

Měření velmi malých kapacit a indukčností

Measurement of very small capacities and inductances

Bc. Michal Miškařík



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal MIŠKAŘÍK**

Osobní číslo: **A09424**

Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**

Studijní obor: **Počítačové a komunikační systémy**

Téma práce: **Měření velmi malých kapacit a indukčností**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Seznamte se s vybranými měřicími metodami pro měření kapacity a indukčnosti.
3. Navrhněte a z dostupných prostředků sestavte měřicí pracoviště.
4. Vytvořte ve vhodném programovacím prostředí program pro automatický sběr dat.
5. Provedte experimentální ověření můstkových metod.
6. Navrhněte měřicí metodu s využitím oscilátoru.
7. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Hruška F. Technické prostředky automatizace III. senzory, jejich principy a funkce [2005] – Vyd. 1 UTB ve Zlíně, ISBN 80-7318-053 7
2. Bezděk, Miloslav. Elektronika. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 271s. ISBN 80-7232-171-4.
3. Vlček, Jiří. Základy elektrotechniky. 1.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2003. 224s. ISBN 859-40-1142-156-2.
4. Agilent Technologies: VEE Pro: Practical Graphical Programming, 2008
5. TR instruments – měřicí přístroje, měřicí technika. <http://www.trinstruments.cz/>
6. Agilent technologies.
<http://www.home.agilent.com/agilent/home.jsp?cc=CZ&lc=eng>.
7. Stanford Research Systems. <http://www.thinksrs.com/>.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Milan Navrátil, Ph.D.

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

25. února 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

13. června 2011

Ve Zlíně dne 25. února 2011

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Karel Vlček, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Hlavním obsahem této diplomové práce je praktická aplikace dvou metod pro měření velmi malých kapacit a indukčností, konkrétně můstkové metody a metody s použitím oscilátoru. V teoretické části jsou podrobně rozebrány nejpoužívanější metody, které se používají pro měření elektrických kapacit a indukčností. V praktické části je rozebrán kompletní inženýrský přístup k práci od sestavování měřicího pracoviště, tvorby uživatelského programu, přes optimalizaci konečného zapojení obou metod až ke zhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova: měření, kapacita, indukčnost, velmi malá změna, elektrický můstek, oscilátor, chyba měření, měřicí hrot, servomotor, čítač

ABSTRACT

The main focus of this diploma thesis is the practical application of two methods for measuring very small capacities and inductances, namely the bridge methods and the use of the oscillator. The theoretical parts are analyzed in detail the most common methods used for measuring electrical capacitance and inductance. The practical part is analyzed complete engineering approach to the work of compilation of a workplace, creating a user program, through the optimization of the final engagement of the two methods to evaluate the results.

Keywords: measure, capacity, inductance, very little change, electric bridge, oscillator, measurement error, measuring tip, servo motor, counter

Poděkování patří v první řadě rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu studia názorově a morálně podporovali. Velké poděkování patří mému vedoucímu panu Ing. Milanu Navrátilovi Ph.D., který mi byl po celou dobu sepsování této práce ochotným rádčem a usměrňoval postup práce až do finální podoby. Vždy, když jsem potřeboval poradit, udělal si čas a vzájemně jsme konzultovali potřebné kroky další práce. Za to mu patří velké poděkování. Velké poděkování patří také panu doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc., který mi byl rovněž velmi dobrým rádčem a z jeho rad jsem se snažil brát si poučení do budoucna.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN.....	13
1.1 DŮVODY MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN	13
1.2 OBECNÉ ZÁSADY PŘI MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN	14
1.2.1 Úvodní shrnutí	16
2 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH KAPACIT A INDUKČNOSTÍ.....	18
2.1 KAPACITA	18
2.2 KONDENZÁTOR	21
2.2.1 Parametry kondenzátoru	22
2.2.2 Kondenzátor v obvodu stejnosměrného proudu	23
2.2.3 Kondenzátor v obvodu střídavého proudu	25
2.2.4 Keramický kondenzátor	27
2.2.5 Elektrolytický kondenzátor	28
2.2.6 Laditelný kondenzátor.....	29
2.2.7 SMD kondenzátory.....	30
2.2.8 Parazitní kapacita	31
2.3 INDUKČNOST.....	32
2.4 CÍVKA.....	33
2.4.1 Parametry cívek	34
2.4.2 Provedení cívek.....	36
2.4.3 Rozdělení cívek.....	37
2.4.4 Cívka v obvodu stejnosměrného proudu	38
2.4.5 Cívka v obvodu střídavého proudu.....	38
2.4.6 SMD cívky.....	41
2.4.7 Parazitní indukčnost	42
2.5 KLASICKÉ METODY MĚŘENÍ KAPACITY	43
2.5.1 Ohmova metoda.....	43
2.5.2 Srovnávací metoda.....	45
2.6 MŮSTKOVÉ METODY PRO MĚŘENÍ KAPACITY	47
2.6.1 De Sautyho můstek	48
2.6.2 Wienův můstek	49
2.6.3 Scheringův můstek.....	51
2.6.4 Ostatní vybrané můstkové metody pro měření kapacity	54
2.7 METODA MĚŘENÍ VELMI MALÝCH ZMĚN IMPEDANCÍ S VYUŽITÍM OSCILÁTORU	54
2.8 KLASICKÉ METODY MĚŘENÍ INDUKČNOSTI	54
2.8.1 Ohmova metoda.....	54
2.9 MŮSTKOVÉ METODY PRO MĚŘENÍ INDUKČNOSTI	56
2.9.1 Andersonův můstek	56

2.9.2	Maxwell – Wienův můstek	57
2.9.3	Ostatní vybrané můstkové metody pro měření indukčnosti.....	58
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	59
3	MĚŘICÍ PŘÍSTROJE A PŘÍSLUŠENSTVÍ	60
3.1	MĚŘICÍ PŘÍSTROJE PRO MŮSTKOVOU METODU	60
3.1.1	LCR meter HP 4284A.....	60
3.1.2	LCR meter Agilent 4263B.....	62
3.2	PROPOJENÍ MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ S PC.....	65
3.2.1	GPIO rozhraní.....	65
3.2.2	Technická specifikace GPIO rozhraní.....	67
3.3	OVLÁDÁNÍ POSUVU SNÍMANÉ PLOCHY VŮČI MĚŘICÍMU HROTU	69
3.3.1	Servomotor C-862 Mercury II DC-Motor Controller/Driver	70
3.3.2	Přední panel C-862 Mercury II DC-Motor Controller/Driver.....	72
3.3.3	Zadní panel C-862 Mercury II DC-Motor Controller/Driver.....	73
3.4	MĚŘICÍ PŘÍSTROJE PRO MĚŘICÍ METODU S POUŽITÍM OSCILÁTORU.....	73
3.4.1	Čítač 53131A 225 MHz Universal Frequency Counter/Timer	74
3.4.2	Sušárna Universal oven Model UNP 200.....	75
4	PROGRAMOVÉ PROSTŘEDÍ.....	78
4.1	PROGRAMOVÉ PROSTŘEDÍ AGILENT VEE PRO 9.2	78
4.1.1	Softwarové nároky programového prostředí Agilent VEE Pro 9.2.....	80
4.1.2	Hardwarové nároky programového prostředí Agilent VEE Pro 9.2	80
4.1.3	Popis uživatelského prostředí Agilent VEE Pro 9.2	81
5	SESTAVENÍ MĚŘICÍHO PRACOVISTĚ	87
5.1	MĚŘICÍ PRACOVISTĚ PRO MŮSTKOVOU METODU	87
5.1.1	Blokové schéma měřicího pracoviště pro můstkovou metodu	88
5.1.2	Elektromechanické schéma měřicího pracoviště.....	88
5.2	MĚŘICÍ PRACOVISTĚ PRO METODU S POUŽITÍM OSCILÁTORU	90
6	UŽIVATELSKÝ PROGRAM	91
6.1	IDENTIFIKACE PŘIPOJENÝCH MĚŘICÍCH PŘÍSTROJŮ.....	91
6.2	KONSTRUKCE UŽIVATELSKÉHO PROGRAMU PRO MŮSTKOVOU METODU	92
6.2.1	Základní konstrukce uživatelského programu	92
6.2.2	Ovládací panel uživatelského programu.....	95
6.3	KONSTRUKCE UŽIVATELSKÉHO PROGRAMU PRO METODU S POUŽITÍM OSCILÁTORU	98
7	APLIKACE MŮSTKOVÉ METODY.....	99
7.1	MĚŘENÍ VELMI MALÝCH KAPACIT MŮSTKOVOU METODOU.....	99
7.1.1	Metodika měření velmi malých změn kapacity můstkovou metodou.....	102
7.2	MĚŘENÍ VELMI MALÝCH INDUKČNOSTÍ MŮSTKOVOU METODOU	103
7.2.1	Metodika měření velmi malých změn indukčnosti můstkovou metodou....	104
8	APLIKACE METODY S POUŽITÍM OSCILÁTORU	105

8.1	MĚŘENÍ VELMI MALÝCH ZMĚN FREKVENCE ZMĚNOU KAPACITY	105
9	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	107
9.1	VÝSLEDKY MĚŘENÍ VELMI MALÝCH ZMĚN KAPACITY MŮSTKOVOU METODOU 107	
9.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ VELMI MALÝCH ZMĚN INDUKČNOSTI MŮSTKOVOU METODOU	109
9.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ METODOU ROZLAŽOVÁNÍ OSCILÁTORU	111
9.3.1	Opakované měření frekvence bez použití mikroposuvu.....	111
9.3.2	Měření stability oscilátoru	112
9.3.3	Rozlad'ování frekvence oscilátoru změnou kapacity.....	113
	ZÁVĚR	116
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	118
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	120
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	124
	SEZNAM OBRÁZKŮ	126
	SEZNAM TABULEK	130
	SEZNAM PŘÍLOH	131

ÚVOD

V dnešním moderním technickém světě se stále častěji setkáváme s otázkou, jak co nejpřesněji identifikovat a analyzovat vlastnosti a chování určitého systému. Je velmi důležité si uvědomit, že každá sebemenší částice vyskytující se na této zemi má své vlastnosti, které mohou být permanentní (stálé, statické) nebo proměnlivé (dynamicky se měnící v závislosti na podmínkách, ve kterých se částice vyskytuje). Proměnlivost může být dána např. změnou prostředí, náhlou změnou lokálních podmínek, štěpením (rozkladem) částic na menší částice apod.

V této diplomové práci se budeme zabývat konkrétně měřením velmi malých kapacit C a indukčností L (jejich změn), což můžeme obecně nazvat jako měření velmi malých změn impedancí. Proč zrovna kapacita a proč zrovna indukčnost? Odpověď je velmi prostá a jednoduchá. Kapacita C a indukčnost L jsou vedle ohmického odporu R další ze vzájemně neoddělitelných vlastností daného předmětu. Nemusíme ihned uvažovat anorganický předmět, ale i organickou hmotu (motýlí křídlo, organickou chemickou sloučeninu, lidskou kůži apod.).

Měření velmi malých kapacit a indukčností organických částic je v praxi velmi složité a mnohdy i finančně nákladné, a to z důvodu potřeby vysoce sofistikovaných měřících přístrojů, potřeby velmi čistého a stálého prostředí s minimalizací šumů, otřesů, s požadavkem na minimální elektromagnetickou interferenci (EMI) a vysokou elektromagnetickou susceptibilitu (EMS). V této práci se tedy zaměříme na měření velmi malých kapacit a indukčností anorganických předmětů (např. kovové desky, mince). Při trochu hlubším zamyšlení je jasné, že elektrická kapacita a indukčnost jsou dvě vlastnosti předmětu, které jsou ve své podstatě velmi těžko oddělitelné. I obyčejný vodič má svou určitou kapacitu, která udává schopnost vodiče jímat (shromažďovat elektrický náboj) a také indukčnost (určuje magnetické vlastnosti vodiče). Často se setkáváme (především v silnoproudé elektrotechnice) s potřebou kompenzovat elektrickou indukčnost elektrickou kapacitou a naopak. Je to z důvodu nastavení určitého stavu rovnováhy v systému, který má v praxi za následek nastavení optimálního $\cos \varphi$ (účinníku). Opět jsme u jisté vzájemné a neoddělitelné působnosti těchto dvou veličin.

V této práci se budeme zabývat klasickými můstkovými metodami, které jsou ve své podstatě velmi jednoduché. Použijeme vysoce přesný můstek (LCR meter), který bude

spolu se třemi servomotory ovládající posuv snímané plochy vůči měřicímu hrotu a s PC tvořit základní měřicí pracoviště. Servomotory budou ovládat posuv měřicího hrotu ve třech osách (x , y , z) a v závislosti na posuvu v dané ose budeme LCR metrem měřit velmi malé změny kapacity C nebo indukčnosti L (deformací pružinky).

Druhou metodou bude měření velmi malých změn kapacity a indukčnosti s pomocí oscilátoru, který budeme rozladovat na určitou frekvenci pomocí kondenzátoru nebo cívky v obvodu oscilátoru a budeme zaznamenávat velmi malé změny frekvence, se kterou budeme dále pracovat. Tato metoda bude čistě experimentální z toho důvodu, že na fakultě se ještě tento postup neaplikoval do praxe, a tak není odzkoušen. Jedním z cílů této práce je tedy ověřit tuto metodu v praxi. Cílem obou metod bude zjistit, jaké nejmenší změny kapacity a indukčnosti jsme schopni s daným technickým vybavením při podmínkách danými okolním prostředím schopni identifikovat (změřit).

Práce bude obsahovat návrhy měřicích metod, vysvětlení jejich postupů, popis optimalizace konečného zapojení měřicích pracovišť, podrobnou analýzu výsledků měření, jejich zhodnocení, zhodnocení jednotlivých metod měření velmi malých změn impedancí (výhody, nevýhody, případné možnosti optimalizace použitých metod) a výběr optimální metody pro měření. Vyhodnocení výsledků bude provedeno s použitím programovacího prostředí VEE Pro 9.2 od firmy Agilent Technologies, které bude sloužit k automatickému sběru dat z měřicích přístrojů, jejich zpracování a vizualizaci.

Závěrem této úvodní části bychom měli podotknout, že obecně měření velmi malých změn impedancí (kapacit, indukčností) je sice měření zdánlivě snadné co se týká návrhu a sestavení měřicí metody, ale je velmi náročné (stejně jako každé měření) na udržení relativní stálosti okolních podmínek (nutno minimalizovat EMI, působení parazitních kapacit a indukčností, eliminovat svodové odpory apod.) a také na optimální konfiguraci měřicích přístrojů (měřicí parametry).

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN

1.1 Důvody měření elektrických veličin

Měření elektrických veličin je spolu s technickou normalizací jedním z nejdůležitějších odvětví technického průmyslu. Měření elektrických veličin prodělalo stejně jako celá elektronika obrovské změny. Od ručkových přístrojů jsme přešli k digitálním multimetrům s téměř nekonečným vstupním odporem, automatickou volbou rozsahu, s měřením kmitočtu, kapacity apod. Tím se celá problematika oboru výrazně zjednodušila.

Bez toho, aniž bychom během technologického procesu nebo po dokončení výroby nevycházeli z hodnot naměřených v průběhu výroby, si neumíme moderní průmysl takřka představit. Měření elektrických veličin představuje soubor sofistikovaných metod v interakci s použitím vhodných měřicích přístrojů, pomocí nichž jsme schopni zjistit klíčové parametry popisující daný elektrický obvod nebo zařízení. Mezi hlavní důvody zavádění měření do technické praxe patří fakt, že měřením jsme schopni velmi přesně identifikovat činnost elektrického obvodu nebo zařízení. Z toho plyne schopnost obvod nebo zařízení velmi přesně nastavit, popř. opravit defekty vzniklé při výrobě. Dále se jedná zejména o automatický sběr dat naměřených senzorem (automatické řízení technologických procesů, sběr dat z éteru – měření vlhkosti, teploty apod.).

Představme si modelovou situaci ve fiktivní firmě, která se zabývá návrhem, výrobou a testováním desek plošných spojů (DPS) pro ovládání určitého typu zařízení (např. řídicí elektronika HDD). Představa, že bychom minimálně do oblasti výroby a testování neaplikovali měřicí metody je ve své podstatě nepředstavitelná. Každý krok výroby přináší určitá rizika výskytu zmetkovosti výrobků, která se snažíme minimalizovat. Průběžná měření odchylek daných normou mohou toto riziko minimalizovat a do jisté míry i odstranit.

Analogickou situací mohou být průběžná automatické měření elektrických veličin např. v chemickém nebo potravinářském průmyslu, kde jsou kladeny velmi vysoké nároky na přesnost měřicího procesu. Měřicí proces je doprovázen procesem regulace (většinou automatické). Absence měřicího procesu je v takovém případě absolutně vyloučena, a to z důvodu nejen bezpečnostního (ohrožení života a zdraví lidí), ale i z hlediska

ekonomického. Přesným měřením elektrických veličin jsme schopni nastavit výrobní proces tak, aby byl ekonomicky výhodný pro firmu a ekologicky šetrný k životnímu prostředí.

Závěrem je nutno dodat, že měření elektrických veličin je kromě procesu aplikace dané metody doprovázeno řadou obecných zásad, které musíme brát v úvahu. Zásadním způsobem totiž ovlivňují přesnost měření, které se snažíme dosáhnout co nejvyšší. Tyto zásady si uvedeme v odstavci 1.2.

1.2 Obecné zásady při měření elektrických veličin

Při měření elektrických veličin se především snažíme o to, aby bylo naše měření co nejpřesnější. Přesnost měření je parametr, který nepřímo udává velikost chyby měření, která při měření vzniká. Chyba měření je obecně dána jako anomálie (odchylka) naměřené hodnoty od hodnoty skutečné (správné, očekávané). Chyby měření vznikají buď působením vnitřních vlivů nebo vlivů vnějších. Chyby měření dělíme ještě na náhodné a soustavné.

Chyby vzniklé působením vnitřních vlivů jsou způsobeny především samotným přístrojem (špatným ocejchováním přístroje, vnitřní vadou na přístroji apod.), špatnou volbou měřicí metody, nedodržením jejího přesného postupu apod. Mohou vznikat také nepozorností osoby provádějící měření (chybný odečet z přístroje). Chybám této kategorie se dá účinně předcházet zvýšenou pozorností a trpělivostí, dokonalou znalostí měřicích metod a jejich aplikací do praxe.

Chyby vzniklé působením vnějších vlivů mají většinou náhodný charakter. Při měření působí na měřicí proces řada vlivů mezi něž můžeme zařadit zejména v čase se měnící teplotu, vlhkost, prašnost, otřesy, vnější elektromagnetické pole, kolísání kmitočtu sítě apod. Snažíme se tedy udržovat pokud možno konstantní parametry těchto vlivů, což většinou není technicky možné (prašnost, otřesy nebo vnější elektromagnetické pole se udržují na konstantní hladině jen velmi obtížně). Chybám tohoto druhu se dá předcházet vhodnou volbou prostředí, ve kterém budeme měření provádět tak, aby se tyto faktory v daném prostředí uplatňovaly co nejméně.

Náhodné chyby a omyly je možné eliminovat vícenásobným opakováním měření a zprůměrováním výsledků. Z toho, jak se jednotlivé výsledky od sebe liší, zjistíme velikost náhodné chyby. Čím je počet měření vyšší, tím přesnější je naměřená hodnota. Nyní si vysvětlíme několik pojmů, které mají při měření velký význam.

Absolutní chyba měření je chyba, která je dána vztahem (1). NH je naměřená hodnota dané veličiny a SH je skutečná (správná, očekávaná) hodnota dané veličiny. Absolutní chyba se udává v jednotkách měřené veličiny (např. ve V, °C, Pa).

$$\Delta a = NH - SH \quad (1)$$

Relativní chyba měření je dána vztahem (2). Je dána jako podíl absolutní chyby ke skutečné (naměřené) hodnotě. Relativní chyba se udává v procentech.

$$\Delta r = \frac{\Delta a}{S} = \frac{\Delta a}{N} \quad (2)$$

Oprava (korekce) je chyba dána vztahem (3). Je to chyba, která je vzata záporně (skutečná hodnota S – naměřená hodnota N). Opravná (korekční) křivka je graficky dána jako závislost odchylky na naměřené hodnotě.

$$O = S - N \quad (3)$$

Třída přesnosti přístroje T_p určuje přesnost daného měřicího přístroje. Číselně je dána procentní chybou z měřicího rozsahu. Čím je T_p menší, tím je přístroj přesnější. Přístroje se dle třídy přesnosti třídí na řady: 6 %, 4 %, 2,5 %, 1,5 %, 1,0 %, 0,5 %, 0,2 %, 0,1 %, 0,05 %, 0,02 %, 0,01 %, 0,005 %, 0,002 %, 0,001 %. Měřicí přístroj může mít i několik tříd přesnosti pro různé funkce.

Závěrem bychom si měli říct něco o zásadách práce s ručkovými přístroji, které jsou sice v dnešní době vytlačovány digitálními multimetry, ale pro svou přesnost jsou stále hojně používány. Při manipulaci s ručkovým měřicím přístrojem musíme postupovat opatrně, abychom zbytečně nepoškodili jednotlivé součásti přístroje (zejména měřicí cívky, ručičku). Poloha, ve které má být přístroj uchováván (vodorovná, svislá) je zakreslena ve formě elektrotechnické značky pod stupnicí přístroje. Před přenášením je nutné přístroj zaaretovat. Při samotném měření vždy musíme vědět, jak přístroj nastavit a zapojit do obvodu, aby měřil co nejpřesněji (a také aby nedošlo k poškození vlivem chybného zapojení). Nastavujeme vždy co nejmenší možný rozsah přístroje, tak aby výchylka byla co možná

největší. Potom je chyba měření minimální. Obdobně postupujeme u digitálních měřicích přístrojů, kde se snažíme, aby zobrazená hodnota na displeji byla maximální. Přístroj zbytečně nepřetěžujeme, aby nedošlo k jeho přetížení a zničení (přístroje jsou schopny snést určitý stupeň přetížení, který ale nesmíme v žádném případě překročit – došlo by k mechanickému poškození přístroje).

Protože přesnost měření je jedním z předpokladů kvality výroby, výzkumu, vývoje a servisu, je péče o měřicí přístroje předmětem celé řady norem, doporučení a nařízení (např. norma ISO 9002). U každého měřicího přístroje musí být cca každé dva roky kontrolovány jeho parametry – provádíme tzv. cejchování pomocí přesnějšího (minimálně o jeden řád) měřicího přístroje – tzv. etalonu. Etalon musí být dobře uskladněn, neměl by se příliš často přenášet, používat pro provozní měření a musí se pravidelně ověřovat (zpravidla národním etalonem). Při ověřování národním etalonem musí být nastavena předepsaná teplota, přístroj musí být předem alespoň 30 minut zapnutý. Obor, který se zabývá doposud zmíněnou problematikou se nazývá metrologie.

1.2.1 Úvodní shrnutí

Z toho, co jsme si doposud řekli o měření elektrických veličin, je zcela jasné co měření přináší do technologického procesu. Přináší zejména možnost mnohdy velmi přesně identifikovat technologické veličiny, kterými mohou být jak veličiny elektrické (elektrický proud I , elektrické napětí U , elektrický odpor R , účinník $\cos \varphi$ apod.), tak i jiné veličiny (teplota, tlak, vlhkost apod.). Hlavním účelem měření je tedy získávání dat za účelem jejich zpracování a vyhodnocování. Důležitost měření je hodnocena zejména ze dvou hledisek. Z hlediska bezpečnostního a ekonomického. Obor, který se takovou problematikou zabývá se nazývá metrologie.

Důležitost měření brána z ekonomického pohledu je dána především snahou ve výrobním procesu dosáhnout co nejvyšší kvality výrobku za ekonomicky přijatelné náklady. Tohoto můžeme dosáhnout právě velmi přesným měřením jednotlivých technologických veličin, které jsou zaneseny do daného výrobního procesu. Příkladem může být například měření elektrických veličin při procesu výroby motherboardu (základní desky PC). Pravidelným měřením elektrických parametrů (napětí, proud...) můžeme předejít výskytu zmetkovosti už před testováním, kde provádíme za běhu výrobku celou řadu dalších měření s cílem otestovat chování výrobku v různých režimech činnosti (při různých podmínkách).

Důležitost měření z hlediska bezpečnostního je dána - jak už z názvu vyplývá – snahou chránit lidské zdraví a statky formou zabezpečení činnosti zařízení formou pravidelného měření technologických veličin a pravidelných revizí technických zařízení. Taková měření musí být podložena zákonnými normami (např. ČSN, IEC). Příkladem mohou být měření elektromagnetického záření produkovaného zařízeními jako jsou radar, mobilní telefon nebo obyčejná mikrovlnná trouba. Zde nesmíme překročit maximální povolenou mez elektromagnetického záření nejen z důvodu ochrany zdraví živých organismů, ale rovněž musíme dodržet pravidla elektromagnetické kompatibility EMC (tedy minimalizovat elektromagnetickou interferenci EMI a maximalizovat elektromagnetickou odolnost zařízení – tzv. elektromagnetickou susceptibilitu EMS). Dalším příkladem významu měření z tohoto hlediska mohou být revize elektrických zařízení, které se provádějí jednak za účelem ochrany zdraví člověka a životního prostředí, ale také za účelem prostého ověření funkčnosti daného zařízení.

Každé měření je více či méně zatíženo chybou měření. Chyby měření se dělí na chyby způsobené vnitřními vlivy a na chyby způsobené vnějšími (okolními) vlivy. Dále na soustavné a náhodné. Mezi chyby způsobené vnitřními vlivy můžeme zařadit chyby způsobené např. vadou na přístroji, neocejchovaným přístrojem, chybným postupem u měřicí metody apod. Chyby způsobené vnějšími vlivy jsou způsobené zpravidla vlivy mající charakter náhodných veličin s normálním rozdělením (teplotní výkyvy, vlhkost, prašnost, elektromagnetické pole).

Chyby způsobené vnitřními vlivy jsme schopni eliminovat vhodnou volbou měřicí metody, správným ocejchováním měřicích přístrojů, zvýšenou pozorností a trpělivostí. Vnější vlivy mající náhodný charakter lze eliminovat vhodnou volbou měřicího prostředí (prostředí bez otřesů, bez velkých výkyvů teplot...). V měřicím procesu počítáme s chybami absolutními (vyjádřeny v jednotkách veličiny, kterou měříme) nebo s chybami relativními (vyjádřené v procentech).

2 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH KAPACIT A INDUKČNOSTÍ

2.1 Kapacita

V obecné rovině je pojem kapacita chápán jako schopnost tělesa (předmětu) jímat daný druh energie. Matematicky je vztah dán jako poměr elektrického náboje Q na deskách kondenzátoru a elektrického napětí U mezi jeho deskami (elektrodami). Jako elektrickou kapacitu C [F-farad] označujeme schopnost předmětu jímat (shromažďovat) elektrický náboj Q [C-coulomb]. Platí: Čím větší elektrickou kapacitu daný předmět má, tím více elektrického náboje dokáže pojmout. Fyzickou realizací elektrické kapacity je kondenzátor. Někdy se můžeme v praxi nebo i v odborné literatuře setkat s nepřesným označením kondenzátoru jako kapacity. Je nutné si uvědomit, že elektrická kapacita je pouze fyzikální veličina, která charakterizuje kondenzátor jako pasivní elektrotechnický prvek. Možným ekvivalentem k názvu kondenzátor je kapacitor. Značka kondenzátoru je na obrázku (Obr. 1). Vlevo můžeme vidět značku pro klasický keramický kondenzátor, vpravo je značka pro laditelný (otočný-vzduchový) kondenzátor.



Obr. 1. Značka kondenzátoru [16]

V souvislosti s kapacitou hovoříme o tzv. elektrostatickém poli, které je výsledkem působení nábojů, které se nachází v klidovém stavu. Elektrostatické pole můžeme přesně definovat podle zdroje [1] takto: „Elektrické náboje, které jsou v klidu, se projevují silovými účinky a vytvářejí elektrické pole. Elektrické náboje jsou kladné (nedostatek elektronů) a záporné (přebytek elektronů). Souhlasné náboje se odpuzují, nesouhlasné přitahují. Coulombův zákon říká, že síla, kterou náboje na sebe působí, je přímo úměrná součinu jejich velikostí a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdáleností¹“.

¹ Vlček, Jiří. *Základy elektrotechniky*. 1.vyd. Praha: BEN- technická literatura, 2003. 224s. s.19. ISBN 859-40-1142-156-2.

Předchozí definici můžeme vyjádřit vztahem (4). Veličina F označuje sílu, kterou na sebe působí elektrické náboje $[N]$. Q_1 a Q_2 označuje elektrické náboje $[C]$, veličina k $[N \cdot m^2 \cdot C^{-2}]$ dána vztahem (5) vyjadřuje prostředí, ve kterém se náboje nachází. Veličina r ve jmenovateli vztahu vyjadřuje vzdálenost mezi náboji $[m]$. Permittivita vakua $\varepsilon_0 \left[\frac{F}{m} \right]$ je definována vztahem (6).

$$F = \frac{k \cdot (Q_1 \cdot Q_2)}{r^2} \quad (4)$$

$$k = \frac{1}{4 \pi \varepsilon_0} \quad (5)$$

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \quad (6)$$

Další velmi důležitou vlastností elektrostatického pole je intenzita elektrického pole E . Intenzita elektrického pole je jednou ze dvou složek elektromagnetického vlnění. Druhou složkou elektromagnetického vlnění je intenzita magnetického pole $H \left[\frac{A}{m} = \frac{Ampér}{metr} \right]$. Intenzita elektrického pole je vektorová veličina (má svou danou velikost a směr), která je charakterizována tak, že má v každém bodě elektrostatického pole velikost a orientaci totožnou se smyslem síly, která na kladný jednotkový náboj působí. Jednotkou intenzity elektrického pole je $\left[\frac{N}{C} = \frac{Newton}{Coulomb} \right]$ V praxi se ovšem setkáváme spíše s jednotkou $\left[\frac{V}{m} = \frac{Volt}{metr} \right]$. Intenzitu tedy chápeme jako spád napětí v každém bodě (místě) působení elektrostatického pole. Intenzita elektrického a magnetického pole jsou na sebe vzájemně kolmé (ortogonální).

Pojmem ekvipotenciální hladina (ekvipotenciální plocha) označujeme místa v elektrostatickém poli, která mají vzhledem k určité vztažné poloze stejnou hodnotu elektrického napětí (potenciálu). Platí, že vektor intenzity elektrického pole je kolmý k

ekvipotenciálním hladinám. Zakreslení ekvipotenciálních hladin můžeme vidět na obrázku (Obr. 2).



Obr. 2. Ekvipotenciální hladiny [17]

Výpočet elektrické kapacity můžeme provést podle dvou kritérií. Z hlediska mechanického a z hlediska elektrického. Elektrická kapacita z pohledu mechanického (mechanické konstrukce kondenzátoru) se vypočítá podle vztahu (7), kde C je kapacita [F], ϵ je permitivita prostředí složená z permitivity vakua ϵ_0 viz. vztah (6) a poměrné permitivity ϵ [-]. Poměrná permitivita ϵ je různá v různých prostředích. Nejznámější hodnota permitivity je $\epsilon = 1$ (permitivita vzduchu). S označuje plochu desek kondenzátoru [m²], d označuje vzdálenost mezi deskami kondenzátoru [m]. Všechny tyto parametry mají významný vliv na celkovou elektrickou kapacitu.

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (7)$$

Nutno podotknout, že vztah (7) platí pouze a jen pro deskové kondenzátory. Elektrická kapacita C [F] z hlediska elektrického je dána podle vztahu (8) jako podíl elektrického náboje Q [C] na deskách a elektrického napětí U [V] mezi deskami.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (8)$$

Převedeno do technické řeči můžeme konstatovat, že kapacita je dána jako podíl elektrického náboje Q , který je akumulován na deskách kondenzátoru a elektrického napětí U mezi deskami, které způsobilo akumulaci elektrického náboje na deskách kondenzátoru.

Energie nabitého kondenzátoru W [J] je dána vztahem (9). Energie je chápána jako schopnost kondenzátoru konat práci, tzn. akumulovat elektrický náboj na deskách kondenzátoru.

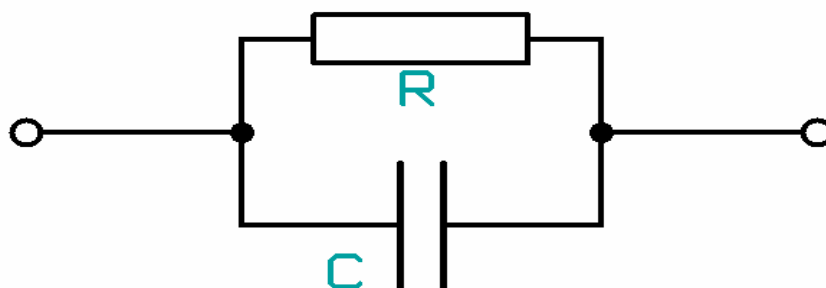
$$W = \frac{1}{2}CU^2 \quad (9)$$

2.2 Kondenzátor

Kondenzátor je elektrotechnická součástka, jejíž základní vlastností je schopnost shromažďovat elektrický náboj. Takové vlastnosti se říká elektrická kapacita kondenzátoru, která byla jako fyzikální veličina popsána již v kapitole 2.1. Patří mezi pasivní elektrotechnické prvky lineární (má lineární VA charakteristiku) a prvky kmitočtově závislé (uplatňuje se pouze v obvodech střídavého proudu).

Ideální kondenzátor neobsahuje parazitní odpor dielektrika, svodové odpory ani parazitní indukčnosti. V technické praxi se však s takovým případem nesetkáme (neexistuje totiž ideální prostředí), a tak existuje pouze a jen kondenzátor reálný (skutečný), který se skládá z paralelního zapojení ideálního kondenzátoru a rezistoru k němu připojeného. Reálný kondenzátor je na obrázku (Obr. 3).

Reálný kondenzátor obsahuje svodový odpor (odpor izolace), který se v technické praxi zakresluje jako rezistor R připojený paralelně proti zemi ke kondenzátoru C . Na kondenzátorech jako na pasivních prvcích se uplatňují tzv. přechodové děje, což jsou děje, které trvají velmi krátkou dobu (cca ms). O přechodových dějích bude pojednáno později. Kondenzátor se jinak chová v obvodu stejnosměrného a jinak v obvodu střídavého proudu. Tyto principy si popíšeme v odstavcích 2.2.2 a 2.2.3.



Obr. 3. Reálný kondenzátor

2.2.1 Parametry kondenzátoru

Kondenzátor stejně jako jiné obvodové součástky má své parametry, které kondenzátor popisují.

Můžeme definovat a popsat základní charakteristiky kondenzátoru ze zdroje [2]:

- „jmenovitá kapacita kondenzátoru C_{jm} – je kapacita vyznačená na obalu kondenzátoru předpokládaná výrobcem. Většina typů pevných kondenzátorů je vyráběna s kapacitou pro řady E6, E12 nebo E24.
- tolerance jmenovité kapacity kondenzátoru – je největší odchylka jmenovité kapacity skutečné kapacity kondenzátoru od jmenovité kapacity vyjádřené v procentech jmenovité kapacity. Na kondenzátoru se většinou neuvádí, výrobce ji uvádí v katalogu.
- jmenovité napětí U_{jm} – je nejvyšší napětí, na které je kondenzátor konstruován. V žádném případě nesmí být překročeno, protože by se kondenzátor mohl zničit vlivem formování, kdy by došlo vlivem tepla ke zničení dielektrika.
- provozní napětí U_{prov} – je dáno jako nejvyšší napětí, které může být trvale připojeno na kondenzátoru. Pokud teplota okolí nepřesahuje $+ 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, rovná se maximální provozní napětí jmenovitému. Při vyšších teplotách je nutné provozní napětí snížit podle doporučení výrobce. Zmenšením provozního napětí se zvyšuje životnost kondenzátoru (kondenzátor se zbytečně nepřetěžuje).
- izolační odpor – je odpor mezi elektrodami kondenzátoru měřený stejnosměrným napětím při teplotě $+ 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je tvořen odporem dielektrika a izolace, která elektrody kondenzátoru obklopuje.

- ztrátový činitel $\tan \delta$ – charakterizuje ztráty energie v kondenzátoru, které jsou způsobeny ztrátami v dielektriku a svodem mezi elektrodami. Uvádí se pro jednotlivé typy kondenzátorů v katalogu. Ztrátový činitel je frekvenčně závislý. Nejmenší ztrátový činitel mají vzduchové kondenzátory, největší elektrolytické².

2.2.2 Kondenzátor v obvodu stejnosměrného proudu

Kondenzátor se v obvodu stejnosměrného proudu chová jako zkrat. Průchodem stejnosměrného proudu I přes kondenzátor C se kondenzátor tímto proudem nabíjí na napětí U , na které je schopen se maximálně nabít (obvykle je to napětí odpovídající cca 95 - 98 % kapacity kondenzátoru – dle typu). Po skončení nabíjení proud kondenzátorem již neprochází.

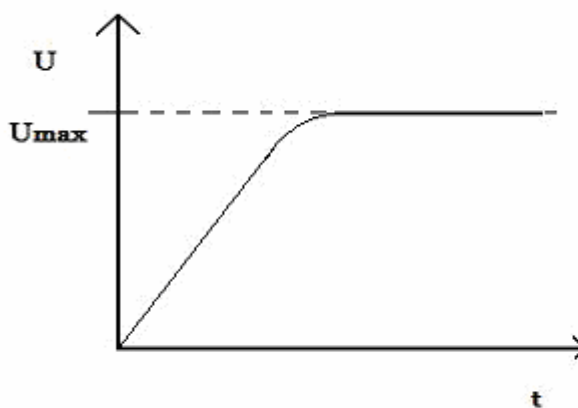
Jinými slovy se tedy dá říct, že při připojení potenciálu (napětí) do obvodu dojde ke zkratu a obvodem prochází maximální možný proud, který dokáže zdroj do obvodu dodat. Proud v obvodu bude omezen pouze odporem dielektrika. Při nabíjení kondenzátoru se proud procházející obvodem postupně snižuje a při nabitém kondenzátoru proud obvodem již neprochází. Kondenzátor se tedy v obvodu stejnosměrného proudu neuplatňuje, protože působí jako zátěž s nekonečně velkým odporem. Nabíjení kondenzátoru je zobrazeno na obrázku (Obr. 4). Vidíme, že se kondenzátor nenabije na maximální kapacitu (vliv odporu dielektrika). Křivka přechodového děje (přechodová charakteristika) se limitně blíží hranici U_{\max} (maximálního napětí, na které se kondenzátor může nabít). Okamžité hodnoty přechodové charakteristiky vyjádřené napětím u [V] jsou dány derivací vstupního napětí U [V] za jednotku času t [s] podle vztahu (10).

$$u = \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad (10)$$

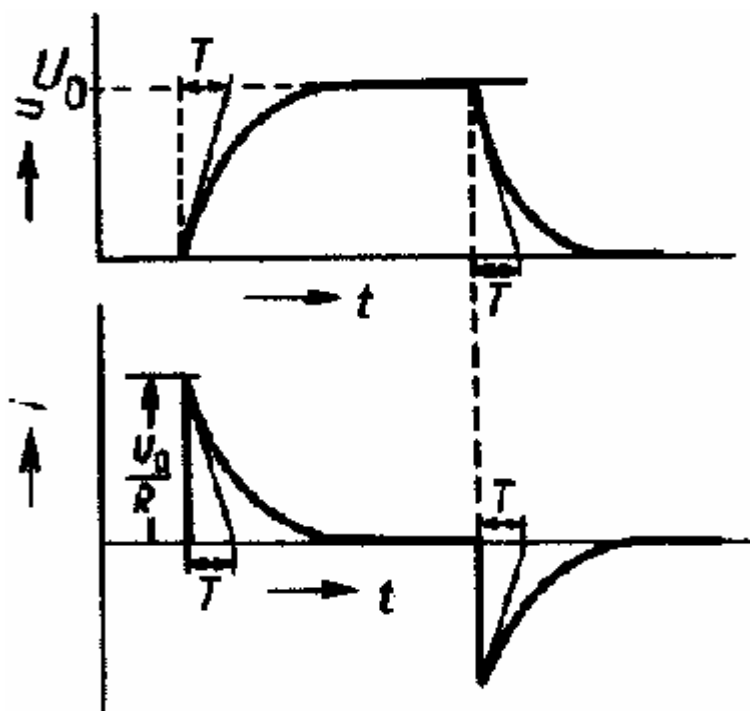
² Bezděk, Miloslav. *Elektronika*. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 271s. s.38-39. ISBN 80 – 7232 – 171 – 4.

Na obrázku (Obr. 5) můžeme vidět celkový pohled na činnost kondenzátoru v obvodu stejnosměrného proudu. Vidíme kompletní průběh nabíjení a kompletní průběh vybíjení kondenzátoru.

Kondenzátor zapojený do obvodu stejnosměrného proudu se uplatňuje např. v obvodech zesilovačů, kde je potřeba účinně oddělit stejnosměrnou a střídavou složku elektrického napětí. Kondenzátor v takovém případě propustí pouze střídavou složku do dalšího stupně obvodu (např. do koncového stupně) a stejnosměrnou složku, která by jinak střídavou složku ovlivňovala nepropustí.



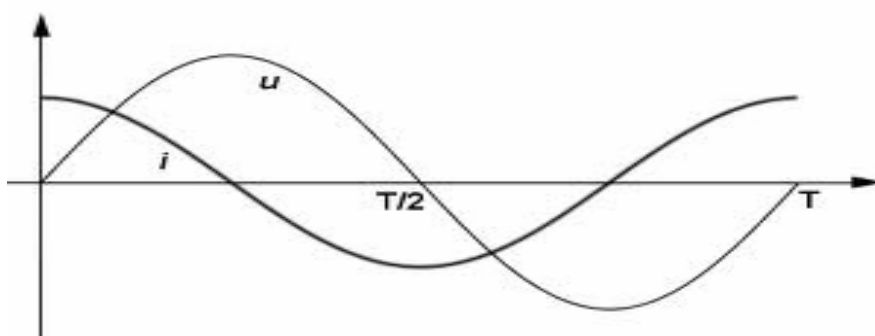
Obr. 4. Přechodová křivka nabíjení kondenzátoru



Obr. 5. Křivky nabíjení a vybíjení kondenzátoru [18]

2.2.3 Kondenzátor v obvodu střídavého proudu

Kondenzátor v obvodu střídavého proudu se chová odlišně než v zapojení obvodu stejnosměrného. Stejně jako v případě, že je kondenzátor připojen do obvodu stejnosměrného proudu i v obvodu střídavého proudu nastává přechodový děj. Časový průběh napětí a proudu není totožný, jako tomu bylo v případě průchodu stejnosměrným proudem. Proud se předbíhá před napětím o 90° viz obrázek (Obr. 6).



Obr. 6. Časový průběh I a U na C v obvodu střídavého proudu [19]

Přechodový děj lze vysvětlit tak, že je v první řadě třeba nabíjecího proudu, aby se kondenzátor nabil na určité napětí. Kondenzátor klade střídavému proudu určitý odpor. Není to ovšem odpor ohmický, ale tzv. kapacitní reaktance X_c [Ω]. Kapacitní reaktance je

odpor, který klade kondenzátor průchodu střídavého proudu. X_c závisí nepřímo úměrně na frekvenci a na kapacitě podle vztahu (11), kde ω je úhlová frekvence $\left[\frac{rad}{s} \right]$ dána vztahem (12).

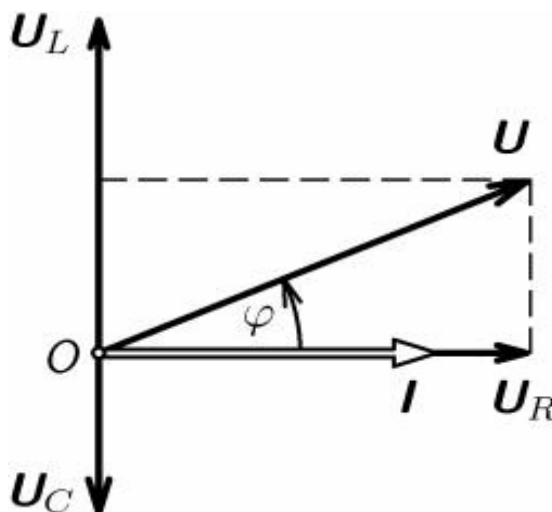
$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (11)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (12)$$

Kapacitní reaktance je nekonečně vysoká pro stejnosměrné napětí, klesá s rostoucí frekvencí, ale při nekonečně vysoké frekvenci se kondenzátor chová jako zkrat. Často se při řešení střídavých obvodů používají fázory.

Fázory jsou vektory (mají svou velikost a směr), kterými se obvykle zobrazuje fázový posuv mezi napětím U a proudem I . Fázory si můžeme představit jako vektory, které se otáčejí v protisměru hodinových ručiček kolem počátku soustavy souřadnic rychlostí danou úhlovou frekvencí ω .

Příklad fázorového diagramu je na obrázku (Obr. 7). Diagram zobrazuje rezonanční obvod RLC (rezistor-cívka-kondenzátor). Z diagramu můžeme pohodlně spočítat parametry obvodu (např. úhel posuvu φ mezi napětím a proudem kondenzátoru apod.). Napětí a proud jsou na rezistoru ve fázi. Na cívce se napětí předbíhá před proudem o 90° . Na kondenzátoru se proud předbíhá o 90° , a proto je nutné napětí U_c zakreslit do záporných hodnot.



Obr. 7. Fázorový diagram RLC obvodu [20]

2.2.4 Keramický kondenzátor

Mezi nejběžněji používané typy kondenzátorů patří kondenzátor keramický. Označení keramický nenese náhodou. Je vyroben ze speciálního typu keramiky s velkou permitivitou ϵ metodou tzv. „sintrování“.

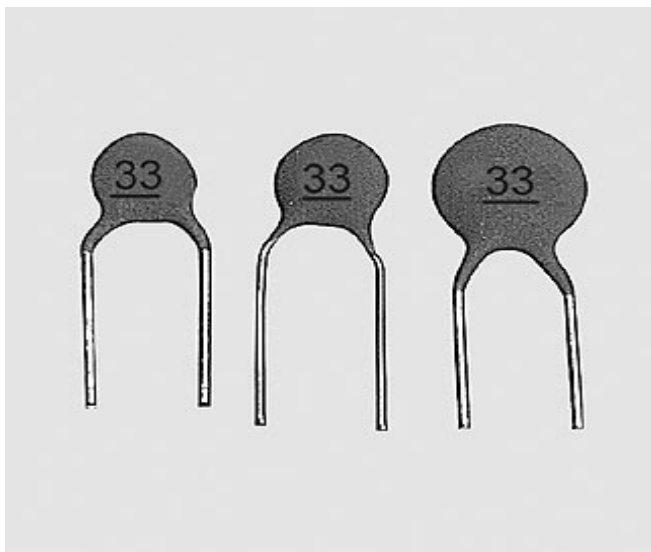
Sintrování, někdy také označováno jako slinování nebo jednoduše spékání, je postup, při kterém dochází k výrobě předmětů spékáním práškových hmot vlivem jejich zahřátí na vysokou teplotu (cca 1100-1900 °C), která ale není rovna nebo větší než teplota tání daného materiálu. Při takto vysoké teplotě dochází ke vzájemnému přizpůsobení (splnutí) prachových částic. Celý proces probíhá ve vakuové peci. Tímto procesem se v oboru metalurgie (výroba kovů) vyrábí např. litinové prášky.

Výhodami jsou malá vlastní indukčnost L , malý ztrátový činitel $\tan \delta$.

Nevýhodami tohoto typu kondenzátoru jsou:

- menší přesnost, jsou vhodné spíše pro VF (vysokofrekvenční) obvody
- mají obvykle větší teplotní součinitel kapacity (tzn., že jejich kapacita může více či méně kolísat v závislosti na teplotě okolí, ve kterém kondenzátor pracuje a na teplotě, na kterou je kondenzátor zahřátý)

Keramické kondenzátory se vyrábí jak pro klasickou průchozí (vývodovou) montáž, tak pro montáž technologií SMT (povrchová montáž). Vyrábí se v kapacitách cca 1 pF – 0,2 μ F. Ukázka keramického kondenzátoru viz. obrázek (Obr. 8).



Obr. 8. Keramický kondenzátor [21]

2.2.5 Elektrolytický kondenzátor

Elektrolytický kondenzátor je typem kondenzátoru, který má zcela odlišnou konstrukci od kondenzátoru keramického. Odlišnost spočívá především v předepsané polaritě obou elektrod. U keramického kondenzátoru nebylo podstatné, jak kondenzátor zapojíme (nehrozilo zničení přepólováním). Zde riziko proražení dielektrika hrozí. Elektrody mají označenou polaritu (+ a -) a v zapojení do obvodu musíme tuto polaritu dodržet, jinak dojde k porušení dielektrika, a tím i ke zničení celého kondenzátoru.

Katoda je vytvořena z vodivého elektrolytu (tekutý, polosuchý, pevný). Anoda je tvořena tenkou hliníkovou fólií, na které je nanесena (napařena) malá vrstva oxidu hlinitého (Al_2O_3). Tato vrstva tvoří dielektrikum kondenzátoru. Jsou známy případy, kdy při přepólování kondenzátor nevydržel krátkodobý zkrat a doslova explodoval (časté případy zranění nebo úplně zničení celého zařízení). Elektrolytický kondenzátor se vyrábí v kapacitách v rozsahu cca $1\mu\text{F}$ – 10 mF . Ukázka elektrolytického kondenzátoru viz. obrázek (Obr. 9). Na kondenzátorech bývá uvedena jmenovitá kapacita C [F], a také maximální teplota T [$^{\circ}\text{C}$], na kterou je daný kondenzátor dimenzován. Konkrétní údaje můžeme vyčíst z obrázku (Obr. 9).

Výhodou je vysoká měrná kapacita a možnost širokého použití v mnoha aplikacích.

Nevýhodou elektrolytického kondenzátoru je:

- mnohem menší přesnost oproti keramickému (tolerance může být od -10 % - +100 %)

- teplotní součinitel kapacity je větší (kapacita se mění v závislosti na teplotě)
- parazitní indukčnost a svodové odpory nemusí být vždy zanedbatelné
- ke své činnosti potřebují stejnosměrné předpětí (nesmíme zaměnit polaritu!!!)
- pokud se kondenzátor dlouho nepoužívá, tak se jeho kapacita zmenšuje. Proto je nutné provádět tzv. formování (refresh) kondenzátoru pomocí stejnosměrného proudu, který jednou za čas nabije kondenzátor na maximální možnou kapacitu, aby se přizpůsobily elektrody a „obnovilo“ dielektrikum
- určen spíše pro provoz s menším napětím



Obr. 9. Elektrolytický kondenzátor [22]

2.2.6 Laditelný kondenzátor

Laditelný kondenzátor je speciálním typem kondenzátoru, jehož kapacitu můžeme měnit otáčením hřídele připojené ke kondenzátoru. Základní konstrukci tvoří stator (pevná část) a rotor (pohyblivá část). Na statoru i rotoru jsou umístěny desky (elektrody), které se do sebe otáčením hřídele zasouvají. Zasouváním desek statoru a rotoru do sebe se mění aktuální aktivní plocha desek S a v důsledku tohoto i samotná kapacita C podle vztahu (7).

Desky mají nejčastěji tvar půlkruhu (výsledná kapacita se mění s natočením desek lineárně). Jako dielektrikum je použit nejčastěji vzduch (otočné vzduchové kondenzátory), popř. olej, papírovina nebo polystyren. Nejčastějším použitím je ladění frekvenčního pásma u rozhlasových přijímačů. Otočný vzduchový kondenzátor viz. obrázek (Obr. 10).



Obr. 10. Otočný vzduchový kondenzátor [23]

2.2.7 SMD kondenzátory

SMD (surface mount device) kondenzátor je typem kondenzátoru určeným pro povrchovou montáž technologií SMT (surface mount technology). Při tomto postupu se vývody součástky pájí přímo na DPS. Keramické SMD kondenzátory jsou vyráběny z keramických dielektrických materiálů, které se tvarují do tenkých destiček. Elektrody jsou z niklu (Ni) nebo paladia (Pd) složených do vícevrstvého bloku. Plošky pro pájení jsou niklovány a pokoveny. Kapacita těchto kondenzátorů se obvykle pohybuje v řádech pF, nF, μ F. Parametry jsou stejné jako u klasických keramických kondenzátorů (viz odstavec 2.2.1). Ukázka SMD kondenzátoru viz. obrázek (Obr. 11).

Výhodou technologie SMT je především nízká úroveň vrtání na DPS, možnost osazovat DPS z obou stran, malá velikost a kompaktnost součástky (obvodu).

Nevýhodou technologie SMT je hlavně menší odolnost vůči poškození a složitá manipulace (vrtání, osazování) pro elektroniky – amatéry, kteří nedisponují patřičným vybavením.



Obr. 11. SMD kondenzátory [24]

2.2.8 Parazitní kapacita

Parazitní kapacita je nežádoucí jev, který vzniká vlivem izolace elektrických vodičů. Izolace vodičů je vyráběna zejména z plastických hmot, které tvoří obvykle dielektrikum. Z tohoto důvodu vzniká mezi souběžnými vodiči parazitní kondenzátor s kapacitou danou vztahem (7). Při průchodu proudu vodiči, které jsou uloženy souběžně vedle sebe se tento parazitní kapacitor nabíjí a vybíjí. Jinými slovy lze říct, že dochází k rušení (přeslechům) mezi kabely.

Příkladem mohou být datové kabely pro přenos dat na HDD. Typicky je IDE kabel pro ATA disk 40-ti žilový. Vodiče jsou umístěny těsně vedle sebe. Může docházet k negativnímu ovlivňování sousedních vodičů vlivem parazitní kapacity. Tento jev nelze z hlediska absence ideálního prostředí nikdy definitivně odstranit. Dá se mu ovšem předejít aplikací stínění mezi vodiči. Z tohoto důvodu nejsou IDE vodiče 40-ti žilové, ale ve skutečnosti jsou 80-ti žilové (40 vodičů + stínění mezi každými dvěma vodiči). Tím se rušení minimalizuje. U datových vodičů je přítomnost parazitní kapacity, která je obvykle v interakci s parazitní indukčností (indukčnost vlastního vodiče), vyjádřena rostoucí bitovou chybovostí BER (bit-error-rate). BER je vyjádřena jako poměr chybně přijatých bitů k celkovému počtu přenesených bitů za jednotku času.

Z důvodů zmíněných na příkladu v tomto odstavci se v dnešní době dává přednost spíše optickým spojům před metalickými, protože optické spoje jsou schopny odolávat působení parazitních vlivů a mají v porovnání s metalickými kabely minimální BER a EMI. Umožňují přenášet data na velké vzdálenosti velkou rychlostí bez nutnosti pravidelné regenerace signálu (nutnost regenerace signálu až po několika stovkách kilometrů přenosové trasy).

2.3 Indukčnost

Indukčnost je fyzikální veličina, která popisuje vznik a působení magnetického pole, které vzniká působením elektrického proudu I procházejícího elektrickým vodičem. Vyjadřuje schopnost elektrického vodiče vytvářet kolem sebe proměnné magnetické pole. Magnetické pole můžeme definovat podle zdroje [3]: „Magnetické pole je silové pole, které vzniká následkem pohybu elektrických nábojů. Vytváří jej buď permanentní magnet nebo elektromagnet“³.

Stejně jako elektrostatické pole, tak i elektromagnetické pole je definováno několika fyzikálními veličinami.

Intenzita magnetického pole je veličina, kterou můžeme podle zdroje [4] definovat takto: „Intenzita magnetického pole H je dána magnetickým napětím připadajícím na jednotku délky indukční čáry, neboli spádem magnetického napětí.“⁴. Jedná se o vektorovou veličinu s jednotkou $\left[\frac{A}{m}\right]$. Matematický vztah je podle zdroje [5] definován: „Ve

³ Vlček, Jiří. *Základy elektrotechniky*. 1.vyd. Praha: BEN- technická literatura, 2003. 224s. s.26. ISBN 859-40-1142-156-2.

⁴ Vlček, Jiří. *Základy elektrotechniky*. 1.vyd. Praha: BEN- technická literatura, 2003. 224s. s.27. ISBN 859-40-1142-156-2.

vzdálenosti r od osy vodiče je intenzita magnetického pole stejná po celé délce indukční

$$\text{čáry } H = \frac{Um}{l} = \frac{I}{2\pi r} \left[\frac{A}{m}, A, m \right] \text{ „}^5.$$

Další veličinou popisující chování magnetického pole je magnetický tok. Podle zdroje [6] můžeme definovat magnetický tok takto: „Počet indukčních čar v magnetickém poli udává magnetický tok ϕ , jednotka Wb (Weber = V.s). Je to skalární veličina definovaná

$$\text{napětím vzniklým (indukovaným) při změně toku. } u = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} [V] \text{ „}^6.$$

Magnetická indukce patří mezi 3 základní veličiny magnetického pole spolu s předchozími dvěma jmenovanými. Ze zdroje [7] magnetickou indukci definujeme: „Magnetická indukce je dána počtem magnetických indukčních čar (tokem ϕ) na jednotku plochy S . $B = \frac{\phi}{S}$, jednotkou je (T). Magnetická indukce vyjadřuje silové účinky magnetického pole. Magnetické pole má indukci 1 T, působí-li na vodič, kterým teče proud 1 A, silou 1 N na každý metr jeho délky. Magnetickou indukci zobrazujeme pomocí magnetických siločar“⁷.

2.4 Cívka

Podle zdroje [8] můžeme cívku definovat: „Cívky (nazývané také induktory nebo tlumivky) jsou součástky, jejichž podstatou obvykle bývá vodič (měděný drát) navinutý do tvaru šroubovice nebo spirály. Základní a požadovanou vlastností cívky je vlastní

⁵ Vlček, Jiří. *Základy elektrotechniky*. 1.vyd. Praha: BEN- technická literatura, 2003. 224s. s.27. ISBN 859-40-1142-156-2.

⁶ Vlček, Jiří. *Základy elektrotechniky*. 1.vyd. Praha: BEN- technická literatura, 2003. 224s. s.28. ISBN 859-40-1142-156-2.

⁷ Vlček, Jiří. *Základy elektrotechniky*. 1.vyd. Praha: BEN- technická literatura, 2003. 224s. s.28. ISBN 859-40-1142-156-2.

indukčnost. Indukčnost cívek závisí na počtu závitů, jejich geometrickém uspořádání a na magnetických vlastnostech prostředí, které závity obepínají i které cívky obklopuje⁸.

Na rozdíl od ostatních součástek (rezistory, kondenzátory) jsou cívky mnohem rozměrnější a dražší na výrobu. V porovnání s jinými součástkami nelze dalším vývojem jejich rozměry miniaturizovat (magnetický obvod se dá miniaturizovat velmi obtížně). Proto se snažíme pokud možno obvodová zapojení s cívkami nahrazovat možnými alternativami (nizkofrekvenční cívky nahrazujeme operačními zesilovači, filtrační tlumivky nahrazujeme stabilizátory apod.). Vzhledem k rozmanitým požadavkům zákazníků se velká většina cívek vyrábí na zakázku. Z tohoto důvodu je sortiment cívek velmi široký. Budeme uvažovat reálnou (skutečnou) cívku, která kromě samotné reaktance X_L [Ω] obsahuje i ohmický odpor vinutí R [Ω]. Elektrotechnická značka cívky viz. obrázek (Obr. 12).



Obr. 12. Elektrotechnická značka cívky [25]

2.4.1 Parametry cívek

Cívka je stejně jako každá jiná součástka definována svými parametry. Nyní si podle zdroje [9] popíšeme základní parametry cívek.

„Vlastnosti cívek, které do značné míry nezávisí na jejich konstrukci, lze popsat následujícími parametry:

- velikost indukčnosti cívky
- teplotní závislost indukčnosti cívky
- proudová a napěťová závislost indukčnosti
- činitel jakosti (ztrátový činitel) cívky

⁸ Bezděk, Miloslav. *Elektronika*. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 271s. s.42. ISBN 80 – 7232 – 171 – 4.

- maximální provozní proud cívky
- maximální provozní napětí cívky
- maximální výkon cívky
- stárnutí cívky⁹.

Velikost vlastní indukčnosti cívky L můžeme určit stejně jako u kondenzátoru z hlediska mechanického (konstrukce cívky) a z hlediska elektrického.

Z hlediska mechanického je velikost vlastní indukčnosti L dána vztahem (13), kde L je vlastní indukčnost [H], N je počet závitů cívky, μ je permeabilita cívky (složená z permeability vakua μ_0 a poměrné permeability μ), S udává průřez vodiče [m²], l udává délku vodiče [m].

$$L = N^2 \mu \frac{S}{l} \quad (13)$$

Z hlediska elektrického je vlastní indukčnost L [H] dána vztahem (14), čili jako derivace magnetického toku vyvolaná změnou proudu protékajícího cívkou.

$$L = \frac{\Delta \phi}{\Delta I} \quad (14)$$

Maximální provozní proud cívky I_{\max} se udává v [A], maximální provozní napětí U_{\max} ve [V], maximální výkon cívky P_{\max} ve [W].

Činitel jakosti (kvality) cívky je bezrozměrná veličina dána vztahem (15), která udává kolikrát je indukční reaktance cívky větší než ohmický odpor vinutí cívky.

⁹ Bezděk, Miloslav. *Elektronika*. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 271s. s.43. ISBN 80 – 7232 – 171–4.

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (15)$$

2.4.2 Provedení cívek

Provedení cívek můžeme popsat podle zdroje [10]: „Cívky bez jádra se konstruují pro indukčnosti řádově mikrohenry, výjimečně jednotek milihenry. Jsou využívány v obvodech s kmitočtem až několik set MHz nebo v obvodech nízkofrekvenčních, kdy záleží na tom, aby se při změně proudu procházejícího vinutím neměnila indukčnost. Speciální skupinou cívek bez jádra jsou tzv. plošné cívky, které jsou vytvořeny vyleptáním do plošných spojů ve tvaru závitů. Indukčnost těchto cívek zpravidla nepřesahuje 10 μ H. Užívají se pro kmitočty několika desítek až stovek MHz.



Obr. 13. Cívka bez jádra [26]

Cívky s jádrem – podle druhu použitého jádra dosahuje maximální indukčnost těchto cívek několika desítek až stovek milihenry (cívky pro použití ve vysokofrekvenčních obvodech) nebo několika desítek henry (nízkofrekvenční tlumivky). Jádra jsou vyráběna z magneticky značně vodivých materiálů s malými hysterezními ztrátami.



Obr. 14. Cívka s železným jádrem [27]

Vysokofrekvenční cívky s jádry – pro cívky s indukčností do několika set mikrohenry se používají jádra šroubová. Jádro má tvar šroubu s jemným závitem a lze ho šroubováním zasouvat do prostoru cívky, tím se mění indukčnost.

Nízkofrekvenční tlumivky mají jádra tvořena magnetickým obvodem. Obvod je navinut z ortopermového pásku tloušťky 0,32 mm (vhodné pro síťový kmitočet 50 Hz, jádro je označeno žlutou barvou), nebo tloušťky 0,13 mm (pro kmitočty akustického pásma, jádro je označeno zeleně). Průchod vířivých proudů jádrem je zmenšen tím, že jsou jednotlivé závity pásku od sebe izolovány¹⁰.

2.4.3 Rozdělení cívek

Ze zdroje [11]: „Cívky se dělí podle následujících kritérií:

1). Podle použití:

- cívky pro ladící okruhy a filtry (na tyto cívky jsou kladeny požadavky teplotní a dlouhodobé stability)
- tlumivky síťové, nízkofrekvenční nebo vysokofrekvenční

2). Podle velikosti magnetické permeability jádra:

- vzduchové cívky

¹⁰ Bezděk, Miloslav. *Elektronika*. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 271s. s.43-44. ISBN 80– 7232 – 171 – 4.

- cívky s magnetickým jádrem
- s otevřeným magnetickým obvodem
- s polouzavřeným magnetickým obvodem
- s uzavřeným magnetickým obvodem

3). Podle druhu vinutí:

- cívky s vrstvomým vinutím (závit vedle závitu v jedné nebo více vrstvách)
- cívky křížově vinuté
- cívky s hrázovým nebo pyramidovým vinutím
- cívky vinuté v sekcích
- podle pracovního kmitočtu: nízkofrekvenční, vysokofrekvenční¹¹.

2.4.4 Cívka v obvodu stejnosměrného proudu

Připojením cívky ke zdroji stejnosměrného napětí nastane přechodový děj. Přechodový děj je charakterizován vytvořením stálého magnetického pole kolem cívky po průchodu elektrického proudu I vinutím. Po odeznění přechodového děje se cívka chová jako zkrat, protože se projevuje pouze svým ohmickým odporem R .

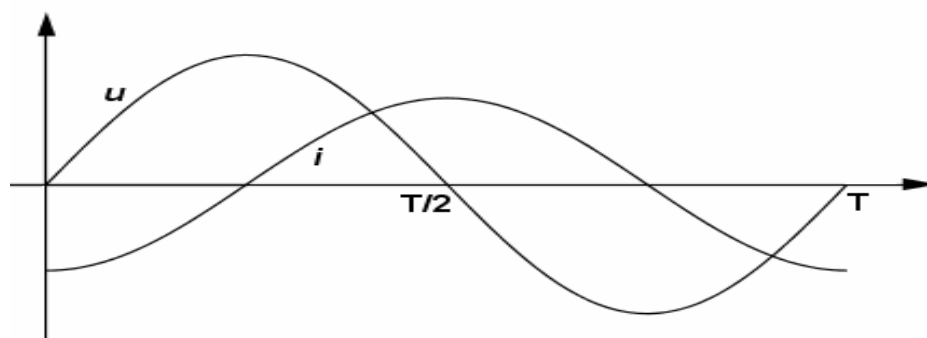
Cívka se tedy v obvodu stejnosměrného proudu chová jako ohmický (činný) odpor. Z tohoto vyplývá, že průběhy elektrického proudu I a napětí U jsou ve fázi.

2.4.5 Cívka v obvodu střídavého proudu

Pokud připojíme střídavé napětí U o dané frekvenci f na cívku, tak se kolem cívky vytvoří proměnné magnetické pole. Toto magnetické pole má za následek naindukování napětí, které podle Lenzova zákona působí proti změně, která ho vyvolala. Následkem tohoto vzniká tzv. reaktance (odpor kladený cívkou při průchodu střídavého proudu).

¹¹ Bezděk, Miloslav. *Elektronika*. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 271s. s.44-45. ISBN 80- 7232 – 171 – 4.

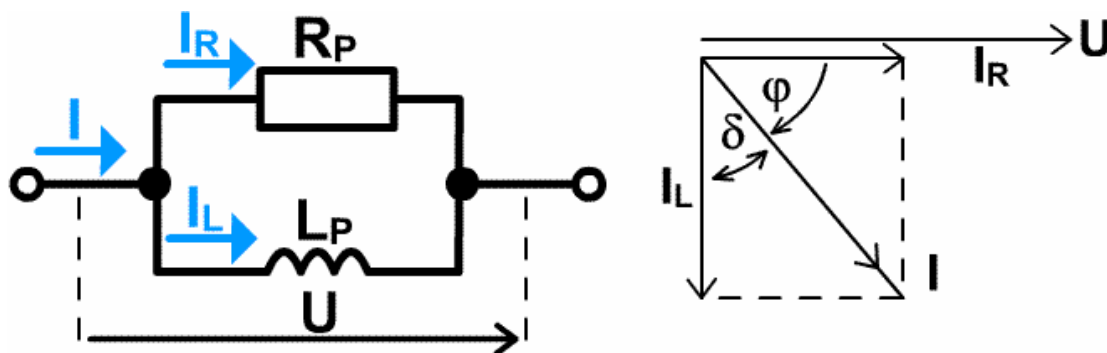
Průběh napětí a proudu není totožný (ve fázi) jako tomu je v obvodu stejnosměrného proudu. Elektrické napětí U se v ideálním případě předbíhá před elektrickým proudem I o 90° . Důvod je zřejmý. V první řadě musíme na cívku připojit potenciál (elektrické napětí), teprve poté cívkou proteče elektrický proud, který vytvoří magnetické pole. Průběh napětí a proudu viz. obrázek (Obr. 15).



Obr. 15. Průběh napětí a proudu na cívce v obvodu střídavého proudu

V předchozím odstavci jsme zmínili, že fázový posuv napětí vůči proudu o 90° platí pouze pro ideální cívku, u které se neuplatňuje ohmický odpor vinutí. U skutečné cívky, která výše zmíněný odpor vinutí má se počítá tzv. ztrátový úhel $\tan \delta$, který vyjadřuje skutečný fázový posuv mezi napětím a proudem, který je vlivem ztrát ve vinutí vždy menší než 90° . Pro vyjádření ztrátivosti cívky se cívce přiřazuje sériový rezistor R_s , který vyjadřuje ztráty ve vinutí cívky. Činitel jakosti daný vztahem (16) je převrácenou hodnotou ztrátového úhlu a naopak. Ztrátový úhel se dá vypočítat podle fázorového diagramu na obrázku (Obr. 16 vpravo). Výpočet ztrátového úhlu viz vztah (17).

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} \quad (16)$$



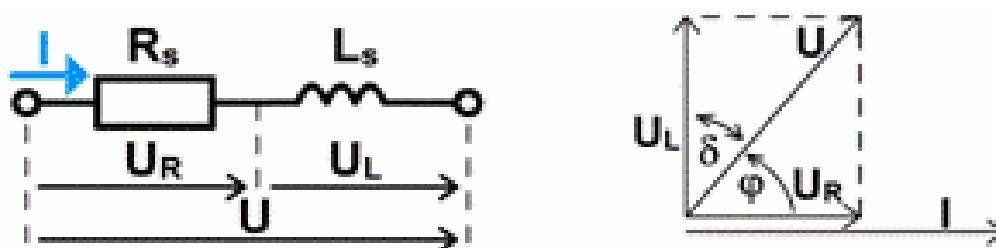
Obr. 16. Zapojení a fázorový diagram paralelního zapojení RL obvodu [28]

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_L} = \frac{\frac{U}{R_P}}{\frac{U}{X_P}} = \frac{X_P}{R_P} \quad (17)$$

Činitel jakosti Q pro paralelní zapojení je dán vztahem (18).

$$Q_P = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{R_P}{\omega L_P} \quad (18)$$

Obdobně se vypočítá ztrátový úhel pro sériové zapojení RL obvodu (Obr. 17). Konečné vyjádření dle vztahu (19).



Obr. 17. Zapojení a fázorový diagram sériového zapojení RL obvodu [29]

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_L} = \frac{I R_S}{I X_S} = \frac{R_S}{\omega L_S} \quad (19)$$

Činitel jakosti Q pro sériové zapojení je dán vztahem (20).

$$Q_s = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{\omega L_s}{R_s} \quad (20)$$

2.4.6 SMD cívky

Cívky pro SMT můžeme popsat podle zdroje [12]: „Tyto cívky se vyrábějí navinutím vodiče na jádro většinou z feromagnetického materiálu.

Používají se magneticky měkké materiály s velkou permeabilitou (ferity). Jádro může v některých případech zcela obklopovat vinutí. Vyrábí se buď otevřené provedení, nebo může být cívka zalisována do vhodné plastické hmoty. Svým provedením a velikostí jsou tyto cívky podobné tantalovým kondenzátorům, případně se vyrábí provedení ve velikosti pouzder 0805 a větších. Cívky s malou indukčností se mohou vyrábět jako samonosné bez jádra, s tvarem přizpůsobeným povrchové montáži.

Vinutí cívky je možné vytvořit závitů plošného vodiče realizovaného na keramických podložkách postupně skládaných na sebe tak, aby vytvořily cívku¹².

Takové cívky se označují jako vrstevné SMD cívky, jejichž hlavním znakem je vysoká spolehlivost a kompaktnost. Příklad SMD cívky můžeme vidět na obrázku (Obr. 18).



Obr. 18. SMD cívka

¹² Bezděk, Miloslav. *Elektronika*. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 271s. s.46-47. ISBN 80– 7232 – 171 – 4.

2.4.7 Parazitní indukčnost

Jako parazitní indukčnost je u elektrických vodičů označován jev, kdy dochází k vytváření parazitního magnetického pole průchodem elektrického proudu. Z principu by měl elektrický proud téct pouze jádrem vodiče (vnitřní plochou vodiče). Často se ale stává, že především při vyšších frekvencích (nad 20 kHz) dochází k vytlačování elektrického proudu na povrch vodiče. Proud tak teče pouze po povrchu vodiče. Tento jev se označuje jako tzv. skin efekt. Příčiny jeho vzniku, parametry a důsledky si popíšeme v následujícím odstavci.

Skin efekt je fyzikální jev, který se projevuje u elektrických vodičů napájených střídavým elektrickým napětím s frekvencí přesahující nízkofrekvenční pásmo (tedy s frekvencí vyšší než přibližně 20 kHz). Základní příčinou skin efektu je nerovnoměrné rozložení elektrického proudu ve vodiči (tím i nerovnoměrné rozložení magnetického pole kolem vodiče). Platí, že s rostoucí frekvencí roste nerovnoměrnost rozložení proudu ve vodiči. Střídavý elektrický proud, který prochází vodičem, vytváří kolem vodiče magnetické pole. Zároveň kolem sebe samého uzavírá siločáry magnetického toku. Určitá část tohoto magnetického toku prochází i samotným vodičem a indukuje v něm nežádoucí vířivé proudy.

Vířivý proud je nežádoucí elektrický proud, který vzniká typicky v plošných vodičích při změně okolního magnetického toku (vzniká pouze v obvodech střídavého proudu). Vířivé proudy mají směrem ke středu vodiče opačný směr než původní elektrický proud, a tak se z tohoto důvodu od původního elektrického proudu odečítají. V opačném případě (směrem k povrchu vodiče) mají vířivé proudy souhlasný (stejný) směr jako původní proud, a tak dochází ke sčítání vířivých proudů s původním elektrickým proudem. V důsledku tohoto dojde k vytlačení elektrického proudu na povrch vodiče – dojde ke skin efektu. Platí, že skin efekt je tím větší, čím je vyšší frekvence f , průřez vodiče S a vodivost materiálu G , ze kterého je vodič vyroben.

Vířivé proudy mají tepelné účinky, a proto v obvodech, kde dochází ke ztrátám vířivými proudy dochází k tepelným ztrátám (dáno Jouleovým teplem). Příkladem působení vířivých proudů je transformátor. Aby se ztráty způsobené vířivými proudy minimalizovaly, tak dochází v praxi ke vzájemné izolaci jednotlivých plechů transformátoru od sebe. Ztráty

vířivými proudy by se daly vyjádřit podle vztahu (21), kde P_v je výkon vířivého proudu [W], f je frekvence střídavého elektrického napětí, B je magnetická indukce [T].

$$P_v = f^2 \cdot B^2 \quad (21)$$

Vířivé proudy mají navzdory svým negativním účinkům své bohaté uplatnění v technické praxi. Typickým příkladem využití vířivých proudů je metalurgie, kde se vířivých proudů využívá v indukčních pecích k zahřívání, potažmo k tavení kovů. Dalšími příklady jsou indukční brzda (např. brždění tramvají, trolejbusů, elektrických invalidních vozíků, rotopedů), elektroměr (utlumení pohybu ručičky po zastavení odběru proudu).

2.5 Klasické metody měření kapacity

Mezi klasické metody měření kapacit a indukčností patří především Ohmova metoda a Srovnávací metoda. Tyto metody se vyznačují především jednoduchou realizací obvodového zapojení a relativně jednoduchým měřicím procesem. Klasické metody se označují jako metody výchylkové.

2.5.1 Ohmova metoda

Ohmova metoda (někdy také nazývána jednoduše jako VA metoda) je zřejmě nejjednodušší metodou měření kapacity kondenzátoru. Vychází se ze znalosti elektrického proudu I [A] protékajícího přes kondenzátor C [F] a elektrického napětí U [V] na kondenzátoru. Pro napětí na kondenzátoru podle ohmova zákona platí vztah (22).

$$U_C = Z_C I \quad (22)$$

Ze vztahu (22) plyne (při znalosti vzorce pro X_C) rozšíření vztahu dané vztahem (23).

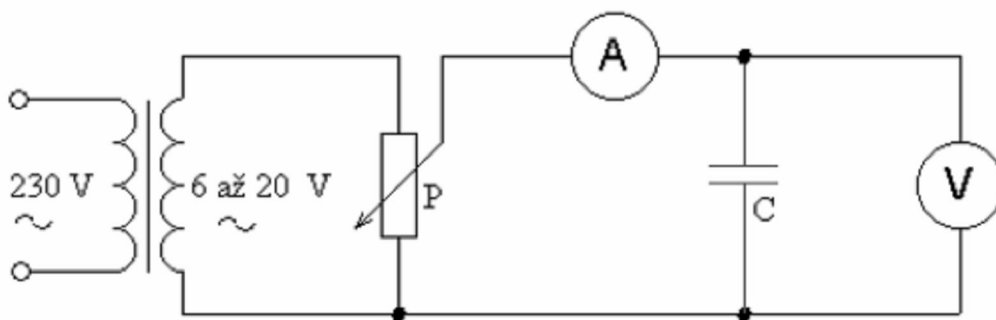
$$U_C = \frac{1}{\omega C} I \quad (23)$$

Ze vztahu (23) už velmi jednoduše vyjádříme výslednou kapacitu C danou vztahem (24).

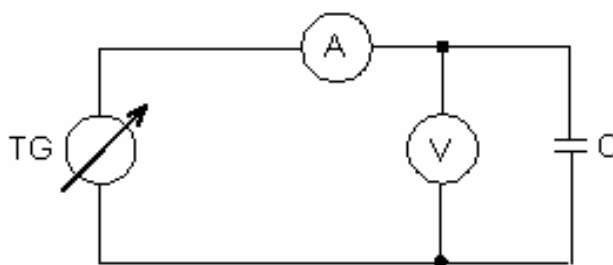
$$C = \frac{I}{\omega U} \quad (24)$$

Postup je tedy takový, že měříme proud I a napětí U . Ze znalosti hodnot těchto dvou veličin snadno dopočítáme výslednou kapacitu C . Příklad zapojení obvodu pro měření kapacity Ohmovou metodou viz. obrázek (Obr. 19).

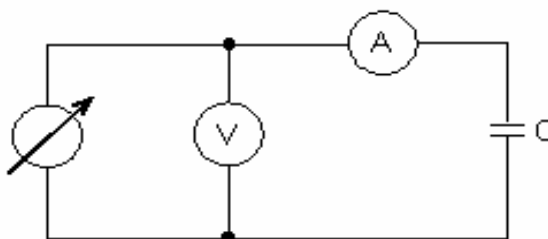
Používají se dvě metody zapojení (tzv. metoda AVAL a AMONT). Metoda AVAL se používá pro měření velkých kapacit, kdy je ampérmetr A zapojen před voltmetr V viz. obrázek (Obr. 20). Metoda AMONT se používá pro měření malých kapacit, kdy je voltmetr V zapojen před ampérmetr A viz. obrázek (Obr. 21).



Obr. 19. Schéma pro měření kapacity Ohmovou metodou



Obr. 20. Metoda AVAL



Obr. 21. Metoda AMONT

2.5.2 Srovnávací metoda

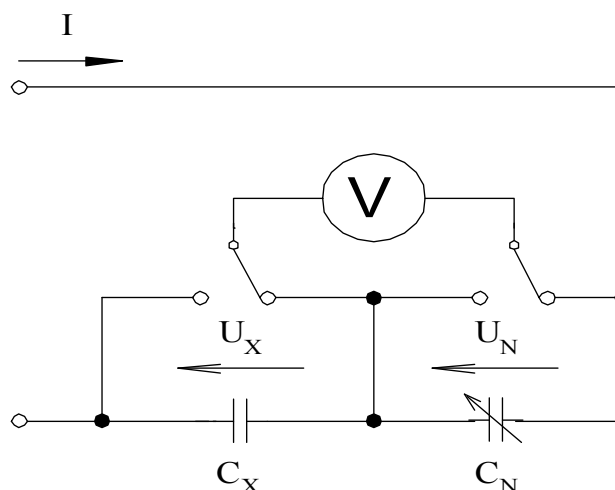
Srovnávací metoda je další z klasických metod měření kapacity kondenzátorů. Tato metoda vychází z Kirchhofových zákonů. Metoda spočívá v měření napětí na dvou sériově spojených kondenzátorech, z nichž jeden je známé kapacity a druhý je kapacity neznámé. Druhou variantou je měření proudu na paralelním spojení dvou kondenzátorů, z nichž jeden je známé kapacity a druhý neznámé kapacity. První podtyp metody je vhodný spíše pro měření velkých kapacit, druhý pro měření malých kapacit. Důležitým atributem pro výběr podmetody je poměr měřené reaktance při určitém kmitočtu a vnitřních odporů použitých přístrojů (voltmetrů a ampérmetrů).

Opět existují dvě „submetody“ této metody. Srovnávací napěťová metoda a srovnávací proudová metoda.

Srovnávací napěťová metoda se s výhodou používá pro měření velkých kapacit. Schéma zapojení této metody viz. obrázek (Obr. 22). Voltmetr je připojen paralelně ke známému a neznámému kondenzátoru. Známý kondenzátor je laditelný. U_X - napětí na neznámém kondenzátoru. U_N – napětí na laditelném kondenzátoru. C_X – neznámý kondenzátor. C_N - nastavitelný (známý kondenzátor). Platí nepřímá úměra mezi kapacitou C a napětím U , což dokazuje i vztah (25). Výsledná neznámá kapacita se vyjádří podle vztahu (26).

$$\frac{U_X}{U_N} = \frac{C_X}{C_N} = \frac{1}{\frac{C_N}{C_X}} \quad (25)$$

$$C_X = C_N \cdot \frac{U_N}{U_X} \quad (26)$$

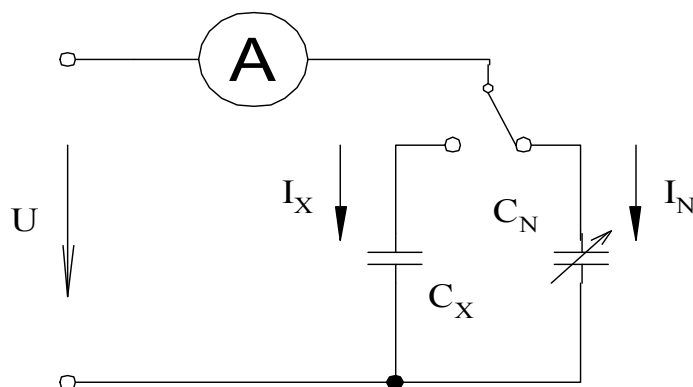


Obr. 22. Schéma srovnávací napěťové metody

Srovnávací proudová metoda je s výhodou používána pro měření malých kapacit. Schéma zapojení této metody viz. obrázek (Obr. 23). Ampérmetr je připojen sériově ke známému a k neznámému kondenzátoru. Známý kondenzátor je laditelný. I_X - proud tekoucí neznámým kondenzátorem. I_N – proud tekoucí laditelným kondenzátorem. C_X – neznámý kondenzátor. C_N - nastavitelný (známý kondenzátor). Mezi proudem a impedancí platí nepřímá úměra, což dokazuje vztah (27). Výsledná neznámá kapacita se vyjádří podle vztahu (28).

$$\frac{I_X}{I_N} = \frac{Z_N}{Z_X} = \frac{\frac{1}{\omega C_N}}{\frac{1}{\omega C_X}} = \frac{C_X}{C_N} \quad (27)$$

$$C_X = C_N \cdot \frac{I_X}{I_N} \quad (28)$$



Obr. 23. Schéma srovnávací proudové metody

2.6 Můstkové metody pro měření kapacity

Můstkových metod (tzv. nulových metod) pro měření kapacity nebo indukčnosti je několik. Jejich základní princip je v podstatě stejný. Hlavním kritériem pro měření kapacity nebo indukčnosti můstkovými metodami je maximálně přesné vyvážení můstku (úplné vyvážení můstku). Obvykle se ke kontrole vyvážení používá vibrační galvanometr (velmi přesný a citlivý přístroj k měření malých a velmi malých proudů) zapojený na diagonále měřicího můstku nebo tzv. nulový indikátor NI. Vhodným nastavením impedancí v můstku se snažíme NI vynulovat. Jakmile dojde k vynulování, odečteme hodnoty známých impedancí a z těchto známých impedancí vypočteme impedanci neznámou.

Nyní si uvedeme příklady nejpoužívanějších typů můstkových zapojení pro měření kapacity. Můstkové metody se dají sestavit s pomocí jednotlivých součástek (typicky neznámý kondenzátor C_x , který měříme, vyvažovací rezistory a kondenzátory - laditelné) nebo jako hotový přístroj.

Obecně pro můstkové metody platí, že přesnost měření závisí mimo přesnosti vyvážení můstku také na vhodné volbě parametrů součástek. Kmitočet napětí, které napájí můstek nemá ve většině zapojení vliv na přesnost měření, a proto hovoříme o kmitočtově nezávislém můstku. Přesnost měření nezávisí ani na přesnosti nulového indikátoru NI, požadavkem je pouze jeho dostatečně velká citlivost. Můstky pro měření kapacity (na rozdíl od můstků pro měření odporu) musí být napájeny střídavým napětím, protože kondenzátor je frekvenčně závislá součástka.

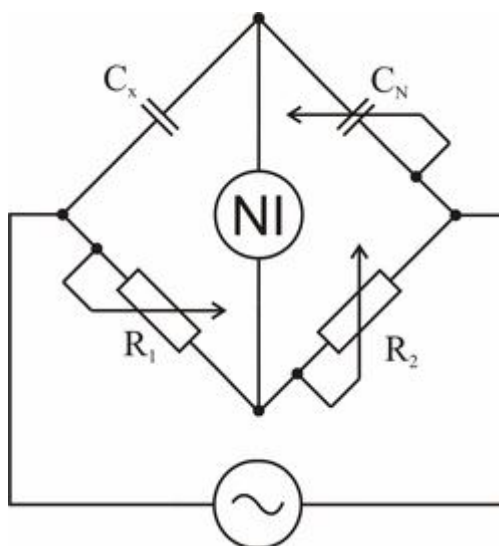
2.6.1 De Sautyho můstek

De Sautyho můstek je typ můstku, který je složen z neznámé kapacity C_x , kterou zjišťujeme, dále ze dvou potenciometrů a jednoho laditelného kondenzátoru C_N . Velkou nevýhodou tohoto můstku je skutečnost, že se nedá úplně (maximálně přesně) vyvážit. Podmínkou k úplnému vyvážení je požadavek na bezztrátovost obou kondenzátorů (C_x a C_N). Tento požadavek nelze ale v reálném prostředí splnit. Pokud se zanedbají ztrátové odpory kondenzátorů, můžeme podmínku vyvážení zapsat podle vztahu (29). Ze vztahu (29) plyne výsledný vztah (30) pro neznámou kapacitu C_x .

$$\frac{R_2}{j\omega C_x} = \frac{R_1}{j\omega C_N} \quad (29)$$

$$C_x = C_N \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (30)$$

Tuto metodu lze aplikovat na měření kondenzátorů, které mají malý ztrátový činitel $\tan \delta$, kde se spokojíme s vyvážením na minimální výchylku. Zapojení De Sautyho můstku je na obrázku (Obr. 24).



Obr. 24. De Sautyho můstek [30]

2.6.2 Wienův můstek

Wienův můstek je dalším z celé řady můstkových zapojení určených pro měření kapacity. Měřený kapacitor C_x je zapojen paralelně k rezistoru R_x (R_x je prvkem náhradního obvodu dielektrika). Platí, že napětí na rezistoru R_x je totožné s napětím na neznámé kapacitě. Můstek vyvažujeme pomocí potenciometrů R_2 , R_4 a kondenzátoru C_4 .

Výhodou tohoto zapojení je možnost měřit kapacity až do relativně velkých kapacit (cca do 100 mF). Zapojení Wienova můstku viz. obrázek (Obr. 25). Podmínka pro vyvážení můstku je definována vztahem (31).

$$Z_x Z_2 = Z_1 Z_4 \quad (31)$$

Ze schématu Wienova můstku můžeme vyjádřit základní vztahy pro vyjádření impedance Z (32), (33), (34), (35) a (36).

$$Z_1 = R_1 \quad (32)$$

$$Z_2 = R_2 \quad (33)$$

$$Z_x = R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \quad (34)$$

Ze vztahu (34) plyne vztah (35):

$$R_x - j \frac{1}{\omega C_x} \quad (35)$$

$$Z_4 = R_4 - j \frac{1}{\omega C_4} \quad (36)$$

Z dosud známých vztahů (31-36) vyjádříme vztah (37):

$$\left(R_x - j \frac{1}{\omega C_x}\right) R_2 = \left(R_4 - j \frac{1}{\omega C_4}\right) R_1 \quad (37)$$

Ze vztahu (37) plyne vztah (38):

$$R_x Z_2 - j \frac{1}{\omega C_x} R_2 = R_4 Z_1 - j \frac{1}{\omega C_4} R_1 \quad (38)$$

Dalším krokem je porovnání reálných a imaginárních částí obou stran rovnice:

1). Reálné části (dle vztahu 39):

$$R_x Z_2 = R_4 Z_1 \quad (39)$$

2). Imaginární části (dle vztahu 40):

$$\frac{1}{\omega C_x} R_2 = \frac{1}{\omega C_4} R_1 \quad (40)$$

Ze vztahů (39) a (40) vyjádříme neznámou kapacitu C_x (41) a odpor R_x (42):

$$C_x = C_4 \frac{R_2}{R_1} \quad (41)$$

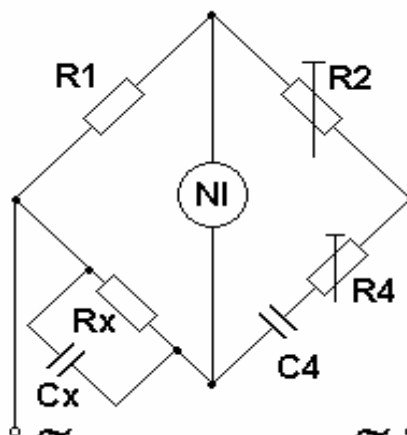
$$R_x = R_4 \frac{Z_1}{Z_2} = R_4 \frac{R_1}{R_2} \quad (42)$$

Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ vypočítáme dle vztahu (43):

$$\text{tg } \delta = \omega C_4 \frac{R_2}{R_1} \cdot R_4 \frac{R_1}{R_2} \quad (43)$$

Vykrácením vztahu (43) dostaneme konečný vztah (44) pro ztrátový činitel $\tan \delta$:

$$\tan \delta = \omega C_4 R_4 \quad (44)$$



Obr. 25. Wienův můstek [31]

2.6.3 Scheringův můstek

Scheringův můstek je dalším z celé řady můstkových zapojení. Používá se primárně pro měření menších kapacit (rozsah měřené kapacity 50-1000 pF). Po úpravě se pomocí tohoto typu můstku dají měřit i kapacity v řádech desítek mF. Přesnost měření kapacity je asi 0,1 %. Lze ho použít i pro měření ztrátového činitele $\tan \delta$, permitivity a dielektrických ztrát. Sériově ke kapacitoru C_x uvažujeme připojený rezistor R_x , který tvoří náhradní obvod dielektrika. Schéma zapojení Scheringova můstku viz. obrázek (Obr. 26).

Podmínka vyvážení je dána vztahem (45):

$$Z_X Z_4 = Z_N Z_3 \quad (45)$$

Ze zapojení dáno Obr. 26 můžeme vyjádřit vztahy (46), (47), (48), (49) pro impedance:

$$Z_X = R_X + \frac{1}{j\omega C_X} \quad (46)$$

$$Z_N = \frac{1}{j\omega C_N} \quad (47)$$

$$Z_3 = R_3 \quad (48)$$

$$Z_4 = \frac{R_4 \cdot \frac{1}{j\omega C_4}}{R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}} = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega C_4} \quad (49)$$

Z předchozích vztahů (46-49) vzhledem k rovnici vyvážení (45) platí vztah (50):

$$\left(R_X + \frac{1}{j\omega C_X} \right) \left(\frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega C_4} \right) = \frac{R_3}{j\omega C_N} \quad (50)$$

Úpravami získáme vztahy (51) a (52):

$$\left(R_X + \frac{1}{j\omega C_X} \right) j\omega C_N = R_3 \left(\frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right) \quad (51)$$

$$j\omega C_N R_X + \frac{C_N}{C_X} = \frac{R_3}{R_4} + j\omega R_3 C_4 \quad (52)$$

Porovnáme reálné a imaginární složky obou stran rovnice podle vztahu (52):

1). Reálné části:

$$\frac{C_N}{C_X} = \frac{R_3}{R_4} \quad (53)$$

Ze vztahu (53) vyjádříme neznámou kapacitu podle vztahu (54):

$$C_X = C_N \frac{R_4}{R_3} \quad (54)$$

2). Imaginární části:

$$\omega C_N R_X = \omega R_3 C_4 \quad (55)$$

Ze vztahu (55) vyjádříme konečný vztah (56) pro neznámý rezistor R_X :

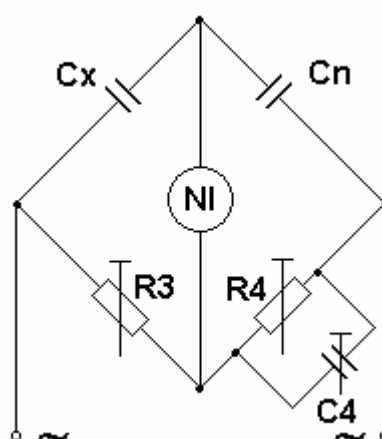
$$R_X = \frac{R_3 C_4}{C_N} \quad (56)$$

Ztrátový činitel $\tan \delta$ vyjádříme podle vztahu (57):

$$\tan \delta = \omega C_N \frac{R_4}{R_3} \frac{C_4}{C_N} \quad (57)$$

Úpravou (vykrácením) vztahu (57) získáme konečný vztah (58) pro ztrátový činitel:

$$\tan \delta = \omega C_4 R_4 \quad (58)$$



Obr. 26. Scheringův můstek [32]

2.6.4 Ostatní vybrané můstkové metody pro měření kapacity

- 1). Carey – Fosterův můstek – můstek pro měření kapacit nebo vzájemných indukčností
- 2). Campbellův můstek – můstek pro měření kapacit nebo indukčností
- 3). Maxwellův můstek - můstek pro měření kapacit nebo indukčností
- 4). Giebeho – Zicknerův můstek – můstek pro měření kapacit

2.7 Metoda měření velmi malých změn impedancí s využitím oscilátoru

Druhou metodou pro měření velmi malých impedancí (velmi malých změn impedancí) je metoda založená na rozladování oscilátoru (rezonátoru) pomocí kapacity nebo indukčnosti. Oscilátor je elektrický obvod, který je zdrojem střídavých el. kmitů. Oscilátorů je velká řada (LC, RLC, krystalové...). Základní princip spočívá ve využití Thompsonova vzorce pro rezonanční frekvenci LC článku, která je dána vztahem (59).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} [Hz] \quad (59)$$

Podle vztahu (59) jsme potenciálně schopni velmi účinně měřit velmi malé změny kapacity nebo indukčnosti. Metodu budeme pokládat za čistě experimentální z důvodu, že na fakultě ještě tato metoda nebyla aplikována do praxe a odzkoušena. Proto odzkoušení funkčnosti a zjištění její efektivnosti a přesnosti je jedním z bodů praktické části této diplomové práce. Podrobně bude metoda rozebrána v praktické části při její aplikaci.

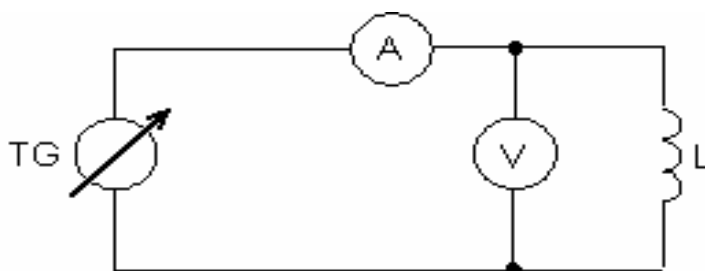
2.8 Klasické metody měření indukčnosti

Mezi klasické metody měření indukčnosti patří stejně jako u měření kapacity Ohmova metoda. Obdobně jako u měření kapacit máme k dispozici dvě zapojení, z nichž jedno je pro měření malých indukčností a druhé pro měření velkých indukčností.

2.8.1 Ohmova metoda

Princip Ohmovy metody pro měření indukčností je stejný jako pro měření kapacity, tj. voltmetrem měříme napětí U , ampérmetrem měříme proud I . Ze znalostí těchto dvou veličin jsme schopni vypočítat výslednou impedanci Z .

Ohmova metoda pro měření malých indukčností je analogií Ohmovy metody pro měření velkých kapacit (metoda AVAL). Schéma této metody viz. obrázek (Obr. 27).



Obr. 27. Schéma metody pro měření malých indukčností

Pro napětí na cívce podle Ohmova zákona platí vztah (60):

$$U_L = X_L \cdot I \quad (60)$$

Ze znalosti reaktance cívky danou vztahem (61):

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (61)$$

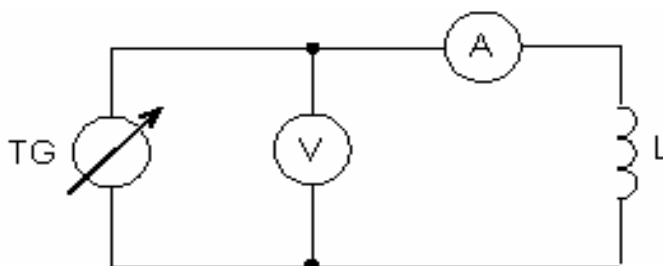
Vyplývá rovnice pro napětí na cívce dána vztahem (62):

$$U_L = 2\pi fL \cdot I \quad (62)$$

Podle vztahů (61) a (62) jsme schopni vypočítat velikost indukčnosti L podle vztahu (63):

$$L = \frac{U_L}{2\pi fI} \quad (63)$$

Ohmova metoda pro měření velkých indukčností je analogií Ohmovy metody pro měření malých kapacit (metoda AMONT). Schéma této metody viz. obrázek (Obr. 28). Pro tuto metodu platí stejné vztahy jako pro metodu měření malých indukčností.



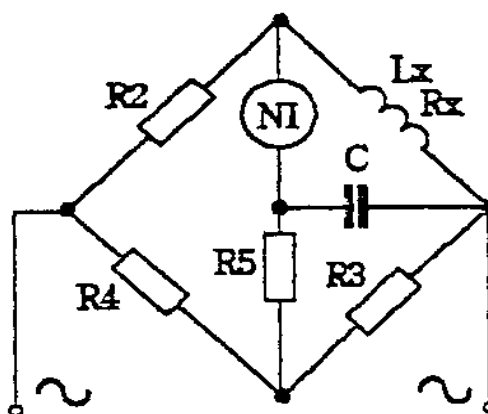
Obr. 28. Schéma metody pro měření velkých indukčností

2.9 Můstkové metody pro měření indukčností

Můstkových metod pro měření indukčností existuje několik typů. Uvedeme si pouze dvě metody, které se používají nejčastěji. Ostatní metody uvedeme pouze informativně.

2.9.1 Andersonův můstek

První z můstkových metod pro měření indukčností (velmi malých indukčností) je Andersonův můstek. Schéma zapojení viz. obrázek (Obr. 29).



Obr. 29. Andersonův můstek [33]

Vyvážení můstku se provádí pomocí rezistorů R_4 a R_5 . Můstek se řeší transfigurací prvků R_4, R_5 a C z trojúhelníka na hvězdu.

Jak je z Obr. 29. zřejmé, tak pro R_x (odpor vinutí cívky) bude platit vztah (64):

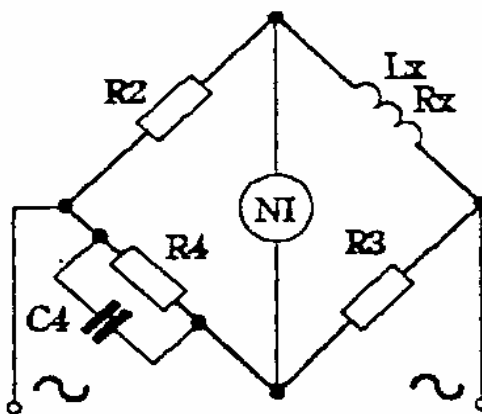
$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4} \quad (64)$$

Pro L_x (vlastní indukčnost) bude platit vztah (65):

$$L_x = CR_2(R_3 + R_4 \frac{R + R_2}{R_2}) \quad (65)$$

2.9.2 Maxwell – Wienův můstek

Dalším z řady můstkových zapojení pro měření indukčností je Maxwell – Wienův můstek. Schéma zapojení můstku viz. obrázek (Obr. 30).



Obr. 30. Maxwell – Wienův můstek [34]

Podmínka vyvážení je dána vztahem (66):

$$R_x + j\omega L_x = R_2 R_3 \left(\frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right) \quad (66)$$

Porovnáme reálné a imaginární části obou stran rovnice.

1). Reálné části (vztah 67):

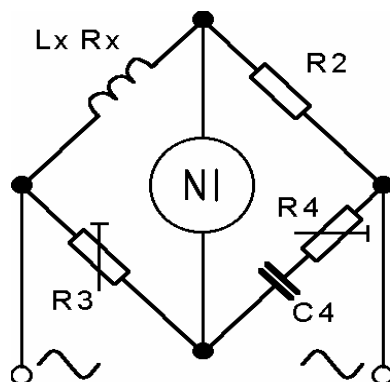
$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4} \quad (67)$$

2). Imaginární části (vztah 68):

$$L_x = R_2 R_3 C_4 \quad (68)$$

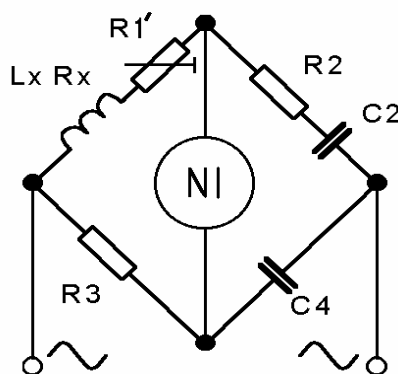
2.9.3 Ostatní vybrané můstkové metody pro měření indukčnosti

1). Hayův můstek – můstek vhodný spíše pro měření velkých indukčností, můstek kmitočtově závislý (nutno napájet čistě sinusovým napětím). Schéma viz obrázek (Obr. 31).



Obr. 31. Hayův můstek [35]

2). Owenův můstek – můstek určený pro měření všech typů indukčností (s výhodou pro měření vyšších indukčností). Schéma zapojení můstku viz. obrázek (Obr. 32).



Obr. 32. Owenův můstek [36]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE A PŘÍSLUŠENSTVÍ

Jednou ze dvou částí této diplomové práce je praktická část, která mimo jiné zahrnuje práci s měřicími přístroji, jejich nastavováním a aplikací na konkrétní měřicí metody. Mezi měřicí přístroje, které budeme v praktické části používat patří zejména LCR metry (HP 4284A nebo Agilent 4263B), čítač (Agilent 53131A), servomotory pro ovládání posuvu měřicího hrotu (C-862 Mercury II).

3.1 Měřicí přístroje pro můstkovou metodu

První metodou, kterou v této práci použijeme k měření velmi malých změn kapacit a indukčností je můstková metoda. Měřicí můstek, který k měření potřebujeme je realizován jako měřič impedancí LCR meter. Popíšeme si dva dostupné typy měřicích můstků. První z nich je od firmy Hewlett Packard a nese označení HP 4284A. Druhý je od firmy Agilent Technologies a je vyráběn pod označením Agilent 4263B.

3.1.1 LCR meter HP 4284A

Měřicí přístroj HP 4284A od firmy Hewlett Packard je přístroj, který slouží k měření impedancí elektrotechnických prvků a materiálů (odporů R , indukčností L a kapacit C), a tak ho budeme nazývat jako LCR meter. Nyní si popíšeme jeho základní vlastnosti.

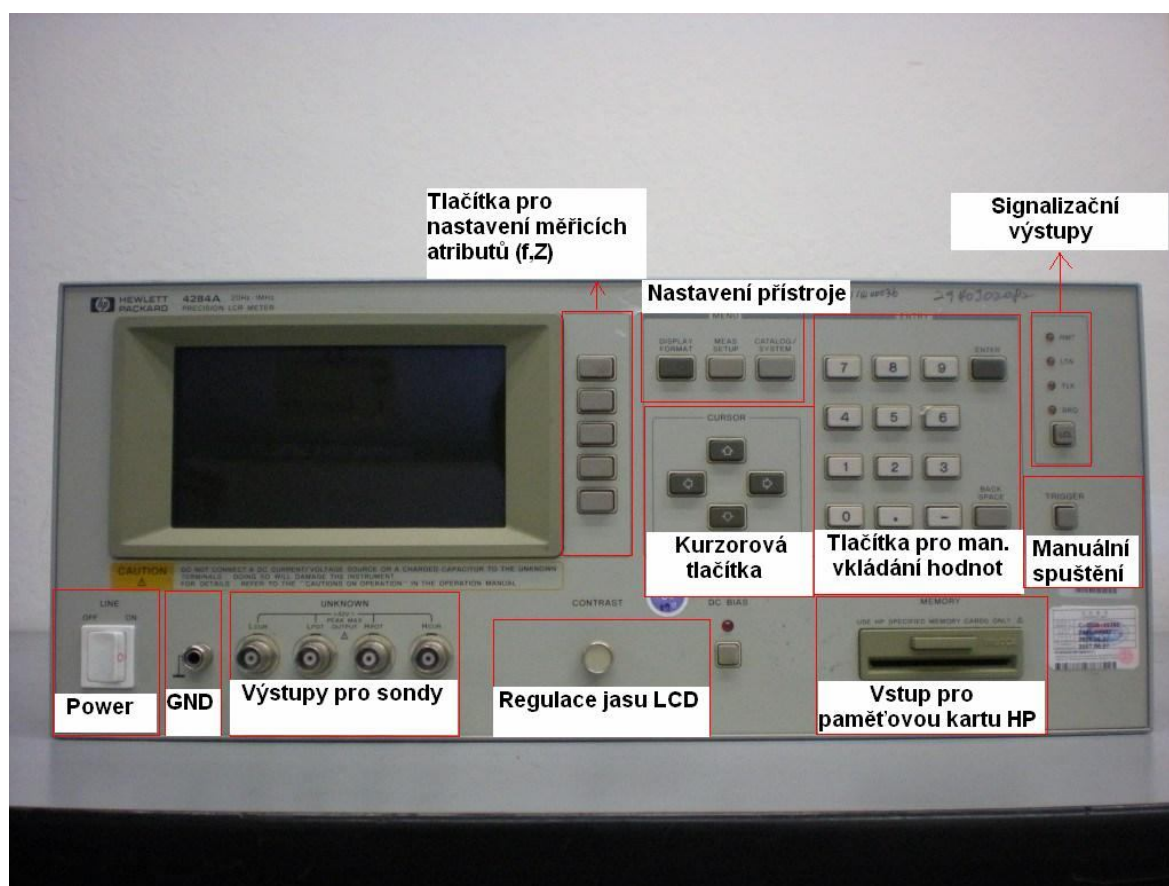
Přístroj dokáže velmi přesně měřit veličiny (odpor R - resistance, indukčnost L - inductance, kapacita C - capacitance), které se v souvislosti s tímto přístrojem nazývají jako veličiny primární (primary). Každou z primárních veličin lze měřit spolu s jednou z veličin (disipační faktor D [-], činitel jakosti Q [-], vodivost G [S]), které nazýváme jako veličiny sekundární (secondary).

Přístroj je schopen měřit ve frekvenčním pásmu 20Hz – 1MHz, což pohodlně postačuje pro vysoce přesné měření. Klidový proud (proud naprázdno) dosahuje hodnot 0- \pm 100 mA. Přesnost přístroje při měření primárních veličin (R, L, C) dosahuje hodnoty 0,05% (pro měření impedancí Z), pro měření sekundárních veličin (disipační faktor D , činitel jakosti Q , vodivost G) dosahuje přesnosti 0,0005 %. Impedanční rozsah se pohybuje v rozmezí 0,01 m Ω – 99,9 M Ω . Základní parametry spolu s ostatními parametry jsou přehledně uvedeny v tabulce (Tab. 1). Přední strana přístroje viz. obrázek (Obr. 33).

Parametr	Hodnota parametru
Frekvenční rozsah přístroje	20Hz – 1MHz
Pracovní frekvence (síťová)	47 – 66 Hz
Pracovní napětí (síťové)	100,120,220 V _{ac} +/-10 %, 240V _{ac} + 5-10 %
Provozní teplota	0 – 55 °C
Energetická spotřeba	200 VA max.
Hmotnost přístroje	15 kg (33 lb)
Displej přístroje	LCD (s regulací jasu)
Počet digitů displeje	6 digitů
Klidový proud přístroje	0 - +/- 100mA
Přesnost přístroje pro měření prim. veličin	0,05 %
Přesnost přístroje pro měření sek. veličin	0,0005 %
Impedanční rozsah	0,01 mΩ – 99,9 MΩ (platné i pro R a X)
Admitanční rozsah	0,01 nS – 99,9999 S (platné i pro G a B)
Kapacitní měřicí rozsah	0,01 fF – 9,99999 F
Indukční měřicí rozsah	0,01 nH – 99,9999 kH
Měřicí rozsah disipačního faktoru D	0,000001 – 9,99999
Měřicí rozsah činitele jakosti Q	0,01 – 99999,9
Měřicí rozsah fázového posuvu θ	- 180.000 ° - +180.000 °
Měřené primární veličiny	R _p ,R _s [Ω], L _p ,L _s [H], C _p ,C _s [F]
Měřené sekundární veličiny	G [S], D [-], Q [-], X [Ω], B [S], θ [°]
Dostupné matematické funkce	Směrodatná odchylka
Měřicí okruhy	Sériový, paralelní
Řízení rozsahu	Automatické, manuální

Parametr	Hodnota parametru
Propojení přístroje s PC	GPIB kabel (IEEE 488.1, IEEE 488.2)
Režim korekce	Open, Short, Load
Spouštění měřicího procesu (trigger)	Interní, externí, manuální

Tab. 1. Parametry přístroje HP 4284A



Obr. 33. LCR meter HP 4284A – přední strana

3.1.2 LCR meter Agilent 4263B

Druhým přístrojem, který může být použit k ověření můstkových metod je LCR meter od firmy Agilent s označením 4263B. Lze ho stejně jako předchozí typ HP 4284A použít pro měření impedancí elektrotechnických prvků a materiálů. Primárním účelem tohoto přístroje je, jak už z označení vyplývá, měření indukčností L, kapacit C a odporů R. Nyní si popíšeme jeho základní vlastnosti.

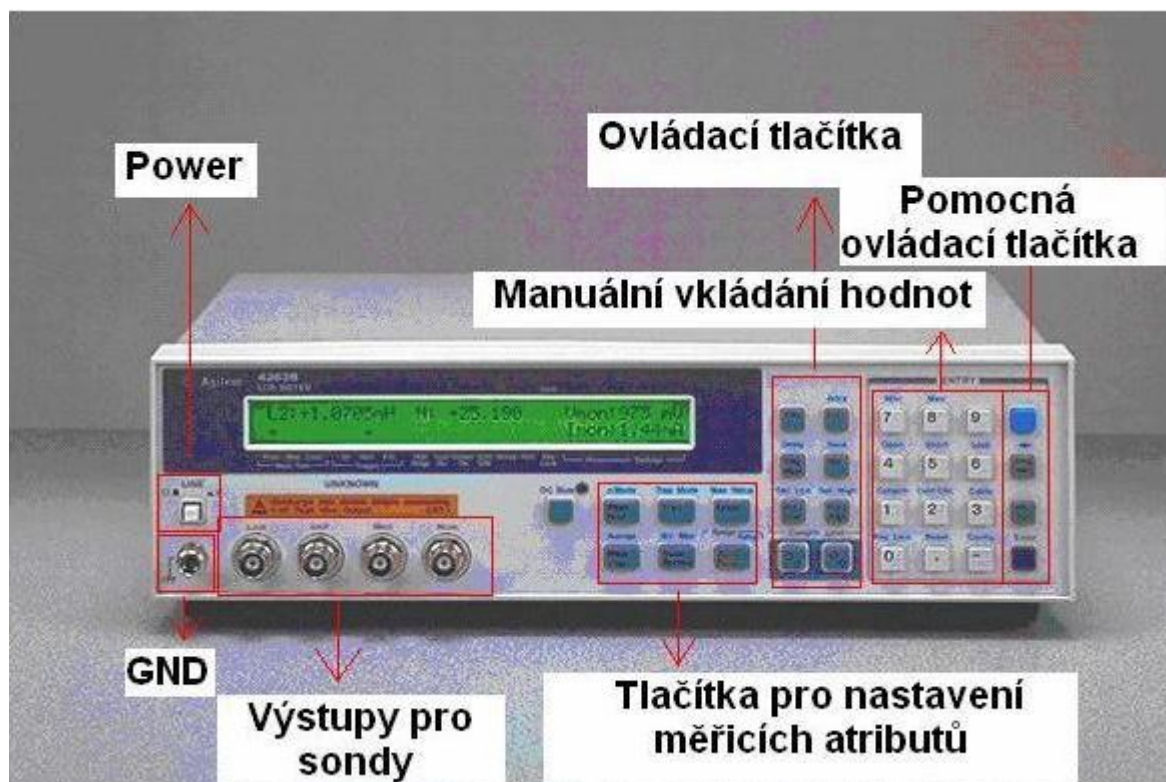
Přístroj dokáže měřit impedance (odpor R – resistance, indukčnost L – inductance, kapacita C – capacitance) a to ve frekvenčním pásmu 100 Hz – 100 kHz. Základních frekvencí je celkem 5 (100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz). Frekvenci lze nastavit z pohledu uživatele pomocí příslušných tlačítek na přední straně přístroje. Měřicí okruhy jsou stejně jako u HP 4284A dva (sériový a paralelní). Veličiny R , L , C můžeme označit jako primární (primary).

Přístroj dokáže měřit absolutní hodnotu impedance Z a admitance Y . Každou z těchto veličin lze měřit spolu s nějakou z veličin sekundárních (secondary). Mezi sekundární veličiny zde patří reaktance X [Ω], susceptance B [S], vodivost G [S], činitel jakosti Q [-], fázový posuv θ [$^\circ$], disipační faktor D [-]. Celkový počet veličin, které jsme schopni změřit je tedy 11 (Z , Y , R , X , G , B , Q , D , θ , L , C). Přesnost přístroje je 0,1%. Typický měřicí čas je v nejlepším případě 25 ms (Short), v případě režimu Medium 65 ms a v případě režimu Long 500 ms. Na přístroji lze také nastavit s jak dlouhým měřicím kabelem budeme měřit. Na výběr jsou celkem 4 možnosti (0, 1, 2, 4 m). Podrobný výčet vlastností přístroje viz. tabulka (Tab. 2).

Parametr	Hodnota parametru
Frekvenční rozsah přístroje	100 Hz – 100 kHz
Pracovní frekvence (síťová)	47 – 66 Hz
Pracovní napětí (síťové)	90-132 V _{ac} (110 V), 192-264 V _{ac} (230 V)
Provozní teplota	0 – 45 °C
Doba záběhu	≥ 15 min.
Energetická spotřeba	45 VA (typicky)
Hmotnost přístroje	4,5 kg (typicky)
Displej přístroje	Maticový displej
Počet digitů displeje	5 digitů
Přesnost přístroje	0,1 %
Impedanční rozsah	1 m Ω – 100 M Ω (platné i pro R a X)

Parametr	Hodnota parametru
Admitanční rozsah	10 nS – 1000 S (platné i pro G a B)
Kapacitní měřicí rozsah	1 pF – 1 F
Indukční měřicí rozsah	10 nH – 100 kH
Měřicí rozsah disipačního faktoru D	0,0001 – 9,9999
Měřicí rozsah činitele jakosti Q	0,1 – 9999,9
Měřicí rozsah fázového posuvu θ	- 180 ° - +180 °
Měřené primární veličiny	R_p, R_s [Ω], L_p, L_s [H], C_p, C_s [F]
Měřené sekundární veličiny	G [S], D [-], Q [-], X [Ω], B [S], θ [°]
Měřicí okruhy	Sériový, paralelní
Řízení rozsahu	Automatické, manuální
Propojení přístroje s PC	GPIB kabel (IEEE 488.1, IEEE 488.2)
Spouštění měřicího procesu (trigger)	Interní, externí, manuální
Časové zpoždění triggeru	0 – 9999 ms v krocích 1 ms
Délka měřicího kabelu	0, 1, 2, 4 m
Režim korekce	Open, Short, Load
Měřicí čas	25 ms, 65 ms, 500 ms

Tab. 2. Parametry přístroje Agilent 4263B



Obr. 34. LCR meter Agilent 4263B – přední strana

3.2 Propojení měřicích přístrojů s PC

Při práci s měřicími přístroji je nutno zajistit komunikaci mezi měřicími přístroji a PC z hlediska potřeby automatického sběru dat k následnému zpracování a vyhodnocení. Abychom toto efektivně zajistili, musíme měřicí přístroj propojit s PC pomocí speciálního rozhraní (kabelu). V našem případě se jedná o rozhraní označované jako GPIB.

3.2.1 GPIB rozhraní

Rozhraní GPIB (z angl. **G**eneral **P**urpose **I**nterface **B**us) je rozhraní pro měřicí přístroje a zkušební techniku, které umožňuje efektivní přenos dat mezi dvěma nebo více přístroji (několik měřicích přístrojů mezi sebou, přístroj s PC). Sběrnice byla vyvinuta firmou Hewlett - Packard jako firemní sběrnice HP-IB. Standardizace této sběrnice proběhla v roce 1972 organizací IEEE a sběrnice nesla označení IEEE488. Standard se rozšířil v roce 1987 pod označením IEEE 488.2, s tím, že původní standard je označován jako IEEE 488.1. V bývalém Československu byl standard přijat v roce 1984 pod označením IMS-2 (IMS= **I**nternational **M**easurement **S**ystem) dle normy ČSN356522. Standard IMS-2

odpovídá dřívějšímu standardu používaného v Evropě pod označením IEC625. Standard IEC625 se od standardu IEEE 488 liší především provedením a zapojením propojovacích konektorů.

V současnosti je standard GPIB nejrozšířenějším a jedním z nejpoužívanějších rozhraní pro propojení měřicí techniky s automatizovaným měřicím systémem (např. PC) na světě. Pomocí GPIB sběrnice jsme schopni propojit měřicí přístroj(e) s automatizovaným měřicím systémem. Měřicí přístroje propojené s automatizovaným měřicím systémem sběrnici GPIB jsou schopny jak autonomního provozu (režim local), tak i provozu, který v systému řídí počítač (režim remote).

Mezi jeho hlavní výhody patří zejména vysoká spolehlivost, snadné použití, dobrá programová podpora na PC a relativně vysoká životnost.

Mezi nevýhody by se dala zařadit menší reálná přenosová rychlost z důvodu paralelního přenosu dat, která ale pro účely přenosu dat mezi přístrojem (přístroji) a počítačem plně postačuje. GPIB kabel viz. obrázek (Obr. 35). Detail koncovky GPIB kabelu viz. obrázek (Obr. 36).



Obr. 35. GPIB kabel [37]



Obr. 36. Detail koncovky GPIB kabelu [38]

3.2.2 Technická specifikace GPIB rozhraní

V tabulce (Tab. 3) jsou přehledně uvedeny nejdůležitější parametry GPIB rozhraní a jejich hodnoty.

Parametr	Hodnota parametru
Standard	IEEE 488.1, IEEE 488.2
Typ sběrnice	Paralelní
Přenos dat	Asynchronní, digitální (po bytech)
Řízení přenosu dat	Hardwarové (HW kartou)
Max. počet propojených přístrojů	16
Max. délka kabelu	20 m
Max. vzdálenost mezi dvěma jednotkami	2 m
Uspořádání pinů sběrnice	Liniové (v řadách)
Počet pinů sběrnice	24 (IEEE488), 25 (IEC625)
Aktivních žil (pinů)	16
Počet datových vodičů	8 (DIO1 – DIO8)
Počet vodičů pro řízení přenosu	3 (DAV, NRFD, NDAC)

Parametr	Hodnota parametru
Počet vodičů pro řízení rozhraní	5 (ATN, IFC, REN, SRQ, EOI)
Počet zemních vodičů (GND)	8
Konstrukce konektorů	Male – Female (samec – samice)
Možnost propojování i za provozu (P&P)	Ano
Max. teoretická přenosová rychlost	1 MB/s
Reálná přenosová rychlost	250 – 500 kB/s
Ochrana kabelu z hlediska EMC	Dvojitě stíněný
Ochrana kabelu před poškozením	PVC ochrana
Kódování dat	ASCII (ISO 7)
Typ logiky	Negativní TTL logika
Logická 0	$U_{\log 0} = +5V$ (2,1 – 4,8 V)
Logická 1	$U_{\log 1} = 0 V$ vůči GND (0-0,8 V)

Tab. 3. Přehled parametrů GPIB rozhraní

Datové vodiče označené jako DIO1 – DIO8 přenášejí data mezi přístroji po jednotlivých bajtech (jedná se o paralelní přenos dat). Bajty přenesené mezi přístroji mohou být dvojího charakteru – informačního a adresního. Data informačního charakteru mohou být např. samotná naměřená data nebo data přístrojových zpráv. Rozhodnutí o tom, zda se jedná o data informačního nebo adresního charakteru provádí signál ATN (Attention). Je-li signál $ATN = \log_0$, potom mají signály na vodičích charakter informačních dat. Pokud je $ATN = \log_1$, jedná se o adresy (data adresního charakteru).

Směr, kterým se mají data mezi přístroji přenášet je dán naadresováním jednotek. Každá funkční jednotka má dvě adresy – přijímací a vysílací. Jednotka přijímá (posluchač) nebo vysílá (mluvčí) podle toho, kterou adresou je funkční jednotka naadresována. Platí, že jako posluchač může pracovat několik funkčních jednotek (i více než jedna), ale jako mluvčí (vysílací režim) může pracovat vždy jen jedna funkční jednotka. Řídícím členem je obvykle počítač (např. PC, IPC).

Řízení přenosu dat (bajtů) po DIO vodičích je realizován pomocí tří signálů- DAV, NRFD a NDAC. Nyní si popíšeme funkci těchto tří signálů.

DAV (Data Valid) – jedná se o signál, který určuje platnost dat na výstupu funkční jednotky. Musí platit, že během přenosu signálu DAV po sběrnici se signály na DIO nesmí měnit (z důvodu synchronizace).

NRFD (Not Ready for Data) – je signál, který posílá přijímající funkční jednotka (posluchač) vysílající funkční jednotce (mluvčímu), že není připravena přijmout data (další bajt).

NDAC (Not Data Accepted) – je signál, kterým přijímající funkční jednotka vysílá informaci vysílající funkční jednotce o tom, že nebyl přijat vyslaný bajt.

Řízení samotného rozhraní a procesů na sběrnici je řízeno pomocí pěti signálů. Jedná se o signály ATN, IFC, REN, SRQ, EOI. Vlastnosti jednotlivých signálů si nyní popíšeme.

ATN (Attention) – signál ATN (Attention) určuje význam přenášených bajtů (rozlišuje, zda se jedná o informační nebo adresová data).

REN (Remote Enable) – signál sloužící k přepojení spojení z místního (local) na dálkové (remote). Signál může vysílat pouze řídící (centrální jednotka).

SRQ (Service Request) – signál přerušení. Může ho vysílat jakákoliv funkční jednotka (vysílací i přijímací). Pokud tento signál přijme řídící jednotka, tak postupně (sériově) od všech funkčních jednotek zjišťuje, jestli žádaly o přerušení.

EOI (End or Identity) – signál EOI má význam ukončovače přenosu. Vysílací funkční jednotka ho vysílá před vysláním posledního bajtu spolu s daty, a tím sděluje přijímací funkční jednotce, že se jedná o poslední bajt datového přenosu.

3.3 Ovládání posuvu snímané plochy vůči měřicímu hrotu

Obě metody, které budeme v této práci aplikovat na měření velmi malých změn kapacit a indukčností, budou ve své podstatě pracovat na obdobném mechanickém principu. Je nutné si uvědomit, že samotný měřicí hrot je upevněn na statickém ramenu, které je uchyceno na podložce, a tak se pohybuje pouze snímaná plocha vůči měřicímu hrotu. Pomocí programu sestaveného v prostředí Agilent VEE Pro 9.2 budeme mimo jiné ovládat

posuv snímané plochy pomocí servomotorů. Posuv snímané plochy vůči měřicímu hrotu můžeme ovládat ve všech třech osách (X, Y, Z) – servomotory jsou tedy tři.

3.3.1 Servomotor C-862 Mercury II DC-Motor Controller/Driver

Servomotor C-862 Mercury II je jedním z celé řady servomotorů, které umožňují uživateli velmi přesně ovládat posuv. Je optimálním řešením pro vysoce přesné řízení polohy měřicího média (v našem případě snímané plochy vůči měřicímu hrotu), které může být ovládáno pomocí PC nebo PLC.

V našem případě bude servomotor ovládán sadou makroinstrukcí programovaných prostřednictvím PC v prostředí VEE Pro 9.2, které budou ovládat především samotný posuv snímané plochy vůči měřicímu hrotu, rychlost posuvu snímané plochy, směr posuvu, krok posuvu apod. Na obrázku (Obr. 37) vidíme servomotor C-862 Mercury II v celkovém pohledu s porovnáním jeho velikosti vzhledem k mincím.



Obr. 37. C-862 Mercury II - celkový pohled

Servomotor C-862 Mercury II je kombinací výkonného řešení velmi přesného řízení pohybu a jednoduché a skladné konstrukce. Jedním z nejdůležitějších prvků vnitřní konstrukce je specializovaný procesor, který slouží k vysoce přesnému a výkonnému řízení pohybu. Vnitřní konstrukce obsahuje kromě procesoru integrovaný driver (řadič) a integrovaný výkonový zesilovač (odpadá nutnost externího výkonového stupně). Pro ukládání makroinstrukcí slouží non-volatile paměť typu EEPROM. Základní jednotku tedy

tvoří procesor, paměť EEPROM a integrovaný driver. Vstupy a výstupy jsou plně kompatibilní s logikou TTL. Servomotor je vybaven kontrolou motorové brzdy (motor-brake control). Komunikace s PC nebo PLC je zajištěna pomocí sériové sběrnice RS-232, která rovněž zajišťuje možnost propojení více servomotorů.

Pro zvýšení bezpečnosti a výkonu celého systému obsahuje C-862 Mercury II ještě jeden nezávislý procesor, který slouží k řízení komunikace a k syntaktické analýze makroinstrukcí. Architektura je tedy dvouprocesorová (dual-processor). Souhrn všech důležitých vlastností viz. tabulka (Tab. 4).

Parametr	Hodnota parametru
Model	C-862
Provozní napětí	12-15 V
Provozní proud	1-2 A
Výstupní výkon	15 W
Hmotnost	0,3 kg
Signálová logika	TTL
Základní registry	Registry pro ukládání pozice a rychlosti
Koncové stupně	2 TTL (pull-up, pull-down)
Programovatelnost koncových stupňů	Ano
Výstup motorové brzdy	5 V TTL, softwarově říditelný
Detekce zablokování	Motor stop, Servo off
Komunikace s PC (PLC)	RS-232 (9-pin male)
Konektor motoru	15-pin D-Sub
Instrukční sada	40 makroinstrukcí
Formát instrukční sady	ASCII
Architektura	Dual-Processor
Procesor(y)	2 procesory

Parametr	Hodnota parametru
Paměť	EEPROM
Vnitřní bezpečnostní prvky	Watchdog timer

Tab. 4. Přehled parametrů servomotoru C-862 Mercury II

3.3.2 Přední panel C-862 Mercury II DC-Motor Controller/Driver

Přední panel servomotoru viz. obrázek (Obr. 38). Panel obsahuje vstup a výstup pro sériovou linku RS-232, dvě kontrolky (STA, ERR). Kontrolka STA může svítit dvěma barvami (červená – chyba serva, zelená – servo OK). Stejně tak i kontrolka ERR může svítit červeně nebo zeleně (zelená – příkaz OK, červená – chyba příkazu). V tabulce (Tab. 5) je uveden popis jednotlivých prvků panelu.



Obr. 38. C-862 Mercury II – přední panel

Prvek	Typ konektoru/kontrolky	Popis prvku
RS-232 (in)	D-Sub DE-9 M (samec)	Vstup sériových dat
RS-232 (out)	D-Sub DE-9 F (samice)	Výstup sériových dat
STA	LED dioda (red/green)	Status serva
ERR	LED dioda (red/green)	Status příkazu
ADDRESS	DIP	Manuální nastavení adres

Tab. 5. Seznam prvků předního panelu C-862 Mercury II

3.3.3 Zadní panel C-862 Mercury II DC-Motor Controller/Driver

Zadní panel servomotoru viz. obrázek (Obr. 39). Na zadním panelu se nachází zdířka napájení, konektor pro digitální vstup/výstup a konektor motoru. Přehled viz. tabulka (Tab. 6).



Obr. 39. C-862 Mercury II – zadní panel

Prvek	Typ konektoru	Popis prvku
12 to 15 VDC	Barrel conector	Napájení ss napětím
DIGITAL I/O	6- ti pinový	Digitální vstup/výstup
MOTOR	D-Sub 15 (F)	Zapojení motoru

Tab. 6. Seznam prvků zadního panelu C-862 Mercury II

3.4 Měřicí přístroje pro měřicí metodu s použitím oscilátoru

Mezi přístroje, které budeme potřebovat pro měření velmi malých změn kapacit a indukčností pomocí oscilátoru patří především čítač 53131A 225 MHz Universal Frequency Counter/Timer od firmy Agilent. Stejně jako u můstkové metody využijeme servomotorů C-862 Mercury II.

Posledním příslušenstvím, které lze využít je sušárna UNP 200 od firmy Memmert, která může sloužit k zahřátí oscilátoru na zadanou teplotu z důvodu měření teplotní závislosti oscilátoru.

3.4.1 Čítač 53131A 225 MHz Universal Frequency Counter/Timer

Čítač jako číslicový obvod definujeme podle zdroje [13]: „Kombinaci klopných obvodů schopnou čítat počet vstupních impulsů a vyjádřit jejich počet pomocí buď binárního nebo jiného kódu, nazýváme čítače“¹³.

Čítač je vybaven dvěma kanály s šířkou pásma 225 MHz. Obsahuje též třetí volitelný kanál s maximální šířkou pásma 12,4 GHz (volitelné 3, 5 nebo 12,4 GHz max.). Důležité parametry čítače viz. tabulka (Tab. 7).

Mezi hlavní měřicí funkce čítače patří měření frekvence, periody, šířky pulsu, doby náběhu/poklesu, fázového úhlu, totálního a špičkového napětí. Čítač umožňuje vyhodnocovat i statistické veličiny jako je minimální/maximální hodnota, průměr a směrodatná odchylka. Čítač je zobrazen na obrázku (Obr. 40).



Obr. 40. Čítač Agilent 53131A [39]

Parametr	Hodnota parametru
Počet kanálů	2 x 225 MHz, 1 volitelný (max. 12,4 GHz)
Počet digitů displeje	10
Rychlost přenosu dat	200 měření/sekundu max.
Interval pro rozlišení hodnot	500 ps (pikosekund)

¹³ Čítače [online]. [cit. 2011-04-04]. Dostupný z WWW:

<http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektronika/kap6/6_7.html>.

Parametr	Hodnota parametru
Provozní teplota	0 – 55 °C
Skladovací teplota	- 40 °C – +71 °C
Propojení s PC	GPIO rozhraní (IEEE 488.1, 488.2)
Pracovní napětí (síťové)	100–120 V +/- 10%, 220 – 240 V +/- 10%
Pracovní frekvence (síťová)	50/60 Hz +/- 10%
Spotřeba	170 VA max (typicky 30 W)
Rozměry (výška x šířka x délka)	88,5 mm x 212,6 mm x 348,3 mm

Tab. 7. Parametry čítače Agilent 53131A

3.4.2 Sušárna Universal oven Model UNP 200

Sušárnu Universal oven Model UNP 200 můžeme použít ve druhé metodě měření k zahřátí oscilátoru na určitou teplotu z důvodu zjištění teplotní závislosti oscilátoru. Cílem by mělo být zjištění stability oscilátoru. Sušárna je vyráběna firmou Memmert, která disponuje pobočkami po celém světě (Evropa, Asie, Amerika). Základní parametry sušárny viz. tabulka (Tab. 8).

Sušárnu v celkovém pohledu vidíme na obrázku (Obr. 41), rozměry sušárny můžeme vidět na obrázku (Obr. 42).

Parametr	Hodnota parametru
Teplotní rozsah ohřevu	30 – 250 °C
Pracovní napětí (síťové)	230 V +/- 10%
Pracovní frekvence (síťová)	50 Hz/60 Hz
Objem	32 l
Příkon	1,1 kW max.
Displej	LED
Teplotní senzory	2 x Pt100 (4-wire)

Parametr	Hodnota parametru
Regulátor teploty	Adaptivní PID regulátor
Nastavitelné parametry (výběr)	Teplota, doba ohřevu, status programu
Hmotnost	28 kg
Vnější rozměry (výška x šířka x hloubka)	600 mm x 550 mm x 400 mm
Vnitřní rozměry (výška x šířka x hloubka)	320 mm x 400 mm x 250 mm

Tab. 8. Parametry sušárny Universal oven Model UNP 200



Obr. 41. Sušárna Universal oven Model UNP 200 [40]



Obr. 42. Rozměry sušárny [41]

4 PROGRAMOVÉ PROSTŘEDÍ

Jedním ze zadaných bodů práce je vytvoření programu ve vhodném programovém prostředí, které nám bude sloužit k automatickému sběru dat z měřicích přístrojů, jejich statistickému vyhodnocení a vizualizaci. Použijeme programové prostředí VEE Pro 9.2 od firmy Agilent Technologies, které bylo zvoleno zejména kvůli jednoduchému a intuitivnímu návrhu programu a vysoké kompatibilitě s širokou škálou měřicích přístrojů.

4.1 Programové prostředí Agilent VEE Pro 9.2

Agilent VEE Pro 9.2 je programové prostředí, u kterého je programování založeno na sestavování programu pomocí funkčních bloků mající určitý význam (funkci), jejich vzájemného propojení a nastavení parametrů jednotlivých bloků. Nejedná se tedy o klasické programové prostředí (jako je Java, C, Python apod.), kde je programování založeno z drtivé většiny na psaní zdrojového kódu pomocí příslušných příkazů s využitím funkcí, podprogramů apod.

Prostředí VEE Pro 9.2 se dá použít jak ke tvorbě programů za účelem komunikace a sběru dat z měřicích přístrojů, tak ke tvorbě programů např. pro modelování systémů, statistické vyhodnocování dat, jejich vizualizaci apod. Logo programu VEE Pro 9.2 je na obrázku (Obr. 43).

Základní definici tohoto prostředí můžeme čerpat překladem ze zdroje [14]: „Agilent Visual Engineering Environment (VEE) je vizuální, většinou intuitivní programovací jazyk. Dramaticky snižuje monitorování a řízení vývoje softwarového času. Programy jsou vyvíjeny off-line prostřednictvím virtuálních strojů. Virtuální přístroje existují v rámci programu VEE. Skutečné přístroje mohou být připojeny přes speciální plug-in karty. Často je nutná samostatná karta pro každý přístroj“¹⁴.

Cílovou skupinou použití tohoto prostředí jsou zejména měřicí přístroje od firmy Agilent Technologies (multimetry, osciloskopy, LCR metry apod.). VEE Pro 9.2 je ovšem vysoce kompatibilní i s přístroji od jiných výrobců. Typickým příkladem je LCR meter HP

¹⁴ Agilent Technologies. VEE Pro: Practical Graphical Programming, 2008. Preface. VII.

4284A od firmy Hewlett-Packard, který používáme i v této práci nebo servomotory od firmy Physik Instrumente (PI) rovněž použité v této práci.

Mezi hlavní výhody tohoto programového prostředí můžeme zařadit zejména výše zmíněnou kompatibilitu s mnoha měřicími přístroji, intuitivní tvorbu programů pomocí funkčních bloků, rychlost tvorby programu, snadné hledání chyb v programu, snadné čtení ze souboru a zápis do souboru, možnost spolupráce s prostředím jako jsou Matlab, .NET, Java formou skriptů, podpora vícevláknového (multithreading) a vícejádrového (multicore) programování, integrovaná podpora databázových aplikací apod. Velkou výhodou verze 9.2 je kompatibilita s operačním systémem Windows 7 a kancelářskými balíky MS Office (verze 2003 a výše).

Zdroj [15] uvádí mezi hlavní výhody tohoto prostředí: „Grafický programovací software Agilent VEE usnadňuje programování, snižuje počet řádek programu a má méně složité obrazovky pro tvorbu programu. Jedná se o programovací jazyk vysoké úrovně používající grafické zobrazení podobné vývojovému diagramu. Je snadné se naučit pracovat se softwarem Agilent VEE a můžete začít svá měření ve velmi krátkém čase. Díky otevřené struktuře software Agilent VEE pracuje bez problémů s hardwarem a softwarem od téměř všech výrobců. Tím se dosáhne toho, že vaše programy budou flexibilní, expandovatelné a kompatibilní s posledními světovými standardy“¹⁵.

Mezi hlavní nevýhody bychom měli zařadit nutnou znalost konkrétních příkazů (tzv. makroinstrukcí) pro ovládání konkrétního přístroje (např. načítání dat z přístroje, softwarové nastavování parametrů přístroje apod.), které jsou většinou specifické pro každý přístroj. Toto je tedy podmíněno důkladným nastudováním manuálu obsahujícího seznam, syntaxi a použití jednotlivých makroinstrukcí.

¹⁵ W4000B – Grafické vývojové prostředí Agilent VEE 9.2 [online]. [cit. 2011-03-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.htest.cz/index.php?produkt=480>>.



Obr. 43. Logo VEE Pro

4.1.1 Softwarové nároky programového prostředí Agilent VEE Pro 9.2

Softwarové nároky prostředí Agilent VEE Pro 9.2 jsou přehledně uvedeny v tabulce (Tab. 9).

Požadavek	Minimální požadavek	Alternativa
Operační systém	Windows XP SP2	W XP SP3, Vista, 7 (32,64)
Webový prohlížeč	Internet Explorer 6.0	Firefox, Opera, Google Ch.
Kancelářský balík MS Office	MS Office 2003	MS Office 2007
Balík IO Libraries Suite	IO Libraries Suite 15.1	IO Libraries Suite 16
Microsoft .NET Framework	.NET Framework 3.5	.NET Framework 4

Tab. 9. Softwarové požadavky prostředí Agilent VEE Pro 9.2

4.1.2 Hardwarové nároky programového prostředí Agilent VEE Pro 9.2

Hardwarové nároky prostředí Agilent VEE Pro 9.2 jsou přehledně uvedeny v tabulce (Tab. 10).

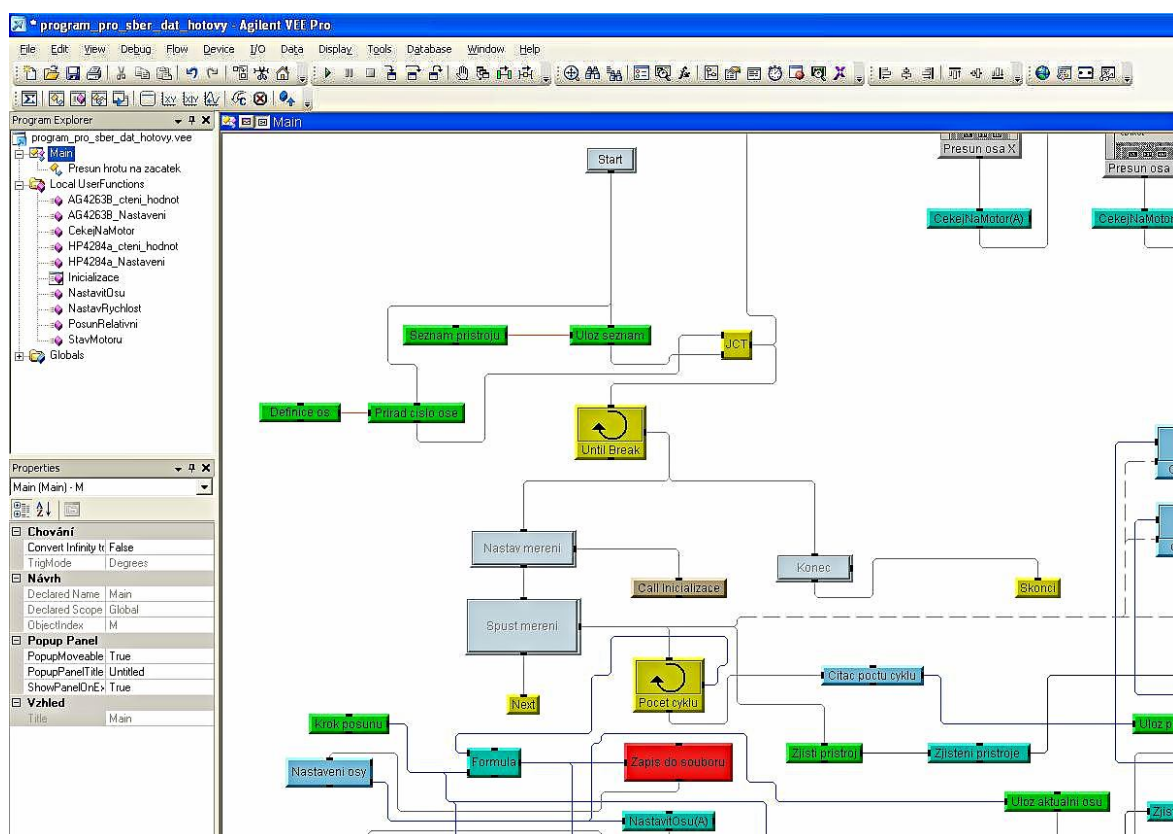
Požadavek	Minimální požadavek	Alternativa
Procesor	Pentium 450 MHz (W XP)	AMD, Intel >450 MHz
	Pentium 1 GHz (W Vista, 7)	AMD, Intel > 1GHz

Požadavek	Minimální požadavek	Alternativa
Kapacita pevného disku	470 MB volného místa	Volné místo > 470 MB
Grafická karta	SVGA (800 x 600)	Rozlišení > 800 x 600
Knihovna DirectX	DirectX 9	DirectX 10,11

Tab. 10. Hardwarové požadavky prostředí Agilent VEE Pro 9.2

4.1.3 Popis uživatelského prostředí Agilent VEE Pro 9.2

Prostředí programu Agilent VEE Pro 9.2 je založeno na intuitivním programování pomocí sestavení funkčních bloků a jejich propojení. Hlavní okno programu viz. obrázek (Obr. 44).



Obr. 44. Hlavní okno programu Agilent VEE Pro 9.2 s uživatelským programem

Uživatelské prostředí VEE Pro 9.2 je rozděleno do několika základních sekcí. První sekcí je hlavní lišta programu. Obsahem hlavní lišty je sada záložek (celkem 13) obsahujících položky, které uživatelům slouží ke konkrétnímu účelu. Nejdůležitější z nich spolu s nejdůležitějšími položkami si uvedeme.

File (Soubor) – slouží k založení nového projektu (*New*), otevření stávajícího (*Open*), uložení projektu (*Save*).

Edit (Úpravy) – důležitými položkami jsou Create User Object a Create User Function.

- **Create User Object** - slouží k seskupení několika objektů do jednoho za účelem zpřehlednění programu.

- **Create User Function** – umožňuje definovat uživatelskou funkci (podprogram), kterou může uživatel volat v libovolném místě programu.

View – možnosti nastavení zobrazení.

Debug – ladění programu (aplikace zářezů – breakpointů), zobrazení toku dat (*Show Data Flow*).

Flow – podmínky (*If/Then/Else*), cykly (*For Range, For Count, For Each, For Log Range, Until Break, On Cycle*), zpoždění (*Delay*), spouštění (*Start*).

Device – důležitá položka *Formula* (ovládání přístrojů přes makroinstrukce, matematické vztahy), import knihoven (*Import Library*), tvorba Matlab-skriptů (*MATLAB script*), objekty *Counter* (čítač), *Accumulator* (akumulátor), *Timer* (časovač).

I/O – Instrument Manager (rozpoznávání přístrojů, přidělování adres, komunikace), práce se soubory (*To File, From File*).

Data – obsahuje možné použitelné datové typy (Text, Int, Real...), *Set Variable* (uložení do proměnné), *Get Variable* (načtení z proměnné), prvky GUI (*Radio Buttons, Cyclic Button, List* apod.).

Display – možnosti číselného nebo grafického výstupu programu.

- **AlphaNumeric (Logging AlphaNumeric)** – číselný výstup programu

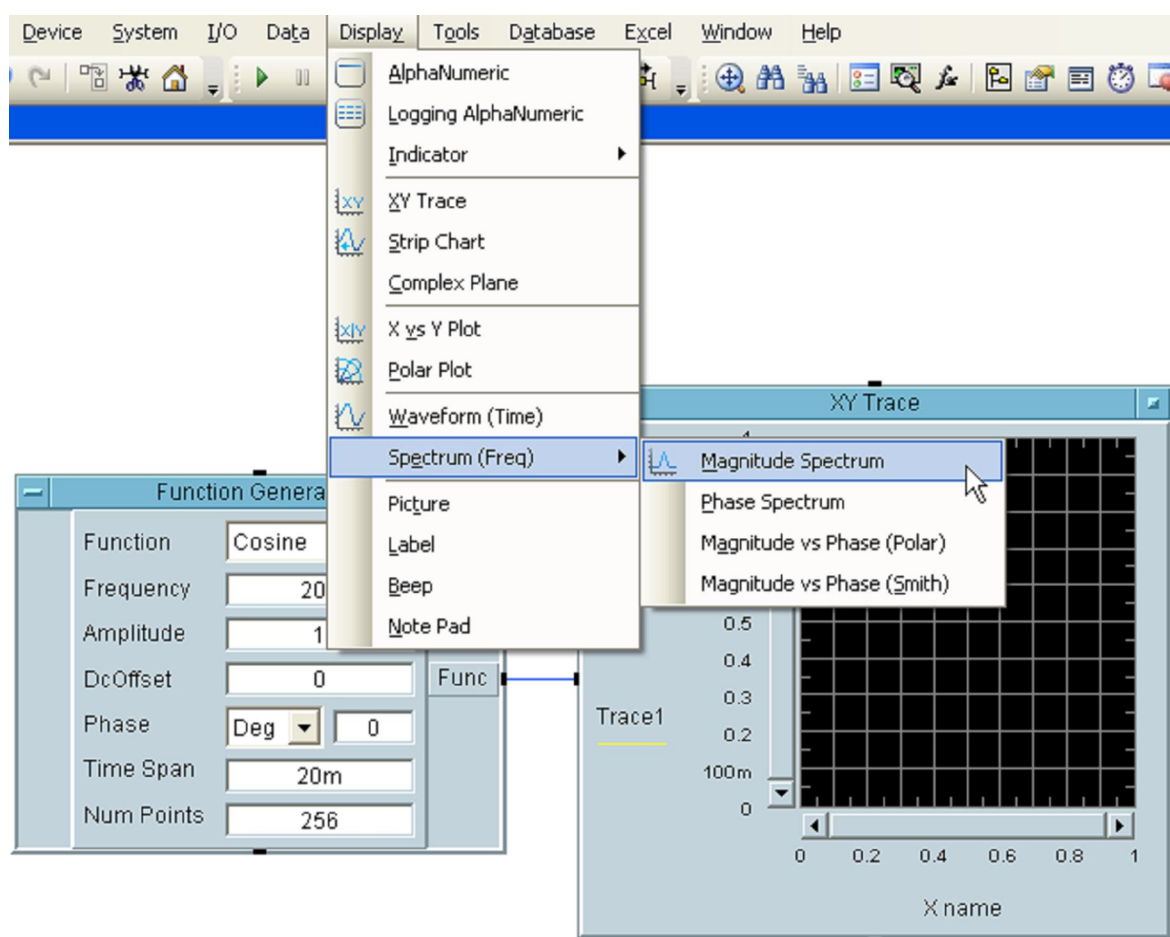
- **XY Trace. X vs Y Plot, Polar Plot** – grafický výstup programu

- **Picture** – možnost importu externího obrázku

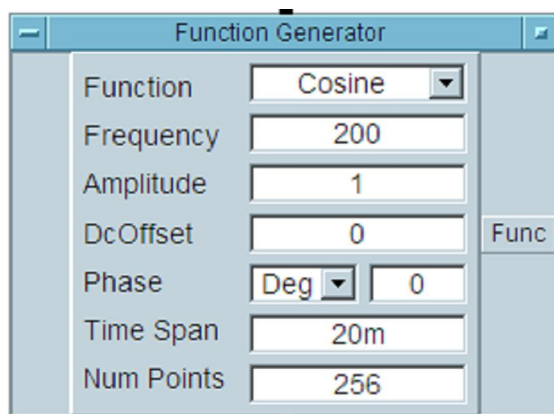
Na obrázku (Obr. 45) vidíme ukázkový příklad použití funkčních bloků (objektů), jejich vzájemné propojení a nastavení jejich parametrů. Konkrétně se jedná o propojení generátoru s grafickým výstupem.

Na obrázku (Obr. 46) vidíme možnosti nastavení generátoru jako funkčního bloku (objektu). V objektu „Function Generator“ můžeme nastavit vlastnosti jako je frekvence signálu (Frequency), amplituda signálu (Amplitude), tvar (typ) signálu (Cosine), fáze signálu (Phase).

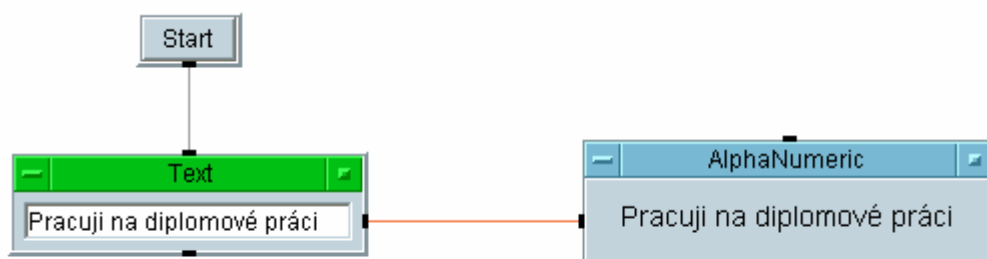
Na obrázku (Obr. 47) vidíme ukázkový příklad práce s datovými typy. Pro ukázkou použijeme datový typ Text. Do objektu „Text“ napíšeme libovolný text (zvolil jsem text „Pracuji na diplomové práci“). Výstupem pro zobrazení bude objekt „AlphaNumeric“. Program spustíme klepnutím na objekt „Start“, který je propojen s objektem „Text“. Obdobná je práce s jinými datovými typy (Int, Real apod.).



Obr. 45. Položka Display hlavní lišty programu Agilent VEE Pro 9.2



Obr. 46. Možnosti nastavení objektu

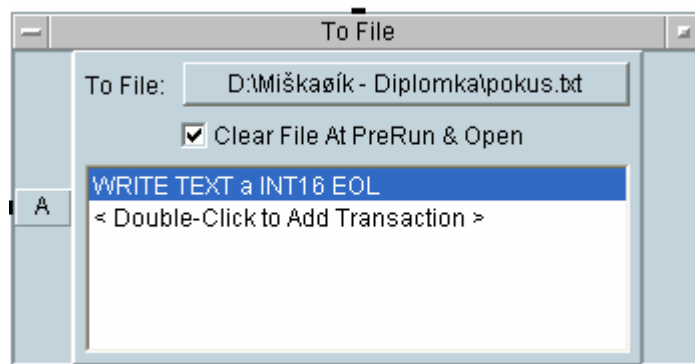


Obr. 47. Ukázkový program pro výpis textového řetězce na výstup

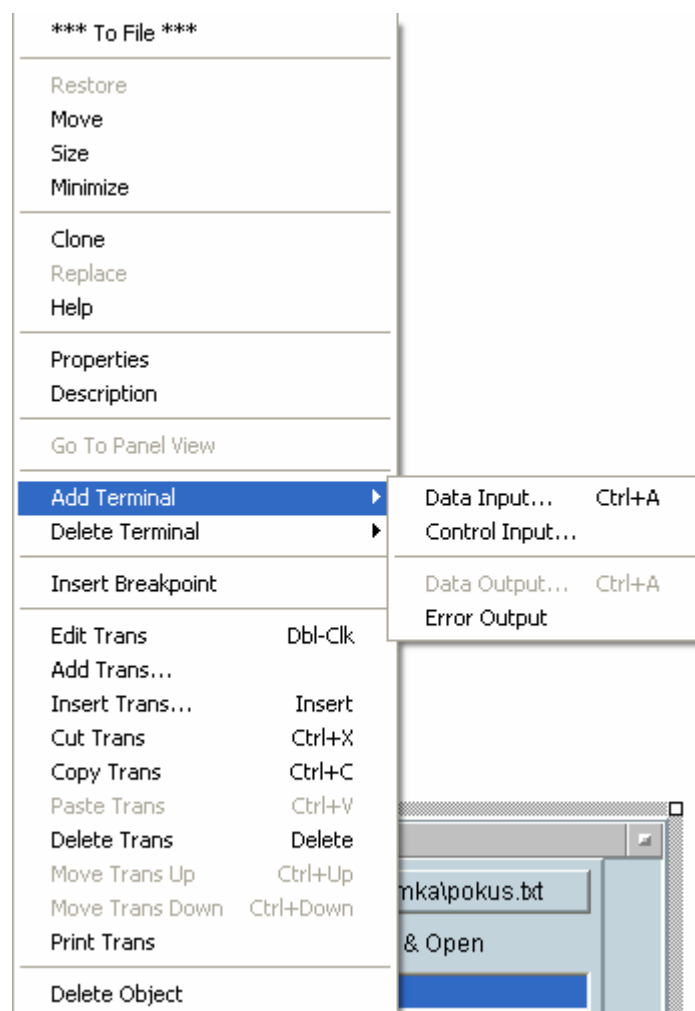
Na obrázku (Obr. 48) vidíme objekt „To File“ který budeme potřebovat pro zapisování hodnot z měřicích přístrojů do textového souboru. Textový soubor, do které se bude zapisovat se vybere pomocí tlačítka „myFile“. Otevře se adresář, kde můžeme zvolit nový soubor (popř. zvolit soubor již existující). Zaškrtnutím položky „Clear File At PreRun & Open“ vždy při zahájení zápisu smažeme data v textovém souboru. Samozřejmě musíme přidat patřičný vstup(y), přes které budeme zapisovat hodnoty do souboru. Vstup se do objektu přidá pravým kliknutím myši na objekt – „Add Terminal – Data Input“ (Obr. 49).

Klepnutím na položku „Double-Click to Add Transaction“ se otevře okno viz. obrázek (Obr. 50), kde můžeme zvolit, jakou transakci chceme uskutečnit. Možnosti jsou tři (Write, Execute, Wait) – pro naši práci využijeme Write. Z formátů máme na výběr (Int16, Int32, Int64, Word, Byte, String, Default aj.). Volba „EOL-ON (OFF)“ slouží k aktivaci (deaktivaci) odřádkování na konci řádku souboru. Program provede výpis hodnot 0-9.

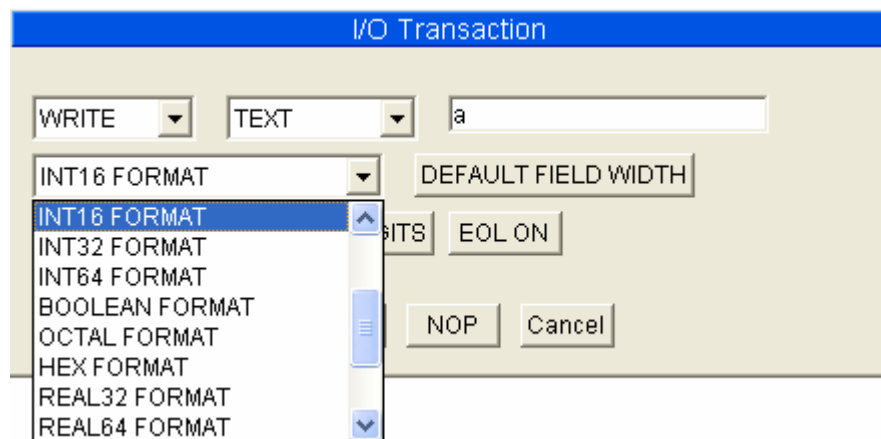
Konstrukce programu viz. obrázek (Obr. 51), výstup viz. obrázek (Obr. 52).



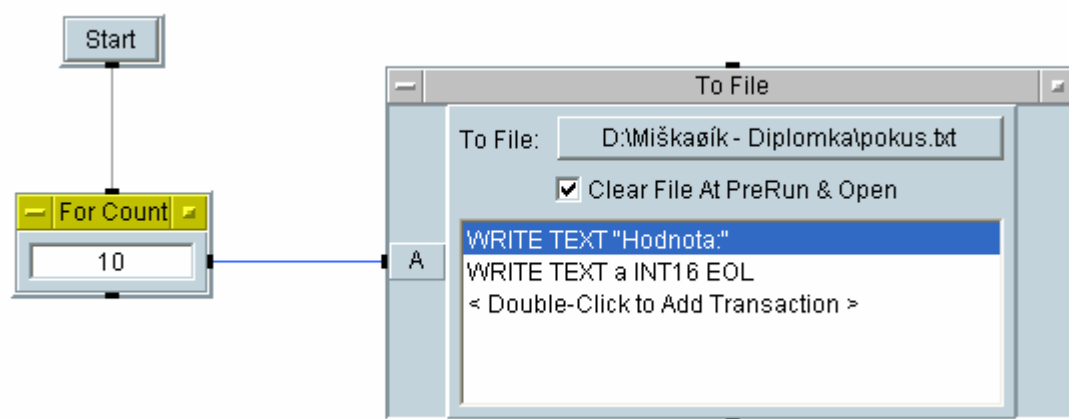
Obr. 48. Objekt To File



Obr. 49. Přidání vstupu k objektu To File



Obr. 50. Výběr transakce a volba formátu



Obr. 51. Konstrukce jednoduchého programu pro zápis do souboru

```
Hodnota:0
Hodnota:1
Hodnota:2
Hodnota:3
Hodnota:4
Hodnota:5
Hodnota:6
Hodnota:7
Hodnota:8
Hodnota:9
```

Obr. 52. Výstup programu se zapsanými hodnotami v textovém souboru pokus.txt

5 SESTAVENÍ MĚŘICÍHO PRACOVISTĚ

Měřicí pracoviště sestává z měřicích přístrojů, PC, příslušenství (servomotory, měřicí hrot, snímaný povrch). Měřicí pracoviště sestavíme a popíšeme formou blokového schématu a také formou elektromechanického schématu. Celkový pohled na měřicí pracoviště z reálného pohledu viz. obrázek (Obr. 53).

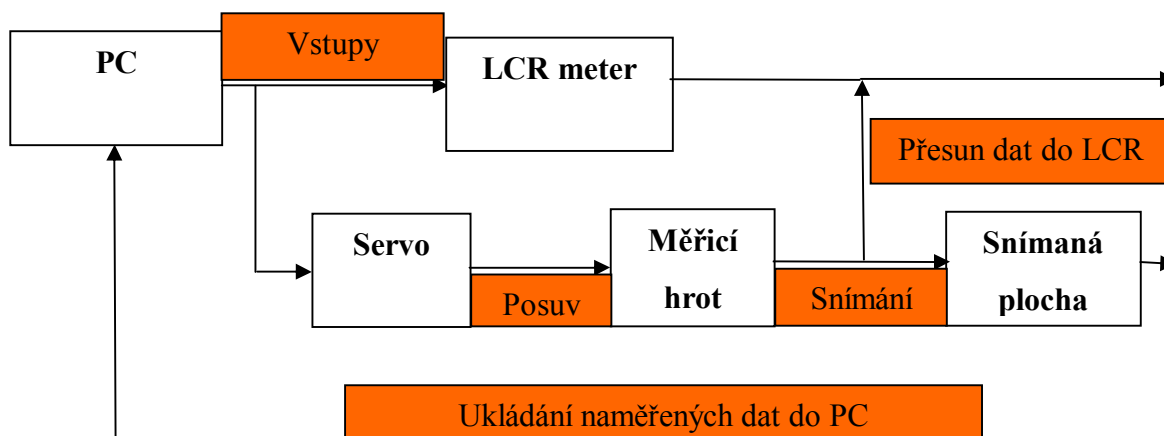


Obr. 53. Pohled na měřicí pracoviště v laboratoři elektromagnetické kompatibility

5.1 Měřicí pracoviště pro můstkovou metodu

Jak už jsme se zmínili v odstavci 3.1, k aplikaci můstkové metody budeme potřebovat tyto přístroje a příslušenství: LCR meter (HP 4284A nebo Agilent 4263B, servomotory C-862 Mercury II, PC s programovým prostředím Agilent VEE Pro 9.2 a v něm vytvořeným programem pro automatický sběr dat), měřicí hrot upevněný na statickém ramenu, snímaný povrch. Blokové schéma měřicího pracoviště můžeme vidět na obrázku (Obr. 54).

5.1.1 Blokové schéma měřicího pracoviště pro můstkovou metodu



Obr. 54. Blokové schéma měřicího pracoviště pro měření můstkovou metodou

Vstupy – zavádění vstupních parametrů do měřicího přístroje (volba měřené veličiny – kapacita, indukčnost) a servomotorů (volba rychlosti posuvu hrotu, kroku posuvu, osy posuvu).

Posuv – servomotor podle zadaných parametrů posouvá snímanou plochou vůči měřicímu hrotu upevněným na statickém ramenu v zadané ose (x,y nebo z).

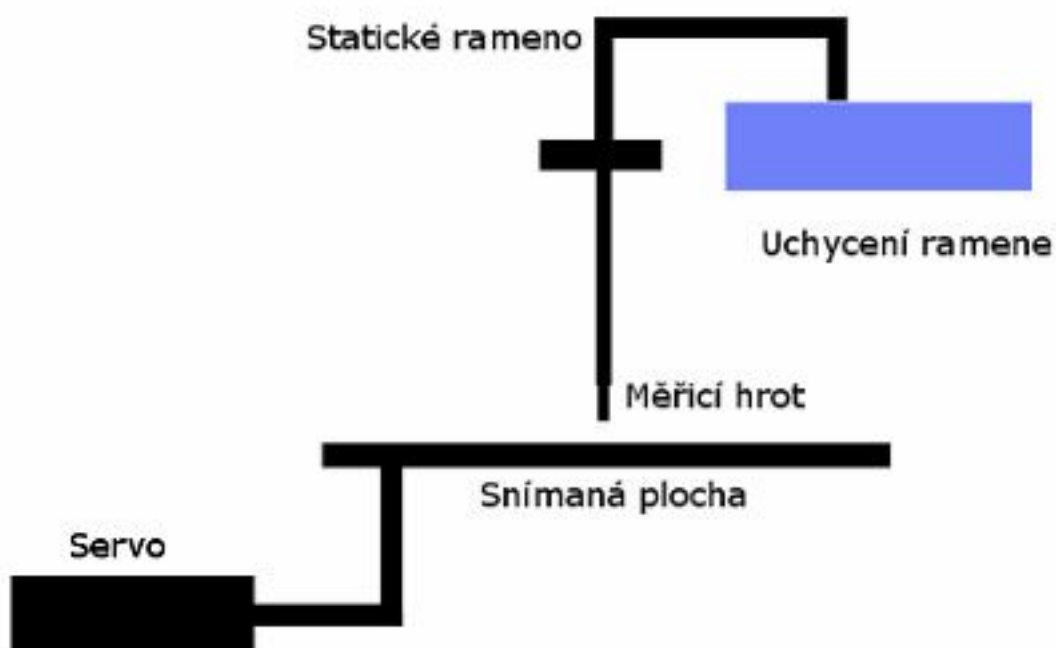
Snímání – měřicí hrot spojený s ramenem snímá plochu v dané ose (měření změn kapacity), měřicí hrot tlakem stlačuje (roztahuje) pružinu (měření změn indukčnosti).

Přesun dat do LCR – změny zaznamenané hrotem se přenášejí do LCR metru.

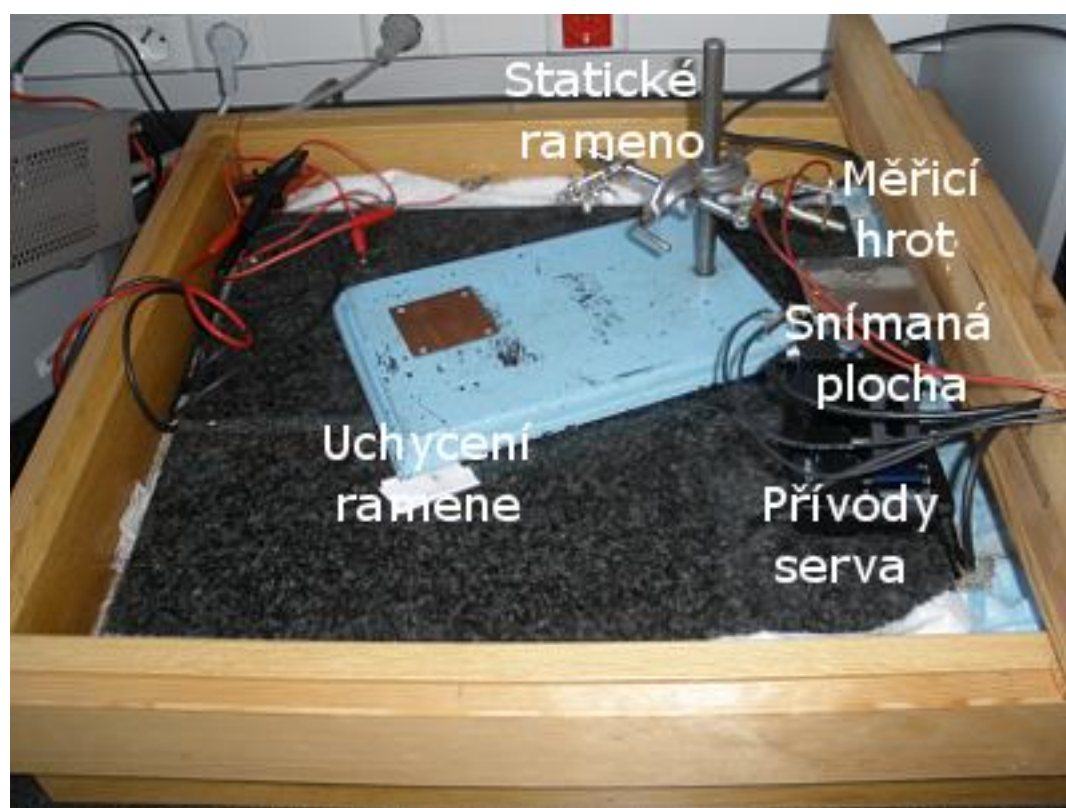
Ukládání naměřených dat do PC – naměřená data se z LCR metru ukládají do programu v PC (konkrétně do textového souboru připraveného na disku PC) k dalšímu zpracování a vyhodnocení.

5.1.2 Elektromechanické schéma měřicího pracoviště

Schéma je na obrázku (Obr. 55). Jak můžeme vidět, měřicí hrot je upevněn na statickém ramenu, které je navíc uchyceno na těžké mramorové desce (z důvodu minimalizace chvění). Celkový pohled na tuto část pracoviště v reálném pohledu viz. obrázek (Obr. 56). Samotný měřicí hrot je tedy vzhledem k pohyblivé snímané ploše statický. Snímanou plochou můžeme v daný okamžik pohybovat pouze v jedné ose pomocí jednoho servomotoru.



Obr. 55. Elektromechanické schéma měřicího pracoviště



Obr. 56. Elektromechanická část měřicího pracoviště v reálném pohledu

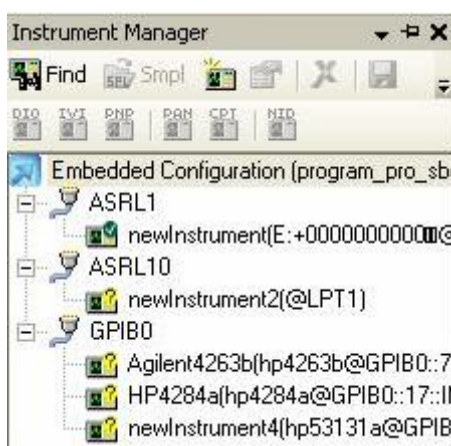
6 UŽIVATELSKÝ PROGRAM

K tvorbě uživatelského programu bylo zvoleno programové prostředí VEE Pro 9.2 od firmy Agilent Technologies, o němž bylo teoreticky pojednáno již v kapitole 4.

Základními požadavky na uživatelský program jsou: univerzálnost použití vzhledem k dostupným měřicím přístrojům (HP 4284A, Agilent 4263B, Agilent 53131A), automatický sběr dat, statistické vyhodnocení dat (výpočet průměrné hodnoty a směrodatné odchylky ze souboru dat), ovládání servomotorů (možnost ovládání posuvu snímané plochy vzhledem k měřicímu hrotu ve všech 3 osách, ovládání rychlosti posuvu), ukládání načítaných dat do souboru, dynamické zobrazování průběhu měřicího procesu.

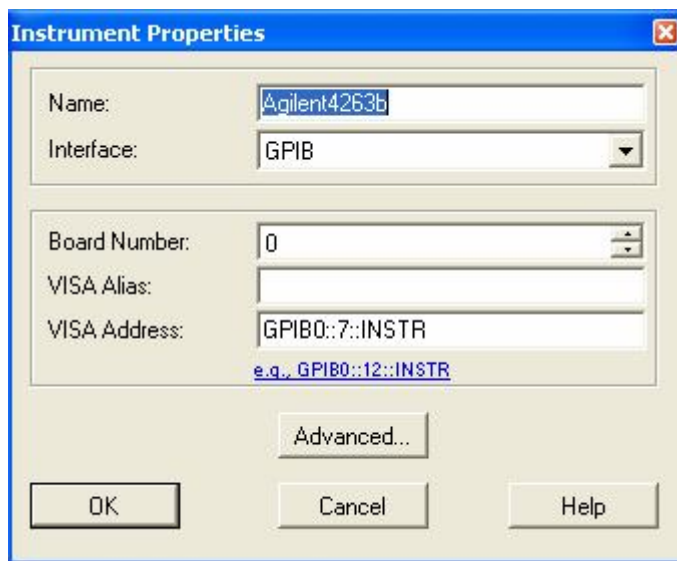
6.1 Identifikace připojených měřicích přístrojů

K tomu, abychom mohli začít s konstrukcí programu, musíme prvně připojené přístroje identifikovat. V záložce I/O zvolíme položku Instrument Manager. Objeví se okno viz. obrázek (Obr. 58). Přístroje se vyhledávají klepnutím na tlačítko Find.



Obr. 58. Instrument Manager

V okně vidíme všechny přístroje, které jsou připojené k PC. Pod záložkou ASRL 1 (Address Space Layout Randomization) vidíme servomotory C-862 Mercury II. Pod záložkou GPIB0 (General Purpose Interface Bus) vidíme přístroje HP4284A, Agilent 4263B a čítač Agilent 53131A. Zelené zatržítka značí, že přístroj byl v pořádku identifikován a byla mu přiřazena adresa. Žlutý otazník značí, že přístroj byl sice identifikován, ale zatím mu nebyla přiřazena adresa. Ukázka nastavení adresy viz. obrázek (Obr. 59).



Obr. 59. Nastavení adresy měřicího přístroje

6.2 Konstrukce uživatelského programu pro můstkovou metodu

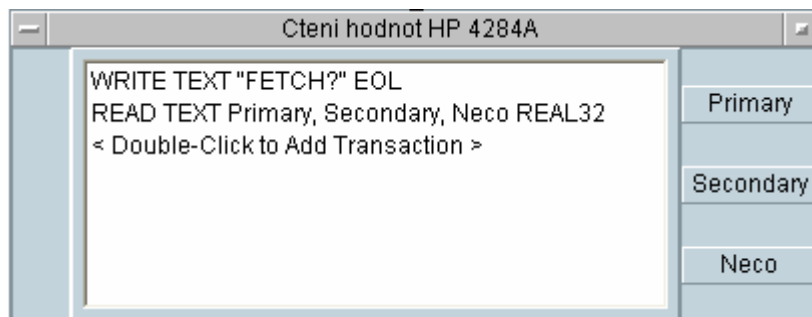
Základní metodika programování v prostředí Agilent VEE Pro 9.2 zahrnující práci se vstupy a výstupy, práci se soubory (ukládání do souboru), práci s objekty, zobrazování výstupů byla popsána již v odstavci 4.1.3. Nebudeme tedy podrobně rozebírat každý krok konstrukce programu, ale rozebereme si pouze nejzásadnější části programu (základní kostru programu, načítání dat z měřicích přístrojů, ovládání servomotorů, seznam použitých makroinstrukcí, vytvoření GUI panelu). Kompletní konstrukci programu přikládám na CD pod názvem `program_pro_sber_dat_hotovy.vee`.

6.2.1 Základní konstrukce uživatelského programu

Základem programu je schopnost načítat data z měřicích přístrojů. Program dokáže načítat data z obou LCR metrů (HP 4284A, Agilent 4263B). Načítání dat z LCR metrů je realizováno pomocí dvou podprogramů.

Podprogram s názvem **HP4284a_cteni_hodnot** slouží k načítání dat z LCR metru HP4284A. Načítání dat příslušné veličiny (podle nastavení) probíhá pomocí makroinstrukce **FETCh?**. Podle manuálu se může makroinstrukce zapsat také jako **FETC?**. Podprogram pro načítání viz. obrázek (Obr. 60). První transakcí je zápis makroinstrukce **FETCH?**, druhou je čtení primární a sekundární veličiny. Třetí parametr **Neco** byl přidán z toho důvodu, že přístroj generuje ještě sekvenci samých nul (z důvodu rozlišení). Podprogram je

sestaven jako User Object, jehož dva výstupy - Primary a Secondary - jsou vedeny na vstupy objektu To File pro zápis do souboru. Podrobný náhled přikládám v programu program_pro_sber_dat_hotovy.vee na CD.



Obr. 60. Načítání hodnot z měřicích přístrojů

Podprogram s názvem **AG4263B_cteni_hodnot** slouží k načítání dat z LCR metru Agilent 4263B. Načítání dat příslušné veličiny (podle nastavení) probíhá pomocí makroinstrukce FETCH? Stejně jako u předchozího přístroje. Transakce jsou totožné jako na Obr. 60.

Podprogram **HP4284a_nastaveni** slouží k volbě měřených veličin, které budou načítány z LCR metru HP4284A. Výběr se provádí pomocí sekvence „FUNC: IMP“ + c, kde c je veličina, kterou chceme měřit (např. „FUNC: IMP“ + CS). Podrobný náhled přikládám jako program program_pro_sber_dat_hotovy.vee na CD.

Podprogram **AG4263B_nastaveni** slouží k volbě měřených veličin, které budou načítány z LCR metru Agilent 4263B. První nastavení je provedeno pomocí sekvence :SENS:FUNC ,FADM‘. Tato sekvence nám říká, že budeme měřit admitance.

Volba primární veličiny se provede sekvencí „:CALC1:FORM“+A, kde A je konkrétní veličina.

Volba sekundární veličiny se provede sekvencí :CALC2:FORM. Podrobný náhled přikládám v programu program_pro_sber_dat_hotovy.vee na CD.

Podprogram s názvem **NastavitOsu** slouží (jak už z názvu vyplývá) k volbě osy, ve které bude docházet k posuvu snímané plochy vzhledem k měřicímu hrotu. Servomotory jsou tři a každý má svou adresu. Přiřazení adres jednotlivým servomotorům je v tabulce (Tab. 11).

Servomotor (osa)	Číslo servomotoru	Adresa servomotoru	
		Adresa (hexa)	Adresa (dekadicky)
X	1	0x30	48
Y	2	0x31	49
Z	3	0x32	50

Tab. 11. Tabulka přiřazení adres jednotlivým servomotorům

Podprogram **NastavRychlost** slouží k nastavení rychlosti posuvu snímané plochy vzhledem k měřicímu hrotu. Nastavení rychlosti posuvu provedeme pomocí makroinstrukce **SV** (Set Velocity). Syntaxe makroinstrukce: SVn, kde n je číslo v intervalu $0 < n < 500000$. Rychlost posuvu se udává v jednotkách counts/s.

Podprogram **PosunRelativni** slouží k posuvu snímané plochy vůči měřicímu hrotu o zadanou dráhu. Nastavení posuvu provedeme pomocí makroinstrukce **MR** (Move Relative). Syntaxe makroinstrukce: MRn, kde n je číslo mezi hodnotami - 1 073 741 823 counts a + 1 073 741 823 counts.

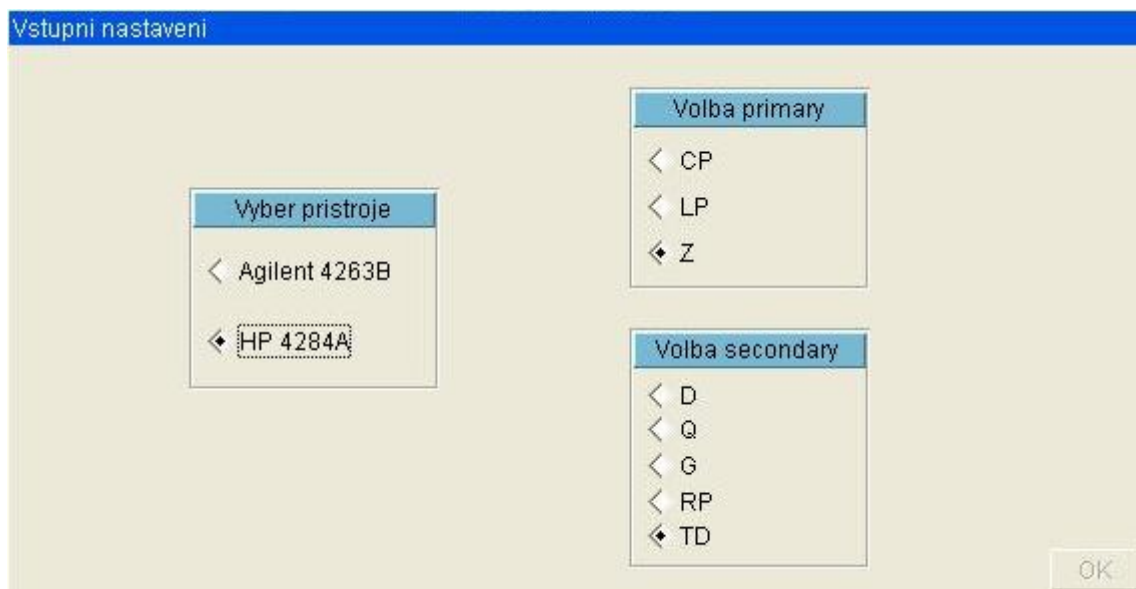
Podprogram **CekejNaMotor** slouží k zajištění dokončení posuvu snímané plochy do cílové pozice. Čekání provedeme pomocí makroinstrukce **WS** (Wait for motor Stop). Příkaz WS slouží de facto k synchronizaci motoru mezi vykonáním dvou po sobě následujících instrukcí.

Syntaxe makroinstrukce: WSn, kde n je číslo vyjadřující počet ms (milisekund), které uplynou mezi ukončením jedné instrukce a zahájením vykonávání další instrukce.

Podprogram **StavMotoru** slouží ke zjištění stavu servomotoru, ve kterém se nachází. Zjištění stavu se provede pomocí makroinstrukce **TS** (Tell Status). Makroinstrukce TS nemá žádné parametry. Jejím výstupem je posloupnost čísel v hexadecimálním tvaru. Platí, že LSB (Least-Significant-Bit) je bit 0. Příklad výstupu makroinstrukce TS - S: 04 A8 04 03 02 00.

Protože je výklad a popis výstupu této makroinstrukce velmi specifický, rozsáhlý a složitý, podrobný popis včetně popisu jednotlivých bitů a jejich významu tedy přikládám na CD k diplomové práci formou souboru C-862_User_MS74E841.pdf (str. 52-53).

Podprogram **Inicializace** slouží k nastavení vstupních parametrů měření. Podprogram je sestaven ve formě panelu, na kterém jsou umístěny 3 objekty Raddio Buttons s příslušnými položkami viz. obrázek (Obr. 61).



Obr. 61. Panel vstupních nastavení měřicího procesu

Objekt **Vyber pristroje** slouží k výběru měřicího přístroje. Na výběr máme ze dvou měřicích přístrojů – Agilent 4263B a HP 4284A.

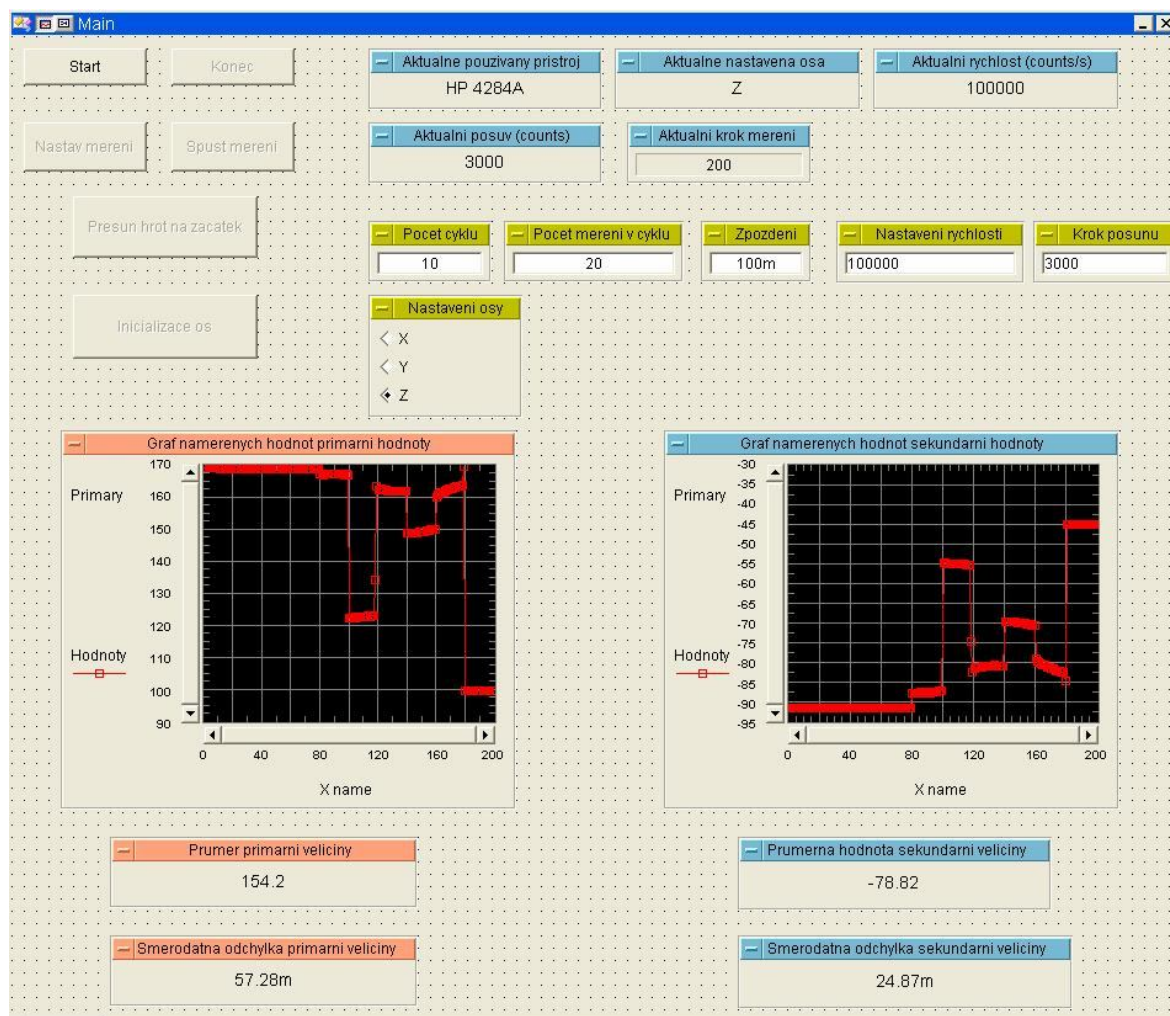
Objekt **Volba primary** slouží k výběru primární veličiny, kterou chceme měřit. Primární veličinou se myslí kapacita C nebo indukčnost L (popř. je možno seznam doplnit podle potřeby o další veličiny jako je např. impedance Z apod.). Přidání položek se provede klepnutím pravým tlačítkem myši na objekt – volba Edit Enum Values.

Objekt **Volba secondary** slouží k výběru sekundární veličiny, kterou chceme měřit. Mezi sekundární veličiny patří např. disipační faktor D, vodivost G nebo činitel jakosti cívky Q. RP označuje paralelní elektrický odpor a TD označuje fázový posuv. Je nutno podotknout, že označení primárních a sekundárních veličin je přesně dáno podle manuálu (nelze tedy použít zástupné označení – např. RP nelze označit jako RPar apod.).

Po výběru vstupních parametrů pokračujeme dále tlačítkem OK.

6.2.2 Ovládací panel uživatelského programu

Ovládací panel obsahuje všechny nejdůležitější objekty, které potřebujeme k nastavení a ovládání měřicího procesu. Celkový pohled na panel viz. obrázek (Obr. 62).



Obr. 62. Ovládací panel uživatelského programu

V levé horní části ovládacího panelu se nachází šest tlačítek. Tlačítkem Start se aktivuje tlačítko Nastav mereni. Klepnutím na toto tlačítko se zobrazí panel Vstupní nastavení viz. obrázek (Obr. 61). Zde nastavíme námi zvolené vstupní parametry a klepnutím na tlačítko OK se aktivuje tlačítko Spust mereni, kterým měření spustíme. Tlačítkem Konec můžeme měření ukončit.

Vedle čtyř hlavních tlačítek (Start, Konec, Nastav mereni, Spust mereni) se nachází objekty, které jsou informativního charakteru.

Zbývající dvě tlačítka Presun hrot na zacatek a Inicializace os jsou doplňkovými tlačítky. Tlačítko Presun hrot na zacatek slouží pro přesun snímané plochy do tzv. home pozice. Home pozici snímané plochy vzhledem k hrotu si nadefinujeme pomocí makroinstrukce DH (Define Home), např. DH 0000000789 (home pozice je 10-ti místné číslo). Volání do home pozice se provede pomocí instrukce GH (Go Home).

Pod těmito objekty se nachází šest dalších objektů, které slouží k dalšímu nastavování měřicího procesu. Objekty se musí editovat před spuštěním měřicího procesu (v jeho průběhu jsou blokovány).

Objekty Pocet cyklu, Pocet mereni v cyklu, Zpozdeni a Nastaveni rychlosti nastavujeme pomocí celých kladných čísel (větších než 0). Objekt Krok posunu můžeme nastavit pomocí celého kladného nebo celého záporného čísla pro danou osu.

Název objektu	Popis objektu
Pocet cyklu	Počet měřicích cyklů
Pocet mereni v cyklu	Počet opakovaných měření v cyklu
Zpozdeni	Zpoždění mezi jednotlivými měřeními
Nastaveni rychlosti	Rychlost posuvu plochy vzhledem k hrotu
Krok posunu	Krok posuvu plochy vzhledem k hrotu
Nastaveni osy	Možnost výběru osy posuvu plochy

Tab. 12. Význam nastavitelných objektů na hlavním panelu programu

V dolní části panelu máme umístěné dva grafy (vlevo pro zobrazování průběhu měřené primární veličiny – např. kapacity C), vpravo pro zobrazování měřené sekundární veličiny (např. vodivosti G). Pod každým grafem se zobrazuje aktuální průměrná naměřená hodnota a aktuální naměřená směrodatná odchylka dané veličiny.

Osa	Směr posuvu	Znaménko posuvu
X	Doprava	+
	Doleva	-
Y	Nahoru	+
	Dolů	-
Z	Oddalování (dolů)	+
	Přiblížení (nahoru)	-

Tab. 13. Přiřazení znamének pro posuv plochy v dané ose

Makroinstrukce	Význam	Parametry	Syntaxe (příklad)
FETCH?	Načítání z přístroje	Bez parametrů	FETCH?
FUNC: IMP	Volba veličiny (HP)	Veličina (např. v)	FUNC: IMP + v
:CALC1: FORM	Volba pr.vel. (Ag.)	Veličina (např. v)	:CALC1: FORM + v
:CALC2: FORM	Volba sek.vel. (Ag.)	Veličina (např. v)	:CALC2: FORM + v
MR	Nastavení posuvu	Posuv (counts)	MR 20000
SV	Nastavení rychlosti	Rychlost (counts/s)	SV 50000
TS	Zjištění polohy	Bez parametrů	TS
WS	Čekání na motor	Počet milisekund	WS 100

Tab. 14. Přehled použitých makroinstrukcí v programu

6.3 Konstrukce uživatelského programu pro metodu s použitím oscilátoru

Uživatelský program pro tuto metodu vychází svou konstrukcí z programu pro můstkovou metodu. Kromě metod pro nastavení LCR metrů a načítání dat z nich jsou podprogramy stejné.

Využijeme tedy podprogramy NastavitOsu pro nastavení osy posuvu, podprogram PosunRelativni pro relativní posuv pohyblivé plochy o daný počet countů (poté přepočteno na mikrometry), podprogram NastavRychlost pro nastavení rychlosti posuvu pohyblivé plochy o daný počet countů/s, podprogram CekejNaMotor, který – jak už bylo řečeno - slouží pro čekání na další instrukci do doby, než motor dojede do cílové pozice. Posledním použitým podprogramem je podprogram StavMotoru sloužící stejně jako v předchozím programu pro zjištění aktuálního stavu motoru.

Jediným parametrem, který načítáme z čítače je frekvence. Frekvenci načítáme pomocí makroinstrukce FETCH:FREQUENCY?. Ukázka hlavního panelu viz. příloha P I.

7 APLIKACE MŮSTKOVÉ METODY

Stručně si popíšeme postupy měření, které byly aplikovány pro měření velmi malých změn kapacity a indukčnosti pomocí můstkové metody. Zmíníme vývoj měření od zkušebních měření až po ostrá měření, k jejichž konečné podobě (zapojení pracoviště, vstupní parametry apod.) se došlo experimentálním ověřováním měřících postupů (volba měřicího hrotu, kroku posuvu, volba frekvence...).

7.1 Měření velmi malých kapacit můstkovou metodou

Hlavním cílem měření je zjistit, jaké nejmenší měřitelné změny kapacity jsme schopni za pomoci dostupných měřících přístrojů a příslušenství vzhledem k okolním podmínkám identifikovat. Podle Obr. 55 si můžeme představit měřicí hrot a snímanou plochu jako laditelný kondenzátor.

Měřicí hrot (statický) představuje pevnou část (stator) a snímaná plocha (pohyblivá) představuje pohyblivou část (rotor). Vzájemnou změnou polohy plochy vzhledem k měřicímu hrotu se mění kapacita C [F], kterou měříme.

Jeden z prvních kroků, které musely být provedeny před samotným měřením, byl úkol zjistit, kolika countům (základní jednotka posuvu servomotoru) se rovná 1 mm. Opakovaným měřením bylo zjištěno (provedeno 30 měření, poté zprůměrováno), že $1 \text{ mm} \approx 166373 \text{ Counts}$. V našem měření se budeme pohybovat v jednotkách mikrometr, takže pokud máme posuv např. 3000 Counts v každém kroku, tak $(3000 \text{ Counts}/166373) \cdot 1000 \approx 18 \text{ } \mu\text{m}$ (násobení tisícem je z důvodu převodu mm na μm).

Druhým úkolem bylo zjistit, jaký typ měřicího hrotu (podle dostupnosti) bude pro měření nejvhodnější. K dispozici byly tři typy hrotů. První z nich nese pracovní název jehlový hrot (viz. Obr. 63), druhý nese název tenký měděný drát (viz. Obr. 64) a třetí tenký měděný vlas (viz. Obr. 65). Snímky hrotů byly vzhledem ke své velikosti pořízeny mikroskopem a později upraveny.

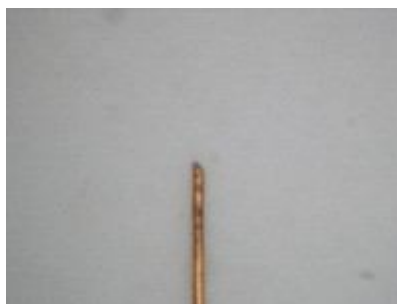
Citlivost hrotů byla testována při různých velikostech posuvu - 50000 Counts (300 μm), 30000 Counts (180 μm), 10000 Counts (60 μm), rychlost posuvu (100 000 Counts/s), frekvence (1 kHz) a napětí (1V) konstantní. Hlavním cílem bylo zjistit, který ze tří typů hrotů má největší citlivost. Velká citlivost (vhodnost hrotu) se projevuje zejména

větší strmostí průběhu křivky (rychlejším klesáním exponenciály, tzn. menší chybou). Je nutno podotknout, že měření bylo pouze orientační a měření bylo ovlivněno jednak okolním prostředím a také hysterezí (dopružováním hrotu) při posuvu.

Bylo zjištěno, že relativně nejcitlivější na změny je hrot tzv. tenký měděný vlas. Ukázka vyhodnocení pro nejjemnější posuv při testování ($60\mu\text{m}$) bez nerovnosti viz. obrázek (Obr. 66) a s nerovností (Obr. 67), podrobnosti přikládám na CD (naměřená data, grafy). Tyto dva grafy jsou z důvodu porovnání zobrazeny spojitě.



Obr. 63. Jehlový hrot



Obr. 64. Tenký měděný drát



Obr. 65. Tenký měděný vlas

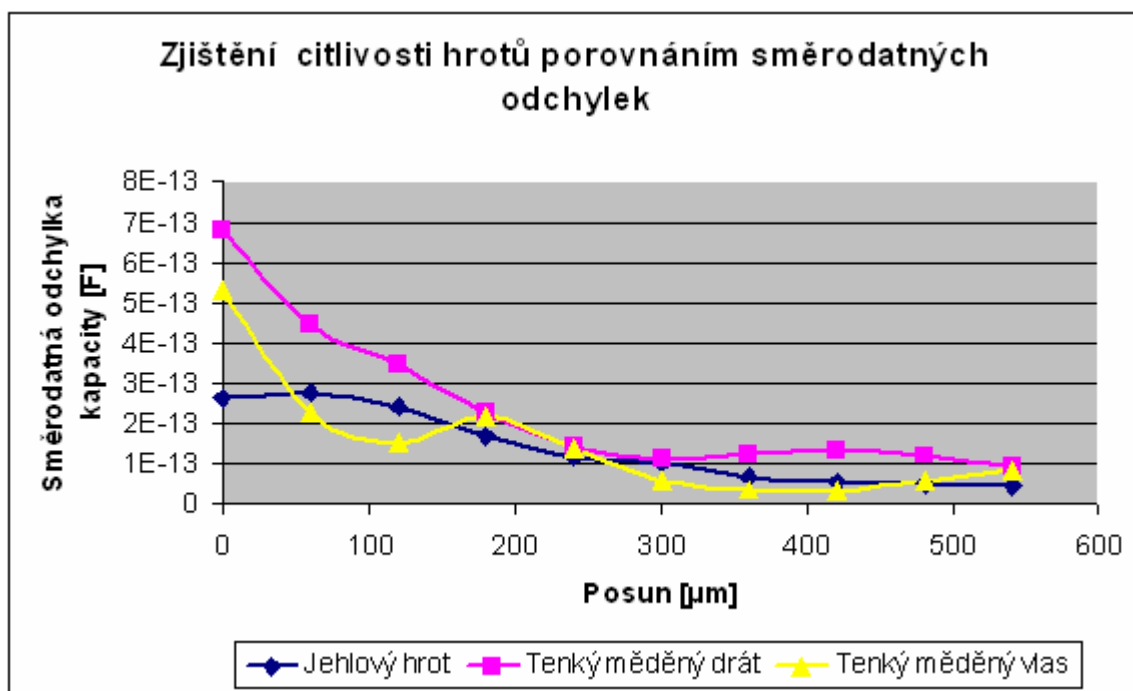
Třetím krokem bylo optimalizovat zapojení metody tak, aby byly minimalizovány okolní parazitní vlivy (rušení, otřesy apod.) a také vyloučit riziko zkratu při dotyku hrotu se snímanou plochou.

Hrot, který je uchycen na statickém ramenu, byl zprvu zapojen tak, že nebyl odizolován od ramene, potažmo jeho uchycení. To způsobovalo nemalé problémy při měření (velké výchylky, šумы...), a tak bylo nutno přistoupit k odizolování hrotu od okolí. To bylo provedeno s pomocí kousku kartonu, mezi který byl vložen hrot a zajištěn svorkou.

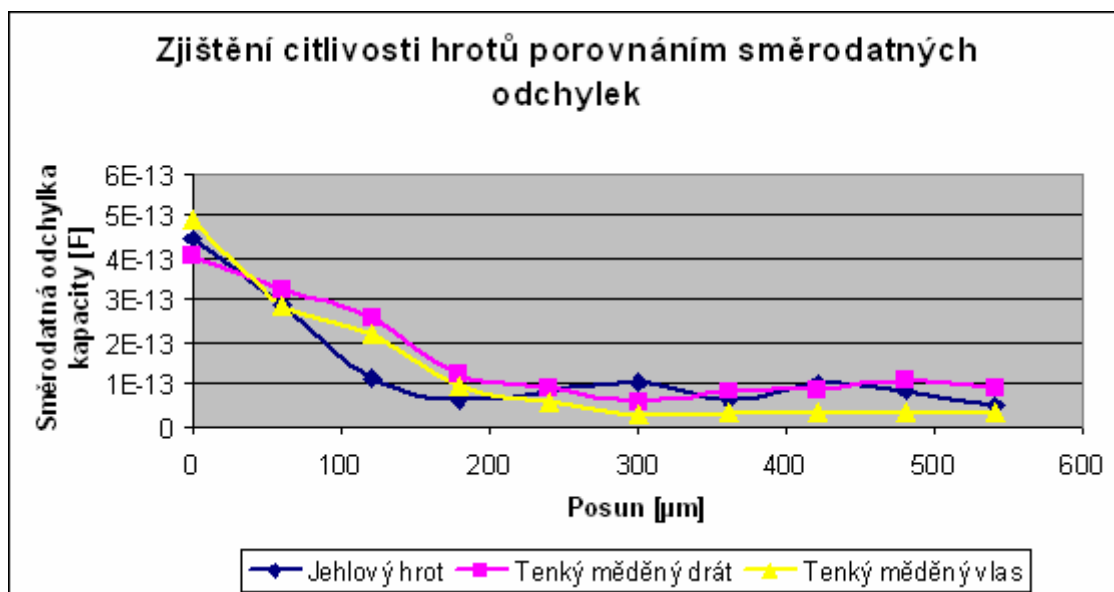
Prívodní kabely LCR metru byly umístěny tak, aby bylo zabráněno případné kolizi s obsluhou (kabely byly umístěny mimo dosah PC, na kterém obsluha pracovala, umístěny do mezery v dřevěném obložení elektromechanické části pracoviště – viz. Obr. 56).

Měřicí hrot, který se přibližoval ke snímané ploše posuvem plochy mohl způsobit při dotyku s plochou zkrat, který by mohl způsobit potíže, a tak se přistoupilo k zařazení odporu 100Ω do série s měřicím hrotem. Posledním článkem v zapojení je paralelně zapojený kondenzátor 100 nF , který slouží k tomu, aby LCR meter nezobrazoval záporné hodnoty kapacity (k čemuž před jeho zařazením docházelo) a také jako referenční kapacita můstku.

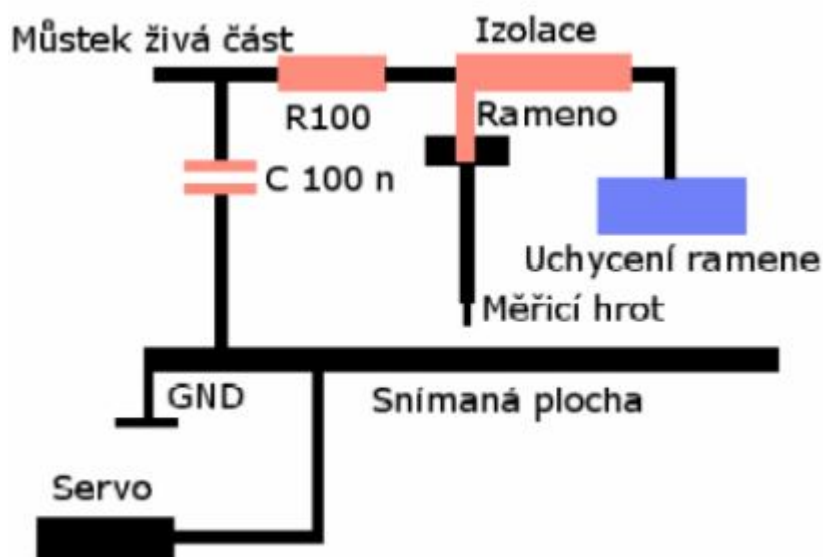
Kompletní konečné zapojení můstkové metody pro měření kapacit spolu s popisem jednotlivých částí viz. obrázek (Obr. 68). Primárním úkolem bylo zjistit jaké nejmenší možné změny kapacity jsme schopni naměřit v ose Z.



Obr. 66. Porovnání citlivosti různých typů hrotů bez nerovnosti povrchu



Obr. 67. Porovnání citlivosti různých typů hrotů s nerovností povrchu



Obr. 68. Konečné schéma můstkové metody měření kapacit

7.1.1 Metodika měření velmi malých změn kapacity můstkovou metodou

Měření velmi malých změn kapacity lze rozdělit na dvě velké skupiny, a to na měření zkušební a ostré.

Mezi zkušební měření lze zařadit již výše zmíněné testování citlivosti měřících hrotů, identifikaci chování při různých frekvencích, optimalizace velikosti posuvu (počet

mikrometrů posuvu), měření s nerovností povrchu. Zkušební měření probíhalo s cílem postupné optimalizace konečného zapojení.

Jako ostrá měření lze označit taková měření, na která aplikujeme sadu nastavení, jejichž optimální konfiguraci jsme zjišťovali právě prostřednictvím zkušebních měření (rychlost posuvu, posuv...). Měření provádíme na čtyřech různých frekvencích (1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz). Měření provádíme za pomoci LCR metru HP 4284A (doporučen vedoucím práce z hlediska přesnosti).

Měření velmi malých změn kapacity probíhá tak, že si vždy v programu prvně zvolíme vstupní parametry (rychlost, posuv, osa, počet cyklů...). Po spuštění programu se snímaná plocha vzhledem k hrotu posouvá svou danou rychlostí, posouvá se podle nastaveného posuvu, v dané ose. Při posuvu v daných osách se řídíme tabulkou (Tab. 13).

Uvažujme, že počet cyklů je 20, počet měření v cyklu je 30, tzn. v každém cyklu, který odpovídá posuvu plochy, se provede 30 měření, která se postupně průměrují a navíc se z nich počítá směrodatná odchylka (hodnot je celkem 600). V takovém modelovém případě je výstupem 20 zprůměrovaných hodnot a 20 hodnot směrodatné odchylky, se kterými můžeme dále pracovat.

Primárním cílem bylo (jak už bylo řečeno v odstavci 7.1) zjistit nejmenší měřitelné změny v ose Z. Osy X a Y nebyly z tohoto hlediska na pokyn vedoucího uvažovány.

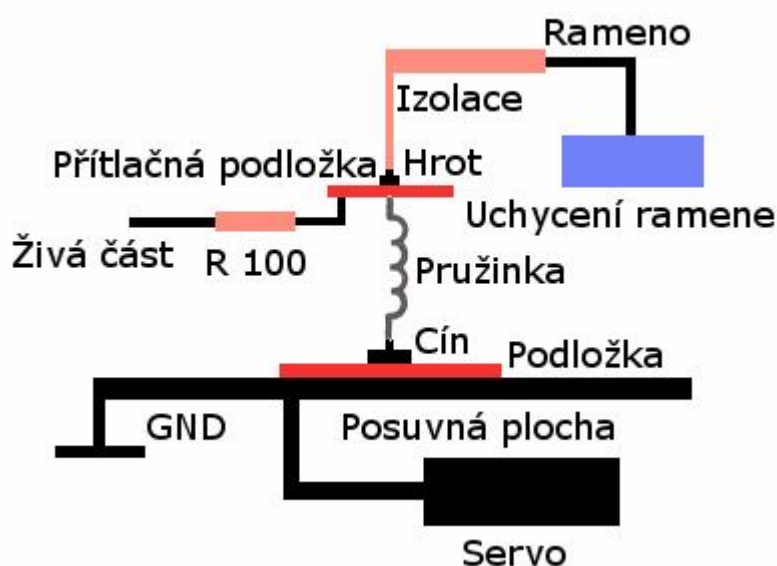
7.2 Měření velmi malých indukčností můstkovou metodou

Hlavním cílem je podobně jako u měření velmi malých změn kapacit zjistit, jaké nejmenší možné změny (tentokrát indukčnosti) jsme schopni naměřit. Měřit budeme jen a pouze v ose Z. Princip měření je obdobný jako u měření kapacit s tím, že optimalizované parametry (rychlost posuvu, posuv, zvolený měřicí hrot...) použijeme z měření kapacit.

Postup měření byl navržen tak, že velmi malé změny indukčnosti budeme měřit metodou stlačování (roztahování) pružinky pomocí hrotu upevněného na rameni. Kompletní schéma pro měření velmi malých změn indukčností s popisem viz. obrázek (Obr. 69).

Na Obr. 69 tedy můžeme vidět kompletní optimalizované schéma. Pružinka je z jedné strany uchycena připájením malou vrstvou cínu k měděné podložce. Tato podložka je svou nevodivou částí položena na posuvnou plochu. Druhý konec pružinky je přitlakem

uchycen zespodu přitlačné podložky. V přitlačné podložce je malá díra, kterou je veden měřicí hrot (jehlový hrot – viz. Obr. 63), jehož koncovka byla upravena zkrácením na průměr díry tak, aby byla pružinka přes podložku ovlivňována tlakem širší části hrotu. Ke spodní části přitlačné podložky je připájen ochranný odpor R o velikosti 100Ω . Hrot je samozřejmě izolován od okolí umístěním mezi kousek kartonu, který je zajištěn svorkou umístěnou na ramenu.



Obr. 69. Konečné schéma můstkové metody měření indukčnosti

7.2.1 Metodika měření velmi malých změn indukčnosti můstkovou metodou

Metodika měření je v podstatě stejná jako u měření velmi malých změn kapacit. Na základě parametrů nastavených v uživatelském programu (rychlost posuvu, posuv...) manipulujeme s pružinkou, kterou buď stlačujeme nebo roztahujeme. Tím se nepatrně mění indukčnost L , jejichž velmi malé změny zaznamenáváme. Při posuvu v daných osách se řídíme tabulkou (Tab. 13). Měříme tedy logicky pouze v jedné ose, a to v ose Z , ostatní osy (X , Y) nejsou uvažovány.

Mezi zkušební měření lze zahrnout zapojení, kdy ochranný odpor R 100 nebyl připájen ke spodní části přitlačné desky, ale pouze volně přichycen k vinutí cívky. Ostré měření probíhalo opět na čtyřech různých frekvencích (1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz).

Měření provádíme za pomoci LCR metru HP 4284A (doporučen vedoucím práce z hlediska přesnosti).

8 APLIKACE METODY S POUŽITÍM OSCILÁTORU

Tato metoda spočívá ve snaze zjistit, jaké nejmenší změny frekvence Δf [Hz] jsme schopni změřit, když budeme rozladovat oscilátor na určitou frekvenci. Rozladovat oscilátor můžeme buď změnou kapacity nebo indukčnosti. Byla zvolena možnost měření za pomoci změn kapacity. Obvod oscilátoru byl pořízen jako celek.

8.1 Měření velmi malých změn frekvence změnou kapacity

Po úvaze bylo rozhodnuto, že bude zvolena tato metoda především proto, že jako kapacitu můžeme použít plochu ovládanou servomotorem. Hlavní výhoda spočívá v jednodušším zapojení. Kdybychom chtěli provést měření změnou indukčnosti, museli bychom vzhledem k neznalosti vnitřního ani vnějšího zapojení oscilátoru provést analýzu, jak indukčnost (pružinku) zapojit do obvodu (sériově?, paralelně?). Nástin analýzy zapojení indukčnosti do obvodu viz. příloha P II.

Základní myšlenka spočívá v tom, že měřicí hrot připojíme (připájíme) ke k jednomu z vývodů kondenzátoru v obvodu oscilátoru a posuvem plochy vůči hrotu se bude velmi málo měnit frekvence, kterou jsme si nastavili jako vstupní. Deska obvodu je izolována od okolí vložením mezi kousek kartonu a zajištěna svorkou. Napájení obvodu je stejnosměrné 12V. Zapojení v reálném pohledu (boční pohled) viz. obrázek (Obr. 70).

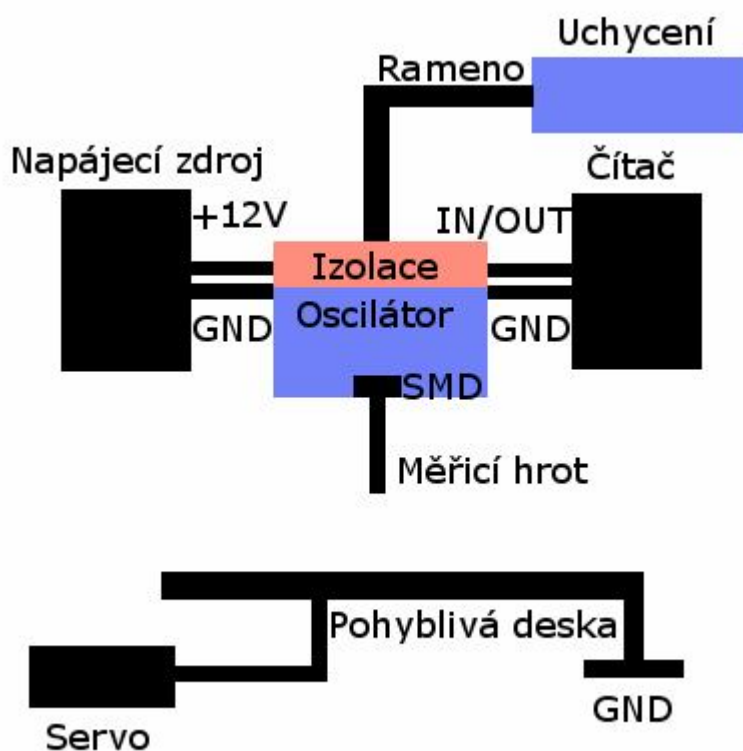


Obr. 70. Zapojení obvodu v reálném pohledu – boční pohled

Z obvodu oscilátoru vedou celkem 4 vodiče (2 pro napájení - červený, modrý, 2 pro čítač - žlutý, modrý). Zelený kabel se svorkou je uzemněním snímané kovové desky (připojeno na společnou zem). Celkové zapojení s popisem viz. obrázek (Obr. 71). Deska oscilátoru je uchycena na statickém ramenu, které je uchyceno na těžké mramorové desce (stejně jako u předchozí metody).

Oscilátor může být napájen ss napětím +5 nebo +12 V, maximální proud činí cca 3mA, výstupní kmitočet je 6,5 MHz max.

Metodika měření je v podstatě stejná jako jsme uvedli u metody můstkové, s tím rozdílem, že se neměří přímo změna kapacity nebo indukčnosti, ale změna frekvence.



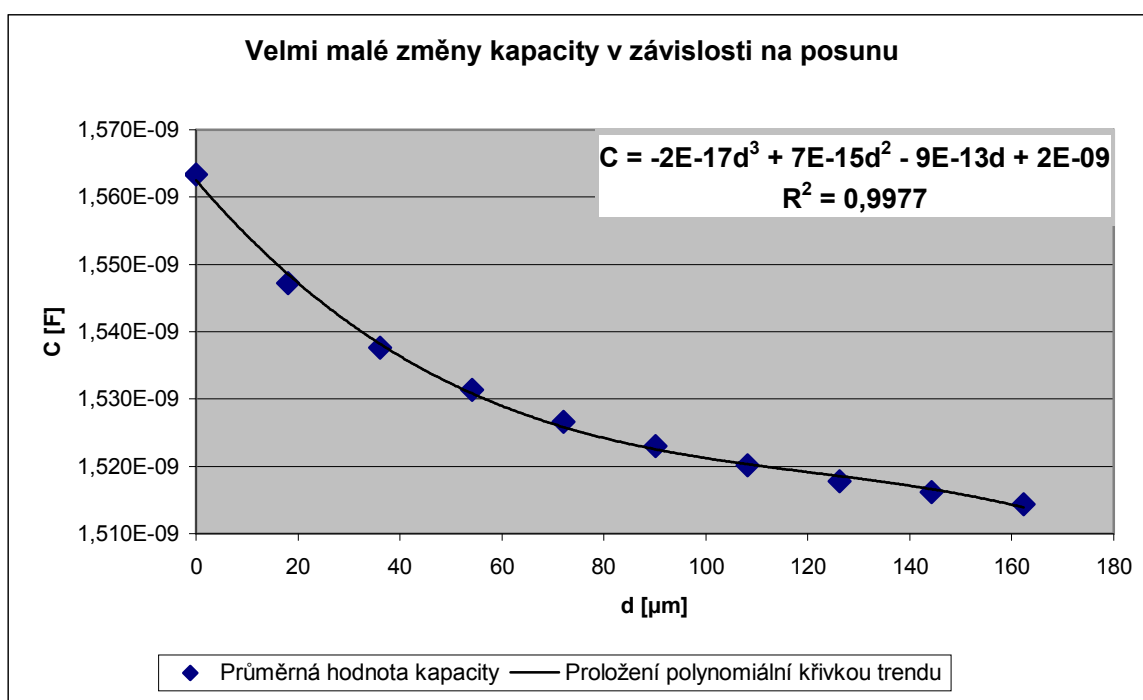
Obr. 71. Konečné schéma metody s oscilátorem

9 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

S ohledem na velký počet měření si ukážeme pouze několik nejlepších výsledků měření obou metod. Ostatní výsledky jsou k nahlédnutí na přiloženém CD, popř. v příloze.

9.1 Výsledky měření velmi malých změn kapacity můstkovou metodou

Na Obr. 72 je průběh při parametrech: d (krok) = 18 μm a rychlost = 100 000 Counts/s (stejně pro všechny 3 grafy), frekvence 1 MHz. Nejmenší možnou změnu kapacity ΔC_{\min} [F] zjistíme pomocí derivace funkce regresní křivky prokládající naměřená data.



Obr. 72. Naměřené změny kapacity – oddalování hrotu - 1 MHz

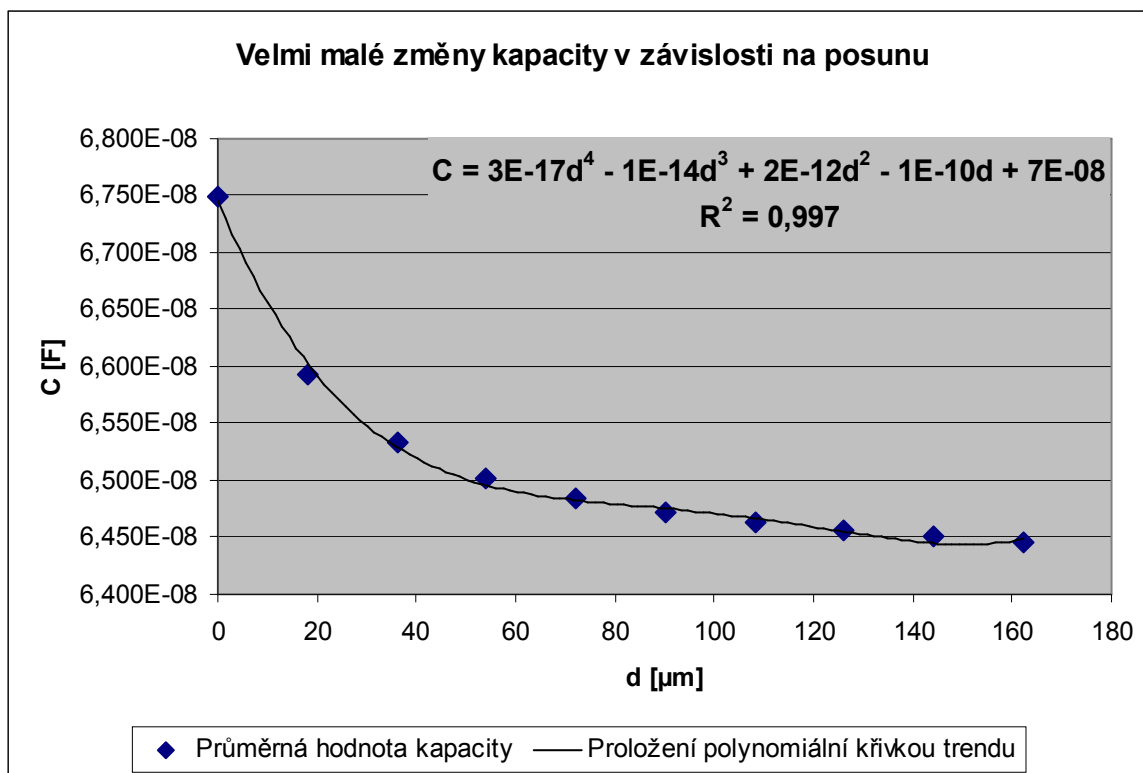
Funkci trendu lze zapsat jako vztah (69). Derivujeme podle C viz. vztahy (70) a (71). Postupnou úpravou dojdeme ke vztahu (72), do něhož dosadíme hodnoty. Nejmenší možná změna $\Delta C_{\min} = 8$ nF. Stejným způsobem dosáhneme i výsledků pro další dva průběhy.

$$C = -a_3 d^3 + a_2 d^2 - a_1 d + b \quad (69)$$

$$dC = -a_3 d d^3 + a_2 d d^2 - a_1 d d + b \quad (70)$$

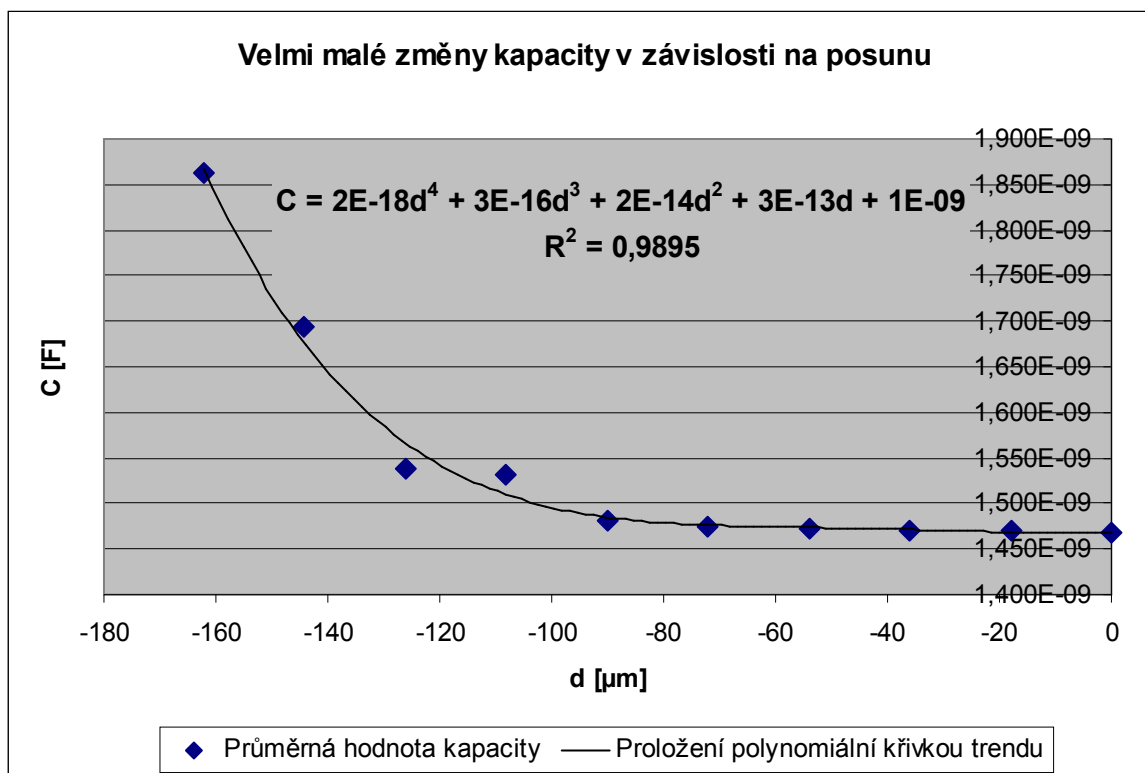
$$\frac{dC}{C} = \frac{-a_3 d d^3 + a_2 d d^2 - a_1 d d + b}{-a_3 d^3 + a_2 d^2 - a_1 d + b} \quad (71)$$

$$\Delta C_{\min} = \frac{-a_3 d^2 + a_2 d - a_1}{-a_3 d + a_2 - a_1 + \frac{b}{d}} \quad (72)$$



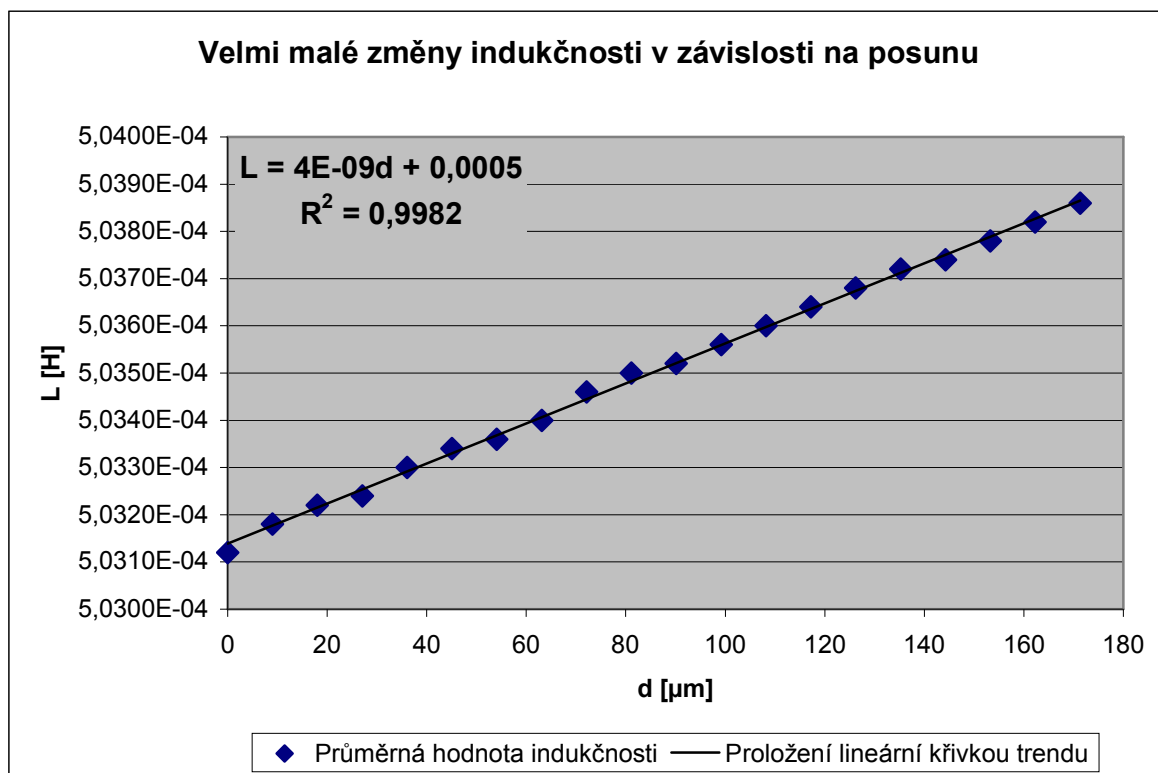
Obr. 73. Naměřené změny kapacity – oddalování hrotu - 100 kHz

Pro průběh na Obr. 73 platí, že $\Delta C_{\min} = 26 \text{ nF}$. Pro průběh na Obr. 74 platí, že $\Delta C_{\min} = 5 \text{ nF}$.



Obr. 74. Naměřené změny kapacity – přibližování hrotu - 1 MHz

9.2 Výsledky měření velmi malých změn indukčnosti můstkovou metodou



Obr. 75. Naměřené změny indukčnosti – roztahování pružiny - 1 MHz

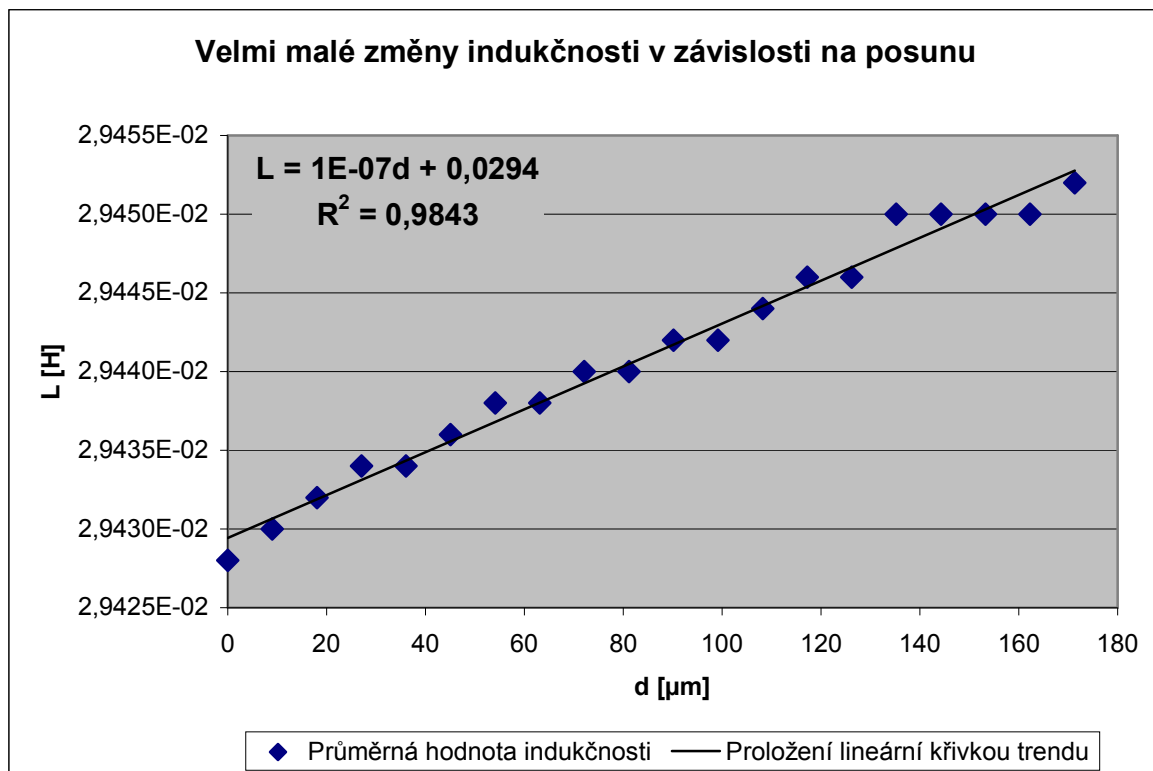
Nejmenší možné měřitelné změny indukčnosti ΔL_{\min} [H] v závislosti na daném posuvu zjistíme pomocí derivace funkce křivky, která prokládá naměřené body. Funkci regresní křivky lze zapsat podle vztahu (73). Funkci derivujeme podle L (74). Postupnou úpravou vztahu (74) dojdeme ke konečnému vztahu (75). Krok $d = 9\mu\text{m}$ a rychlost $= 100\,000$ Counts/s jsou stejné pro všechny průběhy (Obr. 75, Obr. 76 a Obr. 77).

$$L = a d + b \quad (73)$$

$$d L = a d d + b \quad (74)$$

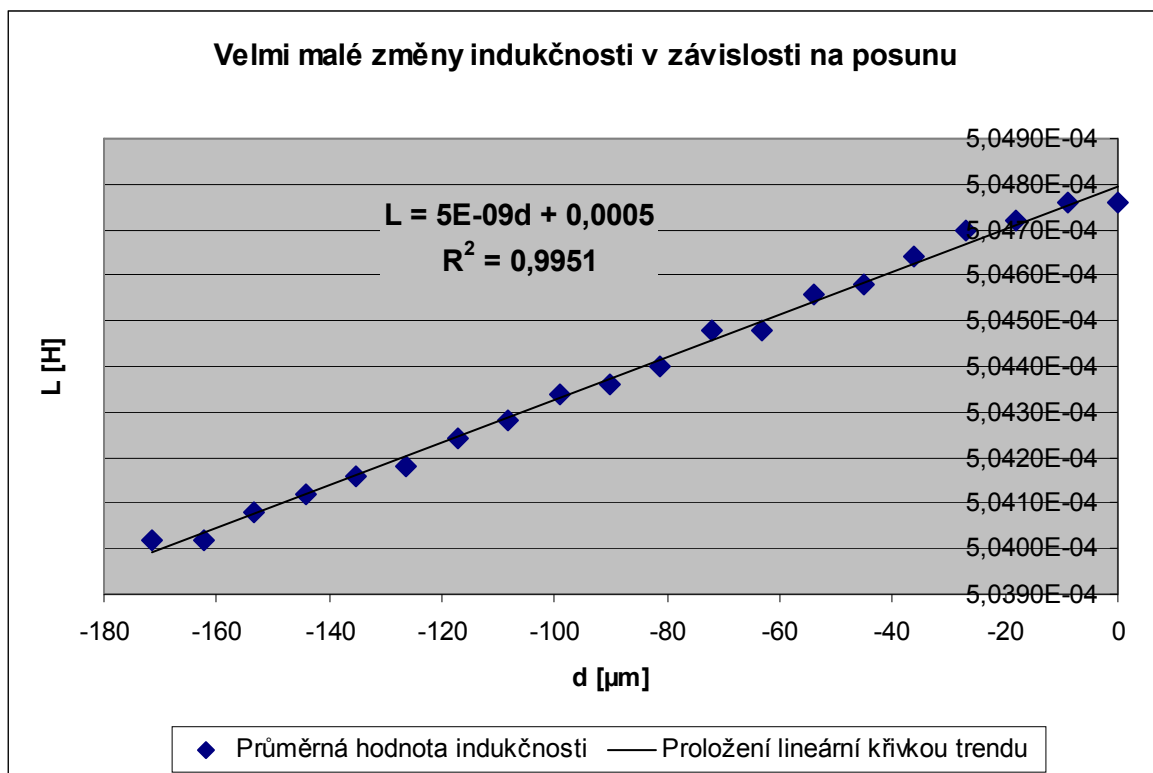
$$\frac{d L}{L} = \frac{a d d + b}{a d + b} \Rightarrow \Delta L_{\min} = \frac{a}{a + \frac{b}{d}} \quad (75)$$

Po dosazení ($d = 9 \cdot 10^{-6}$, $a = 4 \cdot 10^{-9}$, $b = 5 \cdot 10^{-4}$) dostaneme hodnotu $\Delta L_{\min} = 8 \mu\text{H}$.



Obr. 76. Naměřené změny indukčnosti – roztahování pružiny - 100 kHz

Podle vztahu (75) dosadíme hodnoty z rovnice křivky trendu a dostaneme přibližnou hodnotu $\Delta L_{\min} = 4 \mu H$. Pro graf na Obr. 77 po dosazení platí: $\Delta L_{\min} = 10 \mu H$.



Obr. 77. Naměřené změny indukčnosti – stlačování pružiny - 1 MHz

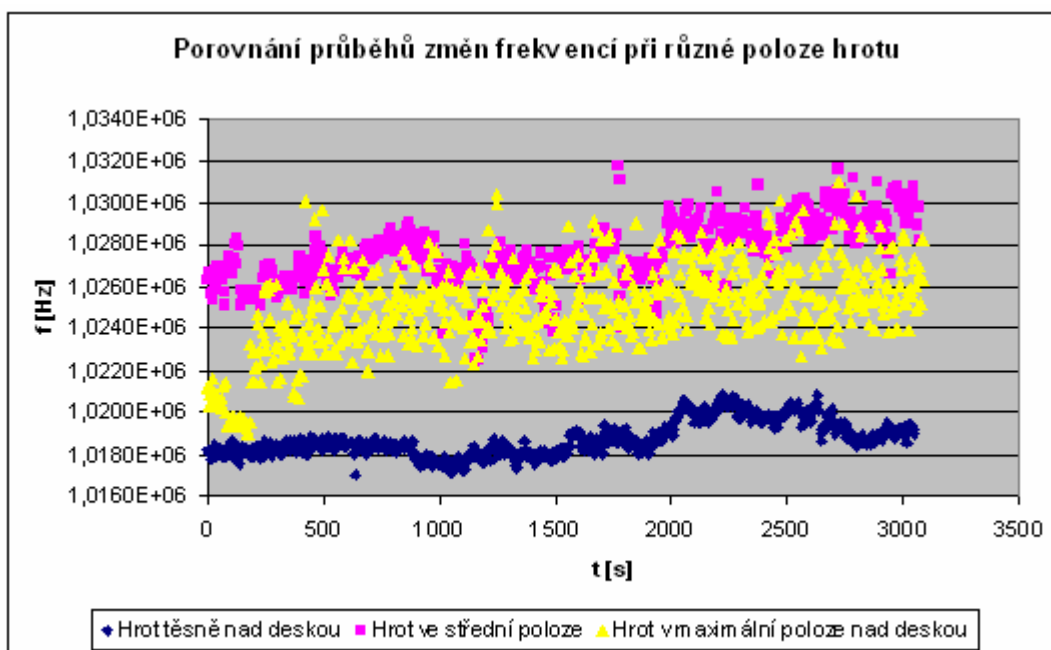
9.3 Výsledky měření metodou rozlad'ování oscilátoru

Shrneme si nejdůležitější výsledky měření zahrnující zejména měření změny frekvence f v čase t bez použití posuvu, měření stability oscilátoru a experimentální měření změn frekvence při posuvu plochy vůči hrotu připojenému ke kondenzátoru v obvodu oscilátoru. Posuv (d) = 1500 Counts (9 μm) a rychlost = 100 000 Counts/s.

9.3.1 Opakované měření frekvence bez použití mikroposuvu

Cílem tohoto měření bylo zjistit, jak se oscilátor v součinnosti s připojeným hrotem chová, když nastavíme pevnou vzdálenost hrotu od plochy a měříme frekvenci f [Hz] v čase t [s]. Byla provedena 3 měření (hrot těsně u plochy, hrot ve střední poloze, hrot v max.poloze). Frekvence oscilátoru byla nastavena přibližně na 1 MHz. Měření probíhalo tak, že každých 5 sekund se provedlo 30 opakovaných měření, která se zprůměrovala. Měření probíhalo cca 1 hodinu.

Porovnáním výsledků všech tří měření bylo zjištěno, že největší stability dosáhneme při poloze hrotu těsně u pohyblivé desky. Průměrná relativní chyba tohoto měření je 0,04 % (pro střední polohu = 0,1 % a pro max. vertikální polohu = 0,06%). Bylo dosaženo také nejmenší celkové změny frekvence po dobu měření (4 kHz) – frekvence se měnila od 1,017 MHz do hodnoty přibližně 1,021 MHz. Porovnání všech tří měření viz. obrázek (Obr. 78).



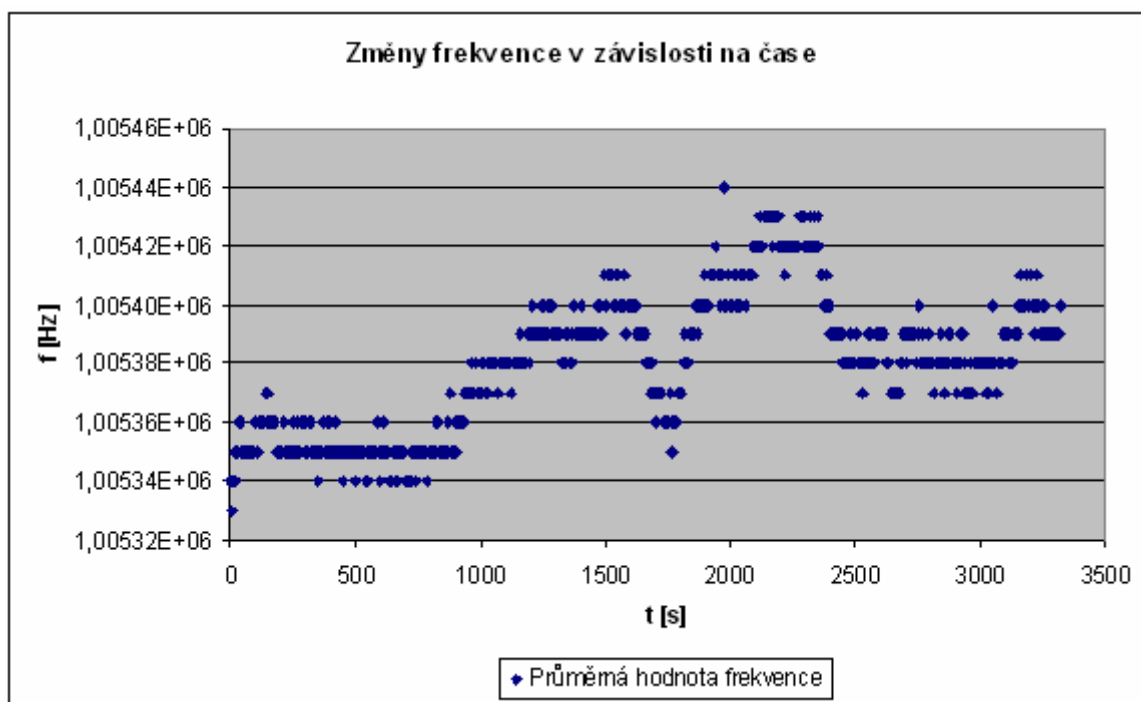
Obr. 78. Porovnání průběhů změn frekvence při různé poloze hrotu vůči ploše

9.3.2 Měření stability oscilátoru

Cílem tohoto měření bylo zjistit, k jakým změnám frekvence bude docházet, pokud necháme oscilátor zahřát na pokojovou teplotu. Oscilátor se nechal připojením k napájení zahřívát na pokojovou teplotu (cca 1 hodinu).

Měření probíhalo tak, že každých 5 sekund se 30-krát změřila frekvence (z těchto hodnot se spočetla směrodatná odchylka) a poté se zprůměrovala. Měření trvalo opět přibližně 1 hodinu.

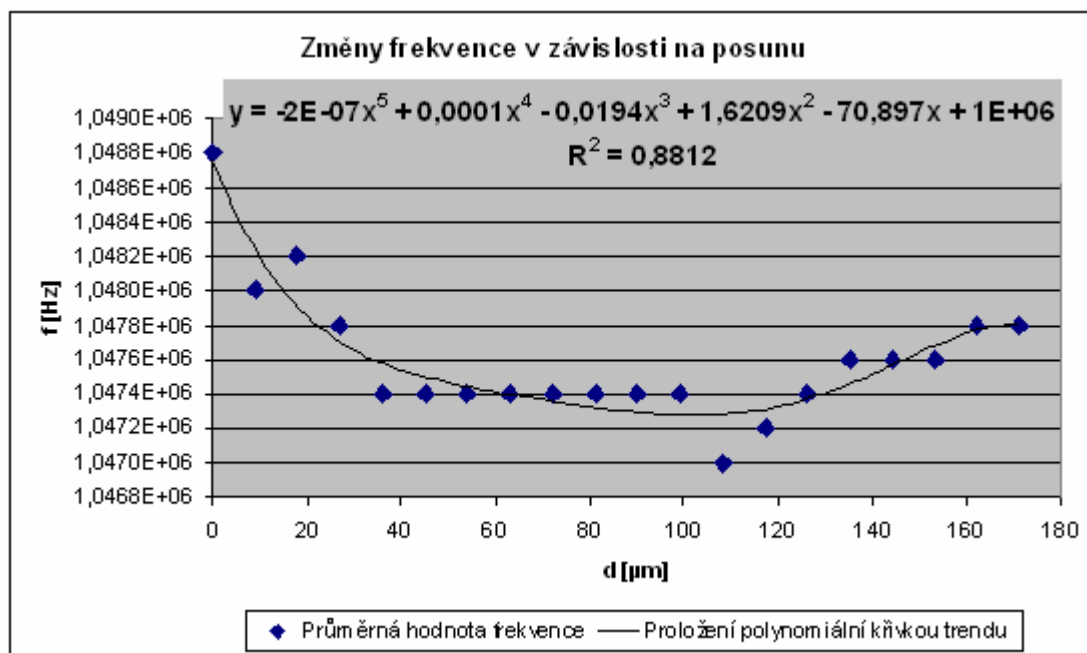
Rozdíl mezi nejnižší naměřenou a nejvyšší naměřenou frekvencí je 0,11 kHz. Oscilátor se podle průběhu na Obr. 79 nechová příliš stabilně. Průběh je charakteristický několika špičkami, ale především nestabilním průběhem (průběh by měl být ideálně lineární, ve skutečnosti by se k téměř lineárnímu průběhu měl přibližovat).



Obr. 79. Průběh změn frekvence při zahřátém oscilátoru

9.3.3 Rozladování frekvence oscilátoru změnou kapacity

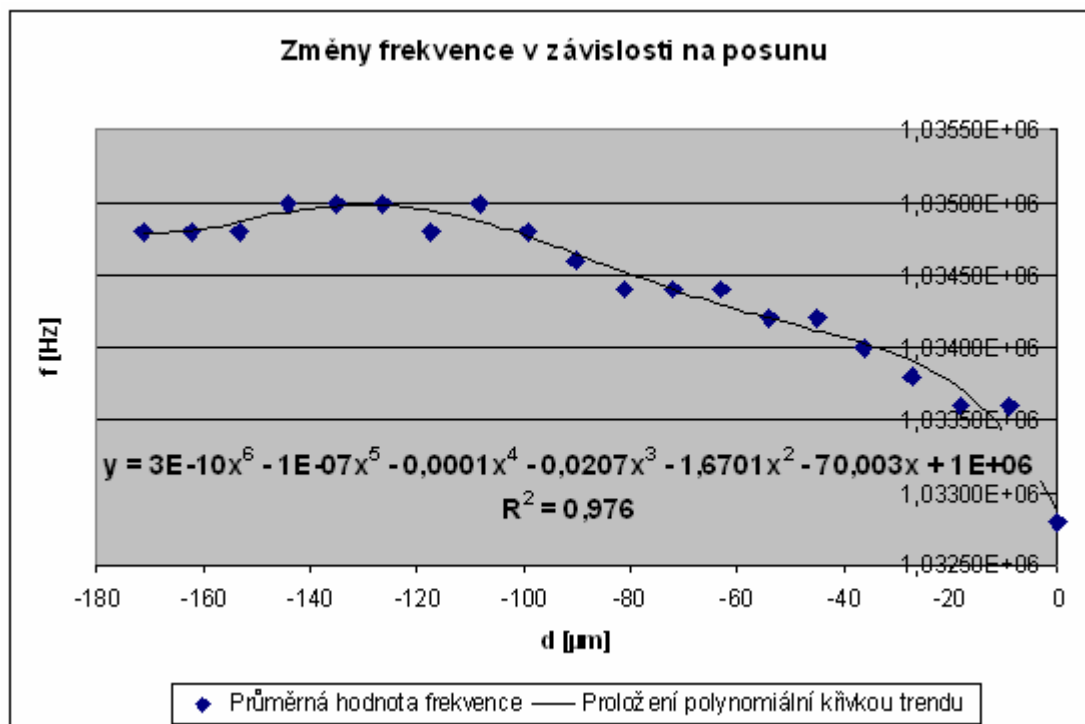
Cílem tohoto měření bylo zjistit, jakou nejmenší změnu frekvence (tzv. frekvenční zdvih) jsme schopni za daných podmínek a s daným vybavením změřit. Byly provedeny 2 typy měření, a to měření s oddalováním pohyblivé plochy vůči hrotu a přibližování pohyblivé plochy vůči hrotu. Podrobný popis postupu byl popsán již v odstavci 8.1. Vycházelo se z výsledků předchozích měření, že nejlepších výsledků můžeme dosáhnout tehdy, pokud je hrot co nejblíže ploše. V každém kroku bylo provedeno 30 opakování měření, z nichž byl počítán průměr a směrodatná odchylka. Průběh při oddalování hrotu viz. Obr. 80.



Obr. 80. Změny frekvence při oddalování plochy vůči hrotu

Z průběhu je patrné, že frekvence značně kolísala, což dokazuje i křivka trendu, která prokládá naměřená data se spolehlivostí pouze 0,88. Relativní chyba měření (průměrná) byla přibližně 0,3 % a absolutní chyba se pohybovala přibližně v relacích $2,73 \cdot 10^5 \text{ [Hz]} = 273 \text{ kHz}$, což byla vzhledem k hodnotě přibližně 1 MHz značná chyba.

Potvrdila se tedy úvaha podložená zkušebními měřeními, že s větší vzdáleností hrotu od plochy (oddálením) se odchylka zvyšuje a velmi malé změny frekvence jsou v podstatě neměřitelné. Průběh při přibližování hrotu viz. Obr. 81.



Obr. 81. Změny frekvence při přibližování plochy vůči hrotu

Křivka prokládá data s mnohem vyšší spolehlivostí (cca 0,98) než v předchozím případě, což potvrzuje výsledky zkušebního měření, kdy pokud byl hrot v těsném kontaktu s plochou, byla odchylka měření nejmenší. Relativní chyba měření (průměrná) je rovna 0,34 %. Absolutní chyba (průměrná) průměrné hodnoty frekvence je přibližně $3,52 \cdot 10^5 \text{ [Hz]} = 352 \text{ kHz}$, což je vzhledem k hodnotě frekvence 1 MHz chyba velmi vysoká.

Výsledky měření obou průběhů naznačují, že velmi malé změny frekvence jsou v takovém případě neměřitelné, ale vzhledem k vyšší spolehlivosti, kterou určuje křivka trendu si naznačíme vyjádření frekvenčního zdvihu alespoň pro tento typ měření.

Vzhledem k tomu, že neznáme zapojení oscilátoru, nevíme jak je zapojen LC členek. Budeme předpokládat, že se jedná o paralelní LC obvod. Kapacita je do měření aplikována jako pohyblivá deska, kterou jsme použili u můstkové metody. Kapacita (pohyblivá deska) je do obvodu zapojena paralelně (jeden konec tvoří hrot, druhý konec zapojen na společnou zem).

Použijeme základní vztah pro rezonanční frekvenci paralelního LC členu viz. vztah (59). Paralelní spojení dvou kondenzátorů je rovno vztahu (76), kde C_0 je kapacita kondenzátoru v obvodu oscilátoru a C' můžeme brát jako kapacitu zjištěnou můstkovou metodou. Předpokládáme, že $C' \ll C_0$. Frekvence f_0 = frekvence, kterou rozladíme.

$$C = C_0 + C' \quad (76)$$

Po rezonanční frekvenci paralelního LC obvodu platí:

$$f' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L(C_0 + C')}} \quad (77)$$

Úpravou dostaneme:

$$f' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_0 \left(1 + \frac{C'}{C_0}\right) L}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC_0}} \sqrt{\frac{1}{\left(1 + \frac{C'}{C_0}\right)}} \quad (78)$$

Celkově pro frekvenci platí:

$$f = f_0 \cdot f' \Rightarrow f = f_0 \left(1 + \frac{C'}{C_0}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (79)$$

Po úpravě rozvinutím v řadu:

$$f = f_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{C'}{C_0}\right) \quad (80)$$

Úpravou obou stran dostaneme konečný vztah pro frekvenční zdvih Δf [Hz]:

$$\frac{f - f_0}{f_0} = 1 - \frac{1}{2} \frac{C'}{C_0} \quad (81)$$

ZÁVĚR

V této diplomové práci s názvem „Měření velmi malých kapacit a indukčností“ byl vytvořen přehled nejpoužívanějších metod, které se používají pro měření kapacit a indukčností. V praktické části byly pro měření velmi malých kapacit a indukčností aplikovány dvě metody, a to metoda můstková a metoda měření velmi malých změn frekvence založená na rozladování obvodu oscilátoru změnou kapacity.

Experimentální ověřování můstkové metody pro měření velmi malých změn kapacit a její postupná optimalizace ukázala, že nejmenších možných změn kapacity ΔC_{\min} jsme schopni dosáhnout při frekvenci 1 MHz, což je maximální frekvence, na které dokáže LCR meter měřit. Byly provedeny dva základní typy ostrého měření, a to měření s oddalováním plochy vůči hrotu a měření s přibližováním plochy vůči hrotu. Nejlepšího výsledku při oddalování bylo dosaženo při frekvenci 1 MHz, a to $\Delta C_{\min} = 8 \text{ nF}$. Při nižší frekvenci (100 kHz) bylo dosaženo minimální změny $\Delta C_{\min} = 26 \text{ nF}$. Nejlepšího výsledku při přibližování jsme dosáhli opět při frekvenci 1 MHz, a to $\Delta C_{\min} = 5 \text{ nF}$.

Můstkovou metodou měření velmi malých změn indukčností bylo zjištěno, že nejmenší možné změny indukčnosti při roztahování pružiny odpovídají $\Delta L_{\min} = 4 \mu\text{H}$ (při 100 kHz) a $\Delta L_{\min} = 8 \mu\text{H}$ (při 1 MHz). Měřením stlačováním pružiny byla vypočtena hodnota $\Delta L_{\min} = 10 \mu\text{H}$ (při 1 MHz).

Měřením velmi malých změn frekvence metodou rozladování oscilátoru bylo zjištěno, že velmi malé změny frekvence za dostupných podmínek a vybavení nejsme schopni měřit, a to z důvodu značné nestability oscilátoru již při zkušebním měření, kdy byla opakovaně měřena frekvence oscilátoru v závislosti na čase. Docházelo ke značnému kolísání frekvence a špičkám. Důvodem by mohl být nekvalitní oscilátor nebo velký vliv okolního prostředí na měřicí proces (zejména kolísání teploty).

Při zkušebním měření byl též zjištěno, že nejmenší průměrné relativní chyby (0,04%) bylo dosaženo tehdy, pokud byl hrot v těsném kontaktu s plochou. Průběh frekvence vykazoval v porovnání s dvěma ostatními (hrot ve střední poloze, hrot v maximální poloze) nejmenší odchylky, a tudíž i nejmenší chyby.

Změnou frekvence oscilátoru oddalováním od plochy byla vypočtena průměrná absolutní chyba cca 270 kHz, což vzhledem k vstupní frekvenci 1 MHz byla chyba velmi

vysoká, stejně tak i při přibližování plochy vůči hrotu (průměrná absolutní chyba cca 350 kHz).

Můstková metoda se v celkovém hodnocení projevila jako metoda efektivnější a přesnější. Metoda s oscilátorem se projevila jako metoda, která byla dopředu označena jako experimentální s tím, že její funkčnost a efektivnost hodně záleží na konstrukci oscilátoru a okolních podmínkách více než u metody můstkové (zejména stálost teploty).

Pro metodu s oscilátorem bychom mohli pro další pokračování práce doporučit zejména volbu jiného oscilátoru, analyzovat funkčnost metody z pohledu změn frekvence vlivem změn indukčnosti, jejíž analýza je obsahem přílohy PII. Dále bychom z výsledků zkušebního měření mohli doporučit měřicí hrot přímo propojit s plochou (přes vhodný rezistor spojený do série) a nastavit velmi malý posuv (řádově např. stovky countů) a zjistit funkčnost metody při takové konfiguraci.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

In this diploma thesis, entitled "Measurement of very small capacities and inductances" was created by an overview of the most common methods used to measure capacity and inductance. The practical part for measuring very small capacities and inductances applied two methods, and the method of bridge and method for measuring very small changes in frequency based on untune of oscillator circuit by capacity.

Experimental verification of bridge methods for measuring very small changes in capacity and the gradual optimization showed that the smallest possible changes ΔC_{\min} capacity we are able to achieve a frequency of 1 MHz, which is the maximum frequency at which the LCR meter can measure. Were carried out two basic types of sharp measurements, and delaying the measurement area to the tip and measuring the area of convergence towards the tip. The best result was achieved when zooming at a frequency of 1 MHz, and $\Delta C_{\min} = 8 \text{ nF}$. At a lower frequency (100 kHz) was achieved minimal changes $\Delta C_{\min} = 26 \text{ nF}$. For best results we have achieved in bringing back at a frequency of 1 MHz, and $\Delta C_{\min} = 5 \text{ nF}$.

Bridge method of measuring very small changes in inductance, it was found that the smallest possible change in the inductance of the spring stretching $\Delta L_{\min} = 4 \mu\text{H}$ (at 100 kHz) and $\Delta L_{\min} = 8 \mu\text{H}$ (at 1 MHz). Measurement of compression spring value was calculated $\Delta L_{\min} = 10 \mu\text{H}$ (at 1 MHz).

Measuring very small changes in frequency oscillator by untune method was found that a very small frequency changes in terms of available equipment and we are not able to measure, because of considerable instability in the oscillator is already in the test measurements, which were repeatedly measured oscillator frequency versus time. There were significant variations in frequency and peaks. The reason could be poor oscillator or a large environmental influence on the measuring process (temperature fluctuations).

The test measurement was also found that the smallest average relative error (0.04%) was achieved when the tip was in close contact with the surface. Course frequency shown in comparison with two others (the tip of the middle position, the maximum position of the tip), the smallest deviation, and hence the smallest error.

By changing the frequency of the oscillator delaying the area was calculated from the average absolute error of about 270 kHz, which is due to the input frequency of 1 MHz,

the error was very high, as well as in areas closer to the tip (mean absolute error of about 350 kHz).

Bridge method in the overall evaluation method proved efficient and accurate. Method oscillator is shown as the method that was described as an experimental forward with the fact that its functionality and efficiency much depends on the oscillator design and environmental conditions over the bridge method (in particular, temperature stability).

For the method with the oscillator, we can continue to further the work recommended in particular the choice of another oscillator, the method to analyze the performance in terms of changes of frequency due to changes in inductance, the analysis is contained in Annex PII. In addition, we test the results of measurement can recommend measuring tip directly linked to the surface (through a suitable resistor connected in series) and set a very small displacement (eg the order of hundreds of county) to determine the operational methods in such a configuration.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Vlček, Jiří. *Základy elektrotechniky*. 1.vyd. Praha: BEN- technická literatura, 2003. 224s. s.19. ISBN 859-40-1142-156-2.
- [2] Bezděk, Miloslav. *Elektronika*. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 271s. s.38-39. ISBN 80 – 7232 – 171 – 4.
- [3] Vlček, Jiří. *Základy elektrotechniky*. 1.vyd. Praha: BEN- technická literatura, 2003. 224s. s.26. ISBN 859-40-1142-156-2.
- [4] Vlček, Jiří. *Základy elektrotechniky*. 1.vyd. Praha: BEN- technická literatura, 2003. 224s. s.27. ISBN 859-40-1142-156-2.
- [5] Vlček, Jiří. *Základy elektrotechniky*. 1.vyd. Praha: BEN- technická literatura, 2003. 224s. s.27. ISBN 859-40-1142-156-2.
- [6] Vlček, Jiří. *Základy elektrotechniky*. 1.vyd. Praha: BEN- technická literatura, 2003. 224s. s.28. ISBN 859-40-1142-156-2.
- [7] Vlček, Jiří. *Základy elektrotechniky*. 1.vyd. Praha: BEN- technická literatura, 2003. 224s. s.28. ISBN 859-40-1142-156-2.
- [8] Bezděk, Miloslav. *Elektronika*. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 271s. s.42. ISBN 80 – 7232 – 171 – 4.
- [9] Bezděk, Miloslav. *Elektronika*. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 271s. s.43. ISBN 80 – 7232 – 171 – 4.
- [10] Bezděk, Miloslav. *Elektronika*. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 271s. s.43-44. ISBN 80– 7232 –171 – 4.
- [11] Bezděk, Miloslav. *Elektronika*. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 271s. s.44-45. ISBN 80– 7232 –171 – 4.
- [12] Bezděk, Miloslav. *Elektronika*. 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 2004. 271s. s.46-47. ISBN 80– 7232 –171 – 4.
- [13] Čítače [online]. [cit. 2011-04-04]. Dostupný z WWW:
<http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektronika/kap6/6_7.html>.
- [14] Agilent Technologies. VEE Pro: Practical Graphical Programming, 2008. Preface. VII.

[15] W4000B – Grafické vývojové prostředí Agilent VEE 9.2 [online]. [cit. 2011-03-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.htest.cz/index.php?produkt=480>>.

[16] Kondenzátory [online]. Dostupný z WWW:

<http://www.copsu.cz/mikrop/didakticka_pomucka/elektronicke_soucastky/kondenzatory.html>.

[17] Elektrické pole [online]. Dostupný z WWW:

<http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/el_pole/el_napeti.html>.

[18] 3 [online]. Dostupný z WWW:

<<http://inter.elektronika.sweb.cz/3.htm>>.

[19] Techmania – Edutorium – Exponáty [online]. Dostupný z WWW:

<http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74f8696e612061206d61676e657469736d7573h&key=484>.

[20] 3 [online]. Dostupný z WWW:

<http://www.ddp.fmph.uniba.sk/~koubek/UT_html/G3/kap3/3-5.htm>.

[21] Keramický kondenzátor, RM 5,08, 100 nF / 50V / -20/80% >> shop.fkt.cz [online]. Dostupný z WWW:

<<http://shop.fkt.cz/keramicky-kondenzator-rm-508-100nf-50v-2080-ck100n+dp42610/>>.

[22] ESI 3300 μ F/50V HC SAMWHA Kondenzátor elyt 85 °C Snap-in 22x30 mm – SOS electronic [online]. Dostupný z WWW:

<<http://www.soselectronic.cz/?str=371&artnum=70044>>.

[23] Kitman electronics – Výrobky, stavebnice, moduly, DPS, součástky elektrotechniky, radiotechniky, spe – Otočný kondenzátor [online]. Dostupný z WWW:

<<http://e-prodavac.cz/kitman/otocny-kondenzator.html>>.

[24] CK1206 47N/50V X7R (905-082) HITANO – GM Electronic Slovakia [online]. Dostupný z WWW:

<<http://www.gme.sk/sk/ck1206-47n-50v-x7r-p905-082.html>>.

[25] Moodle – Gymnázium Cheb [online]. Dostupný z WWW:

<<http://moodle.gymcheb.cz/login/index.php>>.

[26] Andrea Ronešová – Elmag levitace [online]. Dostupný z WWW:

<<http://home.zcu.cz/~ronesova/index.php?menuitem=levitace>>.

[27] Cívka s železným jádrem – tlumivka – elektrotechnická značka [online]. Dostupný z WWW: <<http://pepinator.tym.cz/online/fyzika/elektrotechnicke-znacky/civka-s-zeleznym-jadrem-tlumivka.php>>.

[28] 5.10 Riešené úlohy a príklady (5.10.6, 5.10.7, 5.10.8, 5.10.9, 5.10.10) [online]. Dostupný z WWW: <<http://tonko.net23.net/?q=node/172>>.

[29] Náhradné schémy, stratový uhol a stratový činiteľ, činiteľ kvality [online]. Dostupný z WWW: <<http://tonko.net23.net/?q=node/166>>.

[30] HellWEB – Elektrické měření [online]. Dostupný z WWW:

<<http://hellweb.loose.cz/index.php?page=school&subpage=elm&id=6>>.

[31] HellWEB – Elektrické měření [online]. Dostupný z WWW:

<<http://hellweb.loose.cz/index.php?page=school&subpage=elm&id=6>>.

[32] HellWEB – Elektrické měření [online]. Dostupný z WWW:

<<http://hellweb.loose.cz/index.php?page=school&subpage=elm&id=6>>.

[33] HellWEB – Elektrické měření [online]. Dostupný z WWW:

<<http://hellweb.loose.cz/index.php?page=school&subpage=elm&id=9>>.

[34] HellWEB – Elektrické měření [online]. Dostupný z WWW:

<<http://hellweb.loose.cz/index.php?page=school&subpage=elm&id=9>>.

[35] www.gorkyland.ic.cz [online]. Dostupný z WWW:

<www.gorkyland.ic.cz/mereni/14a.doc>.

[36] www.gorkyland.ic.cz [online]. Dostupný z WWW:

<www.gorkyland.ic.cz/mereni/14a.doc>.

[37] RENTALTEX.CZ – Příslušenství [online]. Dostupný z WWW:

<<http://rentaltex.cz/cz/prislusenstvi>>.

[38] AMC GmbH:: GPIB-Kabel + Zubehor [online]. Dostupný z WWW:

<<http://www.amc->

[systeme.de/de/produkte/schnittstellen___produkte__zubehoer/gpib_produkte_ieee488.2/gpib_kabel__zubehoer.html](http://www.amc-systeme.de/de/produkte/schnittstellen___produkte__zubehoer/gpib_produkte_ieee488.2/gpib_kabel__zubehoer.html)>.

[39] Agilent 53131A, 53132A, 53181A Universal/RF Counters – TestEquity [online]. Dostupný z WWW:

<<http://www.testequity.com/products/39/>>.

[40] Sušárna MEMMERT UNP 200 Perfect s přirozenou cirkulací – s přirozenou cirkulací vzduchu [online]. Dostupný z WWW:

<http://eshop.merci.cz/katalog/zbozi/popis_zbozi.asp?tisk=1&klic_ma=17156>.

[41] MEMMERT >> Universele Oven >> UNP 200 [online]. Dostupný z WWW:

<<http://www.klima->

[testtechnik.nl/leveranciers/memmert/Universele_ovens.php?we_objectID=515](http://www.klima-testtechnik.nl/leveranciers/memmert/Universele_ovens.php?we_objectID=515)>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ASRL	Address Space Randomization Layout = automatické přidělení adres přístrojům
ATA	Advanced Technology Attachment = sběrnice pro připojení pevných disků
BER	Bit Error Rate = bitová chybovost
ČSN	Česká soustava norem (neoficiální označení)
DPS	Deska plošného spoje
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory = mazatelná paměť
EMI	Electromagnetic Interference = elektromagnetické rušení
EMS	Electromagnetic Susceptibility = odolnost proti elektromagnetickému záření
ERR	Status platnosti (správnosti) příkazu pro servomotor C-862 Mercury II
GND	Ground = uzemnění
GPIO	General Purpose Interface Bus = interface pro propojení přístrojů s počítačem
GUI	Graphical User Interface = grafické uživatelské rozhraní
HDD	Pevný disk
HP	Hewlett-Packard = americká firma zabývající se informačními technologiemi
I/O	Input/Output = vstup/výstup
IDE	Integrated Drive Electronics = rozhraní pevných disků
IEC	International Electrotechnical Commission = standardizační organizace
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers = stand.org. pro elektrotechniku
IMS	International Measurement System = označení pro GPIO v bývalém ČSSR
ISO	International Organization for Standardization = standardizační organizace
LCR	Zkratka pro LCR meter (měřicí přístroj)
NI	Nulový indikátor (galvanometr)
PC	Personální (osobní) počítač

PLC	Programmable Logic Controller = programovatelný automat
RAD	Radián = jednotka úhlu
RLC	Zkratka pro rezonanční obvod (rezistor R-indukčnost L- kondenzátor C).
SMD	Surface Mount Device = označení pro součástky osazované povrchovou montáží
SMT	Surface Mount Technology = technologie pro povrchovou montáž součástek
STA	Status = status činnosti servomotoru
TTL	Transistor – Transistor – Logic = standard pro integrované obvody
VA	Voltampér (např. VA metoda měření kapacit)
VEE	Visual Engineering Environment = programové prostředí VEE Pro

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Značka kondenzátoru.....	18
Obr. 2. Ekvipotenciální hladiny	20
Obr. 3. Reálný kondenzátor	22
Obr. 4. Přechodová křivka nabíjení kondenzátoru	24
Obr. 5. Křivky nabíjení a vybíjení kondenzátoru	25
Obr. 6. Časový průběh I a U na C v obvodu střídavého proudu.....	25
Obr. 7. Fázorový diagram RLC obvodu	27
Obr. 8. Keramický kondenzátor	28
Obr. 9. Elektrolytický kondenzátor	29
Obr. 10. Otočný vzduchový kondenzátor	30
Obr. 11. SMD kondenzátory.....	31
Obr. 12. Elektrotechnická značka cívky	34
Obr. 13. Cívka bez jádra	36
Obr. 14. Cívka s železným jádrem.....	37
Obr. 15. Průběh napětí a proudu na cívce v obvodu střídavého proudu.....	39
Obr. 16. Zapojení a fázorový diagram paralelního zapojení RL obvodu	40
Obr. 17. Zapojení a fázorový diagram sériového zapojení RL obvodu	40
Obr. 18. SMD cívka.....	41
Obr. 19. Schéma pro měření kapacity Ohmovou metodou.....	44
Obr. 20. Metoda AVAL.....	44
Obr. 21. Metoda AMONT	44
Obr. 22. Schéma srovnávací napěťové metody.....	46
Obr. 23. Schéma srovnávací proudové metody.....	47
Obr. 24. De Sautyho můstek.....	48

Obr. 25. Wienův můstek	51
Obr. 26. Scheringův můstek.....	53
Obr. 27. Schéma metody pro měření malých indukčností.....	55
Obr. 28. Schéma metody pro měření velkých indukčností.....	56
Obr. 29. Andersonův můstek	56
Obr. 30. Maxwell-Wienův můstek.....	57
Obr. 31. Hayův můstek.....	58
Obr. 32. Owenův můstek	58
Obr. 33. LCR meter HP 4284A - přední strana	62
Obr. 34. LCR meter Agilent 4263B – přední strana.....	65
Obr. 35. GPIB kabel.....	66
Obr. 36. Detail koncovky GPIB kabelu.....	67
Obr. 37. C-862 Mercury II – celkový pohled.....	70
Obr. 38. C-862 Mercury II – přední panel.....	72
Obr. 39. C-862 Mercury II – zadní panel.....	73
Obr. 40. Čítač Agilent 53131A	74
Obr. 41. Sušárna Universal oven Model UNP 200.....	77
Obr. 42. Rozměry sušárny.....	77
Obr. 43. Logo VEE Pro.....	80
Obr. 44. Hlavní okno programu Agilent VEE Pro 9.2 s uživatelským programem	81
Obr. 45. Položka Display hlavní lišty programu Agilent VEE Pro 9.2.....	83
Obr. 46. Možnosti nastavení objektu.....	84
Obr. 47. Ukázkový program pro výpis textového řetězce na výstup	84
Obr. 48. Objekt To File.....	85
Obr. 49. Přidání vstupu k objektu To File.....	85

Obr. 50. Výběr transakce a volba formátu.....	86
Obr. 51. Konstrukce jednoduchého programu pro zápis do souboru.....	86
Obr. 52. Výstup programu se zapsanými hodnotami v textovém souboru pokus.txt.....	86
Obr. 53. Pohled na měřicí pracoviště v laboratoři elektromagnetické kompatibility.....	87
Obr. 54. Blokové schéma měřicího pracoviště pro měření můstkovou metodou.....	88
Obr. 55. Elektromechanické schéma měřicího pracoviště.....	89
Obr. 56. Elektromechanická část měřicího pracoviště v reálném pohledu.....	89
Obr. 57. Blokové schéma měřicího pracoviště pro metodu s použitím oscilátoru	90
Obr. 58. Instrument manager	91
Obr. 59. Nastavení adresy měřicího přístroje.....	92
Obr. 60. Načítání hodnot z měřicího přístrojů.....	93
Obr. 61. Panel vstupních nastavení měřicího procesu.....	95
Obr. 62. Ovládací panel uživatelského programu.....	96
Obr. 63. Jehlový hrot	100
Obr. 64. Tenký měděný drát	100
Obr. 65. Tenký měděný vlas.....	100
Obr. 66. Porovnání citlivosti různých hrotů bez nerovnosti povrchu	101
Obr. 67. Porovnání citlivosti různých hrotů s nerovností povrchu.....	102
Obr. 68. Konečné schéma můstkové metody měření kapacit.....	102
Obr. 69. Konečné schéma můstkové metody měření indukčností.....	104
Obr. 70. Zapojení obvodu v reálném pohledu – boční pohled	105
Obr. 71. Konečné schéma metody s oscilátorem.....	106
Obr. 72. Naměřené změny kapacity – oddalování hrotu – 1 MHz	107
Obr. 73. Naměřené změny kapacity – oddalování hrotu – 100 kHz.....	108
Obr. 74. Naměřené změny kapacity – přibližování hrotu – 1 MHz	108

Obr. 75. Naměřené změny indukčnosti – roztahování pružiny – 1 MHz.....	109
Obr. 76. Naměřené změny indukčnosti – roztahování pružiny – 100 kHz.....	110
Obr. 77. Naměřené změny indukčnosti – stlačování pružiny – 1 MHz.....	110
Obr. 78. Porovnání průběhů změn frekvence při různé poloze hrotu vůči ploše	111
Obr. 79. Průběh změn frekvence při zahřátém oscilátoru	112
Obr. 80. Změny frekvence při oddalování plochy vůči hrotu.....	113
Obr. 81. Změny frekvence při přibližování plochy vůči hrotu.....	114

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Parametry přístroje HP 4284 A	61-62
Tab. 2. Parametry přístroje Agilent 4263B	63-64
Tab. 3. Přehled parametrů GPIB rozhraní	67-68
Tab. 4. Přehled parametrů servomotoru C-862 Mercury II	71-72
Tab. 5. Seznam prvků předního panelu C-862 Mercury II	72
Tab. 6. Seznam prvků zadního panelu C-862 Mercury II	73
Tab. 7. Parametry čítače Agilent 53131A	74-75
Tab. 8. Parametry sušárny Universal oven Model UNP 200	75-76
Tab. 9. Softwarové požadavky prostředí Agilent VEE Pro 9.2	80
Tab. 10. Hardwarové požadavky prostředí Agilent VEE Pro 9.2	80-81
Tab. 11. Tabulka přiřazení adres jednotlivým servomotorům	94
Tab. 12. Význam nastavitelných objektů na hlavním panelu programu	97
Tab. 13. Přiřazení znamének pro posuv plochy v dané ose	97
Tab. 14. Přehled použitých makroinstrukcí v programu	98

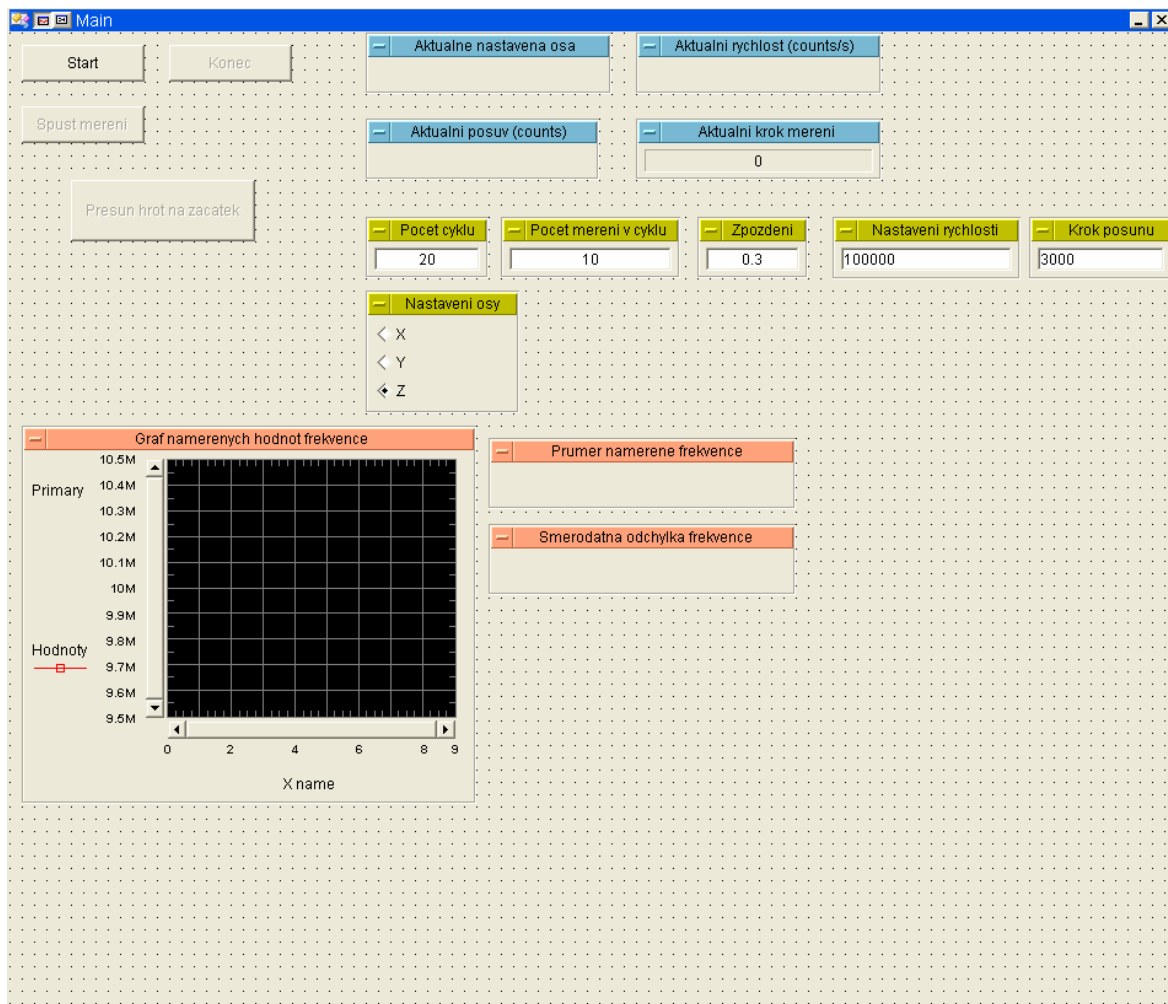
SEZNAM PŘÍLOH

P I: Panel programu (metoda s oscilátorem)

P II: Výpočetní analýza zapojení indukčnosti do obvodu oscilátoru

PŘÍLOHA P I: PANEL PROGRAMU (METODA S OSCILÁTOREM)

Obrázek č.1: Hlavní panel uživatelského programu pro metodu s použitím oscilátoru



PŘÍLOHA P II: VÝPOČETNÍ ANALÝZA ZAPOJENÍ INDUKČNOSTI DO OBVODU OSCILÁTORU

L_0 = indukčnost cívky v obvodu oscilátoru [H]

L' = indukčnost cívky (pružinky) [H]

L = celková indukčnost (předpokládáme, že je $L' \ll L_0$) [H]

f_0 = rezonanční frekvence obvodu bez připojené cívky (pružinky) [Hz]

f = frekvence s připojenou cívkou (pružinkou) [Hz], $f =$ celková frekvence [Hz]

Paralelní zapojení cívky (pružinky) do obvodu

$$L = \frac{L_0 L'}{L_0 + L'} = \frac{L_0 L'}{L_0 (1 + \frac{L'}{L_0})} \sim \frac{L_0 L'}{L_0} = L'$$

- nevyhovující zapojení (celková indukčnost L bude značně ovlivněna L' - nelze měřit velmi malé změny frekvence)

Sériové zapojení cívky (pružinky) do obvodu

$$L = L_0 + L'$$

$$f' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L_0 + L')C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_0 (1 + \frac{L'}{L_0})C}}$$

$$f' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_0 C (1 + \frac{L'}{L_0})}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_0 C}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{L'}{L_0}}}$$

$$f = f_0 \cdot f' = f_0 \cdot (1 + \frac{L'}{L_0})^{-\frac{1}{2}} = f_0 \cdot (1 - \frac{1}{2} \frac{L'}{L_0})$$

$$f - f_0 = f_0 (1 - \frac{1}{2} \frac{L'}{L_0}) - f_0 \Rightarrow f - f_0 = f_0 (1 - \frac{1}{2} \frac{L'}{L_0} - 1)$$

Frekvenční zdvih Δf [Hz]

$$\frac{f - f_0}{f_0} = 1 - \frac{1}{2} \frac{L'}{L_0} \text{ (změny } \Delta f \text{ lze teoreticky měřit, celková } L \text{ nezávisí jen na } L')$$