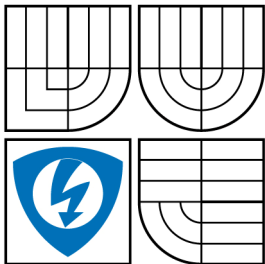


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY

## OPTIMALIZACE NASTAVENÍ MĚŘICÍHO SYSTÉMU PRO SLEDOVÁNÍ DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ KAPALNÝCH IZOLANTŮ

OPTIMIZATION OF MEASUREMENT SYSTEM SETTING  
FOR MONITORING DIELECTRIC PROPERTIES OF LIQUID INSULATORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

LUKÁŠ NOVÁK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. MARTIN FRK, Ph.D.



# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Lukáš Novák  
Bytem: Krátká 8 Třebíč  
Narozen/a (datum a místo): 12.9.1984 v Třebíči

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Optimalizace nastavení měřicího systému  
pro sledování dielektrických vlastností kapalných izolantů  
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Martin Frk, Ph.D.  
Ústav: Ústav mikroelektroniky  
Datum obhajoby VŠKP: 12.6.2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

- tištěné formě – počet exemplářů .....
- elektronické formě – počet exemplářů .....

---

\* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## Abstrakt:

Předkládaná práce se zabývá problematikou využití LCR metrů Agilent v diagnostice izolačních materiálů a optimalizací nastavení měřicího systému pro sledování dielektrických vlastností kapalných izolantů. Z měřené veličiny a chyby měření je vyjádřena nejistota měření.

## Abstract:

Submitted work deals with problems of using LCR meters Agilent in diagnostics of insulating materials and optimization of measurement system settings for monitoring dielectric properties of liquid insulators. From measured physical value and measurement error measurement uncertainty is expressed.

## Klíčová slova:

LCR metr, Agilent, optimalizace nastavení, izolační materiál, dielektrické vlastnosti, kapalný izolant, nejistota měření

## Keywords:

LCR meter, Agilent, optimization of settings, insulating material, dielectric properties, liquid insulator, measurement uncertainty

## Bibliografická citace díla:

NOVÁK, L. *Optimalizace nastavení měřicího systému pro sledování dielektrických vlastností kapalných izolantů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 76 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Frk, Ph.D.

## Prohlášení o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobních a jsem si plně vědom, následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při řešení bakalářské práce.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>3</b>
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>4</b>
1.1 LCR METR AGILENT 4284A .....	5
1.1.1 <i>Chyba měřicího přístroje Agilent 4284A</i> .....	6
1.1.2 <i>Základní přesnost</i> .....	6
1.1.3 <i>Impedanční proporcionální faktory</i> .....	8
1.1.4 <i>Faktor délky kabelu</i> .....	9
1.1.5 <i>Kalibrační interpolační faktor</i> .....	10
1.1.6 <i>Teplotní faktor</i> .....	11
1.1.7 <i>Kalibrační odchylka</i> .....	11
1.1.8 <i>Chyba měření ztrátového činitele</i> .....	12
1.2 LCR METR AGILENT 4285A.....	12
1.2.1 <i>Chyba měřicího přístroje Agilent 4285A</i> .....	12
1.2.2 <i>Základní přesnost</i> .....	13
1.2.3 <i>Faktor délky kabelu</i> .....	15
1.2.4 <i>Teplotní faktor</i> .....	15
1.2.5 <i>Chyba měření ztrátového činitele</i> .....	15
1.3 LCR METR AGILENT E4980.....	16
1.3.1 <i>Chyba měřicího přístroje Agilent E4980A</i> .....	16
1.3.2 <i>Základní přesnost</i> .....	17
1.3.3 <i>Korekce impedance při zapojení nakrátko</i> .....	18
1.3.4 <i>Korekce admitance při zapojení naprázdno</i> .....	19
1.3.5 <i>Teplotní faktor</i> .....	20
1.3.6 <i>Kalibrační přesnost</i> .....	20
1.3.7 <i>Chyba měření ztrátového činitele</i> .....	23
1.4 ELEKTRODOVÝ SYSTÉM AGILENT 16452A.....	23
1.4.1 <i>Chyba měření relativní permitivity elektrodového systému</i> .....	24
1.5 NEJISTOTA MĚŘENÍ .....	25
1.5.1 <i>Výpočet standardní nejistoty typu A</i> .....	25
1.5.2 <i>Výpočet standardní nejistoty typu B</i> .....	26
1.5.3 <i>Standardní kombinovaná nejistota</i> .....	26
1.5.4 <i>Rozšířená nejistota</i> .....	27
<b>2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>28</b>
2.1 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ .....	28
2.1.1 <i>Výpočet chyby měření přístroje Agilent 4284A</i> .....	28
2.1.2 <i>Výpočet chyby měření přístroje Agilent 4285A</i> .....	30
2.1.3 <i>Výpočet chyby měření přístroje E4980</i> .....	32
2.2 ČÍSELNÉ ZNÁZORNĚNÍ NEJISTOT MĚŘENÍ .....	33
2.3 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ NEJISTOT MĚŘENÍ.....	37
2.4 VYHODNOCENÍ.....	47
2.4.1 <i>Přístroj Agilent 4284A</i> .....	47
2.4.2 <i>Přístroj Agilent 4285A</i> .....	47

2.4.3	<i>Přístroj Agilent E4980</i> .....	48
2.4.4	<i>Porovnání přístrojů</i> .....	49
<b>3</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>50</b>
<b>4</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>SEZNAM VELIČIN</b> .....	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>53</b>

## Úvod

V současné době se v metrologii a při technických měřeních postupně přechází k novým metodám vyjadřování odchylek. Pojem chyba měření je v souladu s mezinárodními předpisy ISO, BIPM, OIM a IEC i českými normami TPM 005x nahrazována pojmem nejistota měření. V praxi nejsou žádné měřicí přístroje absolutně přesné. Nejrůznější negativní vlivy, které se v reálném měřicím procesu vyskytují, se projeví odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledované veličiny. Podle svého zdroje se chyby rozdělují na chyby přístroje, pozorování a vyhodnocení. [6]

Tato práce se zabývá vlastnostmi LCR metrů Agilent 4284A, 4285A a E4980, jejich měřicími režimy a výpočty nejistot měření těchto přístrojů. K měřicím přístrojům byl připojen elektrodový systém Agilent 16452A. Jedná se o elektrodový systém určený k měření vlastností kapalných izolačních materiálů. Nami zvolený kapalný izolant byl Krasol LBH2000. Práce není zaměřena na studium samotných vlastností tohoto izolačního materiálu, ale spíše na rozbor chyb a nejistot měření použitých přístrojů a jejich vzájemné porovnání. Na vzorku LBH 2000 byla přímou metodou měřena kapacita a ztrátový činitel  $tg\delta$ . V teoretické části je nejprve vysvětlen výpočet chyb měření těchto veličin, v závěru je rozebrána nejistota měření. Každá hodnota je při jedné frekvenci měřena 10x. Chyby měření jsou počítány pro střední hodnoty těchto deseti hodnot.

# 1 Teoretická část

Tato práce se zabývá porovnáním nejistot měření přístrojů Agilent 4284A, Agilent 4285A a Agilent E4980. V této kapitole je popsán postup výpočtu všech koeficientů tvořících chybu měření jednotlivých přístrojů. Z chyby měření přístroje a ze statistického zpracování naměřených hodnot je vymezen interval, ve kterém se s 95% pravděpodobností nachází skutečná hodnota měřené veličiny. Na základě těchto výpočtů by mělo být stanoveno ideální nastavení měřicích přístrojů pro měření s co nejmenší nejistotou, popřípadě stanovení nejvhodnějšího přístroje pro měření v určité frekvenční oblasti.

Pro správné použití vzorců sloužících k výpočtu chyb měření musí být u všech přístrojů dodrženy následující podmínky:

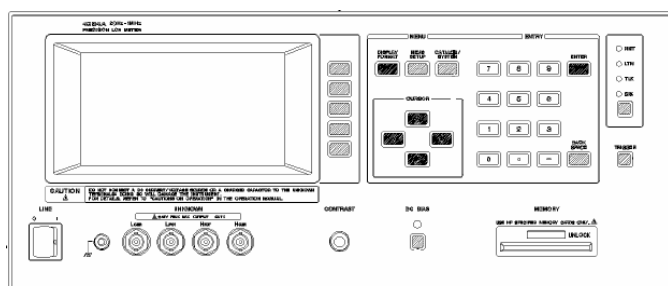
- Před začátkem měření musí být přístroje zapnuty nejméně 30 min
- Je nutno použít originální propojovací kabely o délkách 0m, 1m (16048A) nebo 2m (16084D)
- Jsou změřeny korekce Open (pro prázdný elektrodový systém) a Short (pro zkratované elektrody).
- Je dodržen správný impedanční rozsah. V našem případě jej přístroje nastavovaly automaticky.

Jako vzorek byl použit polybutadien Krasol LBH2000 Jedná se o lineární polymer s hydroxylovými koncovými skupinami. Při pokojové teplotě je jeho skupenství kapalné, proto byl použit právě elektrodový systém Agilent 16452A.

Tloušťka kapalného izolantu v elektrodovém systému je nastavitelná pomocí distančních kroužků. Výrobce dodává distanční kroužky v tloušťkách 0,3 mm, 0,5 mm, 1 mm, a 2 mm. Pro měření bylo použito i distančního kroužku pro nastavení tloušťky vzorku na vzdálenost 0,19 mm. Tento kroužek však není původem od výrobce Agilent. Jedním z úkolů této práce je tedy i zjistit, zda je tento neoriginální distanční kroužek vhodný pro přesné měření.

## 1.1 LCR metr Agilent 4284A

Přístroj Agilent 4284A představuje univerzální RLC metr sloužící ke kontrole kvality součástek a měření jejich vlastností. Používá se pro vyhodnocování indukčních, odporových a kapacitních součástek, materiálů a polovodičových zařízení v širokém rozsahu frekvencí (20 Hz – 1 MHz). V základním provedení lze s přístrojem Agilent 4284A měřit při napětích v rozmezí od 5 mV do 2 V a proudech od 50  $\mu$ A do 20 mA. Volitelným příslušenstvím lze napětí měřicího signálu rozšířit až na hodnotu 20 V a proud lze zvýšit na hodnotu 100 mA.



Obr. 1: Měřicí přístroj Agilent 4284A [1]

Přístroj Agilent 4284A umožňuje měření se základní přesností  $\pm 0,05\% (C)$ ,  $\pm 0,0005 (D)$  na všech měřicích frekvencích s rozlišením šesti desetinných míst.

Pro přesnější měření se v přístroji nastavují parametry měřicí soustavy a způsobu měření. Před samotným měřením je nutné provést korekce. Korekce se provádí zkratováním elektrod elektrodového systému a následným spuštěním automatického měření korekcí. Přístroj tak sám změří možné odchylky způsobené vedením nebo elektrodovým systémem. Poté je nutné nastavit délku připojovacích BNC kabelů. Pro správný výpočet chyby měření je nutné používat pouze originální kabely Agilent délek 1 m, 2 m nebo 4 m. Při našem měření byl vždy použit kabel délky 1 m. Důležité je také nastavení doby integrace. Možné je vybrat si ze tří nastavení – Long, Medium, Short. Čím je doba integrace delší (LONG), tím déle přístroj čeká na ustálení měřené hodnoty. Měření je proto přesnější než při nastavení SHORT, při němž se na ustálení hodnoty nečeká tak dlouho. Při nastavení SHORT ale přístroj měří mnohem rychleji. Toto nastavení je vhodné pro orientační měření, od kterého neočekáváme velkou přesnost a záleží nám na době

měření. Měřili jsme pouze při nastavení Short a Long, protože chyba měření při nastavení Medium se počítá stejným způsobem jako při nastavení Long.

Přesnost měření ovlivňuje i velikost měřicího napětí. To se pak promítá do několika faktorů při výpočtu nejistoty měření. S přístrojem 4284A jsme měřili při napětích 1 V a 2 V.

Přístroj může být připojen přes USB rozhraní např. k PC pro plnou automatizaci měření. Toto zapojení je určeno zároveň pro získávání dat z přístroje a zároveň i pro posílání příkazů z PC do přístroje. Pomocí softwaru v počítači je možné naprogramovat přístroj tak, že během měření sám mění např. dobu integrace, typ měřené veličiny a mnohé další parametry. Přítomnost obsluhy potom není nutná. Program sám ukládá naměřená data do programu Excel, kde je možné jejich další zpracování. Tento způsob měření ušetří mnoho času.

### **1.1.1 Chyba měřicího přístroje Agilent 4284A**

Výpočet celkové chyby měření se skládá z chyby měřicího přístroje a chyby elektrodového systému. Celková chyba měřicího přístroje je v tabulce označena jako  $A_{mp}$  a vypočítá se podle vzorce

$$A_{mp} = A_e + A_{cal} [\%], \quad (1)$$

v němž  $A_e$  je relativní přesnost měření a  $A_{cal}$  je kalibrační odchylka.

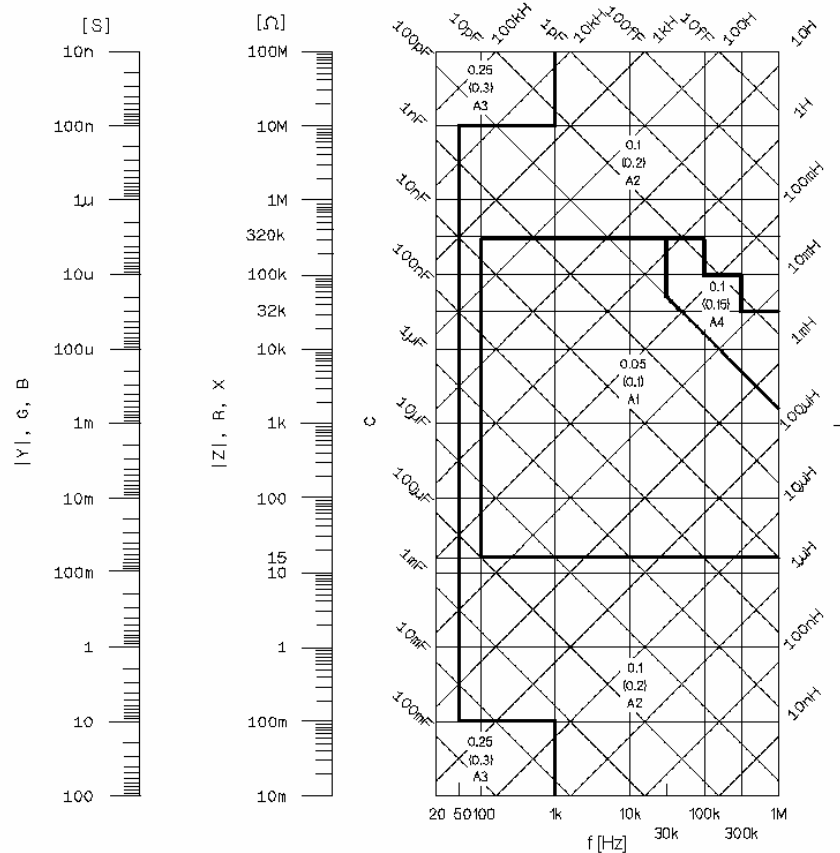
Relativní přesnost se vypočítá ze vzorce

$$A_e = \pm[A_b + (K_a + K_{aa} + K_b \cdot K_{bb} + K_c) \cdot 100 + K_d] \cdot K_t, \quad (2)$$

kde  $A_b$  je základní přesnost,  $K_a$  a  $K_b$  jsou impedanční proporcionální faktory,  $K_{aa}$ ,  $K_{bb}$  a  $K_d$  představují faktory délky kabelu,  $K_c$  je kalibrační interpolační faktor a  $K_t$  je teplotní faktor.

### **1.1.2 Základní přesnost**

Základní přesnost přístroje Agilent 4284A se určí podle obr. 2. Oblast, ve které se pomyslně protíná naměřená kapacita s frekvencí určuje základní přesnost. V případě, že měřicí napětí  $V_s$  je v intervalu  $0,3 \text{ V} \leq V_s \leq 1 \text{ V}$  a doba integrace je nastavena na hodnotu Medium nebo Long, platí vždy první hodnota. Při stejné hodnotě měřicího napětí, ale kratší době integrace, tj. při nastavení "Short", je hodnota základní přesnosti uvedena v závorce.



Obr. 2: Graf pro určení základní přesnosti  $A_b$  [1]

Pro všechny ostatní případy, tj. pro  $0,3V > V_s > 1V$ , je základní přesnosti vyjádřena koeficienty  $A_1 - A_4$ , které jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 : Tabulka pro určení hodnot základní přesnosti  $A_1 - A_4$  [1]

	5m	12m	0.1	0.15	0.3	1	2	5	20	$V_s$ [V]	
MEDIUM/ LONG	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=Atl$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.25$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.25$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=0.1$ $A_3=0.25$ $A_4=0.1$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.25$ $A_4=0.1$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.25$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.25$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.25$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.25$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.25$ $A_4=Atl$	
SHORT	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=Atl$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.3$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=0.2$ $A_3=0.3$ $A_4=0.5 \times Atl + 0.1$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.3$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.3$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.3$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.3$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.3$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.3$ $A_4=Atl$	$A_1=Atl$ $A_2=Atl$ $A_3=0.3$ $A_4=Atl$	
	5m	33m	0.15	0.3	1	2	5	20		$V_s$ [V]	

\*:  $100\text{Hz} \leq f_m < 300\text{Hz}$  -  $A_b$  je dvojnásobné. \*\*: K  $A_b$  přičteme 0,15 za následujících podmínek

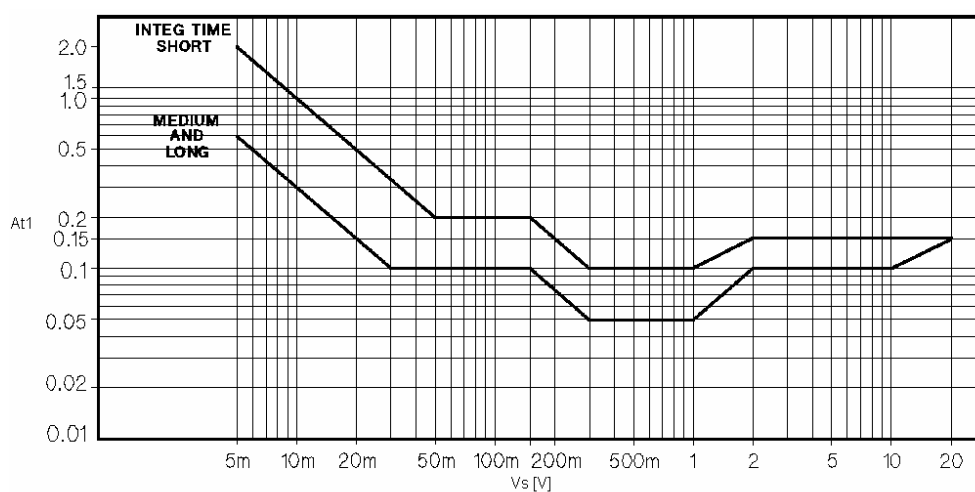
$f_m < 100\text{Hz}$  -  $A_b$  je 2,5-násobné

- měřicí frekvence:  $300\text{Hz} < f_m \leq 1\text{MHz}$

- měřicí napětí:  $5\text{V} < V_s \leq 20\text{V}$

- měřená impedance  $|Z_m| < 200\Omega$

V případě, že  $A_b$  je rovno  $At1$ , pak příslušnou základní přesnost je nutné odečíst z grafu znázorněného na obr. 3.



Obr. 3: Graf pro určení koeficientu základní přesnosti  $At1$  [1]

### 1.1.3 Impedanční proporcionální faktory

Interpolační proporcionální faktory  $K_a$  a  $K_b$  se projevují u vysokých, respektive nízkých impedancí. Z rovnic uvedených v tab. 2 je zřejmé, že při vyšších hodnotách impedance je činitel  $K_a$  prakticky zanedbatelný. Činitel  $K_b$  je naopak zanedbatelný při nízkých impedancích měřeného vzorku.

Tab. 2: Tabulka pro určení hodnot impedančních proporcionálních faktorů [1]

doba integrace	$f$	$K_a$	$K_b$
Medium Long	$f_m < 100\text{Hz}$	$\left(\frac{10^{-3}}{ Z_m }\right)\left(1 + \frac{200}{V_s}\right)\left(1 + \sqrt{\frac{100}{f_m}}\right)$	$ Z_m (1 \cdot 10^{-9})\left(1 + \frac{70}{V_s}\right)\left(1 + \sqrt{\frac{100}{f_m}}\right)$
	$100\text{ Hz} < f_m \leq 100\text{ kHz}$	$\left(\frac{10^{-3}}{ Z_m }\right)\left(1 + \frac{200}{V_s}\right)$	$ Z_m (1 \cdot 10^{-9})\left(1 + \frac{70}{V_s}\right)$
	$100\text{kHz} < f_m \leq 300\text{kHz}$	$\left(\frac{10^{-3}}{ Z_m }\right)\left(2 + \frac{200}{V_s}\right)$	$ Z_m (3 \cdot 10^{-9})\left(1 + \frac{70}{V_s}\right)$
	$300\text{kHz} < f_m \leq 1\text{MHz}$	$\left(\frac{10^{-3}}{ Z_m }\right)\left(3 + \frac{200}{V_s} + \frac{V_s^2}{10^8}\right)$	$ Z_m (10 \cdot 10^{-9})\left(1 + \frac{70}{V_s}\right)$
Short	$f_m < 100\text{Hz}$	$\left(\frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{ Z_m }\right)\left(1 + \frac{400}{V_s}\right)\left(1 + \sqrt{\frac{100}{f_m}}\right)$	$ Z_m (2 \cdot 10^{-9})\left(1 + \frac{100}{V_s}\right)\left(1 + \sqrt{\frac{100}{f_m}}\right)$
	$100\text{Hz} < f_m \leq 100\text{kHz}$	$\left(\frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{ Z_m }\right)\left(1 + \frac{400}{V_s}\right)$	$ Z_m (2 \cdot 10^{-9})\left(1 + \frac{100}{V_s}\right)$
	$100\text{kHz} < f_m \leq 300\text{kHz}$	$\left(\frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{ Z_m }\right)\left(2 + \frac{400}{V_s}\right)$	$ Z_m (6 \cdot 10^{-9})\left(1 + \frac{100}{V_s}\right)$
	$300\text{kHz} < f_m \leq 1\text{MHz}$	$\left(\frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{ Z_m }\right)\left(3 + \frac{400}{V_s} + \frac{V_s^2}{10^8}\right)$	$ Z_m (20 \cdot 10^{-9})\left(1 + \frac{100}{V_s}\right)$

$|Z_m|$  [ $\Omega$ ] - měřená impedance,  $V_s$  [mV] - měřící napětí,  $f_m$  [Hz] - měřící frekvence

#### 1.1.4 Faktor délky kabelu

Výsledná přesnost měření je silně ovlivněna i délkou použitého kabelu. Delší kabel způsobuje větší chybu. Faktor délky kabelu  $K_{aa}$  je zanedbatelný při měření impedanci nad 500  $\Omega$ . Faktory délky kabelu  $K_{bb}$  a  $K_d$  se při nízkých frekvencích příliš neprojevují, chybu měření výrazněji ovlivňují až při vyšších měřicích frekvencích.

Tab. 3: Faktor délky kabelu  $K_{aa}$  [1]

$V_s$	délka kabelu			
	0 m	1 m	2 m	4 m
$\leq 2\text{ V}$	0	0	$K_a / 2$	$K_a$
$> 2\text{ V}$	0	$\frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot f_m^2}{ Z_m }$	$\frac{(1 + 5 \cdot f_m^2) \cdot 10^{-3}}{ Z_m }$	$\frac{(2 + 10 \cdot f_m^2) \cdot 10^{-3}}{ Z_m }$

$|Z_m|$  [ $\Omega$ ] - měřená impedance,  $f_m$  [Hz] - měřící frekvence,  $K_a$  - impedanční proporcionální faktor

Tab. 4: Faktor délky kabelu  $K_{bb}$  [1]

$f$	délka kabelu			
	0 m	1 m	2 m	4 m
$f_m \leq 100 \text{ kHz}$	1	$1 + 5 \cdot f_m$	$1 + 10 \cdot f_m$	$1 + 20 \cdot f_m$
$100 \text{ kHz} < f_m \leq 300 \text{ kHz}$	1	$1 + 2 \cdot f_m$	$1 + 4 \cdot f_m$	$1 + 8 \cdot f_m$
$300 \text{ kHz} < f_m \leq 1 \text{ MHz}$	1	$1 + 0,5 \cdot f_m$	$1 + 1 \cdot f_m$	$1 + 2 \cdot f_m$

$f_m$  [MHz] – měřicí frekvence

Tab. 5: Faktor délky kabelu  $K_d$  [1]

$V_s$	délka kabelu		
	1 m	2 m	4 m
$\leq 2 \text{ V}$	$2,5 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 50 \cdot f_m)$	$5 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 50 \cdot f_m)$	$1 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 50 \cdot f_m)$
$> 2 \text{ V}$	$2,5 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 16 \cdot f_m)$	$5 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 16 \cdot f_m)$	$1 \cdot 10^{-2} \cdot (1 + 16 \cdot f_m)$

$f_m$  [MHz] – měřicí frekvence

### 1.1.5 Kalibrační interpolační faktor

Kalibrační interpolační faktor  $K_c$  nabývá hodnoty  $K_c = 0$ , když měřicí frekvence je stejná jako přímá kalibrační frekvence. V ostatních případech je nutné uvažovat hodnotu  $K_c = 0,0003$ . Uvedená skutečnost je v tab. 6. Přehled přímých kalibračních frekvencí je uveden v tab. 7.

Tab. 6: Kalibrační interpolační faktor  $K_c$  [1]

$f$ [Hz]	$K_c$
přímé kalibrační frekvence	0
ostatní frekvence	0,0003

Tab. 7: Přímé kalibrační frekvence [1]

			20	25	30	40	50	60	80	[Hz]
100	120	150	200	250	300	400	500	600	800	[Hz]
1	1,2	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	[kHz]
10	12	15	20	25	30	40	50	60	80	[kHz]
100	120	150	200	250	300	400	500	600	800	[kHz]
1										[MHz]

### 1.1.6 Teplotní faktor

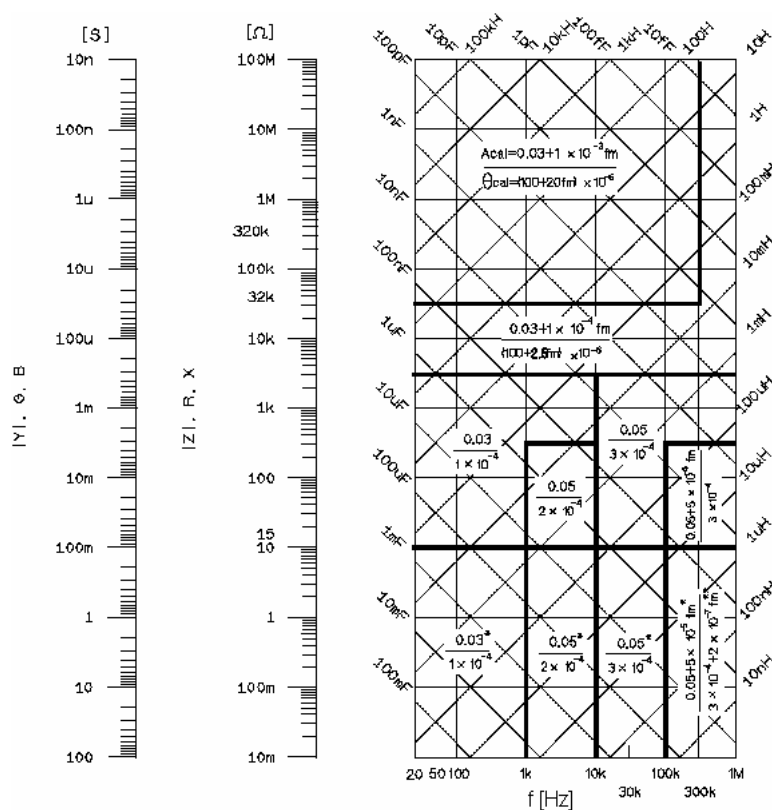
Teplotní faktor  $K_t$  výrazně mění celkovou přesnost v případě, že je teplota v okolí měřicího systému nižší než 18 °C nebo vyšší než 28 °C. Ve školních laboratořích je teplota dlouhodobě udržována v rozmezí těchto dvou teplot, proto se v našem měření faktor  $K_t$  neprojevuje.

Tab. 8: Závislost teplotního faktoru  $K_t$  na teplotě [1]

$\vartheta$ [°C]	5 - 8	8 - 18	18 - 28	28 - 38	38 - 45
$K_e$	4	2	3	2	4

### 1.1.7 Kalibrační odchyška

Kalibrační odchyška  $A_{cal}$  měřicího přístroje se určí z čitatele zlomku v oblasti, kde se protíná naměřená hodnota kapacity s měřicí frekvencí. Potřebný graf je znázorněn na obr. 4.



Obr. 4: Graf pro určení kalibrační odchyšky  $A_{cal}$  a  $\theta_{cal}$  [1]

### 1.1.8 Chyba měření ztrátového činitele

Chybu měření ztrátového činitele  $tg \delta$  je možné určit z jednoduchého vzorce

$$D = D_e + \theta_{cal}, \quad (3)$$

kde  $D$  je celková chyba měření,  $D_e$  je relativní přesnost a  $\theta_{cal}$  představuje kalibrační přesnost. Koeficient  $D_e$  je možné určit pomocí relativní přesnosti primární měřené veličiny vztahem

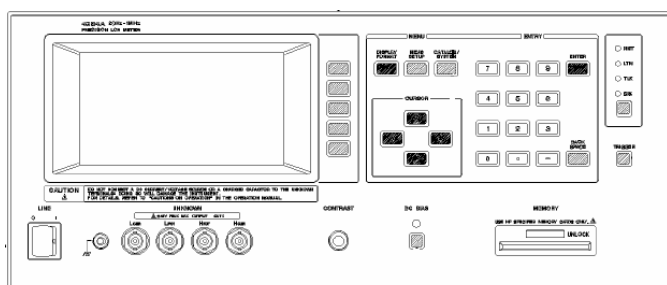
$$D_e = \pm \frac{A_e}{100}. \quad (4)$$

Kalibrační přesnost  $\theta_{cal}$  se určí obdobným způsobem jako relativní přesnost kapacity, tj. z grafu uvedeného na obr. 4. Platný je vzorec uvedený ve jmenovateli zlomku.

## 1.2 LCR metr Agilent 4285A

Agilent 4285A je přesný LCR metr pokrývající frekvenční rozsah v oblasti 75 kHz až 30 MHz. Měřicí frekvence je nastavována s přesností  $\pm 0,01\%$ . Přístroj umožňuje nastavení měřicího napětí od 5 mV do 2 V a měřicí proud od 200  $\mu\text{A}$  do 20 mA.

Nastavení měřících vlastností přístroje 4285A je stejné jako u přístroje 4284A a přístroj pracuje stejným způsobem jen v jiném frekvenčním rozsahu. I jeho vzhled znázorněný na obr. 5 je stejný jako u přístroje 4284A.



Obr. 5: Měřicí přístroj Agilent 4285A [2]

### 1.2.1 Chyba měřicího přístroje Agilent 4285A

Výpočet celkové chyby měřené veličiny přístroje 4285A je dán pouze relativní přesností  $A_e$  a lze ji určit ze vztahu

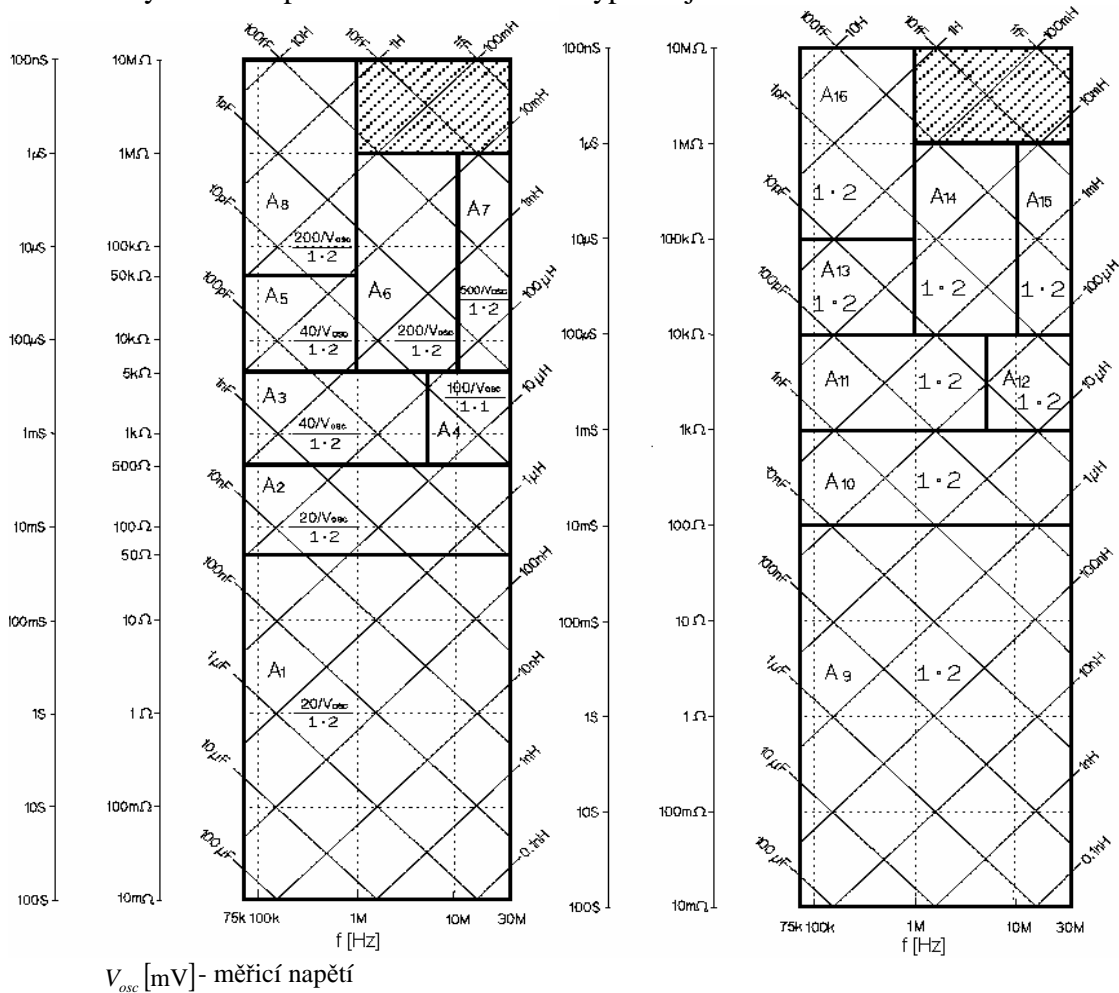
$$A_e = \pm(A_b + A_c) \cdot K_t, \quad (5)$$

kde  $A_b$  je základní přesnost,  $A_c$  je faktor délky kabelu a  $K_t$  představuje teplotní faktor.

### 1.2.2 Základní přesnost

Základní přesnost  $A_b$  přístroje Agilent 4285A se určí z obr. 6. Oblast, ve které se pomyslně protíná naměřená kapacita s měřicí frekvencí, určuje základní přesnost. Základní přesnost odpovídá koeficientům A1 – A16. Pokud platí, že měřicí napětí  $V_s \leq 1V$ , určí se základní přesnost z levé části obr. 6. V opačném případě, tedy pokud platí  $V_s > 1V$ , se základní přesnost určí z pravé části obr. 6.

Koeficienty základní přesnosti A1 – A16 se vypočítají z tab. 9.



Obr. 6: Graf pro určení základní přesnosti  $A_b$  pro  $V_s \leq 1V$  (vlevo) a  $V_s > 1V$  (vpravo) [2]

Tab. 9: Koeficienty základní přesnosti A1 – A16 [2]

$A_1 = N_1 \% + \left(\frac{f_m}{30}\right)^2 \cdot 3\% + \frac{50}{ Z_m } \left[ 0.02\% + \left(\frac{f_m}{30}\right) \cdot 0.1\% \right] \cdot K_i \cdot K_{osc}$	$A_9 = N_2 \% + \left(\frac{f_m}{30}\right)^2 \cdot 3\% + \frac{100}{ Z_m } \left[ 0.02\% + \left(\frac{f_m}{30}\right) \cdot 0.1\% \right] \cdot K_i$
$A_2 = N_1 \% + \left(\frac{f_m}{30}\right)^2 \cdot 3\% + \frac{ Z_m }{50} \left[ 0.02\% + \left(\frac{f_m}{30}\right) \cdot 0.05\% \right] \cdot K_i \cdot K_{osc}$	$A_{10} = N_2 \% + \left(\frac{f_m}{30}\right)^2 \cdot 3\% + \frac{ Z_m }{100} \left[ 0.02\% + \left(\frac{f_m}{30}\right) \cdot 0.05\% \right] \cdot K_i$
$A_3 = N_1 \% + \left(\frac{f_m}{5}\right)^2 \cdot 0.1\% + \frac{ Z_m }{500} \left[ 0.02\% + \left(\frac{f_m}{30}\right) \cdot 0.05\% \right] \cdot K_i \cdot K_{osc}$	$A_{11} = 0.18\% + \left(\frac{f_m}{5}\right)^2 \cdot 0.1\% + \frac{ Z_m }{1k} \left[ 0.02\% + \left(\frac{f_m}{30}\right) \cdot 0.05\% \right] \cdot K_i$
$A_4 = 0.3\% + \left(\frac{f_m}{30}\right)^2 \cdot 3\% + \frac{ Z_m }{500} \left[ 0.05\% + \left(\frac{f_m}{30}\right) \cdot 0.1\% \right] \cdot K_i \cdot K_{osc}$	$A_{12} = 0.3\% + \left(\frac{f_m}{30}\right)^2 \cdot 3\% + \frac{ Z_m }{1k} \left[ 0.05\% + \left(\frac{f_m}{30}\right) \cdot 0.1\% \right] \cdot K_i$
$A_5 = 0.18\% + \frac{ Z_m }{5k} \cdot 0.02\% \cdot K_i \cdot K_{osc}$	$A_{13} = 0.18\% + \frac{ Z_m }{10k} \cdot 0.02\% \cdot K_i$
$A_6 = 0.18\% + \left(\frac{f_m}{30}\right)^2 \cdot 3\% + \frac{ Z_m }{5k} \left[ 0.02\% + \left(\frac{f_m}{10}\right) \cdot 0.03\% \right] \cdot K_i \cdot K_{osc}$	$A_{14} = 0.18\% + \left(\frac{f_m}{30}\right)^2 \cdot 3\% + \frac{ Z_m }{10k} \left[ 0.02\% + \left(\frac{f_m}{10}\right) \cdot 0.03\% \right] \cdot K_i$
$A_7 = 0.5\% + \left(\frac{f_m}{30}\right)^2 \cdot 3\% + \frac{ Z_m }{5k} \cdot \left(\frac{f_m}{30}\right) \cdot 0.2\% \cdot K_i \cdot K_{osc}$	$A_{15} = 0.5\% + \left(\frac{f_m}{30}\right)^2 \cdot 3\% + \frac{ Z_m }{10k} \cdot \left(\frac{f_m}{30}\right) \cdot 0.2\% \cdot K_i$
$A_8 = 0.18\% + \frac{ Z_m }{50k} \cdot 0.03\% \cdot K_i \cdot K_{osc}$	$A_{16} = 0.18\% + \frac{ Z_m }{100k} \cdot 0.03\% \cdot K_i$

$f_m$  [MHz] - měřicí frekvence,  $|Z_m|$  [Ω] - modul měřené impedance

Koeficient  $K_i$  se určí ze jmenovatele ve vzorci na obr. 6. Hodnota jmenovatele závisí na době integrace. Pokud je doba integrace Long, platí hodnota vlevo od tečky. V případě, že je doba integrace Short nebo Medium, platí hodnota vpravo od tečky.

Koeficient  $K_{osc}$  určíme jednoduchým výpočtem z čitatele ve vzorci na obr. 6. Koeficient  $K_{osc}$  se do výpočtu základní přesnosti zahrnuje pouze v případě, že měřicí napětí  $V_s \leq 1$  V.

Konstanty  $N_1$  a  $N_2$  potřebné pro výpočet základní přesnosti se určí z tab. 10.

Tab. 10: Konstanty  $N_1$  a  $N_2$  pro výpočet základní přesnosti [2]

$f$	$N_1$	$N_2$
$75 \text{ kHz} \leq f \leq 200 \text{ kHz}$	0,15	0,15
$200 \text{ kHz} < f \leq 3 \text{ MHz}$	0,08	0,15
$3 \text{ MHz} < f \leq 5 \text{ MHz}$	0,15	0,38
$5 \text{ MHz} < f \leq 30 \text{ MHz}$	0,30	0,38

### 1.2.3 Faktor délky kabelu

Faktor délky kabelu  $A_c$  se vypočítá ze vzorce

$$A_c = \frac{f_m}{15} + A_{co}. \quad (6)$$

V případě, že impedanční rozsah je větší než  $5 \text{ k}\Omega$ , přičte se k faktoru délky kabelu  $A_c$  koeficient  $A_{co}$ . Tento koeficient je určen vzorcem

$$A_{co} = \frac{|Z_m| \cdot f_m \cdot K_t}{1000}, \quad (7)$$

kde  $f_m$  [MHz] je měřicí frekvence,  $|Z_m|$  [k $\Omega$ ] je modul měřené impedance,  $K_t$  [m] je délka kabelu.

### 1.2.4 Teplotní faktor

Součet základní přesnosti a faktoru délky kabelu je podle vzorce (5) nutno vynásobit teplotním faktorem  $K_t$ . Teplotní faktor se určí z tab. 11. Ve školních laboratořích je vždy dodržena teplota v rozmezí  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ , proto je tento faktor roven jedné a na výpočet chyby nemá vliv.

Tab. 11: Závislost teplotního faktoru  $K_t$  na teplotě [2]

$\vartheta$ [°C]	0 - 8	8 - 18	18 - 28	28 - 38	38 - 48	48 - 55
$K_t$	3	2	1	2	3	4

### 1.2.5 Chyba měření ztrátového činitele

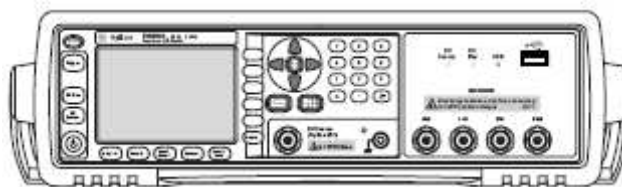
Chyba měření ztrátového činitele  $tg \delta$  se vypočítá ze vzorce

$$D = \frac{A_e}{100}, \quad (8)$$

kde  $A_e$  je relativní přesnost.

### 1.3 LCR metr Agilent E4980

Přístroj Agilent A4980 je přesný LCR metr určený pro kontrolu kvality součástek, materiálů, polovodičů a měření jejich vlastností. Používá se pro vyhodnocování indukčních, odporových a kapacitních součástek, materiálů a polovodičových zařízení v širokém rozsahu frekvencí 20 Hz – 2 MHz. Měřicí napětí přístroje Agilent E4980 se pohybuje v intervalu od 0,1 mV do 2 V a měřicí proud od 50 μA do 20 mA.



Obr. 7: Měřicí přístroj Agilent E4980A [3]

Na přístroji je možno nastavit stejnosměrné předpětí  $\pm 2$  V. Volitelným příslušenstvím lze měřicí signál rozšířit až na hodnoty 20 V a 200 mA a stejnosměrné předpětí na hodnotu až  $\pm 40$  V. Přístroj E4980 nabízí měření se základní přesností  $\pm 0,05\%$  (C),  $\pm 0,0005$  (D) na všech měřicích frekvencích s rozlišením šesti desetinných míst.

Nastavení měřicích vlastností přístroje E4980 je stejné jako u přístrojů 4284A a 4285A a pracuje stejným způsobem jen v jiném frekvenčním rozsahu.

#### 1.3.1 Chyba měřicího přístroje Agilent E4980A

Celková chyba měření přístroje Agilent E4980 se vypočítá ze vzorce

$$A_{mp} = A_e + A_{cal}, \quad (9)$$

kde  $A_e$  je relativní přesnost měření a  $A_{cal}$  je kalibrační přesnost.

Relativní přesnost je dána vztahem

$$A_e = [A_b + Z_s / |Z_m| \cdot 100 + Y_o \cdot |Z_m| \cdot 100] \cdot K_t. \quad (10)$$

Podmínkou použití vzorce (10) je zapnutí měřicího přístroje nejméně 30 min před zahájením měření. Druhou podmínkou je použití schválených propojovacích kabelů Agilent 16047A/B/D/E.

### 1.3.2 Základní přesnost

Základní přesnost  $A_b$  přístroje Agilent E4980, která je závislá na měřicím napětí, frekvenci, a nastavené době integrace, se určí ze vzorců v tab. 12 a tab. 13.

Tab. 12: Výpočet  $A_b$  pro dobu integrace Short [3]

$f$ [Hz]	$V_s$				
	5 mV – 50 mV	50 mV – 0.3 V	0.3 V – 1 V	1 V – 10 V	10 V – 20 V
20 - 125	$(0,6\%) \cdot (50\text{mV}/V_s)$	0,6 %	0,3 %	0,3 %	0,3 %
125 - 1M	$(0,2\%) \cdot (50\text{mV}/V_s)$	0,2 %	0,1 %	0,15 %	0,15 %
1M - 2M	$(0,4\%) \cdot (50\text{mV}/V_s)$	0,4 %	0,2 %	0,3 %	0,3 %

Tab. 13: Výpočet  $A_b$  pro dobu integrace Medium, Long [3]

$f$ [Hz]	$V_s$				
	5 mV – 30 mV	30 mV – 0.3 V	0.3V – 1 V	1 V – 10 V	10 V – 20 V
20 - 100	$(0,25\%) \cdot (30\text{mV}/V_s)$	0,25 %	0,10 %	0,15 %	0,15 %
100 - 1M	$(0,1\%) \cdot (30\text{mV}/V_s)$	0,10 %	0,05 %	0,10 %	0,15 %
1M - 2M	$(0,2\%) \cdot (30\text{mV}/V_s)$	0,20 %	0,1 %	0,20 %	0,30 %

Nachází-li se frekvence nebo měřicí napětí na rozhraní, uvažuje se pro výpočet vždy lepší hodnota (menší chyba) daného koeficientu.

V případě, že impedance měřeného objektu je menší než  $30 \Omega$  přičte se k základní přesnosti  $A_b$  hodnota z tab. 14. Pokud je impedance větší než  $9,2 \text{ k}\Omega$  přičte se hodnota z tab. 15. V tabulkách na příloženém CD je tato hodnota označena  $A_b +$

Tab. 14: Určení základní přesnosti  $A_b +$ ,  $|Z_m| < 30 \Omega$  [3]

$f$ [Hz]	$ Z_m $	
	$1,08 \Omega <  Z_m  < 30 \Omega$	$ Z_m  \leq 1.08 \Omega$
20 – 1M	0,05 %	0,10 %
1M – 2M	0,10 %	0,20 %

Tab. 15: Určení základní přesnosti  $A_b$ ,  $|Z_m| > 9,2 \text{ k}\Omega$  [3]

$f$ [Hz]	$ Z_m $	
	$9,2 \text{ k}\Omega \leq  Z_m  < 92 \Omega$	$92 \text{ k}\Omega \leq  Z_m $
10k – 100k	0 %	0,05 %
100k – 1M	0,05 %	0,05 %
1M – 2M	0,10 %	0,10 %

Pro každý metr kabelu se k  $A_b$  přičte hodnota vypočítaná z rovnice

$$A_b^{++} = 0,015\% \cdot (f_m / 1\text{MHz})^2 \cdot K_l^2, \quad (11)$$

kde  $f_m$  [Hz] je měřicí frekvence,  $K_l$  [m] je délka kabelu.

V tabulkách na příloženém digitálním mediu je tato hodnota označena  $A_b^{++}$

### 1.3.3 Korekce impedance při zapojení nakrátko

Korekce impedance při zapojení nakrátko (Short offset)  $Z_s$  se vypočítá ze vzorců uvedených v tab. 16 a tab. 17. V případě, že impedance měřeného vzorku je větší než  $1,08 \Omega$ , určí se korekce z tab. 16. V opačném případě se pro výpočet použijí vzorce uvedené v tab. 17.

Tab. 16: Výpočet Short Offset pro impedance větší než  $1,08 \Omega$  [3]

$f$ [Hz]	doba integrace	
	Short	Medium, Long
20 – 2M	$2,5 \text{ m}\Omega \cdot (1 + 0,4/V_s) \cdot (1 + \sqrt{1000/f_m})$	$0,6 \text{ m}\Omega \cdot (1 + 0,4/V_s) \cdot (1 + \sqrt{1000/f_m})$

Tab. 17: Výpočet Short Offset pro impedance menší než  $1,08 \Omega$  [3]

$f$ [Hz]	doba integrace	
	Short	Medium, Long
20 – 2M	$1 \text{ m}\Omega \cdot (1 + 1/V_s) \cdot (1 + \sqrt{1000/f_m})$	$0,2 \text{ m}\Omega \cdot (1 + 1/V_s) \cdot (1 + \sqrt{1000/f_m})$

$V_s$  [V] – měřicí napětí,  $f_m$  [Hz] – frekvence měřicího signálu

Pro každý metr kabelu se k  $Z_s$  přičte hodnota z tab. 18. V tabulkách na příloženém CD je tato hodnota označena  $Z_s +$

Tab. 18: Určení short offset  $Z_s +$  [3]

$f$ [Hz]	délka kabelu			
	0 m	1 m	2 m	4 m
20 – 1M	0	0,25 m $\Omega$	0,5 m $\Omega$	1 m $\Omega$
1M – 2M	0	1 m $\Omega$	2 m $\Omega$	4 m $\Omega$

### 1.3.4 Korekce admitance při zapojení naprázdno

Korekce admitance při zapojení naprázdno (Open offset)  $Y_o$  se vypočítá ze vzorců v tab. 19, v případě, že měřicí napětí  $V_s \leq 2V$ . V opačném případě ( $V_s > 2V$ ) se pro výpočet použijí vzorce uvedené v tab. 20.

Tab. 19: Vztahy pro výpočet open offset  $Y_o$  pro  $V_s \leq 2V$  [3]

$f$ [Hz]	doba integrace	
	Short	Medium, Long
20 – 100k	$2 \text{ nS} \cdot (1 + 0,100/V_s) \cdot (1 + \sqrt{100/f_m})$	$0,5 \text{ nS} \cdot (1 + 0,100/V_s) \cdot (1 + \sqrt{100/f_m})$
100k – 1M	$20 \text{ nS} \cdot (1 + 0,100/V_s)$	$5 \text{ nS} \cdot (1 + 0,100/V_s)$
1M – 2M	$40 \text{ nS} \cdot (1 + 0,100/V_s)$	$10 \text{ nS} \cdot (1 + 0,100/V_s)$

Tab. 20: Vztahy pro výpočet open offset  $Y_o$  pro  $V_s > 2V$  [3]

$f$ [Hz]	doba integrace	
	Short	Medium, Long
20 – 100 k	$2 \text{ nS} \cdot (1 + 2/V_s) \cdot (1 + \sqrt{100/f_m})$	$0,5 \text{ nS} \cdot (1 + 2/V_s) \cdot (1 + \sqrt{100/f_m})$
100 k – 1 M	$20 \text{ nS} \cdot (1 + 2/V_s)$	$5 \text{ nS} \cdot (1 + 2/V_s)$
1 M – 2 M	$40 \text{ nS} \cdot (1 + 2/V_s)$	$10 \text{ nS} \cdot (1 + 2/V_s)$

$V_s$  [V] – měřicí napětí,  $f_m$  [Hz] – měřicí frekvence

Pro různé délky připojovacích kabelů se koeficient  $Y_o$  vynásobí činitelem z tab. 21. V tabulkách na příloženém CD je tato hodnota označena  $Y_o^*$ .

Tab. 21: Vztahy pro výpočet  $Y_o$  \* [3]

$f$ [Hz]	délka kabelu			
	0 m	1 m	2 m	4 m
100 – 100k	1	$1 + 5 \cdot f_m / 1 \text{ MHz}$	$1 + 10 \cdot f_m / 1 \text{ MHz}$	$1 + 20 \cdot f_m / 1 \text{ MHz}$
100k – 1M	1	$1 + 0,5 \cdot f_m / 1 \text{ MHz}$	$1 + 1 \cdot f_m / 1 \text{ MHz}$	$1 + 2 \cdot f_m / 1 \text{ MHz}$
1M – 2M	1	$1 + 1 \cdot f_m / 1 \text{ MHz}$	$1 + 2 \cdot f_m / 1 \text{ MHz}$	$1 + 4 \cdot f_m / 1 \text{ MHz}$

$f_m$  [Hz] – měřicí frekvence

### 1.3.5 Teplotní faktor

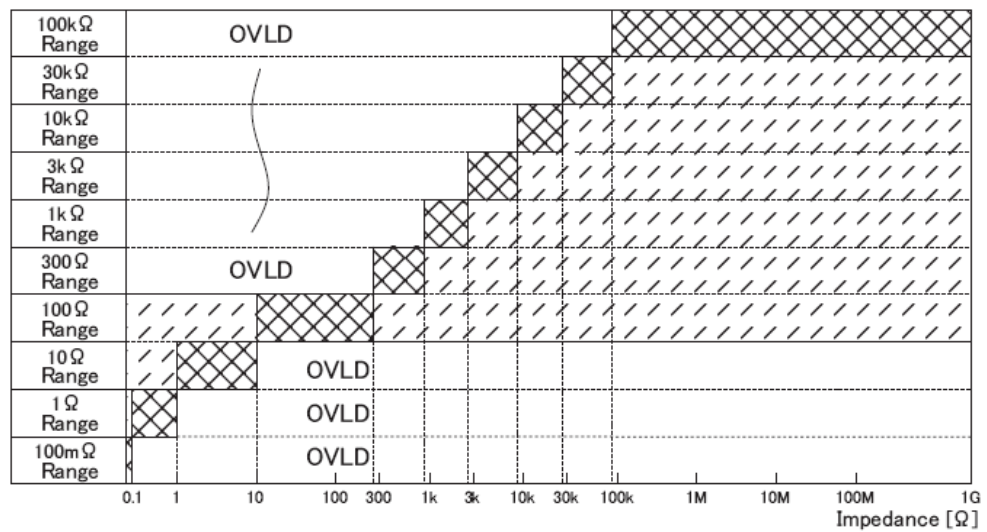
Závislost teplotního faktoru  $K_t$  na teplotě je uvedena v tab. 22. Ve školních laboratořích se teplota vzduchu pohybuje v rozmezí od 18 °C do 28 °C proto tento faktor nemá vliv na výpočet relativní přesnosti. Z tabulky je zřejmé, že při nedodržení těchto mezí je vliv  $K_t$  velmi výrazný, protože tímto faktorem se násobí všechny ostatní faktory potřebné pro výpočet  $A_e$ .

Tab. 22: Závislost faktoru  $K_t$  na teplotě [3]

$\vartheta$ [°C]	0 – 18	18 – 28	28 - 55
$K_t$	4	1	4

### 1.3.6 Kalibrační přesnost

Pro určení kalibrační přesnosti  $A_{cal}$  potřebujeme znát hodnotu impedančního rozsahu měřicího přístroje. Tuto hodnotu nemůžeme vyčíst přímo z displeje přístroje. Proto při automatizovaném měření musíme nastavit program tak, aby nám impedanční rozsah zapisoval spolu s měřenou hodnotou do tabulky Excel nebo tuto hodnotu můžeme vyčíst z technické dokumentace přístroje. Všechny impedanční rozsahy přístroje E4980 jsou naznačeny na obr. 8 a v tab. 23.



▨ - efektivní měřicí rozsah

▩ - zobrazitelný rozsah

Obr. 8: Grafické znázornění Impedančního rozsahu [3]

Tab. 23: Číselné znázornění Impedančního rozsahu [3]

Impedanční rozsah [Ω]	Efektivní měřicí rozsah [Ω]
100m	$0 <  Z_m  \leq 108m$
1	$108m <  Z_m  \leq 1,08$
10	$1,08 <  Z_m  \leq 10,08$
100	$10,08 <  Z_m  < 276$
300	$276 \leq  Z_m  < 0,92k$
1k	$0,92k \leq  Z_m  < 2,76$
3k	$2,76 \leq  Z_m  < 9,2k$
10k	$9,2k \leq  Z_m  < 27,6$
30k	$27,6 \leq  Z_m  < 92k$
100k	$92k \leq  Z_m $

Pokud je přístroj nastaven na automatické přepínání měřicího rozsahu, pohybuje se jeho měřicí rozsah vždy v oblasti “efektivní měřicí rozsah”. Pokud manuálně nastavíme rozsah do oblasti OVL'D (overload), přístroj nebude schopen zobrazit výsledek a nahlásí chybu.

Kalibrační přesnost  $A_{cal}$  se vypočte ze vzorců v tab. 24. Pro různé impedanční rozsahy a frekvence je dán určitý vzorec. Pokud je frekvence na hraniční čáře, platí lepší hodnota, tj. menší chyba.

Tab. 24: Vztahy pro výpočet kalibrační přesnosti  $A_{cal}$  a  $\theta_{cal}$

Impedanční rozsah 0,1; 1; 10  $\Omega$

	$f$ [Hz]					
	20 – 1k	1k – 10k	10k – 100k	100k – 300k	300k – 1M	1M – 2M
$A_{cal}$	0,03	0,05	0,05	$0,05 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot f_m$	$0,05 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot f_m$	$0,1 + 1 \cdot 10^{-4} \cdot f_m$
$\theta$ [rad]	$10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-7} \cdot f_m$	$3 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-7} \cdot f_m$	$6 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 10^{-7} \cdot f_m$

Impedanční rozsah 100  $\Omega$

	$f$ [Hz]					
	20 – 1k	1k – 10k	10k – 100k	100k – 300k	300k – 1M	1M – 2M
$A_{cal}$	0,03	0,05	0,05	$0,05 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot f_m$	$0,05 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot f_m$	$0,1 + 1 \cdot 10^{-4} \cdot f_m$
$\theta$ [rad]	$10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$

Impedanční rozsah 300  $\Omega$ ; 1 k $\Omega$

	$f$ [Hz]					
	20 – 1k	1k – 10k	10k – 100k	100k – 300k	300k – 1M	1M – 2M
$A_{cal}$	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1
$\theta$ [rad]	$10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$

Impedanční rozsah 3 k $\Omega$ ; 10 k $\Omega$

	$f$ [Hz]					
	20 – 1k	1k – 10k	10k – 100k	100k – 300k	300k – 1M	1M – 2M
$A_{cal}$	$0,03 + 10^{-4} \cdot f_m$	$0,03 + 10^{-4} \cdot f_m$	$0,03 + 10^{-4} \cdot f_m$	$0,03 + 10^{-4} \cdot f_m$	$0,03 + 10^{-4} \cdot f_m$	$0,06 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot f_m$
$\theta$ [rad]	$10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$

Impedanční rozsah 30 k $\Omega$ ; 100 k $\Omega$

	$f$ [Hz]					
	20 – 1k	1k – 10k	10k – 100k	100k – 300k	300k – 1M	1M – 2M
$A_{cal}$	$0,03 + 10^{-4} \cdot f_m$	$0,03 + 10^{-4} \cdot f_m$	$0,03 + 10^{-4} \cdot f_m$	$0,03 + 10^{-4} \cdot f_m$	$0,03 + 10^{-4} \cdot f_m$	$0,06 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot f_m$
$\theta$ [rad]	$10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$

$f_m$  [Hz] – frekvence měřicího signálu

### 1.3.7 Chyba měření ztrátového činitele

Chyba měření  $tg \delta$  se vypočítá ze vztahu

$$D = D_e + \theta_{cal} \quad (12)$$

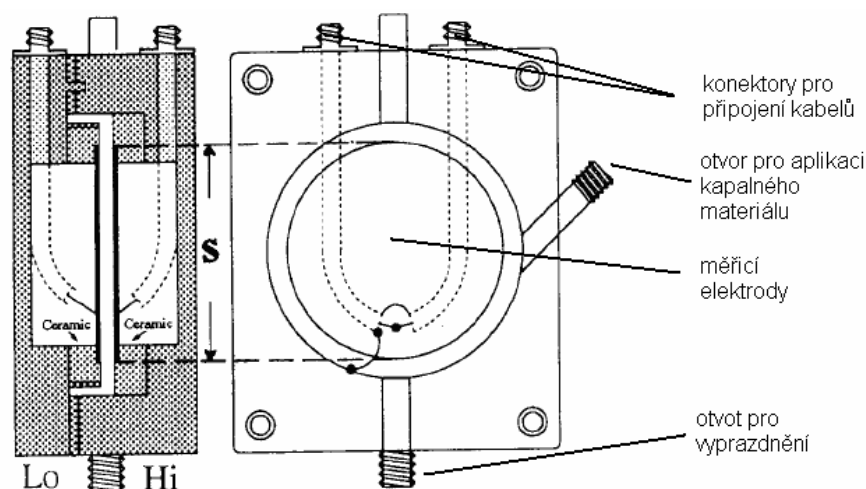
kde  $D$  je celková chyba měření,  $D_e$  je relativní přesnost ztrátového činitele a  $\theta_{cal}$  je kalibrační přesnost. Koeficient  $D_e$  vypočteme ze vztahu

$$D_e = \pm \frac{A_e}{100}. \quad (13)$$

Kalibrační přesnost  $\theta_{cal}$  se určí z tab. 24 stejným způsobem jako  $A_{cal}$ .

### 1.4 Elektrodotový systém Agilent 16452A

Elektrodotový systém 16452A slouží k měření dielektrických vlastností kapalných materiálů v závislosti na měřicím napětí, frekvenci nebo např. na teplotě vzorku. Tento elektrodotový systém je navržen k práci s RLC metry Agilent. Systém se k měřicímu přístroji připojuje pomocí čtyř BNC kabelů. Doporučené délky kabelů jsou 0, 1, 2 m.



Obr. 9: Elektrodotový systém Agilent 16452A [4]

Velikost elektrod systému 16452A je  $38 \pm 0,5$  mm. Vzdálenost elektrod je nastavitelná pomocí distančních kroužků. V této práci jsme měřili při tloušťkách (0,19; 0,3; 0,5; 1; 2) mm. Operační frekvence je od 20 Hz do 30 MHz. Maximální měřicí frekvence je však omezena maximální měřicí frekvencí měřicího přístroje.

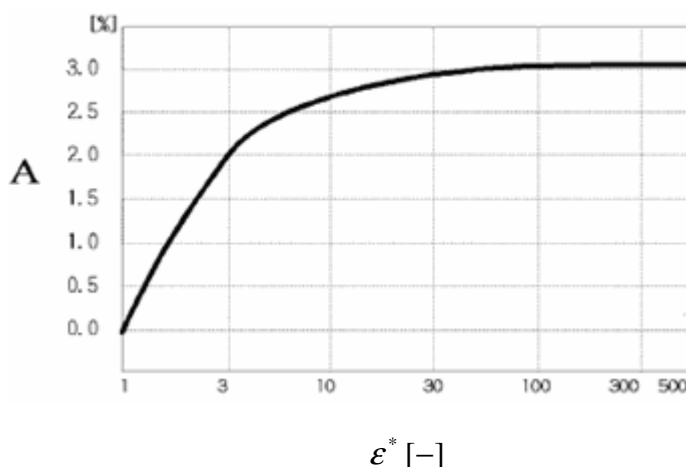
Elektrody systému jsou tvořeny slitinou železa, kobaltu a niklu. Izolace je keramická.

#### 1.4.1 Chyba měření relativní permitivity elektrodového systému

Chyba měření elektrodového systému  $A_{es}$  se skládá ze dvou faktorů. Faktor  $A_{esA}$  je závislý na relativní permitivitě měřeného vzorku a faktor  $A_{esB}$  závisí na měřicí frekvenci. Platí, že

$$A_{es} = A_{esA} + A_{esB} \quad (14)$$

Oba faktory se dají určit z jednoduchých grafů. Faktor  $A_{esA}$  lze odečíst z obr. 10,

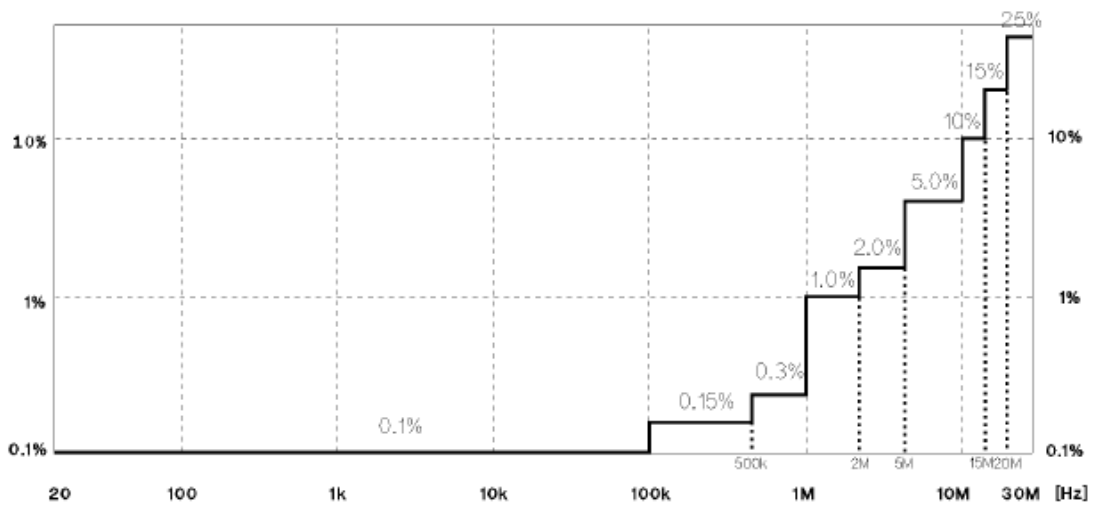


Obr. 10: Grafické znázornění chyby elektrodového systému  $A_{esA}$  [4]

nebo z rovnice

$$A_{esA} = \left( \frac{100 \cdot |\epsilon_{rm}^*|}{97,0442 \cdot |\epsilon_{rm}^*| + 2,9558} - 1 \right) \cdot 100. \quad (15)$$

Faktor  $A_{esB}$  se určí z obr. 11. Je z něj zřejmé, že pro hodnoty  $f \leq 100$  kHz je chyba poměrně malá. Naopak u frekvencí nad 10 MHz je již chyba velmi vysoká.



Obr. 11: Grafické znázornění chyby elektrodového systému  $A_{esB}$  [4]

## 1.5 Nejistota měření

Nejistota měření je parametrem, který bezprostředně souvisí s výsledkem měření, neboť vymezuje interval, v němž lze s určitou pravděpodobností předpokládat výskyt skutečné hodnoty měřené veličiny. Nejistota odráží veškeré nedokonalosti stanovení výsledku měření. V praxi se lze asi velmi zřídka setkat s tou kterou skupinou nejistot samostatně. Za typický příklad je možné považovat způsob určování hodnoty měřené veličiny pomocí opakovaného měření. Tomuto modelu odpovídá situace, kdy celkovou část celkové nejistoty tvoří nejistota vyhodnocovaná metodou A, tj. statisticky (nejistota typu A). Nepominutelný je při tom ovšem podíl nejistot zjišťovaných metodami B (nejistota typu B), tj. takových, které jsou do procesu vnášeny jinými cestami, např. systematickými vlivy apod. [6]

### 1.5.1 Výpočet standardní nejistoty typu A

Výpočet nejistoty typu A je založen na statistické analýze naměřených údajů. U opakovaných přímých měření jde o běžné statistické zpracování hodnot měřené veličiny získaných opakovanými přímými měřeními, jichž by mělo být aspoň deset. Předpokládá se při tom, že měření jsou navzájem nezávislá a uskutečněná za stejných podmínek. Je tedy k dispozici  $n$  naměřených údajů  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ , které jsou výsledkem realizace  $n$  nezávislých a stejně přesných měření jedné veličiny.

Základní výsledek měření je představován aritmetickým průměrem

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (17)$$

Standardní nejistota typu A tohoto výsledku, které se značí  $u_A(x)$ , se rovná směrodatné odchylce aritmetického průměru  $s_{\bar{x}}$  tedy

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (18)$$

Vztah 18 lze k výpočtu nejistoty použít jen tehdy, byl-li vykonán dostatečný počet měření ( $n \geq 10$ ). [6]

### 1.5.2 Výpočet standardní nejistoty typu B

Nejistoty zjišťované metodou B jsou vázány na známé, identifikovatelné a kvantifikovatelné zdroje. Výpočet nejistoty typu B vychází z úsudku založeného na všech dostupných informacích o měřené veličině  $X$  a jejích možných změnách. V našem případě jako zdroj informací k určení nejistoty typu B posloužily manuály k měřicím přístrojům.

Standardní nejistota  $u_b$  se vypočítá ze vztahu

$$u_b = \frac{z_{j\max}}{k}, \quad (19)$$

kde  $k$  je hodnota zvolená ke zvolené aproximaci rozdělení pravděpodobnosti a  $z_{j\max}$  je hodnota odchylek (vypočtená podle postupů uvedených v kapitolách 1.1 až 1.4 vyjádřená v jednotkách měřené veličiny. V této práci jsme použili rovnoměrné – pravoúhlé rozdělení, proto  $k = \sqrt{3}$ . [6]

### 1.5.3 Standardní kombinovaná nejistota

V praxi je obvykle třeba společně jediným číslem vyjádřit nejistotu typu A a nejistoty typu B. K tomu slouží celková nejistota označovaná  $u_c$ . Vypočte se ze vztahu

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)}. \quad (20)$$

[6]

#### 1.5.4 Rozšířená nejistota

Výsledek měření ve tvaru  $\bar{x} \pm u_c$  definuje skutečnou hodnotu měřené veličiny s poměrně malou pravděpodobností, přibližně 60 %. Tato pravděpodobnost je většinou nedostatečná. Proto je snahou stanovit interval, ve kterém se hodnota nachází s pravděpodobností blížíící se 100 %. Do praxe se tudíž zavádí tzv. rozšířená nejistota  $U$ , definovaná jako

$$U = k_r \cdot u_c, \quad (21)$$

kde  $k_r$  je koeficient rozšíření. Hodnota  $k_r$  závisí na typu rozdělení pravděpodobnosti výsledku měření. V praxi se používají různé hodnoty koeficientů rozšíření podle typu rozdělení a požadované hodnoty pravděpodobnosti. Velmi častým případem je 95% pravděpodobnost (tzv. konfidenční), že skutečná hodnota se nachází v intervalu  $\bar{x} \pm U$ . V případě normálního rozdělení výsledků měření odpovídá pravděpodobnosti 95 % hodnota  $k_r = 2$ . Vycházíme-li z teorie matematické statistiky, je možné předpokládat normální rozdělení velmi často. Proto se v praxi také nejčastěji pracuje s  $k_r = 2$ . [6]

## 2 Experimentální část

V tabulkách jsou uvedeny naměřené střední kapacity vzorku  $C_{str}$ , odchylky měření kapacity  $\Delta C$ , střední hodnoty naměřeného ztrátového činitele  $tg \delta$ , a odchylky měření ztrátového činitele  $\Delta tg \delta$ . Pro přehlednost jsou uvedeny pouze tabulky a grafy pro 0,19 mm, 0,3 mm a 1 mm a v tabulkách nejsou uvedeny všechny dílčí koeficienty potřebné pro výpočet nejistoty  $U_c$ . Kvůli přehlednosti grafů jsou také vynechány některé měřené frekvence. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty a grafy jsou na přiloženém digitálním mediu.

### 2.1 Výsledky a vyhodnocení měření

#### 2.1.1 Výpočet chyby měření přístroje Agilent 4284A

Pro příklad výpočtu nejistoty měření přístroje Agilent 4284A byla zvolena kapacita měřená při  $f = 800$  kHz, měřicí napětí  $U = 1$  V, doba integrace Long, tloušťka vzorku 1 mm. Změřená geometrická kapacita elektrodového systému je  $C_{es} = 1,061 \cdot 10^{-11}$  F. Střední hodnota změřeného ztrátového činitele je  $tg \delta_{str} = 0,00735$ .

**Střední kapacita  $C_{str}$ :**

Střední kapacita je tvořena střední hodnotou deseti naměřených kapacit.

$$C_{str} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n C_i = 2,838 \cdot 10^{-11} \text{ F}$$

**Střední hodnota ztrátového činitele  $tg \delta_{str}$ :**

$$tg \delta_{str} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n tg \delta_i = 0,00735$$

**Impedance  $Z$ :**

$$Z = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{str}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 800k \cdot 2,838 \cdot 10^{-11}} = 7008,72 \text{ } \Omega$$

**Základní přesnost  $A_b$ :**

$$A_b = 0,1$$

(viz. obr. 2)

**Interpolační proporcionální faktor  $K_a$  :**

$$K_a = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{|Z_m|} \cdot \left( 3 + \frac{200}{V_s} + \frac{V_s^2}{10^8} \right) = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{7008,72} \cdot \left( 3 + \frac{200}{1000} + \frac{1000^2}{10^8} \right) = 4,58 \cdot 10^{-7} \quad (\text{viz. tab. 2})$$

**Interpolační proporcionální faktor  $K_b$  :**

$$K_b = |Z_m| \cdot (10 \cdot 10^{-9}) \cdot \left( 1 + \frac{70}{V_s} \right) = 7008,72 \cdot (10 \cdot 10^{-9}) \cdot \left( 1 + \frac{70}{1000} \right) = 7,49 \cdot 10^{-5} \quad (\text{viz. tab. 2})$$

**Faktor délky kabelu  $K_{aa}$  :**

$$K_{aa} = 0 \quad (\text{viz. tab. 3})$$

**Faktor délky kabelu  $K_{bb}$  :**

$$K_{bb} = 1 + 0,5 \cdot f_m = 1 + 0,5 \cdot 0,8 = 1,4 \quad (\text{viz. tab. 4})$$

**Kalibrační interpolační faktor  $K_c$  :**

$$K_c = 0 \quad (\text{viz. tab. 6, tab. 7})$$

**Faktor délky kabelu  $K_d$  :**

$$K_d = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 50 \cdot f_m) = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 50 \cdot 0,8) = 0,01025 \quad (\text{viz. tab. 5})$$

**Teplotní faktor  $K_e$**

$$K_e = 0 \quad (\text{viz. tab. 8})$$

**Relativní přesnost  $A_e$**

$$A_e = \pm [A + (K_a + K_{aa} + K_b \cdot K_{bb} + K_c) \cdot 100 + K_d] \cdot K_e$$

$$A_e = \pm [0,1 + (4,58 \cdot 10^{-7} + 0 + 7,49 \cdot 10^{-5} \cdot 1,4 + 0) \cdot 100 + 0,01025] \cdot 1$$

$$A_e = 0,12079 \quad (\text{viz. vzorec (2)})$$

**Kalibrační přesnost  $A_{cal}$**

$$A_{cal} = 0,05 \quad (\text{viz. obr. 4})$$

**Celková chyba měřicího přístroje  $A_{mp}$**

$$A_{mp} = A_e + A_{cal} = 0,12079 + 0,05 = 0,17079 \%$$

**Nejistota měření**

**Standardní nejistota typu A:**

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 2,99 \cdot 10^{-15} \quad (\text{viz. vzorec (18)})$$

**Standardní nejistota typu B:**

**Odchylka  $\Delta C_{mp}$  :**

$$\Delta C_{mp} = C_{str} \cdot (A_{mp} / 100) = 4,85 \cdot 10^{-14} \text{ F}$$

$$u_b = \frac{\Delta C_{mp}}{\sqrt{3}} = \frac{4,85 \cdot 10^{-14}}{\sqrt{3}} = 2,79 \cdot 10^{-14} \text{ F}$$

**Standardní kombinovaná nejistota  $u_c$  :**

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} = \sqrt{(2,99 \cdot 10^{-15})^2 + (2,79 \cdot 10^{-14})^2} = 2,82 \cdot 10^{-14} \text{ F}$$

**Rozšířená nejistota  $U_c$  :**

$$U_c = k_r \cdot u_c = 2 \cdot 2,82 \cdot 10^{-14} = 5,63 \cdot 10^{-14} \text{ F}$$

### 2.1.2 Výpočet chyby měření přístroje Agilent 4285A

Pro příklad výpočtu nejistoty měření přístroje Agilent 4285A byla zvolena kapacita měřená při  $f = 794,3$  kHz, měřicí napětí  $U = 1$  V, doba integrace Long, tloušťka vzorku 1 mm. Změřená geometrická kapacita elektrodového systému je  $C_{es} = 1,061 \cdot 10^{-11}$  F. Střední hodnota změřeného ztrátového činitele je  $tg \delta_{str} = 0,00735$ .

**Střední kapacita  $C_{str}$  :**

Střední kapacita je tvořena střední hodnotou deseti naměřených kapacit.

$$C_{str} \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n C_i = 2,847 \cdot 10^{-11} \text{ F}$$

**Střední hodnota ztrátového činitele  $tg \delta_{str}$  :**

$$tg \delta_{str} \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n tg \delta_i = 0,00735$$

**Impedance  $Z$ :**

$$Z = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{str}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 794,3k \cdot 2,838 \cdot 10^{-11}} = 7035,95 \Omega$$

**Konstanta  $N_1$  pro výpočet základní přesnosti:**

$$N_1 = 0,08 \quad (\text{viz. tab. 10})$$

**Koeficienty  $K_i$  a  $K_{osc}$  :**

$$K_i = 1$$

$$K_{osc} = 0,08 \quad (\text{viz. obr. 6})$$

**Základní přesnost  $A_b$  :**

$$A_b = 0,18 \% + \left( \frac{Z_m}{5k} \right) \cdot 0,02 \% \cdot K_i \cdot K_{osc}$$

$$A_b = 0,18 \% + \left( \frac{7038,95}{5k} \right) \cdot 0,02 \% \cdot 1 \cdot 0,08 = 0,18 \quad (\text{viz. tab. 9, vzorec } A_5)$$

**Faktor délky kabelu  $A_c$  :**

$$A_c = \frac{f_m [\text{MHz}]}{15} = \frac{794,3 \cdot 10^{-6}}{15} = 0,053 \quad (\text{viz. vzorec (6)})$$

**Teplotní faktor  $K_t$  :**

$$K_t = 1 \quad (\text{viz. tab. 11})$$

**Celková chyba měření:**

$$A_e = (A_b + A_c) \cdot K_t = (0,18 + 0,053) \cdot 1 = 0,234 \% \quad (\text{viz. vzorec (5)})$$

Nejistota měření se vypočítá stejným způsobem jako v příkladu výpočtu pro přístroj Agilent 4284A.

### 2.1.3 Výpočet chyby měření přístroje E4980

Pro příklad výpočtu nejistoty měření přístroje Agilent E4980 byla zvolena kapacita měřená při  $f = 796200$  kHz, měřicí napětí  $U = 1$  V, doba integrace Long, tloušťka vzorku 1 mm. Změřená geometrická kapacita elektrodového systému je  $C_{es} = 1,061 \cdot 10^{-11}$  F. Střední hodnota změřeného ztrátového činitele je  $tg \delta_{str} = 0,00735$ .

**Střední kapacita  $C_{str}$  :**

Střední kapacita je tvořena střední hodnotou deseti naměřených kapacit.

$$C_{str} \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n C_i = 2,847 \cdot 10^{-11} \text{ F}$$

**Střední hodnota ztrátového činitele  $tg \delta_{str}$  :**

$$tg \delta_{str} \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n tg \delta_i = 0,00735$$

**Impedance  $Z$ :**

$$Z = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{str}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 796,2k \cdot 2,838 \cdot 10^{-11}} = 7019,86 \text{ } \Omega$$

**Základní přesnost  $A_b$  :**

$$A_b = 0,05 \quad (\text{viz. obr. 12})$$

**Základní přesnost  $A_b$  ++ :**

$$A_b ++ = 0,015 \cdot \left( \frac{f_m}{10^6} \right)^2 \cdot K_l^2 = 0,015 \cdot \left( \frac{796200}{10^6} \right)^2 \cdot 1^2 = 0,0951 \quad (\text{viz. vzorec (11)})$$

**Korekce impedance při zapojení nakrátko  $Z_s$  :**

$$\begin{aligned} Z_s &= 0,06 \text{ m}\Omega \cdot (1 + 0,4/V_s) \cdot \left( 1 + \sqrt{1000/f_m} \right) = \\ &= 0,06 \text{ m}\Omega \cdot (1 + 0,4/1) \cdot \left( 1 + \sqrt{1000/796200} \right) = 0,00087 \end{aligned} \quad (\text{viz. tab. 16})$$

**Korekce impedance při zapojení nakrátko  $Z_s$  + :**

$$Z_s + = 0,00025 \quad (\text{viz. tab. 18})$$

**Korekce admitance při zapojení naprázdno  $Y_o$  :**

$$Y_o = 5 \text{ nS} \cdot (1 + 0,1/V_s) = 5 \text{ nS} \cdot (1 + 0,1/V_s) = 5,5 \cdot 10^{-9} \quad (\text{viz. tab. 19})$$

**Korekce admitance při zapojení naprázdno  $Y_o^*$  :**

$$Y_o^* = 1 + 0,5 \cdot f_m / 1\text{MHz} = 1 + 0,5 \cdot 796200 / 1\text{MHz} = 1,39 \quad (\text{viz. tab. 21})$$

**Relativní přesnost  $A_e$  :**

$$\begin{aligned} A_e &= [A_b + Z_s / |Z_m| \cdot 100 + Y_o \cdot |Z_m| \cdot 100] \cdot K_t = \\ &= [0,05 + (0,00087 + 0,00025) / 7019 \cdot 100 + (5,5 \cdot 10^{-9} \cdot 1,39) \cdot 7019 \cdot 100] \cdot 1 = 0,064 \end{aligned} \quad (\text{viz. vzorec (10)})$$

**Kalibrační přesnost  $A_{cal}$  :**

$$A_{cal} = 0,03 + 0,0001 \cdot (f_m / 1000) = 0,03 + 0,0001 \cdot (796200 / 1000) = 0,109 \quad (\text{viz. tab. 24})$$

**Celková chyba měřicího přístroje  $A_{mp}$**

$$A_{mp} = A_e + A_{cal} = 0,064 + 0,109 = 0,174 \% \quad (\text{viz. vzorec (9)})$$

Nejistota měření se vypočítá stejným způsobem jako v příkladu výpočtu pro přístroj Agilent 4284A.

## 2.2 Číselné znázornění nejistot měření

V této kapitole jsou uvedeny tabulky se změřenými hodnotami kapacit  $C$ , ztrátových činitelů  $tg \delta$ , a jejich vypočtené nejistoty měření při různých frekvencích. V tabulkách je znázorněno srovnání nejistot měření přístrojů při vybraných frekvencích a nastaveních měřicích režimů. Z kapacitních důvodů jsou znázorněny pouze tabulky pro tloušťky vzorku 0,19 mm, 0,3 mm a 1 mm a nastavení 1 V Long, 2 V Long a 1 V Short.

Přílohy obsahují tabulky zaměřené na porovnání nejistot měření jednotlivých přístrojů pro různé nastavení měřicích parametrů.

Tab. 25: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 0,19 mm, 1 V, Long

$f$ [Hz]	Agilent 4284				Agilent 4980				Agilent 4285			
	$C_{sr}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{sr}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{sr}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]
20	2,29E-10	3,34E-11	-0,70519	0,148011	1,44E-10	1,67E-11	0,000675	0,115534	-	-	-	-
100	1,34E-10	2,54E-12	-0,14752	0,018684	1,43E-10	2,23E-12	0,00037	0,007671	-	-	-	-
1k	1,44E-10	4,18E-13	-0,0121	0,00268	1,44E-10	3,51E-13	0,000155	0,002223	-	-	-	-
10k	1,46E-10	1,73E-13	-0,00085	0,00107	1,43E-10	2,44E-13	0,00043	0,001583	-	-	-	-
100k	1,46E-10	1,57E-13	0,002294	0,001019	1,43E-10	2,43E-13	0,002156	0,001635	1,45E-10	3,15E-13	0,002429	0,002176
1M	1,45E-10	1,92E-13	0,009161	0,001095	1,42E-10	3,57E-13	0,008609	0,002044	1,44E-10	2,54E-13	0,009254	0,001762
2M	-	-	-	-	1,42E-10	4,28E-13	0,011124	0,002557	1,35E-10	6,37E-12	0,013391	0,0471

Tab. 26: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 0,19 mm, 2V, Long

$f$ [Hz]	Agilent 4284				Agilent 4980				Agilent 4285			
	$C_{sr}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{sr}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{sr}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]
20	2,23E-10	3,23E-11	-0,67477	0,144577	1,44E-10	1,82E-11	0,000215	0,126098	-	-	-	-
100	1,33E-10	2,38E-12	-0,14761	0,018023	1,44E-10	2,51E-12	0,000323	0,017152	-	-	-	-
1k	1,44E-10	4,11E-13	-0,0125	0,00264	1,44E-10	5,06E-13	0,000164	0,002882	-	-	-	-
10k	1,46E-10	2,56E-13	-0,00087	0,001643	1,44E-10	3,42E-13	0,000429	0,00159	-	-	-	-
100k	1,46E-10	2,41E-13	0,002208	0,001596	1,44E-10	4,05E-13	0,002174	0,002209	1,45E-10	3,52E-13	0,00235	0,002421
1M	1,45E-10	2,75E-13	0,009031	0,001671	1,43E-10	5,76E-13	0,008621	0,003197	1,45E-10	4,58E-13	0,0093	0,00317
2M	-	-	-	-	1,42E-10	6,4E-13	0,010572	0,00371	1,44E-10	7,07E-13	0,012159	0,004915

Tab. 27: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 0,19 mm, 1V, Short

$f$ [Hz]	Agilent 4284				Agilent 4980				Agilent 4285			
	$C_{sr}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{sr}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{sr}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]
20	2E-10	7,52E-11	-1,07739	0,424679	1,44E-10	6,61E-11	-0,00355	0,458812	-	-	-	-
100	1,47E-10	1,18E-11	-0,1271	0,049035	1,43E-10	8,7E-12	0,000341	0,060463	-	-	-	-
1k	1,48E-10	1,03E-12	-0,02327	0,005986	1,43E-10	8,34E-13	0,000181	0,00559	-	-	-	-
10k	1,46E-10	2,98E-13	-0,00055	0,001828	1,43E-10	3,61E-13	0,000427	0,002404	-	-	-	-
100k	1,46E-10	2,44E-13	0,002295	0,001618	1,43E-10	3,57E-13	0,002145	0,002435	1,45E-10	3,18E-13	0,00248	0,002196
1M	1,45E-10	2,79E-13	0,009154	0,001699	1,42E-10	5,31E-13	0,008569	0,003265	1,44E-10	2,57E-13	0,00929	0,001784
2M	-	-	-	-	1,42E-10	5,99E-13	0,01106	0,00376	1,43E-10	3,82E-13	0,012231	0,002668

Tab. 28: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 0,3 mm, 1 V, Long

$f$ [Hz]	Agilent 4284				Agilent 4980				Agilent 4285			
	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]
20	1,42E-10	3,26E-11	-1,02209	0,235279	9,39E-11	1,66E-11	0,001061	0,176024	-	-	-	-
100	7,77E-11	2,36E-12	-0,24318	0,028912	9,34E-11	2,16E-12	0,000182	0,022881	-	-	-	-
1k	9,16E-11	3,39E-13	-0,01788	0,003478	9,35E-11	2,75E-13	0,000134	0,00272	-	-	-	-
10k	9,33E-11	1,18E-13	-0,00145	0,00115	9,35E-11	1,63E-13	0,00049	0,001626	-	-	-	-
100k	9,34E-11	1,55E-13	0,002433	0,001608	9,34E-11	1,62E-13	0,002534	0,001675	9,34E-11	2,04E-13	0,002768	0,002187
1M	9,27E-11	1,77E-13	0,009416	0,001682	9,27E-11	2,33E-13	0,009651	0,002055	9,27E-11	1,65E-13	0,009989	0,001776
2M	-	-	-	-	9,22E-11	2,79E-13	0,012202	0,002564	9,22E-11	2,46E-13	0,013196	0,002662

Tab. 29: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 0,3 mm, 2 V, Long

$f$ [Hz]	Agilent 4284				Agilent 4980				Agilent 4285			
	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]
20	1,49E-10	3,22E-11	-1,03645	0,215404	9,38E-11	1,83E-11	-0,00083	0,194345	-	-	-	-
100	7,78E-11	2,33E-12	-0,24689	0,031191	9,34E-11	2,61E-12	0,000285	0,02773	-	-	-	-
1k	9,16E-11	3,32E-13	-0,01839	0,00342	9,35E-11	3,41E-13	0,000147	0,003427	-	-	-	-
10k	9,34E-11	1,71E-13	-0,00149	0,00172	9,35E-11	2,18E-13	0,000489	0,002215	-	-	-	-
100k	9,34E-11	1,55E-13	0,002395	0,001607	9,34E-11	2,15E-13	0,002527	0,002247	9,34E-11	2,4E-13	0,002639	0,002569
1M	9,27E-11	1,77E-13	0,008994	0,001681	9,27E-11	3,4E-13	0,009537	0,003208	9,27E-11	3,08E-13	0,009955	0,003325
2M	-	-	-	-	9,22E-11	3,85E-13	0,011589	0,003717	9,22E-11	5,3E-13	0,012963	0,005751

Tab. 30: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 0,3 mm, 1 V, Short

$f$ [Hz]	Agilent 4284				Agilent 4980				Agilent 4285			
	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]
20	1,72E-10	8,47E-11	-1,06298	0,596035	9,44E-11	6,58E-11	-0,00648	0,696994	-	-	-	-
100	8,22E-11	1,1E-11	-0,21644	0,059916	9,36E-11	8,48E-12	0,001627	0,09034	-	-	-	-
1k	9,42E-11	1,78E-12	-0,02582	0,009677	9,35E-11	7,29E-13	0,000123	0,007579	-	-	-	-
10k	9,32E-11	2,01E-13	-0,00119	0,002076	9,35E-11	2,52E-13	0,000489	0,002578	-	-	-	-
100k	9,33E-11	2,13E-13	0,002425	0,002219	9,34E-11	2,47E-13	0,002527	0,002593	9,34E-11	2,07E-13	0,002753	0,002219
1M	9,27E-11	2,34E-13	0,009356	0,002297	9,27E-11	3,5E-13	0,009614	0,003309	9,27E-11	1,72E-13	0,009922	0,001831
2M	-	-	-	-	9,22E-11	3,92E-13	0,012129	0,003788	9,22E-11	2,47E-13	0,013192	0,002681

Tab. 31: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 1 mm, 1 V, Long

$f$ [Hz]	Agilent 4284				Agilent 4980				Agilent 4285			
	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]
20	2,89E-11	3,19E-11	-0,05147	1,104703	2,88E-11	1,64E-11	-0,00258	0,570144	-	-	-	-
100	2,85E-11	2,06E-12	-0,00819	0,072018	2,86E-11	2,06E-12	0,000759	0,071754	-	-	-	-
1k	2,85E-11	2,41E-13	-0,00071	0,008223	2,86E-11	1,77E-13	4,55E-05	0,005955	-	-	-	-
10k	2,85E-11	6,73E-14	0,000279	0,002229	2,86E-11	5,79E-14	0,000347	0,001909	-	-	-	-
100k	2,85E-11	4,99E-14	0,00218	0,00168	2,86E-11	8,67E-14	0,001898	0,003956	2,86E-11	6,39E-14	0,002256	0,002233
1M	2,84E-11	5,66E-14	0,008273	0,001753	2,84E-11	1,26E-13	0,00784	0,004443	2,84E-11	8,13E-14	0,00865	0,002859
2M	-	-	-	-	2,83E-11	2,05E-13	0,010539	0,007808	2,83E-11	1,08E-13	0,011821	0,003802

Tab. 32: : Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 1 mm, 2 V, Long

$f$ [Hz]	Agilent 4284				Agilent 4980				Agilent 4285			
	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]
20	2,89E-11	3,09E-11	-0,05284	1,067931	2,87E-11	1,8E-11	-0,00428	0,625238	-	-	-	-
100	2,86E-11	2E-12	-0,00852	0,069608	2,86E-11	2,33E-12	0,000722	0,081243	-	-	-	-
1k	2,86E-11	2,35E-13	-0,00075	0,007981	2,86E-11	2,06E-13	7,52E-05	0,006967	-	-	-	-
10k	2,86E-11	6,69E-14	0,000274	0,002204	2,86E-11	7,55E-14	0,00034	0,002523	-	-	-	-
100k	2,86E-11	5,03E-14	0,002144	0,001676	2,86E-11	1,03E-13	0,001894	0,004513	2,86E-11	8,22E-14	0,000626	0,003171
1M	2,84E-11	5,7E-14	0,007855	0,001749	2,84E-11	1,59E-13	0,007777	0,005587	2,84E-11	1,22E-13	0,008558	0,004295
2M	-	-	-	-	2,83E-11	2,37E-13	0,010017	0,008942	2,83E-11	1,29E-13	0,011384	0,004558

Tab. 33: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 1 mm, 1 V, Short

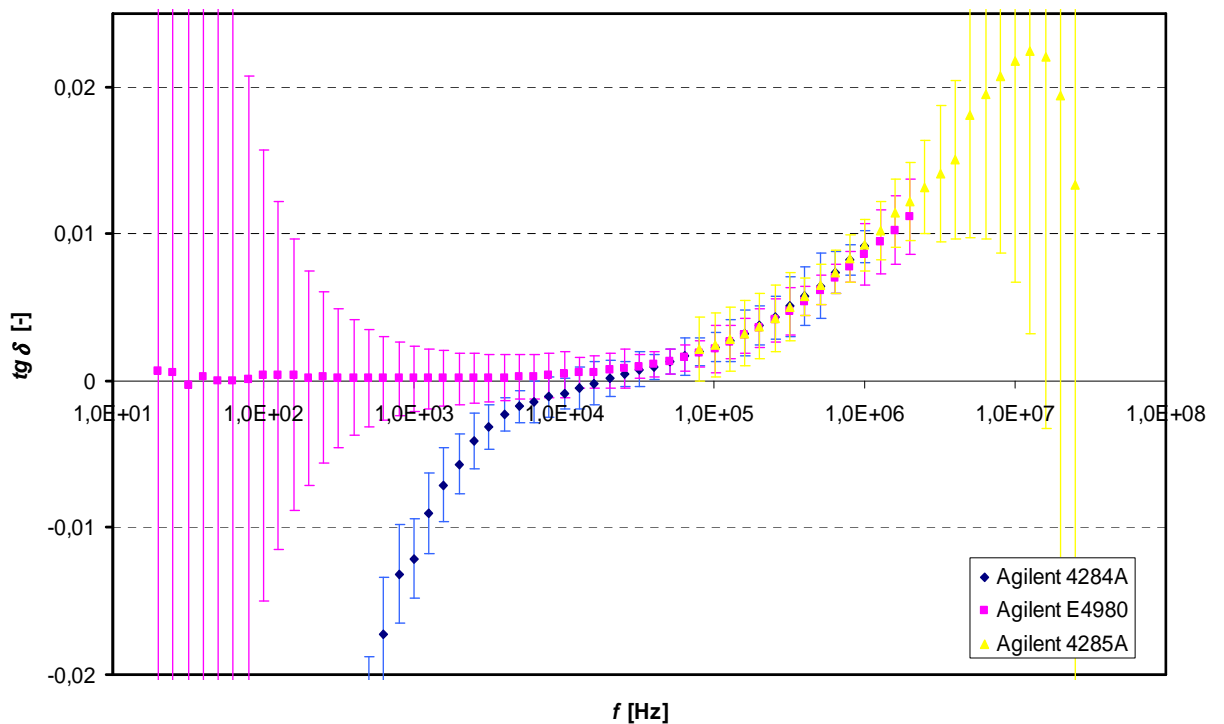
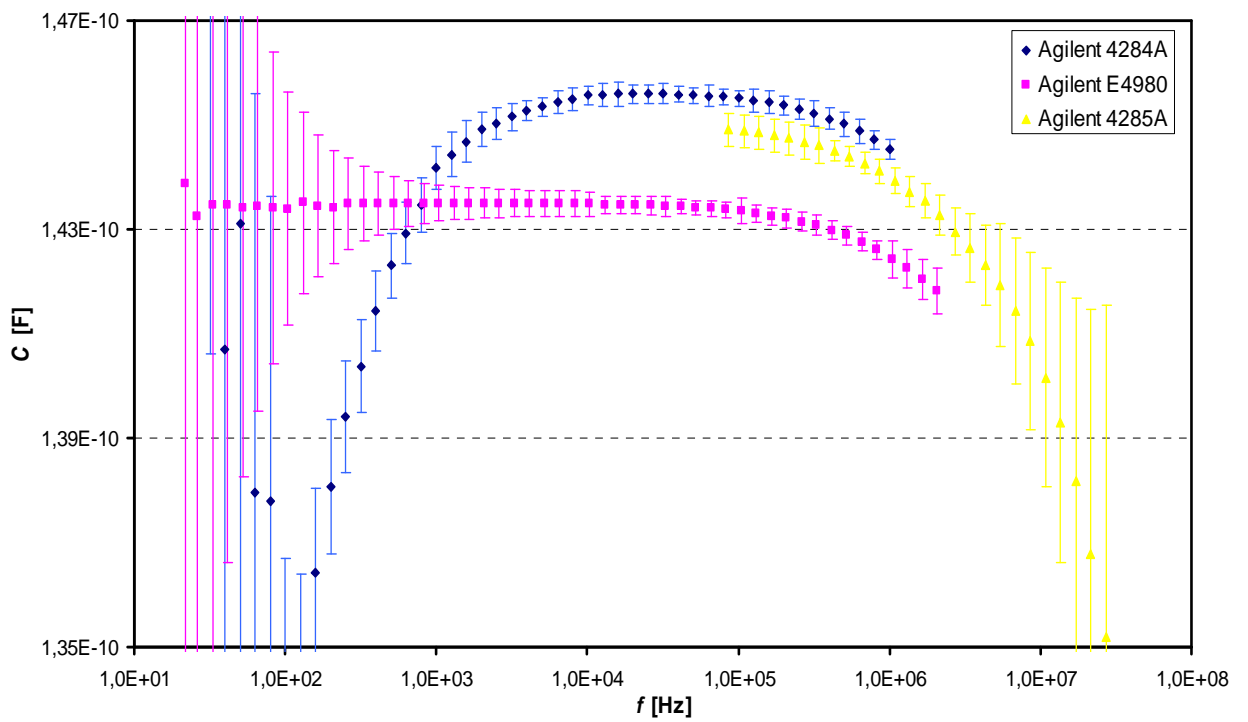
$f$ [Hz]	Agilent 4284				Agilent 4980				Agilent 4285			
	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]	$C_{str}$ [F]	$\Delta C$ [F]	$tg \delta$ [-]	$\Delta tg \delta$ [-]
20	2,99E-11	6,55E-11	-0,0264	2,191789	2,87E-11	6,56E-11	0,043485	2,286568	-	-	-	-
100	2,88E-11	4,16E-12	-0,00866	0,144175	2,86E-11	8,2E-12	-0,00505	0,286811	-	-	-	-
1k	2,86E-11	4,83E-13	-0,00108	0,016636	2,86E-11	5,93E-13	3,5E-05	0,020516	-	-	-	-
10k	2,86E-11	1,22E-13	0,00027	0,004143	2,86E-11	1,09E-13	0,000356	0,003707	-	-	-	-
100k	2,86E-11	6,93E-14	0,002197	0,002366	2,86E-11	1,35E-13	0,001895	0,005645	2,86E-11	6,61E-14	0,002302	0,00231
1M	2,84E-11	7,6E-14	0,008293	0,002441	2,84E-11	1,26E-13	0,007827	0,005918	2,84E-11	8,16E-14	0,008688	0,002869
2M	-	-	-	-	2,83E-11	2,44E-13	0,010555	0,009178	2,83E-11	1,09E-13	0,01179	0,00384

### **2.3 Grafické znázornění nejistot měření**

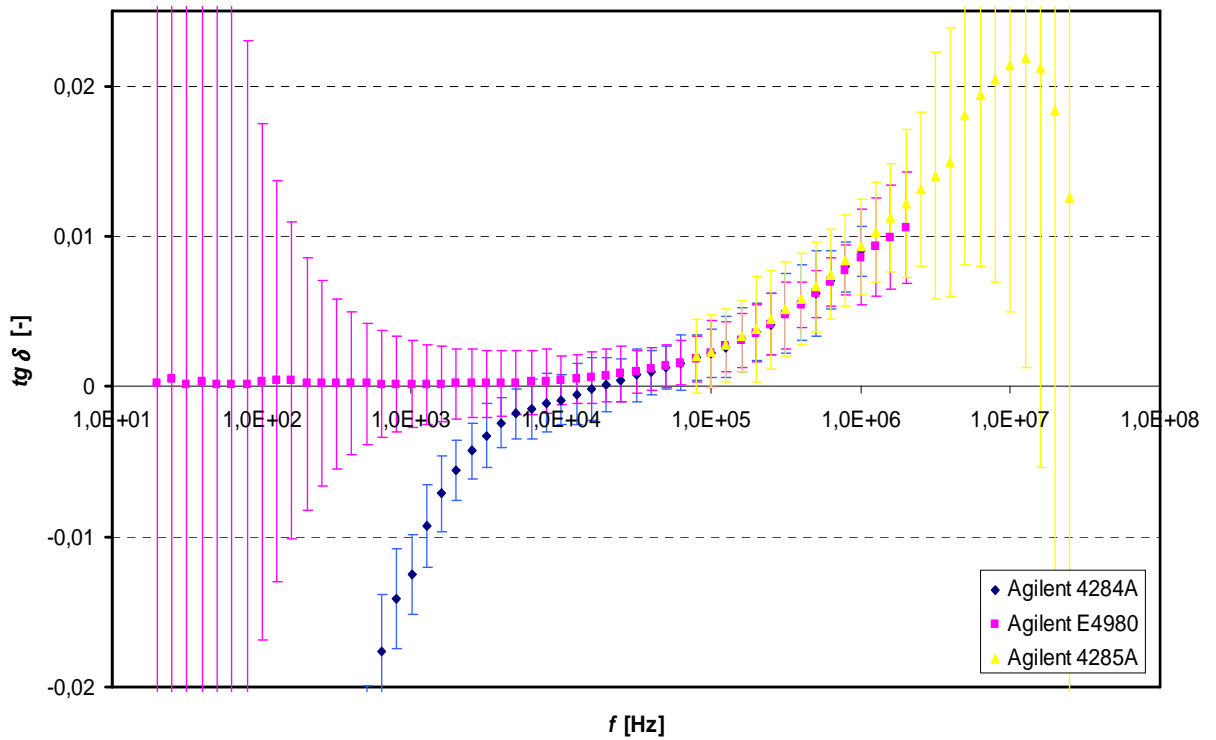
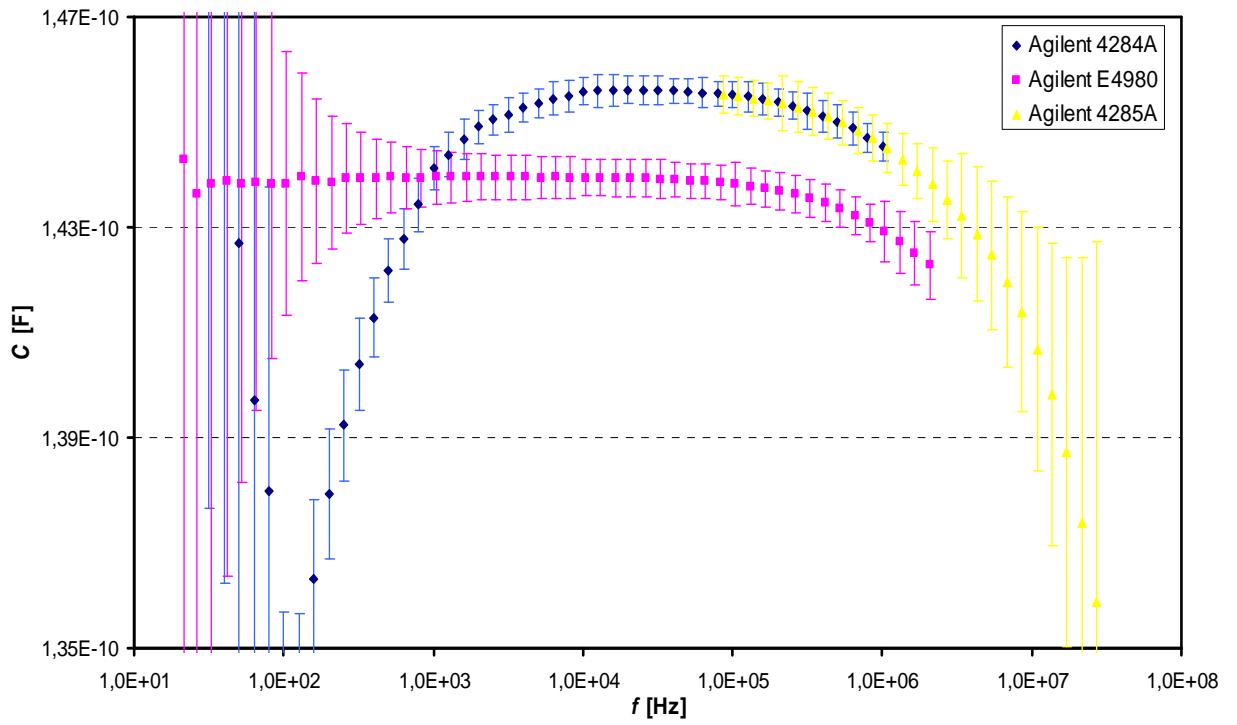
V této kapitole jsou uvedeny grafy se změřenými hodnotami kapacit  $C$ , ztrátových činitelů  $tg\delta$ , a jejich vypočtené nejistoty měření při různých frekvencích. V tabulkách je znázorněno srovnání nejistot měření přístrojů při vybraných frekvencích a nastaveních měřicích režimů. Z kapacitních důvodů jsou znázorněny pouze tabulky pro tloušťky vzorku 0,19 mm, 0,3 mm a 1 mm a nastavení 1 V Long, 2 V Long a 1 V Short.

Přílohy obsahují grafy zaměřené na porovnání nejistot měření jednotlivých přístrojů pro různé nastavení měřicích parametrů.

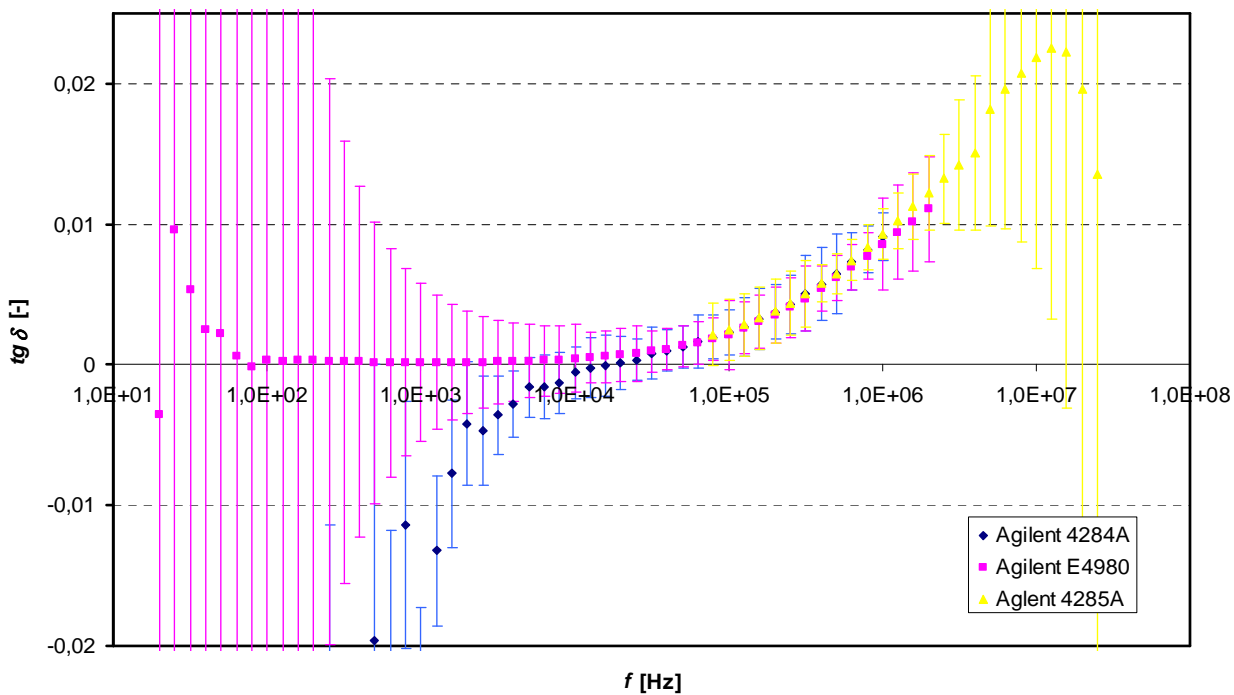
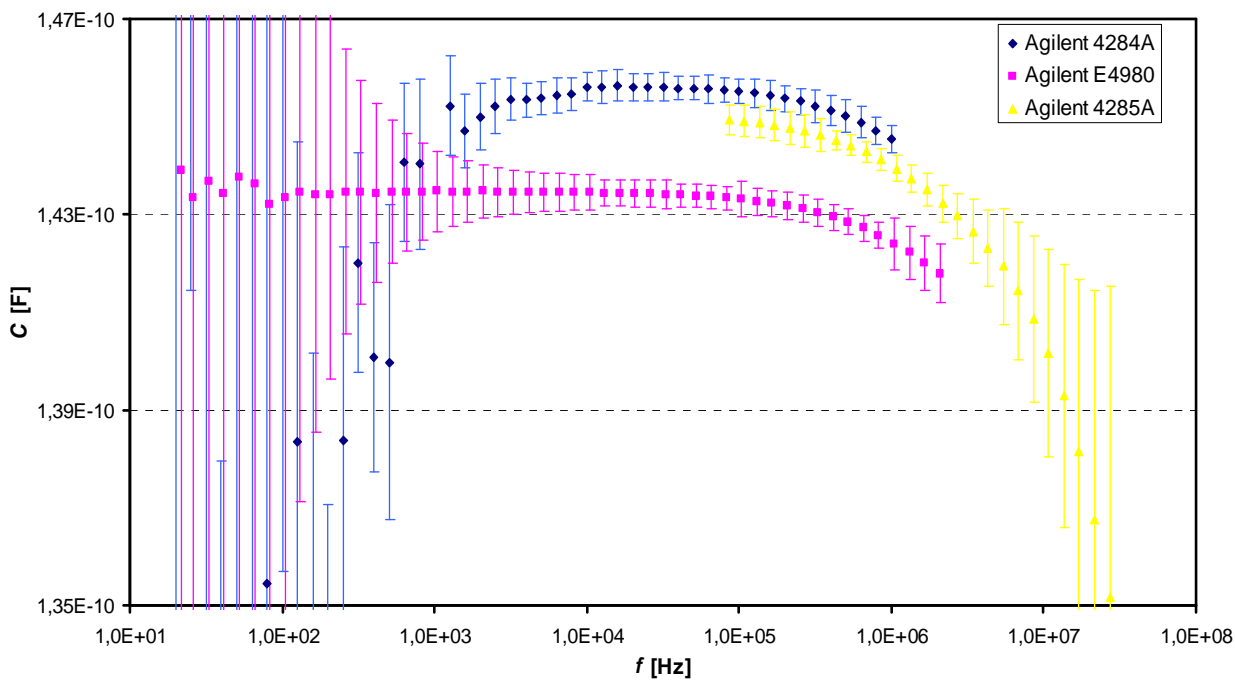
Příložené digitální medium obsahuje grafy i pro ostatní měřicí nastavení a tloušťky kapalného vzorku.



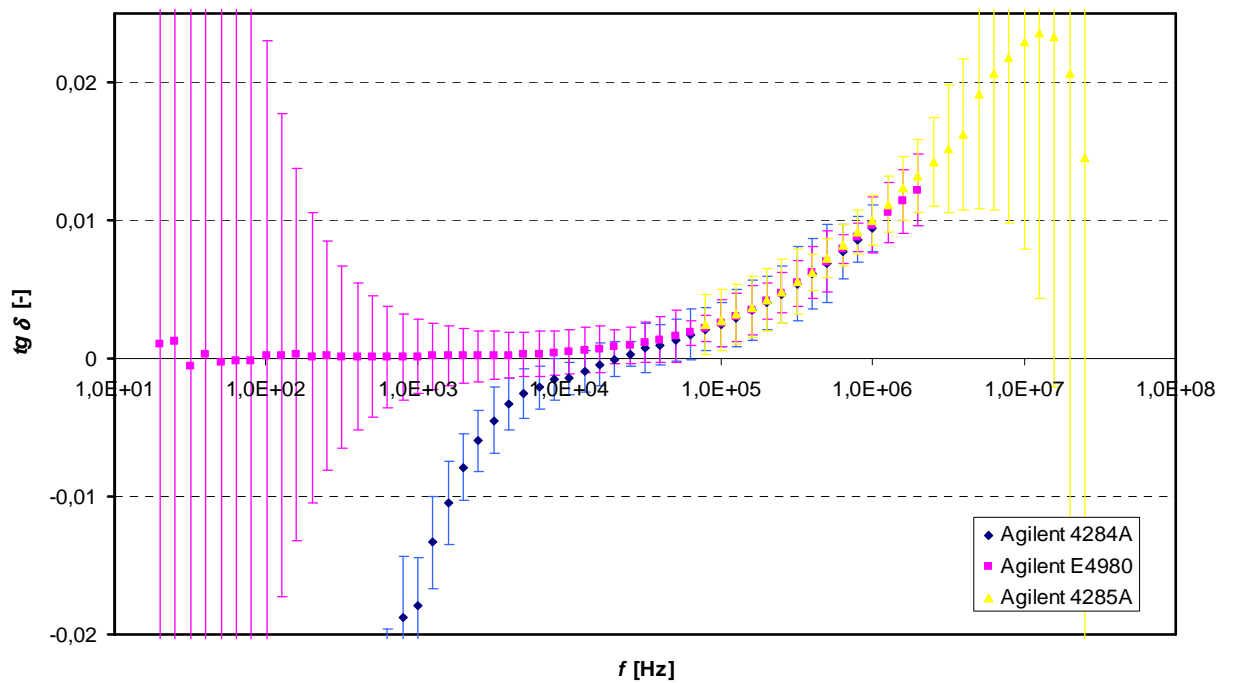
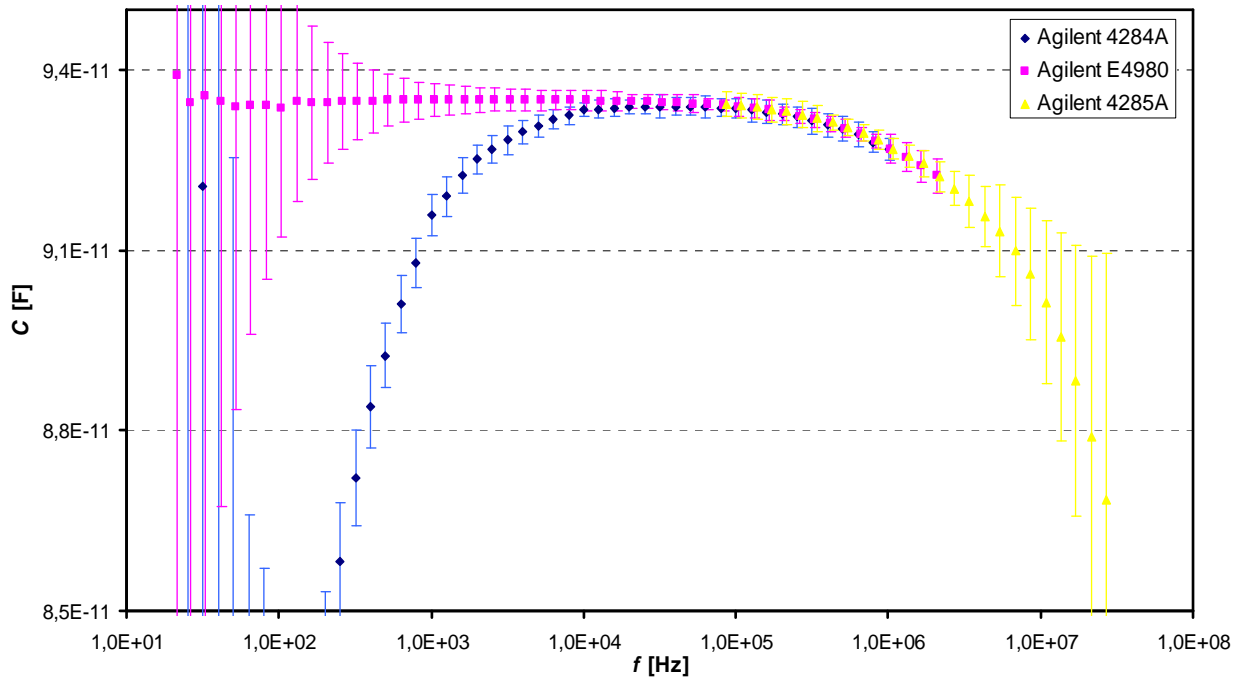
Obr. 12: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 0,19 mm, 1 V, Long



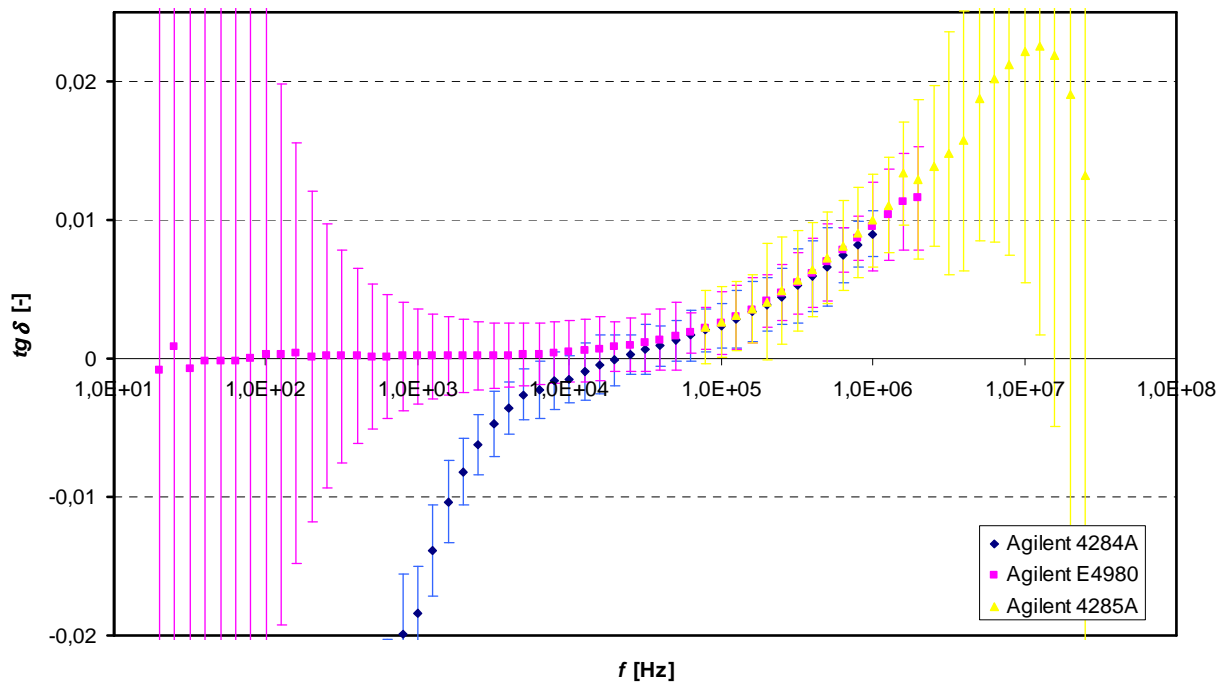
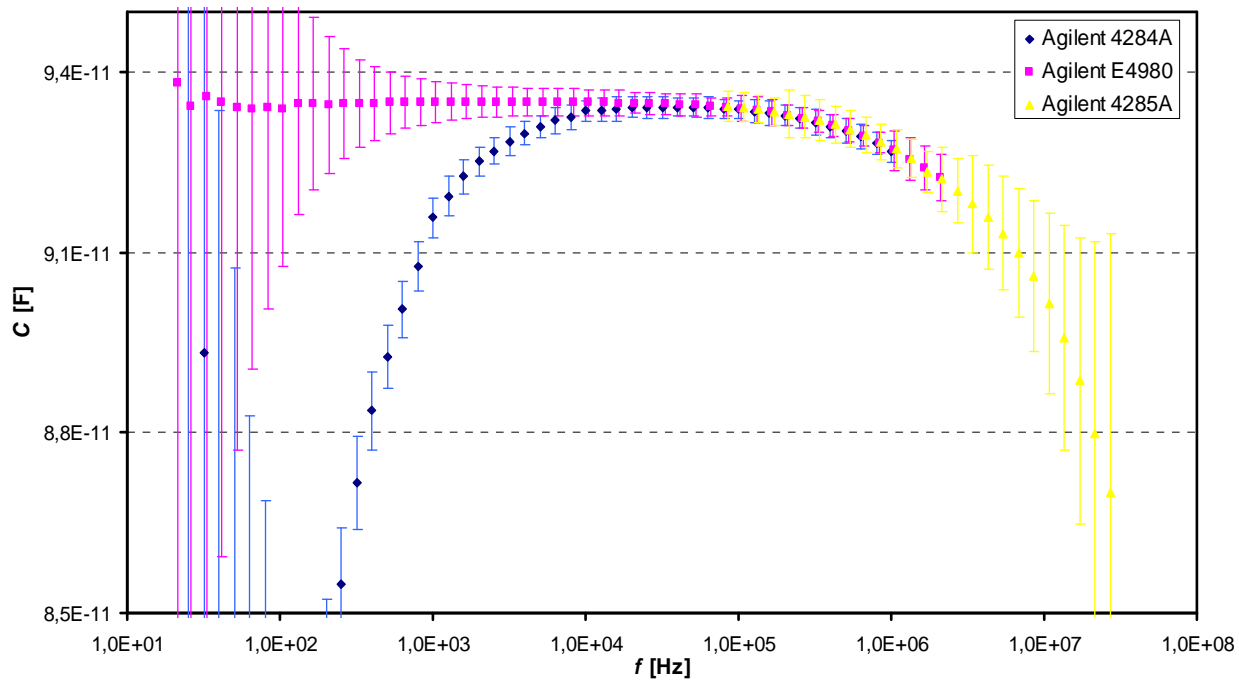
Obr. 13: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 0,19 mm, 2 V, Long



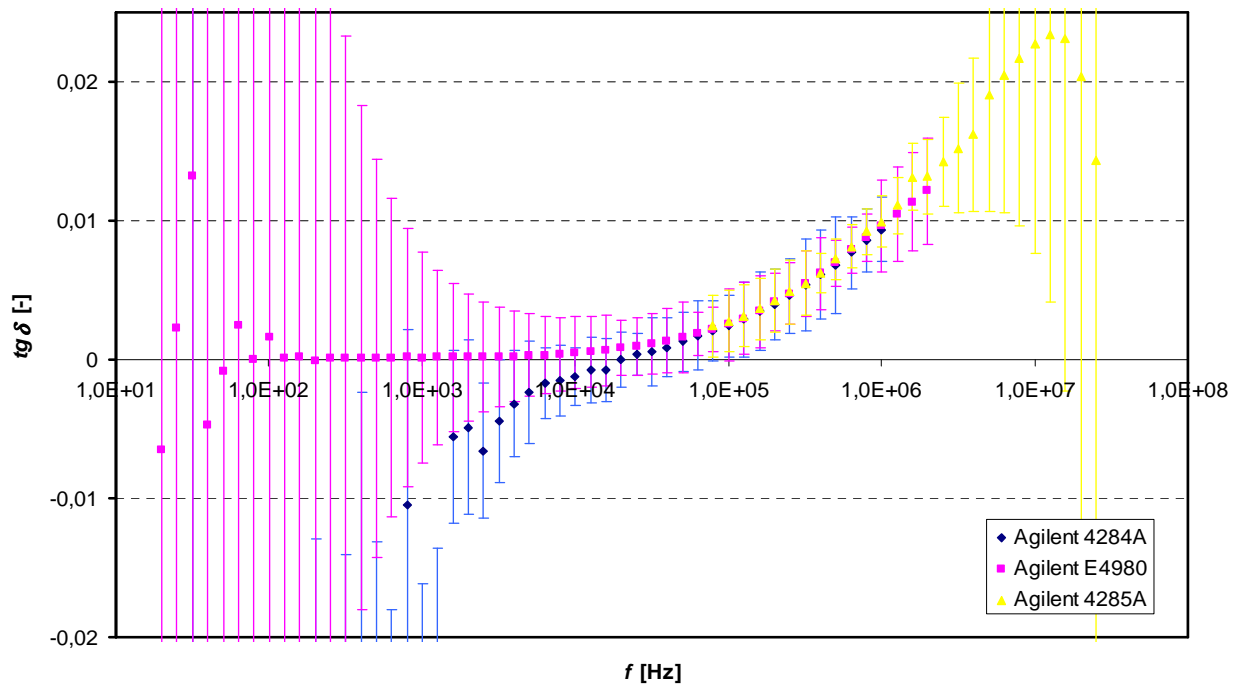
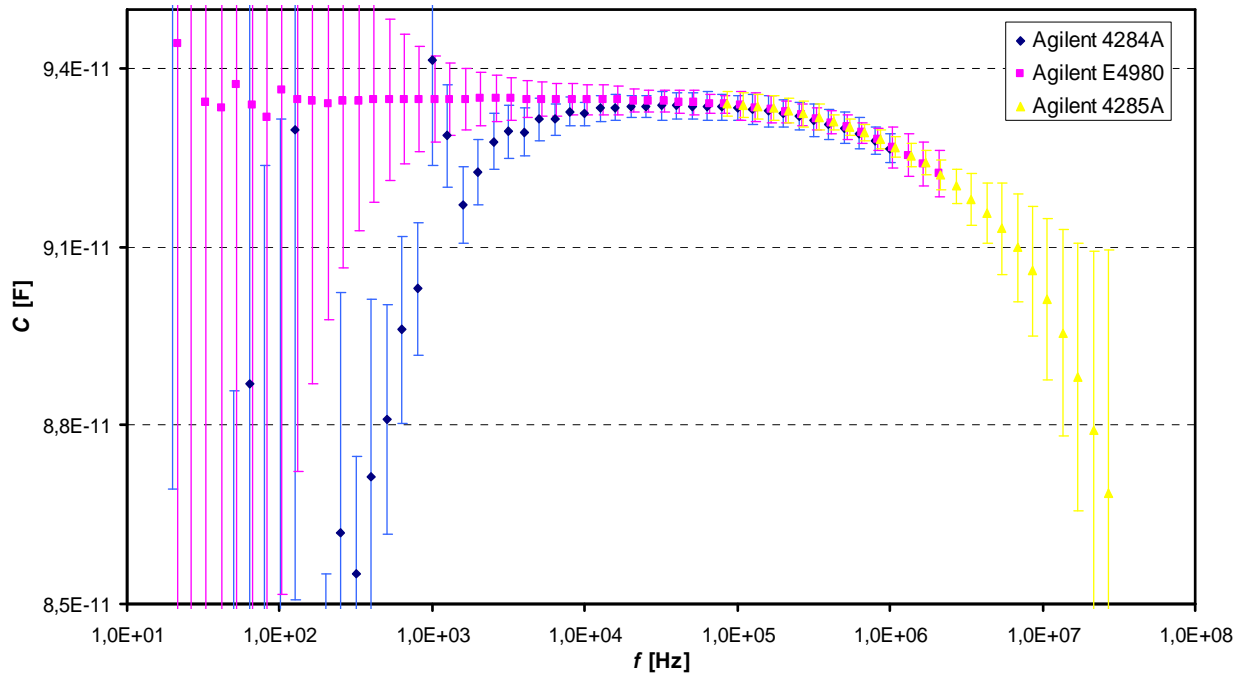
Obr. 14: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 0,19 mm, 1 V, Short



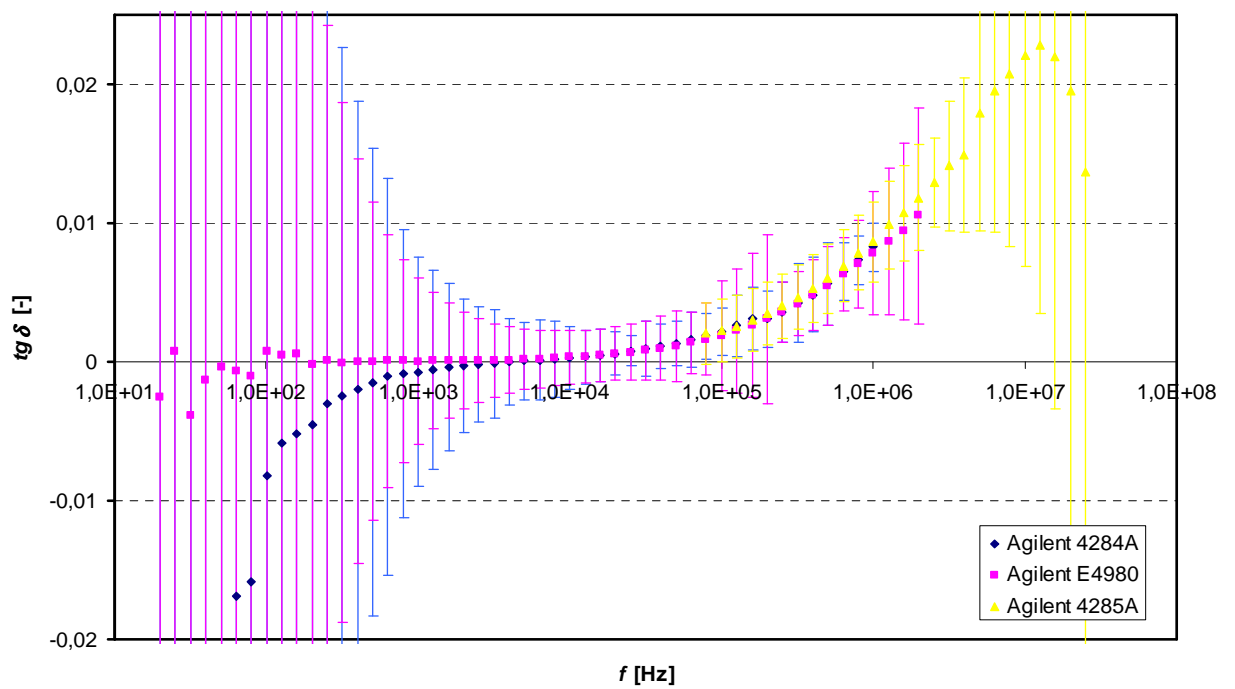
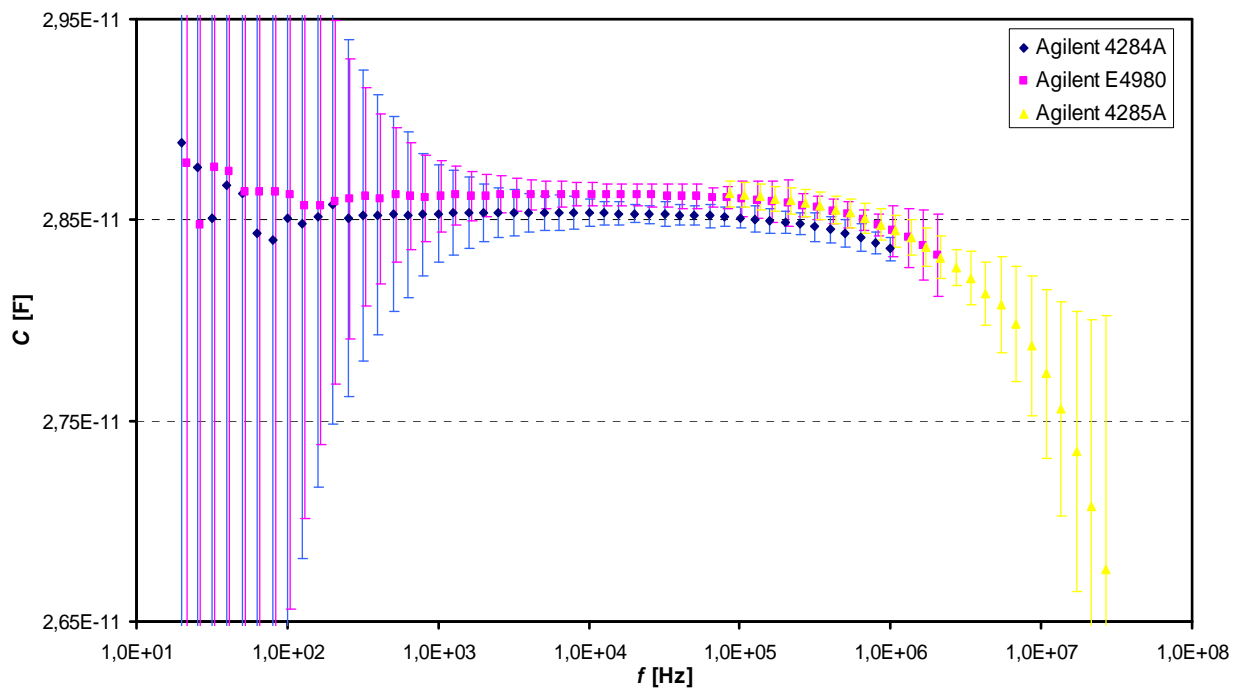
Obr. 15: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 0,3 mm, 1 V, Long



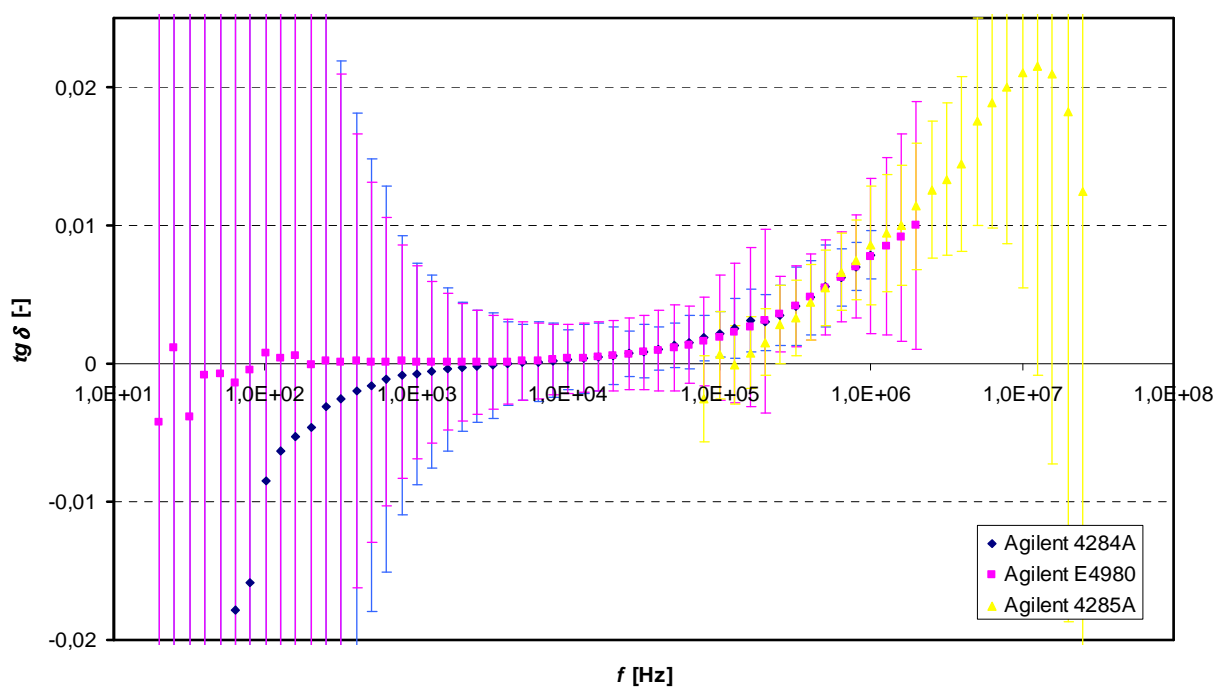
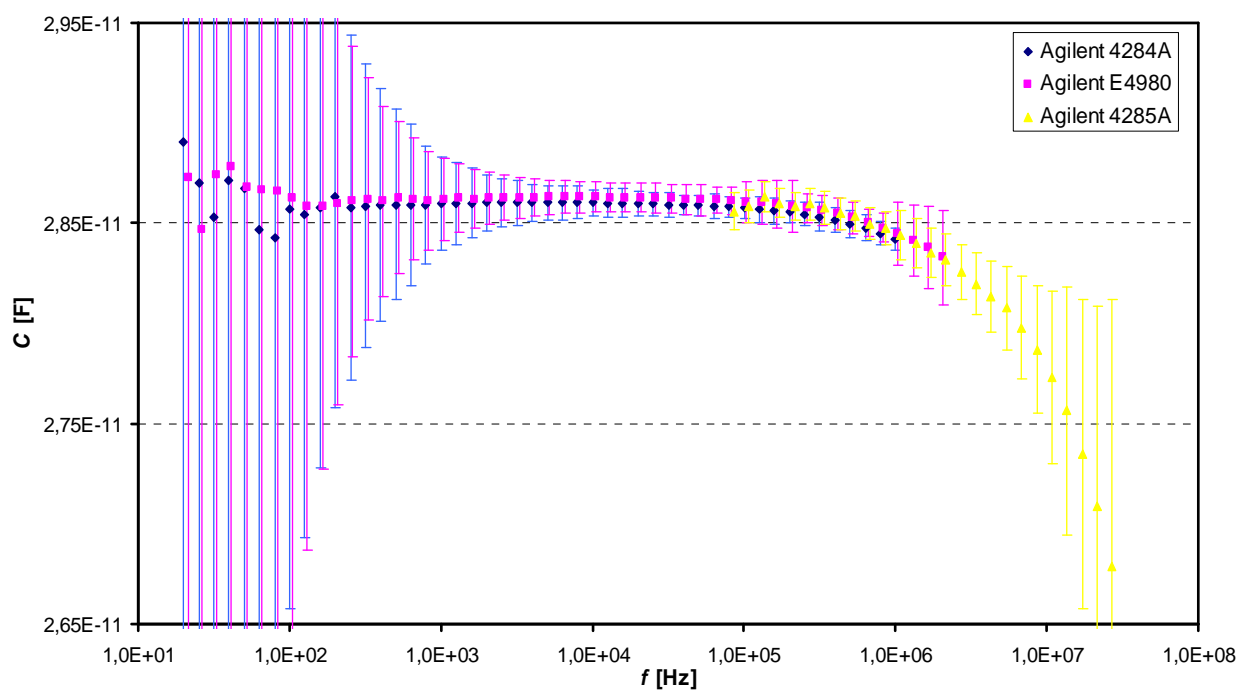
Obr. 16: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 0,3 mm, 2 V, Long



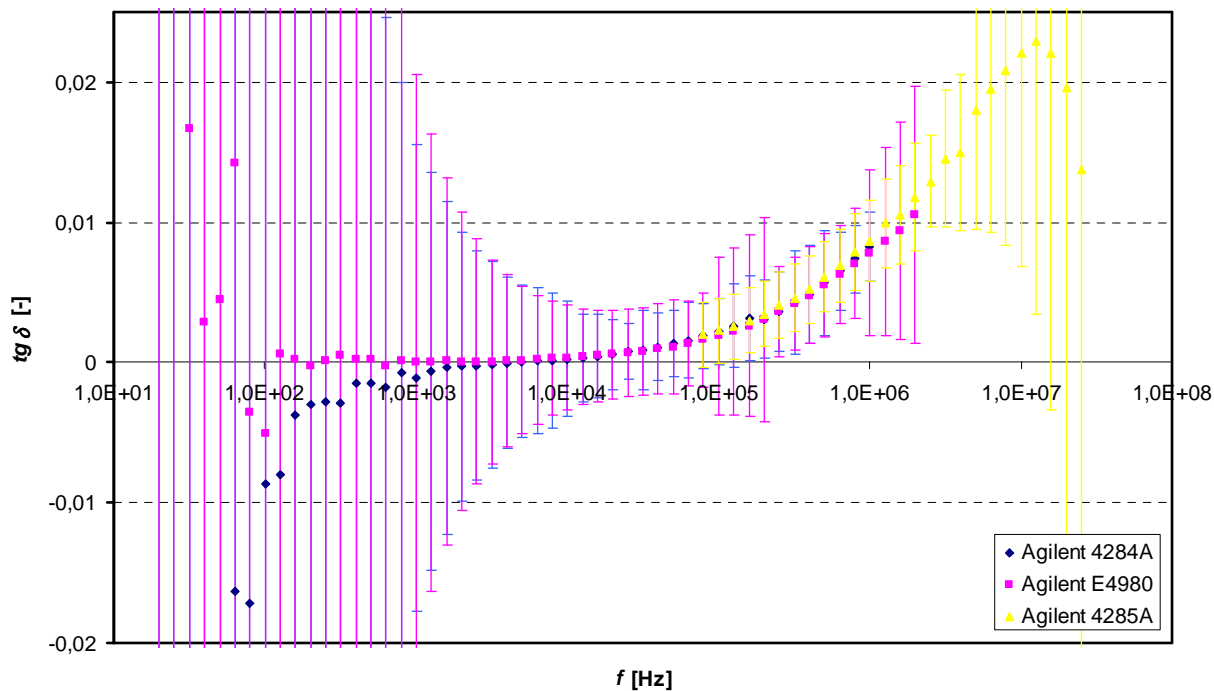
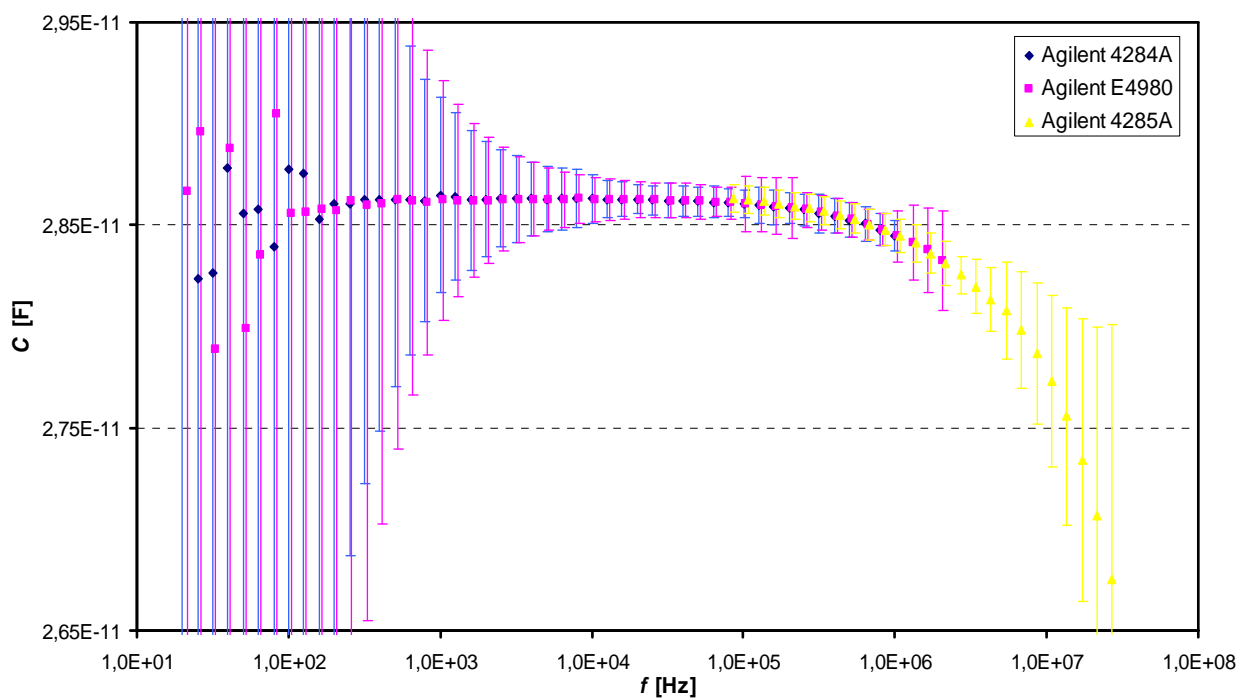
Obr. 17: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 0,3 mm, 1 V, Short



Obr. 18: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 1 mm, 1 V, Long



Obr. 19: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 1 mm, 2 V, Long



Obr. 20: Hodnoty měřené na vzorku tloušťky 1 mm, 1 V, Short

## **2.4 Vyhodnocení experimentu**

### **2.4.1 Přístroj Agilent 4284A**

Nejistota měření kapacity při frekvencích do 1 kHz dosahuje v některých případech hodnot až 50 %. Grafické znázorní kombinované nejistoty měření je proto zaměřeno na frekvence vyšší než 1 kHz, kde dosahuje vypočtená kombinovaná nejistota měřené kapacity poměrně stabilních hodnot.

Podle předpokladů je v celém frekvenčním rozsahu nejistota nižší při nastavení doby integrace na hodnotu Long než na hodnotu Short. Kombinovaná nejistota měření je při nastavení doby integrace na hodnotu Short v některých případech až trojnásobná. Tento faktor se výrazně projevuje při nízkých frekvencích. Při frekvencích nad 1 kHz se rozdíly nejistot mezi nastaveními Long a Short zmenšují, jsou však stále patrné.

Procentuální nejistota měření se mírně zvyšuje se zvětšující se tloušťkou vzorku, avšak měřená kapacita při nízkých frekvencích je stabilnější při měření na větší tloušťce vzorku.

Nejistota měření ztrátového činitele dosahuje ve frekvencích pod 10 kHz hodnot v desítkách procent a navíc je ztrátový činitel záporný. Při vyšších frekvencích je kombinovaná nejistota měření také vysoká. Tento jev je způsoben tím, že měření bylo prováděno na vzorku s velmi nízkou hodnotou ztrátového činitele i měřená kapacita se pohybovala na spodní hranici měřicího rozsahu daného přístroje. Přístroj proto není vhodný pro měření vzorků uvedených vlastností ve frekvenční oblasti pod 10 kHz.

Optimálního nastavení přístroje Agilent 4284 se dosáhne nastavením doby integrace na hodnotu Long a měřicího napětí na hodnotu 1 V.

### **2.4.2 Přístroj Agilent 4285A**

Měřicí rozsah přístroje Agilent 4285A je od 75 kHz do 30 MHz. Z toho důvodu se u něj při měření kapacity neprojevují chyby způsobené vysokou impedancí vzorku jak tomu bylo u přístroje Agilent 4284A. Projevují se ovšem faktory závislé na vyšší frekvenci, proto se při vysokých frekvencích kombinovaná nejistota měření zvyšuje.

Z grafů je patrné, že doba integrace nemá na kombinovanou nejistotu měření kapacity příliš velký vliv. Výraznější vliv má hodnota nastaveného měřicího napětí. Při měřicím napětí 2 V je nejistota měření větší než při napětí 1 V. Rozdíl nejistot měření dosahuje hodnot v jednotkách procent.

Stejně jako u přístroje Agilent 4284A se procentuální nejistota měření zvyšuje se zvětšující se tloušťkou měřeného vzorku.

Nejistota měření ztrátového činitele je v celém frekvenčním rozsahu velmi vysoká. To je způsobeno tím, byl měřen vzorek s velmi nízkou hodnotou ztrátového činitele. Tloušťka vzorku nemá na nejistotu měření ztrátového činitele výrazný vliv.

V optimálním případě je vhodné s přístrojem Agilent 4285A měřit při době integrace nastavené na hodnotu Long a měřicím napětí nastaveném na hodnotu 1 V. Pro zkrácení doby měření je možné měřit i při nastavení doby integrace na hodnotu Short, protože kombinovaná nejistota dosahuje při měření v nižších frekvencích rozdílu jednotek procent a při měření ve vyšších frekvencích je tento rozdíl zanedbatelný. .

### **2.4.3 Přístroj Agilent E4980**

Přístroj Agilent E4980 umožňuje nastavení měřicího napětí až na hodnotu 5 V a má v logaritmickém měřítku nejširší frekvenční rozsah ze všech tří přístrojů. Proto se u něj projevují jak chyby způsobené vysokou impedancí měřeného vzorku (nízké frekvence) tak i faktory závislé na frekvenci (vysoké frekvence). Můžeme u něj lépe zhodnotit vliv měřicího napětí na nejistotu měření než u předchozích dvou přístrojů.

Kombinovaná nejistota měření je při frekvencích pod 100 Hz vysoká ale s rostoucí frekvencí se výrazně snižuje. Grafy jsou tedy zaměřeny nad tuto frekvenční oblast, kde je již hodnota nejistoty poměrně stálá a dají se nejistoty lépe porovnat.

Při nízkých frekvencích se na hodnotě kombinované nejistoty měření výrazně projevuje nastavená doba integrace. Při době integrace nastavené na hodnotu Short je kombinovaná nejistota měření v některých případech až trojnásobná. U vyšších frekvencí se tyto rozdíly zmenšují, ale jsou stále patrné.

Stejně jako u předchozích přístrojů se s rostoucím měřicím napětím zvětšuje i nejistota měření. Rozdíl kombinovaných nejistota měření dosahuje v závislosti na měřicím napětí hodnot okolo 20 %. U vzorku tloušťky 0,19 mm způsobí měřicí napětí pokles měřené kapacity.

Nejistota měření ztrátového činitele je opět v celém frekvenčním rozsahu vysoká.

#### **2.4.4 Porovnání přístrojů**

Z grafů lze vyčíst, že pro měření v oblasti nižších frekvencích je vhodnější použít přístroj Agilent E4980 než Agilent 4284A. S rostoucí frekvencí se rozdíl mezi přístroji snižuje a v oblasti nad 10 kHz jsou měřená kapacita i kombinovaná nejistota měření obou přístrojů téměř shodné.

Ve frekvenční oblasti, ve které se překrývají měřicí rozsahy přístrojů Agilent E4980 a Agilent 4285A, je nejistota měření obou těchto přístrojů velmi podobná. Při frekvencích nad 1 MHz je však nejistota přístroje Agilent 4285A nižší, proto je pro měření v těchto frekvencích vhodnější.

Hodnoty měřeného ztrátového činitele a vypočtené hodnoty nejistoty měření ztrátového činitele, v oblasti ve které se překrývají frekvenční rozsahy přístrojů, je u všech přístrojů velice podobná. Vypočtené nejistoty jsou však velmi vysoké.

### 3 Závěr

Z naměřených hodnot kapacit a vypočtených nejistot měření vyplývá, že pro měření v oblasti, v které se překrývají frekvenční rozsahy přístrojů Agilent E4980 a Agilent 4284A je vhodnější použít první z uvedených přístrojů, protože dosahuje největší přesnosti, tj. obdržené výsledky se vyznačují nejmenší hodnotou nejistoty měření. Pro měření kapacity v oblasti, ve které se překrývají frekvenční rozsahy přístrojů Agilent E4980 a Agilent 4285A je naopak vhodnější použít druhý z uvedených přístrojů, protože dosahuje větší přesnosti než přístroj Agilent E4980.

Z výsledků lze též odvodit, že doba integrace má na nejistotu měření výrazný vliv při nižších frekvencích. Při vyšších hodnotách frekvence se vliv doby integrace na celkovou nejistotu měření snižuje.

Z grafů a hodnot uvedených v tabulkách pro měření na vzorku o tloušťce 0,19 mm vyplývá, že neoriginální distanční kroužek není vhodný pro přesné měření kapacity. Hodnoty měřené kapacity se výrazně liší v závislosti na použitém přístroji. Při použití originálních distančních kroužků se měřené kapacity a jejich nejistoty ve většině případů překrývají.

Ze všech grafů porovnání přístrojů lze odvodit, že měření ztrátového činitele přístrojem Agilent 4284A nemá smysl při frekvencích nižších než 30 kHz, protože změřená hodnota ztrátového činitele je záporná. Naměřené hodnoty ztrátového činitele a vypočtené nejistoty měření jsou u všech přístrojů ve vyšších frekvencích velmi podobné.

Kombinovaná nejistota měření kapacity i ztrátového činitele dosahuje ve většině případů velmi vysokých hodnot. Uvedená skutečnost je způsobena tím, že experiment byl realizován na vzorku materiálu s velmi nízkou hodnotou ztrátového činitele a jeho kapacita se pohybovala na spodní hranici měřicího rozsahu daného přístroje. V ostatních případech by všechny použité přístroje bezesporu vykazovaly větší přesnost měřených veličin a tudíž i nižší hodnoty kombinovaných nejistot měření.

## 4 Použitá literatura

- [1] Agilent 4284A precision LCR meter OPERATION MANUAL. Japonsko 2001. 571 stran. Part. No. 04284-90040.
- [2] Agilent 4285A precision LCR meter OPERATION MANUAL. Japonsko 2000. 523 stran. Part. No. 04285-90010.
- [3] Agilent E4980 precision LCR meter OPERATION MANUAL. Japonsko 2006. 545 stran. Manufacturing number E4980-90020.
- [4] Agilent 16452A Liquid Test Fixture Operation and Service Manual. Japonsko 2000. 48 stran. Part No. 16452-90000.
- [5] Jiráček, J. Materiály a technická dokumentace. Brno Vysoké učení technické v Brně, 129 stran.
- [6] Palenčár, R. – Vdoleček, F. – Halaj, M.: Nejistoty v měření III: nejistoty přímých měření. Automa, 7, 2001, č. 10, s. 52-56 Bratislava: Sjf STU Bratislava, 2001 [cit. 2008-03-08] dostupné na: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070150.pdf>.

## 5 Seznam veličin

$A_b$  - základní přesnost

$A_e$  - relativní přesnost

$A_{cal}$  - kalibrační odchylka

$A_{mp}$  - celková chyba měřicího přístroje

$A_{els}$  - chyba měření elektrodového systému

$C_{str}$  - střední hodnota kapacity

$C_{es}$  - kapacita prázdného elektrodového systému

$D$  - chyba měření ztrátového činitele

$D_e$  - relativní přesnost ztrátového činitele

$K_a, K_b$  - impedanční proporcionální faktor

$K_{aa}, K_{bb}, A_c$  - faktor délky kabelu

$K_c$  - kalibrační interpolační faktor

$K_t$  - teplotní faktor

$K_l$  - délka kabelu

$u_a$  - standardní nejistota typu A

$u_b$  - standardní nejistota typu B

$U$  - rozšířená nejistota měření

$Y_o$  - Open offset

$Z_s$  - Short offset

$tg \delta$  - ztrátový činitel

$\theta_{cal}$  - kalibrační odchylka chyby ztrátového činitele

$\vartheta$  - teplota okolního prostředí

## 6 Přílohy

Příložené tabulky obsahují střední hodnoty naměřené kapacity a jejich příslušnou nejistotu měřené při daném měřicím napětí, příslušné době integrace a tloušťce vzorku. V příložených obrázcích jsou graficky znázorněny hodnoty naměřených kapacit, ztrátových činitelů a jejich kombinovaných nejistot.

### 6.1 Seznam příložených tabulek

Tab. P1: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje 4284A při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 0,19 mm

Tab. P2: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje 4284A při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 0,3 mm

Tab. P3: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje 4284A při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 1 mm

Tab. P4: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje 4285A při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 0,19 mm

Tab. P5: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje 4285A při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 0,3 mm

Tab. P6: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje 4285A při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 1 mm

Tab. P7: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje E4980 při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 0,19 mm

Tab. P8: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje E4980 při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 0,3 mm

Tab. P9: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje E4980 při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 1 mm

### 6.2 Seznam Příložených grafů

Obr. P1: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje 4284A při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 0,19 mm

Obr. P2: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje 4284A při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 0,3 mm

Obr. P3: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje 4284A při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 1 mm

Obr. P4: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje 4285A při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 0,19 mm

Obr. P5: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje 4285A při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 0,3 mm

Obr. P6: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje 4285A při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 1 mm

Obr. P7: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje E4980 při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 0,19 mm

Obr. P8: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje E4980 při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 0,3 mm

Obr. P9: Porovnání kombinované nejistoty měření přístroje E4980 při různých měřicích režimech při tloušťce vzorku 1 mm