportování zpracovány a upraveny v tabulkovém editoru, následně byly zhotoveny příslušné grafy. Přístroj i s měřicí stolicí je vidět na obrázku č. 3.4.



Obr. 3.4 Testování vzorků – Agilent 4287A RF

Další měření probíhalo na LCR měřiči MOTECH MT 4090 (*Příloha E*). Před samotným měřením vždy proběhla kalibrace naprázdno / zkrat. Veškeré vzorky byly měřeny při frekvenci 1 kHz a byly zaznamenávány následující parametry:

- Kapacity
 - C_p – paralelní kapacita
 - D – činitel jakosti

- Induktory
 - L_s – sériová indukčnost
 - Q – činitel jakosti
 - DCR – odpor, kladený stejnosměrnému proudu

Hodnoty z měřiče Motech, který je viděn na obrázku č. 3.5, byly zaznamenány, zpracovány tabulkovým editorem a následně vyhodnoceny.



Obr. 3.5 LCR měřič MOTECH MT 4090

3.4 Vyhodnocení testování

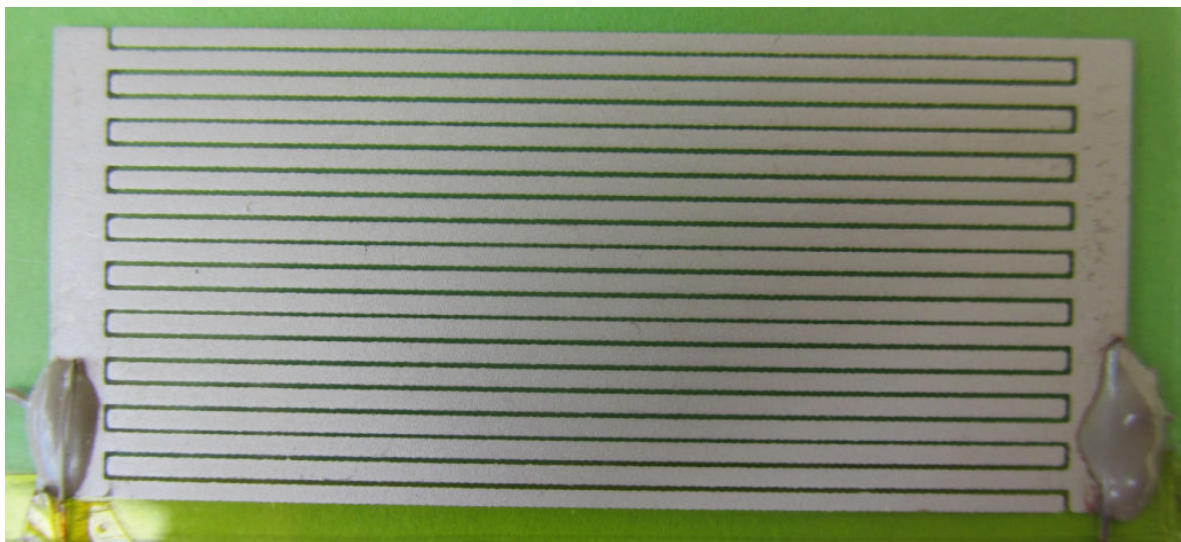
Jak již bylo v této diplomové práci několikrát zmíněno, hlavním úkolem práce je zjištění vlivu prostředí na parametry tištěných elektronických součástek.

Před prvním vystavení vzorků konstantnímu vlhkému teplu byly změřeny referenční hodnoty všech vzorků. Tyto hodnoty jsou v grafech označeny datem 29.3.

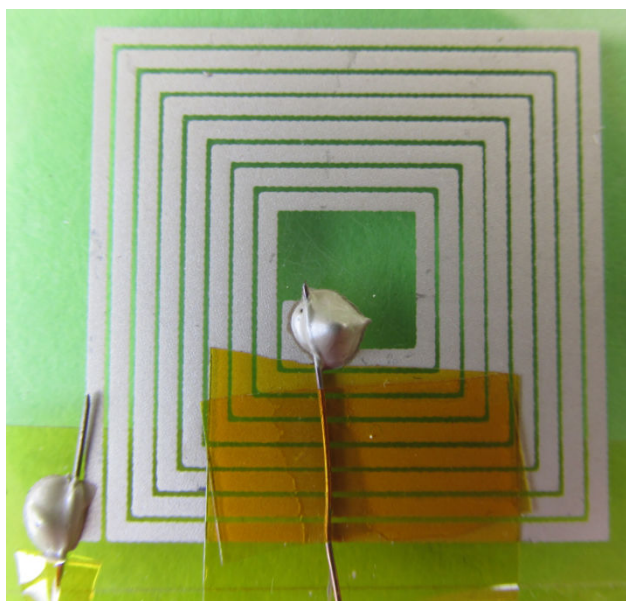
Jak bylo zmíněno v kapitole 3.3, u některých součástek bylo nutné přistoupit k dodatečnému nakontaktování měděných drátků z důvodu možnosti testování na měřicí stolici u přístroje Agilent 4287A RF. Po vystavení vzorků konstantnímu vlhkému teplu bylo však zjištěno, že některé vzorky nejsou měřitelné. Neměřitelnost vzorků byla způsobena degradací stříbrného vodivého lepidla.

Pro vyhodnocení testování vzorků byly z naměřených dat sestrojeny dva typy grafů. Z přístroje Agilent 4287A RF, kde se vyhodnocovaly sledované parametry v závislosti na vyšší frekvenci (od 1 MHz do 1 GHz) byly sestrojeny pomocí tabulkového editoru grafy typu XY bodový. Z přístroje MOTECH MT 4090, kde bylo měřeno při nižší frekvenci (1kHz) byly následně sestrojeny „burzovní grafy“. Tyto grafy byly zvoleny pro jejich nejlepší vystižení daného měřicího rozptylu kolem střední hodnoty v závislosti na čase.

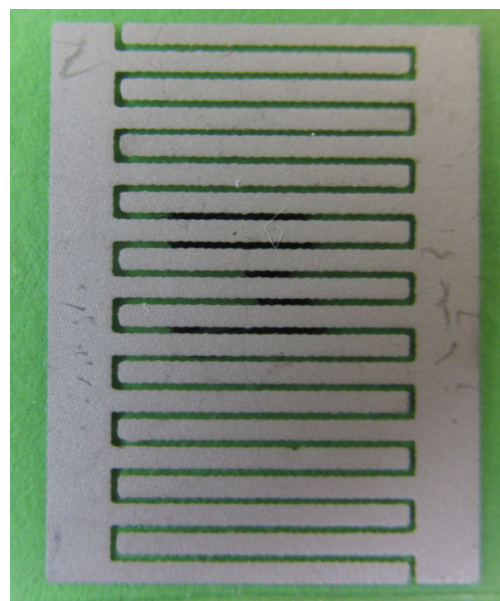
Na obrázcích 3.5, 3.6, 3.7 jsou vidět vybrané tištěné součástky již po testování. Z obrázků je patrné, že při vystavení součástek konstantnímu vlhkému teplu nedošlo k žádnému viditelnému poškození (degradaci).



Obr. 3.5 Interdigitální kapacitor po testování



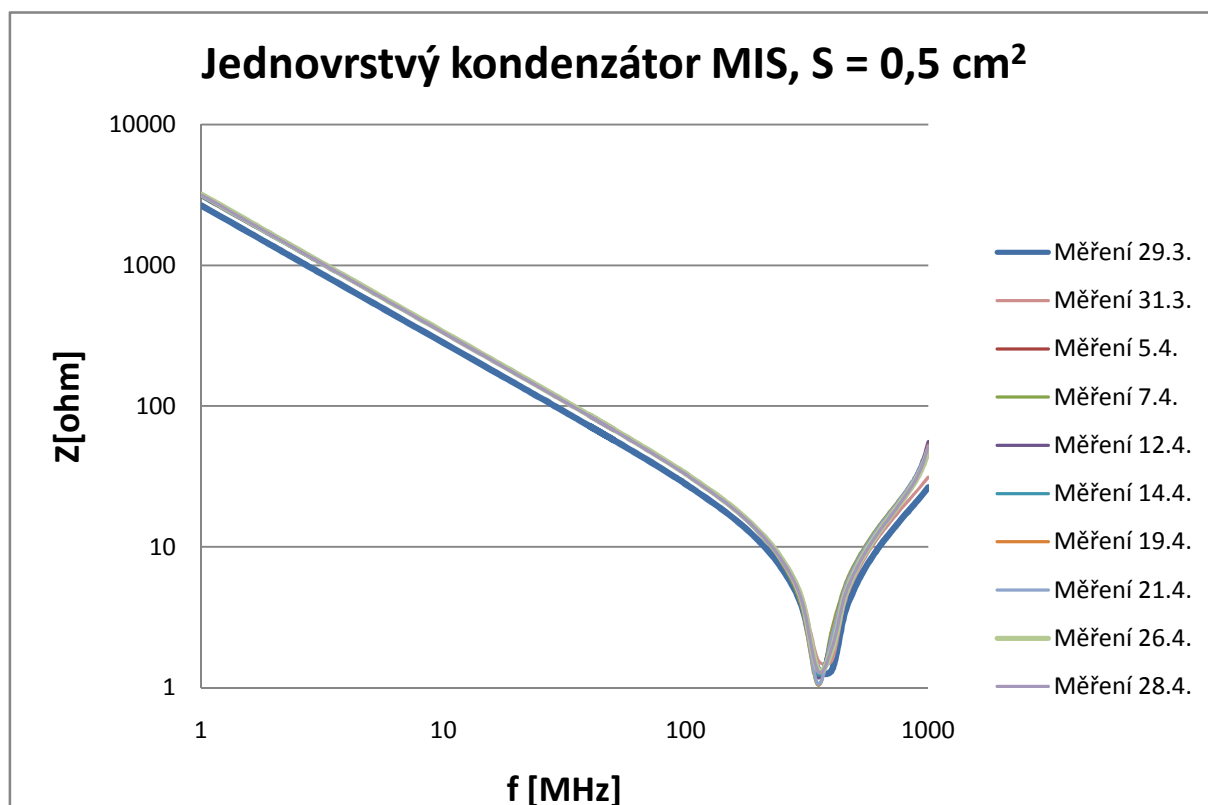
Obr. 3.6 čtvercová spirála po testování



Obr. 3.7 Interdigitální kapacitor po testování

3.4.1 Vyhodnocení testování z měřicího přístroje Agilent 4287A RF

Vybraný graf z hodnot změřených z přístroje Agilent 4287A RF je vidět v grafu 3.1. Konkrétně se jedná o jednovrstvý kondenzátor MIS, kde plocha horní elektrody $S = 0,5 \text{ cm}^2$. K sestavení těchto druhů grafů byly použity zprůměrované hodnoty vzorků z daného období měření. Odlehlé hodnoty, které byly způsobeny chybou měření, byly z následujícího vyhodnocování vyřazeny.



Graf. 3.1 Znázornění závislosti impedance na frekvenci - jednovrstvý kondenzátor MIS, $S = 0,5 \text{ cm}^2$

Do grafu 3.1, který znázorňuje změnu impedance v závislosti na frekvenci (kmitočtu), byly vyneseny průběhy pro jednotlivá období měření. Kondenzátor byl měřen ve frekvenčním pásmu od 1 MHz do 1 GHz. Z grafu je dále patrné, že impedance kondenzátoru klesala se vzrůstající frekvencí přibližně do 350 MHz, následně po překročení vlastní rezonance součástky impedance v závislosti na vzrůstající frekvenci (kmitočtu) opět vzrůstala. Dále je vidět, že rozdíly impedance kondenzátoru pro jednotlivá měření jsou minimální, tedy parametry v závislosti na vlivu prostředí se neměnily.

Další grafy tohoto typu k jednotlivým součástkám se nachází v příloze (*Příloha G*). Z těchto grafů můžeme vidět typické průběhy závislosti impedance na frekvenci u induktorů a kapacit. Na základě výsledků měření nebyla pozorována významná změna elektrických

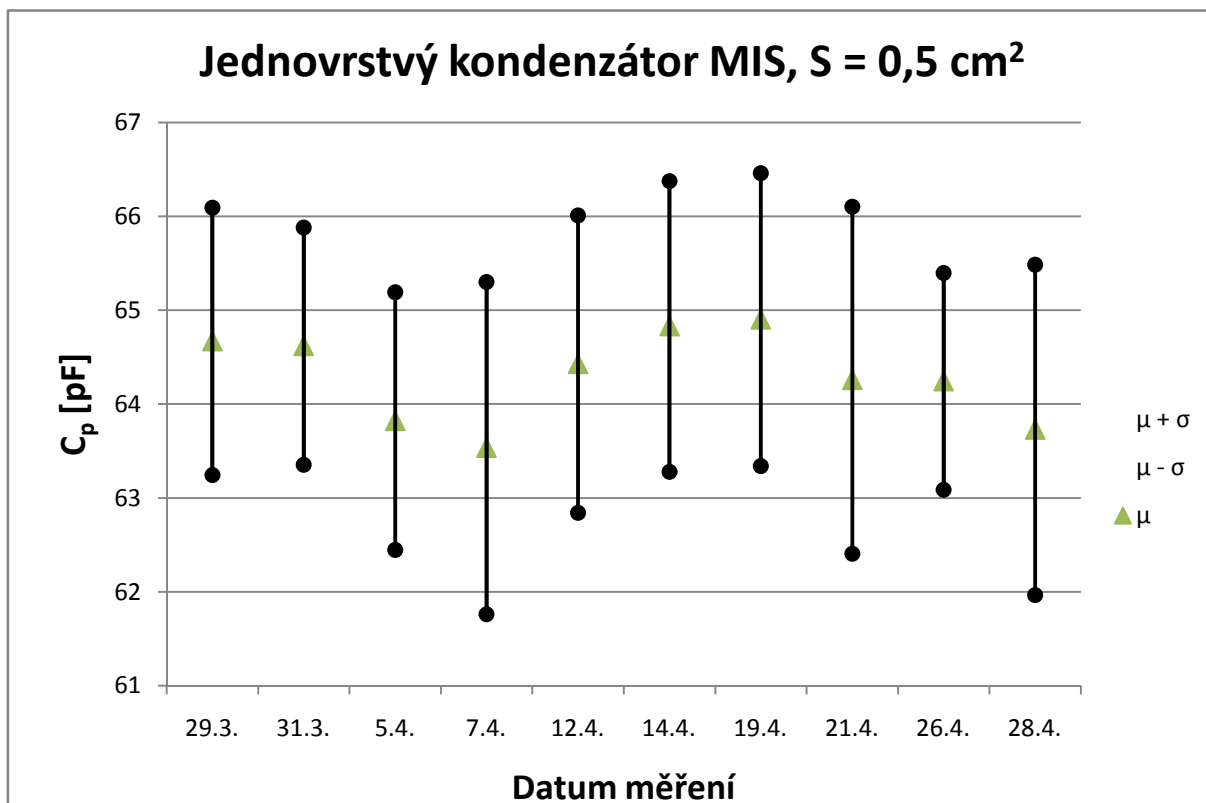
parametrů testovaných planárních součástek. Drobné odchylky jsou pravděpodobně způsobené kontaktováním součástek během měření.

Dále u součástek interdigitální kapacitor 10 prstů, $l = 10$ mm; 20 prstů, $l = 10$ mm a u meandrového induktoru - 4 úseky nebyla ve stanoveném měřicím rozsahu patrná rezonanční frekvence. Byla tedy u posledního měření změněna měřicí frekvence do 2,6 GHz.

3.4.2 Vyhodnocení testování z LCR měřiče MOTECH MT 4090

Další vyhodnocení testování probíhalo zpracováním naměřených hodnot z LCR měřiče MOTECH MT 4090. Z tohoto měření byly následně sestrojeny grafy v závislosti C_p – paralelní kapacita, popřípadě L_s – sériová indukčnost na čase (datu měření). V grafu 3.2 je možno pozorovat závislost C_p na čase (datu měření), opět je zde uveden graf jednovrstvého kondenzátoru MIS, $S = 0,5$ cm². V grafu můžeme pozorovat, že parametry součástek se v závislosti na vlivu prostředí nemění. Mírné odchylky jsou způsobeny opět chybou měření.

Pro lepší názornost a vyhodnocení hodnot byly do grafů vyneseny průměrné hodnoty μ a dále pak směrodatné odchylky $\mu + \sigma$, $\mu - \sigma$. Pomocí směrodatných odchylek je možno lépe poznat odchylku naměřených hodnot od průměru (střední hodnoty).



Graf 3.2 Závislost C_p – paralelní kapacita na čase - Jednovrstvý kondenzátor MIS, $S = 0,5 \text{ cm}^2$

Další grafy tohoto typu jsou uvedeny v příloze (Příloha H).

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo seznámení se s problematikou návrhu planárních tištěných elektronických součástek a zjištění vlivu prostředí na elektrické parametry tištěných součástek. Pro tento test byl v poslední kapitole navržen postup a metoda testování vlivu okolního prostředí na tyto tištěné elektronické součástky.

V teoretické části byly shrnuty nejběžnější technologie vytváření tištěných elektronických součástek jako je sítotisk, šablonový tisk, ale jsou zde uvedeny i informace o nové patentované tiskařské technologii AJP (Aerosol Jet Printing) od výrobce Optomec. Dále v této práci jsou uvedeny různé typy provedení tištěných elektronických součástek, včetně jejich návrhů a výpočtů parametrů. Tyto návrhy a výpočty byly použity v praktické části této práce.

Na základě normy byl v praktické části navržen postup a metoda testování vlivu prostředí na planární tištěné elektronické součástky. K tomuto testování bylo navrženo 17 druhů tištěných součástek, každá byla vyrobená 5 krát, celkem tedy bylo použito v testu 85 součástek. Veškeré součástky byly vystaveny v určitých periodách vlivu konstantního vlhkého tepla, a poté měřeny jejich elektrické parametry v závislosti na parametrech okolního prostředí.

Pomocí tohoto testování bylo zjištěno, že vystavení tištěných elektronických součástek, vyrobených sítotiskovou metodou, vlivům okolního prostředí nemá významný vliv na elektrické parametry těchto součástek. Případné mírné odchylky nejen v rezonančních frekvencích byly způsobeny chybou měření.

Tato práce byla vypracována dle bodů uvedených v zadání a pokynů vedoucího práce. Všechny cíle zadání byly splněny.

Seznam použitých zdrojů

- [1] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 440 s. ISBN 80-01-02392-3.
- [2] HOUŠKA, Radek. *Problematika PRT - Planar Resistor Technology*. Plzeň, 2007. Bakalářská práce. FEL ZČU. Vedoucí práce Ing. Jan Šimeček.
- [3] *Sítotisk* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1791>
- [4] BUJALOBOKOVÁ, Magdaléna a Pavel TRNKA. *Progresivní tlustovrstvové technologie v elektronických aplikacích* [online]. [cit. 2015-12-08]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36505.pdf>
- [5] *Sítotisk* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://sshopct.cz/polygrafie/all/8/data/2.sitotisk-predlohy.ramy.a.sitoviny.pdf>
- [6] HLÍNA, Jiří. *Aditivní metody vytváření vodivých obrazců na substráty pro senzorické aplikace* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/8239/BP_Hlina_Jiri.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. ZČU FEL. Vedoucí práce Ing. Karel Hromadka.
- [7] DOLEŽEL, Tomáš. [online]. Brno, 2014 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=88312. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Adámek, Ph.D.
- [8] HUBÁLEK, Jaromír. *Mikrotechnologie* [online]. [cit. 2015-12-08]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUK Ewii9MWgsMzJAhWEVywKHZDjDbUQFggdMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.umel.feec.vutbr.cz%2Fnanoteam%2Fdata%2Fsoubory%2FMikrotechnologiestudijn%2F5C3%25AD%2520materi%25C3%25A1ly_Mikrotechnologie.docx&usg=AFQjCNFhr7DoQ32gZDKUX9eWo4ICxC6Rww&bvm=bv.109332125,d.bGg&cad=rja

- [9] Od písku k procesoru: tajemství technologií výroby čipů. *Pc tuning* [online]. [cit. 2015-12-08]. Dostupné z: <http://pctuning.tyden.cz/hardware/procesory-pameti/34087-od-pisku-k-procesoru-tajemstvi-technologie-vyroby-cipu?start=6>
- [10] *Aerosol Jet Printing aneb když tranzistor prochází tryskou* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [11] *Aerosol Jet Technology for 3D Printed Electronics* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-technology/>
- [12] *Výzkumné centrum ZČU má unikátní přístroj pro tisk elektronických součástek* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://plzen.cz/vyzkumne-centrum-zcu-ma-unikatni-pristroj-pro-tisk-elektronickych-soucastek-18130/>
- [13] VOKROUHLÍK, Stanislav. *Planární transformátory*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. ZČU FEL.
- [14] KONEČNÁ, Zuzana. *Planární transformátory pro statické měniče používané v trakčních aplikacích* [online]. Praha, 2015 [cit. 2015-12-08]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61747/F3-DP-2015-Konecna-Zuzana-DIP_internet.pdf?sequence=1
- [15] VACHTA, Radek. *Planární RLC součástky*. Plzeň. Bakalářská práce. ZČU FEL.
- [16] HOFFMANN, Karel. *Planární mikrovlnné obvody*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 145 s. ISBN 978-80-01-03705-8.
- [17] ČSN EN 60068 –2 –78 ed. 2. Zkoušení vlivu prostředí –Část 2 –78: Zkoušky – Zkouška Cab: Vlhké teplo konstantní
- [18] ČSN EN 60068 –1 ed. 2. Zkoušení vlivu prostředí –Část 1: Obecně a návod
- [19] *Agilent 4287A RF LCR Meter 1 MHz - 3 GHz Data Sheet* [online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: https://d3fdwrtpsindh7j.cloudfront.net/Docs/datasheet/Agilent_4287A.pdf
- [20] *Operation Manual MT 4090 LCR Meter* [online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://www.inp.nsk.su/students/radio/lectures/REL/New/RLCmeter-mt4090_um.pdf

Seznam příloh

Příloha A Induktory z velmi krátkých úseků vedení

Příloha B Kapacity z velmi krátkých úseků vedení

Příloha C Mezera v mikropásku, tenkovrstvý kapacitor, SMD kapacitor

Příloha D Rezistory

Příloha E Agilent 4287 A RF, LCR měřič MOTECH MT 4090

Příloha F Grafy - Agilent 4287 A RF

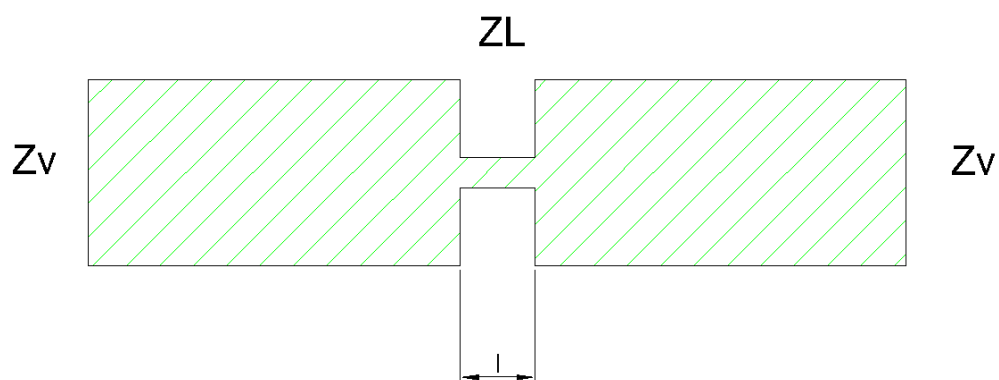
Příloha G Grafy - LCR měřič MOTECH MT 4090

Přílohy

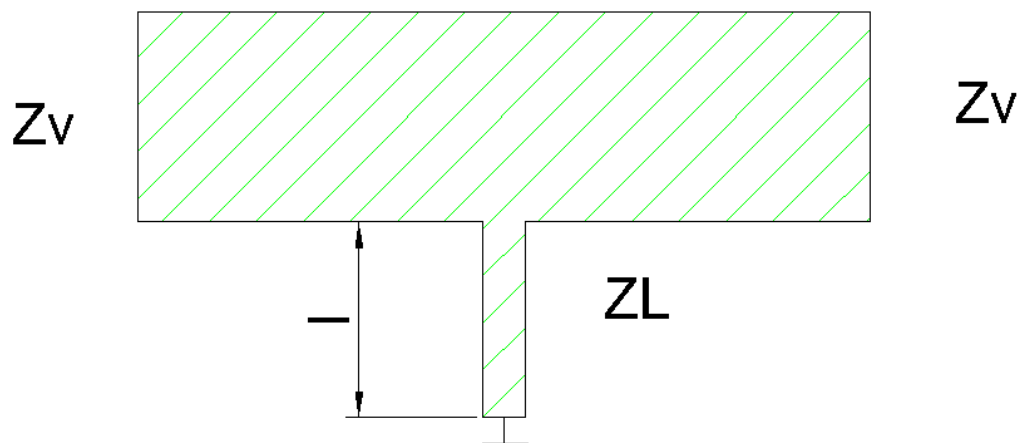
Příloha A

Induktory z velmi krátkých úseků vedení

Jedná se o induktory, které mají hodnotu indukčnosti řádově desetkrát menší, než klasické. Indukčnost se tedy pohybuje v rozmezí desetin až desítek nH. Tyto prvky jsou tvořeny přímo na vedení a jeho zúžení vyjadřuje indukčnost. Samotná hodnota induktoru je pak dána geometrickými rozměry (délkou a šířkou zúženého místa). Ta se vypočítává z vlnové impedance. K výpočtu se používá tzv. metoda konformního zobrazení. Induktory z velmi krátkých úseků vedení můžeme vidět na obrázcích č. 1,2 a 3. [15]



Obr. 1 Sériový induktor

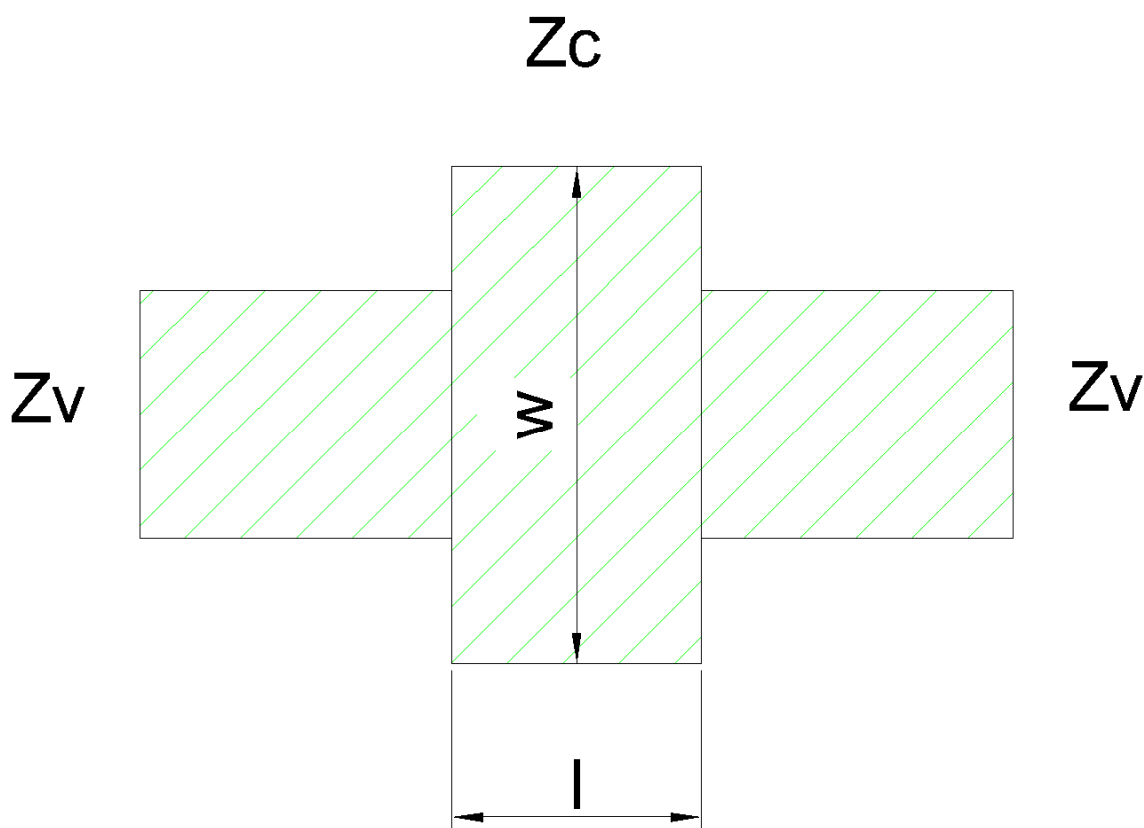


Obr. 2 Paralelní induktor

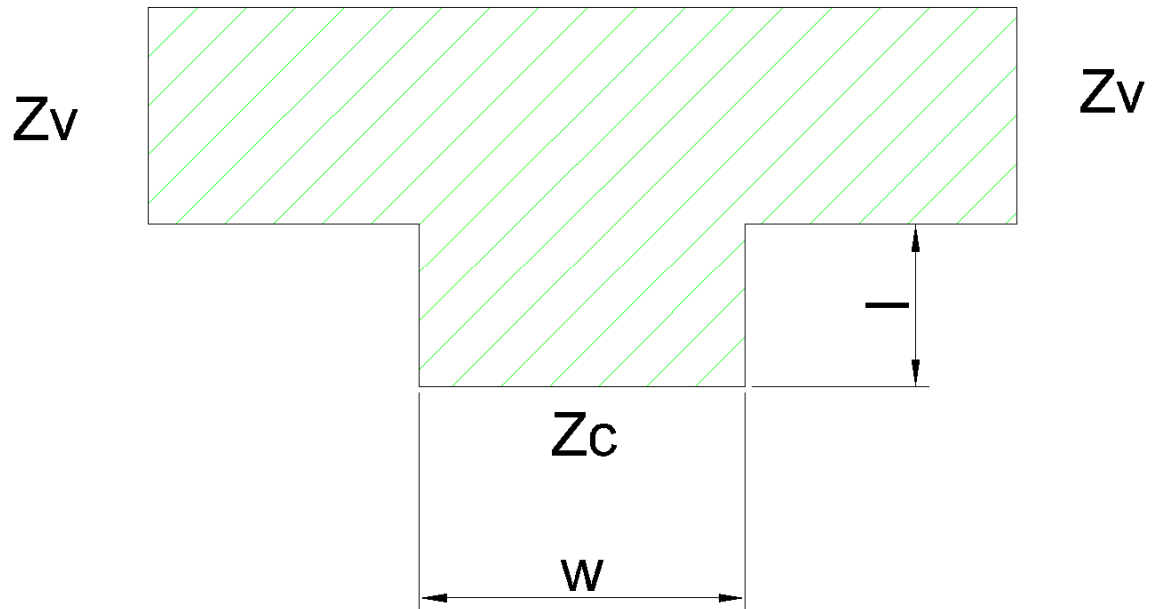
Příloha B

Kapacitory z velmi krátkých úseků vedení

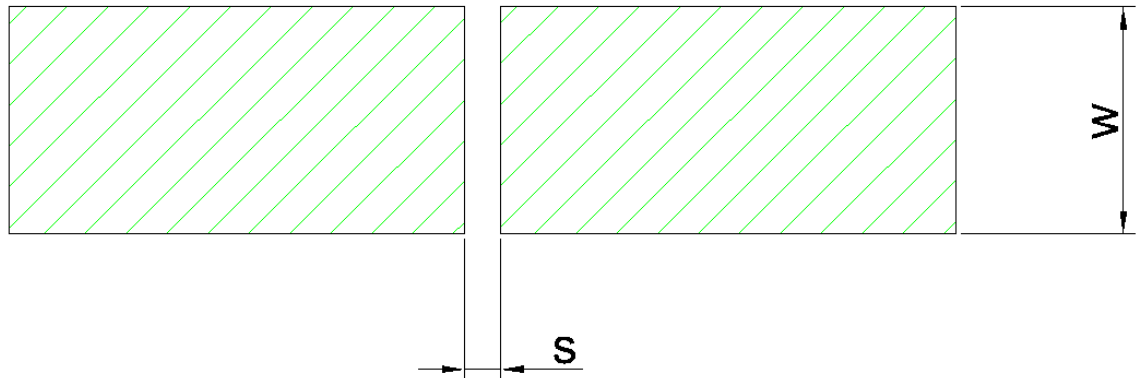
Kapacitory z *krátkých úseků vedení* jsou vytvořeny rozšířením části vedení. Výsledná kapacita je dána geometrickými rozměry tohoto rozšíření. Kapacita dosahuje jednotek pF. Výpočet se opět provádí za pomoci tzv. metody konformního zobrazení vycházející z impedance vedení. Jednotlivé kapacitory z *krátkých úseků vedení* můžeme vidět na obrázcích č. 3 a 4. [15]



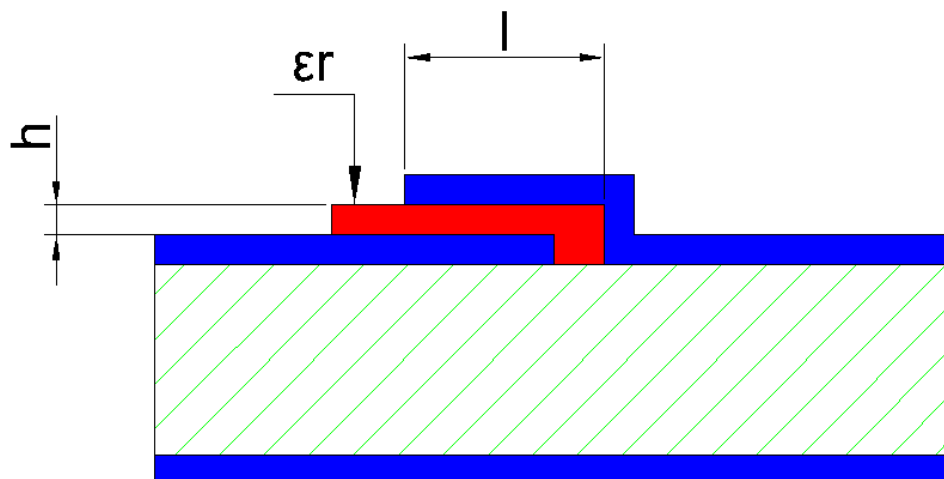
Obr. 3 Kapacitor z krátkého úseku vedení



Obr. 4 Kapacitor z krátkého úseku vedení – kapacitní pahýl

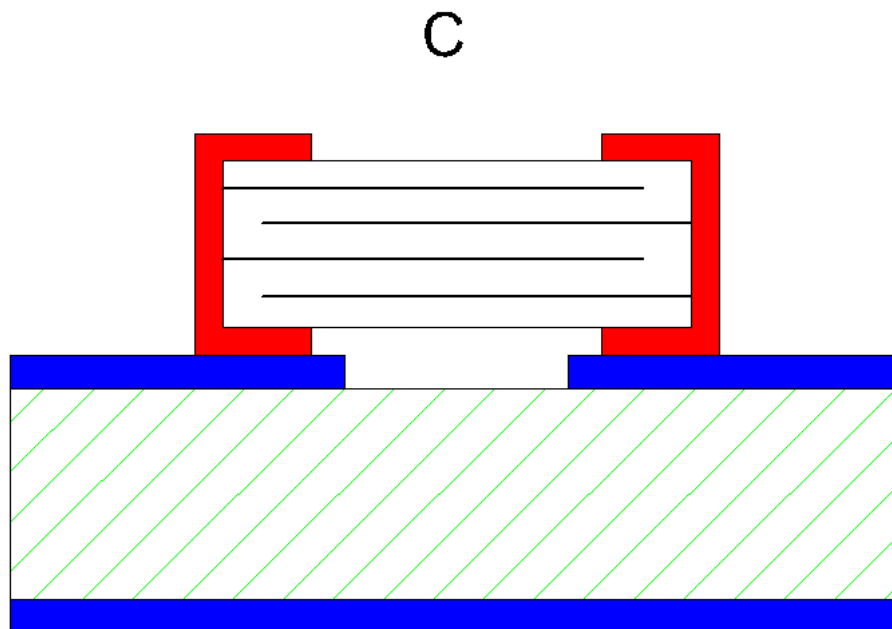
Příloha C**Mezera v mikropásku**

Obr. 5 Klasický kapacitor – mezeru v mikropásku

Tenkovrstvý kapacitor

Obr. 6 Klasický kapacitor – tenkovrstvý kapacitor

SMD kapacitor



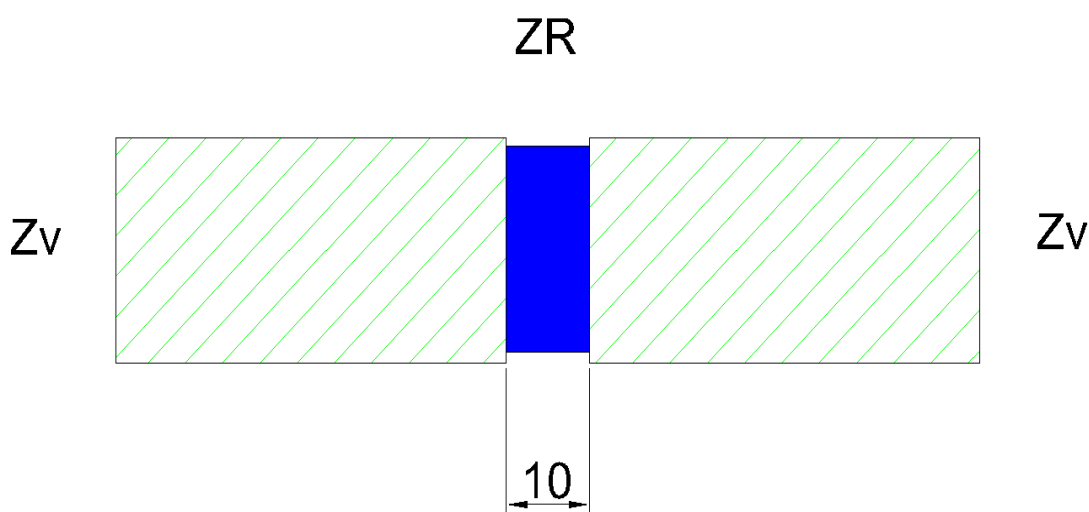
Obr. 7 Klasický kapacitor – SMD kapacitor

Příloha D

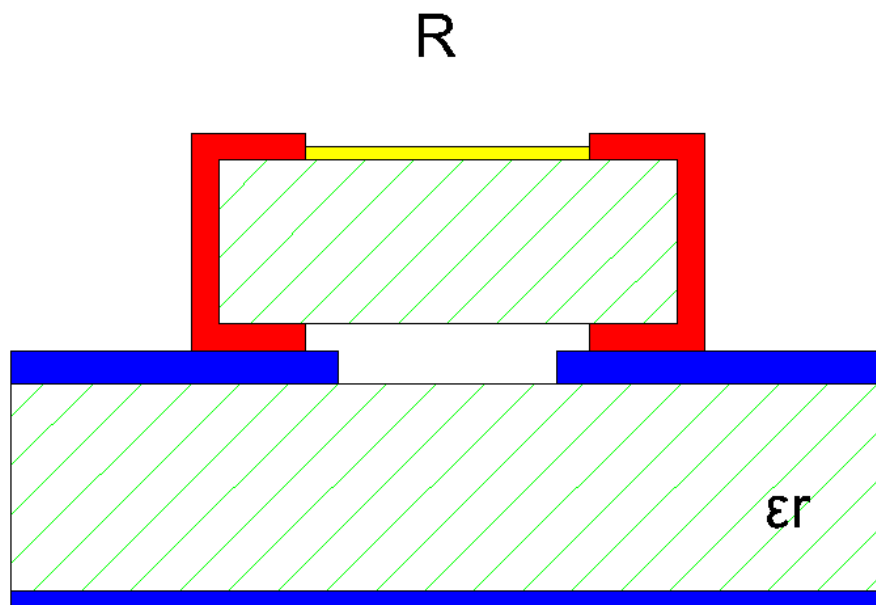
Rezistory

Rezistor je v planární technologii realizován z *velmi krátkého úseku vedení*. K jeho zrealizování stačí vytvořit mezeru v mikropáskovém vedení a do této mezery nanést odporový materiál s plošným odporem v rozmezí od 9,5 až 135 Ω/\square a tloušťkou od 0,05 do 0,2 μm . Výsledný odpor je tedy dán plochou této odporové vrstvy. [15]

Další možností k vytvoření odporového prvku je pomocí SMD odporu. Zde musíme mít na paměti, že vysokofrekvenční vlastnosti prvku jsou ovlivněny způsobem montáže. Na následujícím obrázku č. 8 je uveden rezistor z *krátkého úseku vedení* a na obrázku č. 9 SMD odpor. [16]



Obr. 8 Rezistor – krátký úsek odporového vedení



Obr. 9 SMD odpor

Příloha E

Agilent 4287A RF

Základní specifikace [19]:

Measurement parameters

Impedance parameters: $|Z|$, $|Y|$, L_s , L_p , C_s , C_p , R_s , R_p , X , G , B , D , Q , θ_z [°],
 θ_z [rad], θ_y [°], θ_y [rad]
(A maximum of four parameters can be displayed at one time.)

Measurement range

Measurement range: 200 m Ω to 3 k Ω
(Frequency = 1 MHz,
Averaging factor = 8,
Oscillator level ≥ -33 dBm,
Measurement uncertainty $\leq \pm 10$ %,
Calibration is performed within 23 °C ± 5 °C,
Measurement is performed within ± 5 °C from the calibration temperature.)

Source characteristics

Frequency

Range: 1 MHz to 3 GHz
Resolution: 100 kHz
Uncertainty : ± 10 ppm (23 °C ± 5 °C)
 ± 20 ppm (5 °C to 40 °C)

LCR měřič MOTECH MT 4090

Základní specifikace [20]:

1. Voltage Measurements:

- AC : True RMS, up to 600Vrms @ 40 ~ 1K Hz
- DC : up to 600V
- Input Impedance : 1M-Ohm

2. Current Measurements:

- AC : True RMS, up to 2Arms @ 40 ~ 1K Hz
- DC : up to 2A
- Current Shunt : 0.1 Ohm > 20mA; 10 Ohm ≤ 20mA

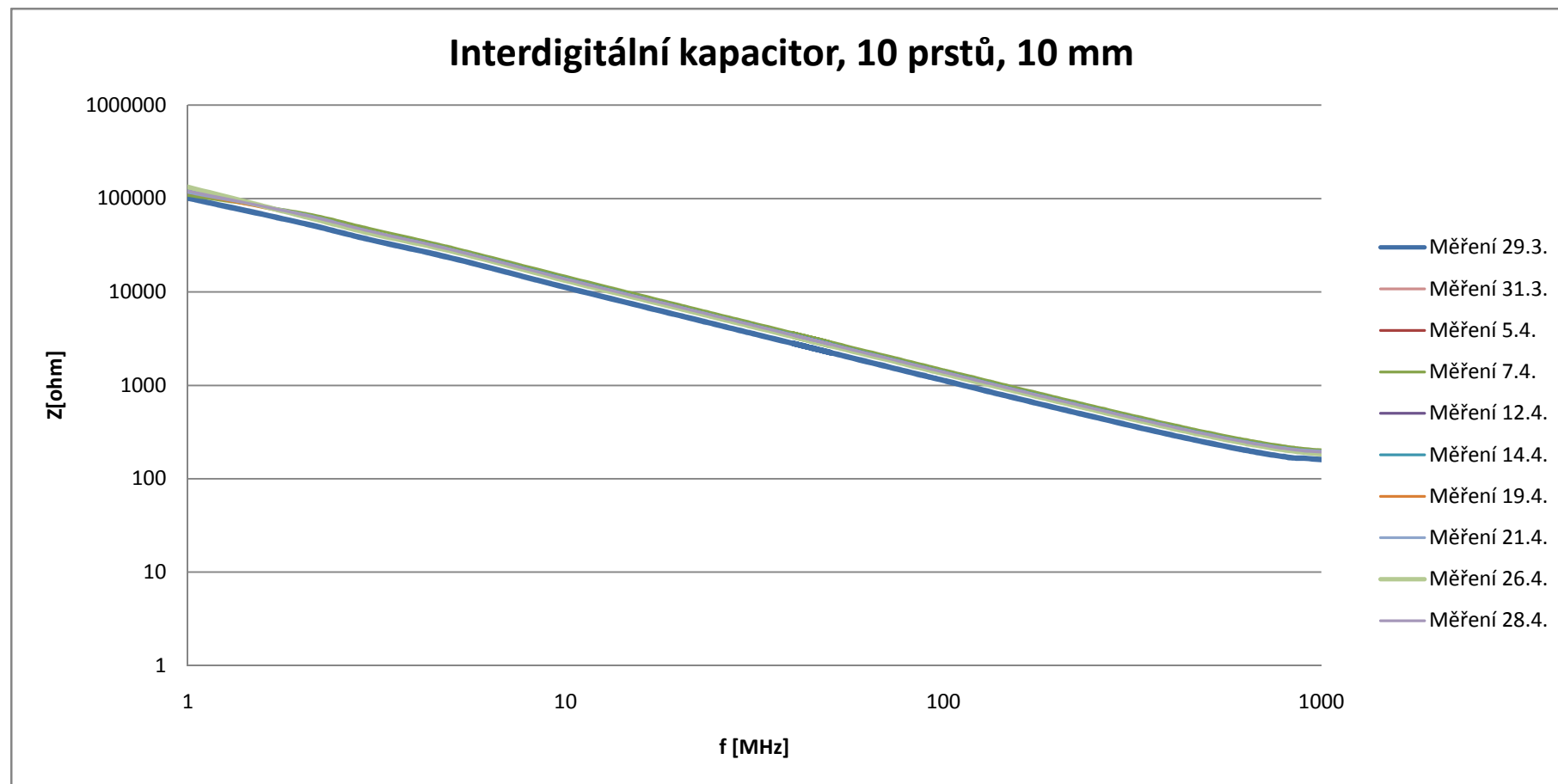
3. Diode/Audible Continuity Checks:

- Open Circuit Voltage: 5Vdc
- Short Circuit Current: 2.5mA
- Beep On: 25
- Beep Off: 50

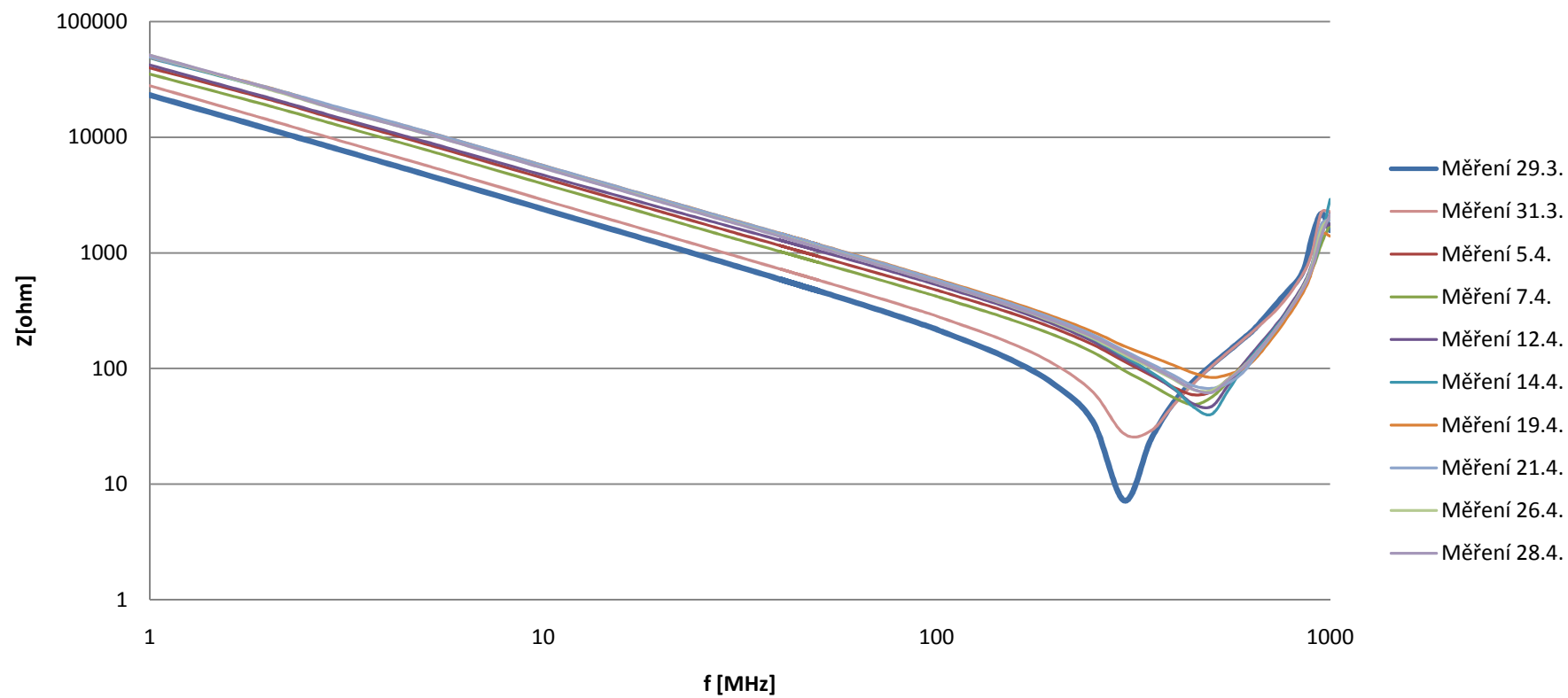
4. LCR Measurements:

- Test conditions
 - 1 Frequency : 100Hz / 120Hz / 1KHz / 10KHz / 100KHz / 200KHz
 - 2. Level : 1Vrms / 0.25Vrms / 50mVrms / 1VDC (DCR only)
- Measurement Parameters : Z, Ls, Lp, Cs, Cp, DCR, ESR, D, Q and
- Basic Accuracy : 0.1%
- Dual Liquid Crystal Display
- Auto Range or Range Hold
- USB Interface Communication
- Open/Short Calibration
- Primary Parameters Display:
 - Z : AC Impedance
 - DCR : DC Resistance
 - Ls : Serial Inductance
 - Lp : Parallel Inductance
 - Cs : Serial Capacitance
 - Cp : Parallel Capacitance
- Second Parameter Display:
 - θ : Phase Angle
 - ESR : Equivalence Serial Resistance
 - D : Dissipation Factor
 - Q : Quality Factor
- Combinations of Display:
 - Serial Mode : Z – θ , Cs – D, Cs – Q, Cs – ESR, Ls – D, Ls – Q, Ls – ESR
 - Parallel Mode : Cp – D, Cp – Q, Lp – D, Lp – Q

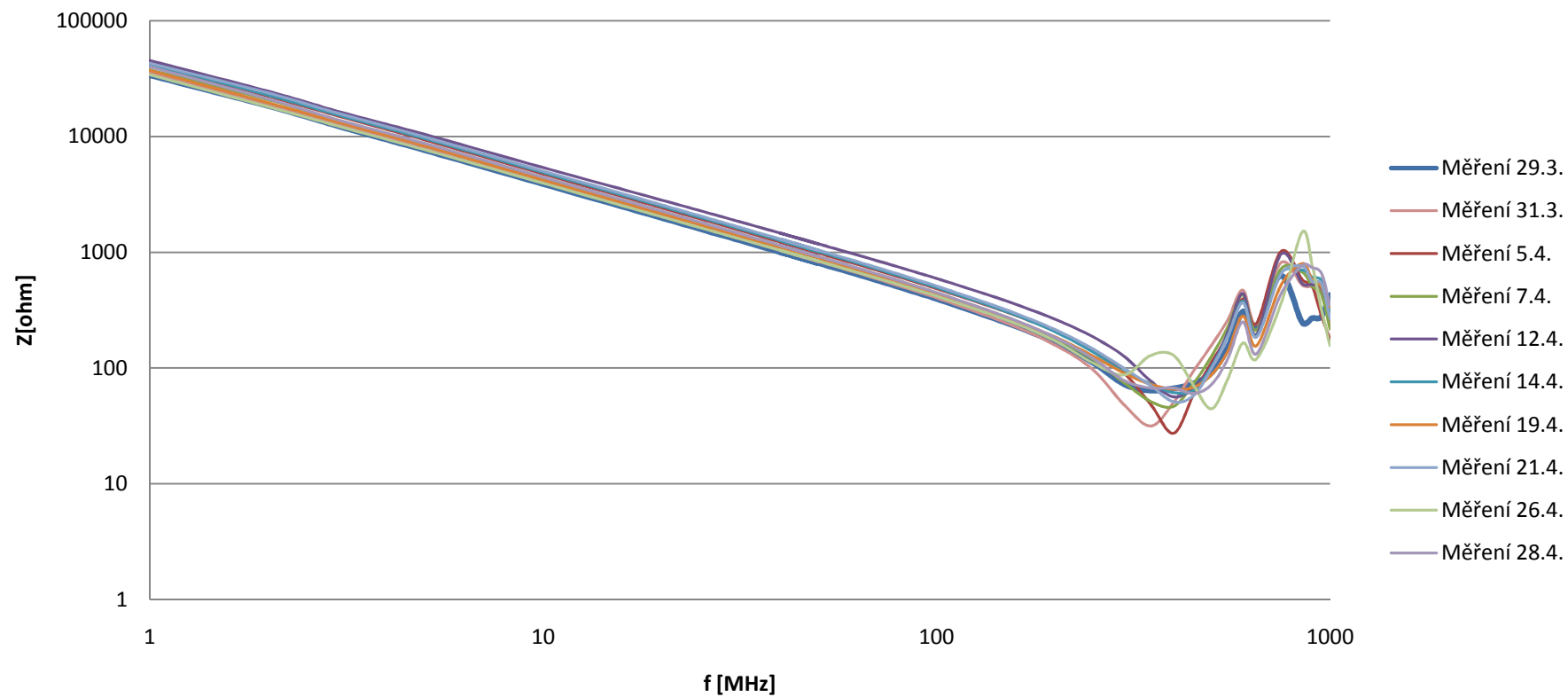
Příloha G - Grafy – Agilent 4287A RF



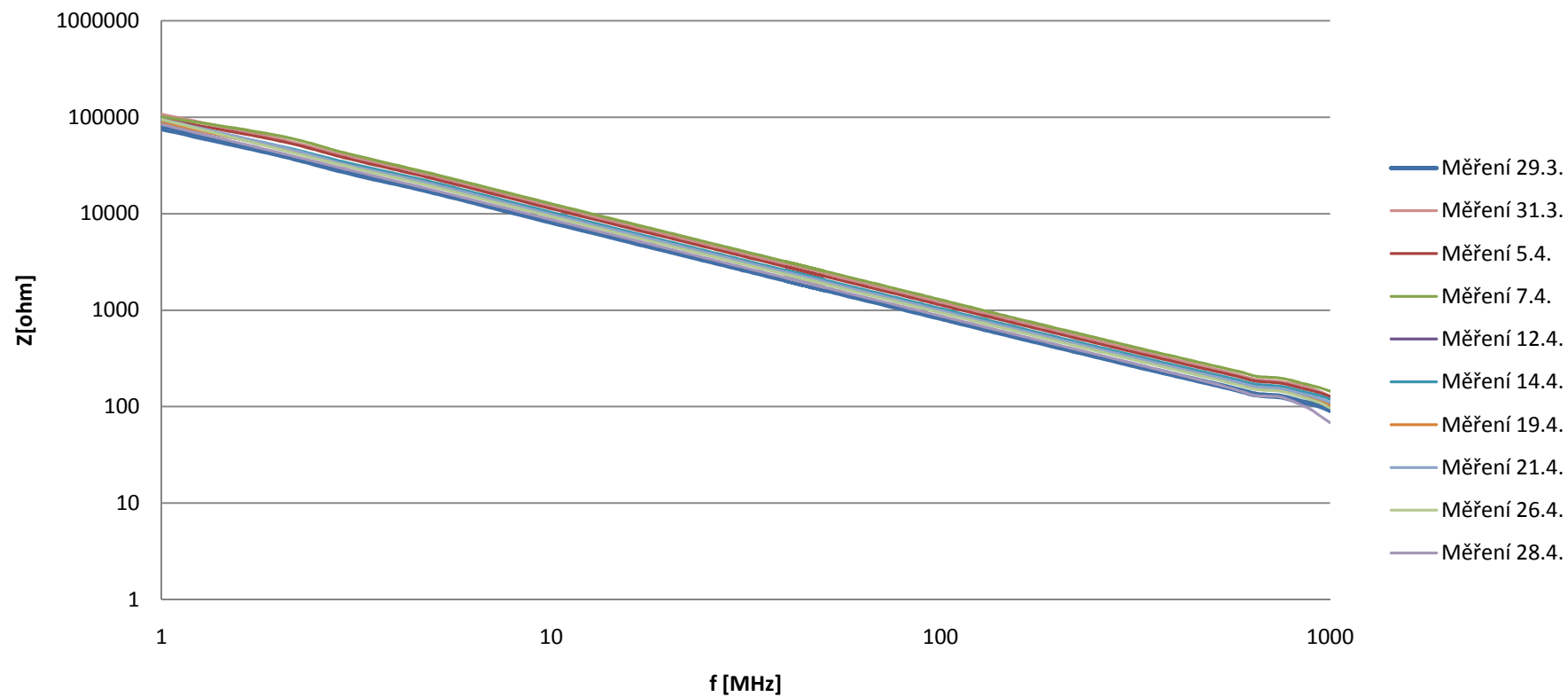
Interdigitální kapacitor, 10 prstů, 20 mm



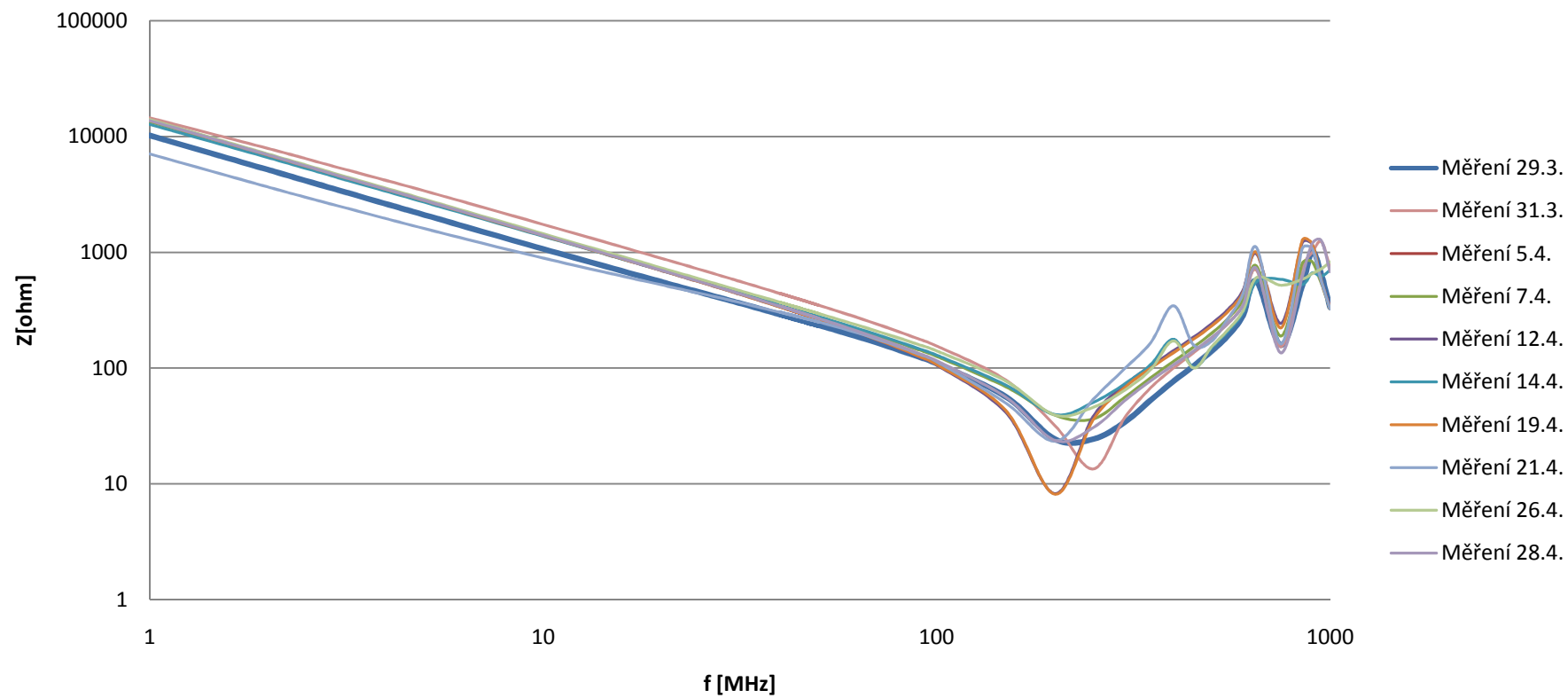
Interdigitální kapacitor, 10 prstů, 40 mm



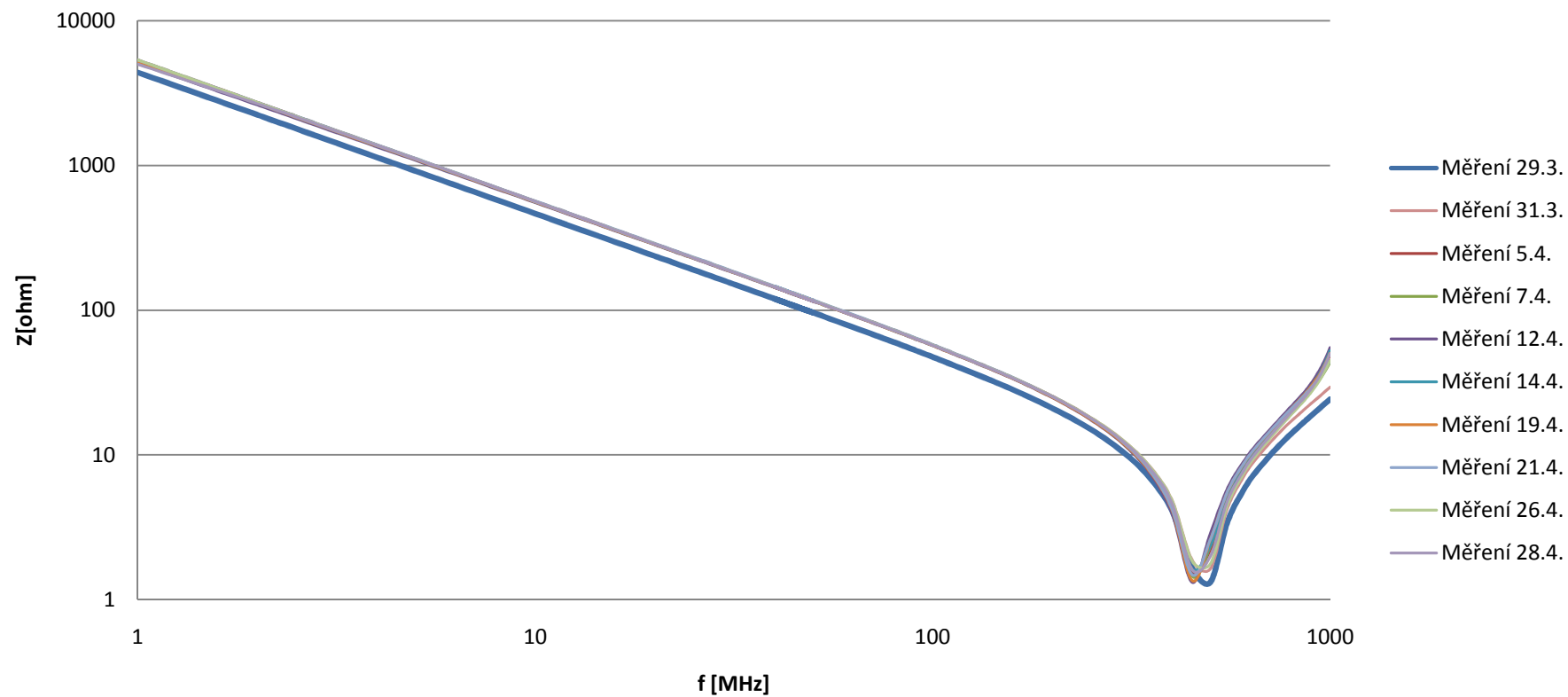
Interdigitální kapacitor, 20 prstů, 10 mm



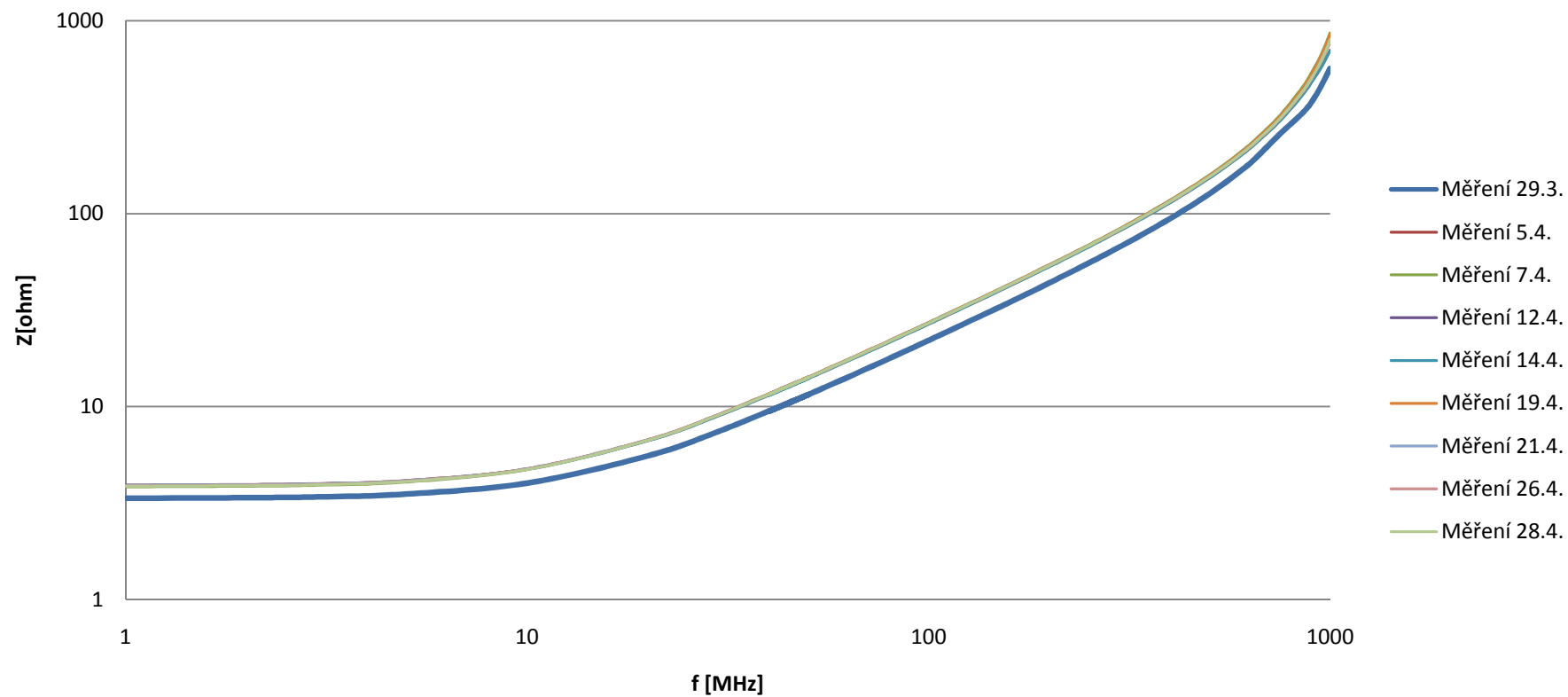
Interdigitální kapacitor, 20 prstů, 20 mm



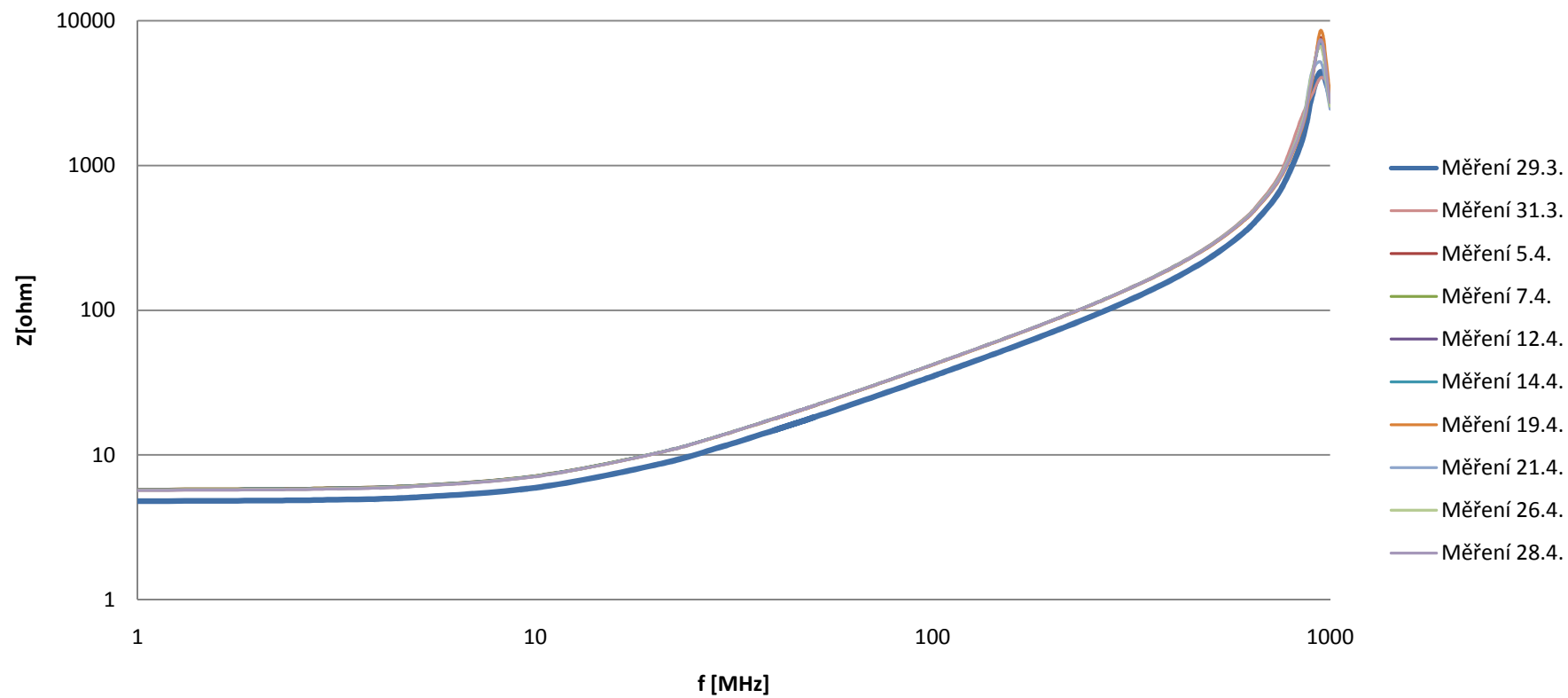
Jednovrstvý kondenzátor MIS, S = 0,25cm²

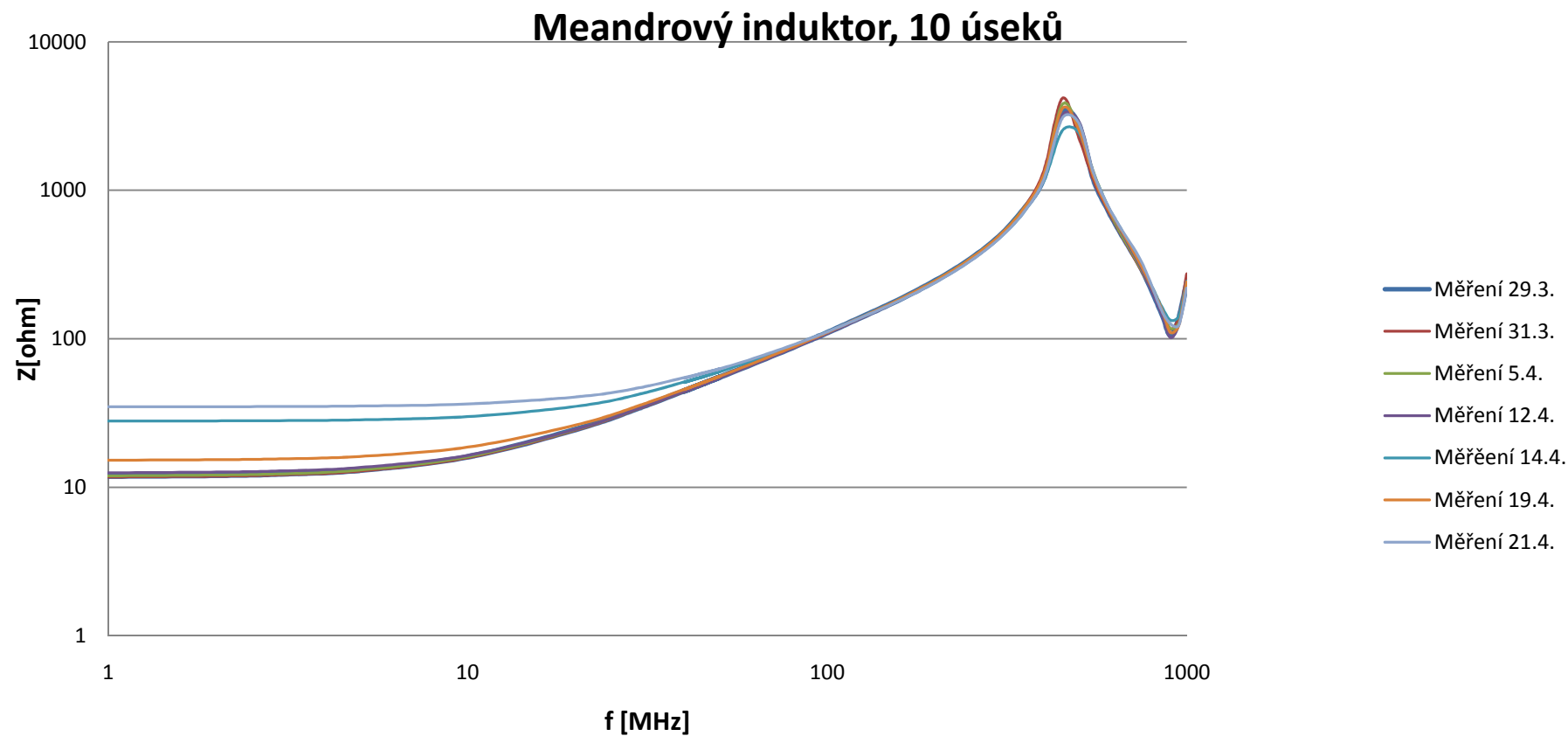


Meandrový induktor, 4 úseky

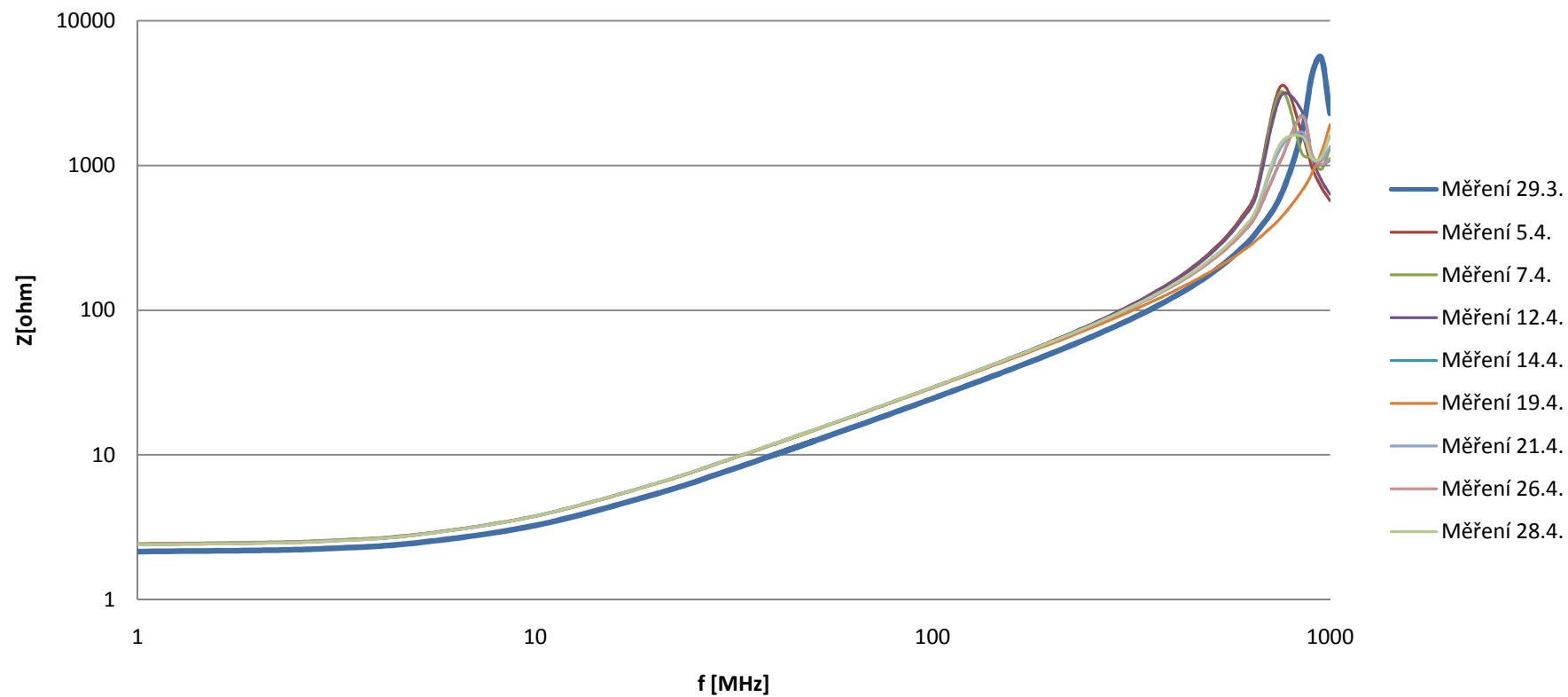


Meandrový induktor, 6 úseků

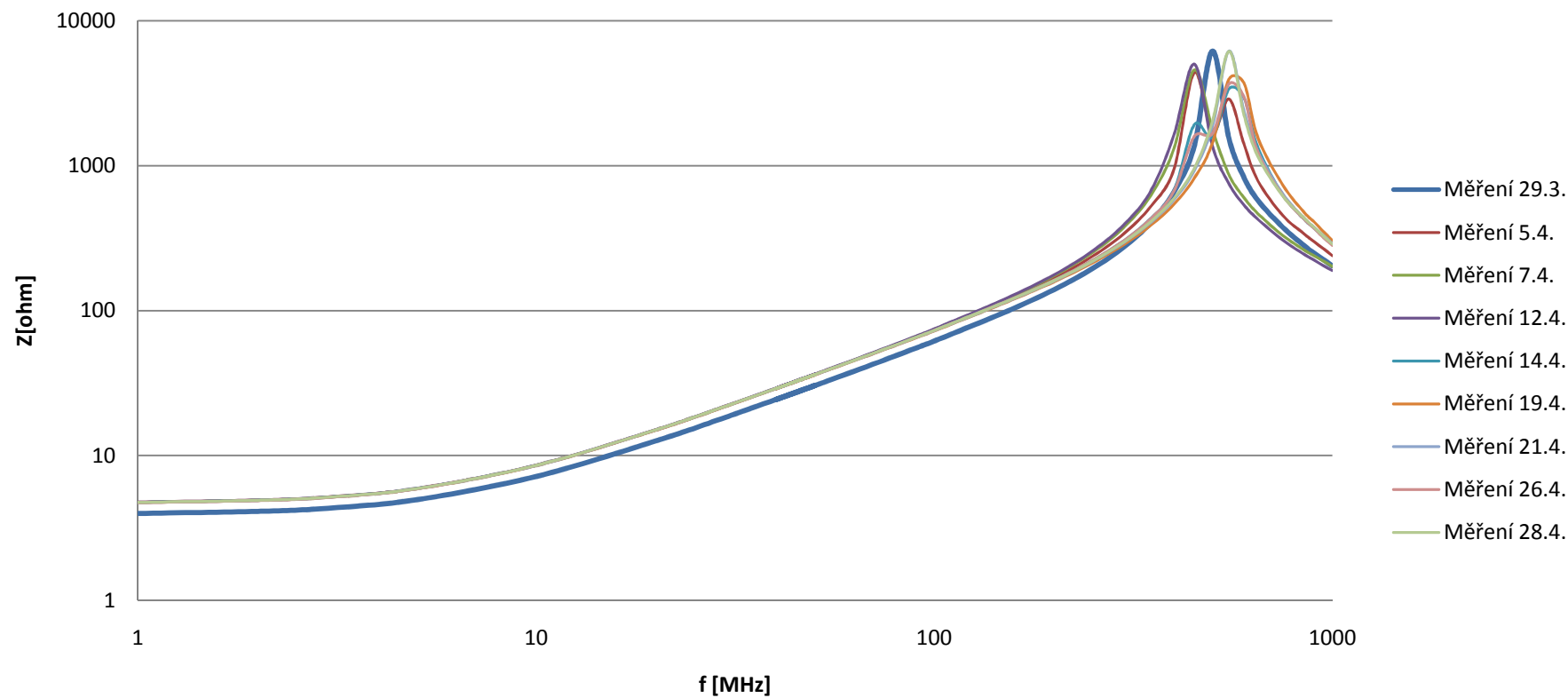




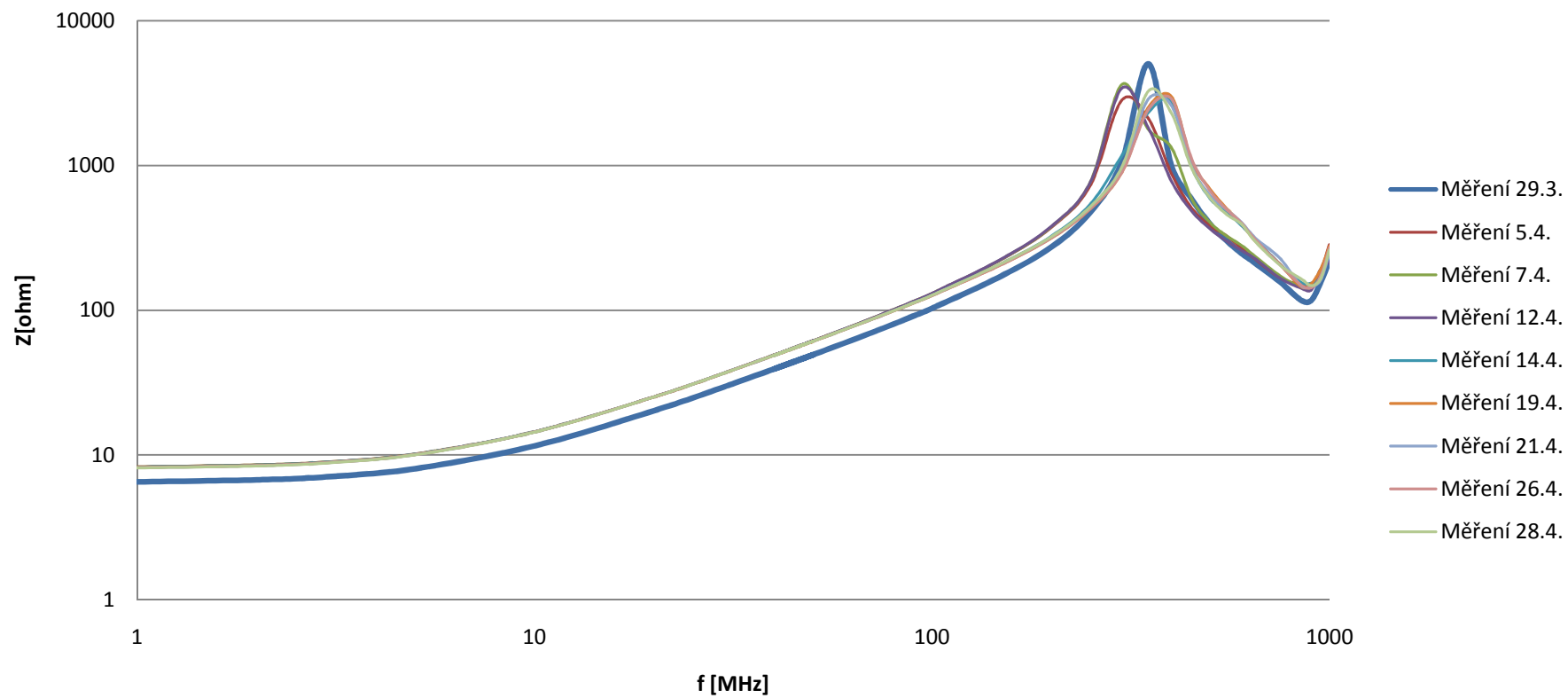
Plochá smyčka, r = 10 mm



Plochá smyčka, r = 20 mm

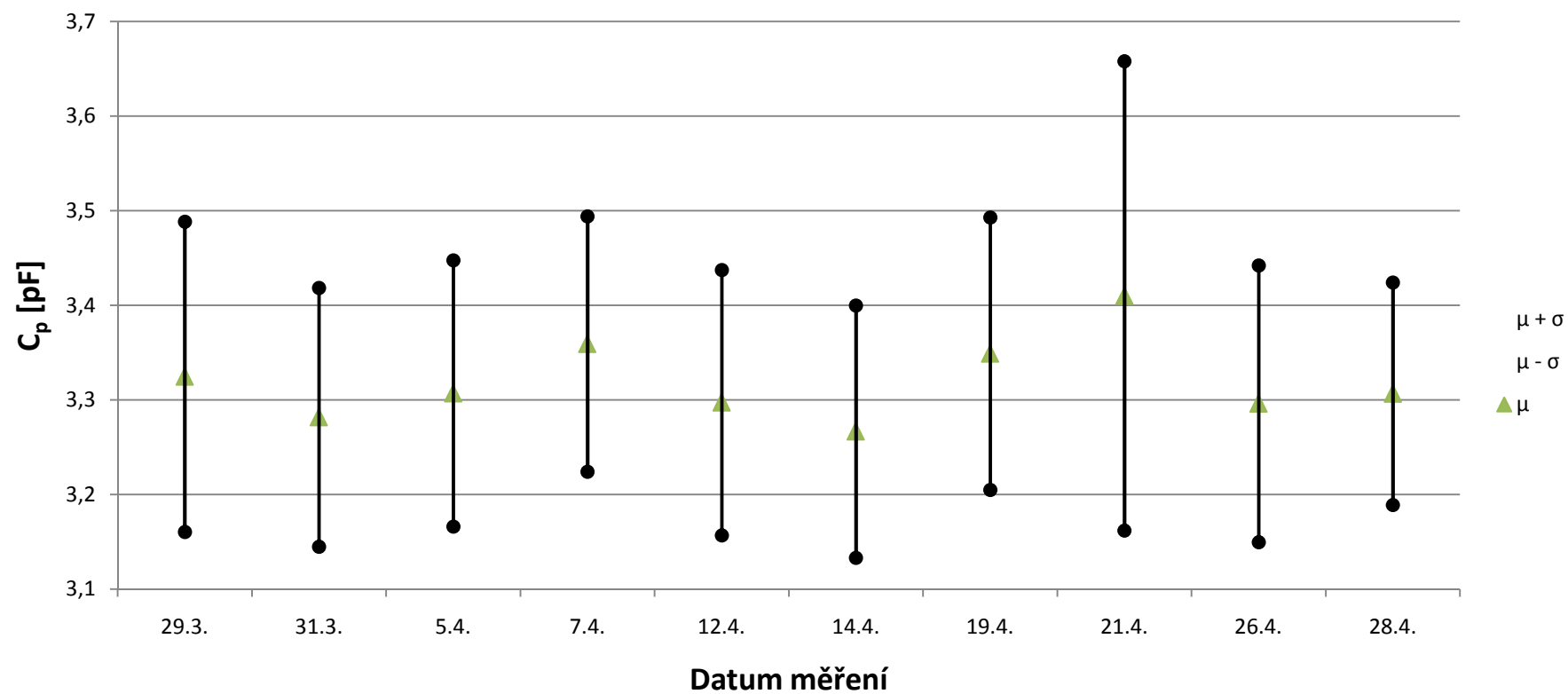


Plochá smyčka, r = 30 mm

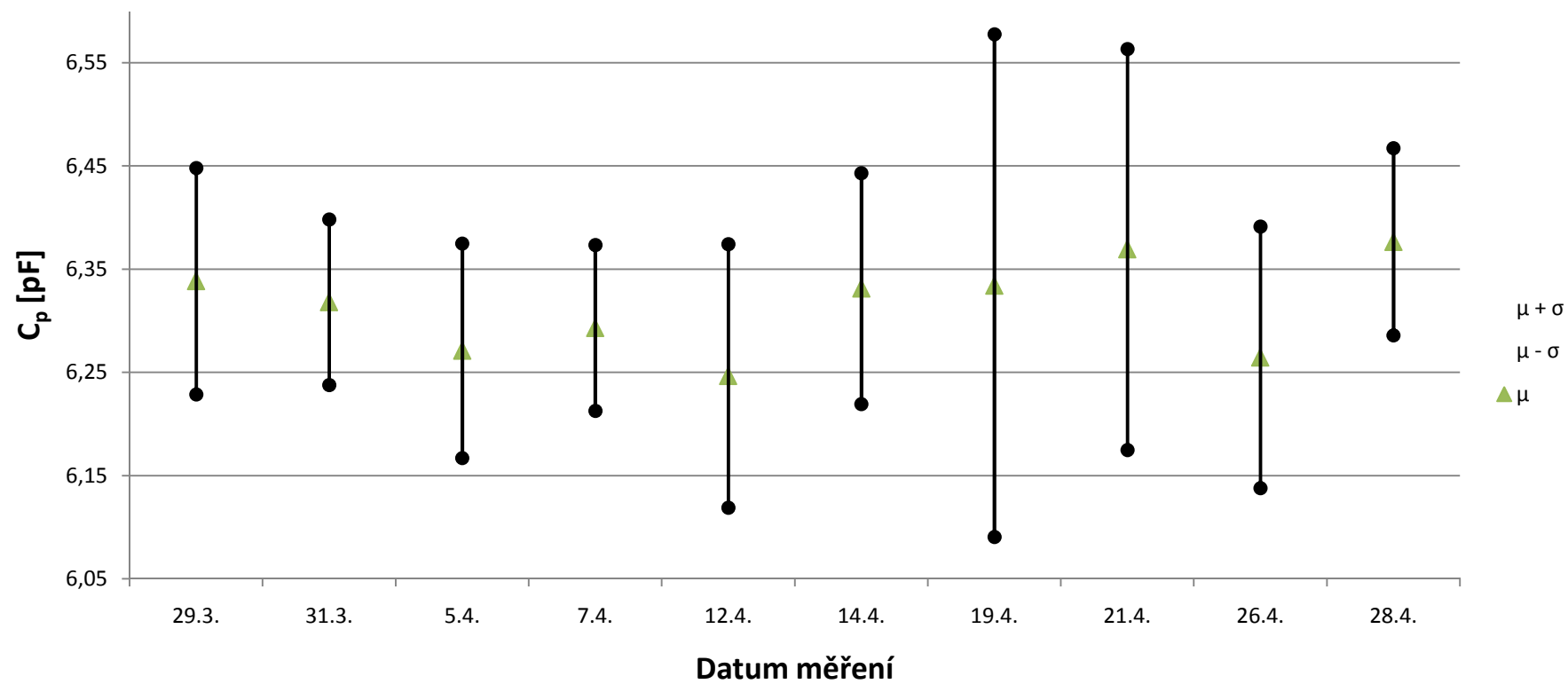


Příloha H - Grafy LCR měřič MOTECH MT 4090

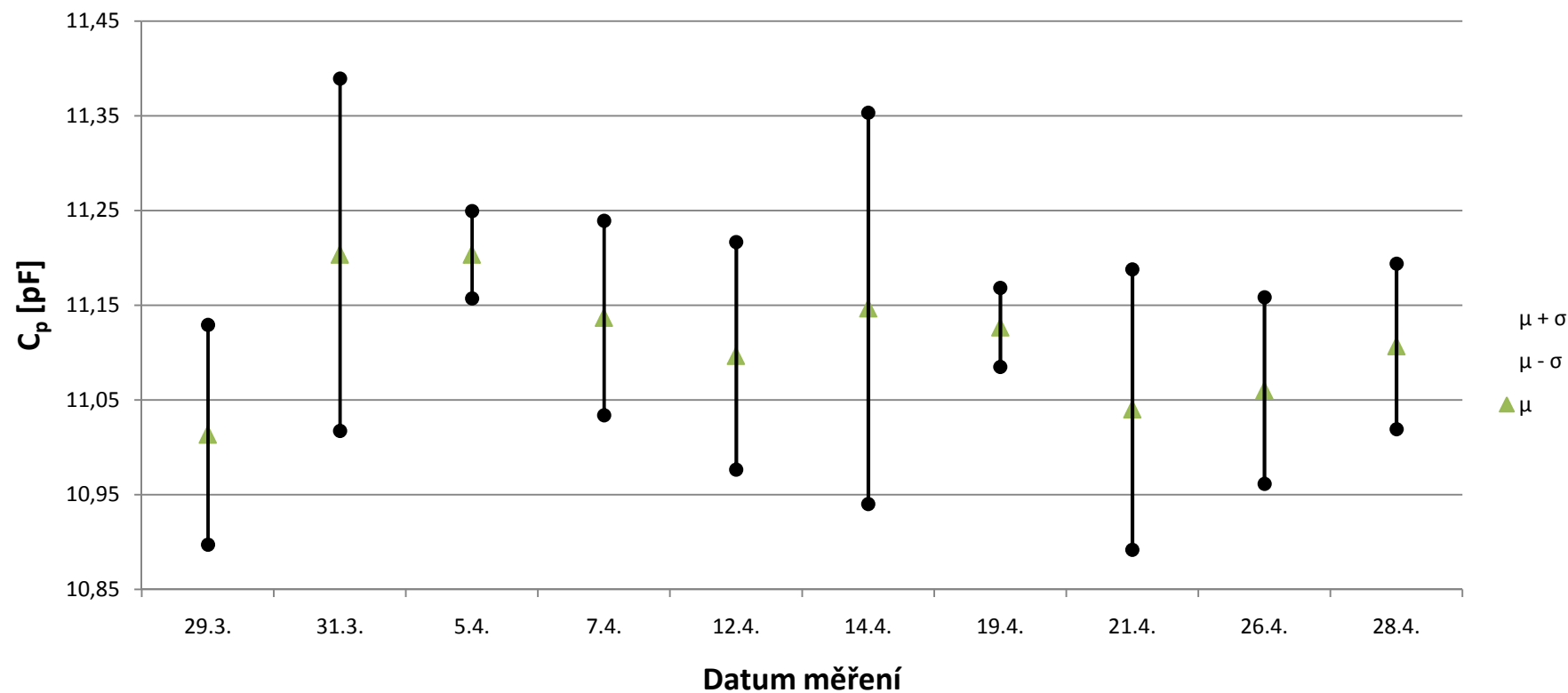
Interdigitální kapacitor, 10 prstů, 10 mm



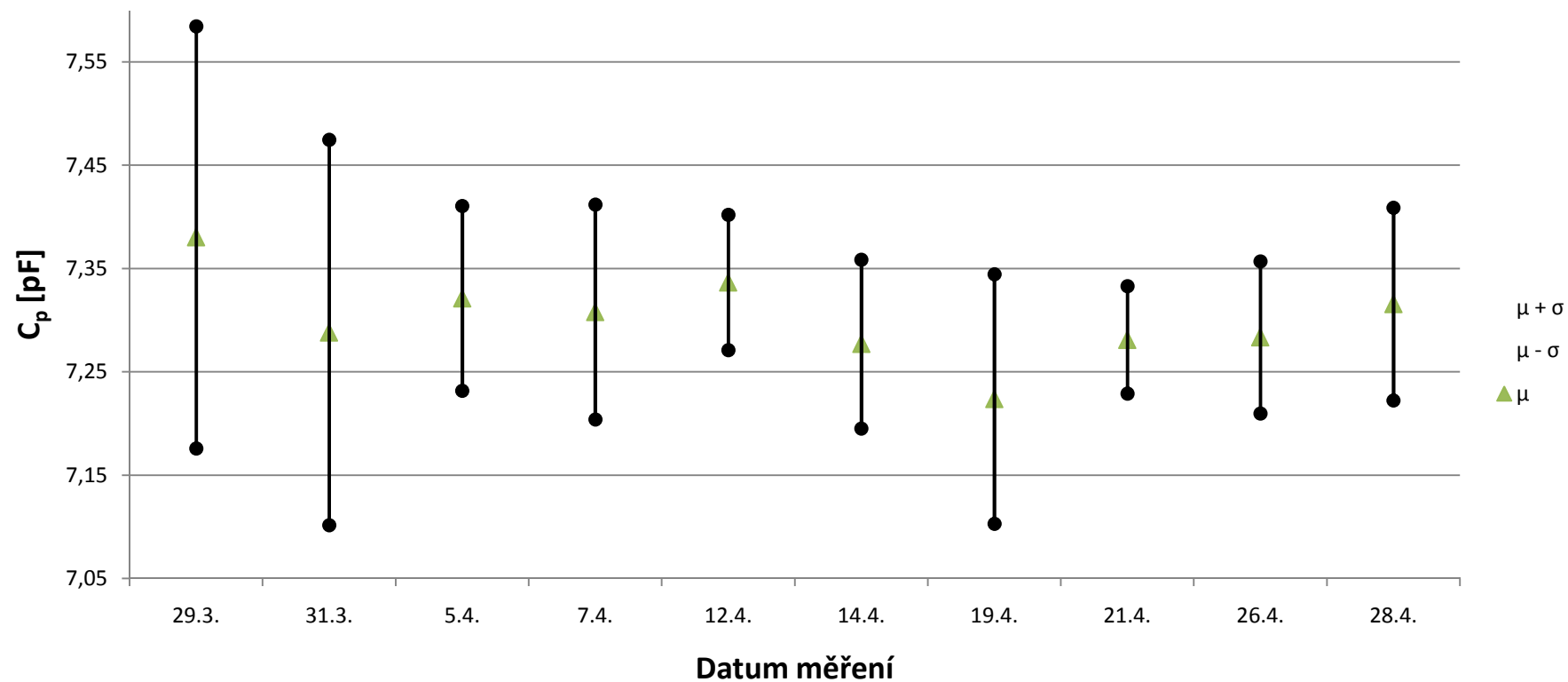
Interdigitální kapacitor, 10 prstů, 20 mm



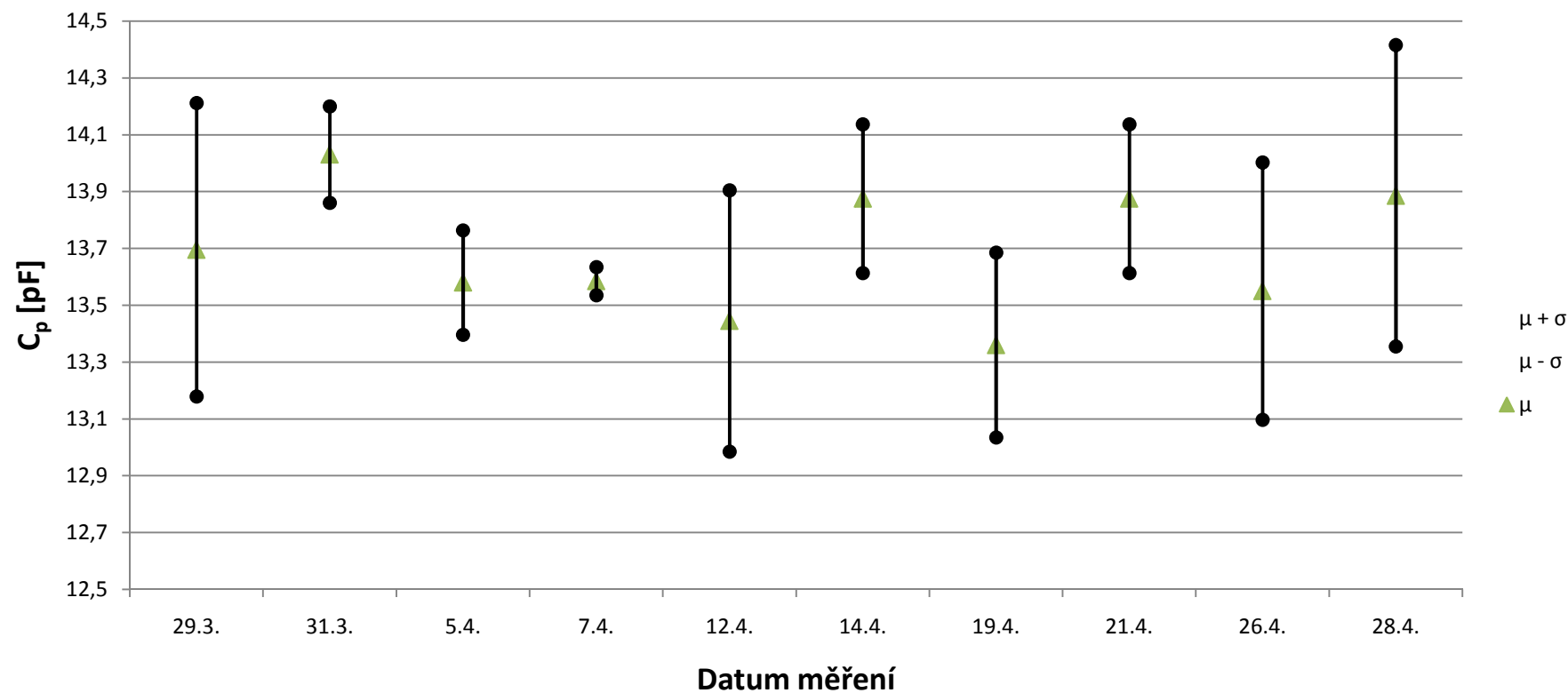
Interdigitální kapacitor, 10 prstů, 40 mm



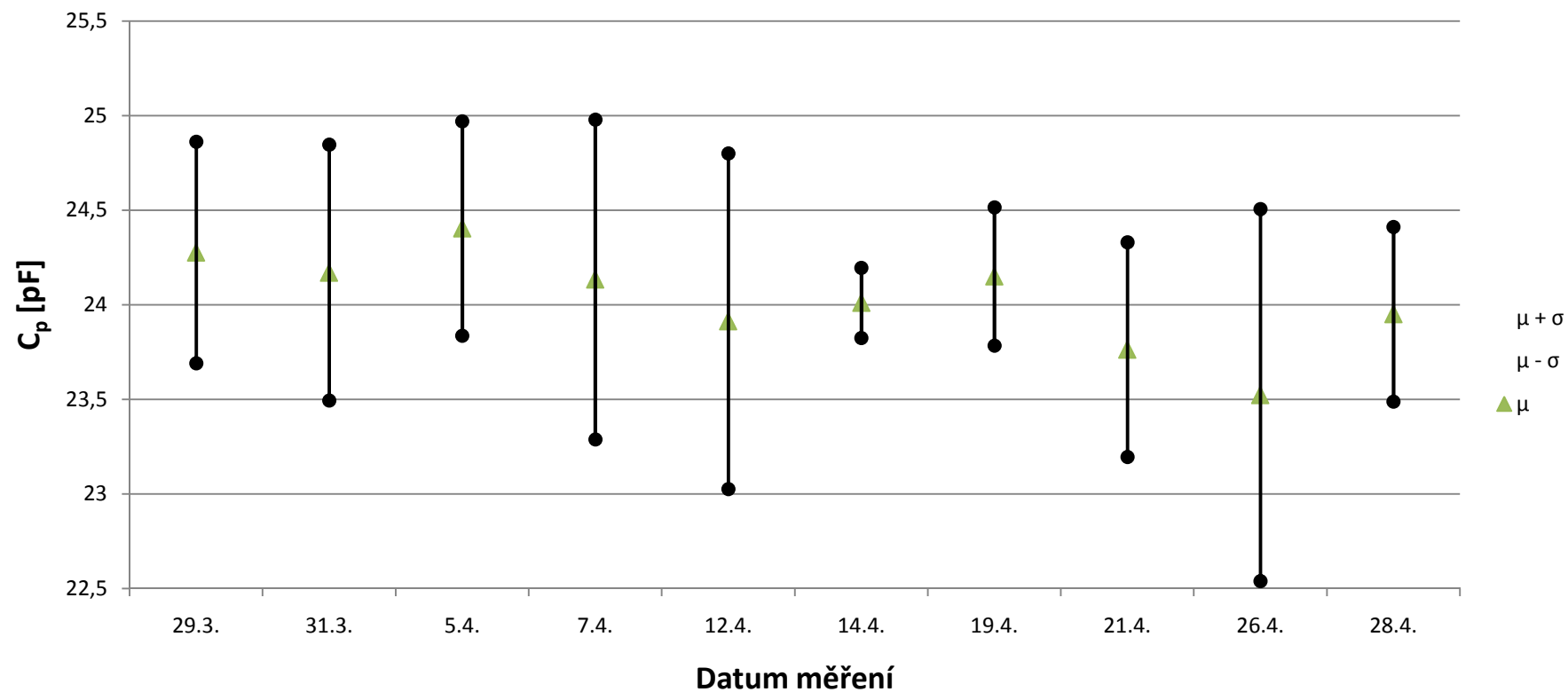
Interdigitální kapacitor, 20 prstů, 10 mm



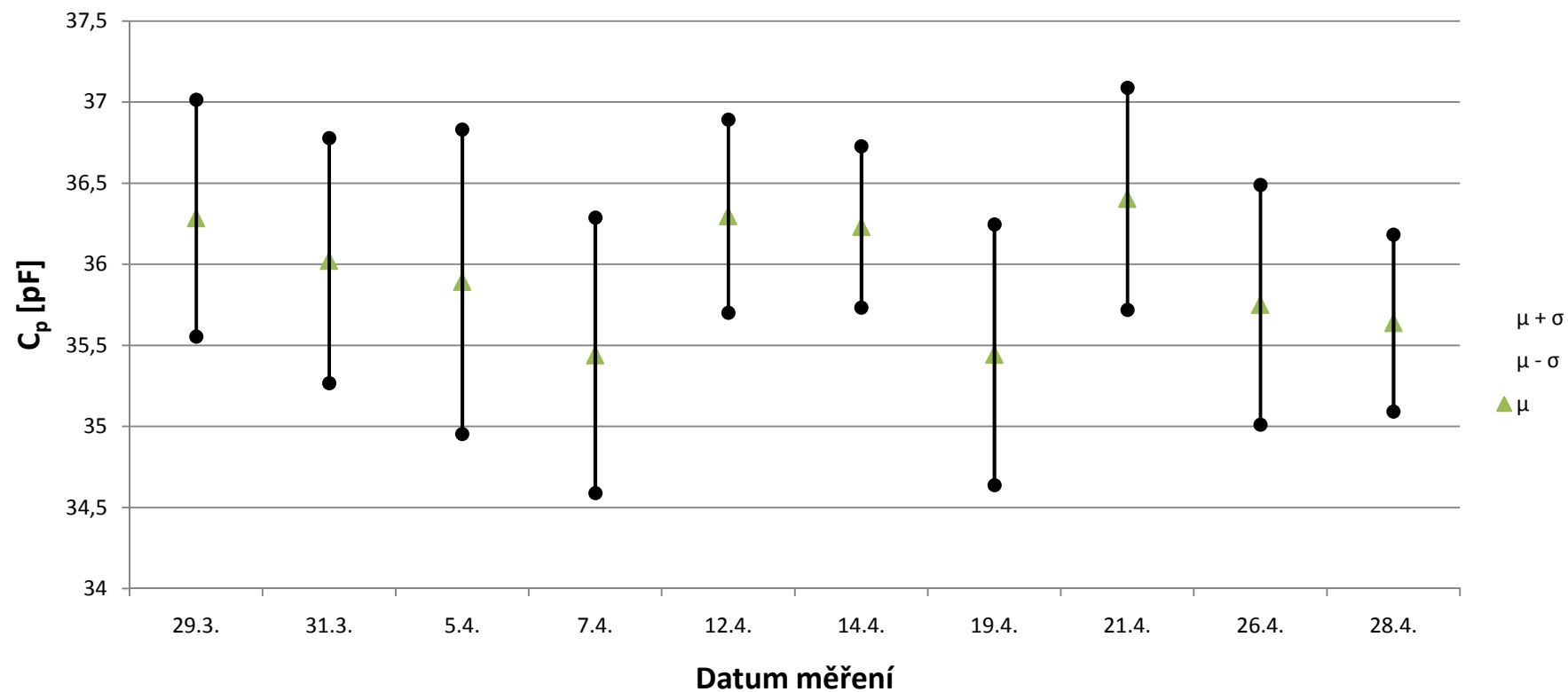
Interdigitální kapacitor, 20 prstů, 20 mm



Interdigitální kapacitor, 20 prstů, 40 mm

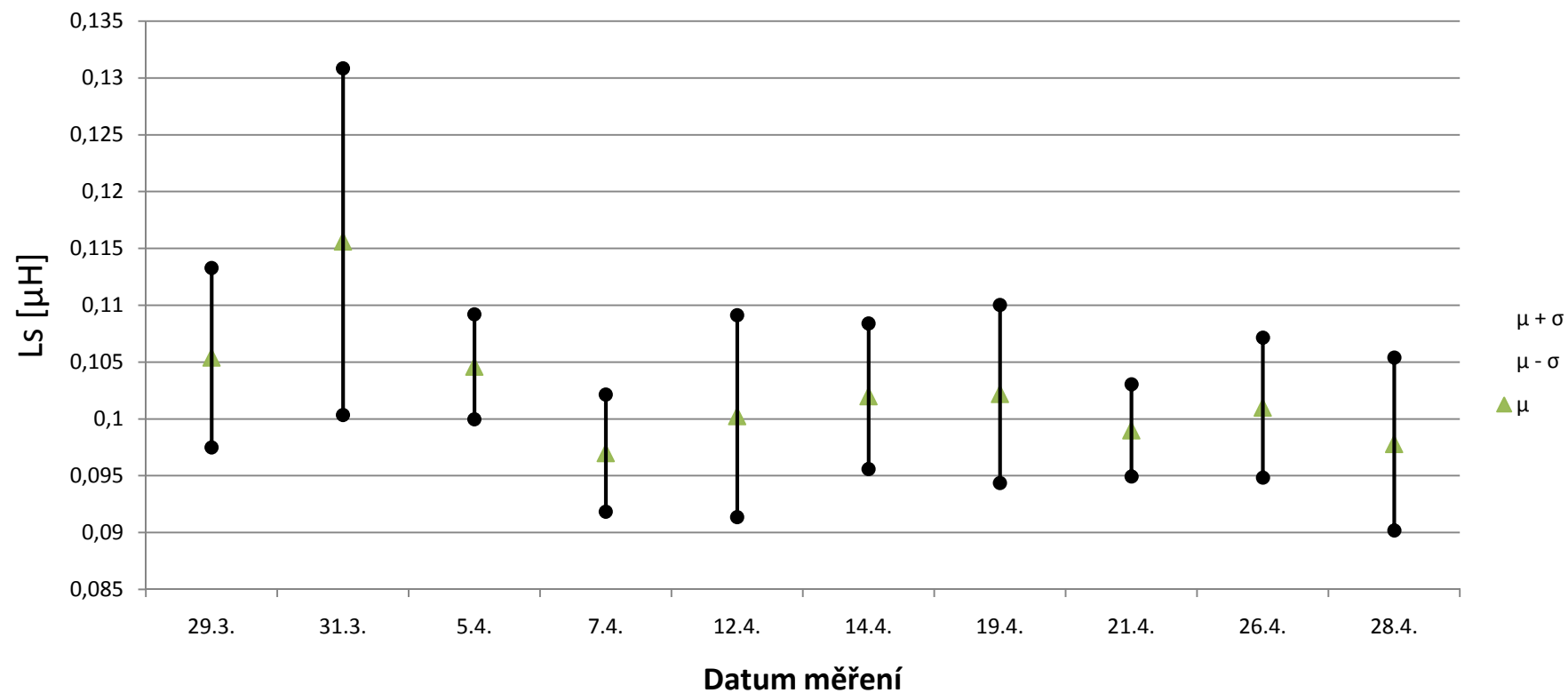


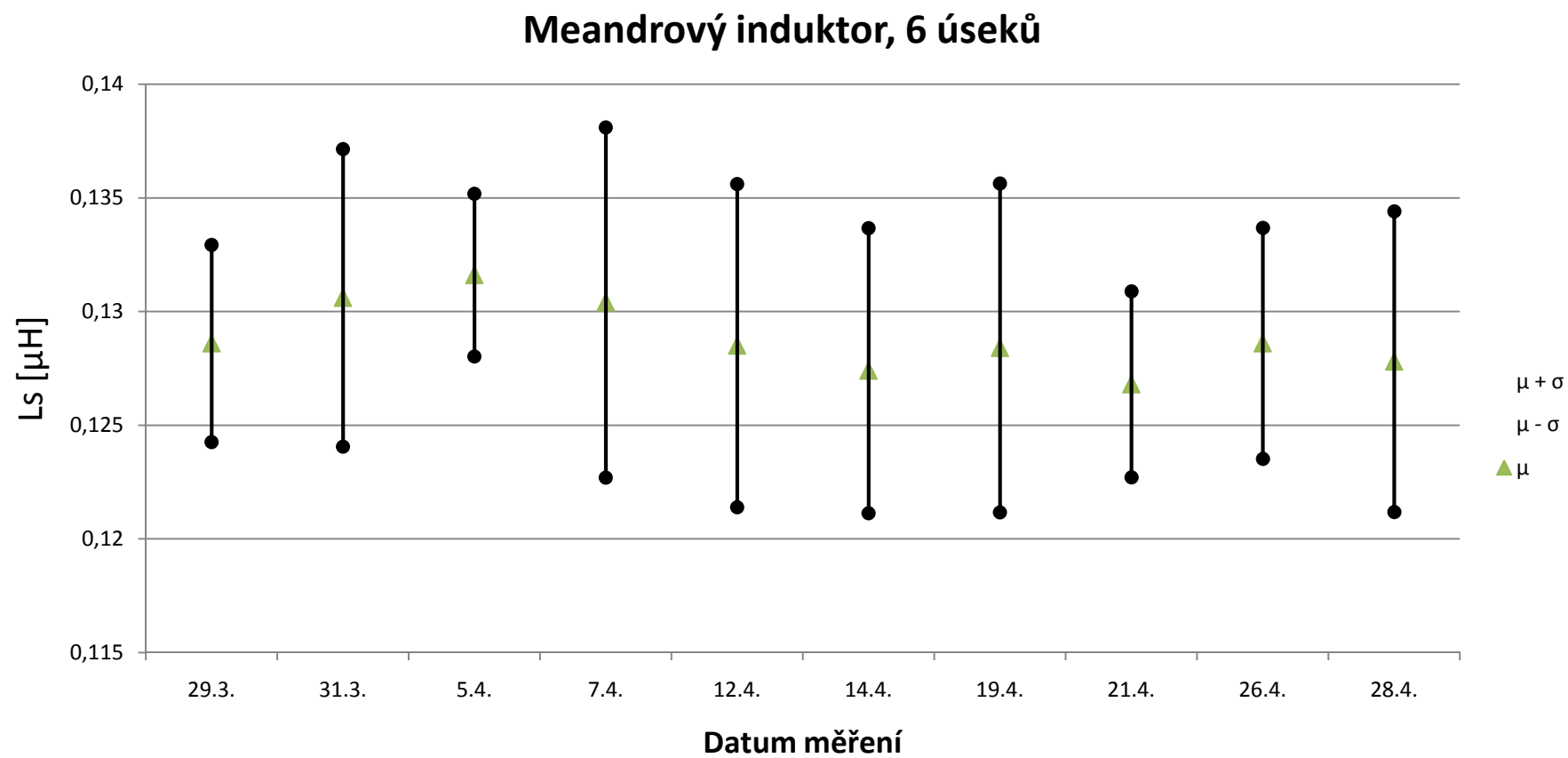
Jednovrstvý kondenzátor MIS, S = 0,25cm²



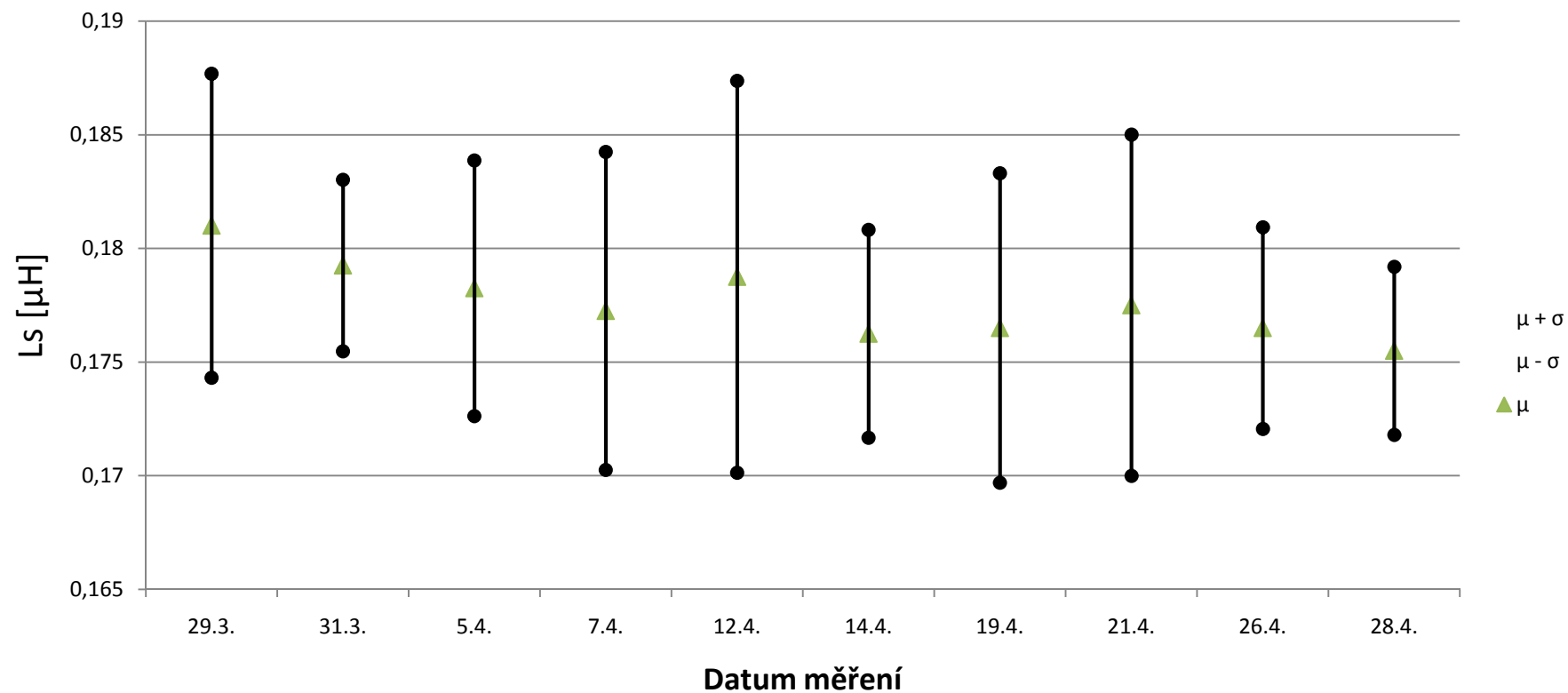
XXX

Meandrový induktor, 4 úseky

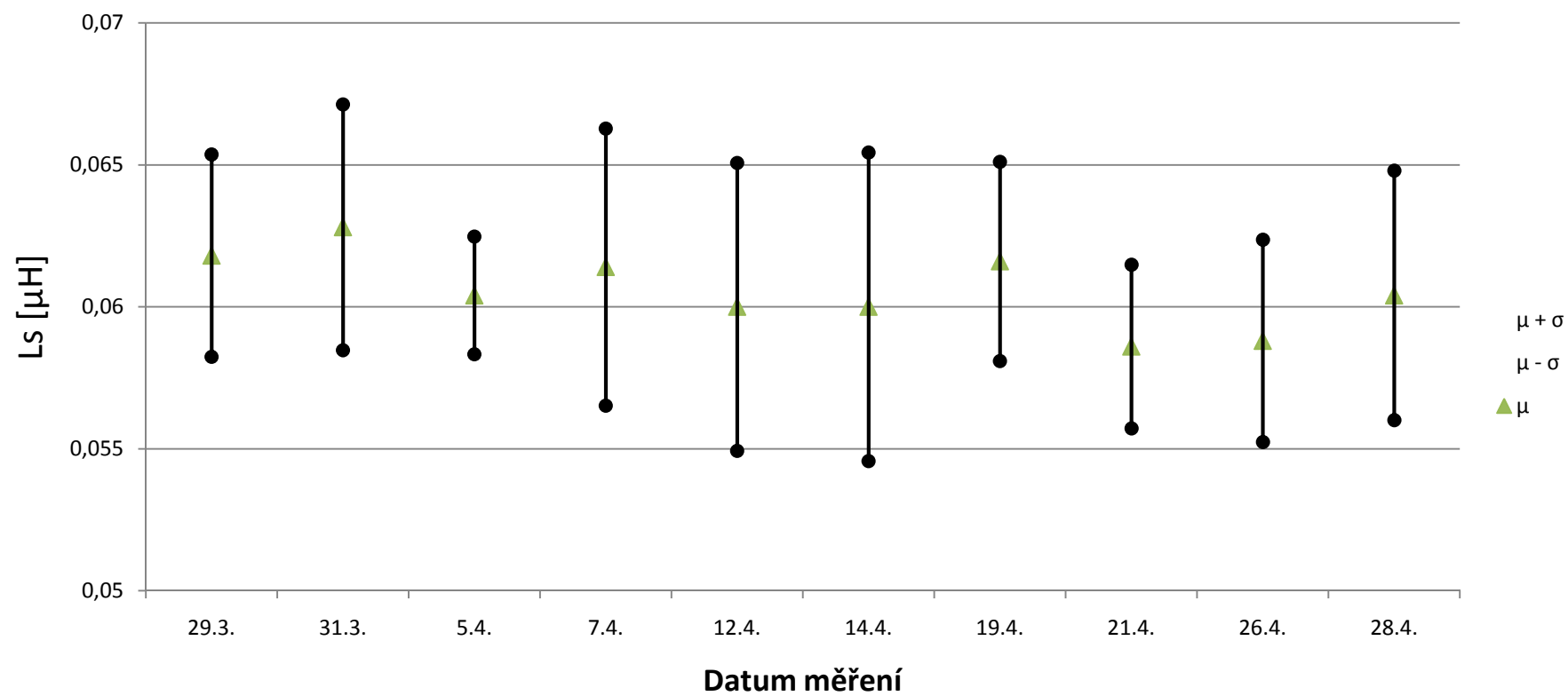




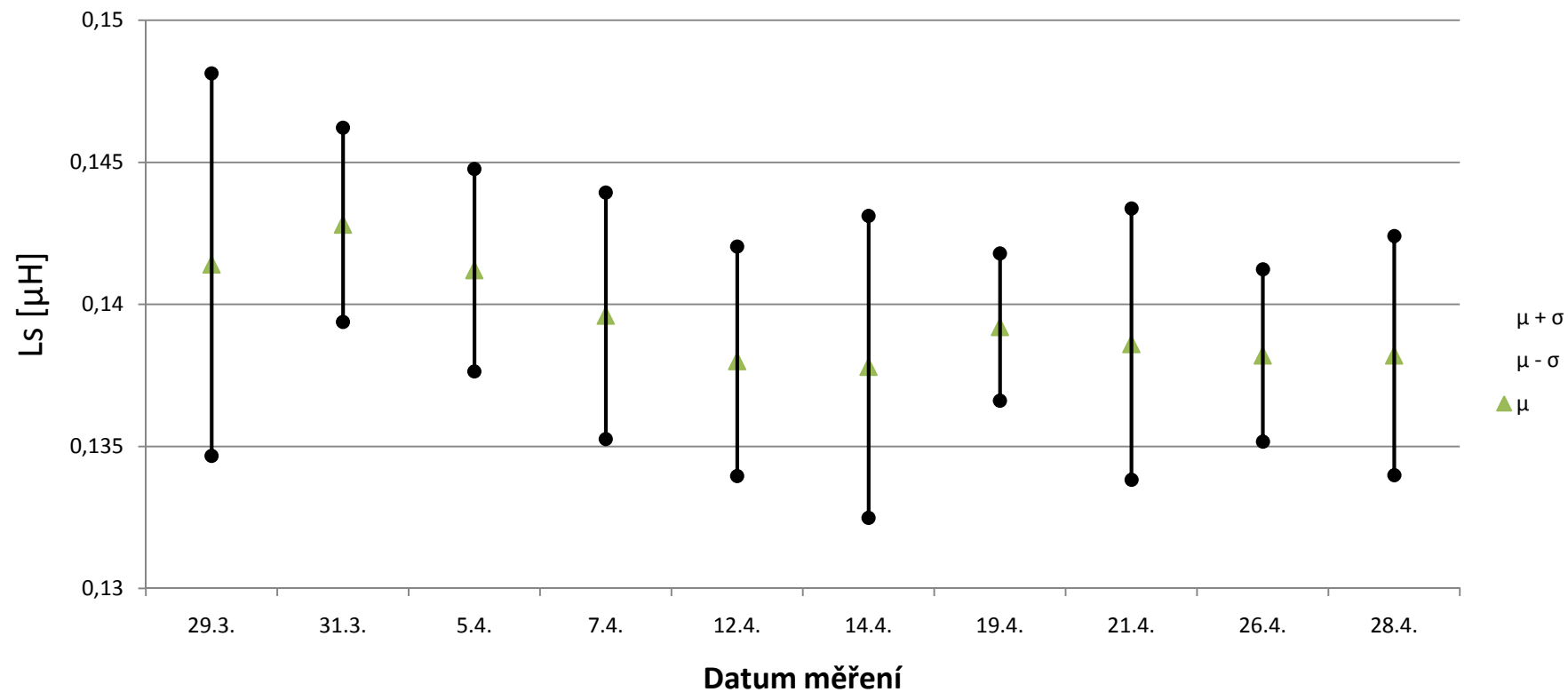
Meandrový induktor, 10 úseků



Plochá smyčka, r = 10 mm



Plochá smyčka, r = 20 mm



Plochá smyčka, r = 30 mm

