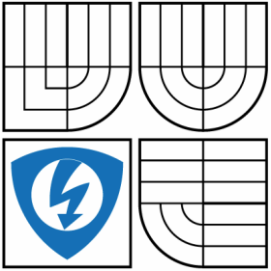


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## MĚŘENÍ PRŮMYSLOVÉ KAPACITNÍ DEKÁDY V KLIMATICKÉ KOMOŘE

MEASUREMENT OF PRECISE CAPACITANCE DECADE IN ENVIRONMENTAL CHAMBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB SCHINNECK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARIE HAVLÍKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Automatizační a měřicí technika

**Student:** Jakub Schinneck

**ID:** 138704

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

**Měření průmyslové kapacitní dekády v klimatické komoře**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte klasifikaci typů kondenzátorů se zaměřením na teplotní a vlhkostní stabilitu.
2. Seznamte se s přístrojem M525 firmy Meatest.
3. V souladu s požadavky externího pracoviště Meatest s.r.o. proveďte soubor měření přístroje M525 v rozdílných klimatických podmínkách.
4. Zhodnoťte a přehledně graficky znázorněte závislost kapacity na změnu klimatických podmínek. Porovnejte změřené údaje s údaji udávanými výrobcem dekády a výrobcí jednotlivých kondenzátorů.
5. Navrhněte možné zlepšení parametrů změnou součástí nebo rozložením DPS.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Bejček, L., Čejka, M., Rez, J.: Měření v elektrotechnice, Skripta VUT Brno, 2002
- [2] Uživatelská příručka programu Caliber
- [3] Manuál k přístroji M525

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 26.5.2014

**Vedoucí práce:** Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá kontrolou kapacitní dekády v klimatické komoře. Teoretická část představuje *kapacitní dekádu M525* firmy MEATEST a program *Caliber* rovněž od této společnosti. Seznamuje nás s metodami měření kapacity. V bakalářské práci se nachází výpočet nejistot měřicích přístrojů. Na základě nejnížší nejistoty volíme nejvhodnější měřicí přístroj. Praktická část práce popisuje měření pomocí sestavené procedury pro ověření kapacit programovatelné dekády. Poslední část obsahuje zhodnocení výsledků měření a porovnání s údaji výrobce.

## **Klíčová slova**

kapacitní dekáda M525, kapacita, měření, Caliber, procedura, teplota, vlhkost, klimatická komora, Wayne Kerr 6440B

## **Abstract**

This bachelor's thesis deals with the control capacitance decade in a climatic chamber. The theoretical part introduces a *capacitance decade M525* of the MEATEST company and the program *Caliber* of the same company. It introduces the methods of capacitance measurement. In the bachelor's thesis there is the calculation of the uncertainty of measuring devices. On the basis of the lowest uncertainty, we choose the most suitable measuring device. The practical part describes the measuring with the use of prepared procedure for verification of the capacitance of programmable decade. The last part contains the evaluation of the measurement results and their comparison with the manufacturer's specifications.

## **Keywords**

capacitance decade M525, capacitance, measurement, Caliber, procedure, temperature, humidity, climatic chamber, Wayne Kerr 6440B

### **Bibliografická citace:**

SCHINNECK, J. Měření průmyslové kapacitní dekády v klimatické komoře. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 72 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření průmyslové kapacitní dekády v klimatické komoře jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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 osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **26. května 2014**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marii Havlíkové, Ph.D. a odbornému konzultantovi Ing. Michalu Sittovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **26. května 2014**

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod.....	11
2	Kondenzátory.....	12
2.1	Reálný kondenzátor.....	12
2.2	Rozdělení kondenzátorů.....	13
2.2.1	Keramické kondenzátory [1], [3].....	13
2.2.2	Svitkové kondenzátory (fóliové) .....	14
2.3	Klimatická kategorie [2], [5].....	15
3	Programovatelná kapacitní dekáda M525.....	16
3.1	Obecné informace [6].....	16
3.2	Princip funkce .....	17
3.3	Funkce MENU [6].....	17
3.4	Technické údaje [6].....	18
4	Program caliber.....	19
4.1	Obecné informace [8].....	19
4.2	Části programu [8] .....	19
4.3	Modul <i>Procedura</i> [8] .....	19
4.3.1	Vytvoření nové kalibrační procedury .....	20
4.3.2	Popis modulu <i>Procedura</i> .....	21
4.4	Modul <i>Karty přístrojů</i> [8] .....	23
5	Volba vhodného měření.....	24
5.1	Metody měření kapacity [9].....	24
5.1.1	Metody s přímým údajem.....	24
5.1.2	Rezonanční metoda.....	24
5.1.3	Nulové metody.....	24
5.2	Výběr měřicí metody.....	25
5.3	Výpočet nejistot [10].....	25
5.4	Výběr měřicího přístroje .....	32
6	Vytvoření procedury .....	33
6.1	Výběr funkcí přístrojů.....	33
6.2	Převodník funkcí .....	33

6.3	Vytvoření procedury <i>M525</i> .....	34
6.4	Volba testovacích hodnot .....	34
7	Měření .....	36
7.1	Klimatická komora, CLIMACELL 222 [14] .....	36
7.1.1	Popis komory .....	36
7.1.2	Technické údaje .....	36
7.2	Popis zapojení .....	37
7.3	Průběh měření .....	38
7.4	Zpracování dat .....	38
8	Zhodnocení výsledků měření .....	40
8.1	Absolutní chyba údaje kapacity .....	40
8.2	Specifikace .....	46
9	Závěr .....	47

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma reálného kondenzátoru [2] .....	12
Obrázek 2: Teplotní závislost procentuální změny kapacity a ztrátového činitele kondenzátorů třídy I [3].....	13
Obrázek 3: Teplotní závislost procentuální změny kapacity a ztrátového činitele kondenzátorů třídy II [3] .....	14
Obrázek 4: Teplotní závislost procentuální změny kapacity a ztrátového činitele kondenzátorů třídy III [3] .....	14
Obrázek 5: Teplotní závislost procentuální změny kapacity kondenzátorů MKP [2] ..	15
Obrázek 6: Kapacitní dekáda M525 [6] .....	16
Obrázek 7: Okno <i>Průvodce vytváření procedur</i> .....	20
Obrázek 8: Konfigurace přístroje vkládaného do procedury .....	20
Obrázek 9: Okno hodnot v <i>Průvodci vytváření procedur</i> .....	21
Obrázek 10: Popis okna modulu <i>Procedura</i> [8] .....	22
Obrázek 11: Stavové okno s hierarchií procedury .....	22
Obrázek 12: Přidání podmínky převodníku v <i>kartě přístroje</i> .....	23
Obrázek 13: Virtuální převodník .....	33
Obrázek 14: CLIMACELL 222 [14].....	37
Obrázek 15: Blokové schéma zapojení .....	37

# Seznam tabulek

Tabulka 1: Relativní chyby měřicího přístroje WK 6440B, měření kapacit $C_{\min} = 100 \text{ pF}$ , $C_{\text{stř}} = 100 \text{ nF}$ , $C_{\max} = 100 \text{ }\mu\text{F}$ dekády M525 .....	27
Tabulka 2: Standardní rozšířené nejistoty měřicího přístroje WK 6440B, měření kapacit $C_{\min} = 100 \text{ pF}$ , $C_{\text{stř}} = 100 \text{ nF}$ , $C_{\max} = 100 \text{ }\mu\text{F}$ dekády M525 .....	28
Tabulka 3: Relativní chyby měřicího přístroje Agilent 4980A, měření kapacit $C_{\min} = 100 \text{ pF}$ , $C_{\text{stř}} = 100 \text{ nF}$ , $C_{\max} = 100 \text{ }\mu\text{F}$ dekády M525 .....	30
Tabulka 4: Standardní rozšířené nejistoty měřicího přístroje Agilent 4980A, měření kapacit $C_{\min} = 100 \text{ pF}$ , $C_{\text{stř}} = 100 \text{ nF}$ , $C_{\max} = 100 \text{ }\mu\text{F}$ dekády M525 .....	31
Tabulka 5: Relativní chyby měřicího přístroje Chroma 11021, měření kapacit $C_{\min} = 100 \text{ pF}$ , $C_{\text{stř}} = 100 \text{ nF}$ , $C_{\max} = 100 \text{ }\mu\text{F}$ dekády M525 .....	31
Tabulka 6: Standardní rozšířené nejistoty měřicího přístroje Chroma 11021, měření kapacit $C_{\min} = 100 \text{ pF}$ , $C_{\text{stř}} = 100 \text{ nF}$ , $C_{\max} = 100 \text{ }\mu\text{F}$ dekády M525 .....	32
Tabulka 7: Standardní rozšířené nejistoty měřicích přístrojů, měření kapacit $C_{\min} =$ $100 \text{ pF}$ , $C_{\text{stř}} = 100 \text{ nF}$ , $C_{\max} = 100 \text{ }\mu\text{F}$ dekády M525.....	32
Tabulka 8: Testovací hodnoty kapacitní dekády M525 .....	35
Tabulka 9: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity $C = 0,2 \text{ nF}$ dekády M525, etalon WK6440B.....	39

# 1 ÚVOD

Stálost a záruka udávaných parametrů přístrojů je jedním z nejzákladnějších požadavků odběratelů. Z tohoto důvodu musí výrobci parametry na svých produktech testovat. Měřicí přístroje zejména ty průmyslové mohou být vystavovány nejrůznějším vlivům i v poměrně velkém rozsahu. Měnící se podmínky nesmí mít žádný zásadní vliv na přístroj. Tato práce bude zaměřena především na vlivy teplotní a vlhkostní. Každý přístroj má svůj pracovní teplotní rozsah, pro který výrobce zaručuje správnou funkci s určitou malou chybou, kterou by neměl měřicí přístroj překročit.

Bakalářská práce popisuje měření nově vyvinuté programovatelné *kapacitní dekády M525* od firmy MEATEST v různých okolních podmínkách. K simulaci okolních podmínek slouží *klimatická komora*, do které se umísťuje kontrolovaný přístroj, v našem případě *kapacitní dekáda M525*. Výrobce si ověří, jak moc ovlivní teplota a vlhkost nastavitelnou kapacitu dekády.

První část bakalářské práce přibližuje program *Caliber*, sloužící k automatizovaným měřením a kalibracím, dále seznamuje s programovatelnou *kapacitní dekádou M525*, jejími vnitřními kondenzátory tvořícími výstupní kapacitu a také s metodami měření kapacity.

Další část práce se zabývá výběrem správného měřicího přístroje na základě výpočtu nejistot pro jednotlivé měřicí přístroje a následné sestavení procedury programu *Caliber*, jejímž použitím se ověřují parametry *kapacitní dekády M525*.

Hlavním cílem bakalářské práce je zhodnocení výsledků měření provedeného v souladu s požadavky externího pracoviště MEATEST s.r.o. spolu s grafickým znázorněním závislosti kapacity na změnu klimatických podmínek.

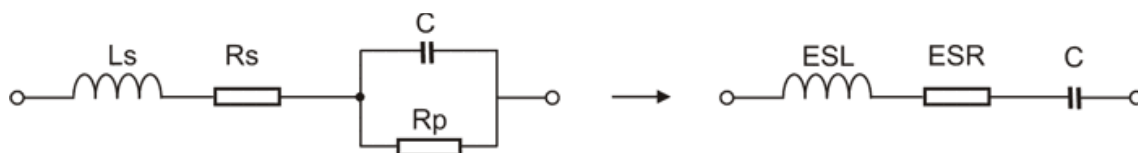
Výstupem bakalářské práce je porovnání získaných dat měření s údaji uváděnými výrobcem dekády a výrobcí kondenzátorů.

## 2 KONDEZNÁTORŮ

Tato kapitola nás seznámí s reálným kondenzátorem a jeho vlastnostmi. Dále uvádí rozdělení přesných kondenzátorů a jejich vlastností s důrazem na teplotní a vlhkostní závislosti. Zaměřeno je zejména na kondenzátory použité v naší *kapacitní dekádě 525*.

### 2.1 Reálný kondenzátor

Reálný kondenzátor není pouze ideální kapacita  $C$ , ale obsahuje další parazitní vlastnosti, viz Obrázek 1 vlevo. Sériový odpor  $R_s$  reprezentující odpor přívodních cest a kontaktů, paralelní (svodový) odpor  $R_p$  někdy nazývaný izolační odpor dielektrika, který klesá s rostoucí teplotou. Poslední parazitní vlastností je sériová indukčnost  $L_s$  způsobena přívodny kondenzátoru. [1], [2]



Obrázek 1: Schéma reálného kondenzátoru [2]

Obrázek 1 vpravo zobrazuje ekvivalentní sériové zapojení, kde  $ESR$  je ekvivalentní sériový odpor,  $ESL$  je ekvivalentní sériová indukčnost a  $C$  je vlastní kapacita kondenzátoru. Celková impedance  $Z$  sériového zapojení je podle vzorce (1). [2]

$$Z = \sqrt{ESR^2 + \left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot ESL - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}\right)^2} \quad (1)$$

Ze vzorce 1 je patrné, že impedance  $Z$  sériového obvodu je frekvenčně závislá. Se vzrůstající se hodnotou frekvence klesá vliv kapacitní složky a vzrůstá vliv indukční složky.

Důležitým parametrem kondenzátorů je ztrátový činitel  $tg \delta$  vyjadřující ztráty způsobené parazitními odpory. Vypočítá se jako poměr odporové a kapacitní složky impedance kondenzátoru, viz vzorec (2). [2]

$$tg \delta = \frac{ESR}{\left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}\right)} = ESR \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad (2)$$

## 2.2 Rozdělení kondenzátorů

Kondenzátory se dají rozdělit podle různých kritérií. Já vycházím z technologického kritéria a volím pouze zapouzdřené kondenzátory dekády, které budou předmětem měření.

### 2.2.1 Keramické kondenzátory [1], [3]

Keramické kondenzátory umístěné v dekádě plní funkci menších hodnot kapacity dekády M525. Nejvyšší nominální hodnota kapacity jednoho keramického kondenzátoru je v dekádě  $C_n = 220$  pF. Keramické kondenzátory jsou vyrobeny jako vícevrstvé kondenzátory vypalované při vysoké teplotě. Tyto kondenzátory se dále rozdělují do třech tříd podle teplotních charakteristik.

#### 2.2.1.1 Třída I

Keramické kondenzátory *třídy I* se značí podle teplotního rozsahu a velikosti změny kapacity, viz příloha A. Typicky jsou označovány COG nebo se můžeme setkat s označením NPO. Velkou předností těchto kondenzátorů je lineární a velmi malá závislost parametrů na teplotě, viz Obrázek 2. Mají malý ztrátový činitel  $tg \delta$  a výbornou kapacitní, frekvenční, časovou i napěťovou stabilitu. Lehkou nevýhodou je měrná kapacita. Kondenzátory *třídy I* mají větší rozměry a menší kapacitu v porovnání s ostatními keramickými kondenzátory. Vhodné jsou pro obvody vyžadující vysokou stabilitu. Keramické kondenzátory *třídy I* jsou umístěny v testované kapacitní dekádě M525.

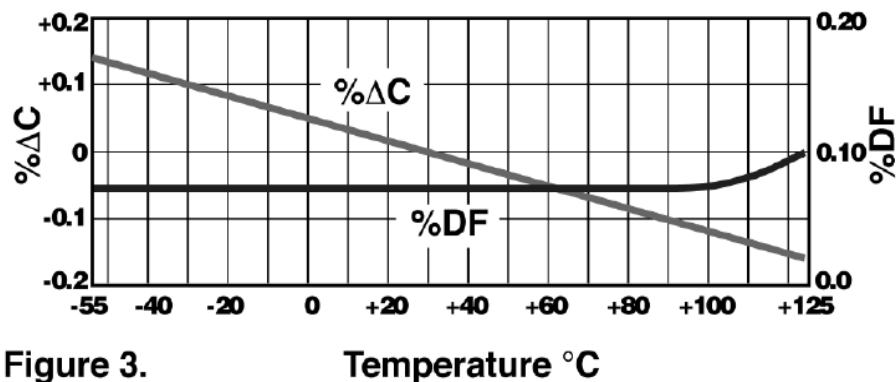


Figure 3. Temperature °C

Obrázek 2: Teplotní závislost procentuální změny kapacity a ztrátového činitele kondenzátorů třídy I [3]

#### 2.2.1.2 Třída II

Značení keramických kondenzátorů *třídy II* je podobně jako u *třídy I* podle teplotního rozsahu a velikosti změny. Kapacita je značně teplotně závislá, viz Obrázek 3. Teplotní závislost se pohybuje do  $\pm 15$  %. Stabilita ostatních parametrů je také horší. Keramické kondenzátory *třídy II* mají výhodu ve vyšší měrné kapacitě oproti *třídě I*.

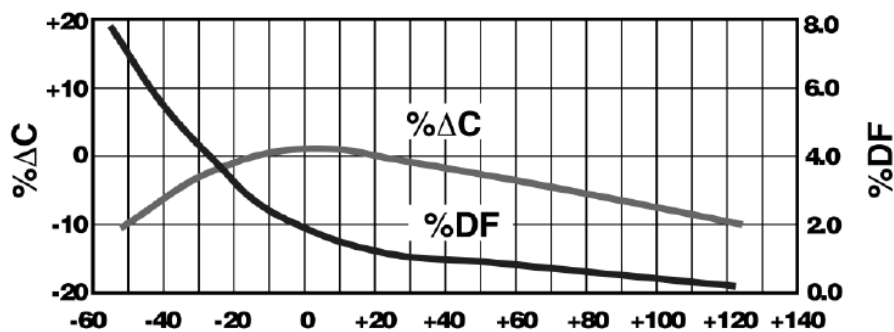


Figure 4. Temperature °C

Obrázek 3: Teplotní závislost procentuální změny kapacity a ztrátového činitele kondenzátorů třídy II [3]

### 2.2.1.3 Třída III

Princip značení je stejný jako u předchozích tříd. Keramické kondenzátory *třídy III* vynikají velkou měrnou kapacitou, která je ovšem velmi teplotně závislá. Další nevýhodou je vyšší ztrátový činitel  $tg \delta$ , vysoký izolační odpor  $R_p$  a nízké provozní napětí  $U_R$ . Stabilita všech parametrů je ze všech tříd nejhorší, viz Obrázek 4.

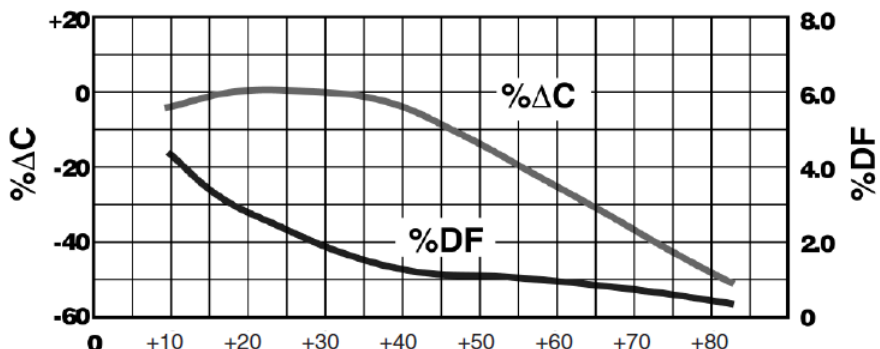


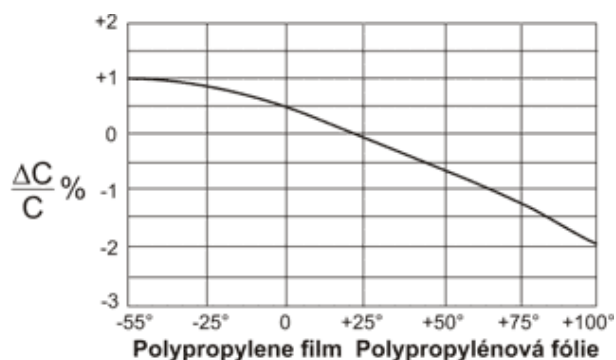
Figure 5. Temperature °C

Obrázek 4: Teplotní závislost procentuální změny kapacity a ztrátového činitele kondenzátorů třídy III [3]

### 2.2.2 Svitkové kondenzátory (fóliové)

Svitkové kondenzátory je možné rozdělit podle druhu dielektrika. Známé jsou kondenzátory s papírovým dielektrikem nebo plastickou fólií. Větší hodnoty kapacity v *kapacitní dekádě M525* zajišťují fóliové kondenzátory. Fóliové kondenzátory lze dále rozlišit podle použitých dielektrických plastů, kterých je celá řada. Vlastnosti jsou závislé právě na použitém dielektriku. Dielektrikum může být například polystyren, polyester, teflon, polypropylén a další. V *kapacitní dekádě M525* se nachází metalizované polypropylenové kondenzátory značené *MKP*. [1], [2]

Polypropylenové kondenzátory (*MKP*) splňují i náročné požadavky na klimatickou odolnost. Mají velmi dobrou časovou stabilitu a malou kmitočtovou a teplotní závislost kapacity, viz Obrázek 5. Kondenzátory *MKP* se vyrábí ve třech kapacitních tolerancích do  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  nebo  $\pm 20\%$ . [4]



Obrázek 5: Teplotní závislost procentuální změny kapacity kondenzátorů *MKP* [2]

### 2.3 Klimatická kategorie [2], [5]

Základní zkoušky vlivu prostředí na součástky pro elektroniku definuje norma IEC 60068-2. Klimatickou kategorii kondenzátorů určuje norma IEC 60068-1. Nejčastěji se používá základní tvar tří číslic oddělených od sebe lomítky X/Y/Z. První hodnota X vyjadřuje nejnižší provozní teplotu testovanou pro zkoušku mrazem *Aa*, dle IEC 60068-2-1. Druhá hodnota Y určuje nejvyšší provozní teplotu, která odpovídá zkoušce pro suché teplo *Ba* podle normy IEC 60068-2-2. Poslední hodnota Z vztahující se k vlhkosti, udává počet dní dlouhodobé zkoušky vlhkým konstantním teplem *Ca* při vlhkosti 95 % a teplotě +40 °C dle normy IEC 60068-2-3. Příklad pro provozní rozsah teplot -55 °C až 105 °C se zkouškou odolnosti proti vlhkému teplu trvajícím 56 dní je uveden ve formě **55/105/56**.

### 3 PROGRAMOVATELNÁ KAPACITNÍ DEKÁDA M525

#### 3.1 Obecné informace [6]

Programovatelná *kapacitní dekáda M525* od firmy MEATEST je určena především pro kontrolu multimetrů a jednoduchých RLC metrů, opravu, kalibraci a seřízení měřicích přístrojů. *Dekádu M525* lze připojit k počítači a dálkově ovládat pomocí sběrnice RS232, případně lze přístroj vybavit i rozhraním GPIB, USB a LAN. *Dekáda M525* umožňuje následující funkce:

- přímé nastavení hodnoty kapacity,
- uzemnění svorky Lo,
- korekci OPEN,
- uživatelský průběh kapacity.

*Kapacitní dekáda M525* také obsahuje proceduru pro vlastní re-kalibraci, kdy korekce odchylky hodnot je dosaženo bez potřebného mechanického zásahu.

Rozhraní mezi uživatelem a *kapacitní dekádou M525* zajišťuje displej TFT s vysokým rozlišením umístěný ve střední části předního panelu, viz Obrázek 6. Napravo od displeje se nachází šipky pro možnost pohybu v menu přístroje, číslice pro nastavování hodnot a další funkční tlačítka pro ovládání a nastavení přístroje. V levé části předního panelu *kapacitní dekády M525* jsou umístěny výstupní svorky Lo a Hi pro dvou vodičové zapojení. Na obě výstupní svorky lze připojit až 500 V<sub>pk</sub> proti zemi (PE). Maximální dovolené napětí mezi svorkami Lo a Hi je 50 V DC a 35V AC.



Obrázek 6: Kapacitní dekáda M525 [6]

## 3.2 Princip funkce

*Kapacitní dekáda M525* obsahuje etalonové kapacity  $C_{n1}$  -  $C_{n35}$  uvedené v příloze B. Tyto etalonové kapacity jsou vzájemně paralelně propojeny. Každý etalon spíná vlastní relé s vysokou proudovou zatížitelností. Pro každou možnou výstupní hodnotu kapacity *dekády M525* není předem pevně dána kombinace etalonů. Procesor řídí spínání vhodných kondenzátorů na základě kalibračních hodnot získaných funkcí CALIBRATION (viz kapitola 3.3), nikoliv přímo na základě etalonových hodnot. Kombinací spínání kondenzátorů se vytváří námi zvolené výstupní hodnoty kapacity rovnající se součtu kalibračních (skutečných) hodnot sepnutých etalonů. [7]

## 3.3 Funkce MENU [6]

Volbou zvolené funkce se volí požadovaný pracovní režim *kapacitní dekády M525*. Důležité nastavení je *OPEN correction*, ve kterém se volí mezi absolutním nebo relativním nastavením kapacity  $C_n$ . Pro absolutní nastavení jmenovité kapacity  $C_n$  je výstupní hodnota zcela na úrovni výstupních svorek Lo a Hi. Pro relativní nastavení kapacity  $C_n$  je výstupní hodnota definována vzhledem ke korekci *OPEN*.

### Přímé nastavení (CAPACITANCE)

Funkce *CAPACITANCE* *kapacitní dekády M525* poskytuje přímé nastavení hodnoty kapacity  $C_n$  na výstupních svorkách Lo a Hi *dekády M525*.

### Časování (TIMING)

Funkce *TIMING* *kapacitní dekády M525* definuje různé časové závislosti kapacitní křivky, která udává velikost nominální hodnoty  $C_n$  v čase  $t$ . Časově proměnné kapacity jsou definovány tabulkou, kdy každý řádek obsahuje hodnotu kapacity a čas, po který je kapacita nastavena. Lze definovat více časových funkcí s různými názvy. Maximální počet řádků je 50.

### Uživatelská funkce (USER FUNCTION)

*Uživatelská funkce* je vyjádřena konverzní křivkou formulovanou v převodní tabulce. Hodnoty funkce jsou lineárně proloženy. Každý řádek zahrnuje simulovanou hodnotu funkce a její odpovídající kapacitu. Uživatel může formulovat více tabulek různých názvů. Maximální počet řádků je 100.

### Kalibrace (CALIBRATION)

Funkce *CALIBRATION* se skládá z měření nominálních hodnot etalonových kondenzátorů  $C_{n1}$  -  $C_{n35}$  a 6 hodnot otevřené korekce, viz příloha B. Měření se provádí čtyř-vodičově pomocí kalibračního RLC metru, kterým se změří konvenčně „pravá“ (správná) hodnota výstupní kapacity  $C_n$  a pomocí vestavěného mikroprocesoru se realizuje korekce hodnoty jmenovitých hodnot kapacit kondenzátorů  $C_{n1}$  -  $C_{n35}$  *dekády M525* na kalibrační hodnotu.

### 3.4 Technické údaje [6]

Technické údaje udávané v manuálu výrobce:

- rozsah hodnot kapacity  $C_n = 100 \text{ pF}$  až  $100 \text{ }\mu\text{F}$ .
- základní přesnost udávaná výrobcem  $\delta_{M525} = 0,25 \text{ }\%$ .
- referenční rozsah teplot  $\vartheta_R = 23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
- pracovní rozsah teplot  $\vartheta_P = 5 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- frekvenční rozsah  $f = 40 \text{ Hz}$  až  $1 \text{ kHz}$ .
- reakční doba přístroje  $t_R < 200 \text{ ms}$ .
- teplotní koeficient  $\alpha < 270 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ .

## 4 PROGRAM CALIBER

### 4.1 Obecné informace [8]

Program *Caliber* od firmy MEATEST je software určený k automatizovaným kalibračním měřicím přístrojům. Ke kalibraci pomocí tohoto programu je potřeba testovaný přístroj, odpovídající etalon a počítač s operačním systémem Windows 2000/XP/Vista/7/8. Ovládat přístroje lze manuálně nebo automatizovaně pomocí sběrnice RS232, GPIB nebo jinou sběrnici využívající průmyslový standart VISA (sběrnice USB, Ethernet,...). Odečítání naměřených hodnot je možné pomocí kamery. Program umožňuje samostatné užívání, kdy je výstupem pouze kalibrační protokol. Při použití s databází *WinQbase* mohou být výsledky dále zpracovány funkcemi databáze.

### 4.2 Části programu [8]

Program *Caliber* obsahuje čtyři základní moduly:

- Procedury
- Karty přístrojů
- Uživatelské funkce
- Pravidla generování

Základem automatizované kalibrace tímto programem je modul *Procedury*. V tomto modulu se vytváří, modifikují i provádí kalibrační procedury, které řídí postup kalibrace. Pro vytvoření procedury je potřeba zadat seznam přístrojů a dále vybraných funkcí, rozsahů a bodů kontrolovaného přístroje.

Přístroj musí mít v programu definovanou *Kartu přístroje*. Obsahem karty je popis přístroje a jeho vlastností. Především jde o seznam podporovaných funkcí, rozsahů, jeho specifikací a způsob ovládání přístroje.

Modul *Uživatelské funkce* poskytuje možnost vytvářet nové funkce představující vlastnosti přístroje využívané v celém programu *Caliber*. Funkce mají za úkol sjednotit nastavení použitých přístrojů (např. V-DC stejnosměrné napětí).

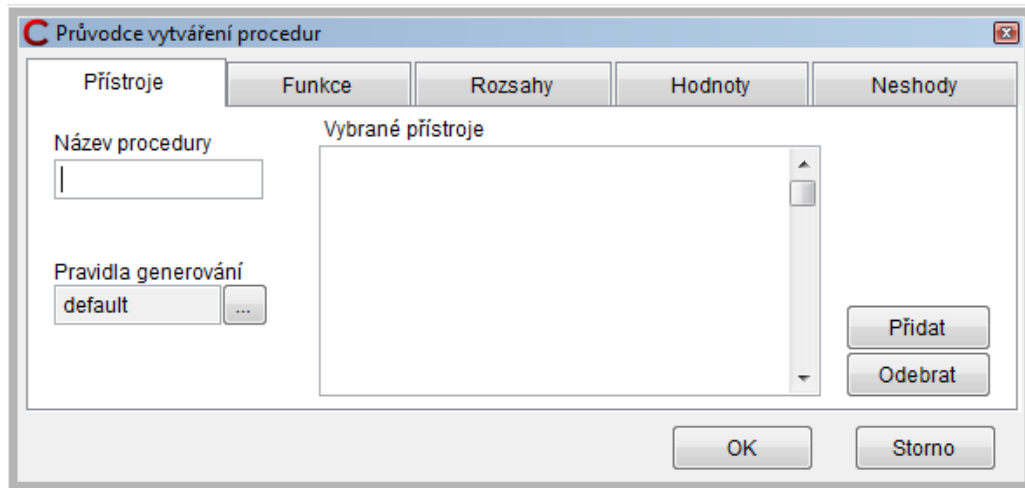
Modul *Pravidla generování* definuje pravidla, podle kterých se automaticky vytvářejí kalibrační procedury.

### 4.3 Modul *Procedura* [8]

Kapitola 4.3 popisuje vytvoření, úpravy a grafické prostředí modulu *Procedury* programu *Caliber* od firmy MEATEST.

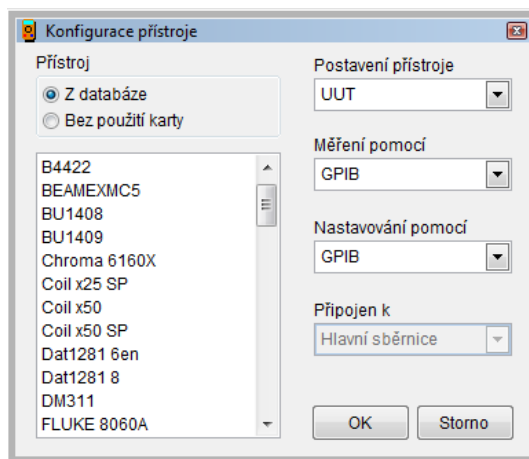
### 4.3.1 Vytvoření nové kalibrační procedury

Nová kalibrační procedura se vytváří v modulu *Procedury* stiskem tlačítka „Nový“. Otevře se *Průvodce vytváření procedur*, který obsahuje pět karet - *Přístroje*, *Funkce*, *Rozsahy*, *Hodnoty* a *Neshody*.



Obrázek 7: Okno *Průvodce vytváření procedur*

Obsluha pojmenuje nově vznikající proceduru v okně *Název procedury* a zvolí *Pravidla generování*. *Pravidla generování* zůstávají zpravidla nastavena na „default“. Jiná pravidla většinou vybíráme pro kontrolu zdrojů a dekád. Do okna *Vybrané přístroje* je nutné vložit pouze kontrolovaný přístroj *UUT*. Doporučuje se však přidat všechny využívané přístroje. Pro sestavení celé úlohy je povinné definovat *UUT*, *Etalon* a *Zdroj*. Nastavení přidávaných přístrojů vidíme na obrázku 8.



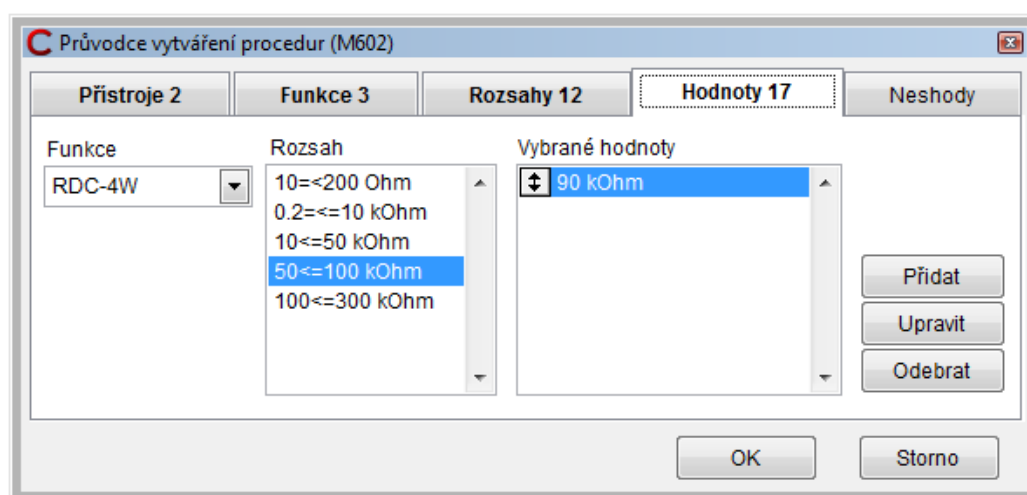
Obrázek 8: Konfigurace přístroje vkládaného do procedury

V rolovacím okně se volí přístroj z databáze. V pravé části okna vybereme *Postavení přístroje*, kde přiřadíme přístroji jeho funkci (*UUT*, *Zdroj*, *Etalon*,...) a způsob ovládání. Způsobem ovládání je myšleno, jak bude měřicí přístroj nastavován a jakou

metodou budou odečítány hodnoty. V modulu *Průvodce vytváření procedur* nelze přidat převodník, přepínač ani žádný přístroj umístěný za převodníkem. Tyto prvky je možné přidat až úpravou vlastní procedury. V okně *Konfigurace přístroje* se také nenastavuje položka *Připojení k*, tedy místo kam připojit vybraný měřicí přístroj. Tomuto nastavení je automaticky přiřazena možnost *Hlavní sběrnici*.

V záložce *Funkce* se vybírají funkce, které chceme používat. Výběr se provádí pomocí standardních šipek pro přesun jedné nebo všech funkcí. Dostupné funkce jsou pouze funkce definované na *kartě přístroje* UUT.

V další záložce *Rozsahy* se postupně volí pro všechny vybrané funkce jejich rozsahy. Každému z rozsahů je možné přiřadit typ. To je výhodné pouze při automatickém sestavení procedury. Vybrat se dají běžné rozsahy, nejnižší, nejvyšší, střední rozsahy a také specifické rozsahy. V záložce *Hodnoty* se definují měřicí body každého rozsahu a funkce, viz Obrázek 9.



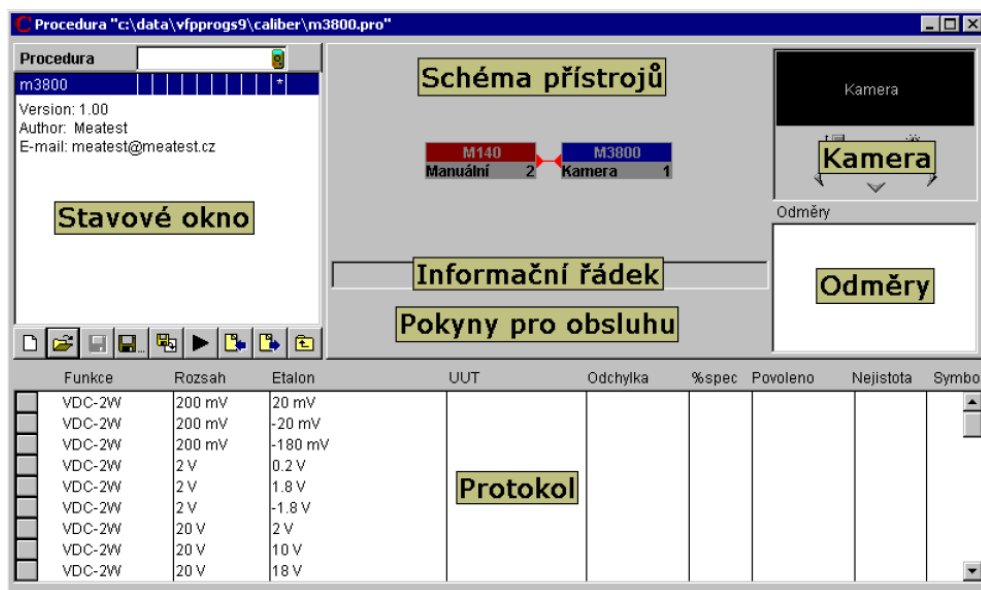
**Obrázek 9: Okno hodnot v *Průvodci vytváření procedur***

Závěr průvodce nás informuje o neshodách procedury. Neshody jsou body, které nelze nastavit na některém z přístrojů v naší proceduře. Pokud takové neshody nastanou, průvodce umožňuje se vrátit k některému z předchozích kroků a hodnoty upravit. Dokončení průvodce a vytvoření procedury se zbylými neshodami vede k problémům chodu programu.

### 4.3.2 Popis modulu *Procedura*

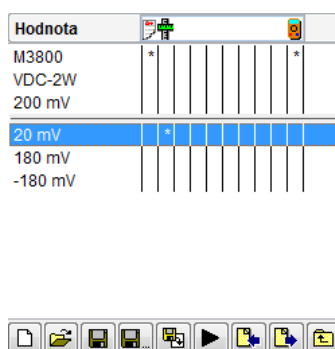
Mimo vytváření samotných procedur je možné v modulu *Procedura* tyto procedury upravovat, testovat a provádět.

Po spuštění programu *Caliber* se spouští modul *Procedura* automaticky. Stisknutím tlačítka „otevření“ vybereme příslušnou proceduru. Vzorový panel procedury znázorňuje obrázek 10.



Obrázek 10: Popis okna modulu *Procedura* [8]

Ve střední části okna je umístěno *Schéma přístrojů*. Každý přístroj je definovaný blokem ve tvaru obdélníku, v jehož horní části je název *karty přístroje* a pod ním druh ovládání s indexem přístroje. Přístroje propojené oranžovou čarou značí připojení na *hlavní sběrnici*. Šedý spoj informuje o tom, že hodnoty byly změněny *převodníkem*. Pod schématem se nachází *Informační řádek* popisující právě prováděný úkon při spuštění kalibraci. Pod *informačním řádkem* nalezneme *Pokyny pro obsluhu*, které jsou doplněny o zadávací pole v případě potřeby zapsat hodnoty. V pravé části okna jsou pole *Kamera* a pole *Odměry*. V případě použití kamery je zde zobrazen obraz a pomocí tlačítek můžeme upravovat vlastnosti videa (jas, kontrast, přiblížení posun, atd.). V okně *Odměry* lze vidět naměřené hodnoty. Ve spodní části modulu *Procedura* je umístěn postupně doplňující se protokol se všemi kontrolními body. V levém horním rohu je umístěno *stavové okno* a těsně pod ním se nachází ovládací tlačítka, viz Obrázek 11.



Obrázek 11: Stavové okno s hierarchií procedury

Stavové okno zobrazuje hierarchii procedury v pořadí *Procedura*, *Funkce*, *Rozsah*, *Hodnota*. Při nejvyšší úrovni bývá pod názvem procedury uveden popis (např. verze, autor, email). Na nižší stupeň struktury je možné se dostat kliknutím myši na aktuální

stupeň, tedy kliknutím na název *procedury* se dostaneme na *funkce* atd. Přejechod na vyšší úroveň zajišťuje tlačítko umístěné nejvíce vpravo. Aktuální úroveň je vyznačena v horní části okna, vedle níž jsou ikony vyjadřující nastavení. Hvězdička ve sloupcích ikon vyjadřuje individuální nastavení požadavků na proceduru. Individuálního nastavení je možné dosáhnout stisknutím pravého tlačítka myši na daný řádek.

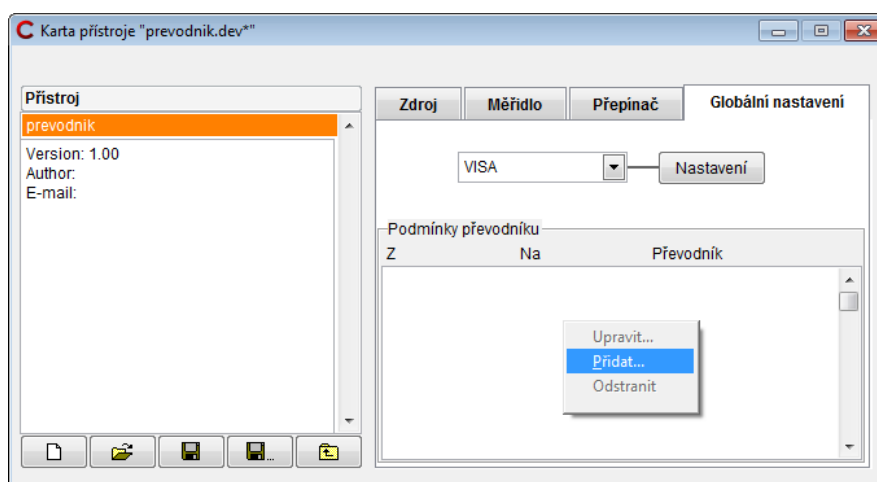
Program umí importovat nebo exportovat celou proceduru. Exportování vytvoří textový soubor s koncovkou „*pre*“, který obsahuje všechny využívané *uživatelské funkce, karty přístrojů* a samozřejmě danou *proceduru*.

#### 4.4 Modul *Karty přístrojů* [8]

Aby bylo možné sestavení procedur, musí existovat *Karty přístrojů*. Vytvoření *karty přístrojů* je mnohem složitější záležitostí než vytvoření samotné procedury. K vytvoření *karty přístrojů* je důležitá znalost funkcí, rozsahu a dalších specifikací přístroje. Hotové *karty* lze stáhnout na webových stránkách firmy MEATEST.

Protože budou využity již existující *karty přístrojů*, zaměřím se nyní na vytvoření převodníku, který v této práci aplikuji, viz kapitola 6.2.

*Převodníky* slouží k převodu funkce, hodnoty nebo parametru na základě převodních podmínek. Umísťují se mezi signálovou sběrnici a další přístroj a umožňují práci v obou směrech. *Převodníky* lze rozdělit do dvou skupin. První z nich *Reálné převodníky* jsou skutečné přístroje. Jako příklad uvedu proudový bočník, který převádí napětí na proud. *Reálné převodníky* mohou mít svou specifikaci a zahrnují se tedy do nejistoty měření. U těchto převodníků je povinnost vyplnit kartu přístroje v režimu *Zdroj*. Druhým typem převodníků jsou *Virtuální převodníky*, které zprostředkovávají pouze převod jedné funkce na jinou nebo přepočítání hodnoty. Nevypĺňuje se u nich žádná specifikace v režimu *Zdroj* ani v režimu *Měřidlo*, pouze se přidávají podmínky převodníku v záložce *Globální nastavení*, viz Obrázek 12. *Virtuální převodníky* jsou nastavovány na funkci „*void*“ a mají nulovou chybu.



Obrázek 12: Přidání podmínky převodníku v *kartě přístroje*

## 5 VOLBA VHODNÉHO MĚŘENÍ

Tato kapitola se zabývá výběrem vhodné metody měření kapacity *kapacitní dekády M525* a zvolením nejpřesnějšího měřicího přístroje popřípadě přístrojů ověřujících nastavené hodnoty kapacit na dekádě podle vybrané metody.

### 5.1 Metody měření kapacity [9]

Při měření kapacit *dekády M525* se musí brát v úvahu parazitní odpory spínacích relé. Proto není vhodné zvolit například *Ohmovu metodu*, kdy tyto odpory ovlivňují měřenou impedanci. Tato metoda je vhodná pro obvod se zapojenou pouze ideální kapacitou. Z tohoto důvodu představím metody měření impedance a následně vyberu vhodnou metodu k měření impedance.

#### 5.1.1 Metody s přímým údajem

Velkou výhodou metody *s přímým údajem* je velmi snadné měření bez vytváření složitých zapojení *kapacitní dekády M525* do měřicích obvodů. Měřicí obvody jsou již integrovány v přístrojích a tím zjednodušují obsluhu měření. Přístroje *s přímým údajem* se vyrábí s různými principy měření kapacity. Jedním ze způsobu je číslicové měření kapacity využívající převod kapacity na časový interval. Dále také měření na principu *Ohmova zákona*, kdy měřicí přístroj obsahuje zdroj harmonického napětí a měřič střídavého proudu. Do této skupiny zahrneme i RLC metry měřící kapacitu pomocí složitých vnitřních mostů a obvodů, které vykazují velmi dobrou přesnost.

#### 5.1.2 Rezonanční metoda

*Rezonanční metody* patří mezi nejstarší metody měření impedancí. Měřená kapacita je vložena do kmitavého (*rezonančního*) obvodu, který je následně vyladěn do *rezonance*, což se projeví maximální hodnotou napětí na obvodu. Existují různé druhy zapojení lišící se například způsobem ladění obvodu do *rezonance*. Ladění lze provádět nastavením frekvence budícího signálu nebo změnou vlastního kmitočtu způsobeného seřazením parametrů proměnných součástí kmitavého obvodu. Díky jejich náročnosti, ať už teoretické nebo konstrukční, jsou dnes nahrazovány moderními přístroji, které zjednodušují měření.

#### 5.1.3 Nulové metody

*Nulové metody* někdy nazývané *Mostové metody* dosahují velmi dobré přesnosti, avšak jejich velkou a často zásadní nevýhodou je jejich konstrukční náročnost. K sestavení mostů je potřeba například mnoho proměnných etalonových kapacit nebo rezistorů. Pro měření kapacit se nejčastěji využívají mosty *De Sautyho* a *Scheringův*.

## 5.2 Výběr měřicí metody

Z uvedených metod jsem vybral měření pomocí *RLC metru* z kategorie *přímých měření*. Tento typ měřicích přístrojů umožňuje získat hodnoty nejen kapacity, ale také parazitních odporů, ztrátového činitele nebo například činitele jakosti. Výhodou práce s těmito přístroji je snadné zapojení a obsluha. Zároveň se vyznačují poměrně velkou přesností.

## 5.3 Výpočet nejistot [10]

Po volbě metody je potřeba zvolit vhodný měřicí přístroj. K posuzování přesnosti měření se dnes používají dva typy vyhodnocení. Jedním z nich je tzv. chyba měření. Tento druh vyhodnocení je starší a jeho výpočet se zakládá na „správné hodnotě“, která ovšem nemůže být určena, ale pouze experimentálně zjištěna, například přesnější metodou. Druhým typem vyhodnocení je nejistota měření. Pomocí nejistoty měření bude vyhodnocena přesnost našich přístrojů. Vybrán bude přístroj s nejmenší možnou nejistotou.

Nejistota je parametr určující rozpětí hodnot, ve kterém se měřená hodnota nachází s určitou pravděpodobností.

- Standardní nejistota typu A

Standardní nejistota typu A  $u_A$  se zjišťuje z opakovaného měření dané veličiny. Protože je zjišťována nejistota měřicího přístroje ještě před měřením, není standardní nejistota typu A  $u_A$  v tomto případě uvažována.

- Výpočet absolutní chyby údaje číslicového měřicího přístroje  $\Delta_{max}$  podle vzorce (3)

$$\Delta_{max} = \frac{|\delta_M \cdot X_M| + |\delta_R \cdot X_R|}{100} \quad (3)$$

$\delta_M$  – relativní chyba z měřené hodnoty

$X_M$  – měřená hodnota

$\delta_R$  – relativní chyba z rozsahu přístroje

$X_R$  – měřicí rozsah přístroje

- Standardní nejistota typu B

Standardní nejistota typu B  $u_B$  se neurčuje z opakovaných měření, ale z kvantifikace jiných zdrojů nejistot, které můžeme určit.

- Výpočet standardní nejistoty typu B zdroje  $Z$   $u_B(Z)$  podle vzorce (4)

$$u_B(Z) = \frac{\Delta_{\max}}{\chi} \quad (4)$$

$\Delta_{\max}$  – maximální absolutní chyba údaje číslicového měřicího přístroje  
 $\chi$  – koeficient typu rozložení (pro normální rozložení  $\chi = 2$ )

- Výpočet standardní kombinované nejistoty  $u_C$  podle vzorce (5)

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (5)$$

$u_A$  – standardní nejistota typu A

$u_B$  – standardní nejistota typu B

- Výpočet standardní rozšířené nejistoty  $U$  podle vzorce (6)

$$U = k_r \cdot u_C \quad (6)$$

$u_C$  – standardní kombinovaná nejistota

$k_r$  – koeficient rozšíření (pro 95% pravděpodobnost hodnot ve vypočteném intervalu je  $k_r = 2$ )

Při výpočtu nejistot typu B vybírám normální rozložení používané pro přesné přístroje. Pro rozšířenou nejistotu volím pravděpodobnost hodnot ve vypočteném intervalu 95 %. Nejistoty budou počítány pro tři různé kapacity. Pro nejmenší nastavitelnou kapacitu *dekády M525*  $C_{\min} = 100$  pF, pro přibližně střední hodnotu kapacity *dekády M525*  $C_{\text{stř}} = 100$  nF a pro maximální hodnotu kapacity *dekády M525*  $C_{\max} = 100$   $\mu$ F.

### RLC meter Wayne Kerr 6440B [11]

Uveden vzorový výpočet pro  $C_{\min} = 100$  pF

- Výpočet absolutní chyby údaje kapacity  $\Delta(C)_{WK_I}$  RLC metru Wayne Kerr 6440B pro malé kapacity na základě tabulkové hodnoty z dokumentace odvozené interpolací grafu viz příloha C, podle vzorce (7)

$$\Delta(C)_{WK_I} = \frac{0,15 \cdot 10^{-12}}{f} = \frac{0,15 \cdot 10^{-12}}{40} = \underline{\underline{3,75 \cdot 10^{-3} \text{ pF}}} \quad (7)$$

$f$  – frekvence měřicího signálu

- Výpočet absolutní chyby údaje kapacity  $\Delta(C)_{WK\_L}$  RLC metru Wayne Kerr 6440B pro malé kapacity na základě tabulkové hodnoty z dokumentace pro úroveň měřicího signálu  $V_s$  viz příloha C, podle vzorce (8)

$$\Delta(C)_{WK\_L} = \frac{0,015 \cdot 10^{-12}}{f \cdot V_s} = \frac{0,015 \cdot 10^{-12}}{40 \cdot 1} = \underline{\underline{3,75 \cdot 10^{-4} \text{ pF}}} \quad (8)$$

$f$  – frekvence měřicího signálu

$V_s$  – úroveň měřicího signálu

- Výpočet celkové absolutní chyby údaje kapacity  $\Delta(C)_{WK\_T}$  RLC metru Wayne Kerr 6440B odpovídající součtu dílčích absolutních chyb ze vzorců (7) a (8) podle vzorce (9) viz příloha C

$$\begin{aligned} \Delta(C)_{WK\_T} &= \Delta(C)_{WK\_I} + \Delta(C)_{WK\_L} = \\ &= 3,75 \cdot 10^{-15} + 3,75 \cdot 10^{-16} = \underline{\underline{4,125 \cdot 10^{-3} \text{ pF}}} \end{aligned} \quad (9)$$

$\Delta(C)_{WK\_I}$  – absolutní chyba údaje kapacity RLC metru Wayne Kerr 6440B pro malé kapacity na základě tabulkové hodnoty z dokumentace odvozené interpolací grafu, viz příloha C

$\Delta(C)_{WK\_L}$  – absolutní chyba údaje kapacity RLC metru Wayne Kerr 6440B pro malé kapacity na základě tabulkové hodnoty z dokumentace pro úroveň měřicího signálu  $V_s$ , viz příloha C

- Výpočet relativní chyby údaje kapacity  $\delta(C_{min})_{WK}$  RLC metru Wayne Kerr 6440B pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{min} = 100 \text{ pF}$  dekády M525 podle vzorce (10)

$$\delta(C_{min})_{WK} = A + 100 \cdot \frac{\Delta(C)_{WK\_T}}{C_{min}} = 1 + 100 \cdot \frac{4,125 \cdot 10^{-15}}{100 \cdot 10^{-12}} = \underline{\underline{1,004\%}} \quad (10)$$

$A$  – přesnost odečtená z grafu vyjadřujícího chybu měření kapacity RLC metru Wayne Kerr 6440B v závislosti na hodnotě kapacity a frekvenci, viz příloha C

$\Delta(C)_{WK\_T}$  – celková absolutní chyba údaje kapacity RLC metru Wayne Kerr 6440B

$C_{min}$  – nejmenší nastavitelná hodnota kapacity dekády M525

**Tabulka 1: Relativní chyby měřicího přístroje WK 6440B, měření kapacit  $C_{min} = 100 \text{ pF}$ ,  $C_{stř} = 100 \text{ nF}$ ,  $C_{max} = 100 \text{ μF}$  dekády M525**

$f$ [Hz]	$\delta(C_{min})_{WK}$ [%]	$\delta(C_{stř})_{WK}$ [%]	$\delta(C_{max})_{WK}$ [%]
40	1,004	0,050	0,050
1000	0,050	0,050	0,050

- Výpočet absolutní chyby údaje kapacity  $\Delta_{\max}(C_{\min})_{WK}$  RLC metru Wayne Kerr 6440B pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{\min} = 100 \text{ pF}$  dekády M525 podle vzorce (11)

$$\Delta_{\max}(C_{\min})_{WK} = \frac{\delta(C_{\min})_{WK}}{100} \cdot C_{\min} = \frac{1,004}{100} \cdot 100 \cdot 10^{-12} = \underline{\underline{1,004 \text{ pF}}} \quad (11)$$

$\delta(C_{\min})_{WK}$  – relativní chyba údaje kapacity RLC metru Wayne Kerr 6440B pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{\min}$  dekády M525

$C_{\min}$  – nejmenší nastavitelná hodnota kapacity dekády M525

- Výpočet standardní nejistoty typu B  $u_B(C_{\min})_{WK}$  RLC metru Wayne Kerr 6440B pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{\min}$  dekády M525 podle vzorce (12)

$$u_B(C_{\min})_{WK} = \frac{|\Delta_{\max}(C_{\min})_{WK}|}{\chi} = \frac{1,004 \cdot 10^{-12}}{2} = \underline{\underline{0,502 \text{ pF}}} \quad (12)$$

$\chi$  – koeficient typu rozložení (pro normální rozložení  $\chi = 2$ )

- Výpočet standardní kombinované nejistoty  $u_C(C_{\min})_{WK}$  RLC metru Wayne Kerr 6440B pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{\min}$  dekády M525 podle vzorce (13)

$$u_C(C_{\min})_{WK} = u_B(C_{\min})_{WK} = \underline{\underline{0,502 \text{ pF}}} \quad (13)$$

$u_B(C_{\min})_{WK}$  – standardní nejistota typu B RLC metru Wayne Kerr 6440B pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{\min}$  dekády M525

- Výpočet standardní rozšířené nejistoty  $U(C_{\min})_{WK}$  RLC metru Wayne Kerr 6440B pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{\min}$  dekády M525 podle vzorce (14)

$$U(C_{\min})_{WK} = k_r \cdot u_C(C_{\min})_{WK} = 2 \cdot 0,502 \cdot 10^{-12} = \underline{\underline{1,004 \text{ pF}}} \quad (14)$$

$k_r$  – koeficient rozšíření

$u_C(C_{\min})_{WK}$  – standardní kombinovaná nejistota RLC metru Wayne Kerr 6440B pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{\min}$  dekády M525

**Tabulka 2: Standardní rozšířené nejistoty měřicího přístroje WK 6440B, měření kapacit  $C_{\min} = 100 \text{ pF}$ ,  $C_{\text{stř}} = 100 \text{ nF}$ ,  $C_{\max} = 100 \text{ }\mu\text{F}$  dekády M525**

f [Hz]	$U(C_{\min})_{WK}$ [pF]	$U(C_{\text{stř}})_{WK}$ [nF]	$U(C_{\max})_{WK}$ [μF]
40	1,004	0,050	0,050
1000	0,050	0,050	0,050

## Agilent 4980A [12]

Uveden vzorový výpočet pro  $C_{stř} = 100 \text{ nF}$

- Výpočet impedance  $Z_{m_{Agil}}$  měřené kapacitní dekádou M525 podle vzorce (15)

$$Z_{m_{Agil}} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_{stř}} = \frac{1}{2\pi \cdot 40 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} \doteq 39790 \Omega \quad (15)$$

$f$  – frekvence měřicího signálu

$C_{stř}$  – střední nastavitelná hodnota kapacity dekádou M525

- Výpočet hodnoty impedance pro short offset  $Z_{s_{Agil}}$  RLC metru Agilent 4980A podle vzorce (16), platí pro  $Z_{m_{Agil}} > 1,08 \Omega$ , viz příloha D

$$\begin{aligned} Z_{s_{Agil}} &= 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + \frac{0,4}{V_s}\right) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{1000}{f}}\right) = \\ &= 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + \frac{0,4}{1}\right) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{1000}{40}}\right) = 5,04 \text{ m}\Omega \end{aligned} \quad (16)$$

$f$  – frekvence měřicího signálu

$V_s$  – velikost měřicího signálu

- Výpočet hodnoty admittance pro open offset  $Y_{o_{Agil}}$  RLC metru Agilent 4980A podle vzorce (17), viz příloha D

$$\begin{aligned} Y_{o_{Agil}} &= 0,5 \cdot 10^{-9} \cdot \left(1 + \frac{0,1}{V_s}\right) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{100}{f}}\right) = \\ &= 0,5 \cdot 10^{-9} \cdot \left(1 + \frac{0,1}{1}\right) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{100}{40}}\right) = 1,42 \text{ nS} \end{aligned} \quad (17)$$

$f$  – frekvence měřicího signálu

$V_s$  – velikost měřicího signálu

- Výpočet relativní chyby údaje kapacity  $\delta(C_{stř})_{Agil}$  RLC metru Agilent 4980A pro střední nastavitelnou kapacitu  $C_{stř}$  dekádou M525 podle vzorce (18), viz příloha D

$$\delta(C_{stř})_{Agil} = \left[ Ab_{Agil} + \frac{Zs_{Agil}}{|Zm_{Agil}|} \cdot 100 + Yo_{Agil} \cdot |Zm_{Agil}| \cdot 100 \right] \cdot Kt =$$

$$= \left[ 0,1 + \frac{5,04 \cdot 10^{-3}}{39790} \cdot 100 + 1,42 \cdot 10^{-9} \cdot 39790 \cdot 100 \right] \cdot 1 = 0,11\% \quad (18)$$

$Ab_{Agil}$  – základní přesnost RLC metru Agilent 4980A odečtená z dokumentace, viz příloha D

$Zs_{Agil}$  – impedance pro short offset RLC metru Agilent 4980A

$Zm_{Agil}$  – impedance měřené kapacitní dekády M525

$Yo_{Agil}$  – admittance pro open offset RLC metru Agilent 4980A

$Kt$  – teplotní koeficient RLC metru Agilent 4980A

**Tabulka 3: Relativní chyby měřicího přístroje Agilent 4980A, měření kapacit  $C_{min} = 100$  pF,  $C_{stř} = 100$  nF,  $C_{max} = 100$  μF dekády M525**

f [Hz]	$\delta(C_{min})_{Agil}$ [%]	$\delta(C_{stř})_{Agil}$ [%]	$\delta(C_{max})_{Agil}$ [%]
40	5,75	0,11	0,11
1000	0,17	0,05	0,16

- Výpočet absolutní chyby údaje kapacity  $\Delta_{max}(C_{stř})_{Agil}$  RLC metru Agilent 4980A pro střední nastavitelnou kapacitu  $C_{stř}$  dekády M525 podle vzorce (19)

$$\Delta_{max}(C_{stř})_{Agil} = \frac{\delta(C_{stř})_{Agil}}{100} \cdot C_{stř} = \frac{5,75}{100} \cdot 100 \cdot 10^{-9} = \underline{\underline{0,11nF}} \quad (19)$$

$\delta(C_{stř})_{Agil}$  – relativní chyba údaje kapacity RLC metru Agilent 4980A pro střední nastavitelnou kapacitu  $C_{stř}$  dekády M525

$C_{stř}$  – střední nastavitelná hodnota kapacity dekády M525

- Výpočet standardní nejistoty typu B  $u_B(C_{stř})_{Agil}$  RLC metru Agilent 4980A pro střední nastavitelnou kapacitu  $C_{stř}$  dekády M525 podle vzorce (20)

$$u_B(C_{stř})_{Agil} = \frac{|\Delta_{max}(C_{stř})_{Agil}|}{k} = \frac{0,11 \cdot 10^{-9}}{2} = \underline{\underline{0,055nF}} \quad (20)$$

$\chi$  – koeficient typu rozložení (pro normální rozložení  $\chi = 2$ )

- Výpočet standardní kombinované nejistoty  $u_C(C_{stř})_{Agil}$  RLC metru Agilent 4980A pro střední nastavitelnou kapacitu  $C_{stř}$  dekády M525 podle vzorce (21)

$$u_C(C_{stř})_{Agil} = u_B(C_{stř})_{Agil} = \underline{\underline{0,055nF}} \quad (21)$$

$u_B(C_{stř})_{Agil}$  – standardní nejistota typu B RLC metru Agilent 4980A pro střední nastavitelnou kapacitu  $C_{stř}$  dekády M525

- Výpočet standardní rozšířené nejistoty  $U(C_{stř})_{Agil}$  RLC metru Agilent 4980A pro střední nastavitelnou kapacitu  $C_{stř}$  dekády M525 podle vzorce (22)

$$U(C_{stř})_{Agil} = k_r \cdot u_c(C_{stř})_{Agil} = 2 \cdot 0,055 \cdot 10^{-9} = \underline{\underline{0,11nF}} \quad (22)$$

$k_r$  – koeficient rozšíření

$u_c(C_{stř})_{Agil}$  – standardní kombinovaná nejistota RLC metru Agilent 4980A pro střední nastavitelnou kapacitu  $C_{stř}$  dekády M525

**Tabulka 4: Standardní rozšířené nejistoty měřicího přístroje Agilent 4980A, měření kapacit  $C_{min} = 100$  pF,  $C_{stř} = 100$  nF,  $C_{max} = 100$  μF dekády M525**

f [Hz]	$U(C_{min})_{Agil}$ [pF]	$U(C_{stř})_{Agil}$ [nF]	$U(C_{max})_{Agil}$ [μF]
40	5,75	0,11	0,11
1000	0,17	0,05	0,16

### Chroma 11021 [13]

Uveden vzorový výpočet pro  $C_{min} = 100$  pF

Relativní chyby byly odečteny z manuálu přístroje Chroma 11021 získáním pomocí grafu a tabulky zobrazených v příloze E.

**Tabulka 5: Relativní chyby měřicího přístroje Chroma 11021, měření kapacit  $C_{min} = 100$  pF,  $C_{stř} = 100$  nF,  $C_{max} = 100$  μF dekády M525**

f [Hz]	$\delta(C_{min})_{Chr}$ [%]	$\delta(C_{stř})_{Chr}$ [%]	$\delta(C_{max})_{Chr}$ [%]
40	-	-	-
1000	0,40	0,10	0,25

- Výpočet absolutní chyby údaje  $\Delta_{max}(C_{min})_{Chr}$  RLC metru Chroma 11021 pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{min}$  dekády M525 podle vzorce (23)

$$\Delta_{max}(C_{min})_{Chr} = \frac{\delta(C_{min})_{Chr}}{100} \cdot C_{min} = \frac{0,4}{100} \cdot 100 \cdot 10^{-12} = \underline{\underline{0,4pF}} \quad (23)$$

$\delta(C_{min})_{Chr}$  – relativní chyba údaje kapacity RLC metru Chroma 11021 pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{min}$  dekády M525

$C_{min}$  – nejmenší nastavitelná hodnota kapacity dekády M525

- Výpočet standardní nejistoty typu B  $u_B(C_{min})_{Chr}$  RLC metru Chroma 11021 pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{min}$  dekády M525 podle vzorce (24)

$$u_B(C_{min})_{Chr} = \frac{|\Delta_{max}(C_{min})_{Chr}|}{\chi} = \frac{0,4 \cdot 10^{-12}}{2} = \underline{\underline{0,2pF}} \quad (24)$$

$\chi$  – koeficient typu rozložení (pro normální rozložení  $\chi = 2$ )

- Výpočet standardní kombinované nejistoty  $u_C(C_{min})_{Chr}$  RLC metru Chroma 11021 pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{min}$  dekády M525 podle vzorce (25)

$$u_C(C_{min})_{Chr} = u_B(C_{min})_{Chr} = \underline{\underline{0,2 pF}} \quad (25)$$

$u_B(C_{min})_{Chr}$  – standardní nejistota typu B RLC metru Chroma 11021 pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{min}$  dekády M525

- Výpočet standardní rozšířené nejistoty  $U(C_{min})_{Chr}$  RLC metru Chroma 11021 pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{min}$  dekády M525 podle vzorce (26)

$$U(C_{min})_{Chr} = k_r \cdot u_C(C_{min})_{Chr} = 2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-12} = \underline{\underline{0,4 pF}} \quad (26)$$

$k_r$  – koeficient rozšíření

$u_C(C_{min})_{Chr}$  – standardní kombinovaná nejistota RLC metru Chroma 11021 pro nejmenší nastavitelnou kapacitu  $C_{min}$  dekády M525

**Tabulka 6: Standardní rozšířené nejistoty měřicího přístroje Chroma 11021, měření kapacit  $C_{min} = 100$  pF,  $C_{stř} = 100$  nF,  $C_{max} = 100$  μF dekády M525**

f [Hz]	$U(C_{min})_{Chr}$ [pF]	$U(C_{stř})_{Chr}$ [nF]	$U(C_{max})_{Chr}$ [μF]
40	-	-	-
1000	0,40	0,10	0,25

## 5.4 Výběr měřicího přístroje

Tabulka 7 shrnuje standardní rozšířené nejistoty třech vybraných etalonových měřicích přístrojů. Na základě hodnot standardních rozšířených nejistot vybereme nejpřesnější měřicí přístroj pro ověření parametrů *kapacitní dekády M525*.

**Tabulka 7: Standardní rozšířené nejistoty měřicích přístrojů, měření kapacit  $C_{min} = 100$  pF,  $C_{stř} = 100$  nF,  $C_{max} = 100$  μF dekády M525**

f [Hz]	40			1000		
Název přístroje	$U(C_{min})$ [pF]	$U(C_{stř})$ [nF]	$U(C_{max})$ [μF]	$U(C_{min})$ [pF]	$U(C_{stř})$ [nF]	$U(C_{max})$ [μF]
Chroma 11021	-	-	-	0,40	0,10	0,25
Agilent 4980A	5,75	0,11	0,11	0,17	0,05	0,16
WK 6440B	1,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Z tabulky 7 je patrné, že nejpřesnějším měřicím přístrojem je *RLC Wayne Kerr 6440B*, jehož řádek je šedě zvýrazněn. Od něj se ve většině bodech příliš neliší přístroj *Agilent 4980A*, avšak při frekvenci 40Hz a nejmenších hodnotách kapacity se přesnost výrazně zhoršuje. Přístroj *Chroma 11021* nepodporuje měření kapacity při 40Hz, a zároveň při 1kHz dosahuje nejvyšší nejistoty z výše uvedených přístrojů. Z toho důvodu je pro naše měření nejméně vhodný.

## 6 VYTVOŘENÍ PROCEDURY

Tato kapitola popisuje vytvoření měřicí procedury v programu *Caliber*. Měření zadané *kapacitní dekády M525* bude prováděno vybraným měřicím přístrojem *Wayne Kerr 6440B*. K oběma měřicím přístrojům již existují *Karty přístrojů* programu *Caliber*.

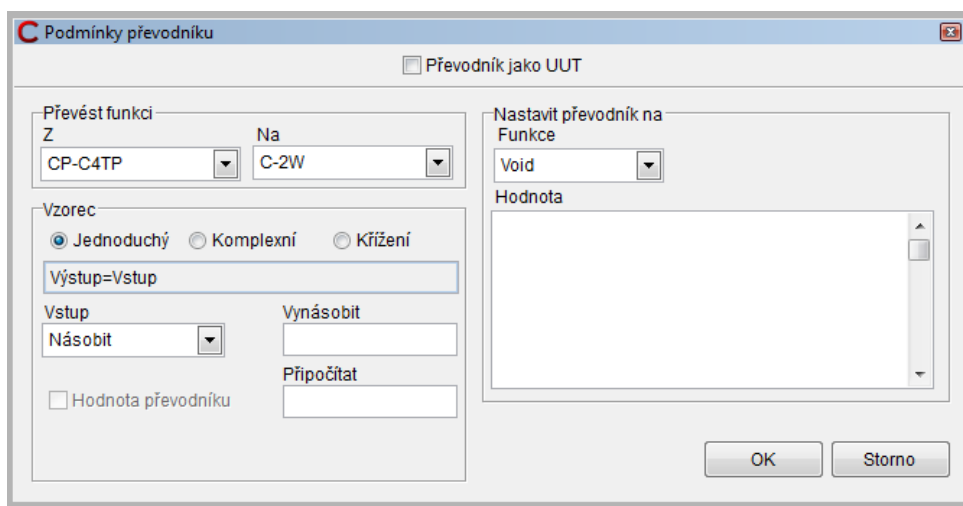
### 6.1 Výběr funkcí přístrojů

*Kapacitní dekáda M525* pracuje pouze s jedinou funkcí definovanou na kartě přístrojů *M525*. Název funkce je *C-2W*. Funkce *C-2W*, ale neodpovídá našim požadavkům na možnost měření kapacity při různých frekvencích, proto vybereme funkci *CP-C4TP*, která nastavení frekvence pro měření kapacity umožňuje. Funkce *CP-C4TP* obsahuje pouze karta RLC metru *Wayne Kerr 6440B*, nikoliv však karta *kapacitní dekády M525*. Řešením je vytvoření převodníku z funkce *CP-C4TP* na *C-2W*.

### 6.2 Převodník funkcí

Vytvářený převodník vzájemně převádí námi vybrané funkce *CP-C4TP* a *C-2W* oběma směry. Z tohoto důvodu se jedná o převodník pouze *virtuální*.

*Virtuální převodník* bude vytvořen následujícím postupem. Spustí se modul *Karty Přístrojů* a vytvoří se nová karta přístroje. Karta přístroje bude pojmenována *prevodnik\_fc*. Jelikož se jedná pouze o *virtuální převodník*, záložky *Zdroj* a *Měřidlo* se ignorují a vybírá se až záložka *Globální nastavení*. V této části se vytváří podmínky převodníku, které při přidání podmínek převodníku zobrazí nové okno *Podmínky převodníku*, viz Obrázek 13.



Obrázek 13: Virtuální převodník

Převod se nastaví z funkce *CP-C4TP* na straně etalonu na funkci *C-2W* na straně *UUT*. Z důvodu virtuálního převodníku bude převodník nastaven na funkci „*Void*“. Vzorec

převodu zůstává nastaven na typ „jednoduchý“. Podmínky musí být potvrzeny a karta přístroje uložena.

### 6.3 Vytvoření procedury M525

K vytvoření procedury použiji *Průvodce vytváření procedur*. Vytvářenou proceduru pojmenuji M525 podle kontrolované kapacitní dekády M525. Pravidla generování ponechám „default“. Přidám kapacitní dekádu M525 jako *UUT & Zdroj*. RLC metr *Wayne Kerr 6440B* vložím jako *Etalon*. Kapacitní dekádě M525 přiřadím nastavování a měření pomocí RS232, protože jiné dálkové ovládání zatím přístroj neobsahuje, více viz kapitola 3.1. Pracovní etalon *Wayne Kerr 6440B* bude ovládán rozhraním GPIB. Toto nastavení lze později v případě potřeby jednoduše změnit z pole *Schéma přístrojů* v modulu *Procedura*. V následující záložce *Funkce* odeberu nepoužívanou funkci *C-2W* a potvrdím proceduru.

Poté se zobrazí vytvořená procedura M525. Do schématu přístrojů přidám virtuální převodník *prevodnik\_fc*, jehož popis vytváření můžeme nalézt v kapitole 6.2. Převodník *prevodnik\_fc* připojím k hlavní sběrnici. Dále vložím funkci *CP-C4TP* do procedury, vytvořím rozsahy, do nichž zadám měřicí hodnoty. Vybrané měřicí hodnoty jsou uvedeny v kapitole 6.4. Z důvodu výběru funkce *CP-C4TP* jako hlavní funkce ponechám připojení RLC metru *Wayne Kerr 6440B* také k hlavní sběrnici, ale u *kapacitní dekády M525* definované jako *UUT* změním položku „připojení k“ z hlavní sběrnice na *prevodnik\_fc*. Nakonec je možné upravit parametry měření procedury M525 nebo jen modifikovat její vybrané funkce, rozsahy nebo i konkrétní měřené hodnoty kapacity  $C_M$ . Například změnit počet odměřů *etalonu* i *UUT* nebo *Povolenou chybu*. Pro měření jsme z důvodu širokého teplotního a vlhkostního rozsahu zvýšili *Povolenou chybu* ze 100 % na maximální hodnotu 999 %. To znamená, že místo požadované přesnosti kapacitní dekády M525 uvedené v manuálu  $\delta_{M525} = 0,25 \%$  provádíme testování se zvolenou požadovanou přesností 2,5 %.

### 6.4 Volba testovacích hodnot

Existují dvě možnosti volby typu hodnot kapacity *dekády M525*. Lze zvolit pouze etalonové hodnoty kapacity kondenzátorů  $C_{n1} - C_{n35}$  odpovídající kalibračním bodům (viz příloha B) *kapacitní dekády M525* nebo libovolné nastavitelné hodnoty kapacity  $C_n$ . Kalibrační hodnota nemusí odpovídat přesně kalibračnímu bodu (etalonové hodnotě), viz kapitola 3.2. Při nastavení kapacity na hodnotu odpovídající etalonové hodnotě mohou nastat 2 varianty. Jedna varianta nastane, když je kalibrační hodnota těsně menší než kalibrační bod, díky tomu se ke kalibračnímu bodu připojí další etalon, s největší pravděpodobností poměrně malé kapacity. Druhou možností je těsně větší kalibrační hodnota než kalibrační bod, kdy spíná celá řada nižších etalonů. Spojení kondenzátorů způsobuje zesílení parazit a chyb nastavení. Příkladem může být zvýšení parazitního odporu výstupní kapacity  $C_n$  z důvodu sepnutí více relé. Z tohoto důvodu je samozřejmě důležitější testovat nastavitelné hodnoty kapacity  $C_n$ , protože je potřeba

ověřit funkčnost na celém rozsahu *kapacitní dekády M525* a ne jen funkci ve vybraných etalonových bodech, ve kterých může při první variantě docházet k minimálním parazitním jevům oproti běžnému spínání více etalonových kondenzátorů. V tabulce 8 jsou zapsány vybrané kontrolované nastavitelné hodnoty kapacity  $C_n$ . Výběr byl volen tak, aby pokryl celý rozsah *kapacitní dekády M525*. Šedě jsou zvýrazněny body, které odpovídají přímo etalonovým hodnotám kondenzátorů.

**Tabulka 8: Testovací hodnoty kapacitní dekády M525**

	$C_n$ [nF]	$C_n$ [nF]	$C_n$ [nF]	$C_n$ [μF]	$C_n$ [μF]	$C_n$ [μF]
<b>Rozsahy</b>	<b>1,0</b>	<b>10,0</b>	<b>100</b>	<b>1,00</b>	<b>10,0</b>	<b>100</b>
<b>Hodnoty</b>	0,1	1,0	10	0,10	1,0	10
	0,2	2,5	11	0,13	1,3	13
	0,4	4,0	18	0,20	1,7	20
	0,7	7,0	30	0,30	3,0	30
	0,9	9,0	50	0,50	5,0	47
			70	0,70	7,0	60
			90	0,90	9,0	80
			95	0,97	9,5	91
					100	

## 7 MĚŘENÍ

V této kapitole představím klimatickou komoru pro simulaci klimatických podmínek a zaměřím se na použitou klimatickou komoru CLIMACELL 222. Dále popíši průběh měření kapacitní dekády M525 a uvedu jeho výsledky.

### 7.1 Klimatická komora, CLIMACELL 222 [14]

Klimatické komory slouží k simulaci stanovených klimatických podmínek. Používají se například ve farmaceutickém, chemickém, přírodovědeckém, elektrotechnickém a mnoha dalších oborech. Tyto komory zajišťují homogenní prostředí pro uchovávání různorodých látek nebo testování přístrojů a materiálů.

Při měření byla použita klimatická komora CLIMACELL 222 od firmy BMT Medical Technology. Firemní označení tohoto přístroje je chladicí inkubátor s řízenou vlhkostí. Tato komora je vybavena mikroprocesorovým řízením s těmito funkcemi:

- Regulace teploty PID regulátorem s fuzzy logikou a s teplotním čidlem PT100.
- Regulace vlhkosti PID regulátorem s fuzzy logikou a s vlhkostním kapacitním čidlem.
- 4 přednastavené programy a 2 volně nastavitelné programy.
- Různé časové módy
- Nastavitelná rychlost ventilátoru.
- Možnost vtištění protokolu skutečných hodnot teploty a času prostřednictvím RS 232C.
- Čtecí zařízení na čipovou kartu k uchování údajů.
- Klávesnice pro programování s prosvětleným displejem.

#### 7.1.1 Popis komory

Vnitřní plášť spolu s policemi je vyroben z nerezavějící oceli a vnější plášť z galvanicky pozinkovaného plechu s šedým tvrdým a odolným vypalovacím lakem. Komora je celá izolována ekologickým izolačním materiálem a obsahuje vnitřní skleněné dveře. Hlavní dveře jsou zajištěny ve 4 bodech pro dobré utěsnění.

Výkonný zvlhčovač napájený destilovanou vodou ze zásobní nádoby a topná spirála spolu s ventilátorem s regulovatelnými otáčkami zajišťují rovnoměrné parametry v celém prostředí komory.

#### 7.1.2 Technické údaje

Technické údaje udávané v manuálu výrobce:

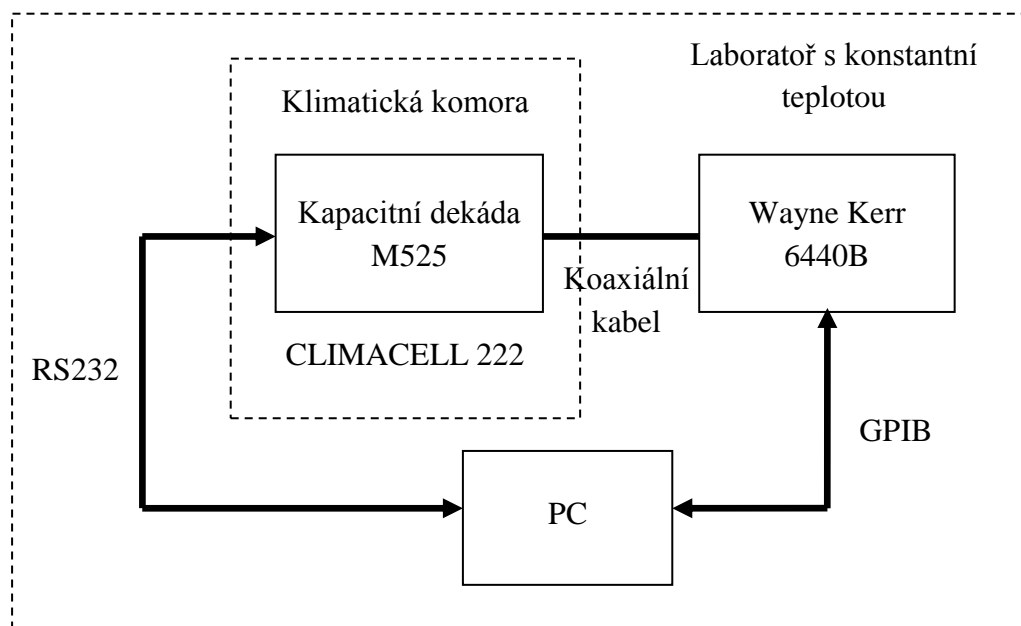
- Pracovní rozsah teplot  $\vartheta = 0\text{ °C}$  až  $99,9\text{ °C}$ .
- Relativní vlhkost RH = 10 % až 90 %.
- Doba ohřevu na  $37\text{ °C}$  z teploty okolí  $t_0 < 25\text{ min}$ .
- Doba chlazení z teploty  $22\text{ °C}$  na  $10\text{ °C}$   $t_{CH} < 21\text{ min}$ .



Obrázek 14: CLIMACELL 222 [14]

## 7.2 Popis zapojení

Celé měření probíhalo v laboratoři s řízenou konstantní teplotou  $23\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  a vlhkostí 30 % až 50 %. *Kapacitní dekáda M525* byla umístěna nehybně do středu klimatické komory. Využity byly obě průchodky z klimatické komory. Levou průchodkou vedly napájecí vodiče spolu s datovými vodiči. Měřicí kabely procházely pravou průchodkou, z důvodu zamezení rušení od napájecích a datových vodičů. Zapojení přístrojů je vidět na obrázku 15. *Kapacitní dekáda M525* je připojena k počítači pomocí rozhraní RS232 a měřicí etalon *Wayne Kerr 6440B* pomocí rozhraní GPIB. Celé měření ovládá vytvořená měřicí procedura *M525* programu *Caliber*, viz kapitola 6.



Obrázek 15: Blokové schéma zapojení

### 7.3 Průběh měření

Chod komory probíhal pomocí programu P1 pro požadovanou stálou teplotu a vlhkost. V klimatické komoře nelze dosáhnout 10% vlhkosti na nižších teplotách, proto bylo celé měření pro 10% vlhkost zrušeno, oproti prvotnímu záměru testovat dekádu i na této hodnotě vlhkosti. *Kapacitní dekáda M525* byla testována při následujících měnicích se podmínkách:

Vlhkost: 50 %, 70 % a 90 %

Teplota: 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C, 50 °C.

Aby nebylo ovlivněno měření, proběhla kalibrace přístroje i s měřicími kabely před prvním měřením. V dalším měření již k žádným kalibracím (open ani short) nedošlo a to z toho důvodu, aby se v jeho průběhu nezměnily podmínky měření. Žádným způsobem nebylo manipulováno po dobu měření s jakoukoli částí zapojení ani měřicími přístroji.

Vždy proběhlo měření všech teplot od nejnižší po nejvyšší na jedné úrovni vlhkosti a následně se přešlo na vyšší hodnotu vlhkosti. Po každé změně klimatických podmínek následoval stabilizační interval trvající 24 hodin, po kterém proběhla vždy dvě celá kontrolní měření následující za sebou. To z toho důvodu, aby se daly odstranit nahodilé chyby způsobené měřicím etalonem *Wayne Kerr 6440B*.

### 7.4 Zpracování dat

Výsledky měření byly vygenerovány programem *Caliber* ve formě protokolů uložených do souboru s příponou *.txt* (viz elektronická příloha na CD). Z těchto souborů byla data exportována do tabulkového editoru Office Excel firmy Microsoft, kde byla dále zpracována. Došlo k filtraci a následnému vyřazení nahodilých chyb odhalených opakovaným měřením. Při zpracování a analýze dat jsem se zaměřil zejména na absolutní chybu údaje kapacity *dekády M525*  $\Delta(C)_{M525}$  uvedenou v měřicích protokolech programu *Caliber* jako odchylka. Výpočet absolutní chyby údaje kapacity *dekády M525*  $\Delta(C)_{M525}$  popisuje vzorec (27).

$$\Delta(C)_{M525} = C_{UUT} - C_{WK} \quad (27)$$

$C_{UUT}$  – hodnota kapacity udávána *kapacitní dekádou M525*

$C_{WK}$  – hodnota kapacity změřená etalonovým měřicím RLC metrem *Wayne Kerr 6440B*

Z velkého množství dat byly vybrány některé z nastavovaných hodnot kapacity napříč všemi rozsahy *kapacitní dekády M525*, na kterých budou zhodnoceny výsledky měření. Výběr byl zvolen tak, aby charakterizoval hodnoty daného rozsahu, nebo upozornil například na zhoršení hodnot kapacity nacházející se v měření. Vybrané nastavované hodnoty *kapacitní dekády M525* jsou:

- C = 0,2 nF; 0,7 nF; 2,5 nF; 7 nF; 30nF; 0,5 μF; 5 μF; 47 μF

Absolutní chyby údaje kapacity  $\Delta(C)_{M525}$  jsou zapsány v tabulce 9 pro kapacitu C = 0,2 nF. Tabulky pro ostatní kapacity jsou přiloženy v příloze F. Zaokrouhlení

hodnot proběhlo na základě nejistoty vypočítané měřicí procedurou v programu *Caliber*. Nejistota je zaokrouhlena vždy na dvě platné číslice. Zhodnocení hodnot a grafické vyjádření se nachází v kapitole 8.

**Tabulka 9: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity  $C = 0,2$  nF dekády M525, etalon WK6440B**

$\vartheta$ [°C]	$\Delta(C)_{M525}$ [pF]					
	Vlhkost 50 %		Vlhkost 70 %		Vlhkost 90 %	
	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz
10	-0,47	-0,152	-0,76	-0,257	-0,89	-0,356
15	-0,57	-0,180	-0,71	-0,290	-1,26	-0,446
20	-0,61	-0,202	-0,78	-0,307	-1,98	-0,553
25	-0,61	-0,219	-1,02	-0,333	-2,33	-0,598
30	-0,71	-0,247	-1,20	-0,362	-3,20	-0,730
35	-0,72	-0,267	-1,29	-0,388	-3,62	-0,788
40	-0,85	-0,282	-1,23	-0,462	-4,75	-1,184
50	-1,10	-0,337	-1,71	-0,545	-6,96	-1,628

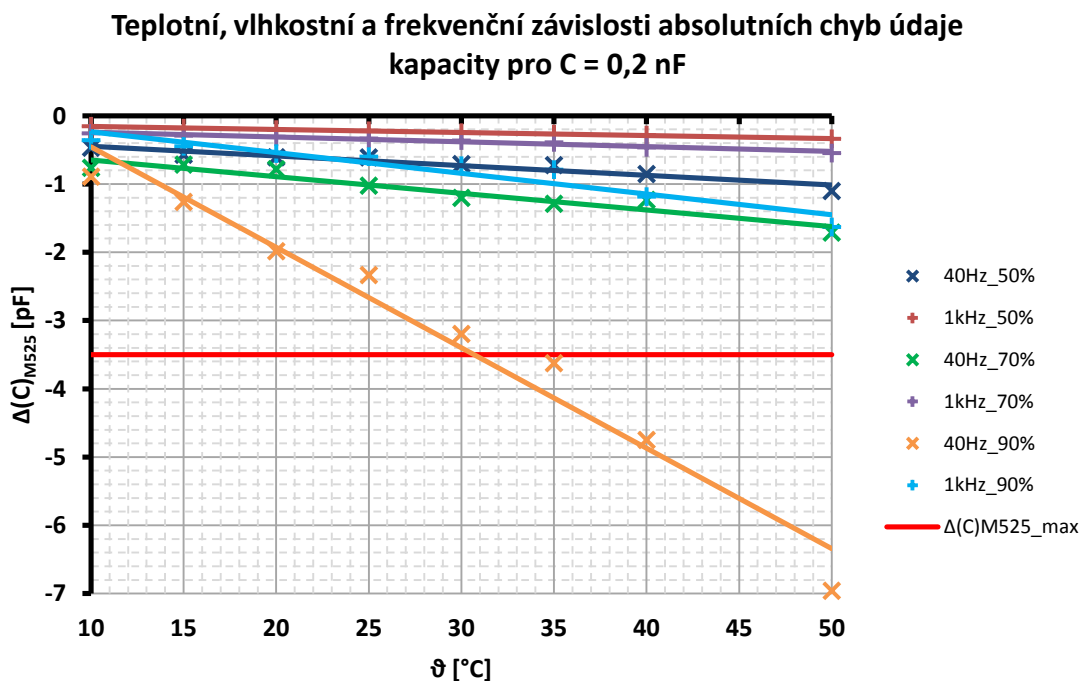
## 8 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

V této kapitole zhodnotíme výsledky měření ve dvou kapitolách na základě typu grafického zobrazení měřených a vypočítaných veličin. Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislost absolutních chyb údaje kapacity dekády M525 popisuje kapitola 8.1. Vyjádření specifikace všech měřených hodnot kapacity charakterizuje kapitola 8.2.

### 8.1 Absolutní chyba údaje kapacity

Hodnoty z tabulky 9 a tabulek v příloze F byly zakresleny do přehledných grafů 1 až 8, ze kterých je jasně patrné, jak se kapacity *dekády* M525 chovaly v závislosti na teplotě, vlhkosti a frekvenci. V každém grafu je vyznačena maximální povolená absolutní chyba údaje dekády M525  $\Delta(C)_{M525\_max}$  při referenčním rozsahu teplot  $\vartheta_R = 23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při tomto teplotním rozsahu výrobce garantuje přesnost  $\delta_{M525} = 0,25 \text{ } \%$  při frekvenci  $f = 1 \text{ kHz}$ , při frekvencích mezi 40 Hz až 1 kHz uvádí výrobce přesnost  $\delta_{M525} = 0,5 \text{ } \%$ . Pro zjednodušení grafů uvažujeme pouze přísnější mez a to  $\delta_{M525} = 0,25 \text{ } \%$ . Výpočet maximální povolené absolutní chyby údaje kapacity dekády M525  $\Delta(C)_{M525\_max}$  se řídí podle vzorce (3) pro výpočet absolutní chyby údaje číslicového měřicího přístroje.

Z grafu 1 pro kapacitu  $C = 0,2 \text{ nF}$  je patrné, že pro nízké kapacity složené z keramických kondenzátorů třídy I je teplotní rozsah pro přesnost  $\delta_{M525} = 0,25 \text{ } \%$  daleko širší, než je referenční rozsah.

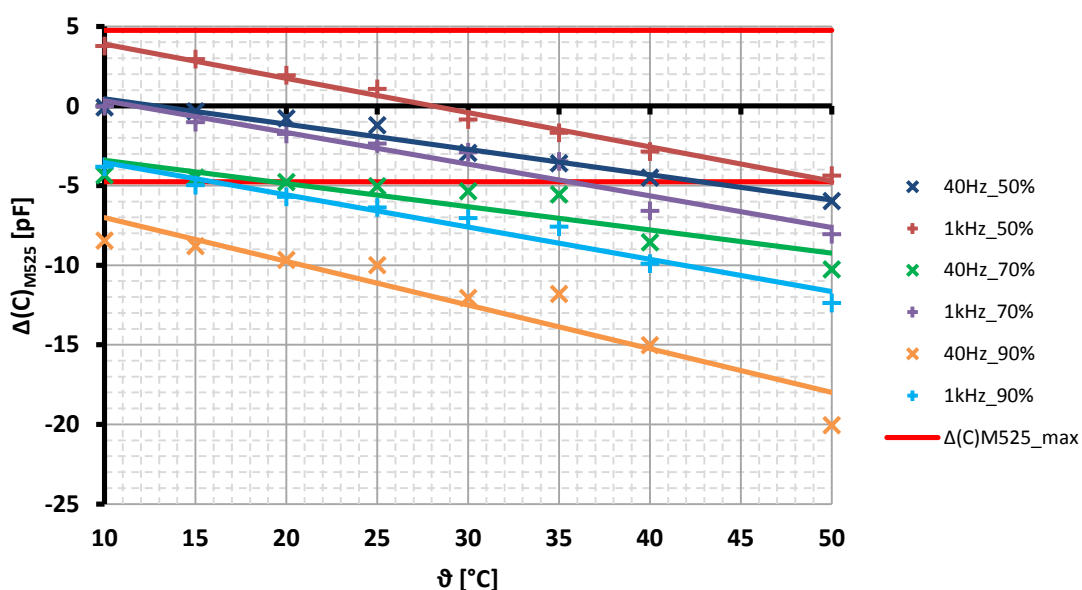


Graf 1: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje dekády, měření kapacity  $C = 0,2 \text{ nF}$  dekády M525, etalon WK6440B

Pouze nízká frekvence  $f = 40 \text{ Hz}$  spolu s vysokou relativní vlhkostí  $RH = 90 \%$  způsobila zhoršení vlastností kondenzátorů, kdy při teplotě vyšší než  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  již překročila absolutní chyba údaje kapacity  $\Delta(C)_{M525}$  hodnotu povolené absolutní chyby  $\Delta(C)_{M525\_max}$ . Při měřeních s ostatními vlhkostmi a frekvencemi se jen lehce absolutní hodnota absolutní chyby zvětšovala, ale přesto ani při nejvyšší teplotě  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  nepřekročila povolenou chybu.

V grafu 2 vidíme teplotní, vlhkoštní a frekvenční závislost kapacity  $C = 0,7 \text{ nF}$ . Oproti grafu 1 již vidíme zhoršení vlastností při měnících se klimatických podmínkách a frekvenci. To je způsobeno sériovým zapojením dvou kondenzátorů, každého o hodnotě  $500 \text{ pF}$ . Tyto kondenzátory nejsou již keramické, ale polypropylenové svitkové kondenzátory, které mají na úkor vyšší kapacity horší vlastnosti teplotní, frekvenční a vlhkoštní stability. Při 90% vlhkosti absolutní chyby údaje *dekády M525*  $\Delta(C)_{M525}$  překračují v celém kontrolovaném teplotním rozsahu povolenou hodnotu chyby  $\Delta(C)_{M525\_max}$ . Naopak při vlhkosti 50 % a všech nastavených hodnotách teploty splňují hodnoty kapacity povolenou absolutní chybu  $\Delta(C)_{M525\_max}$ . Při 70% vlhkosti se dal předpokládat teplotní rozsah pro danou přesnost  $\delta_{M525} = 0,25 \%$  až do  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

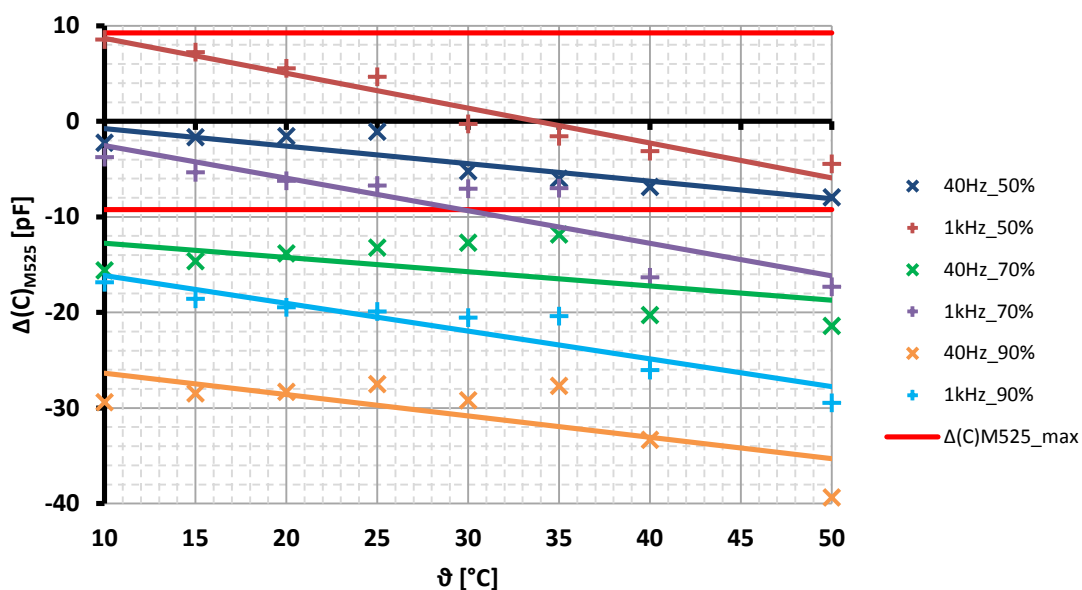
**Teplotní, vlhkoštní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity pro  $C = 0,7 \text{ nF}$**



**Graf 2: Teplotní, vlhkoštní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje dekády, měření kapacity  $C = 0,7 \text{ nF}$  dekády M525, etalon WK6440B**

Další testovanou hodnotou je kapacita  $C = 2,5 \text{ nF}$ , viz graf 3. Závislost se podobá závislosti z grafu 2. Malé zmenšení proběhlo u teplotního rozsahu při vlhkosti 70 %, kde se absolutní chyba údaje kapacity  $\Delta(C)_{M525}$  držela pod maximální povolenou hranici chyby  $\Delta(C)_{M525\_max}$  zhruba do  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

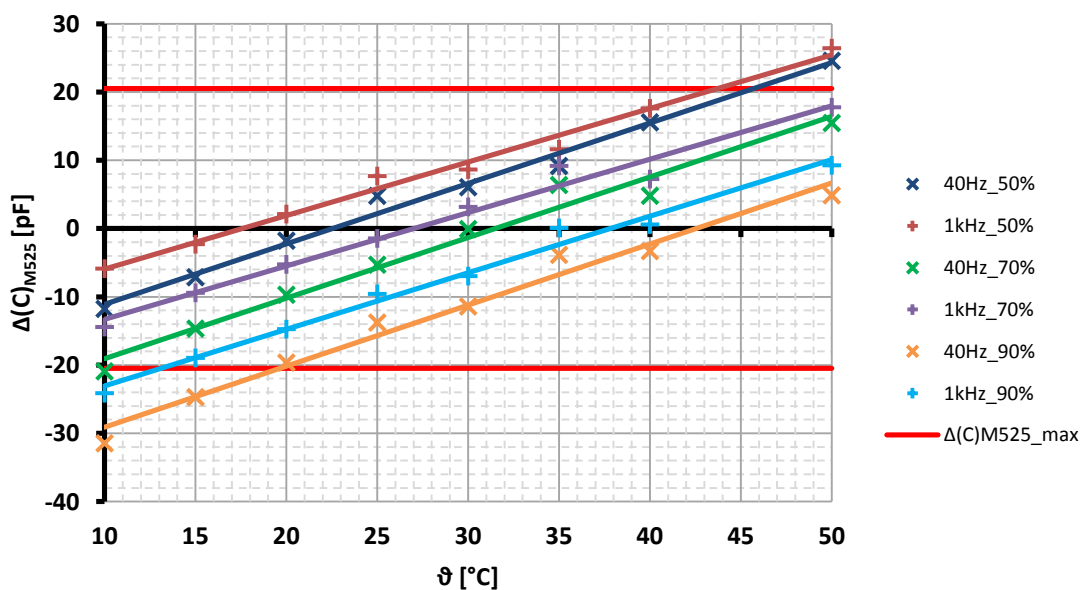
**Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity pro C = 2,5 nF**



**Graf 3: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje dekády, měření kapacity C = 2,5 nF dekády M525, etalon WK6440B**

V grafu 4 pro hodnotu *kapacitní dekády M525*  $C = 7$  nF se dosahuje nejmenší absolutní chyby údaje  $\Delta(C)_{M525}$  při referenční teplotě 23 °C a vlhkosti 50% tak, jak je uvedeno v manuálu přístroje od výrobce.

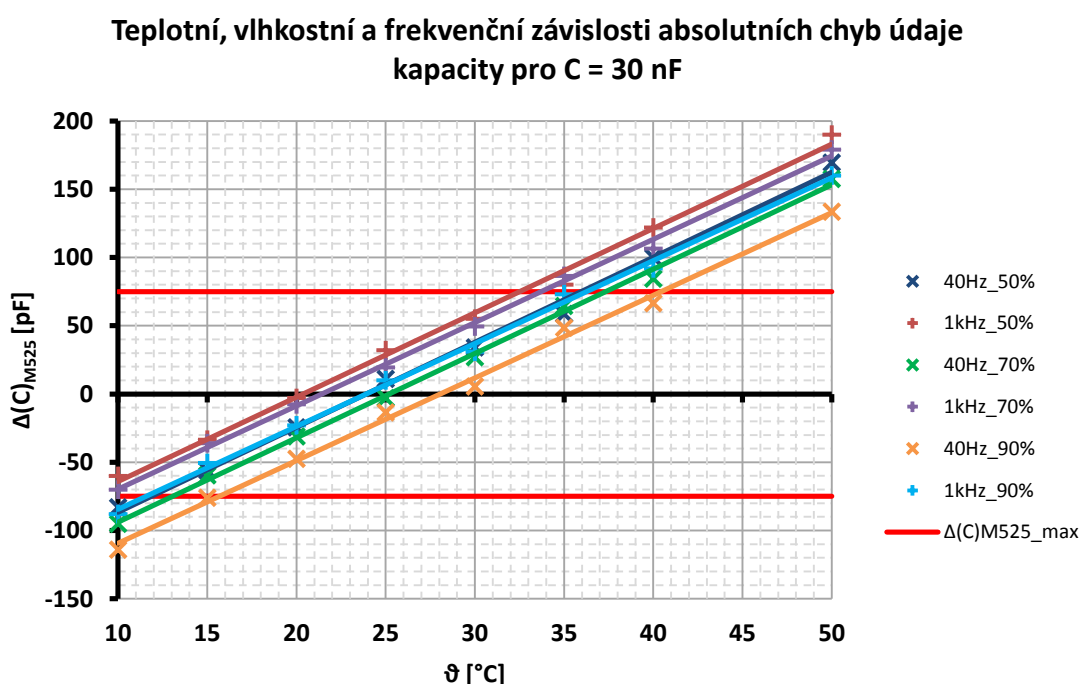
**Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity pro C = 7 nF**



**Graf 4: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje dekády, měření kapacity C = 7 nF dekády M525, etalon WK6440B**

Pomocí předpokládané extrapolace pro nižší teploty by se dal rozšířit interval referenční teploty při kapacitě  $C = 7\text{nF}$  až na  $23\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$ . Podobně by tomu mohlo být při vlhkostech 70 % a 90 %, kde by zůstal interval  $\pm 20\text{ °C}$ , avšak by se posunul jeho střed. Referenční rozsah teplot by byl pro 70% vlhkost  $30\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$  a pro 90% vlhkost na základě extrapolace pro vyšší teploty  $40\text{ °C} \pm 20\text{ °C}$ .

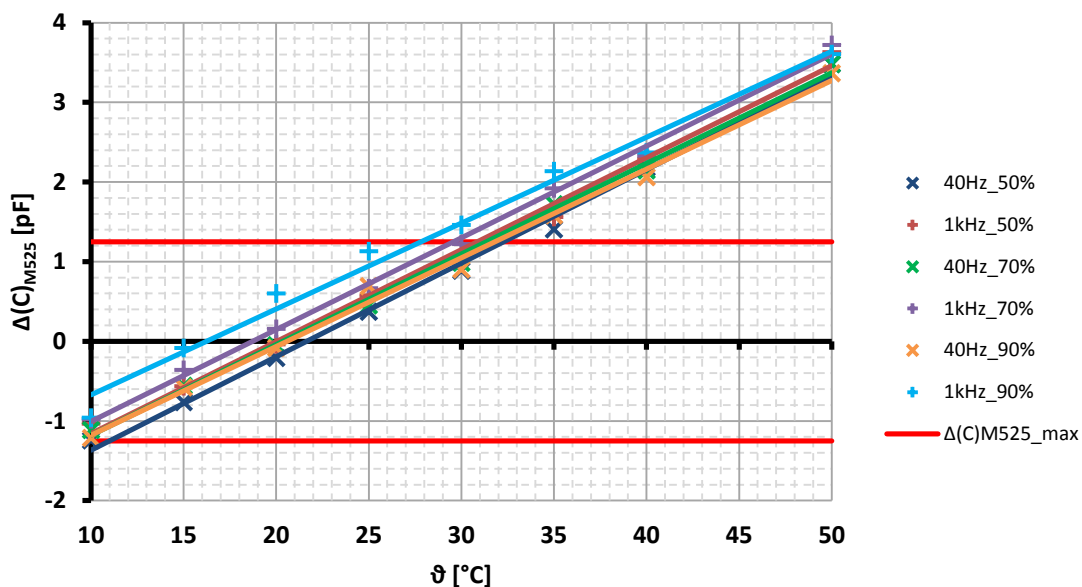
Závislost v grafu 5 má podobný průběh jako v grafu 4. Rozdílem je menší teplotní interval pro nastavené vlhkosti i obě frekvence. Velikost intervalu se pohybuje okolo  $25\text{ °C}$  tedy  $\pm 12\text{ °C}$ .



Graf 5: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje dekády, měření kapacity  $C = 30\text{ nF}$  dekády M525, etalon WK6440B

Malou vlhkostní a frekvenční závislost lze pozorovat u nastavené hodnoty kapacity  $C = 0,5\text{ }\mu\text{F}$  v grafu 6. Teplotní závislost je patrná. S vyšší hodnotou kapacity dekády se opět zmenšil interval teplot splňující přesnost  $\delta_{M525} = 0,25\text{ \%}$ . Při teplotách nad  $30\text{ °C}$  již absolutní chyba údaje kapacity  $\Delta(C)_{M525}$  překračuje maximální povolenou absolutní chybu  $\Delta(C)_{M525\_max}$ .

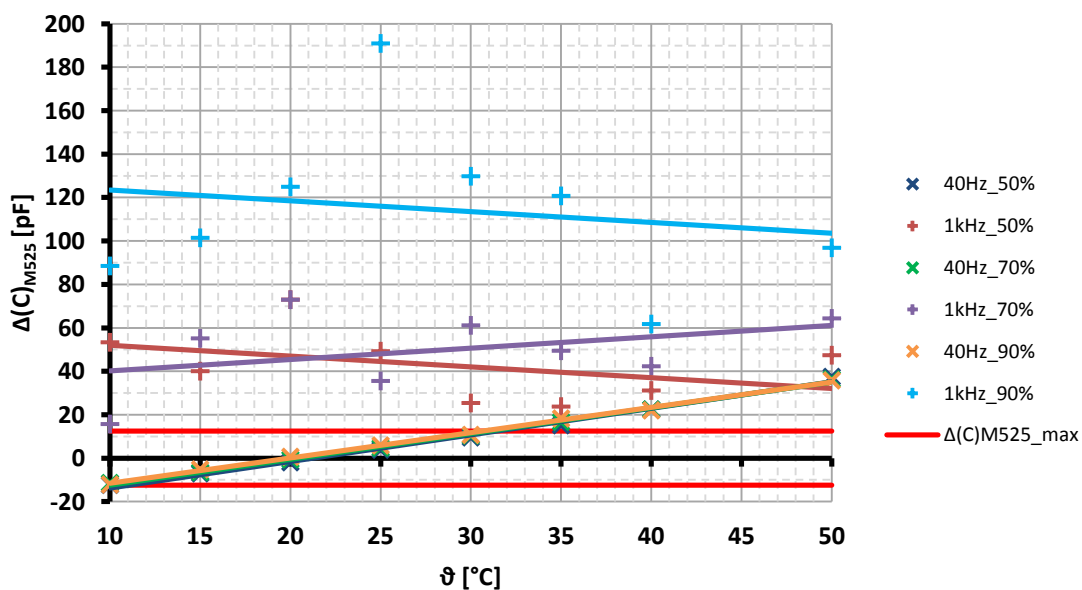
**Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity pro  $C = 0,5 \mu\text{F}$**



**Graf 6: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje dekády, měření kapacity  $C = 0,5 \mu\text{F}$  dekády M525, etalon WK6440B**

Z grafu 7 pro kapacitu  $C = 5 \mu\text{F}$  je patrná velká frekvenční závislost. Hodnoty změřené při frekvenci 40 Hz jsou téměř vlhkostně nezávislé.

**Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity pro  $C = 5 \mu\text{F}$**

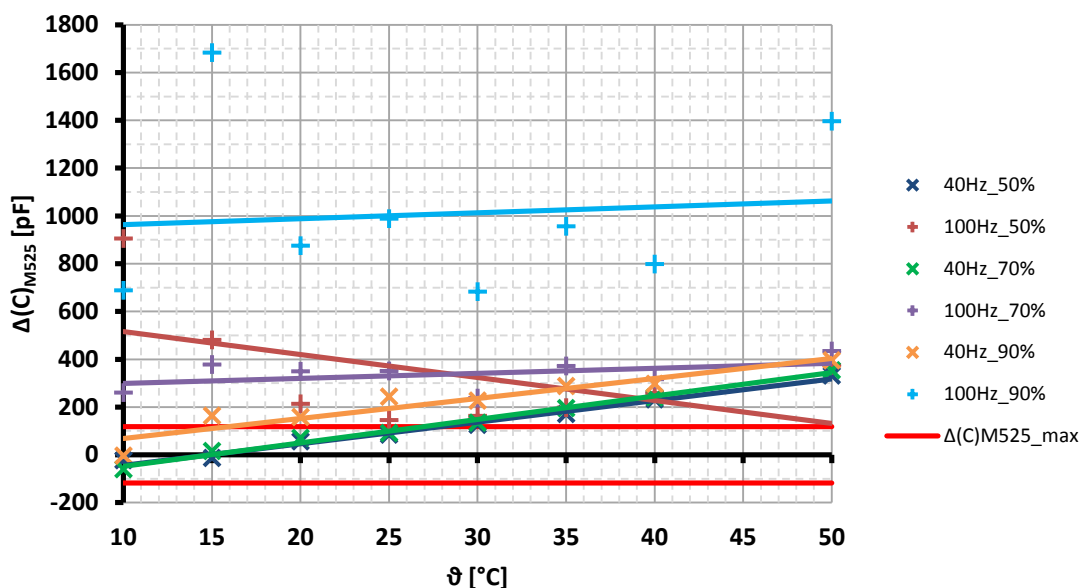


**Graf 7: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje dekády, měření kapacity  $C = 5 \mu\text{F}$  dekády M525, etalon WK6440B**

Rozsah teplot splňující přesnost  $\delta_{M525} = 0,25 \%$  je  $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  stejně jako u předchozí hodnoty kapacity  $C = 0,5 \text{ }\mu\text{F}$ . Při měření na frekvenci  $1 \text{ kHz}$  došlo k velkým rozdílům měřených hodnot. Žádná z naměřených hodnot kapacity při frekvenci  $1 \text{ kHz}$  nesplnila přesnost  $\delta_{M525} = 0,25 \%$  uvedenou v manuálu.

Pro nejvyšší hodnoty kapacity je výrobcem snížen frekvenční rozsah od  $40$  do  $100 \text{ Hz}$ . Z grafu 8 pro kapacitu  $C = 47 \text{ }\mu\text{F}$  lze vyzorovat, že ani toto snížení nebylo dostatečné, protože i při frekvenci  $100 \text{ Hz}$  nesplňují hodnoty kapacity přesnost  $\delta_{M525} = 0,25 \%$  uvedenou v manuálu *kapacitní dekády M525*. Negativní vliv má  $90\%$  vlhkost, při které je absolutní chyba údaje také větší.

**Teplotní, vlhkoštní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity pro  $C = 47 \text{ }\mu\text{F}$**



**Graf 8: Teplotní, vlhkoštní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje dekády, měření kapacity  $C = 47 \text{ }\mu\text{F}$  dekády M525, etalon WK6440B**

Uvedené grafy přiblížily teplotní, vlhkoštní a frekvenční závislost hodnoty *kapacitní dekády M525*. Při nastavení malých hodnot kapacity s rostoucí teplotou hodnota absolutní chyby údaje klesá, tedy kapacita dekády roste. K tomuto růstu hodnoty kapacity s teplotou dochází pouze do jednotek nF. Při ostatních nastavených vyšších kapacitách hodnota kapacity s rostoucí teplotou klesá.

## 8.2 Specifikace

Specifikace je procentuální vyjádření čerpání absolutní chyby údaje kapacity *dekády* M525  $\Delta(C)_{M525}$  z maximální povolené absolutní chyby údaje kapacity *dekády* M525  $\Delta(C)_{M525\_max}$ , viz vzorec (28).

$$specifikace = \frac{\Delta(C)_{M525}}{\Delta(C)_{M525\_max}} \cdot 100 \quad (28)$$

Mezní povolená absolutní chyba  $\Delta(C)_{M525\_max}$  je počítána pomocí programu Caliber, kde jsem uvažoval z důvodu širokého teplotního a vlhkostního rozsahu její 10x větší hodnotu, viz kapitola 6.3. Z toho plyne, že hodnoty specifikace v měřicích protokolech i grafech jsou 10x menší, než by měly být se skutečnou přesností  $\delta_{M525} = 0,25$  %. Grafy závislosti specifikace na hodnotě kapacity *dekády* M525 jsou uvedeny v příloze G.

Z grafů je patrné, že zejména kolem hodnoty 1 nF dochází k poměrně velké závislosti na vlhkosti. To je s největší pravděpodobností způsobeno krátkou vzdáleností mezi nožičkami kondenzátorů a přívodních cest, což vlivem vlhkosti způsobuje snížení paralelního odporu kondenzátorů. Při vysoké vlhkosti v *kapacitní dekádě* M525 může dojít i k orosení součástek a spolu se slabou hermetizací opět ovlivnit výstupní kapacitu. Dále se již vliv vlhkosti příliš neprojevuje, pouze při nejvyšších nastavitelných hodnotách kapacity může působení vlhkosti napomáhat stavu, kdy specifikace prudce roste. Pro nejvyšší nastavitelné kapacity byly výsledky měření dosti rozdílné. Z důvodu pouze dvou opakování měření se obtížně stanovovaly věrohodné hodnoty, přesto je z grafů patrné, že hodnoty kapacity jsou více než jiné kapacity ovlivněny všemi vlivy (frekvenční, teplotní a vlhkostní).

Překvapivé jsou velké specifikace při frekvenci  $f = 1$  kHz rostoucí od kapacity  $C = 1$   $\mu$ F do kapacity  $C = 10$   $\mu$ F. Protože se tyto špičky při měření na frekvenci  $f = 40$  Hz neprojevují, ukazuje to velkou frekvenční závislost znásobovanou různými klimatickými podmínkami. Ze schématu zapojení kondenzátorů v *dekádě* M525 od výrobce bylo zjištěno, že v tomto rozmezí kapacit spínají kondenzátory WIMA MPK4 s kapacitou  $C = 2,2$   $\mu$ F a vyšší kapacitní tolerancí  $\pm 10$  %. V *kapacitní dekádě* M525 je umístěn tento kondenzátor jeden v samostatné větvi a poté vždy po dvou ve větvi sériové a paralelní.

## 9 ZÁVĚR

První část bakalářské práce nás seznamuje s přesnými kondenzátory a jejich vlastnostmi, zvláště se zaměřením na teplotní a vlhkostní závislost kapacity. V kapitole 2 je uvedeno rozdělení a popis přesných kondenzátorů umístěných v *kapacitní dekádě M525*. Nejstabilnějšími kondenzátory jsou keramické kondenzátory *třídy I*. Nevýhodou kondenzátorů *třídy I* je, že se vyrábí pouze pro menší kapacity, takže pro větší kapacity byly použity fóliové metalizované polypropylenové kondenzátory značené *MKP*.

Kapitola 3 představuje námi kontrolovanou *kapacitní dekádu M525*, charakterizuje její možnosti a vhodné využití. Dále seznamuje s funkcemi *kapacitní dekády M525* a informuje o technických parametrech přístroje.

Kapitola 4 popisuje program *Caliber* od firmy MEATEST. U tohoto programu byly popsány základní principy a jeho rozdělení do 4 modulů. Cílem bylo zaměřit se zejména na popis modulu *Procedura*, jehož součástí je vytvoření měřicí procedury.

Kapitola 5 se zaměřuje na možné metody měření kapacity, z nichž je vybrán jeden způsob měření. Na základě přesnosti, jednoduchosti a univerzálnosti byla zvolena přímá metoda měření pomocí RLC metru. Dále jsou v kapitole 5 vypočítány nejistoty měření třech různých etalonových RLC metrů. Na základě vypočítaných nejistot byl vybrán nejvhodnějším a zároveň nejpresnějším měřicím přístrojem RLC metr *Wayne Kerr 6440B*, se kterým proběhlo testování *kapacitní dekády M525*. Porovnání rozšířených nejistot  $U(C)$  všech tří ověřovaných etalonových měřicích přístrojů je uvedeno v tabulce 7.

V kapitole 6 je vysvětleno vytvoření *procedury M525* pro měření kapacity *dekády M525* za pomoci RLC metru *Wayne Kerr 6440B*. Při tvorbě *procedury M525* bylo zjištěno, že je potřeba vytvořit virtuální převodník funkcí, protože karta přístroje *kapacitní dekády M525* neobsahuje funkci nastavení kapacity s parametrem frekvence potřebným na straně RLC metru *Wayne Kerr 6440B*. Na konci kapitoly 6 jsou uvedeny vybrané testovací hodnoty *kapacitní dekády M525*.

Na začátku kapitoly 7 je představena klimatická komora její funkce, typické vlastnosti, použití a technické údaje. Dále kapitola 7 uvádí průběh měření, kde popisuje zapojení spolu s blokovým schématem zapojení, dále průběh samotného měření a zpracování změřených dat.

Kapitola 8 rozebírá výsledky měření na základě zpracovaných teplotních, vlhkostních a frekvenčních závislostí kapacity zakreslených v grafech.

*Kapacitní dekáda M525* byla vystavena klimatickému působení, které ovlivnilo některé hodnoty kapacity dekády. Nejnižší hodnoty kapacity do okolí  $C = 4$  nF nejvíce ovlivňovala vlhkost. Tyto kondenzátory mají podle jejich výrobců velmi dobrou klimatickou a frekvenční stabilitu, což se u frekvence a teploty potvrdilo. Bohužel jsou však malých rozměrů a vlhkost působící na blízké nožičky kondenzátorů a přívodních cest způsobila snížení paralelního odporu, a tím zhoršení hodnoty kapacity. V tomto případě by mohlo dojít ke zlepšení změnou rozložení desky plošných spojů s důrazem

na vzdálenější vedení cest a použitím rozměrově větší pouzdra kondenzátorů se vzdálenějšími nožičkami. Další kapacity až do hodnoty  $C = 1 \mu\text{F}$  mají lehkou teplotní závislost, která se udržela v mezích udávaných výrobcí. Frekvenční a vlhkostní závislost nebyla na těchto kondenzátorech pozorována. Silná frekvenční závislost byla odhalena u kondenzátorů WIMA MPK4 s kapacitou  $C = 2,2 \mu\text{F}$  s vyšší kapacitní tolerancí  $\pm 10 \%$ . Tyto kondenzátory zásadně ovlivnili měření kapacity a bylo by vhodné je nahradit kondenzátory s nižší kapacitní tolerancí  $\pm 5 \%$ . Nejvyšší hodnoty kapacity *dekády M525* byly obtížně zhodnotitelné, z důvodu nejednoznačnosti výsledků dvou uskutečněných měření, která se v mnoha případech výrazně lišila. Celkově usuzuji na základě grafů, že docházelo k největšímu vlivu klimatických i frekvenčních podmínek.

Pro ověření a bližší rozbor by bylo zapotřebí provést více opakovaných měření zejména pro vyšší kapacity.

# Literatura

- [1] OTT, Henry W. Electromagnetic compatibility engineering. 1. vydání. Hoboken: Wiley, 2009, 843 s. ISBN 978-0-470-18930-6.
- [2] Produkty: Fóliové kondenzátory - základní informace. Elektronické součástky CZ [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: [http://www.es-ostrava.cz/index.php?page=prod\\_15&lang=cz](http://www.es-ostrava.cz/index.php?page=prod_15&lang=cz).
- [3] *Ceramic Leaded Capacitors: User's Manual* [online]. Greenville (S.C.), 7/2009 [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: <http://www.kemet.com>.
- [4] *MKP Metalizované polypropylenové kondenzátory: Uživatelská příručka* [online]. Ostrava - Vítkovice, [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.es-ostrava.cz>.
- [5] VYORAL, K., *Spolehlivost a provozní vlastnosti kondenzátorů: Uživatelská příručka* [online]. Ostrava, 1.9/2005 [cit. 2014-04-19]. Dostupné z: <http://www.es-ostrava.cz>.
- [6] *M525 Programmable Capacitance Box: Operation manual* [online]. Ver. 10 [cit. 2014-03-29]. Dostupné z: <http://www.meatest.cz>.
- [7] SITTA, M. Interview. Meatest. Železná 509/3, Brno. 10.4.2014.
- [8] CALIBER: *Uživatelská příručka* [online]. Ver. 21 [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://www.meatest.cz>.
- [9] BEJČEK, L., ČEJKA, M., REZ, J., E. GESCHIEDTOVÁ a M. STEINBAUER. *Měření v elektrotechnice*. VUT Brno: 2002, 241 s.
- [10] PALEČÁR, R., F. VDOLEČEK a M. HALAJ: Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. *Automa* [online]. 2001, 10, s. 52-56 [cit. 2014-03-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz>.
- [11] *Precision component analyzer 6430B / 6440B: Product specification* [online]. 2006 [cit. 2014-03-17]. Dostupné z: <http://www.waynekerrtest.com>.
- [12] *Agilent E4980A Precision LCR Meter: User's Guide* [online]. Ver. 10, 5/2013 [cit. 2014-03-17]. Dostupné z: <http://www.home.agilent.com>.
- [13] *LCR Meter Chroma 11021/11021L: User's Manual* [online]. Ver. 1.0, 11/2009 [cit. 2014-03-17]. Dostupné z: <http://www.chromaate.com>.
- [14] CLIMACELL: *Chladicí inkubátor s řízenou vlhkostí: Technický list* [online]. 2007 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.bmt.cz>.

## Seznam symbolů

$A$	přesnost odečtená z grafu vyjadřujícího chybu měření kapacity RLC metru Wayne Kerr 6440B v závislosti na hodnotě kapacity a frekvenci, viz příloha C
$Ab_{Agil}$	základní přesnost RLC metru Agilent 4980A
$C$	vlastní kapacita kondenzátoru
$C_{max}$	největší nastavitelná hodnota kapacity dekády M525 (100 $\mu$ F)
$C_{min}$	nejmenší nastavitelná hodnota kapacity dekády M525 (100 pF)
$C_n$	nominální hodnota kapacity dekády M525
$C_{n1} - C_{n35}$	nominální hodnoty etalonových kondenzátorů kapacitní dekády M525
$C_{stř}$	střední nastavitelná hodnota kapacity dekády M525 (100 nF)
$C_{UUT}$	kapacita udávána <i>kapacitní dekádou M525</i>
$C_{WK}$	kapacita změřená etalonovým měřicím RLC metrem Wayne Kerr 6440B
$ESL$	ekvivalentní sériová indukčnost reálného kondenzátoru
$ESR$	ekvivalentní sériový odpor reálného kondenzátoru
$f$	frekvence měřicího signálu
$f_{M525}$	frekvenční rozsah kapacitní dekády M525
$k_r$	koeficient rozšíření
$Kt$	teplotní koeficient RLC metru Agilent 4980A
$L_s$	sériová indukčnost reálného kondenzátoru
$MKP$	polypropylenový fóliový kondenzátor
$R_p$	paralelní (svodový) odpor reálného kondenzátoru
$R_s$	Sériový odpor reálného kondenzátoru
$RH$	relativní vlhkost
$tg \delta$	ztrátový činitel reálného kondenzátoru
$t_{CH}$	doba chlazení
$t_O$	doba ohřevu
$t_R$	reakční doba kapacitní dekády M525
$U$	standardní rozšířená nejistota
$U(C_{max})$	standardní rozšířená nejistota pro největší nastavitelnou kapacitu $C_{max}$ dekády M525

$U(C_{min})$	standardní rozšířená nejistota pro nejmenší nastavitelnou kapacitu $C_{min}$ dekády M525
$U(C_{stř})$	standardní rozšířená nejistota pro střední nastavitelnou kapacitu $C_{stř}$ dekády M525
$U(C_{max})_{Agil}$	standardní rozšířená nejistota RLC metru Agilent 4980A pro největší nastavitelnou kapacitu $C_{max}$ dekády M525
$U(C_{max})_{Chr}$	standardní rozšířená nejistota RLC metru Chroma 11021 pro největší nastavitelnou kapacitu $C_{max}$ dekády M525
$U(C_{max})_{WK}$	standardní rozšířená nejistota RLC metru Wayne Kerr 6440B pro největší nastavitelnou kapacitu $C_{max}$ dekády M525
$U(C_{min})_{Agil}$	standardní rozšířená nejistota RLC metru Agilent 4980A pro nejmenší nastavitelnou kapacitu $C_{min}$ dekády M525
$U(C_{min})_{Chr}$	standardní rozšířená nejistota RLC metru Chroma 11021 pro nejmenší nastavitelnou kapacitu $C_{min}$ dekády M525
$U(C_{min})_{WK}$	standardní rozšířená nejistota RLC metru Wayne Kerr 6440B pro nejmenší nastavitelnou kapacitu $C_{min}$ dekády M525
$U(C_{stř})_{Agil}$	standardní rozšířená nejistota RLC metru Agilent 4980A pro střední nastavitelnou kapacitu $C_{stř}$ dekády M525
$U(C_{stř})_{Chr}$	standardní rozšířená nejistota RLC metru Chroma 11021 pro střední nastavitelnou kapacitu $C_{stř}$ dekády M525
$U(C_{stř})_{WK}$	standardní rozšířená nejistota RLC metru Wayne Kerr 6440B pro střední nastavitelnou kapacitu $C_{stř}$ dekády M525
$u_A$	standardní nejistota typu A
$u_B$	standardní nejistota typu B
$u_B(C_{min})_{Chr}$	standardní nejistota typu B RLC metru Chroma 11021 pro nejmenší nastavitelnou kapacitu $C_{min}$ dekády M525
$u_B(C_{min})_{WK}$	standardní nejistota typu B RLC metru Wayne Kerr 6440B pro nejmenší nastavitelnou kapacitu $C_{min}$ dekády M525
$u_B(C_{stř})_{Agil}$	standardní nejistota typu B RLC metru Agilent 4980A pro střední nastavitelnou kapacitu $C_{stř}$ dekády M525
$u_B(Z)$	standardní nejistota typu B zdroje Z
$u_C$	standardní kombinovaná nejistota
$u_C(C_{min})_{Chr}$	standardní kombinovaná nejistota RLC metru Chroma 11021 pro nejmenší nastavitelnou kapacitu $C_{min}$ dekády M525

$u_C(C_{min})_{WK}$	standardní kombinovaná nejistota RLC metru Wayne Kerr 6440B pro nejmenší nastavitelnou kapacitu $C_{min}$ dekády M525
$u_C(C_{stř})_{Agil}$	standardní kombinovaná nejistota RLC metru Agilent 4980A pro střední nastavitelnou kapacitu $C_{stř}$ dekády M525
$U_R$	provozní napětí kondenzátoru
$V_S$	velikost měřicího signálu
$X_M$	měřená hodnota
$X_R$	měřicí rozsah přístroje
$Y_{OAgil}$	admitance pro open offset RLC metru Agilent 4980A
$Z$	impedance
$Z_{mAgil}$	impedance měřené kapacitní dekády M525
$Z_{SAgil}$	impedance pro short offset RLC metru Agilent 4980A
$\alpha$	teplotní koeficient kapacitní dekády M525
$\delta(C_{max})_{Agil}$	relativní chyba údaje kapacity RLC metru Agilent 4980A pro největší nastavitelnou kapacitu $C_{max}$ dekády M525
$\delta(C_{max})_{Chr}$	relativní chyba údaje kapacity RLC metru Chroma 11021 pro největší nastavitelnou kapacitu $C_{max}$ dekády M525
$\delta(C_{max})_{WK}$	relativní chyba údaje kapacity RLC metru Wayne Kerr 6440B pro největší nastavitelnou kapacitu $C_{max}$ dekády M525
$\delta(C_{min})_{Agil}$	relativní chyba údaje kapacity RLC metru Agilent 4980A pro nejmenší nastavitelnou kapacitu $C_{min}$ dekády M525
$\delta(C_{min})_{Chr}$	relativní chyba údaje kapacity RLC metru Chroma 11021 pro nejmenší nastavitelnou kapacitu $C_{min}$ dekády M525
$\delta(C_{min})_{WK}$	relativní chyba údaje kapacity RLC metru Wayne Kerr 6440B pro nejmenší nastavitelnou kapacitu $C_{min}$ dekády M525
$\delta(C_{stř})_{Agil}$	relativní chyba údaje kapacity RLC metru Agilent 4980A pro střední nastavitelnou kapacitu $C_{stř}$ dekády M525
$\delta(C_{stř})_{Chr}$	relativní chyba údaje kapacity RLC metru Chroma 11021 pro střední nastavitelnou kapacitu $C_{stř}$ dekády M525
$\delta(C_{stř})_{WK}$	relativní chyba údaje kapacity RLC metru Wayne Kerr 6440B pro střední nastavitelnou kapacitu $C_{stř}$ dekády M525
$\delta_M$	relativní chyba z měřené hodnoty
$\delta_{M525}$	základní přesnost kapacitní dekády M525 udávaná výrobcem MEATEST
$\delta_R$	relativní chyba z rozsahu přístroje

$\Delta(C)_{M525}$	absolutní chyba údaje kapacity <i>dekády M525</i>
$\Delta(C)_{M525\_max}$	maximální povolená absolutní chyba údaje kapacity <i>dekády M525</i>
$\Delta(C)_{WK\_I}$	absolutní chyba údaje kapacity RLC metru Wayne Kerr 6440B pro malé kapacity na základě tabulkové hodnoty z dokumentace odvozené interpolací grafu, viz příloha C
$\Delta(C)_{WK\_L}$	absolutní chyba údaje kapacity RLC metru Wayne Kerr 6440B pro malé kapacity na základě tabulkové hodnoty z dokumentace pro úroveň měřicího signálu $V_s$ , viz příloha C
$\Delta(C)_{WK\_T}$	celková absolutní chyba údaje kapacity RLC metru Wayne Kerr 6440B
$\Delta_{max}$	absolutní chyba údaje číslicového měřicího přístroje
$\Delta_{max}(C_{min})_{WK}$	absolutní chyba údaje kapacity RLC metru Wayne Kerr 6440B pro nejmenší nastavitelnou kapacitu $C_{min}$ dekády M525
$\Delta_{max}(C_{stř})_{Agil}$	absolutní chyba údaje kapacity RLC metru Agilent 4980A pro střední nastavitelnou kapacitu $C_{stř}$ dekády M525
$\Delta_{max}(C_{min})_{Chr}$	absolutní chyba údaje kapacity RLC metru Chroma 11021 pro nejmenší nastavitelnou kapacitu $C_{min}$ dekády M525
$\vartheta$	teplota
$\vartheta_P$	pracovní rozsah teplot kapacitní dekády M525
$\vartheta_R$	referenční rozsah teplot kapacitní dekády M525
$\chi$	koeficient typu rozložení
$\%DF$	procentuální změna ztrátového činitele kondenzátoru
$\%\Delta C$	procentuální změna kapacity kondenzátoru

## Seznam příloh

- Příloha A: Značení a charakteristiky keramických kondenzátorů - firma KEMET
- Příloha B: Tabulka kalibračních bodů kapacitní dekády M525
- Příloha C: Chyby měření kapacity - Wayne Kerr 6440B
- Příloha D: Chyby měření kapacity - Agilent 4980A
- Příloha E: Chyby měření kapacity - Chroma 11021
- Příloha F: Tabulky teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity
- Příloha G: Závislosti specifikace na hodnotě kapacity dekády M525
- Příloha H: Elektronická příloha CD - elektronická verze práce, protokoly měření vygenerované programem Caliber, měřicí procedura M525 programu Caliber spolu s převodníkem a kartami přístrojů

# Příloha A: Značení a charakteristiky keramických kondenzátorů - firma KEMET [3]



## APPLICATION NOTES FOR MULTILAYER CERAMIC CAPACITORS

**TABLE 1**  
EIA TEMPERATURE CHARACTERISTIC CODES  
FOR CLASS I DIELECTRICS

Significant Figure of Temperature Coefficient		Multiplier Applied to Temperature Coefficient		Tolerance of Temperature Coefficient *	
PPM per Degree C	Letter Symbol	Multi-plier	Number Symbol	PPM per Degree C	Letter Symbol
0.0	C	-1	0	±30	G
0.3	B	-10	1	±60	H
0.9	A	-100	2	±120	J
1.0	M	-1000	3	±250	K
1.5	P	-100000	4	±500	L
2.2	R	+1	5	±1000	M
3.3	S	+10	6	±2500	N
4.7	T	+100	7		
7.5	U	+1000	8		
		+10000	9		

\* These symmetrical tolerances apply to a two-point measurement of temperature coefficient: one at 25°C and one at 85°C. Some deviation is permitted at lower temperatures. For example, the PPM tolerance for C0G at -55°C is +30 / -72 PPM.

**TABLE 2**  
EIA TEMPERATURE CHARACTERISTIC CODES  
FOR CLASS II & III DIELECTRICS

Low Temperature Rating		High Temperature Rating		Maximum Capacitance Shift	
Degree Celcius	Letter Symbol	Degree Celcius	Number Symbol	Percent	Letter Symbol
+10C	Z	+45C	2	±1.0%	A
-30C	Y	+65C	4	±1.5%	B
-55C	X	+85C	5	±2.2%	C
		+105C	6	±3.3%	D
		+125C	7	±4.7%	E
		+150C	8	±7.5%	F
		+200C	9	±10.0%	P
				±15.0%	R
				±22.0%	S
				+22/-33%	T
				+22/-56%	U
				+22/-82%	V

**EFFECT OF TEMPERATURE**

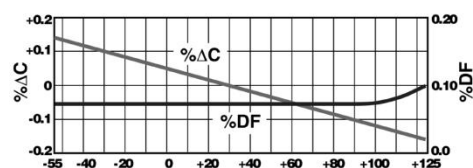


Figure 3. Temperature °C  
Capacitance & DF vs Temperature - C0G

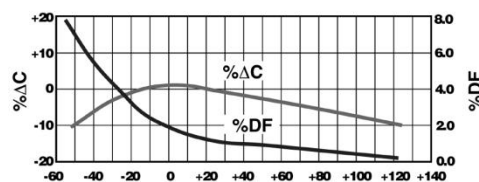


Figure 4. Temperature °C  
Capacitance & DF vs Temperature - X7R

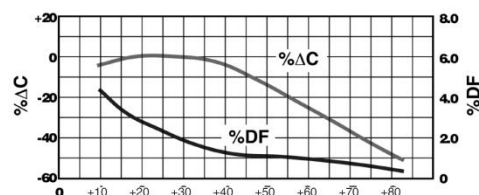


Figure 5. Temperature °C  
Capacitance & DF vs Temperature - Z5U

## Příloha B: Tabulka kalibračních bodů kapacitní dekády M525 [6]

*Calibration points M525*

Standard	Nominal value	Requested Accuracy
C1	0,5 pF	0,2 pF
C2	1.0 pF	0,2 pF
C3	2,2 pF	0,2 pF
C4	5,0 pF	0,2 pF
C5	10,0 pF	0,2 pF
C6	20,0 pF	0,2 pF
C7	23,5 pF	0,2 pF
C8	47,0 pF	0,2 pF
C9	94,0 pF	0,5 pF
C10	110 pF	0,5 pF
C11	220 pF	1,0 pF
C12	440 pF	1,0 pF
C13	500 pF	1,0 pF
C14	870 pF	1,0 pF
C15	2,00 nF	1,0 pF
C16	2,35 nF	1,2 pF
C17	4,70 nF	2,4 pF
C18	9,40 nF	4,7 pF

C19	11,0 nF	5,5 pF
C20	22,0 nF	11 pF
C21	44,0 nF	22 pF
C22	50,0 nF	25 pF
C23	100 nF	50 pF
C24	200 nF	0,10 nF
C25	235 nF	0,12 nF
C26	470 nF	0,24 nF
C27	940 nF	0,47 nF
C28	1,10 uF	0,55 nF
C29	2,20 uF	1,1 nF
C30	4,40 uF	2,2 nF
C31	4,40 uF	2,2 nF
C32	10,0 uF*	5,0 nF*
C33	20,0 uF*	10 nF*
C34	20,0 uF*	10 nF*
C35	50,0 uF*	25 nF*

**Table 1 M525 Calibration points**

Note:

Nominal values in the table are informative.

Measuring frequency 1 kHz

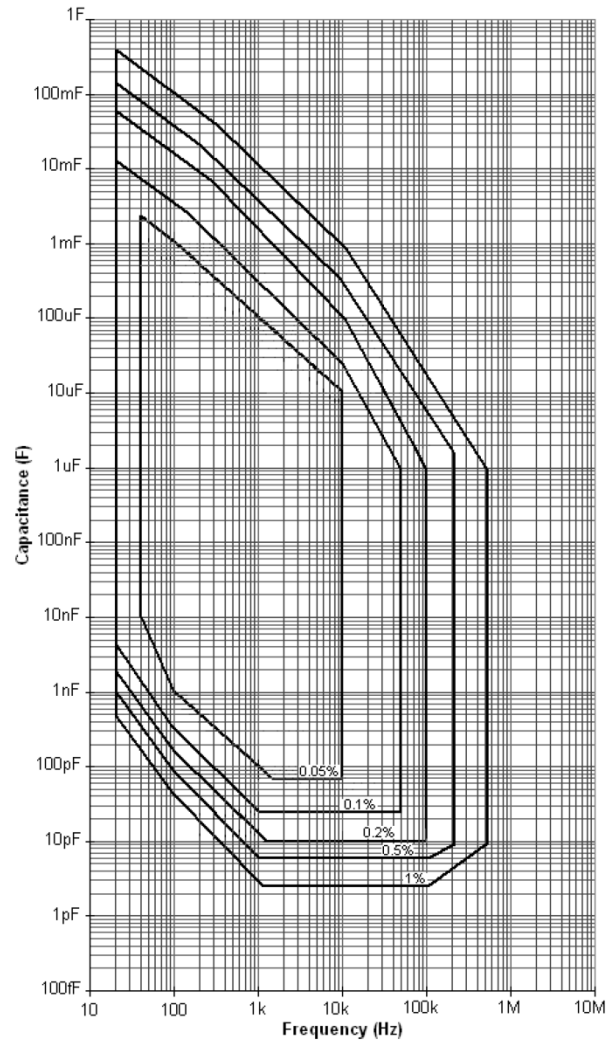
\* Measuring frequency 100 Hz

# Příloha C: Chyby měření kapacity - Wayne Kerr 6440B

## [11]



### 1.9.2 C Accuracy



#### Conditions

AC Drive Level: 1V/20mA  
 Slow Speed, 4-Terminal Mode.  
 Analyzer trimmed at measurement frequency.  
 $D \leq 0.1$   
 Temperature range  $25 \pm 10^\circ\text{C}$ .

**Except** on the highest and lowest hardware measurement ranges, the adjacent iso-accuracy chart also applies to Medium measurement speed.

For Fast speed, on all ranges, the Medium speed figures must be doubled. Supply frequency rejection is also reduced causing additional unquantifiable errors dependent on lead layout, particularly at frequencies below 600Hz and at lower AC drive levels.

O/C and S/C trim corrections under various conditions of interpolation, speed and level are given in the table following these iso-accuracy charts.

For impure components, and for measurements of the highest and lowest available ranges, full accuracy expressions, shown below, apply.

If  $D > 0.1$ , multiply C accuracy by  $(1+D)$ .

#### High capacitance values

$$\text{Accuracy} = \pm (A + 100 X_T \cdot \omega C_X) \%$$

#### Low capacitance values

$$\text{Accuracy} = \pm (A + 100 C_T / C_X) \%$$

where

A = accuracy from adjacent chart  
 $C_X$  = measured value of unknown component.

$X_T$  = sum of  $Z_i, Z_L$  (as appropriate, from section 1.10.2)

$C_T$  = sum of  $C_i, C_L$  (as appropriate, from section 1.10.1)

$$\omega = 2\pi \cdot \text{frequency}$$



## 1.10 Additional Corrections

The following tables give the additional corrections which need to be applied to measurements when some or all the measurement conditions specified in the Iso\_Accuracy charts are not used.

### 1.10.1 Open Circuit Trim Correction

f = frequency in kHz

Frequency range (Hz)	Interpolation		Level 1.02 - 10V	
	Y <sub>I</sub> (nS)	C <sub>I</sub> (pF)	Y <sub>L</sub> (nS)	C <sub>L</sub> (pF)
20-250	1	0.15 / f	1	0.015 / f
300-10k	0.2	0.03 / f	0.2	0.03 / f
12k-100k	0.12 x f	0.02	0.12 x f	0.02
120k - 300k	0.31 x f	0.05	0.31 x f	0.05
302k-500k <sup>(1)</sup>	0.31 x f	0.05	0.31 x f	0.05

f = frequency in kHz, V= drive level in V

Frequency range (Hz)	Level 0.1 - 0.98V		Level < 0.1V	
	Y <sub>L</sub> (nS)	C <sub>L</sub> (pF)	Y <sub>L</sub> (nS)	C <sub>L</sub> (pF)
20-250	0.4 / V	0.06 / (f x V)	0.4 / V	0.06 / (f x V)
300-10k	0.1 / V	0.015 / (f x V)	0.1 / V	0.015 / (f x V)
12k-100k	0.12 x f	0.02	0.012 x f / V	0.002 / V
120k - 300k	0.31 x f	0.05	0.031 x f / V	0.005 / V
302k-500k <sup>(1)</sup>	0.31 x f	0.05	0.031 x f / V	0.005 / V

### 1.10.2 Short Circuit Trim Correction

f = frequency in kHz

Frequency range (Hz)	Interpolation		Level 2 - 200mA		
	Z <sub>I</sub> (μΩ)	L <sub>I</sub> (nH)	Z <sub>L</sub> (μΩ)	L <sub>L</sub> (nH)	
20	1500	240 / f	1500	240 / f	For drive levels below 2mA multiply level corrections in previous column by 2 / (level in mA).
25-80	1000	160 / f	1000	160 / f	
100	500	80 / f	500	80 / f	
120-10k	250	40 / f	250	40 / f	
12k-300k	18 x f	3	18 x f	3	
302k-500k <sup>(1)</sup>	18 x f	3	18 x f	3	

(1) Level restricted to 5V/100mA

# Příloha D: Chyby měření kapacity - Agilent 4980A [12]

## Relative accuracy

Relative accuracy includes stability, temperature coefficient, linearity, repeatability, and calibration interpolation error. Relative accuracy is specified when all of the following conditions are satisfied.

- o Warm-up time: 30 minutes
- o Test cable length: 0 m, 1 m, 2 m, or 4 m (Agilent 16047A/D/E)
- o A “Signal source overload” warning does not appear.  
When the test signal current exceeds a value in the following table, a “Signal source overload” warning appears.

**Table 11-6 Test Signal Voltage**

Test signal voltage	Test Frequency	Condition <sup>*1</sup>
≤ 2 Vrms	-	-
> 2 Vrms	≤ 1 MHz	the smaller value of either 110 mA or 130 mA - 0.0015 × Vac × (Fm / 1 MHz) × (L_cable + 0.5)
	> 1 MHz	70 mA - 0.0015 × Vac × (Fm / 1 MHz) × (L_cable + 0.5)

\*1. When the calculation result is a negative value, 0 A is applied.

Vac [V]                      Test signal voltage  
Fm [Hz]                     Test frequency  
L\_cable [m]                Cable length

- o OPEN and SHORT corrections have been performed.
- o Bias current isolation: Off  
The DC bias current does not exceed a set value within each range of the DC bias current.  
(For accuracy with bias current isolation, refer to “Supplemental Information” on page 438.)
- o The optimum impedance range is selected by matching the impedance of DUT to the effective measuring range.

**|Z|, |Y|, L, C, R, X, G, and B accuracy (L, C, X, and B accuracies apply when  $D_x \leq 0.1$ , R and G accuracies apply when  $Q_x \leq 0.1$ )**

Relative accuracy  $A_e$  is given as

**Equation 11-9** 
$$A_e = [Ab + Zs/|Zm| \times 100 + Yo \times |Zm| \times 100] \times Kt$$

Zm                            Impedance of DUT  
Ab                            Basic accuracy  
Zs                            Short offset  
Yo                            Open offset  
Kt                            Temperature coefficient

Specifications and Supplemental Information  
**Basic Specifications**

**Basic accuracy**

Basic accuracy  $A_b$  is given below.

**Table 11-7 Measurement time mode = SHORT**

Test Frequency [Hz]	Test signal voltage				
	5 mVrms to 50 mVrms	50 mVrms to 0.3 Vrms	0.3 Vrms to 1 Vrms	1 Vrms to 10 Vrms	10 Vrms to 20 Vrms
20 to 125	$(0.6\%) \times (50 \text{ mVrms} / V_s)$	0.60%	0.30%	0.30%	0.30%
125 to 1 M	$(0.2\%) \times (50 \text{ mVrms} / V_s)$	0.20%	0.10%	0.15%	0.15%
1 M to 2 M	$(0.4\%) \times (50 \text{ mVrms} / V_s)$	0.40%	0.20%	0.30%	0.30%

**Table 11-8 Measurement time mode = MED, LONG**

Test Frequency [Hz]	Test signal voltage				
	5 mVrms to 30 mVrms	30 mVrms to 0.3 Vrms	0.3 Vrms to 1 Vrms	1 Vrms to 10 Vrms	10 Vrms to 20 Vrms
20 to 100	$(0.25\%) \times (30 \text{ mVrms} / V_s)$	0.25%	0.10%	0.15%	0.15%
100 to 1 M	$(0.1\%) \times (30 \text{ mVrms} / V_s)$	0.10%	0.05%	0.10%	0.15%
1 M to 2 M	$(0.2\%) \times (30 \text{ mVrms} / V_s)$	0.20%	0.10%	0.20%	0.30%

$V_s$  [Vrms] Test signal voltage

**Effect by impedance of DUT**

For impedance of DUT below 30  $\Omega$ , the following value is added.

Test Frequency [Hz]	Impedance of DUT	
	$1.08 \Omega <  Z_x  < 30 \Omega$	$ Z_x  \leq 1.08 \Omega$
20 to 1 M	0.05%	0.10%
1 M to 2 M	0.10%	0.20%

For impedance of DUT over 9.2 kΩ, the following value is added.

Test Frequency [Hz]	Impedance of DUT	
	9.2 kΩ ≤  Zx  < 92 kΩ	92 kΩ ≤  Zx
10 k to 100 k	0%	0.05%
100 k to 1 M	0.05%	0.05%
1 M to 2 M	0.10%	0.10%

**Effect of cable extension**

When the cable is extended, the following element is added for each meter of extension.

$$0.015\% \times (F_m / 1 \text{ MHz})^2 \times (L_{\text{cable}})^2$$

F<sub>m</sub> [Hz]            Test Frequency

L<sub>cable</sub> [m]        Cable length

**Short offset Z<sub>s</sub>**

**Table 11-9            Impedance of DUT > 1.08 Ω**

Test Frequency [Hz]	Measurement time mode	
	SHORT	MED, LONG
20 to 2 M	$2.5 \text{ m}\Omega \times (1 + 0.400 / V_s) \times (1 + \sqrt{(1000 / F_m)})$	$0.6 \text{ m}\Omega \times (1 + 0.400 / V_s) \times (1 + \sqrt{(1000 / F_m)})$

**Table 11-10        Impedance of DUT ≤ 1.08 Ω**

Test Frequency [Hz]	Measurement time mode	
	SHORT	MED, LONG
20 to 2 M	$1 \text{ m}\Omega \times (1 + 1 / V_s) \times (1 + \sqrt{(1000 / F_m)})$	$0.2 \text{ m}\Omega \times (1 + 1 / V_s) \times (1 + \sqrt{(1000 / F_m)})$

V<sub>s</sub> [Vrms]            Test signal voltage

F<sub>m</sub> [Hz]            Test frequency

**Effect of cable extension (Short offset)**

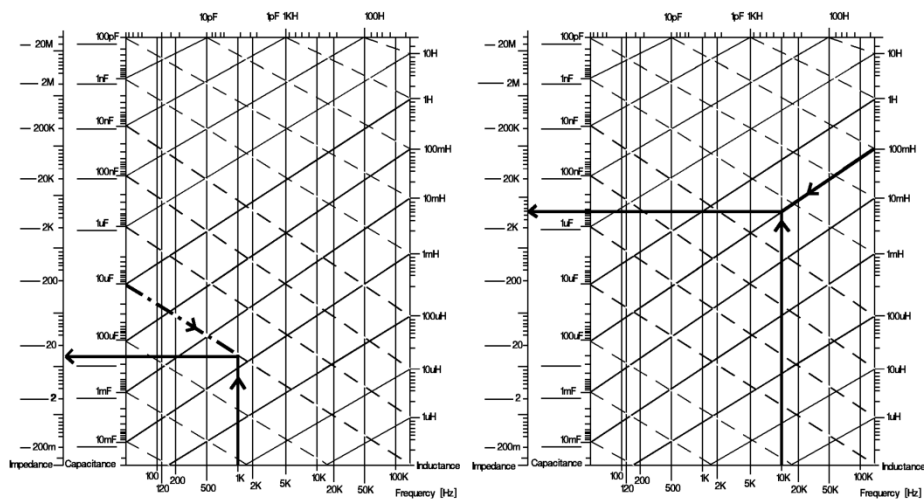
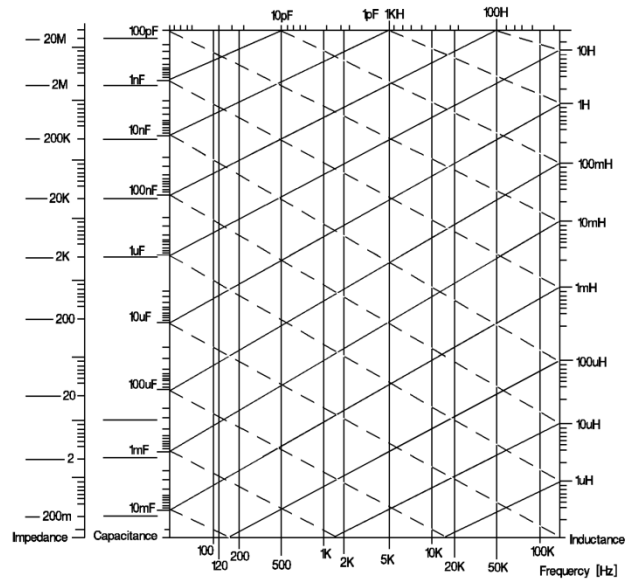
When the cable is extended, the following value is added to Z<sub>s</sub> (independent of the measurement time mode).

Test Frequency [Hz]	Cable length			
	0 m	1 m	2 m	4 m
20 to 1 M	0	0.25 mΩ	0.5 mΩ	1 mΩ

# Příloha E: Chyby měření kapacity - Chroma 11021 [13]

Specification

Figure 2-1 LC - |Z| Conversion Table



(b). C → |Z| Conversion Table

(c). L → |Z| Conversion Table

## 2.3 Accuracy

- Within 1 year of factory calibration
- Temperature: 23°C ± 5°C
- Relative Humidity: <90%RH
- Warm up: At least 30 minutes
- Zero calibrated under the above conditions

### 1. Impedance – Phase Accuracy

Table 2-1 shows the basic accuracy of 11021:

- The accuracy times 2 when is it is measured in high speed.

Impedance Z	10MΩ	2.5% 0.6°	1.0% 0.5°	0.8% 0.4°	
	1MΩ	0.6% 0.4°	0.5% 0.3°	0.4% 0.25°	0.5% 1.5°
	100KΩ	0.4% 0.2°	0.3% 0.15°	0.2% 0.12°	0.3% 0.5°
	10KΩ	0.1% 0.1°			
	100Ω	0.3% 0.15°	0.25% 0.12°	0.2% 0.1°	0.2% 0.12°
	10Ω	0.4% 0.2°	0.3% 0.2°	0.25% 0.15°	0.3% 0.2°
	1Ω	0.5% 0.4°	0.4% 0.4°	0.3% 0.3°	0.4% 0.4°
	0.1Ω				
		100Hz	120Hz	1KHz	10KHz

Frequency  
Table 2-1 |Z|, θ Accuracy

## Příloha F: Tabulky teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity

**Tabulka F-1: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity  $C = 0,7 \text{ nF}$  dekády M525, etalon WK6440B**

$\vartheta$ [°C]	$\Delta(C)_{M525}$ [pF]					
	Vlhkost 50 %		Vlhkost 70 %		Vlhkost 90 %	
	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz
10	-0,09	3,76	-4,36	-0,02	-8,46	-3,82
15	-0,34	2,94	-4,50	-1,02	-8,81	-4,98
20	-0,78	1,93	-4,79	-1,76	-9,67	-5,71
25	-1,21	1,07	-5,04	-2,36	-10,00	-6,38
30	-2,95	-0,85	-5,36	-2,91	-12,06	-7,05
35	-3,60	-1,69	-5,56	-3,49	-11,81	-7,58
40	-4,51	-2,87	-8,57	-6,59	-15,03	-9,91
50	-5,98	-4,38	-10,27	-8,06	-20,06	-12,38

**Tabulka F-2: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity  $C = 2,5 \text{ nF}$  dekády M525, etalon WK6440B**

$\vartheta$ [°C]	$\Delta(C)_{M525}$ [pF]					
	Vlhkost 50 %		Vlhkost 70 %		Vlhkost 90 %	
	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz
10	-2,3	8,5	-15,6	-3,8	-29,4	-16,9
15	-1,7	7,2	-14,6	-5,3	-28,5	-18,6
20	-1,6	5,5	-13,8	-6,2	-28,3	-19,5
25	-1,1	4,7	-13,2	-6,7	-27,5	-19,9
30	-5,2	-0,3	-12,7	-7,1	-29,2	-20,6
35	-6,0	-1,6	-11,9	-7,0	-27,7	-20,4
40	-6,9	-3,1	-20,3	-16,3	-33,3	-26,0
50	-8,0	-4,5	-21,4	-17,3	-39,4	-29,5

**Tabulka F-3: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity  $C = 7 \text{ nF}$  dekády M525, etalon WK6440B**

$\vartheta$ [°C]	$\Delta(C)_{M525}$ [pF]					
	Vlhkost 50 %		Vlhkost 70 %		Vlhkost 90 %	
	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz
10	-11,8	-5,9	-20,9	-14,4	-31,5	-24,1
15	-7,1	-2,3	-14,6	-9,4	-24,7	-18,9
20	-1,8	2,1	-9,7	-5,2	-19,6	-14,7
25	4,8	7,7	-5,3	-1,4	-13,8	-9,6
30	6,1	8,7	-0,1	3,2	-11,4	-7,0
35	9,2	11,6	6,4	9,2	-3,8	0,1
40	15,6	17,6	4,8	7,3	-3,3	0,6
50	24,6	26,4	15,5	17,8	4,9	9,3

**Tabulka F-4: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity  $C = 30 \text{ nF}$  dekády M525, etalon WK6440B**

$\vartheta$ [°C]	$\Delta(C)_{M525}$ [pF]					
	Vlhkost 50 %		Vlhkost 70 %		Vlhkost 90 %	
	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz
10	-83	-60	-95	-70	-114	-88
15	-56	-33	-60	-36	-76	-50
20	-24	-3	-31	-8	-47	-23
25	11	32	-3	19	-13	10
30	34	55	27	49	6	31
35	59	80	64	86	49	73
40	100	122	85	107	67	92
50	169	190	158	179	134	160

**Tabulka F-5: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity  $C = 0,5 \text{ } \mu\text{F}$  dekády M525, etalon WK6440B**

$\vartheta$ [°C]	$\Delta(C)_{M525}$ [pF]					
	Vlhkost 50 %		Vlhkost 70 %		Vlhkost 90 %	
	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz
10	-1,25	-1,04	-1,12	-0,98	-1,22	-0,96
15	-0,76	-0,56	-0,56	-0,36	-0,58	-0,08
20	-0,21	-0,04	-0,05	0,15	-0,08	0,60
25	0,37	0,58	0,45	0,66	0,69	1,13
30	0,89	1,05	0,98	1,22	0,90	1,46
35	1,41	1,56	1,72	1,92	1,58	2,14
40	2,18	2,29	2,15	2,33	2,06	2,37
50	3,48	3,63	3,48	3,72	3,37	3,61

**Tabulka F-6: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity  $C = 5 \mu\text{F}$  dekády M525, etalon WK6440B**

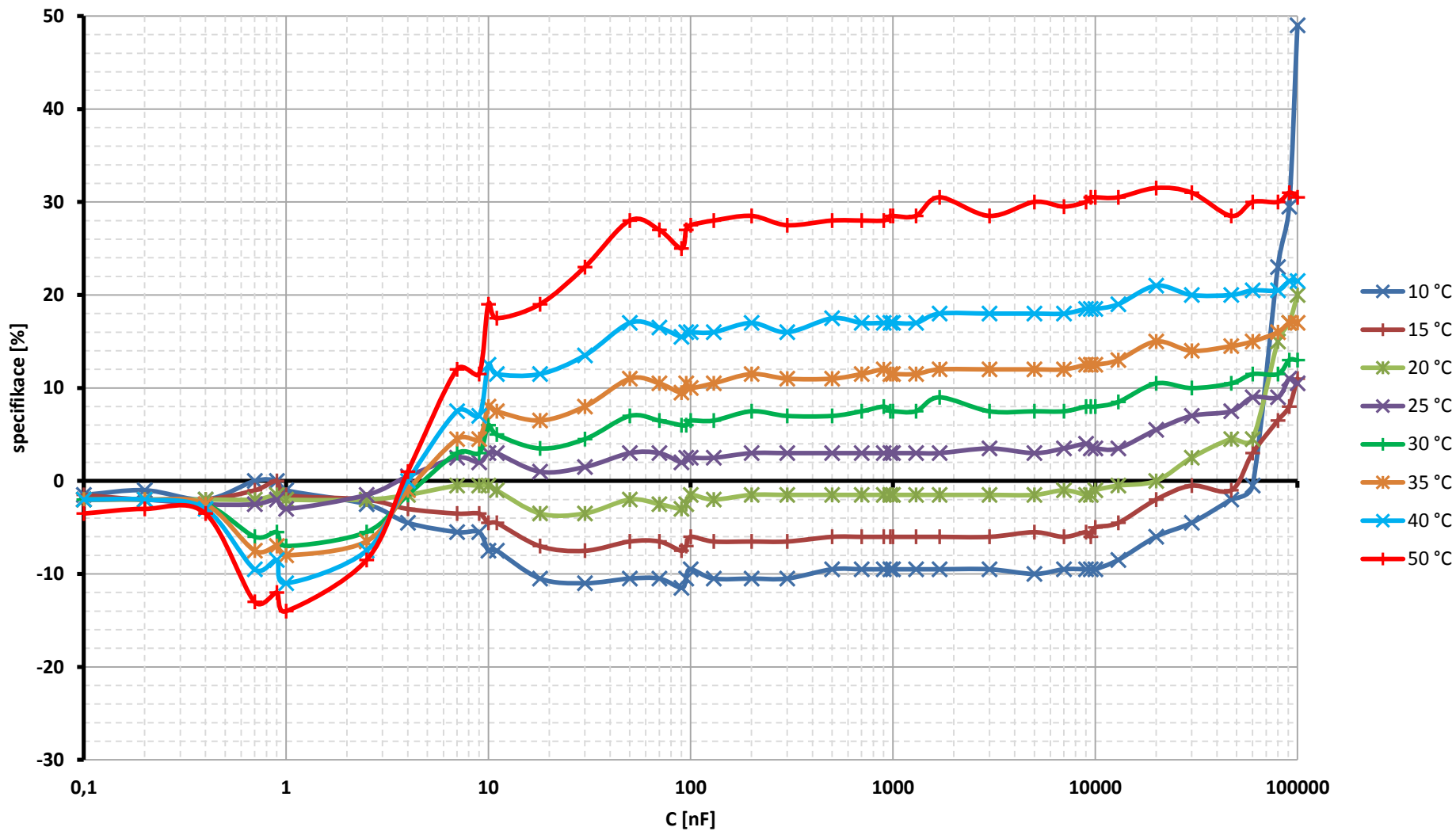
$\vartheta$ [°C]	$\Delta(C)_{M525}$ [pF]					
	Vlhkost 50 %		Vlhkost 70 %		Vlhkost 90 %	
	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz	f = 40 Hz	f = 1 kHz
10	-12,3	53,4	-11,4	15,7	-12,1	88,5
15	-6,9	40,1	-6,4	55,2	-5,1	101,5
20	-1,8	73,1	-0,6	73,0	0,7	125,0
25	4,0	49,3	4,8	35,6	5,9	191,0
30	9,6	25,5	10,4	61,2	10,8	129,9
35	15,2	23,8	16,7	49,5	18,3	120,8
40	22,4	31,2	22,5	42,4	22,1	61,8
50	37,4	47,4	36,4	64,4	35,9	96,9

**Tabulka F-7: Teplotní, vlhkostní a frekvenční závislosti absolutních chyb údaje kapacity  $C = 47 \mu\text{F}$  dekády M525, etalon WK6440B**

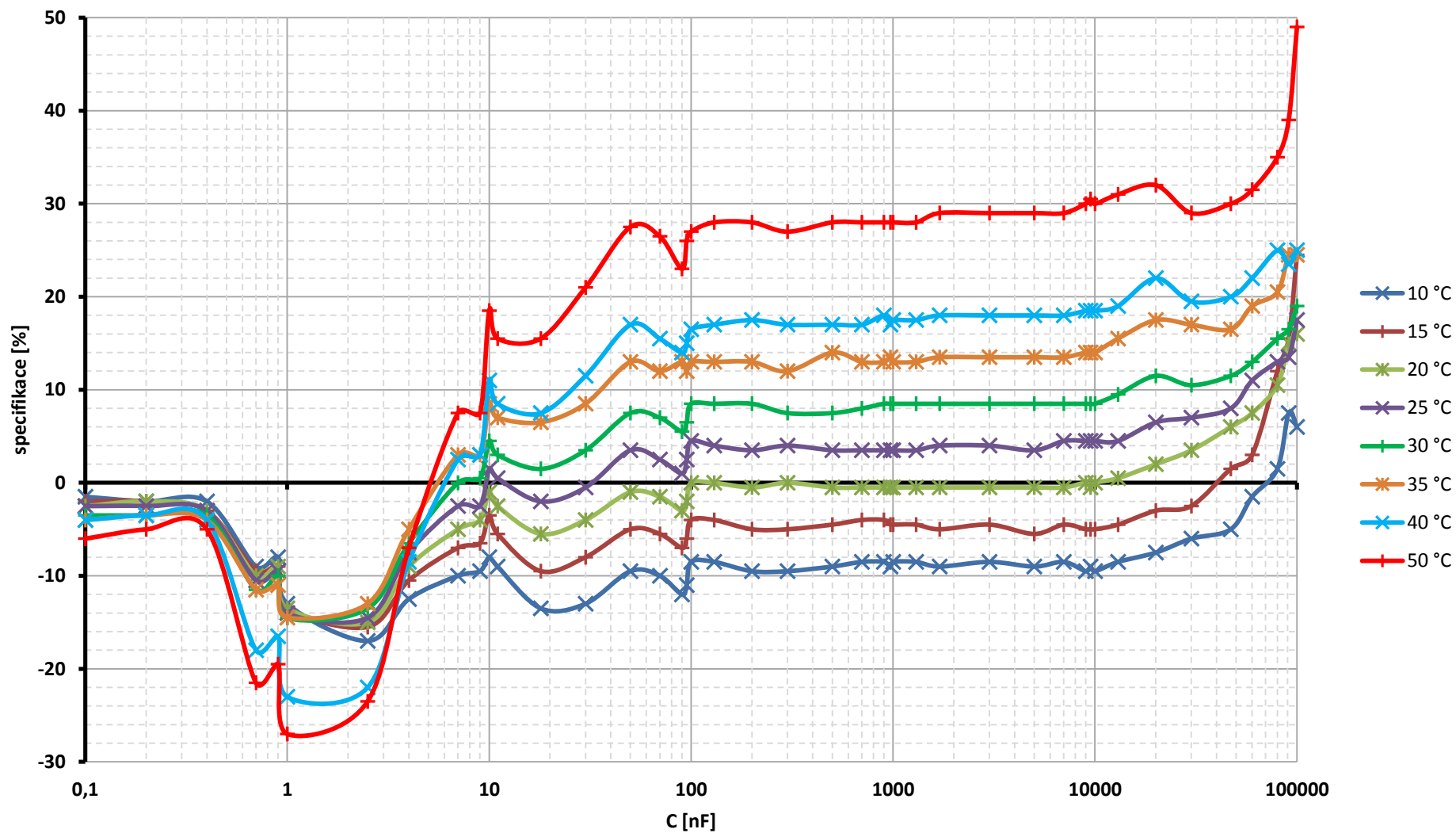
$\vartheta$ [°C]	$\Delta(C)_{M525}$ [pF]					
	Vlhkost 50 %		Vlhkost 70 %		Vlhkost 90 %	
	f = 40 Hz	f = 100 Hz	f = 40 Hz	f = 100 Hz	f = 40 Hz	f = 100 Hz
10	-23	905	-61	260	-4	688
15	-13	481	15	377	164	1683
20	56	213	70	349	158	875
25	84	145	91	350	243	988
30	125	163	134	237	227	683
35	171	197	195	371	288	956
40	231	258	240	316	297	798
50	331	374	354	434	395	1396

## **Příloha G: Závislosti specifikace na hodnotě kapacity dekády M525**

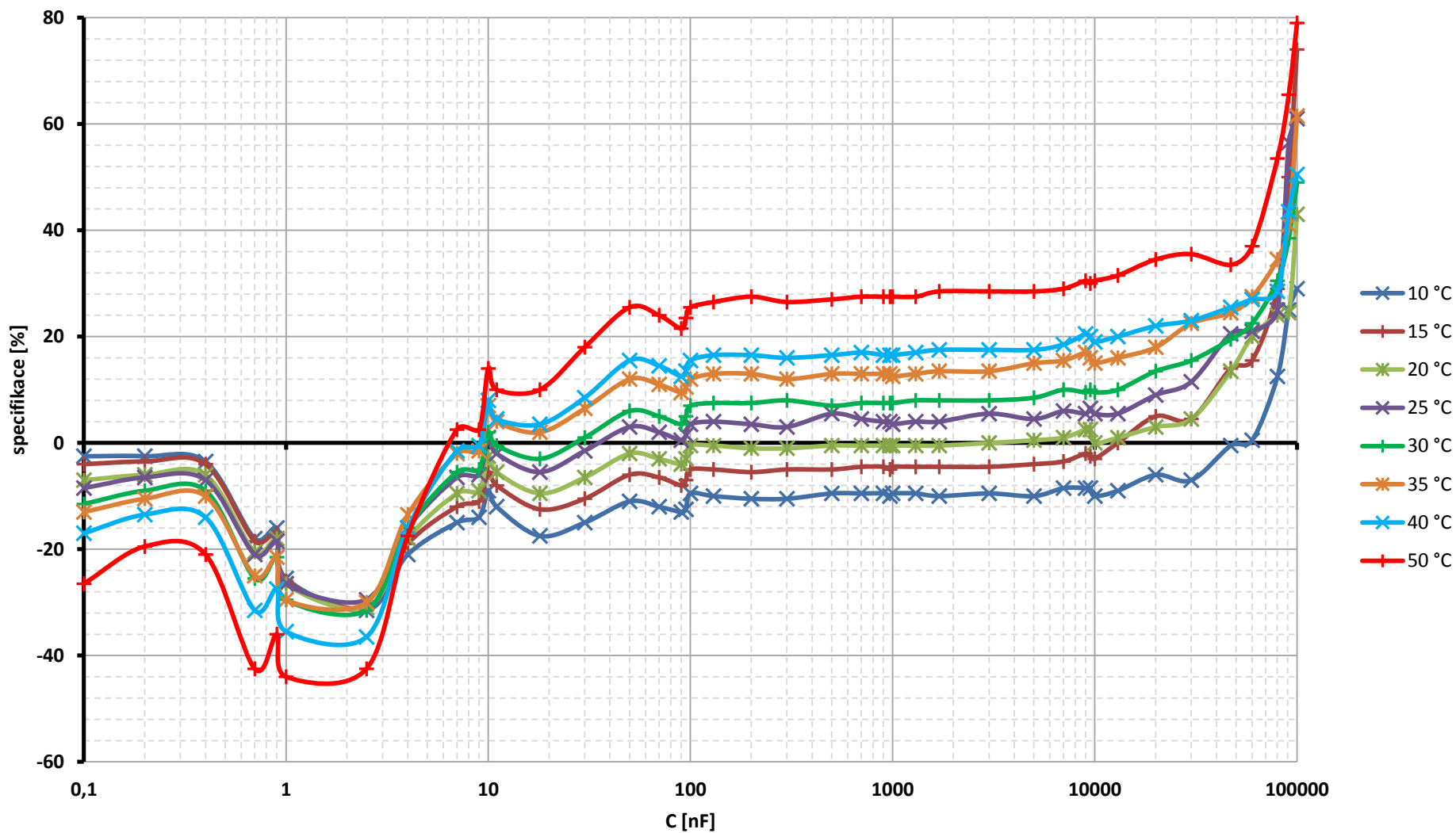
Závislost specifikace na hodnotě kapacity dekády M525 při vlhkosti 50 % a frekvenci 40 Hz



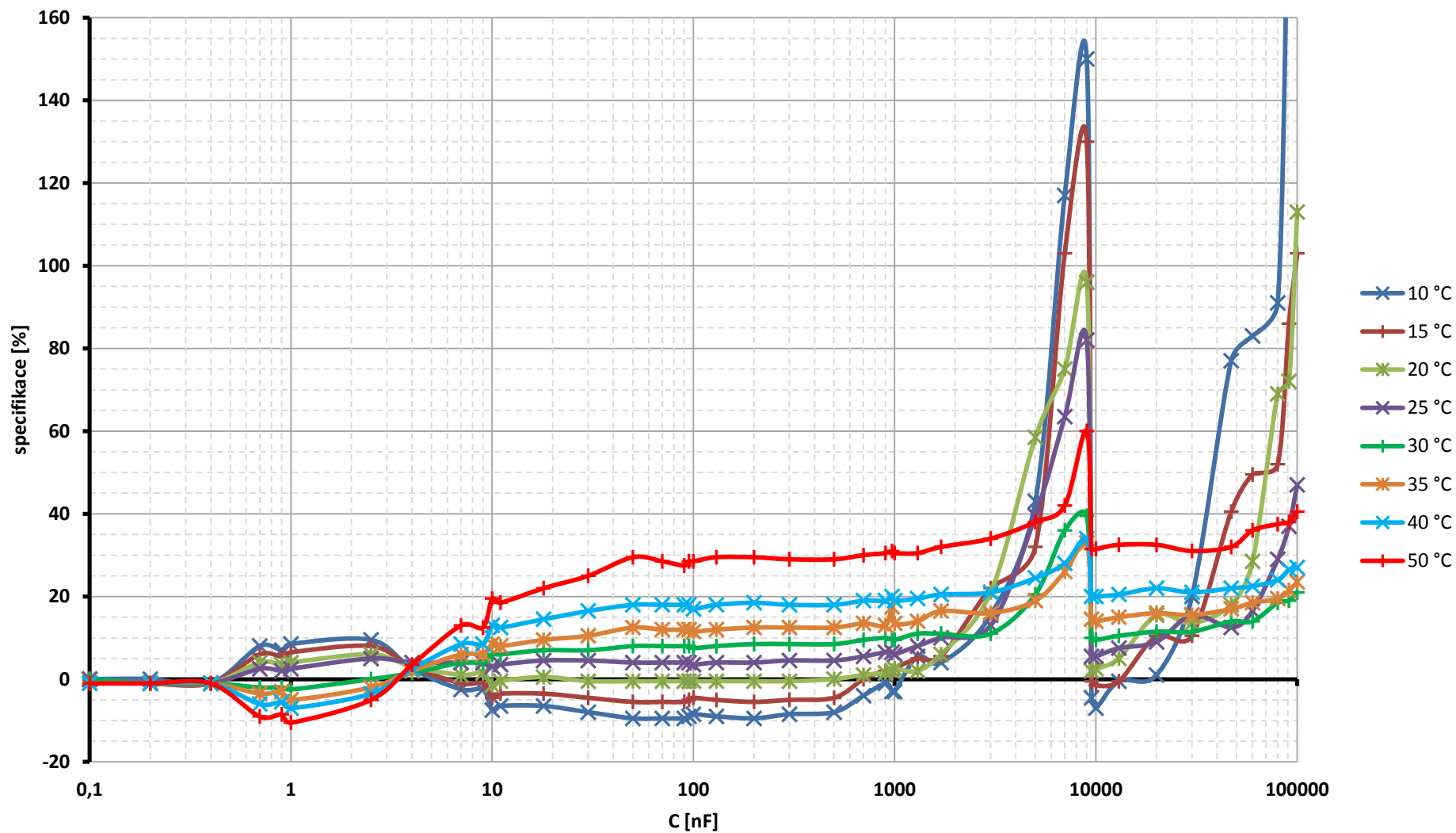
Závislost specifikace na hodnotě kapacity dekády M525 při vlhkosti 70 % a frekvenci 40 Hz



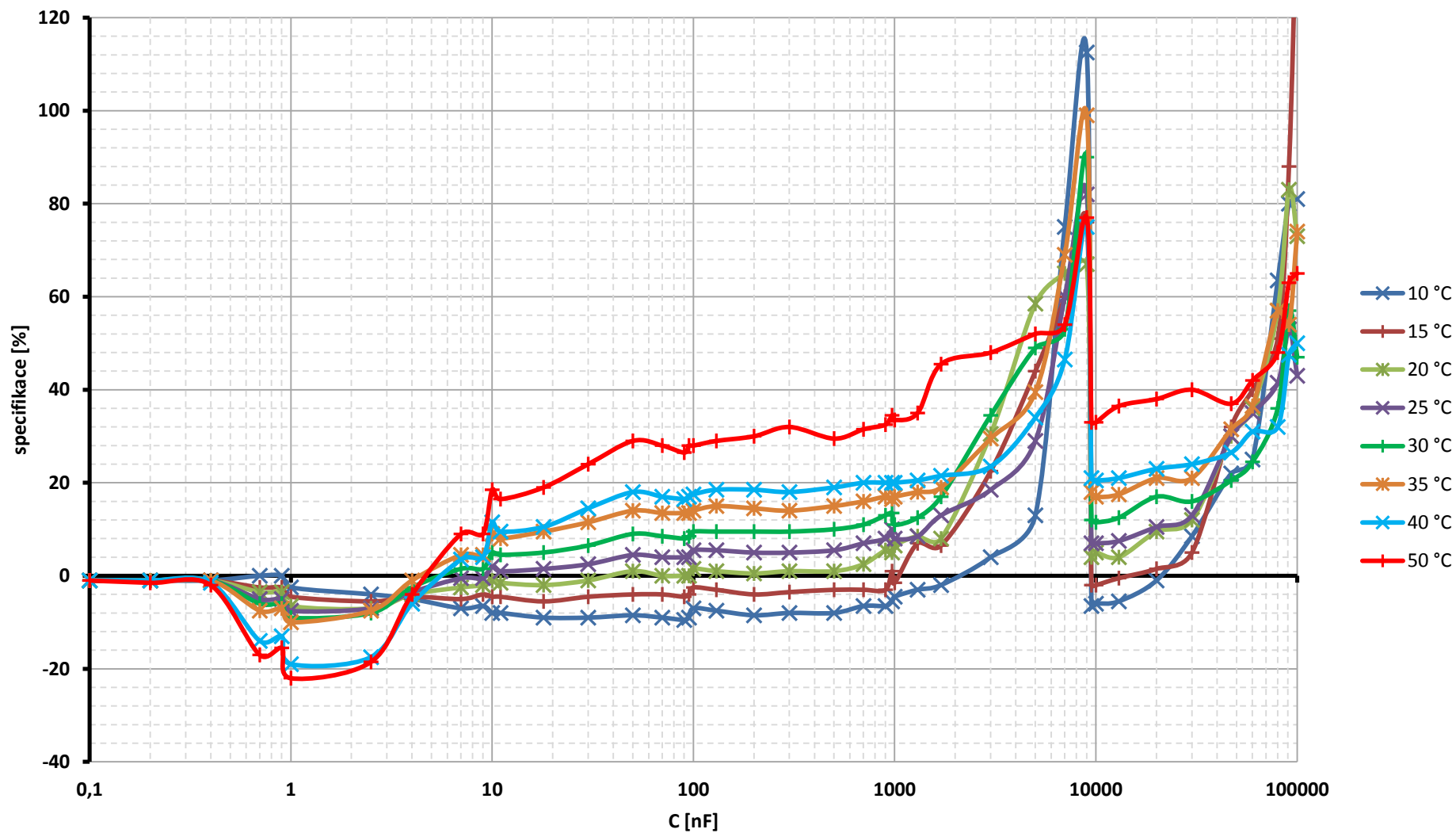
Závislost specifikace na hodnotě kapacity dekády M525 při vlhkosti 90 % a frekvenci 40 Hz



Závislost specifikace na hodnotě kapacity dekády M525 při vlhkosti 50 % a frekvenci 1 kHz



Závislost specifikace na hodnotě kapacity dekády M525 při vlhkosti 70 % a frekvenci 1 kHz



Závislost specifikace na hodnotě kapacity dekády M525 při vlhkosti 90 % a frekvenci 1kHz

