



**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**F3**

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra měření**

**Bakalářská práce**

# **Přípravek na měření napěťové závislosti kapacity keramických kondenzátorů**

**Petr Pojar**

**Vedoucí práce: Ing. Jan Novák, Ph.D.  
Studijní program: Kybernetika a robotika  
Květen 2024**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pojar** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **507367**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Přípravek na měření napěťové závislosti kapacity keramických kondenzátorů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Measuring the Capacity-Voltage Dependence of the Ceramic Capacitors Device**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s problematikou feroelektrik ve vícevrstvých keramických kondenzátorech.
- 2) Prostudujte možnost poloautomatického měření kapacity kondenzátoru při změně přiloženého stejnosměrného napětí.
- 3) Navrhněte zapojení přípravku s následujícími rozsahy: kapacita kondenzátoru 1 uF - 100 uF, stejnosměrné napětí 0 V - 30 V.
- 4) Vytvořte měřicí režim pro určení napěťové charakteristiky kapacity kondenzátoru.
- 5) Zapojení realizujte ve formě funkčního vzorku.
- 6) Proveďte ověřovací měření.
- 7) Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte případná rozšíření.

Seznam doporučené literatury:

- [1] V. Haasz a kolektiv, Elektrická měření. Přístroje a metody, ČVUT 2018, 3. vydání, ISBN 978-80-01-06412-2.
- [2] Sonia De Almeida-Didry, Cécile Autret, François Gervais, Promising trends in materials for ceramic capacitors, LAP LAMBERT Academic Publishing 2020, ISBN 978-6203042085 .
- [3] Passive Components, MLCC and Ceramic Capacitors, 2023, <https://passive-components.eu/mlcc-and-ceramic-capacitors/>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Novák, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **24.01.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce:

**do konce letního semestru 2024/2025**

Ing. Jan Novák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta



## Poděkování / Prohlášení

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Novákoví, Ph.D. za odborné vedení a za pomoc a rady při zpracování této práce.

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

V Praze dne 23. 5. 2024

.....

## Abstrakt / Abstract

Tato bakalářská práce se v teoretické části zabývá problematikou ferroelektrik, která jsou využívána jako dielektrikum ve vícevrstvých keramických kondenzátorech. Dále jsou pak rozebrány metody měření kapacity kondenzátorů v závislosti na přiloženém stejnosměrném napětí. Praktická část popisuje návrh a realizaci měřicího přípravku s rozsahem měřené kapacity 1–100  $\mu\text{F}$  a přiloženým stejnosměrným napětím 0–30 V. Pro ověření funkčnosti přípravku bylo provedeno měření na vzorcích kondenzátorů v rámci celého měřicího rozsahu. Následuje porovnání výsledků měření na přípravku s měřením na RLC měřiči a s katalogovými údaji výrobce.

**Klíčová slova:** měření kapacity; napěťová charakteristika kondenzátoru; závislost kapacity na napětí; ferroelektrika; vícevrstvý keramický kondenzátor; MLCC; STM32; Nucleo-F446RE.

The theoretical part of this bachelor thesis deals with ferroelectrics, which are used as dielectrics in multilayer ceramic capacitors. Then the methods of measuring capacitance of capacitors depending on the applied DC voltage are discussed. The practical part describes the design and implementation of a measuring instrument with a measured capacitance range of 1–100  $\mu\text{F}$  and an applied DC voltage of 0–30 V. To verify the functionality of the device, measurements were performed on capacitor samples over the entire measurement range. The following is a comparison of the measurement results with the LCR meter measurements and the manufacturer's catalog data.

**Keywords:** capacitance measurement; DC bias characteristics; capacity-voltage dependence; ferroelectrics; multilayer ceramic capacitor; MLCC; STM32; Nucleo-F446RE.

**Title translation:** Measuring the Capacity-Voltage Dependence of the Ceramic Capacitors Device

# Obsah /

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>		
<b>2 Fyzikální princip kondenzátoru</b>	<b>2</b>		
2.1 Kapacita dvou vodičů . . . . .	2		
2.2 Kondenzátor s dielektrikem . . . . .	3		
2.2.1 Elektrický dipól . . . . .	4		
2.2.2 Polarizace dielektrika . . . . .	4		
2.2.3 Elektrické pole polarizovaného dielektrika . . . . .	5		
2.2.4 Dielektrikum v elektrostatickém poli . . . . .	6		
2.2.5 Kapacita kondenzátoru s dielektrikem . . . . .	6		
<b>3 Vlastnosti dielektrik</b>	<b>8</b>		
3.1 Feroelektrika . . . . .	8		
3.2 Elektrety . . . . .	11		
3.3 Piezoelektrika . . . . .	11		
3.4 Pyroelektrika . . . . .	12		
<b>4 Vícevrstvé keramické kondenzátory</b>	<b>13</b>		
4.1 Konstrukce a výrobní proces . . . . .	13		
4.2 Vlastnosti . . . . .	14		
4.2.1 Závislost kapacity na napětí . . . . .	15		
4.2.2 Závislost kapacity na teplotě a na frekvenci . . . . .	16		
<b>5 Kondenzátor v elektrickém obvodu</b>	<b>18</b>		
5.1 Paralelní a sériové zapojení . . . . .	18		
5.2 Přejídné děje prvního řádu . . . . .	19		
5.3 Obvody v harmonickém ustáleném stavu . . . . .	20		
5.4 Model a parazitní parametry . . . . .	20		
<b>6 Měření impedancí</b>	<b>22</b>		
6.1 Klasifikace měřicích metod . . . . .	22		
6.2 Metody měření impedancí . . . . .	22		
6.2.1 Číslicový RLC měřič . . . . .	23		
6.2.2 Můstky Wheatstoneova typu . . . . .	24		
6.2.3 Transformátorové můstky . . . . .	24		
6.2.4 Metoda tří voltmetrů . . . . .	25		
6.2.5 Další měřicí metody a převodníky . . . . .	25		
6.3 Měření kondenzátorů se stejnosměrným předpětím . . . . .	26		
6.3.1 RLC měřič . . . . .	26		
6.3.2 Výhylková metoda . . . . .	27		
<b>7 Návrh měřicího přípravku</b>	<b>28</b>		
7.1 Metoda měření kapacity . . . . .	28		
7.2 Blokové schéma . . . . .	30		
7.3 Digitální blok . . . . .	31		
7.4 Analogový blok . . . . .	31		
7.4.1 Generátor střídavého napětí . . . . .	31		
7.4.2 Operační usměrňovač . . . . .	32		
7.4.3 Zdroj stejnosměrného předpětí . . . . .	32		
7.5 Firmware . . . . .	33		
7.5.1 Proces měření . . . . .	33		
7.5.2 AD převodník . . . . .	34		
7.5.3 DA převodník . . . . .	34		
7.5.4 LCD displej . . . . .	35		
7.6 Napájení . . . . .	35		
7.7 Mechanická konstrukce . . . . .	35		
<b>8 Výsledky měření</b>	<b>37</b>		
8.1 Vzorok kondenzátorů pro měření . . . . .	37		
8.2 Srovnání s měřením na RLC měřiči a údají výrobce . . . . .	37		
8.3 Odchylnka od měření na RLC měřiči . . . . .	39		
<b>9 Závěr</b>	<b>41</b>		
<b>Literatura</b>	<b>42</b>		
<b>Přílohy</b>	<b>45</b>		
A Naměřené hodnoty . . . . .	46		
B Schéma . . . . .	48		
C Fotografická dokumentace . . . . .	53		
D Návod k použití . . . . .	55		
D.1 Spuštění přípravku . . . . .	55		
D.2 Měření . . . . .	56		

## Tabulky / Obrázky

<b>7.1</b> Měřicí rozsahy .....	30
<b>8.1</b> Vzorčky kondenzátorů pro ověřovací měření.....	37
<b>A.1</b> Měření na RLC metru .....	46
<b>A.2</b> Měření na přípravku, kondenzátor 1 $\mu\text{F}$ .....	46
<b>A.3</b> Měření na přípravku, kondenzátor 10 $\mu\text{F}$ .....	47
<b>A.4</b> Měření na přípravku, kondenzátor 100 $\mu\text{F}$ .....	47
<b>2.1</b> El. pole deskového kondenzátoru .....	2
<b>2.2</b> Kondenzátor s dielektrikem.....	3
<b>2.3</b> Elektrický dipól .....	4
<b>2.4</b> Indukovaná polarizace dielektrika .....	4
<b>2.5</b> Orientační polarizace dielektrika .....	5
<b>2.6</b> Indukované elektrické pole .....	6
<b>3.1</b> Závislost polarizace na el. poli...8	
<b>3.2</b> Krystalická buňka feroelektrika .....	9
<b>3.3</b> Hysterezní smyčka el. polarizace .....	9
<b>3.4</b> Závislosti náboje kondenzátoru na napětí.....	10
<b>3.5</b> Závislost rel. permitivity na teplotě .....	11
<b>3.6</b> Piezoelektrický jev .....	12
<b>4.1</b> Struktura vícevrstvého keramického kondenzátoru .....	13
<b>4.2</b> Výroba vícevrstvých keramických kondenzátorů .....	15
<b>4.3</b> Změna kapacity dle velikosti pouzdra .....	16
<b>4.4</b> Závislost kapacity na teplotě ..	17
<b>5.1</b> Paralelní a sériové zapojení kondenzátorů .....	18
<b>5.2</b> Náhradní schéma kondenzátoru .....	20
<b>5.3</b> Náhradní schéma kondenzátoru pro vyšší frekvence.....	21
<b>6.1</b> Převodníky impedance a admitance na napětí.....	23
<b>6.2</b> Wheatstoneův můstek .....	24
<b>6.3</b> Transformátorový můstek.....	25
<b>6.4</b> Impedanční dělič .....	25
<b>6.5</b> Adaptér pro RLC metr .....	26
<b>6.6</b> RLC metr HAMEG HM8118 ..	26
<b>6.7</b> Výchylková metoda .....	27
<b>7.1</b> Schéma kapacitního děliče .....	28
<b>7.2</b> Blokované schéma .....	30
<b>7.3</b> Blokované schéma analogové části.....	31
<b>7.4</b> Schéma operačního usměrňovače .....	33



<b>7.5</b>	Vývojový diagram programu ..	34
<b>7.6</b>	Konstrukce měřicího přípravku .....	36
<b>8.1</b>	Měření kondenzátoru 1 $\mu\text{F}$ .....	38
<b>8.2</b>	Měření kondenzátoru 10 $\mu\text{F}$ .....	38
<b>8.3</b>	Měření kondenzátoru 100 $\mu\text{F}$ ...	39
<b>8.4</b>	Odchylka měření .....	40
<b>B.1</b>	Blokové schéma přípravku .....	48
<b>B.2</b>	Schéma generátoru a zdroje stejnosměrného předpětí .....	49
<b>B.3</b>	Schéma operačních usměrňovačů .....	50
<b>B.4</b>	Schéma digitálního bloku .....	51
<b>B.5</b>	Schéma filtrace napájení .....	52
<b>B.6</b>	Schéma bloku signálových relé .	52
<b>C.1</b>	Deska plošného spoje .....	53
<b>C.2</b>	Měřicí přípravek vestavěný do krabičky .....	53
<b>C.3</b>	Měřicí přípravek s měřicí pinzetou .....	54
<b>C.4</b>	Čelní panel .....	54
<b>C.5</b>	Zadní panel .....	54
<b>D.1</b>	Popis čelního a zadního panelu .....	55

# Symbols and abbreviations

## 1 Symbols

$B$	Susceptance [S]
$C$	Elektrická kapacita [F]
$C_K$	Curieho konstanta [K]
$D$	Elektrická indukce [ $C \cdot m^{-2}$ ]
$d$	Vzdálenost mezi elektrodami deskového kondenzátoru [m]
$E$	Intenzita elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ]
$E_K$	Koercitivní pole [ $V \cdot m^{-1}$ ]
$E_p$	Polarizační elektrická intenzita [ $V \cdot m^{-1}$ ]
$f$	Frekvence [Hz]
$G$	Konduktance [S]
$I$	Elektrický proud [A]
$I_M$	Amplituda střídavého elektrického proudu [A]
$L$	Indukčnost [H]
$N$	Počet závitů transformátoru [-]
$P$	Elektrická polarizace [ $C \cdot m^{-2}$ ]
$p_0$	Dipólový moment [ $C \cdot m$ ]
$P_R$	Remanentní polarizace [ $C \cdot m^{-2}$ ]
$q, Q$	Elektrický náboj [C]
$R$	Elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$S$	Plocha elektrody deskového kondenzátoru [ $m^2$ ]
$T$	Termodynamická teplota [K]
$T_0$	Charakteristická teplota [K]
$tg\delta$	Ztrátový činitel [-]
$U$	Elektrické napětí [V]
$U_M$	Amplituda střídavého napětí [V]
$Y$	Admitance [S]
$X$	Reaktance [ $\Omega$ ]
$Z$	Impedance [ $\Omega$ ]
$\delta C$	Relativní změna kapacity [%]
$\Delta C$	Absolutní změna kapacity [F]
$\varepsilon$	Permitivita [ $F \cdot m^{-1}$ ]
$\varepsilon_0$	Permitivita vakua, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$
$\Phi_E$	Tok elektrické intenzity [V m]
$\varphi$	Elektrický potenciál [V], respektive fázový posun [s]
$\chi_e$	Elektrická susceptibilita [-]
$\omega$	Úhlová frekvence [ $rad \cdot s^{-1}$ ]

## 2 Zkratky

ADC	Analogově-digitální převodník
C++	Programovací jazyk odvozený od jazyka C
DAC	Digitálně-analogový převodník
DMA	Přímý přístup do paměti (periferie mikrokontroléru)
DOO	Diodový ochranný obvod
DOR	Výstupní registr digitálně-analogového převodníku
DP	Dolní propust
EIA	Electronic Industries Association
HAL	Hardware Abstraction Layer, vysokoúrovňové knihovny pro mikrokontroléry STM32
HP	Horní propust
IEC	International Electrotechnical Commission, mezinárodní elektrotechnická komise
LCD	Displej z tekutých krystalů
MLCC	Vícevrstvý keramický kondenzátor
RNG	Range, rozsah
SMD	Součástky určené pro povrchovou montáž
ST-LINK	Rozhraní pro programování a ladění mikrokontrolérů STM



# Kapitola 1

## Úvod

Vícevrstvé keramické kondenzátory jsou v dnešní době často využívány pro své malé rozměry, při nichž lze dosáhnout velké jmenovité kapacity oproti jiným typům kondenzátorů. Právě díky jejich efektivní miniaturizaci jsou tak široce používány a najdeme je coby nejběžnější pasivní součástky v téměř každém vyrobeném kusu elektroniky [1].

Významnou vlastností vícevrstvých keramických kondenzátorů je závislost kapacity na přiloženém stejnosměrném napětí, kdy kapacita může klesnout i o vyšší desítky procent [2]. To může být často nežádoucí a je nutné tuto vlastnost brát v potaz s ohledem na konkrétní aplikaci. Například při použití jako filtrační kondenzátor ve spínaném zdroji [1] se pokles kapacity projeví významným způsobem, protože zde na kondenzátoru bude vždy stejnosměrné výstupní napětí zdroje.

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací přípravku na měření napěťové závislosti kapacity keramických kondenzátorů. V teoretické části je rozebrán fyzikální princip kondenzátoru, vlastnosti vícevrstvých keramických kondenzátorů a způsoby měření elektrické kapacity, respektive její závislosti na stejnosměrném napětí.

Praktická část se věnuje návrhu měřicího přípravku a realizaci funkčního vzorku. Pro ověření funkčnosti přípravku je zde zpracováno srovnávací měření s laboratorními přístroji a porovnání naměřených hodnot s katalogovými charakteristikami měřených kondenzátorů.

## Kapitola 2

### Fyzikální princip kondenzátoru

Pro pochopení vlastností kondenzátorů je nutné porozumět jejich základním fyzikálním principům. Rozebereme zde případ jednoduchého deskového kondenzátoru, dielektrika a jejich vlastnosti. Někdy se v literatuře rozlišují pojmy kondenzátor a kapacitor, kdy kapacitor reprezentuje ideální součástku, jejíž jedinou vlastností je kapacita, a kondenzátor pak součástku reálnou, která má nenulovou parazitní indukčnost a odpor. V této práci budu používat pouze pojem kondenzátor pro oba případy.

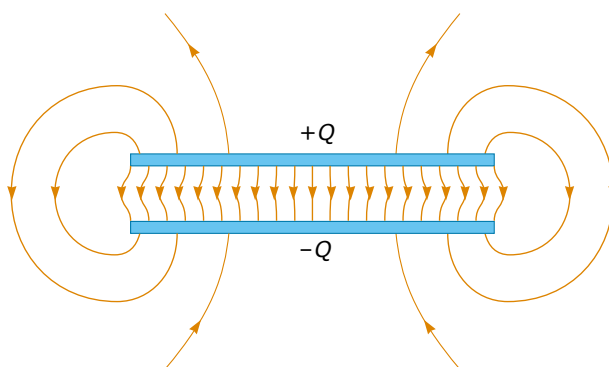
Základem pro vysvětlení principu kondenzátoru je chování elektrického pole v materiálovém prostředí. Podle chování v elektrickém poli rozlišujeme materiály na vodiče, které obsahují velké množství volných nábojů (ty se mohou volně pohybovat daným materiálem), a dielektrika (též izolanty, nevodiče), v nichž jsou náboje vázány k atomům a molekulám a mohou se pohybovat jen velmi omezeně [3].

#### 2.1 Kapacita dvou vodičů

Mějme izolovaný vodič nabitý nábojem  $q > 0$ , do jehož těsné blízkosti umístíme druhý vodič nabitý nábojem  $-q$ . Potenciál kladně nabitého vodiče označíme  $\varphi_1$  a potenciál záporně nabitého vodiče  $\varphi_2$ . Toto uspořádání nazýváme elektrickým kondenzátorem a jednotlivé vodiče nazýváme elektrodami. Mezi těmito elektrodami je soustředěno elektrické pole. Kapacitu kondenzátoru  $C$  pak definujeme vztahem [3]

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U} \quad (2.1)$$

kde  $U$  je napětí mezi elektrodami kondenzátoru. Podle tvaru elektrod rozlišujeme například kulové, válcové nebo deskové kondenzátory. Deskové jsou v praxi nejběžnější, ostatními se dále nebudeme zabývat.



**Obrázek 2.1.** Elektrické pole deskového kondenzátoru nabitého nábojem  $Q$ . Převzato z [4].

Deskový kondenzátor se skládá ze dvou rovnoběžných vodivých elektrod, které mají plochu  $S$  a jejich vzdálenost je  $d$ . Pakliže elektrody považujeme za dostatečně velké a předpokládáme, že jsou v těsné blízkosti, můžeme elektrické pole mezi nimi považovat za homogenní. Okrajové jevy (nehomogenity elektrického pole na okrajích elektrod) zanedbáme. Velikost elektrické intenzity  $E$  mezi deskami kondenzátoru lze určit pomocí Gaussova zákona, který říká, že celkový tok intenzity elektrického pole libovolnou uzavřenou plochou se rovná celkovému náboji v prostoru, který uzavírá tato plocha, dělenému elektrickou konstantou (permitivitou vakua) [3]. Integrální vyjádření zákona je následující:

$$\Phi_e = \oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{\varepsilon_0} \quad (2.2)$$

Plochou, přes kterou integrujeme, je v případě deskového kondenzátoru kvádr vymezený oběma elektrodami, tedy s podstavou o ploše  $S$  a výšce  $d$ . Označme tuto plochu jako  $S_{kv}$ . Uvnitř kvádru se nachází kladně nabitá elektroda. Potom platí

$$\oiint_{S_{kv}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = ES = \frac{q}{\varepsilon_0} \quad (2.3)$$

Elektrická intenzita v prostoru mezi elektrodami je tedy:

$$E = \frac{q}{S\varepsilon_0} \quad (2.4)$$

Napětí mezi elektrodami spočítáme s pomocí vztahu  $U = Ed$  takto

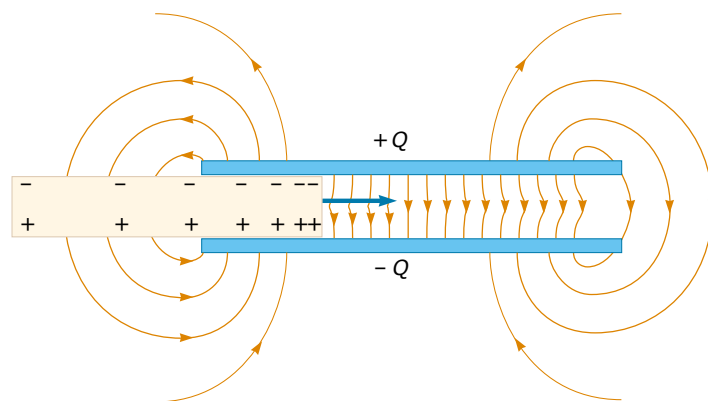
$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = Ed = \frac{qd}{S\varepsilon_0} \quad (2.5)$$

Dosazením do definičního vztahu (2.1) pro kapacitu kondenzátoru dostaneme

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q}{\frac{qd}{S\varepsilon_0}} = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (2.6)$$

## 2.2 Kondenzátor s dielektrikem

Výše uvedený vztah platí pouze pro případ, kdy je mezi elektrodami kondenzátoru vakuum. V praxi se však takové kondenzátory používají zřídka, často je mezi elektrodami přítomný nějaký nevodivý materiál – dielektrikum.



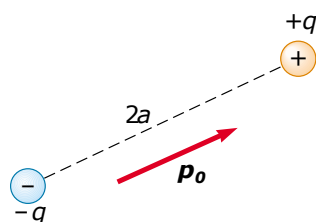
**Obrázek 2.2.** Kondenzátor s dielektrikem. Při vložení dielektrika mezi nabitě elektrody dochází k jeho polarizaci. Převzato z [4].

Pokud na dielektrikum působí vnější elektrické pole, dochází k jeho polarizaci. Polarizaci rozumíme vytvoření a uspořádání dipólů v materiálu ve směru daném vnějším polem. Podle toho, jakým způsobem se částice materiálu dielektrika v elektrickém poli chovají, je dělíme na polární a nepolární. Pro vysvětlení je nutné zavést pojem elektrický dipól.

### 2.2.1 Elektrický dipól

Elektrický dipól se skládá ze dvou bodových nábojů stejné velikosti s opačným znaménkem, tedy  $+q$  a  $-q$ , jejichž vzdálenost je  $2a$  (Obr. 2.3).

Elektrický dipólový moment tohoto dipólu je pak definován jako vektor orientovaný ve směru od  $-q$  do  $+q$  s velikostí rovnou  $2aq$ . Říkáme, že molekuly jsou polární, pokud je v nich stále rozložení kladného a záporného elektrického náboje nerovnoměrné a mají tak nenulový dipólový moment,  $\mathbf{p}_0 \neq 0$ . Naopak nepolární molekuly mají náboje rozloženy rovnoměrně (v případě, že na ně nepůsobí vnější elektrické pole) a výsledný dipólový moment je nulový,  $\mathbf{p}_0 = 0$ . Podmínkou je zde středová souměrnost molekuly nebo atomu, typickým příkladem je hélium. Odtud pak plyne rozdělení dielektrik na polární a nepolární.



**Obrázek 2.3.** Elektrický dipól tvořený dvěma náboji o velikosti  $q$  a  $-q$  ve vzdálenosti  $2a$ ,  $\mathbf{p}_0$  je dipólový moment. Převzato z [4].

### 2.2.2 Polarizace dielektrika

Existují dva typy polarizace: indukovaná a orientační. Indukovaná polarizace pak může být elektronová nebo iontová.

Elektronová polarizace se projevuje u všech dielektrik. Probíhá díky deformaci elektronového obalu atomu nebo molekuly, díky čemuž vzniknou místa vyšším podílem záporných nábojů vůči kladným a obráceně. To zapříčiní vznik elektrického dipólu, který má směr dipólového momentu shodný s působícím elektrickým polem. Tento dipólový moment označujeme jako moment indukovaný elektrickým polem.

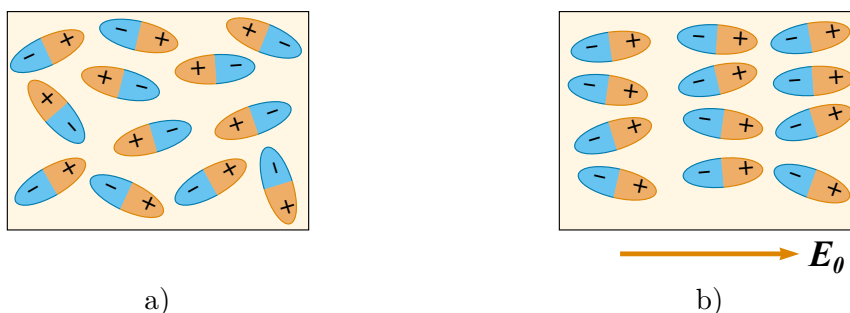


**Obrázek 2.4.** Indukovaná polarizace dielektrika. Při působení vnějšího elektrického pole dochází ke změně rozložení náboje v molekule nebo atomu. Převzato z [4].

Iontová polarizace funguje obdobně, nedochází ovšem k přesunu elektronů, ale ke změně relativní polohy iontů v rámci molekul.



Orientační polarizace se na rozdíl od indukované projevuje jen u polárních dielektrik, podmínkou je tedy nenulový dipólový moment molekul dielektrika bez přítomnosti vnějšího elektrického pole. Tyto permanentní dipóly nejsou nikdy uspořádány úplně, protože konají náhodný tepelný pohyb. Polarizace (respektive její střední hodnota v čase) závisí na teplotě dielektrika a na intenzitě působícího elektrického pole. Se snižující se teplotou se bude polarizace dielektrika zvyšovat.



**Obrázek 2.5.** Orientační polarizace dielektrika. Převzato z [4].

Z mechanismů polarizace vyplývá chování dielektrik při vysokých frekvencích proměnného elektrického pole. Převládá-li orientační polarizace, projevuje se setrvačnost polárních molekul, které nestačí tak rychle měnit svou orientaci. Naopak indukovaná polarizace se projevuje i při vysokých frekvencích [3].

### 2.2.3 Elektrické pole polarizovaného dielektrika

Pro popis elektrického pole v dielektriku zavádíme veličiny elektrická polarizace  $\mathbf{P}$  a elektrická indukce  $\mathbf{D}$ . Elektrická polarizace je hustota elektrického dipólového momentu a charakterizuje z makroskopického hlediska reakci dielektrika na elektrické pole. Je definována vztahem

$$\mathbf{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta V} \quad (2.7)$$

kde  $\Delta \mathbf{p}$  představuje elektrický dipólový moment objemu  $\Delta V$  [3, 5]. Materiálový vztah mezi indukcí a intenzitou elektrického pole lze zapsat právě pomocí polarizace. Tyto veličiny jsou svázány vztahem

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}(\mathbf{E}) \quad (2.8)$$

Vektor elektrické polarizace  $\mathbf{P}$  závisí na intenzitě  $\mathbf{E}$ , tedy  $\mathbf{P} = \mathbf{P}(\mathbf{E})$  [3, 5]. Pro slabá pole lze odezvu dielektrika považovat za lineární a provést Taylorův rozvoj vektoru polarizace prvního řádu. Často členy vyšších řádů zanedbáváme a používáme pouze lineární aproximaci. V tom případě hovoříme o lineárním dielektriku. Dalším případem, kdy vektory  $\mathbf{P}$  a  $\mathbf{E}$  nejsou kolineární, jsou anizotropní dielektrika. Speciálním případem lineárních dielektrik jsou lineární izotropní dielektrika, pro která platí

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E} . \quad (2.9)$$

Veličina  $\chi_e$  se nazývá elektrická susceptibilita [3, 5]. Vzhledem k použití permitivity vakua  $\varepsilon_0$  ve vztahu (2.9) je elektrická susceptibilita bezrozměrná. Nyní tedy pro vztah indukce a intenzity pro slabá elektrická pole dostáváme

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad (2.10)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 + \chi_e) . \quad (2.11)$$

Veličinu  $\varepsilon$  nazýváme permitivita a veličinu  $\varepsilon_r = 1 + \chi_e$  relativní permitivita (bezrozměrná veličina) [5]. Pro jiná než homogenní izotropní dielektrika ve velmi slabém poli by byl popis složitější, permitivita a susceptibilita by byly reprezentovány tenzory [5]. Běžně se však pro jednoduchost používá popis pomocí skalárních veličin.

### 2.2.4 Dielektrikum v elektrostatickém poli

Jestliže je dielektrikum vloženo do vnějšího elektrostatického pole  $\mathbf{E}_0$ , dojde k polarizaci a polarizované dielektrikum je tak zdrojem vlastního elektrického pole. Výsledné pole uvnitř dielektrika  $\mathbf{E}$  je tak součtem intenzity vnějšího pole a polarizační intenzity  $\mathbf{E}_p$ , tedy:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_p \quad (2.12)$$

Polarizační intenzita je dána vztahem

$$\mathbf{E}_p = -\frac{\mathbf{P}}{\varepsilon_0} . \quad (2.13)$$

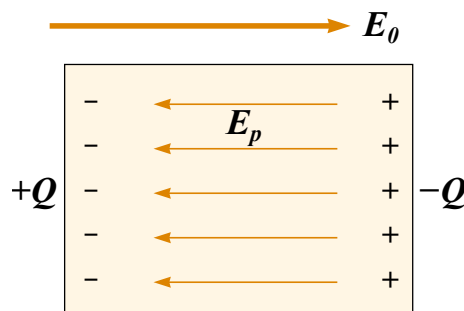
S využitím tohoto vztahu a vztahu pro polarizaci dielektrika (2.9) dostáváme

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_p = \mathbf{E}_0 - \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\mathbf{E}}{\varepsilon_0} = \mathbf{E}_0 - (\varepsilon_r - 1)\mathbf{E} \quad (2.14)$$

Odtud po úpravě máme vztah

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{E}_0}{\varepsilon_r} \quad (2.15)$$

Jestliže je tedy dielektrikum vloženo do elektrostatického pole, je toto pole zeslabeno a míru tohoto zeslabení udává relativní permitivita  $\varepsilon_r$ .



**Obrázek 2.6.** Při vložení dielektrika do vnějšího pole  $\mathbf{E}_0$  dochází k jeho polarizaci a vzniká indukované elektrické pole o intenzitě  $\mathbf{E}_p$  s opačnou orientací. Převzato z [4].

### 2.2.5 Kapacita kondenzátoru s dielektrikem

Kapacitu deskového kondenzátoru s dielektrikem snadno odvodíme z použitím výsledků ze sekce 2.1 a 2.2.4. Intenzita elektrického pole v prostoru mezi elektrodami s vloženým dielektrikem dle vztahu (2.4) bude

$$E = \frac{q}{S\varepsilon_0\varepsilon_r} \quad (2.16)$$

a hledaná kapacita deskového kondenzátoru s dielektrikem je potom

$$C = \varepsilon_0\varepsilon_r \frac{S}{d} \quad (2.17)$$

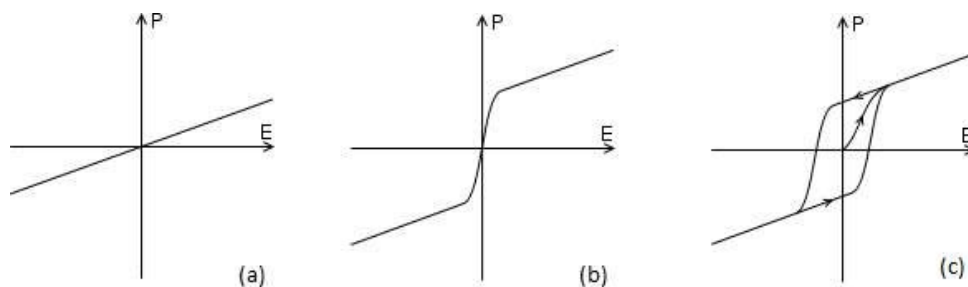
Vidíme, že kapacita bude  $\epsilon_r$ -krát větší oproti kondenzátoru bez dielektrika. Také vidíme, že kapacita nepřímo závisí na vzdálenosti elektrod. Zdá se, že pokud bychom vzdálenost  $d$  neomezeně zmenšovali, můžeme docílit libovolně velké kapacity. V praxi to však není možné, protože dojde k průrazu dielektrika a vybití náboje kondenzátoru [4]. Maximální hodnotu elektrického pole, při níž ještě nedojde k destruktivnímu průrazu, nazýváme dielektrická pevnost. Většina běžných nevodivých materiálů má vyšší dielektrickou pevnost než vzduch ( $E_{vz} = 3 \cdot 10^6 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

Použití dielektrika v kondenzátoru přináší nejen zvýšení kapacity, ale i zvýšení maximálního napětí díky vyšší dielektrické pevnosti materiálu oproti vzduchu. Dielektrikum jako součást mechanické konstrukce kondenzátoru zároveň zajišťuje oddělení elektrod a umožňuje výrazné snížení vzdálenosti mezi nimi [4].

# Kapitola 3

## Vlastnosti dielektrik

Dielektrika dělíme podle toho, zda mají jejich molekuly vlastní dipólový moment i bez přítomnosti elektrického pole, na polární nebo nepolární. Jiné dělení je možné podle závislosti polarizace dielektrika na orientaci elektrického pole na izotropní (polarizace stejná při libovolné orientaci) a anizotropní. Z charakteru této závislosti pak odvozujeme dělení na dielektrika lineární a nelineární. Zatímco u lineárních dielektrik je závislost  $P = P(E)$  lineární funkcí, u nelineárních tomu tak není, viz Obr. 3.1.



**Obrázek 3.1.** Závislost polarizace na elektrickém poli pro (a) lineární paraelektrikum, (b) nelineární paraelektrikum, (c) feroelektrikum. Převzato z [6].

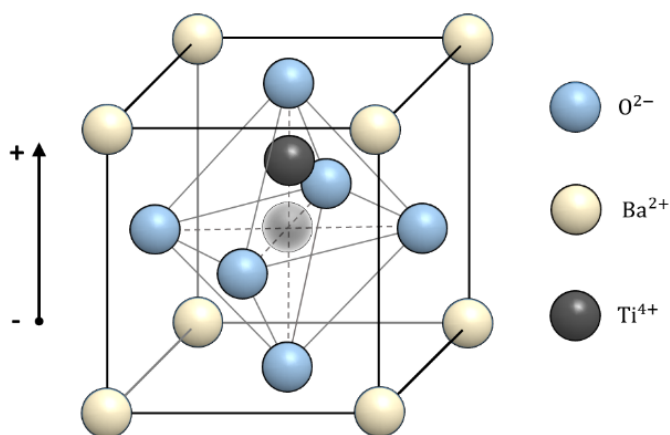
Pro dielektrika, u nichž se polarizace objevuje pouze při působení vnějšího elektrického pole (tedy nevykazují spontánní polarizaci) používáme označení paraelektrika. Do této skupiny patří všechna lineární dielektrika a některá nelineární. Skupinu nelineárních dielektrik, která vykazují spontánní polarizaci, nazýváme feroelektrika. Dalšími skupinami se specifickými vlastnostmi jsou pyroelektrika, piezoelektrika, elektrety a antiferoelektrika.

### 3.1 Feroelektrika

Aby měl materiál feroelektrické vlastnosti, musí jeho molekuly mít nenulový spontánní dipólový moment, respektive musí být přítomna spontánní polarizace. To samo o sobě však nestačí, materiál musí navíc mít doménovou strukturu, kde v každé doméně jsou elementární dipóly shodně orientované. Elementární dipólové momenty se sčítají a celá doména má tak určitý dipólový moment. Z toho vyplývá, že krystalová buňka těchto materiálů nesmí být středově souměrná, jinak by v ní nebyly přítomny potřebné elementární dipóly [7]. Příklad asymetrické krystalové buňky je na Obr. 3.2.

U feroelektrik můžeme často pozorovat spontánní polarizaci celého krystalu na makroskopické úrovni. Také se ovšem může stát, že elektrická pole jednotlivých domén se navzájem odečtou a žádnou makroskopickou polarizaci nepozorujeme [7].

U feroelektrik při kruhové změně intenzity vnějšího elektrického pole pozorujeme elektrickou hysterezi a hysterezní smyčku závislosti  $P(E)$  [3], viz Obr. 3.1. Na počátku



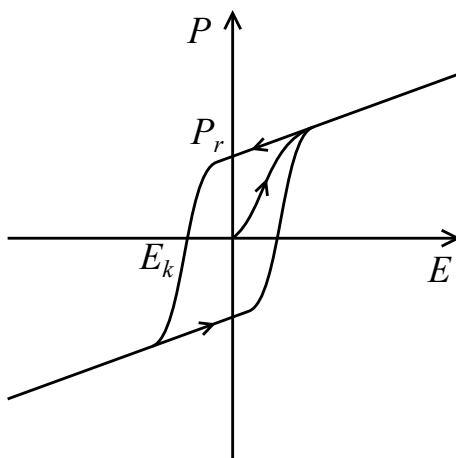
**Obrázek 3.2.** Krystalická buňka titaničitanu barnatého  $\text{BaTiO}_3$ . Posun kationtu mimo střed symetrie způsobí vznik elektrického dipólu. Převzato z [8].

předpokládáme krystal feroelektrika, který má všude  $P = 0$ . To znamená, že má náhodně orientované domény, jejichž dipólové momenty se odečtou, a na makroskopické úrovni tak nevykazuje žádnou polarizaci. Jestliže zvyšujeme intenzitu elektrického pole v kladném směru, roste i hodnota polarizace. Nejprve dochází k rozšiřování domén, jejichž vektor polarizace je orientovaný ve směru vnějšího elektrického pole. Zpočátku je tento děj reverzibilní. Poté ve strmé lineární části křivky dochází k lineárnímu nárůstu nových domén. Následně strmost křivky klesá, protože růst orientovaných domén se přibližuje svému maximum a dosahujeme stavu nasycení. V té chvíli se celý objem krystalu stává jednou doménou.

Jestliže následně budeme zeslabovat elektrické pole, zjistíme, že i při nulové intenzitě vykazujeme feroelektrikum tzv. remanentní polarizaci. Tedy při  $E = 0$  máme  $P \neq 0$  a platí

$$P = P_r, \quad (3.1)$$

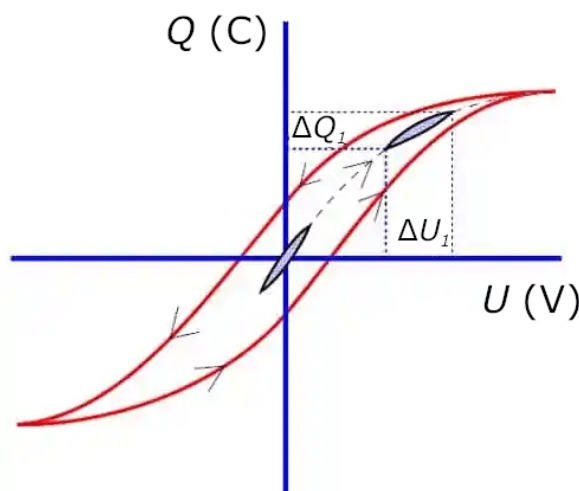
kde  $P_r$  je remanentní polarizace krystalu. Abychom docílili nulové hodnoty polarizace, musíme působit polem opačného směru o velikosti  $E = E_k$ , tuto hodnotu označujeme jako koercitivní pole. Tyto významné hodnoty jsou vyznačeny na Obr. 3.3.



**Obrázek 3.3.** Závislost polarizace na elektrickém poli pro feroelektrikum, hysterezní smyčka s vyznačenou remanentní polarizací a koercitivním polem. Podle [6].

Z této úvahy vyplývá, že relativní permitivita feroelektrika není konstantní, ale mění se (mimo jiné) v závislosti na intenzitě vnějšího elektrického pole [9]. To je důvodem závislosti kapacity na napětí u kondenzátorů, které využívají jako dielektrikum feroelektrické materiály.

U feroelektrik zaznamenáváme hysterezní smyčku pro závislost elektrické polarizace na intenzitě elektrického pole. Pro konkrétní vzorek kondenzátoru můžeme hysterezi pozorovat při měření závislosti náboje kondenzátoru na napětí,  $Q = Q(U)$ . Příklad takové závislosti je na Obr. 3.4, kde jsou navíc vyznačeny lokální hysterezní smyčky pro malé změny napětí ve dvou pracovních bodech. V nule (pro  $U = 0$  V) je malá hysterezní smyčka strmější než pro napětí  $U_1$ , tedy malá změna napětí v nule způsobí velkou změnu náboje  $\Delta Q$ . Stejně velká změna napětí při stejnosměrném napětí  $U_1$  způsobí menší změnu náboje. To znamená, že kapacita musí být při napětí  $U_1$  menší než při nulovém napětí [2].

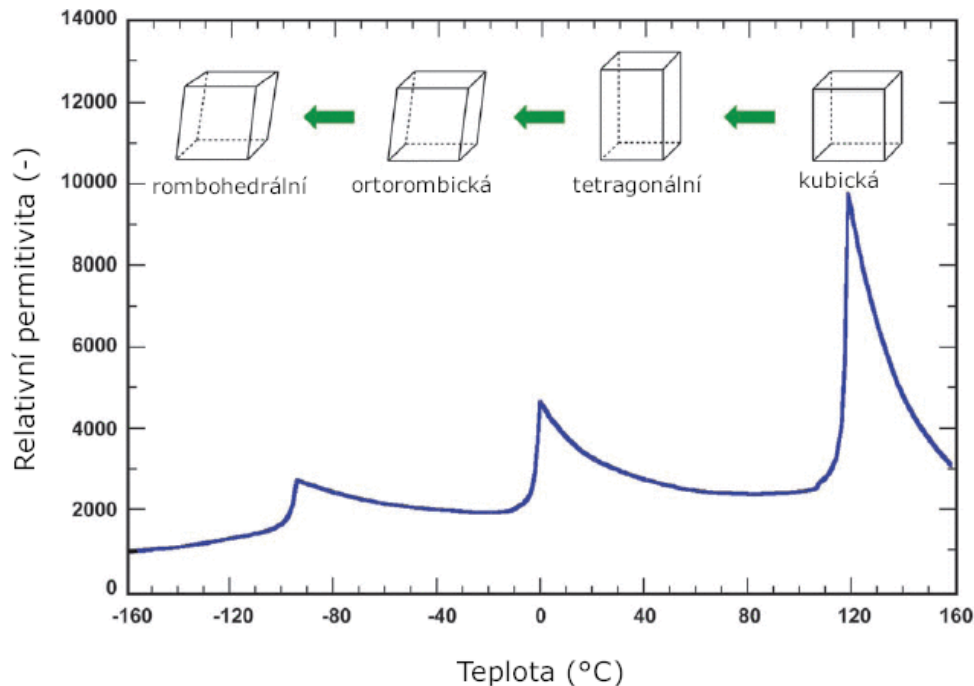


**Obrázek 3.4.** Hysterezní smyčka závislosti náboje kondenzátoru na napětí. Převzato z [2], upraveno.

Pro feroelektrika je charakteristická vysoká hodnota relativní permitivity od řádově  $10^3$  do  $10^4$ . Její hodnota ovšem závisí nejen na intenzitě elektrického pole, ale i na teplotě a u časově proměnných polí na frekvenci. U anizotropních dielektrik pak také na směru elektrického pole.

Teplotní závislost permitivity souvisí se změnami krystalické struktury. Pokud dojde k fázovému přechodu mezi různými krystalickými strukturami, pozmění se uspořádání atomů v krystalové buňce a to může vést ke změně momentu elementárních dipólů. Například jeden z nejběžnějších feroelektrických materiálů, titaničitan barnatý ( $\text{BaTiO}_3$ ), může zaujímat čtyři různé krystalové struktury – kubickou, tetragonální, ortorombickou a rombohedrální [1]. Každý fázový přechod provází výrazná anomálie (prudký nárůst) permitivity, viz Obr. 3.5. Toto chování samozřejmě není pro materiál dielektrika kondenzátoru žádoucí. Vytvořením pevného roztoku s materiály s podobnou strukturou nebo přidáním vhodných příměsí lze teplotní závislost omezit.

Feroelektrický stav se u většiny látek projevuje jen při dostatečně nízkých teplotách. Při teplotách vyšších, než je tzv. Curieova teplota, dochází k rozpadu domén a látka přechází do paraelektrického stavu. To je doprovázeno výrazným snížením relativní



**Obrázek 3.5.** Závislost relativní permitivity na teplotě s uvedenými krystalografickými soustavami titaničitanu barnatého ( $\text{BaTiO}_3$ ). Převzato z [1].

permitivitu, která je pak dána Curieho-Weissovým zákonem podle vztahu

$$\varepsilon_r = \frac{C_K}{T - T_0}, \quad (3.2)$$

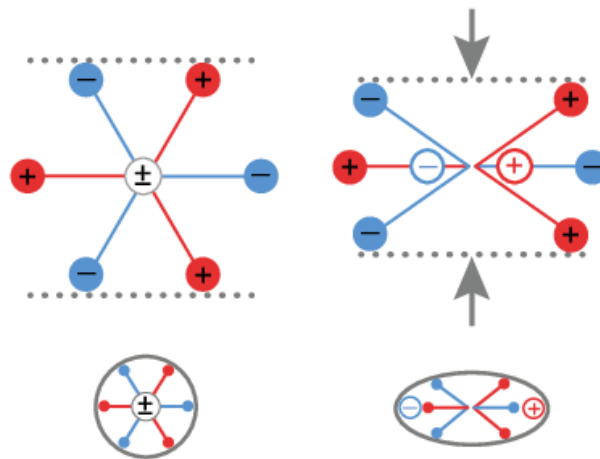
kde  $C_K$  je Curieho konstanta (K),  $T$  je absolutní teplota materiálu (K) a  $T_0$  je charakteristická teplota (K) [9]. Existují ale i feroelektrika, u nichž je doménová struktura zachována až do teploty tání, a nemají tedy Curieovu teplotu [9].

## 3.2 Elektrety

Elektrety jsou dielektrika, která jsou obdobou permanentních magnetů pro elektrické pole. Pokud jsou v tekutém stavu a během tuhnutí vystaveny silnému elektrickému poli, pozorujeme u nich poté polarizaci, kterou si uchovávají i bez přítomnosti vnějšího elektrického pole [3].

## 3.3 Piezoelektrika

Při mechanickém namáhání (tlakem, tahem, ohybem) některých krystalů dochází ke změně elektrické polarizace krystalu. To se projeví jako indukovaný povrchový elektrický náboj a elektrické napětí mezi deformovanými plochami. Tento úkaz nazýváme piezoelektrickým jevem a látky, u kterých se projevuje, nazýváme piezoelektrika. Nutnou podmínkou pro vznik piezoelektrického jevu je nesymetrie elementární krystalové buňky [3]. To splňují všechna feroelektrika a navíc i některé další látky, například křemen. Při piezoelektrickém jevu dochází k přeměně mechanické energie na elektrickou. Toho se v praxi využívá k detekci deformací, sil a vibrací piezoelektrickými senzory. Obráceným jevem je pak elektrostrikce, tedy přeměna elektrické energie na mechanickou. Při působení elektrického pole na iontové krystalové mřížky dochází při polarizaci krystalu k deformaci krystalové mřížky a tím ke změně rozměrů krystalu [3].



**Obrázek 3.6.** Piezoelektrický jev, elektrický dipól vzniká posunem těžišť kladného a záporného náboje mimo střed symetrie při mechanické deformaci. Převzato z [10].

### 3.4 Pyroelektrika

U pyroelektrik dochází vlivem změny teploty ke vzniku povrchových nábojů (pyroelektrický jev). Při zahřátí dochází k objemovým změnám, respektive změnám v krystalové mřížce, a tím ke vzniku těchto povrchových nábojů vlivem elementárních dipólů [3].



## Kapitola 4

### Vícevrstvé keramické kondenzátory

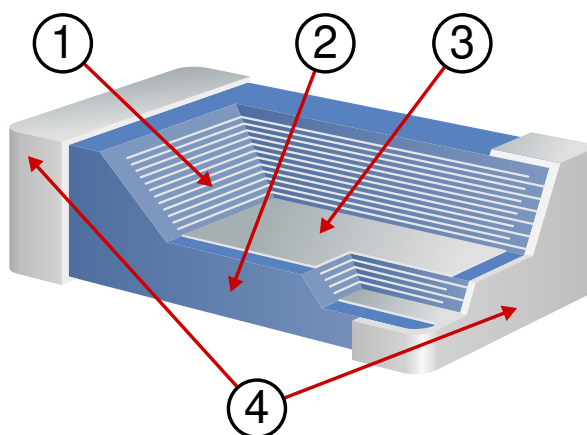
Existuje velké množství různých typů kondenzátorů, které se liší podle použitého dielektrika, konstrukce, parazitních vlastností, bezpečnostních tříd, polarity a mnoha dalších kritérií. Není cílem poskytnout zde úplnou a vyčerpávající klasifikaci. Jen pro ilustraci, běžně používané typy kondenzátorů jsou:

- svitkové foliové
- svitkové papírové
- elektrolytické
- keramické
- olejové
- slídové
- vzduchové

Keramické kondenzátory jsou specifické použitým materiálem dielektrika. Nejčastěji se používají feroelektrické materiály pro svou vysokou hodnotu relativní permitivity. Od použitého dielektrika se pak odvíjejí elektrické vlastnosti kondenzátorů.

#### 4.1 Konstrukce a výrobní proces

Keramické kondenzátory můžeme rozdělit na jednovrstvé (single layer ceramic capacitor, SLCC) a vícevrstvé (multilayer ceramic capacitor, MLCC). Výhodou jednovrstvé konstrukce je jednodušší a levnější výroba, širší rozsah pracovních napětí a možnost použití ve výkonových aplikacích. Naproti tomu vícevrstvé kondenzátory disponují vyšší kapacitou vzhledem k objemu, mají nižší ekvivalentní sériový odpor a je u nich možná efektivní miniaturizace [2].



**Obrázek 4.1.** Struktura vícevrstvého keramického kondenzátoru: 1 – vrstva dielektrika, 2 – vnější keramická vrstva, 3 – elektroda, 4 – vývody kondenzátoru. Převzato z [11].

Většina keramických kondenzátorů na trhu je vyráběna vícevrstvou technologií. Principiálně jde o paralelní kombinaci většího množství deskových keramických kondenzátorů navrstvených na sebe (viz Obr. 4.1), dochází zde ke zvětšení efektivní plochy elektrod a zmenšení vzdálenosti mezi nimi. Sousední vodivé vrstvy jsou vždy připojené k opačným vývodům kondenzátoru a tvoří tak elektrody pro každou jednotlivou vrstvu dielektrika. Právě díky kombinaci velké plochy elektrod, malé vzdálenosti mezi nimi a vysoké permitivity dielektrika mají vícevrstvé keramické kondenzátory velkou kapacitu vzhledem k objemu.

Tento konstrukční princip se zdá jednoduchý, ale výrobní proces vícevrstevných keramických kondenzátorů je komplikovaný. Základem výroby je sítotisk, pak laminace vrstev, řezání, vypalování a následné sintrování a následně kontaktování elektrod. Schéma procesu výroby je na Obr. 4.2

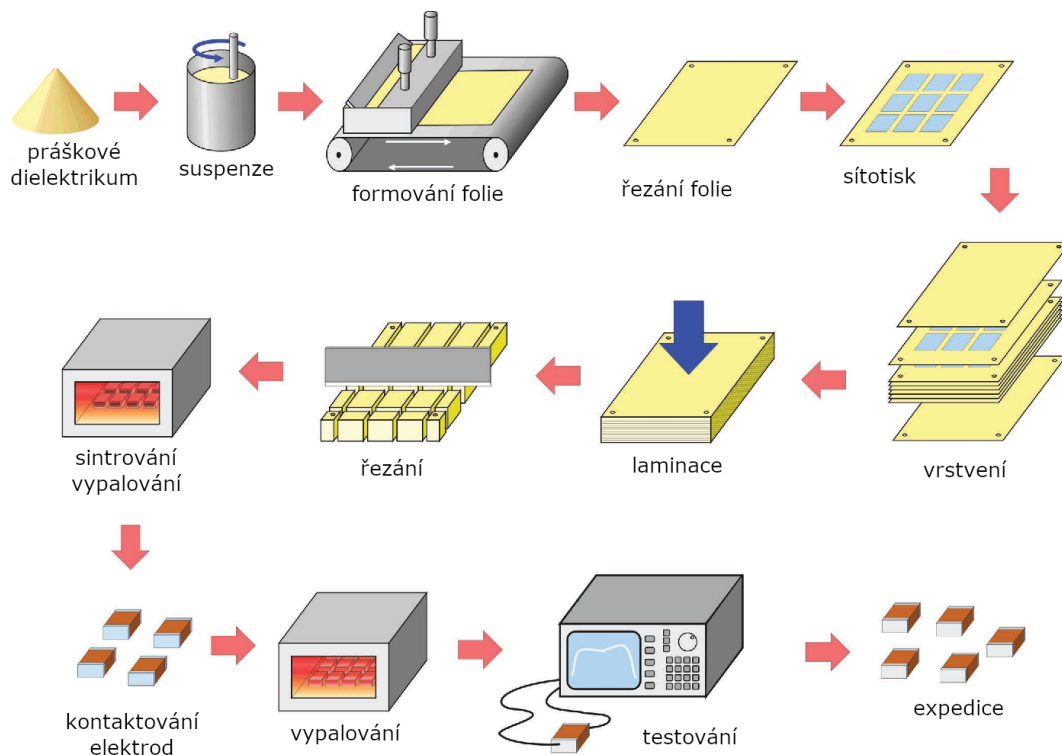
Na začátku výrobního procesu je příprava materiálu dielektrika. Dielektrický materiál je zpravidla jemně rozemletý na prach. Ten se smísí s rozpouštědly, dispergátorem, pojivem a změkčovadly, aby se vytvořila homogenní suspenze. Ta se poté odlévá do tenké souvislé fólie, která se nechá vyschnout. Metodou sítotisku se na ni nanese vodivá pasta ve specifickém vzoru pro vytvoření elektrod. Tyto potištěné folie se skládají na sebe, čímž se docílí vícevrstevné struktury, a zalaminují se. Následuje rozřezání na malé bloky, které už odpovídají samotným kondenzátorům. Ty se poté vypalují, aby se odstranily organické látky přítomné v pojivu. Dalším krokem je spékání/sintrování, čímž dojde k trvalému pevnému spojení vrstev dielektrika s vodivými vrstvami. Posledním krokem je aplikování kovových vývodů, které se napojí na vrstvy elektrod vyvedené na protilehlých stranách kondenzátoru a zajistí tak elektrické propojení s vnějším obvodem. Ty se ještě pokovují několika vrstvami. Tím je výroba hotová a následuje kontrola a testování [1].

## 4.2 Vlastnosti

Od použitého dielektrika se odvíjejí elektrické vlastnosti kondenzátorů a podle nich rozlišujeme jednotlivé třídy. Existují dva standardy, IEC/EN 60384-1 a EIA RS-198. Standard IEC rozlišuje třídy 1, 2 a 3. Pro třídu 1 je typická vysoká stabilita a nízké ztráty, je možné použití v rezonančních obvodech. Třída 2 nabízí vyšší kapacitu na jednotku objemu a je vhodná pro použití jako vyhlazovací, odrušovací a vazební kondenzátory. Do třídy 3 pak spadají tzv. kondenzátory s bariérovou vrstvou, které mají extrémně vysokou hodnotu relativní permitivity a díky tomu i vyšší kapacitu na jednotku objemu než třída 2, ale nyní se již běžně nepoužívají [2].

Standard EIA pak rozlišuje třídy I, II a III, které přibližně odpovídají třídám standardu IEC.

- Třída I – Do třídy I patří kondenzátory s dielektriky, jejichž relativní permitivita je nízká, v rozmezí od pěti do několika set. Zároveň se vyznačují nízkými ztrátami. Obvykle mívají lineární závislost permitivity na teplotě. Běžnými materiály jsou oxid titaničitý ( $\text{TiO}_2$ ) a titaničitany či zirkoničitany (např.  $\text{CaTiO}_3$ ,  $\text{SrZrO}_3$ ). Použitím příměsí lze dosáhnout speciálních vlastností dielektrika, například nulové teplotní závislosti relativní permitivity.
- Třída II – Dielektrika v třídě II mají vysokou relativní permitivitu, obvykle v rozsahu od 1000 do více než 20 000. Zpravidla se jedná o feroelektrika a vykazují tak vyšší ztráty než třída I. Významnou vlastností této třídy dielektrik je střední až vysoká teplotní závislost relativní permitivity. Základním materiálem je titaničitan barnatý ( $\text{BaTiO}_3$ ), který coby feroelektrikum dosahuje vysoké hodnoty relativní permitivity,



**Obrázek 4.2.** Schéma výroby vícevrstevých keramických kondenzátorů. Převzato z [1], upraveno.

běžně i více než 10 000. Opět se přidávají různé příměsi pro dosažení požadovaných vlastností. Při současném trendu ve zmenšování rozměrů kondenzátorů a tím i snižování tloušťky dielektrické vrstvy je nutné snižovat i hrubost zrn dielektrika, tedy snižovat jejich velikost. To má u  $\text{BaTiO}_3$  významný vliv na dielektrické vlastnosti. Zároveň se ztenčováním vrstvy dielektrika roste intenzita elektrického pole v dielektriku. Tím se začíná výrazněji projevovat závislost dielektrických vlastností na napětí. Další skupinou jsou relaxorová feroelektrika, například  $\text{PbNbO}_3$ . Tyto materiály se však kvůli obsahu olova a jeho těkání při přípravě příliš nepoužívají. Relativní permitivita u nich sice dosahuje až 20 000, vykazují však navíc silnou závislost permitivity na frekvenci [1].

- Třída III – Dielektrika třídy III využívají bariérových vrstev. Pomocí chemických procesů je dosaženo toho, že každé zrno práškového dielektrika je tvořeno vodivým jádrem a tenkou nevodivou bariérovou vrstvou. Díky tomu jsou dielektrické vrstvy extrémně tenké a je možné dosáhnout velmi vysoké hodnoty kapacity, ovšem při poměrně nízkém pracovním napětí. Třída III se principem funkce a jiným způsobem výroby odlišuje od běžných vícevrstevých keramických kondenzátorů [1].

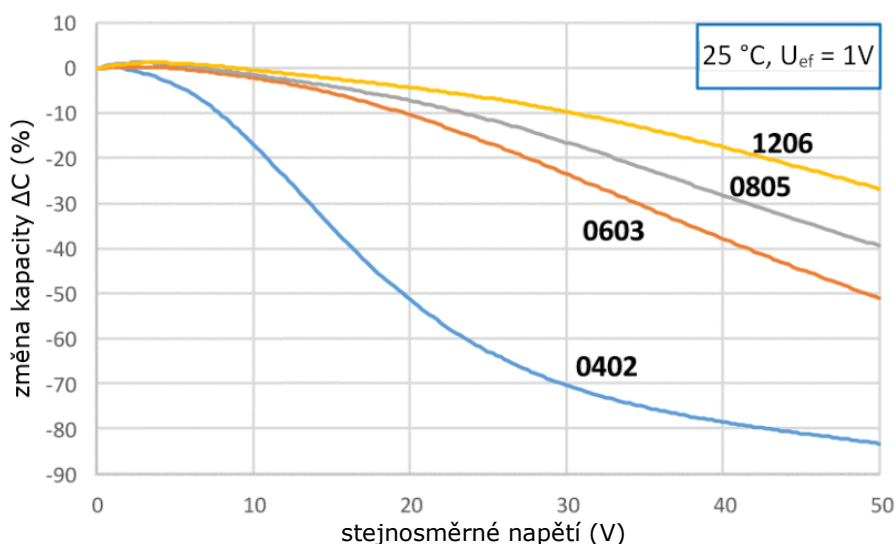
#### 4.2.1 Závislost kapacity na napětí

U vícevrstevých keramických kondenzátorů třídy II se objevuje závislost kapacity na stejnosměrném napětí. Kapacita, kterou můžeme měřit připojením střídavého harmonického napětí o malé amplitudě na kondenzátor, bude tedy funkcí stejnosměrného napětí přiloženého zároveň na tento kondenzátor.

Jak již bylo řečeno výše, kondenzátory třídy II využívají feroelektrická dielektrika, nejčastěji jde o titaničitan barnatý. Jeho molekuly jsou bez přítomnosti vnějšího elek-

trického pole symetrické a nevykazují tedy žádný dipólový moment. Krystalická mřížka je v tomto stavu kubická. Ve slabém elektrickém poli jsou vzniklé elektrické dipóly orientovány náhodně a dochází ke spontánní polarizaci. Za těchto podmínek je permitivita velmi vysoká. V silnějším elektrickém poli je krystalická mřížka deformována, což vede k polarizaci molekul. Tyto elektrické dipóly se orientují podle vnějšího elektrického pole a mění krystalovou mřížku na tetragonální. Tato polarizace výrazně snižuje relativní permitivitu dielektrika, a tím způsobuje významný pokles kapacity [12].

Protože elektrická polarizace závisí na intenzitě elektrického pole, a ta je dána podílem napětí a vzdálenosti elektrod, měli bychom u tlustších vrstev dielektrika při stejném napětí pozorovat menší pokles kapacity. Pokud tedy chceme minimalizovat pokles kapacity se stejnosměrným napětím, měli bychom upřednostňovat kondenzátory v rozměrově větších pouzdrech [12]. Závislost kapacity kondenzátoru na napětí pro různá pouzdra, ale se stejným materiálem dielektrika a stejnou nominální kapacitou je zachycena na Obr. 4.3.

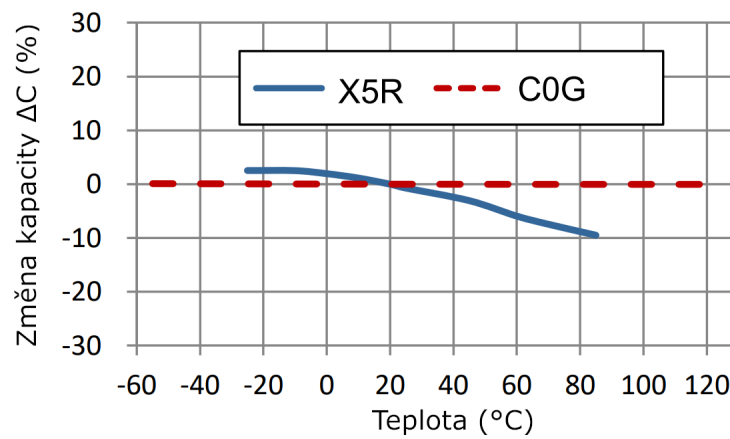


**Obrázek 4.3.** Ukázka závislosti kapacity na napětí pro kondenzátory 100 nF X7R v různých pouzdrech (měřeno při teplotě 25 °C,  $U_{ef} = 1$  V), převzato z [12].

Na rozdíl od stejnosměrného napětí, střídavé harmonické napětí způsobuje u kondenzátorů třídy II nárůst kapacity. Při dostatečně malých amplitudách pozorujeme nárůst kapacity, po překročení určité kritické hodnoty pak pokles zpět na nominální hodnotu či ještě níže [2].

#### 4.2.2 Závislost kapacity na teplotě a na frekvenci

Jak již bylo zmíněno na začátku sekce 4.2, vícevrstvé keramické kondenzátory vykazují závislost kapacity na teplotě. Zde velmi záleží na tom, o jakou třídu dielektrik se jedná, třídy jsou specifikovány právě podle teplotních závislostí. Pro třídu I je typická lineární závislost kapacity na teplotě a nízký teplotní koeficient (např. kondenzátory C0G, NP0), a je tak možné použít tyto kondenzátory pro teplotní kompenzaci. Oproti tomu kondenzátory třídy II (např. X5R, X7R) vykazují silnou závislost kapacity na teplotě. Může docházet nejen k poklesu, ale i k nárůstu kapacity se změnou teploty, záleží na konkrétním dielektriku [13]. Srovnání ukazuje Obr. 4.4.



**Obrázek 4.4.** Ukázka závislosti kapacity na teplotě pro kondenzátory C0G (třída I) a X5R (třída II), převzato z [13].

Kapacita keramických kondenzátorů navíc závisí i na frekvenci střídavého harmonického napětí. Zpravidla je v třídě II kapacita při frekvencích do 100 kHz nižší než nominální, pro vyšší frekvence se pak naopak zvyšuje [14].

# Kapitola 5

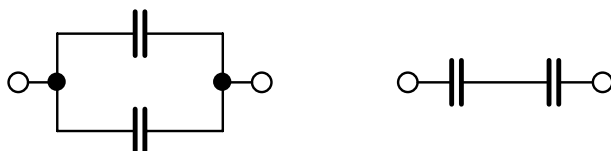
## Kondenzátor v elektrickém obvodu

Účelem této kapitoly je popsat chování kondenzátoru coby pasivního prvku v elektrickém obvodu. V obvodech často najdeme více kondenzátorů v různých typech zapojení. Pro sériovou a paralelní kombinaci lze snadno určit výslednou ekvivalentní kapacitu metodami popsány dále. Kondenzátory nikdy nejsou ideální, kromě kapacity mají vždy parazitní parametry. Protože každý vodič má z principu indukčnost a odpor, budou se tyto vlastnosti u kondenzátorů projevovat. Tyto parazitní parametry zahrnujeme do modelů reálných součástek.

Kondenzátor se v obvodech chová jako prvek akumulující energii. To vede ke vzniku přechodných dějů. Od toho se pak odvíjí i chování kondenzátoru v obvodech střídavého napětí.

### 5.1 Paralelní a sériové zapojení

Schématická značka kondenzátoru odráží konstrukci nejběžnějšího modelu kondenzátoru – dvě paralelní deskové elektrody. Kondenzátor je jednobran (má pouze jednu dvojici svorek) a tudíž můžeme kondenzátory řadit sériově nebo paralelně (Obr. 5.1).



**Obrázek 5.1.** Paralelní a sériové zapojení dvou kondenzátorů.

V paralelní kombinaci jsou napětí na svorkách všech kondenzátorů stejná. Každý kondenzátor se nabije příslušným nábojem  $Q_i$ , který je dán jeho kapacitou  $C_i$  a napětím na svorkách podle vzorce

$$Q_i = C_i U . \quad (5.1)$$

Celkový náboj všech kondenzátorů paralelní kombinace tedy bude dán součtem [4]

$$Q = \sum_{i=1}^n C_i U = U \sum_{i=1}^n C_i \quad (5.2)$$

Tuto kombinaci nahradíme jedním kondenzátorem s kapacitou  $C_{eq}$ . Aby byl efekt tohoto kondenzátoru na chování obvodu stejný jako u dané kombinace, musí být na něm stejný náboj, tedy

$$U \sum_{i=1}^n C_i = C_{eq} U \quad (5.3)$$

Pokud bychom tedy nahradili  $n$  kondenzátorů jedním kondenzátorem s kapacitou

$$C_{eq} = \sum_{i=1}^n C_i, \quad (5.4)$$

náboj na něm bude stejný jako na paralelní kombinaci a efekt tohoto kondenzátoru na chování obvodu musí být stejný jako u dané kombinace. Odtud vidíme, že kapacity jednotlivých kondenzátorů se sčítají. Díky součtu je výsledná kapacita vždy větší než kapacita libovolného jednotlivého kondenzátoru [4].

Pro sériové zapojení vycházíme z předpokladu, že napětí na sériové kombinaci a na ekvivalentní kapacitě  $C_{eq}$  jsou shodná. Přitom součet napětí na jednotlivých kondenzátorech musí být roven napětí na jejich kombinaci, tedy

$$U = \sum_{i=1}^n U_i. \quad (5.5)$$

Protože jsou kondenzátory v sérii, musí jimi protékat stejný proud. Náboj je s proudem svázán přes integrál vztahem

$$Q(t) = \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau. \quad (5.6)$$

Všemi kondenzátory při jejich nabíjení tedy protéká stejný proud a proto se i nabijí na stejnou hodnotu náboje, tedy

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = Q \quad (5.7)$$

Vidíme že zde nezáleží na počtu kondenzátorů v sériové kombinaci, všechny se nabijí na stejnou hodnotu náboje. V triviálním případě, máme-li pouze jeden kondenzátor s kapacitou  $C_{eq}$  a nabíjíme ho stejným proudem, musí se také nabít nábojem  $Q$ . Z rovnosti pro napětí na kombinaci a na ekvivalentní kapacitě sestavíme rovnici

$$\frac{Q}{C_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{C_i}, \quad (5.8)$$

z níž dostaneme vztah pro ekvivalentní kapacitu

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}. \quad (5.9)$$

Odtud vidíme, že ekvivalentní kapacita pro sériovou kombinaci je vždy menší než libovolná jednotlivá kapacita v dané kombinaci [4]. Pro kapacitu dvou kondenzátorů v sériovém zapojení pak platí zjednodušený vztah

$$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}. \quad (5.10)$$

## 5.2 Přechodné děje prvního řádu

K přechodným dějům dochází v případě připojení stejnosměrných zdrojů do obvodu s akumulací prvky. Obvodové veličiny se v čase vyvíjejí, až obvod dosáhne nového ustáleného stavu. Pro nalezení funkcí obvodových veličin musíme řešit diferenciální rovnice, protože napětí a proud na akumulacím prvku jsou svázány přes integrál (resp. derivaci). Počet akumulacích prvků v obvodu zpravidla určuje řád diferenciální rovnice a tím i řád přechodného děje. Řád přechodného děje ale může být i menší, záleží na konkrétním zapojení obvodu [15].

### 5.3 Obvody v harmonickém ustáleném stavu

Kondenzátor je setrvačný prvek, akumuluje energii. Vztah mezi napětím a proudem na kondenzátoru je dán integrálem, respektive derivací podle času [15]:

$$i = C \frac{du}{dt}, \quad u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau + u(0). \quad (5.11)$$

Jestliže je ideální kondenzátor připojen ke zdroji napětí s časovým průběhem  $u_C(t) = U_m \sin(\omega t)$ , určíme proud jako jeho derivaci:

$$i_C(t) = U_m \omega C \cos(\omega t) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5.12)$$

Odtud vidíme, že proud kondenzátorem předbíhá napětí o fázový posun  $\pi/2$ . Tvar a frekvence harmonického signálu se zachovává, mění se pouze jeho amplituda a fázový posun. Pro amplitudu proudu a napětí dostáváme vztah

$$I_m = U_m \omega C. \quad (5.13)$$

Pro popis obvodů v harmonickém ustáleném stavu často používáme popis ve frekvenční oblasti pomocí fázorů namísto vyjádření v časové oblasti. Fázor  $\hat{U}$  je pro harmonickou veličinu  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$  definován vztahem [15]

$$\hat{U} = U_m e^{j\varphi}. \quad (5.14)$$

S použitím fázorů můžeme pro vztah mezi napětím a proudem na kondenzátoru psát

$$\hat{U}_C = \frac{\hat{I}_C}{j\omega C} = \hat{Z}_C \hat{I}_C, \quad (5.15)$$

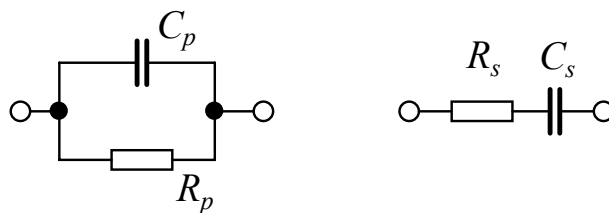
kde  $\hat{Z} = R + jX$  ( $\Omega$ ) je impedance. Reálná složka impedance  $R = \Re\{\hat{Z}\}$  je rezistance a imaginární složka  $X = \Im\{\hat{Z}\}$  je reaktance. Reaktance může být buď induktivní nebo kapacitní [15]:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (5.16)$$

kde  $\omega$  ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) je úhlová frekvence,  $L$  (H) je indukčnost. Převrácenou hodnotu impedance nazýváme admitancí a značíme ji  $\hat{Y}$  (S). Pro admitanci platí  $\hat{Y} = G + jB$ , kde  $G = \Re\{\hat{Y}\}$  je konduktance a  $B = \Im\{\hat{Y}\}$  je susceptance [15].

### 5.4 Model a parazitní parametry

Kondenzátor je stejně jako rezistor, cívka nebo transformátor pasivním prvkem elektrického obvodu. Pro popis reálných elektrických vlastností zavádíme náhradní schémata. Nejčastěji používáme paralelní schéma tvořené kombinací kapacity a ztrátové vodivosti (respektive odporu) a sériové schéma složené z kapacity a ztrátového odporu.



**Obrázek 5.2.** Paralelní a sériové náhradní schéma kondenzátoru.



Ačkoliv jde o zjednodušení, protože zde parazitní vlastnosti reprezentujeme jako prvky obvodu se soustředěnými parametry, popisují tato náhradní schémata dobře vlastnosti reálných prvků. Hodnoty parazitních parametrů jsou zpravidla specifické pro danou frekvenci nebo frekvenční pásmo.

Pro kondenzátor definujeme ztrátový činitel  $\text{tg}\delta$ . Pro paralelní náhradní schéma je dán vztahem [15]

$$\text{tg}\delta = \frac{X_p}{R_p} = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (5.17)$$

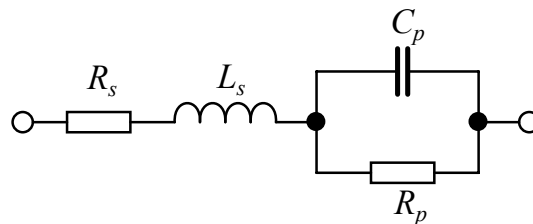
a pro sériové náhradní schéma

$$\text{tg}\delta = \frac{R_s}{X_s} = \omega R_s C_s . \quad (5.18)$$

Jelikož musí být admitance nebo impedance pro daný kondenzátor shodná nehledě na to, jaké použijeme náhradní schéma, je možné přepočítat hodnoty prvků z paralelního schématu na sériové a naopak pomocí vztahů [16]

$$C_s = C_p(1 + \text{tg}^2\delta) , \quad R_s = \frac{1 + \text{tg}^2\delta}{G_p \text{tg}^2\delta} . \quad (5.19)$$

Při vysokých frekvencích se uplatňují i další parazitní vlastnosti, u kondenzátoru je to sériový odpor, sériová indukčnost a svod kondenzátoru. Náhradní schéma je na Obr. 5.3. Hodnoty prvků náhradního schématu určujeme buď měřením (např. rezonanční frekvence), nebo je lze zjistit z katalogu výrobce.



**Obrázek 5.3.** Náhradní schéma kondenzátoru pro vysoké frekvence, podle [15].

# Kapitola 6

## Měření impedancí

Jelikož kapacita se ve střídavém obvodu projevuje jako reaktance, a ta může být i induktivní, budou zde obecně rozebrány metody měření impedancí. Zároveň nikdy neměříme pouze reaktanci, protože všechny reálné obvodové prvky mají jako parazitní parametr odpor. Zvláštní sekce je věnována měření kapacity, respektive impedance, za speciálních podmínek – tedy například při nenulovém stejnosměrném napětí na této impedanci (ve smyslu obvodového prvku).

### 6.1 Klasifikace měřících metod

Podle způsobu, jakým určujeme měřenou veličinu rozlišujeme měřící metody na přímé a nepřímé:

- Přímé – výsledek získáme odečtením údaje jediného přístroje, veličinu lze tedy přímo měřit. Příkladem přímé metody je měření proudu ampérmetrem.
- Nepřímé – výsledek dostáváme jako funkční hodnotu výpočtem z hodnot jiných veličin, které jsme získali přímým měřením. Příkladem je měření odporu Ohmovou metodou [16].

Dále pak podle způsobu realizace měření rozlišujeme základní měřící metody a srovnávací metody.

- Základní měřící metody – měřenou veličinu stanovujeme měřením základních veličin jako je čas, hmotnost, délka a podobně.
- Srovnávací metody – měřenou veličinu stanovujeme srovnáním s veličinou stejného druhu a známé hodnoty [16]. Tyto metody dále dělíme na:
  - Diferenční metody – měřená veličina se porovnává se shodnou veličinou nepatrně odlišné hodnoty a měřením se zjišťuje pouze tato odchylka.
  - Substituční metody – měřená veličina se nahrazuje totožnou veličinou se známou hodnotou tak, aby byly údaje indikačního přístroje stejné.
  - Nulové metody – měřená hodnota se nalezne pomocí matematických vztahů z rovnováhy v měřicím obvodu dosažené změnou jedné nebo více veličin. Rovnováha je přitom indikována nulovou výchylkou indikačního přístroje. Příkladem jsou vyvážené můstky pro měření odporů [16].

Zvláštní skupinou metod jsou pak rezonanční měřící metody, kdy měřená veličina určuje z hodnot parametrů obvodu ve stavu rezonance [16].

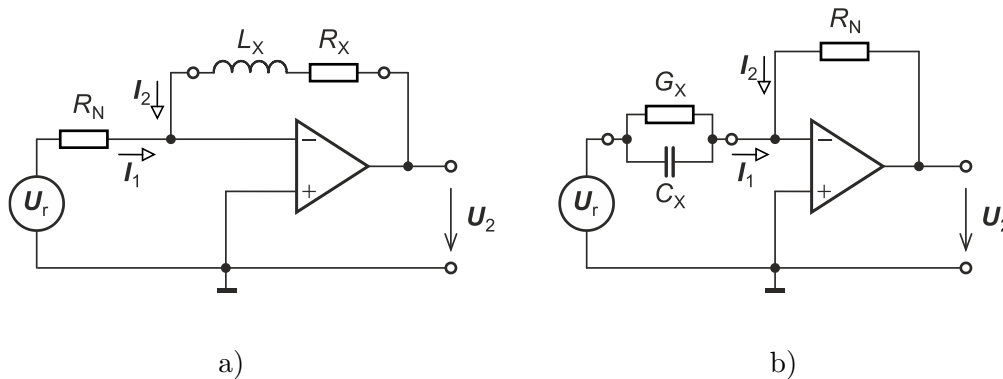
### 6.2 Metody měření impedancí

Impedance je zásadní veličina používaná pro charakterizaci obvodů, elektrických prvků a materiálů pro jejich výrobu. Impedancí rozumíme odpor, který obvod nebo prvek klade průchodu střídavého proudu o dané frekvenci. Jelikož je to komplexní veličina,

potřebujeme pro nalezení její hodnoty měřit alespoň dvě různé veličiny. Moderní přístroje často měří reálnou a imaginární část komplexní impedance a poté je přepočítají na požadované parametry, jako je modul impedance  $|Z|$ , fázový posun  $\varphi$ , modul admittance  $|Y|$ , odpor, reaktance, konduktance, susceptance, kapacita nebo indukčnost [8]. Běžně dnes měříme impedanci pomocí číslicového RLC měřiče, jinou možností je například měření pomocí můstků.

### 6.2.1 Číslicový RLC měřič

Základním principem nejjednodušších RLC měřičů je převod impedance, popřípadě admittance na fázor napětí. To zajišťují převodníky impedance/admittance na napětí, jejich principiální schéma je na Obr. 6.1.



**Obrázek 6.1.** Převodník impedance na napětí (a) a převodník admittance na napětí (b).  
Převzato z [16].

Pro měření prvků sériového náhradního schématu je vhodný převodník impedance na napětí a pro paralelní schéma zase převodník admittance na napětí. Podrobněji rozebereme převodník  $\mathbf{Y} \rightarrow \mathbf{U}$ , který se využívá pro měření parametrů kondenzátorů a rezistorů. Z rovnosti proudů  $I_1$  a  $I_2$  dostáváme vztah

$$U_1 \mathbf{Y}_x = -\frac{U_2}{R_N} \quad (6.1)$$

kde  $\mathbf{Y}_x = G_x + j\omega C_x$  je komplexní admittance kondenzátoru. Dosazením výrazu pro admittance a oddělením reálné a imaginární složky dostáváme [16]

$$G_x = \frac{\Re\{U_2\}}{U_1 R_N}, \quad C_x = -\frac{\Im\{U_2\}}{\omega U_1 R_N}. \quad (6.2)$$

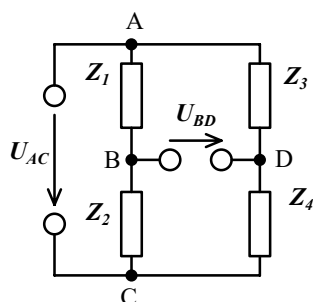
Při měření v praxi používáme stínění, které potlačuje vliv rušivých elektromagnetických polí. Zároveň využíváme čtyřsvorkové zapojení, kdy jsou odděleny napěťové a proudové svorky. To je nezbytné zejména pro měření malých impedancí [16], způsob připojení měřeného prvku ke svorkám RLC metru má v praxi velký vliv na přesnost měření a rozsah měřitelných hodnot [17]. Označení svorek vychází z anglické terminologie:  $H_C$  – High, Current;  $H_V$  – High, Voltage;  $L_C$  – Low, Current;  $L_V$  – Low, Voltage. Pro potlačení parazitních parametrů přívodních vodičů se u RLC měřičů provádí číslicová korekce při zkratovaných a rozpojených měřicích svorkách [16].

RLC měřiče založené na převodnicích  $\mathbf{Z} \rightarrow \mathbf{U}$  a  $\mathbf{Y} \rightarrow \mathbf{U}$  lze kvůli vlastnostem reálných operačních zesilovačů použít pro frekvence do řádově desítek kHz. Pro použití vyšších

frekvencí je nutné použít složitější kompenzační obvody. Princip činnosti je podobný, ale místo jednoduchého operačního zesilovače se používá detektor nuly a řízený zdroj kompenzačního napětí s galvanicky odděleným výstupem. Ten udržuje na svorce  $L_V$  nulové napětí vůči zemi, tzv. virtuální nulu [16]. Toto zapojení se někdy označuje jako automaticky vyvažovaný můstek [18].

### 6.2.2 Můstky Wheatstoneova typu

Princip Wheatstoneova můstku pro měření impedancí je shodný se stejnosměrným můstkem s tím rozdílem, že ho napájíme střídavým napětím a nulový indikátor musí být schopen měřit střídavé napětí. Zapojení je znázorněno na Obr. 6.2.



**Obrázek 6.2.** Wheatstoneův můstek pro měření impedancí. Podle [16].

Uzly v můstku jsou označeny  $A$ ,  $B$ ,  $C$  a  $D$ . Mezi body  $A$  a  $C$  připojíme napájecí napětí a mezi body  $B$  a  $D$  zapojíme nulový indikátor, což může být voltmetr měřící střídavé napětí. Podmínka rovnováhy pak je

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 . \quad (6.3)$$

Oddělením reálné a imaginární složky dostáváme dvojici podmínek

$$\Re\{Z_1 Z_4\} = \Re\{Z_2 Z_3\} , \quad \Im\{Z_1 Z_4\} = \Im\{Z_2 Z_3\} . \quad (6.4)$$

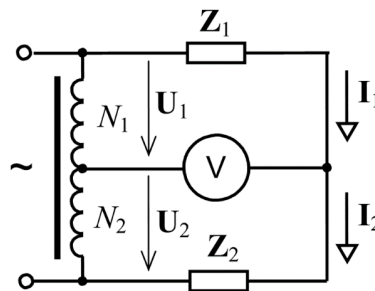
Tyto dvě podmínky musí být pro vyvážení můstku splněny. Proto je potřeba vyvažovat takovýto můstek dvěma různými prvky. Dnes se můstky tohoto typu pro měření indukčností nepoužívají kvůli nízké přesnosti. Jsou však využívány jako nevyvážené pro měření neelektrických veličin s kapacitními a indukčnostními senzory [16]. Pro měření kapacit je určen například Wienův nebo Scheringův můstek [17].

### 6.2.3 Transformátorové můstky

Transformátorové měřicí můstky se dnes používají pouze při přesných měřeních pro metrologii [16]. Princip je podobný Wheatstoneovu můstku, impedance  $Z_3$  a  $Z_4$  jsou zde nahrazeny indukčním děličem (autotransfátorem). Na indukčním děliči se nastavuje počet závitů  $N_1$  a  $N_2$  tak, aby nulovým indikátorem neprotékal proud, pak platí  $I_1 = I_2$ . Odtud máme vztah

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} . \quad (6.5)$$

Předpokladem je, že impedance indukčního děliče je zanedbatelná oproti impedancím  $Z_1$  a  $Z_2$ . Zjednodušené schéma částečně vyváženého transformátorového můstku je na Obr. 6.3. V praxi se používají složitější zapojení, která umožňují vyvažovat reálnou i imaginární složku impedance a přidává se i nezbytné stínění [16].



**Obrázek 6.3.** Principiální schéma transformátorového můstku pro měření impedancí. Převezato z [16].

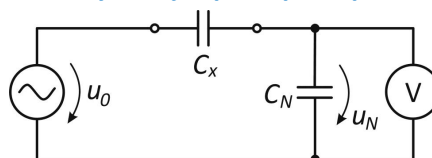
### 6.2.4 Metoda tří voltmetrů

Pro měření touto metodou potřebujeme odporový etalon, který zapojíme v sérii s měřenou impedancí. Poté třemi voltmetry měříme napětí na etalonu, impedanci a na jejich sériové kombinaci. Neznámou impedanci pak dopočítáme podle fázorového diagramu [18]. S pomocí této metody můžeme určit i výkon na impedanci.

Na podobném principu fungují další metody, například metoda měření pomocí ampérmetru, voltmetru a wattmetru nebo metoda měření pomocí tří ampérmetrů [17]. Základem těchto metod je skutečnost, že ze tří vhodných měřených veličin je možné výpočtem určit hodnotu prvků náhradního schématu kondenzátoru nebo cívky.

### 6.2.5 Další měřicí metody a převodníky

Přímé měření kapacity můžeme realizovat na principu impedančního děliče s etalonem kapacity [17]. Přesnost tohoto měření ale bude velmi záviset na parazitních parametrech, které zde zanedbáváme. Schéma je na Obr. 6.4.



**Obrázek 6.4.** Principiální schéma impedančního děliče pro měření kapacit. Převezato z [17].

Neznámou kapacitu  $C_x$  spočteme ze vztahu

$$C_x = \frac{C_N}{\frac{U_0}{U_N} - 1} \quad (6.6)$$

Pro kapacitní senzory se často využívají převodníky kapacita/frekvence nebo kapacita/číslo. První zmíněný pracuje na principu změny frekvence oscilátoru. Může využívat LC oscilátor nebo multivibrátor. Výhodou je jednoduché měření frekvence a vysoká přesnost.

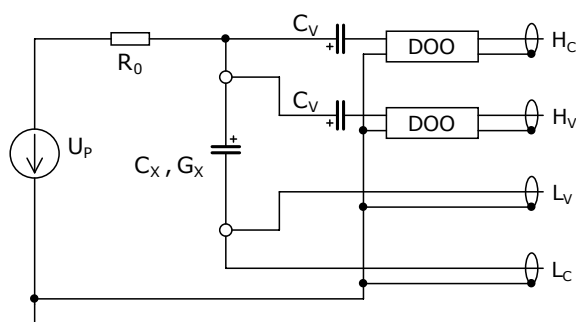
Převodník kapacita/číslo využívá  $\Sigma\Delta$  převodník s vyrovnáváním náboje. Výhodou je velmi vysoká dosažitelná přesnost, až  $4 \cdot 10^{-18}$  F [16].

## 6.3 Měření kondenzátorů se stejnosměrným předpětím

Měření kapacity kondenzátorů je často potřeba provádět při stejnosměrné polarizaci. Kromě měření napěťové závislosti kapacity keramických kondenzátorů je toto potřeba například pro měření závislosti kapacity na napětí u varikapů, unipolárních tranzistorů a dalších polovodičových struktur, nebo pro měření kapacity u elektrolytických kondenzátorů [16].

### 6.3.1 RLC měřič

Pro přesné měření je vhodné využít RLC měřič s adaptérem, který umožní stejnosměrnou polarizaci měřeného kondenzátoru. Některé RLC metry umožňují toto měření i bez adaptéru a obsahují často i zdroj stejnosměrného polarizačního napětí.



**Obrázek 6.5.** Principiální schéma adaptéru pro měření kapacity kondenzátoru polarizovaného stejnosměrným napětím. Svorky  $H_C$  a  $H_V$  jsou připojeny přes vazební kondenzátory a ochranné obvody. Převzato z [16].

Principiální zapojení adaptéru je na Obr. 6.5. Kladné stejnosměrné napětí z externího zdroje je na kondenzátor přivedeno přes odpor  $R_0$ , protože stejnosměrný zdroj představuje pro střídavé měřicí napětí RLC měřiče zkrat, záporný pól zdroje je uzemněn, stejně jako jako svorky  $L_V$  a  $L_C$ . Svorky  $H_V$  a  $H_C$  jsou každá připojena ke kondenzátoru přes vazební kondenzátory  $C_V$ , které oddělují RLC měřič od stejnosměrného napětí. Jejich kapacita nemá na měření vliv díky čtyřsvorkovému zapojení. Ve schématu jsou znázorněny navíc diodové ochranné obvody proti přepětí (DOO). RLC měřič s adaptérem lze využít pro všechny výše zmíněné účely – měření závislosti kapacity na napětí u různých typů kondenzátorů, varikapů, unipolárních tranzistorů a podobně [16].

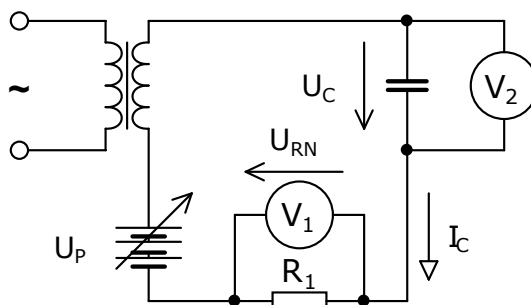
Novější RLC měřiče umožňují měření při stejnosměrném napětí z vestavěného zdroje a není tedy potřeba připojovat externí adaptér. Takovým je například RLC metr HAMEG HM 8118 [19].



**Obrázek 6.6.** RLC metr HAMEG HM8118, převzato z [19].

### 6.3.2 Výhylková metoda

Pro přibližné určení kapacity kondenzátoru při stejnosměrném předpětí lze použít výhylkovou metodu podle zapojení na Obr. 6.7. Měřený kondenzátor je zapojen v sérii s etalonem odporu a na obou měříme střídavé napětí. Tato kombinace je připojena k napětí sériové kombinace dvou zdrojů – střídavého (je jím sekundární vinutí transformátoru) a stejnosměrného, jejichž napětí se dle principu superpozice sčítají. Jelikož kondenzátor představuje pro stejnosměrné napětí rozpojený obvod, je na něm plné stejnosměrné napětí. Střídavé napětí zdroje se dělí v poměru impedancí kondenzátoru  $C_X$  a odporového etalonu  $R_N$  [16].



**Obrázek 6.7.** Obvod pro měření parametrů kondenzátorů výhylkovou metodou, podle [16].

Jestliže zanedbáme ztráty kondenzátoru, pro měřenou kapacitu přibližně platí

$$C_X = \frac{I}{\omega U_C} = \frac{U_{RN}}{\omega U_C R_N} . \quad (6.7)$$

Pro dosažení větší přesnosti měření je možné použít vektorvoltmetr, jehož referenční vstup bychom připojili na primární vinutí transformátoru [16]. Přitom uvažujeme sériové náhradní schéma kondenzátoru, pro které jsme schopni hodnoty jeho prvků určit výpočtem z údajů změřených vektorvoltmetrem. Impedance kondenzátoru bude dána vztahem

$$\mathbf{Z}_X = R_S + \frac{1}{j\omega C_S} \quad (6.8)$$

a pro prvky sériového náhradního schématu platí

$$\mathbf{I} = \frac{U_{RN}}{R_N} = \frac{U_C}{\mathbf{Z}_X} . \quad (6.9)$$

Odtud bychom po úpravě a oddělení reálné a imaginární složky dostali výrazy pro prvky náhradního schématu  $R_S$  a  $C_S$  [16].

# Kapitola 7

## Návrh měřicího přípravku

V této sekci je uvedeno navržené blokové schéma měřicího přípravku a vysvětlen princip měření. Rovněž jsou zde rozebrány jednotlivé funkční bloky, jejich schémata a princip činnosti.

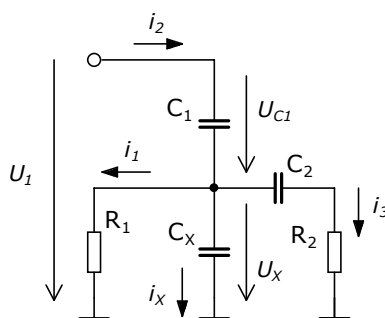
### 7.1 Metoda měření kapacity

Pro měření neznámé kapacity jsem využil metodu, která funguje na principu impedančního děliče složeného ze dvou kondenzátorů, viz Obr. 7.1. Kondenzátor  $C_1$  má předem známou hodnotu kapacity, slouží zde jako etalon. Díky vlastnostem kondenzátoru – neprochází jím stejnosměrný proud – je možné přivést na měřený kondenzátor  $C_X$  stejnosměrné napětí, aniž by to mělo vliv na zbytek zapojení. Kondenzátor  $C_2$  zajišťuje oddělení stejnosměrné složky napětí od měřicího obvodu.

Kapacitu kondenzátoru  $C_X$  určíme tak, že na impedanční dělič přivedeme malé střídavé harmonické napětí  $U_1$ . Z hodnoty modulu napětí  $U_1$  a  $U_X$  pak určíme kapacitu výpočtem. Protože k uzlu děliče bude připojeny další obvody s určitou vstupní impedancí, bude tato impedance způsobovat fázový posun napětí  $U_X$  vůči  $U_1$  a změnu jeho amplitudy. Vliv této impedance ovšem lze korigovat při výpočtu, známe-li její hodnotu.

Ke střednímu uzlu děliče (mezi kondenzátorem  $C_x$  a  $C_1$ ) budou připojeny dva obvody – měřící obvod střídavého napětí a obvod pro přivedení stejnosměrného napětí  $U_{in}$ . Stejnosměrný zdroj představuje pro střídavé napětí zkrat, nulový odpor. Proto musíme stejnosměrný zdroj oddělit rezistorem s dostatečně velkým odporem.

Pro měření střídavého napětí budeme muset měřící obvod připojit přes kondenzátor  $C_2$  pro oddělení stejnosměrné složky. Zároveň se zde uplatní vstupní odpor měřicího obvodu  $R_2$ . Rozšířené schéma je na Obr. 7.1.



**Obrázek 7.1.** Principiální schéma děliče pro měření kapacit rozšířené o vlivy připojených obvodů.

Díky znalosti hodnot prvků  $R_1$ ,  $R_2$  a  $C_2$  můžeme jejich vliv korigovat při výpočtu kapacity  $C_x$ . Označení proudů jednotlivými větvemi s jejich orientací je na Obr. 7.1. S využitím Ohmova zákona a Kirchhoffových zákonů dostáváme následující vztahy pro



proudy a napětí na děliči:

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{U_x}{R_1} & i_x &= \frac{U_x}{\frac{1}{j\omega C_x}} & i_3 &= \frac{U_x}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_3}} \\ U_1 - U_x &= U_{C_1} = \frac{i_2}{j\omega C_1} & i_2 &= i_1 + i_x + i_3 \end{aligned} \quad (7.1)$$

Z těchto vztahů vyjádříme nejprve napětí  $U_1$  a poté podíl napětí  $\frac{U_1}{U_x}$ . Pomocí oddělení reálné a imaginární složky můžeme modul podílu  $\frac{U_1}{U_x}$  vyjádřit vzorcem (7.4). Právě velikost napětí  $U_1$  a  $U_x$  jsme schopni jednoduše měřit.

$$\begin{aligned} U_1 = U_{C_1} + U_x &= \frac{i_2}{j\omega C_1} + U_x = \frac{U_x \left( \frac{1}{R_1} + j\omega C_x + \frac{j\omega C_3 - \omega^2 R_2 C_3^2}{1 + \omega^2 R_2^2 C_3^2} \right)}{j\omega C_1} + U_x = \\ &= U_x \left( \frac{\frac{1}{R_1} + j\omega C_x + \frac{j\omega C_3 - \omega^2 R_2 C_3^2}{1 + \omega^2 R_2^2 C_3^2}}{j\omega C_1} + 1 \right) \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$\frac{U_1}{U_x} = \frac{\frac{1}{R_1} + j\omega C_x + \frac{j\omega C_3 - \omega^2 R_2 C_3^2}{1 + \omega^2 R_2^2 C_3^2}}{j\omega C_1} + 1 \quad (7.3)$$

$$\frac{|U_1|}{|U_x|} = \sqrt{\left( \Re \frac{U_1}{U_x} \right)^2 + \left( \Im \frac{U_1}{U_x} \right)^2} \quad (7.4)$$

Následnou úpravou a vyjádřením  $C_x$  ze vztahu (7.4) dostaneme vzorec pro neznámou kapacitu:

$$\begin{aligned} C_x = C_1 \left( \sqrt{\frac{|U_1|^2}{|U_x|^2} - \left( \frac{1}{C_1 R_1 \omega} - \frac{C_3^2 R_2 \omega}{C_1 (C_3^2 R_2^2 \omega^2 + 1)} \right)^2} \right. \\ \left. - \frac{C_3}{C_1 (C_3^2 R_2^2 \omega^2 + 1)} - 1 \right) \end{aligned} \quad (7.5)$$

Při vyčíslení některých zlomků ve výrazu (7.5) jsem zjistil, že na výslednou hodnotu kapacity mají při zvolených hodnotách součástek zanedbatelný vliv. Jejich hodnota je totiž o několik řádů menší než u dalších částí výrazů, od nichž se tyto odečítají. Vzorec pro neznámou kapacitu je tedy možné zjednodušit takto:

$$\begin{aligned} C_x = C_1 \left( \sqrt{\frac{|U_1|^2}{|U_x|^2} - \left( \frac{1}{C_1 R_1 \omega} - \frac{C_3^2 R_2 \omega}{C_1 (C_3^2 R_2^2 \omega^2 + 1)} \right)^2} \right. \\ \left. - \frac{C_3}{C_1 (C_3^2 R_2^2 \omega^2 + 1)} - 1 \right) \end{aligned} \quad (7.6)$$

Tím dostáváme jednoduchý vzorec pro kapacitní dělič, který je použit ve výsledné implementaci:

$$C_x = C_1 \left( \frac{U_1}{U_x} - 1 \right). \quad (7.7)$$

Protože měřicí přípravek má mít rozsah od  $1\ \mu\text{F}$  do  $100\ \mu\text{F}$ , je vhodné přizpůsobit kapacitu etalonu  $C_1$  v kapacitním děliči kapacitě měřeného kondenzátoru. Zvolil jsem přepínání mezi dvěma rozsahy  $1 - 10\ \mu\text{F}$  a  $10 - 100\ \mu\text{F}$ . Pro rozsah  $1 - 10\ \mu\text{F}$  je připojen etalon s kapacitou  $4,7\ \mu\text{F}$ . Pro rozsah  $10 - 100\ \mu\text{F}$  jsou pak paralelně zapojeny etalony  $4,7\ \mu\text{F}$  a  $47\ \mu\text{F}$  a výsledná kapacita je tedy  $51,7\ \mu\text{F}$ . Přepínání rozsahu je zajištěno pomocí signálového relé. Přesné hodnoty kapacity kondenzátorů, které jsou použity jako etalony, byly změřeny RLC metrem a jsou v implementaci definovány jako konstanty.

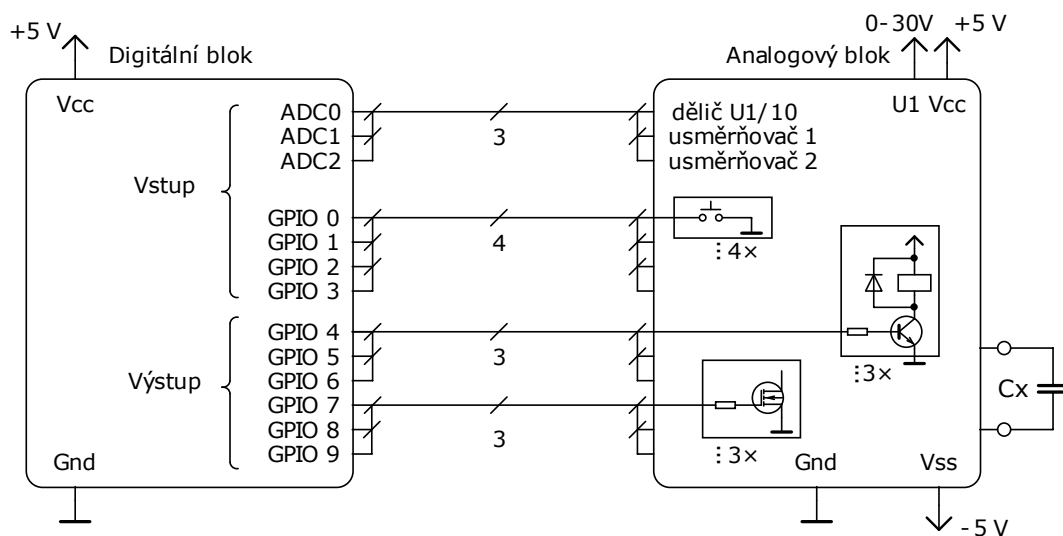
Pro každý rozsah je při měření použita jiná frekvence a hodnota střídavého měřicího napětí, viz Tab. 7.1. Tyto hodnoty odpovídají katalogovým podmínkám měření výrobce kondenzátorů Murata [13]. Stejně podmínky měření pak u vybraných vzorků kondenzátorů umožní objektivní porovnání naměřených hodnot s charakteristikami, které udává výrobce.

**Tabulka 7.1.** Efektivní hodnota a frekvence měřicího napětí pro jednotlivé rozsahy měření. Podle [13].

rozsah ( $\mu\text{F}$ )	$U_{ef}$ (V)	f (Hz)
1–10	1	1000
10–100	0,5	120

## 7.2 Blokové schéma

Měřicí přípravek se bude skládat z analogové a digitální části, viz Obr. 7.2. Měřený kondenzátor bude zapojován do analogové části, která obsahuje kapacitní dělič (viz kapitola 7.1) s potřebnými měřicími obvody. Digitální část je vývojová deska s mikrokontrolérem a displej pro zobrazení měřených hodnot. Měření na analogovém bloku je ovládáno spínáním tranzistorů a relé a výstupní napětí měřicích obvodů je pak zpracovááno AD převodníky v digitálním bloku. Analogový blok je napájen symetrickým zdrojem napětí  $\pm 5\ \text{V}$  a digitální pak rovněž z kladné větve symetrického zdroje. Stejnoseměrné předpětí měřeného kondenzátoru  $0$  až  $30\ \text{V}$  bude přivedeno z externího laboratorního zdroje, na němž uživatel nastaví požadovanou hodnotu.



**Obrázek 7.2.** Blokové schéma, propojení digitálního a analogového bloku.

## 7.3 Digitální blok

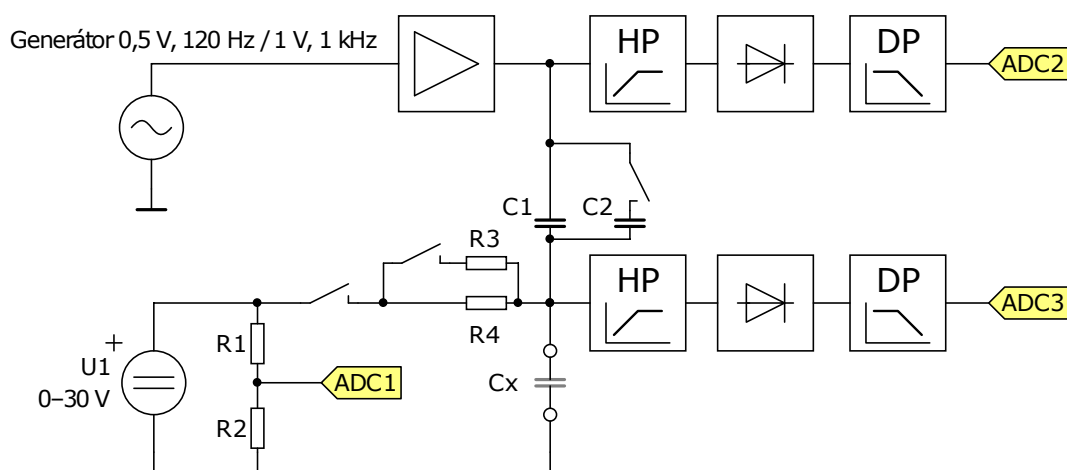
Digitální blok se skládá z vývojové desky Nucleo-F446RE, alfanumerického LCD displeje a uživatelských tlačítek. Vývojová deska je osazena výkonným dvaatřicetibitovým mikrokontrolérem STM32F446RE. Nucleo-F446RE jsem zvolil kvůli DA převodníku, který je možné využít pro generování střídavého harmonického napětí.

Pro zobrazení výsledných hodnot závislosti kapacity na napětí jsem použil alfanumerický LCD displej 1602A-1 o velikosti  $16 \times 2$  znaků, který umožňuje zápis přes čtyřbitové nebo osmibitové paralelní rozhraní. Dále jsou pak součástí digitálního bloku čtyři tlačítka, jimiž uživatel spouští měření a ovládá zobrazení hodnot na displeji. Funkce tlačítek a ovládání měřicího přípravku je podrobněji rozebráno v sekci 7.5.

## 7.4 Analogový blok

Samotný analogový blok lze rozdělit na několik dílčích částí. Základním prvkem je kapacitní dělič složený z etalonu a měřeného kondenzátoru, který umožňuje měření neznámé kapacity. Dále potřebujeme zdroj střídavého harmonického napětí o dané amplitudě a frekvenci, kterým budíme kapacitní dělič. Tato střídavá napětí zpracováváme operačním usměrňovačem a filtrem typu dolní propust, aby na výstupu byla jen stejnosměrná složka. Posledním prvkem je obvod pro přivedení a měření stejnosměrného předpětí kondenzátoru.

Pro analogovou část jsem navrhl a vyrobil desku plošného spoje. Při návrhu je využito v maximální míře SMD součástek a deska je dvoustranná, bez nepájivé masky. Výrobní podklady jsou uvedeny v příloze. Kromě níže popsaných funkčních bloků jsou součástí zapojení další pomocné obvody jako relé pro přepínání rozsahu a přivedení stejnosměrného napětí na měřený kondenzátor, unipolární tranzistory pro vybíjení měřeného kondenzátoru a kondenzátorů dolní propusti na výstupu operačních usměrňovačů nebo obvody filtrace napájení.



**Obrázek 7.3.** Funkční schéma analogového bloku. Legenda: HP - horní propust, DP - dolní propust.

### 7.4.1 Generátor střídavého napětí

V měřicím přípravku potřebujeme zdroj střídavého napětí sinusového průběhu, které se přivede na měřený kondenzátor za účelem měření kapacity. Střídavé harmonické napětí lze generovat buď pomocí analogového oscilátoru, nebo digitálně s využitím DA

převodníku a filtru. Nejjednodušší analogové oscilátory generující sinusový průběh jsou oscilátor s Wienovým článkem a dále celá třída zapojení, která využívají fázového posunu na více RC člancích. Všechna tato zapojení využívají operační zesilovače. Výhodou těchto zapojení je jejich jednoduchost, nevýhodou pak rostoucí zkreslení při špatném nastavení zesílení nebo neznámá velikost amplitudy výstupního sinusového napětí. Pro použití v přípravku jsem proto zvolil generování sinusového průběhu pomocí DA převodníku. Výhodou je i jednodušší přímé řízení DA převodníku oproti analogovým oscilátorům a také vhodnější zastoupení vyšších harmonických. Zde jsou zastoupeny oproti první harmonické až o několik řádů vyšší frekvence, které lze pak snadno potlačit vhodným filtrem.

K filtraci signálu z DA převodníku jsem použil pasivní filtr typu pásmová propust. Tu tvoří dvoustupňový RC filtr typu dolní propust a RC filtr typu horní propust pro oddělení stejnosměrné složky.

Pro impedanční přizpůsobení výstupu filtru a kapacitní zátěže je třeba zařadit vhodný zesilovač. Lze použít základní zapojení jednoduchého napětového sledovače s operačním zesilovačem. Maximální výstupní proud generátoru bude dosažen při připojení největší dovolené kapacity pro zvolený rozsah, což je při frekvenci 1 kHz maximálně 10  $\mu\text{F}$ . Celková kapacita kapacitního děliče (4,7  $\mu\text{F}$ , 10  $\mu\text{F}$ ) pak bude  $C_0 = 3,3 \mu\text{F}$ . Maximální proud při napětí  $U_{ef} = 1 \text{ V}$  pak bude:

$$I_{ef} = \frac{U_{ef}}{Z_0} = \frac{U_{ef}}{\frac{1}{2\pi f C_0}} = 20,7 \text{ mA} \quad (7.8)$$

Problematická je i kapacitní zátěž, která může zapříčinit nestabilitu zesilovače. Snížit nestabilitu může zapojení tzv. uklidňovacího odporu na výstup zesilovače, případně různé jiné způsoby kompenzace. V měřicím přípravku se však kapacitní zátěž bude měnit v poměrně velkém rozsahu, z čehož vyplývá obtížnost jakékoliv přesnější kompenzace.

Kvůli nutnosti vyššího výstupního proudu a kapacitní zátěži jsem zvolil operační zesilovač AD817, který má výstupní proud 50 mA a dle údajů výrobce je kompenzovaný na neomezenou kapacitní zátěž [20].

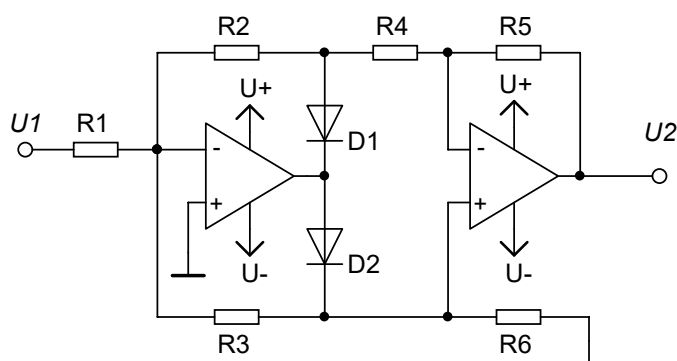
#### ■ 7.4.2 Operační usměrňovač

Pro měření střídavých napětí je nutné použít usměrňovač, protože vestavěný AD převodník mikrokontroleru měří pouze kladné napětí. Je vhodné použít aktivní usměrňovač, protože ten oproti pasivnímu usměrňovači dosahuje linearity i pro malé signály. Aktivní usměrňovač (též operační usměrňovač) se odlišuje od pasivního použitím operačních zesilovačů, které kompenzují úbytek napětí na diodách. Existuje mnoho různých zapojení, která se liší například vstupní impedancí, dosahovanou linearitou nebo možností nastavit zesílení. Pro účely měřicího přípravku požadujeme co nejvyšší linearitu. Vstupní impedance by měla být co nejvyšší, protože je jejím připojením ovlivněno měření neznámé kapacity. Její vliv lze ovšem dodatečně korigovat při výpočtu.

Zvolené zapojení vychází z invertujícího zesilovače, má tedy vstupní impedanci danou odporem  $R_1$  na vstupu (viz Obr. 7.4). Výhodou však je, že lze snadno nastavit zesílení změnou právě tohoto jediného odporu. Důvodem pro použití tohoto zapojení je linearita i pro nízkou úroveň vstupního signálu.

#### ■ 7.4.3 Zdroj stejnosměrného předpětí

Pro měření je nutné přivést stejnosměrné napětí na měřený kondenzátor. Protože stejnosměrný zdroj napětí se vůči střídavému měřicímu napětí projeví pouze svým vnitřním



**Obrázek 7.4.** Principiální schéma operačního usměrňovače. Podle [21].

odporem, došlo by při přímém připojení zdroje ke zkreslení měření. Zdroj je proto připojen přes rezistor s velmi vysokým odporem v řádu  $M\Omega$  a pouze při nabíjení měřeného kondenzátoru je připojen přes rezistor s nižší hodnotou. Stejnosemné napětí je přes dělič přivedeno na AD převodník, aby jeho hodnota mohla být uložena společně se změřenou kapacitou kondenzátoru jako konkrétní bod charakteristiky závislosti kapacity na napětí.

## 7.5 Firmware

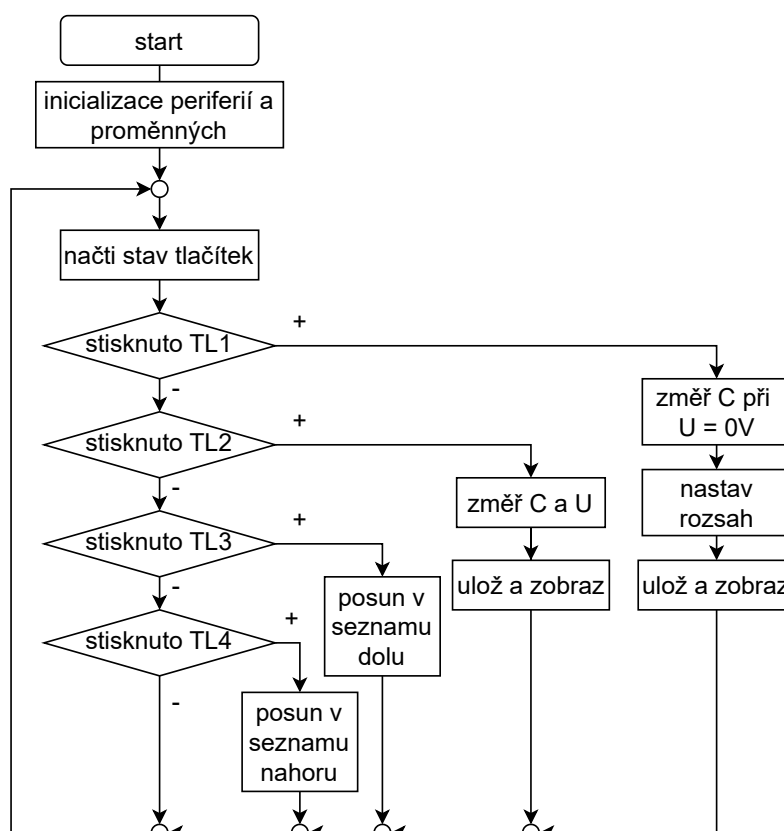
Firmware je napsán v jazyce C++ ve vývojovém prostředí STM32CubeIDE, které je vhodné zejména pro snadnou konfiguraci periférií mikrokontroléru, generování kódu, kompilaci, nebo ladění programu za běhu pomocí rozhraní ST-LINK. Program je napsán s využitím vysokoúrovňových knihoven HAL (Hardware Abstraction Layer), které umožňují přímočaré a přehledné ovládání periférií mikrokontroléru. Výhodou je pak i přenositelnost na jiné mikrokontroléry v rámci rodiny STM32.

V měřicím přípravku jsou využity tyto periferie – AD převodník pro měření výstupních napětí operačních usměrňovačů, DA převodník pro generování harmonického napětí, časovač (Timer) pro řízení běhu AD převodníku. Dále pak vstupně-výstupní piny pro zapisování na displej, čtení tlačítek a ovládání relé a tranzistorů pro přepínání rozsahů a vybíjení kondenzátorů.

### 7.5.1 Proces měření

Měřicí algoritmus je popsán zjednodušeným vývojovým diagramem na Obr. 7.5.

Po inicializaci periférií mikrokontroléru se v hlavní smyčce čte stav tlačítek a pokud je zaznamenáno stisknutí některého z nich, vykoná se příslušná akce. Jestliže chce uživatel začít s měřením, musí připojit měřený kondenzátor a stisknout tlačítko „nové měření“. Proběhne měření kapacity při nulovém stejnosměrném předpětí a je automaticky vybrán vhodný měřicí rozsah, buď  $1\text{--}10\ \mu\text{F}$ , nebo  $10\text{--}100\ \mu\text{F}$ , případně je vypsána hláška „Kapacita mimo rozsah“. Změřená hodnota je uložena jako první bod charakteristiky. Dále pak uživatel nastavuje různé hodnoty vstupního stejnosměrného napětí na připojeném laboratorním zdroji a zaznamenává další body charakteristiky stiskem tlačítka „další měření“. Na displeji se vždy zobrazuje poslední měřená hodnota, tedy zjištěná kapacita, příslušné stejnosměrné napětí a příslušný rozsah.



**Obrázek 7.5.** Stručný vývojový diagram hlavní smyčky programu.

Změřené body charakteristiky se ukládají do seznamu, ve kterém je možno se pohybovat pomocí dalších dvou tlačítek nahoru a dolů. Jestliže uživatel připojí jiný kondenzátor a začne nové měření stiskem prvního tlačítka, jsou hodnoty z předchozího měření smazány.

### 7.5.2 AD převodník

Pomocí AD převodníku jsou měřeny tři hodnoty napětí. Je to napětí na výstupu generátoru harmonického napětí a na kapacitním děliči, zpracované operačními usměrňovači a filtrem typu dolní propust, a dále pak vstupní stejnosměrné předpětí přes odporový dělič. K tomu jsou využity tři kanály vestavěného dvanáctibitového převodníku ADC1. Sběr vzorků je řízen časovačem Timer2 a pro ukládání vzorků je použit přímý přístup do paměti (DMA - Direct Memory Access). Pro zvýšení odolnosti proti šumu je vždy nasbírán větší počet vzorků a vypočítána střední hodnota. AD převodník sbírá vzorky po dobu poloviny periody budícího harmonického signálu generátoru. Měřené střídavé napětí na výstupu operačního usměrňovače, které prochází pasivní dolní propustí, nemusí být dokonale vyfiltrované a sběr většího počtu vzorků omezí případné odchylky od střední hodnoty.

### 7.5.3 DA převodník

Jako generátor sinusového měřicího napětí slouží vestavěný dvanáctibitový DA převodník. Při inicializaci jsou vypočítány hodnoty vzorkovaného sinusového signálu a uloženy do statického pole. Tato pole jsou dvě, protože každý měřicí rozsah má jinou frekvenci

a amplitudu měřicího napětí. Výpočet sinusovky je převzat z aplikačních příkladů výrobce [22] a je dán vzorcem:

$$y(t) = y_M \left( \sin \left( \frac{2\pi t}{n_s} \right) + 1 \right) \left( \frac{2^{12}}{2} \right), \quad (7.9)$$

kde  $y_M$  je amplituda signálu,  $n_s$  je počet vzorků za periodu a  $2^{12}$  určuje rozsah DA převodníku. Vypočítané hodnoty jsou převedeny do celočíselného formátu a uloženy do statického pole.

Na výstupu DA převodníku je pak napětí dle vzorce [22]

$$U_{DA} = U_{REF} \frac{DOR}{2^{12}}, \quad (7.10)$$

kde  $U_{REF}$  (V) je referenční napětí 3,3 V,  $DOR$  je hodnota zapsaná ve výstupním registru a  $2^{12}$  je rozsah DA převodníku. Pro nastavování hodnoty na DA převodníku je opět využit přímý přístup do paměti, tentokrát s využitím tzv. circular mode, který je vhodný pro generování periodických signálů. Pro časování je využit Timer5.

### 7.5.4 LCD displej

Pro výpis na alfanumerický LCD displej je použita volně dostupná knihovna HD44780 16x2 Lcd (dostupné z [23]), která využívá moduly HAL a umožňuje jednoduchý tisk formátovaných textových řetězců pomocí předdefinovaných funkcí. Zápis dat na displej probíhá přes rozhraní se čtyřmi datovými a dvěma řídicími signály: D0, D1, D2, D3 a RS – Register Select, E – Enable signal. Na displej se vypisuje změřená kapacita, stejnosměrné předpětí a automaticky volený rozsah RNG1 nebo RNG2. Číselné údaje jsou zobrazeny s přesností na dvě desetinná místa.

## 7.6 Napájení

Pro napájení operačních zesilovačů je potřeba symetrické napětí  $\pm 5$  V, které je přivedeno z externího zdroje. Toto napětí je přivedeno na analogovou desku a z kladné větve +5 V jsou vyvedeny tři napájecí větve – napájení pro operační zesilovače, pro digitální část a pro relé. Napájení operačních zesilovačů je filtrováno LC filtrem, který je tvořen feritovými korálky a keramickými kondenzátory. Samozřejmostí jsou odrušovací kondenzátory na všech napájecích větvích a také v blízkosti operačních zesilovačů. Jako ochrana proti přepólování slouží antiparalelní diody na vstupu napájení.

Stejnosemné předpětí pro nabíjení měřeného kondenzátoru je rovněž přivedeno z externího regulovatelného zdroje a nastavuje ho uživatel. Povolný rozsah je 0–30 V. Jako ochrana proti přepólování je na vstupu antiparalelní dioda a rychlá tavná pojistka.

## 7.7 Mechanická konstrukce

Měřicí přípravek je vestavěn do univerzální plastové přístrojové krabičky. Na čelním panelu je LCD displej pro zobrazení měřených hodnot a čtyři ovládací tlačítka – „nové měření“, „další měření“, „nahoru“ a „dolů“. Rovněž jsou zde přes koaxiální kabel vyvedeny měřicí svorky v podobě pinzety na měření SMD součástek. Koaxiální kabel byl zvolen kvůli vyšší odolnosti proti rušení.

V zadním panelu jsou zdířky pro připojení symetrického napájecího napětí  $\pm 5$  V, spínač pro zapnutí/vypnutí napájení a zdířky pro připojení stejnosměrného předpětí 0–30 V.



**Obrázek 7.6.** Mechanická konstrukce měřicího přípravku, krabička a měřicí pinzeta.



# Kapitola 8

## Výsledky měření

Na zhotoveném měřicím přípravku jsem provedl ověřovací měření na třech vzorcích vícevrstvých keramických kondenzátorů. Výsledky měření jsou srovnány s měřením na RLC měřiči HM8118 a s katalogovými charakteristikami výrobce. Pro omezený rozsah stejnosměrného předpětí odpovídající měření na RLC měřiči je určena odchylka měření.

### 8.1 Vzorky kondenzátorů pro měření

Pro ověřovací měření jsem zvolil hodnoty kondenzátorů  $1\ \mu\text{F}$ ,  $10\ \mu\text{F}$  a  $100\ \mu\text{F}$ , aby byl pokryt celý měřicí rozsah. Označení typu dle výrobce je C1206C105K3RACAUTO pro kondenzátor  $1\ \mu\text{F}$ , GRT31CR61H106KE01 pro  $10\ \mu\text{F}$  a GRM32ER61A107ME20 pro  $100\ \mu\text{F}$ . Parametry zvolených kondenzátorů jsou uvedeny v tabulce 8.1.

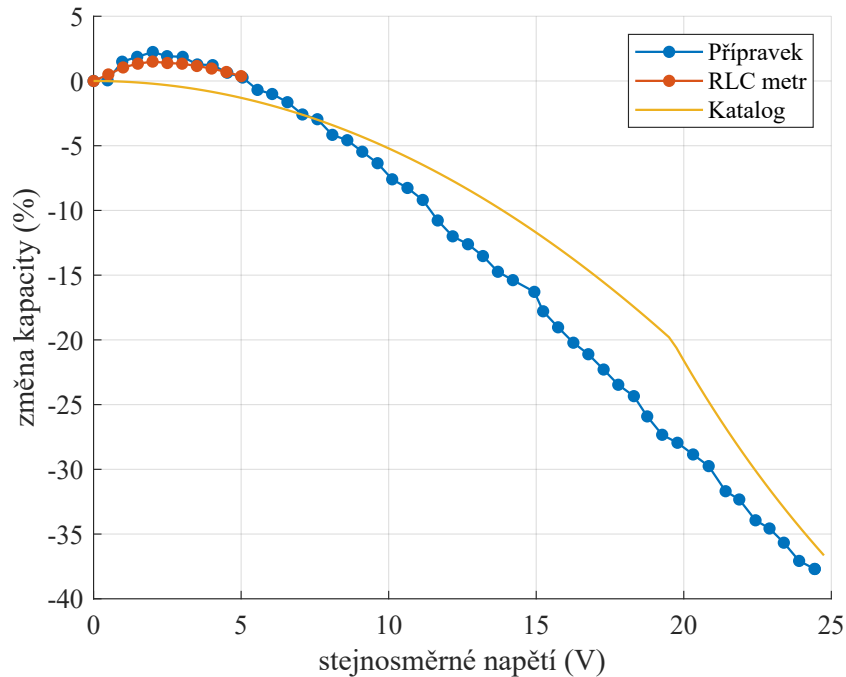
**Tabulka 8.1.** Vzorky kondenzátorů pro ověřovací měření. Podle katalogu výrobce [14, 24].

Kapacita	$1\ \mu\text{F}$	$10\ \mu\text{F}$	$100\ \mu\text{F}$
Výrobce	Kemet	Murata	Murata
Charakteristika	X7R	X5R	X5R
Max. ss napětí (V)	25	50	10
Tolerance (%)	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 20$
Pouzdro (in)	1206	1206	1210

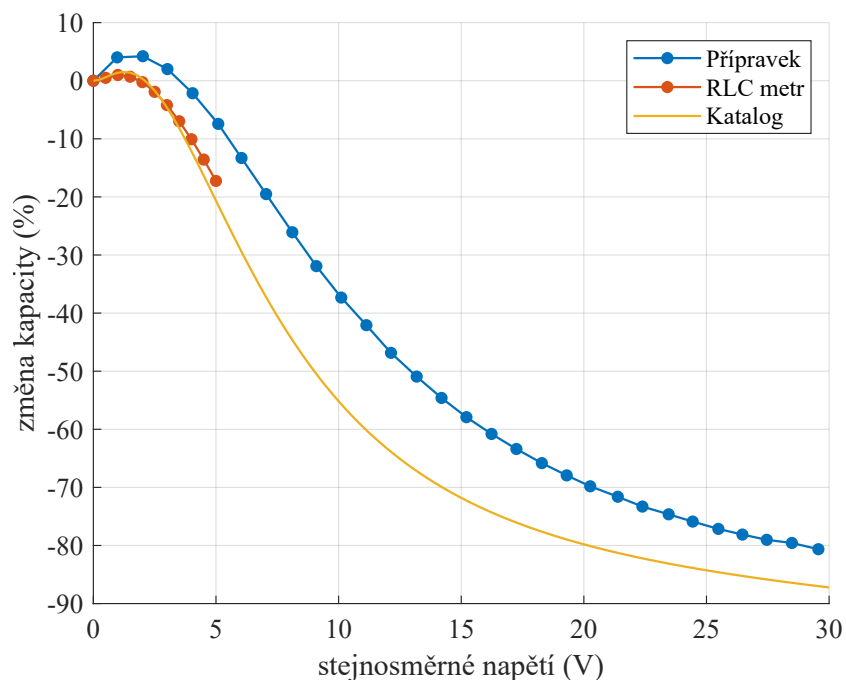
### 8.2 Srovnání s měřením na RLC měřiči a údaji výrobce

Pro ověřovací měření byl použit RLC metr HM 8118, který umožňuje měřit kapacitu při stejnosměrném předpětí až 5 V z vnitřního zdroje. Frekvence a amplituda měřicího napětí byla zvolena tak, aby odpovídala hodnotám použitým v měřicím přípravku podle tabulky 7.1. Průběhy závislosti změny kapacity na přiloženém napětí změřené RLC metrem, měřicím přípravkem a převzaté z katalogu jsou vždy pro daný vzorek kondenzátoru vyneseny do jednoho grafu. Pro lepší porovnatelnost je na svislé ose nikoliv absolutní hodnota kapacity, ale relativní změna kapacity vztahovaná k počáteční hodnotě (hodnota při napětí 0 V) v procentech. Naměřené hodnoty kapacity v závislosti na napětí jsou uvedeny v příloze A a výsledné grafy jsou na Obr. 8.1, 8.2 a 8.3.

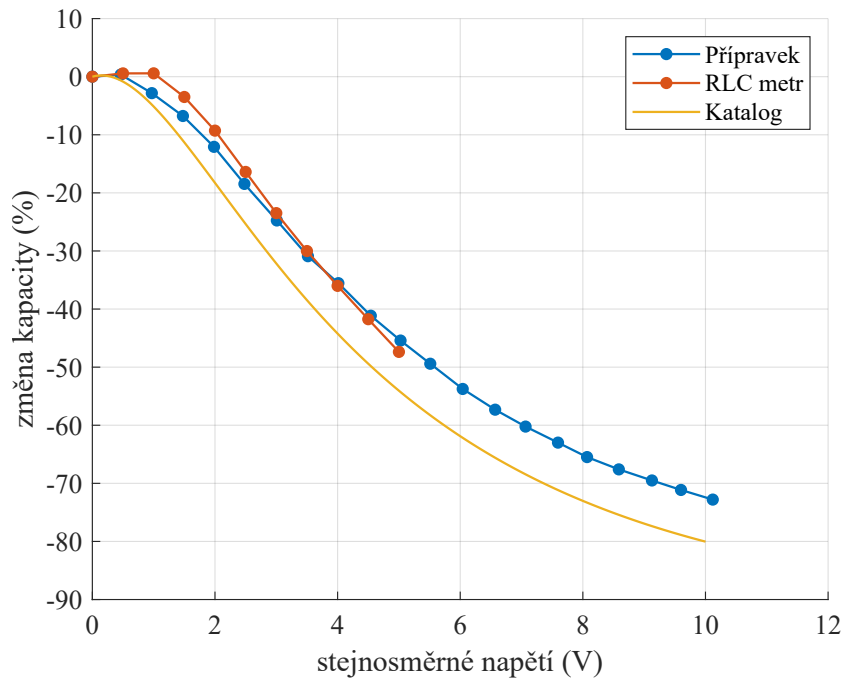
Výrobce specifikuje přesnost RLC metru HAMEG HM8118 v závislosti na velikosti modulu impedance  $|Z|$  a měřicí frekvenci  $f$ . Při provedeném srovnávacím měření byla přesnost přístroje  $\pm 0.05\% \pm |Z|/(2 \cdot 10^9)$  ( $\Omega$ ) při frekvenci 120 Hz a  $\pm 0.1\% \pm |Z|/(1,5 \cdot 10^9)$  ( $\Omega$ ) při frekvenci 1 kHz [19].



**Obrázek 8.1.** Závislost kapacity na napětí pro kondenzátor  $1\ \mu\text{F}$ . Měření na přípravku (rozsah  $1\text{--}10\ \mu\text{F}$ ), RLC metru (měřicí napětí  $U_{ef} = 1\ \text{V}$ ,  $f = 1\ \text{kHz}$ ) a charakteristika dle katalogu výrobce [24]. Pozn.: Omezený rozsah měření na RLC metru je dán omezením přístroje.



**Obrázek 8.2.** Závislost kapacity na napětí pro kondenzátor  $10\ \mu\text{F}$ . Měření na přípravku (rozsah  $1\text{--}10\ \mu\text{F}$ ), RLC metru (měřicí napětí  $U_{ef} = 1\ \text{V}$ ,  $f = 1\ \text{kHz}$ ) a charakteristika dle katalogu výrobce [14]. Pozn.: Omezený rozsah měření na RLC metru je dán omezením přístroje.



**Obrázek 8.3.** Závislost kapacity na napětí pro kondenzátor  $100\ \mu\text{F}$ . Měření na přípravku (rozsah  $10\text{--}100\ \mu\text{F}$ ), RLC metru (měřicí napětí  $U_{ef} = 0,5\ \text{V}$ ,  $f = 120\ \text{Hz}$ ) a charakteristika dle katalogu výrobce [14]. Pozn.: Omezený rozsah měření na RLC metru je dán omezením přístroje.

### 8.3 Odchylka od měření na RLC měřiči

RLC metr má rozsah stejnosměrného předpětí  $0\text{--}5\ \text{V}$ . V tomto rozsahu můžeme určit absolutní odchylku měření na přípravku od hodnot měřených RLC metrem jako absolutní hodnotu rozdílu změřené kapacity na přípravku a na RLC metru při daném napětí podle vzorce

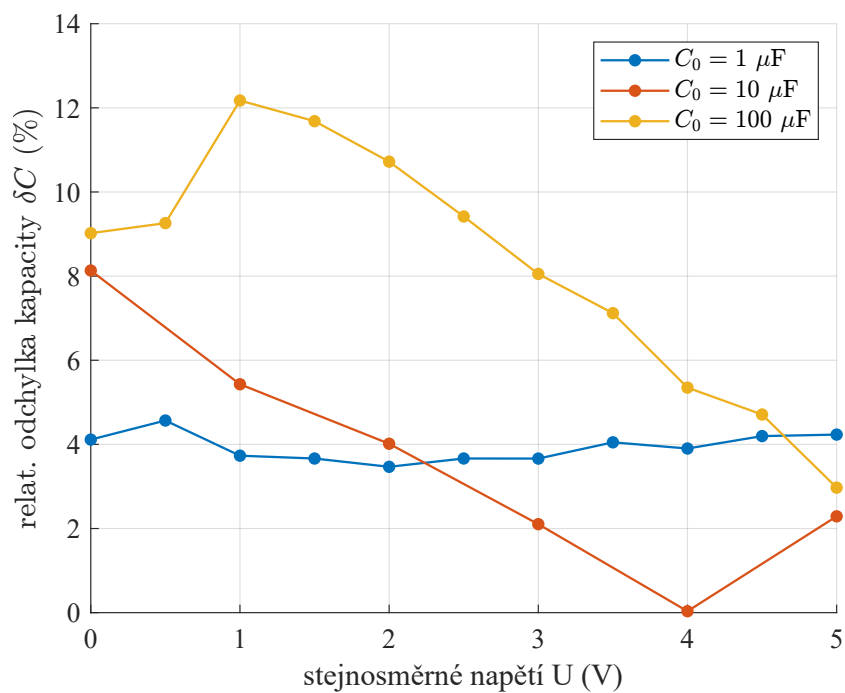
$$\Delta C = |C_A - C_B|,$$

kde  $C_A$  je hodnota kapacity změřená RLC metrem a  $C_B$  je hodnota změřená přípravkem. Pro vynesení do grafu byla použita relativní odchylka, vztážená k počáteční hodnotě kapacity změřené RLC metrem při nulovém stejnosměrném napětí:

$$\delta C = \frac{\Delta C}{C_{A,0V}} \cdot 100\ (\%)$$

Hodnoty jsou vyneseny v grafu 8.4, naměřené hodnoty kapacity na přípravku a RLC metru jsou pak uvedeny v příloze A.

Vidíme, že odchylka při rozsahu  $10\text{--}100\ \mu\text{F}$  je zřetelně větší než při měření v rozsahu  $1\text{--}10\ \mu\text{F}$ , dosahuje téměř 13%. Pravděpodobně je to způsobeno tím, že daný měřicí rozsah používá nižší měřicí napětí. Je možné, že se i více uplatňují parazitní parametry (například odpor  $R_p$ ) kondenzátoru, které nebereme v úvahu.



**Obrázek 8.4.** Relativní odchylka měření na přípravku vůči RLC metru pro měření na kondenzátorech  $1 \mu\text{F}$ ,  $10 \mu\text{F}$  a  $100 \mu\text{F}$ . Měřicí napětí RLC metru odpovídá tabulce 7.1.

# Kapitola 9

## Závěr

Cílem bakalářské práce bylo v teoretické části zpracovat problematiku feroelektrik ve vícevrstvých keramických kondenzátorech a shrnout možné metody měření kapacity při přiloženém stejnosměrném napětí. Popsal jsem materiálové a fyzikální vlastnosti feroelektrik, jež mají zásadní vliv na vlastnosti vícevrstvých keramických kondenzátorů. Zvláštní pozornost jsem věnoval polarizaci feroelektrik při kruhové změně intenzity elektrického pole. V rozboru metod měření kapacity jsem se nejprve věnoval klasifikaci metod měření obecně, metodám měření impedance a poté měření kondenzátorů při přiloženém stejnosměrném napětí.

V praktické části bakalářské práce jsem navrhl měřicí přípravek pro měření napěťové závislosti kapacity keramických kondenzátorů a realizoval jsem jeho funkční vzorek. Přípravek umožňuje určit napěťovou charakteristiku kapacity kondenzátoru, v měřicím režimu se vždy ukládají jednotlivé body charakteristiky (tedy dvojice kapacita – napětí) do paměti a uživatel může tento seznam hodnot procházet.

Provedl jsem ověřovací měření s keramickými kondenzátory s kapacitou  $1\mu\text{F}$ ,  $10\mu\text{F}$  a  $100\mu\text{F}$ . Napěťovou charakteristiku kapacity jsem měřil na zhotoveném přípravku a na RLC měřiči. Pro každé měření jsem určil odchylku od měření na RLC měřiči, které jsem použil jako referenční. Tato odchylka nabývá nejvyšší hodnoty při rozsahu  $10\text{--}100\mu\text{F}$ , kdy dosahuje až 12 % nominální kapacity (měřené RLC měřičem při napětí 0 V).

Při rozsahu  $10\text{--}100\mu\text{F}$  se používá střídavé měřicí napětí s efektivní hodnotou 0,5 V oproti 1 V při rozsahu  $1\text{--}10\mu\text{F}$ . Kvůli tomu je pak nižší i napětí měřené AD převodníkem a rozlišení je horší, což může být příčinou nepřesnosti. Zároveň měřicí přípravek nezohledňuje parazitní parametry měřených kondenzátorů. Při kapacitě v řádu desítek  $\mu\text{F}$  se výrazněji projevuje parazitní odpor kondenzátoru a dochází k fázovému posunu napětí na děliči vůči napětí generátoru. Zjednodušený vzorec (7.7) již pak není vhodný pro popis reálného kapacitního děliče.

Navržený přípravek pro měření napěťové závislosti kapacity keramických kondenzátorů nedosahuje přesnosti laboratorních přístrojů a nehodí se tak pro přesné měření kapacity. Lze ale velmi dobře použít ke zjištění přibližné napěťové charakteristiky kapacity nebo k demonstraci vlastností keramických kondenzátorů při výuce. Možným vylepšením přípravku by mohlo být doplnění o možnost zobrazení dat v grafické podobě, ať už na grafickém displeji nebo na připojeném počítači. Propojení s počítačem by bylo vhodné i pro další zpracování naměřených hodnot. Měřicí obvod by například bylo vhodné rozšířit o měření fázového posunu a zohlednit jej při výpočtu výsledné kapacity.

## Literatura

- [1] M-J. Pan a Clive A. Randall. A brief introduction to ceramic capacitors. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2010, 26 (3), 44-50. DOI 10.1109/MEI.2010.5482787.
- [2] Tomáš Zedníček. *MLCC and Ceramic Capacitors*. 2023. <https://passive-components.eu/mlcc-and-ceramic-capacitors/>.
- [3] Michal Bednařík. *Fyzika 1*. 1. vyd. V Praze: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04834-4.
- [4] David Halliday, Jearl Walker a Robert Resnick. *Fyzika*. 1. vyd. Brno: VUTIUUM, 2000. ISBN 80-214-1868-0.
- [5] Petr Kulhánek. *Vybrané kapitoly z teoretické fyziky*. Vydání: druhé, aktualizované a změněné vyd. Praha: AGA, 2020. ISBN 978-80-906638-3-1.
- [6] Kumail Abbas. *Structural Optimization of SrMnO3 to Study Electro-Magnetic Characteristics*. 2015.
- [7] University of Cambridge. *Ferroelectric Materials*. 2021. <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/ferroelectrics/printall.php>.
- [8] René Kalbitz. *Voltage and Frequency Dependence of Ferroelectric Class 2 Multilayer Ceramic Capacitors*. 2023. [https://www.we-online.com/components/media/o753710v410%20ANP114a\\_Polarization%20DC%20Bias%20MLCC\\_EN.pdf](https://www.we-online.com/components/media/o753710v410%20ANP114a_Polarization%20DC%20Bias%20MLCC_EN.pdf).
- [9] František Poljak. *Dielektriká*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1983. ISBN 000000.
- [10] Andrius Ceponis a Dalius Mazeika. Piezoelectric Systems as an Alternative Energy Source. *Mokslas - Lietuvos ateitis*. 2014, 6 676-681. DOI 10.3846/mla.2014.775.
- [11] Jens Both. *MLCC Structure Details*. 2008. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MLCC-Structure-Details.svg>.
- [12] Vratislav Michal. *Floating Voltage Sensing Based on Ceramic Capacitor Ferroelectric Derating*. In: *2022 International Conference on Applied Electronics (AE)*. 2022. 1-4.
- [13] Ltd. Murata Manufacturing Co.. *SimSurfing Multilayer Ceramic Capacitors Characteristics Viewer Measurement Conditions*. 2019. [https://ds.murata.co.jp/simsurfing\\_data/pdf/en-us/mlcc/sim\\_mlcc\\_measuringcond\\_e.pdf](https://ds.murata.co.jp/simsurfing_data/pdf/en-us/mlcc/sim_mlcc_measuringcond_e.pdf).
- [14] Ltd. Murata Manufacturing Co.. *SimSurfing: Multilayer Ceramic Capacitors*. 2024. <https://ds.murata.co.jp/simsurfing/mlcc.html?lclid=en-us&jis=false&md5=79803869079216bbf3b6058b58891670>.
- [15] Jiří Hospodka. *Elektronické obvody*. 2024. <https://hippo.feld.cvut.cz/vyuka/soubory/ElektronickeObvody.pdf>.
- [16] Vladimír Haasz, Jan Holub, Michal Janošek, Petr Kašpar a Vojtěch Petrucha. *Elektrická měření*. 3. přepracované vydání vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06412-2.

- 
- [17] Jiří Švarný. *Měření impedancí*. 2021.  
<https://portal.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=214097>.
- [18] Pavel Ripka a Vojtěch Petrucha. *6. Kapacitní a indukčnostní senzory. Měření impedancí*. 2023.  
<https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=273182>.
- [19] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. *R&S@HM8118 Programmable LCR-Bridge*. 2016.  
[https://www.rohde-schwarz.com/nl/manual/r-s-hm8118-lcr-bridge-user-manual-manuals\\_78701-156992.html](https://www.rohde-schwarz.com/nl/manual/r-s-hm8118-lcr-bridge-user-manual-manuals_78701-156992.html).
- [20] Jiří Švarný. *Měření impedancí*. 2021.  
<https://portal.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=214097>.
- [21] Rod Elliott (ESP). *Precision Rectifiers*. 2005.  
<https://sound-au.com/appnotes/an001.htm>.
- [22] 2020 STMicroelectronics. *AN3126 Application note*. 2020.  
[https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/05/fb/41/91/39/02/4d/1e/CD00259245.pdf/files/CD00259245.pdf/jcr:content/translations/en.CD00259245.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/05/fb/41/91/39/02/4d/1e/CD00259245.pdf/files/CD00259245.pdf/jcr:content/translations/en.CD00259245.pdf).
- [23] Aleksander Kaweczynski. *HD44780 16x2 Lcd library*. 2020.  
[https://github.com/4ilo/HD44780-Stm32HAL/blob/master/lcd\\_lib/lcd.c](https://github.com/4ilo/HD44780-Stm32HAL/blob/master/lcd_lib/lcd.c).
- [24] KEMET Corporation. *K-SIM 3.0.7 Capacitor Simulation*. 2021.  
<https://ksim3.kemet.com/capacitor-simulation?pn=C1206C105K3RACAUTO&disty=mouser>.







## **Přílohy**

## A Naměřené hodnoty

**Tabulka A.1.** Měření na RLC metru, naměřené hodnoty kapacity v závislosti na napětí pro vzorky kondenzátorů 1  $\mu\text{F}$ , 10  $\mu\text{F}$  a 100  $\mu\text{F}$ .

$U$ (V)	$C_1$ ( $\mu\text{F}$ )	$C_{10}$ ( $\mu\text{F}$ )	$C_{100}$ ( $\mu\text{F}$ )
0,00	0,957	8,89	78,4
0,50	0,962	8,93	78,8
1,00	0,967	8,97	78,8
1,50	0,970	8,95	75,6
2,00	0,971	8,87	71,1
2,50	0,970	8,72	65,5
3,00	0,970	8,51	60,0
3,50	0,968	8,27	54,8
4,00	0,966	7,99	50,2
4,50	0,963	7,68	45,7
5,00	0,960	7,35	41,2

**Tabulka A.2.** Měření na přípravku, naměřené hodnoty kapacity v závislosti na napětí pro kondenzátor 1  $\mu\text{F}$ .

$U$ (V)	$C_1$ ( $\mu\text{F}$ )	$U$ (V)	$C_1$ ( $\mu\text{F}$ )	$U$ (V)	$C_1$ ( $\mu\text{F}$ )
0,00	0,917				
0,47	0,918	8,60	0,876	16,77	0,724
0,97	0,931	9,10	0,867	17,28	0,713
1,48	0,935	9,62	0,859	17,78	0,702
2,01	0,938	10,12	0,848	18,31	0,694
2,49	0,935	10,64	0,842	18,76	0,680
3,02	0,935	11,16	0,833	19,27	0,667
3,52	0,929	11,66	0,819	19,79	0,661
4,03	0,929	12,17	0,807	20,32	0,653
4,53	0,923	12,69	0,802	20,84	0,645
5,05	0,920	13,19	0,793	21,42	0,627
5,56	0,911	13,70	0,782	21,88	0,621
6,05	0,908	14,21	0,776	22,43	0,606
6,57	0,902	14,94	0,768	22,91	0,600
7,08	0,894	15,23	0,754	23,39	0,590
7,58	0,890	15,74	0,743	23,91	0,577
8,09	0,879	16,26	0,732	24,44	0,572

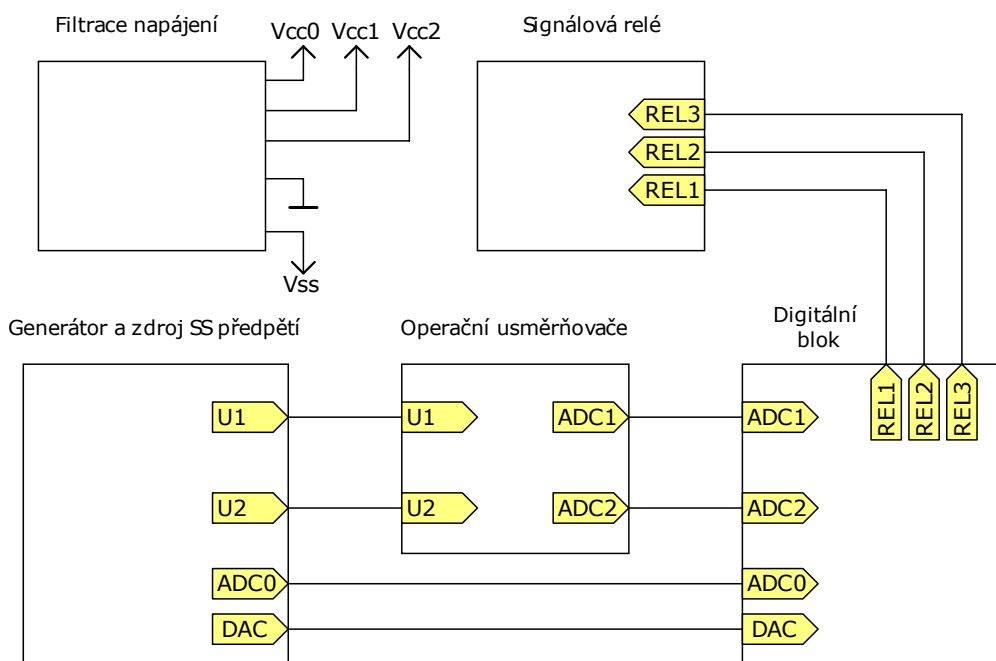
**Tabulka A.3.** Měření na přípravku, naměřené hodnoty kapacity v závislosti na napětí pro kondenzátor  $10\ \mu\text{F}$ .

$U$ (V)	$C_{10}$ ( $\mu\text{F}$ )	$U$ (V)	$C_{10}$ ( $\mu\text{F}$ )
0,00	8,16	16,24	3,20
0,97	8,49	17,25	2,99
2,02	8,51	18,29	2,79
3,02	8,33	19,30	2,62
4,05	7,99	20,26	2,46
5,09	7,56	21,38	2,32
6,04	7,08	22,39	2,18
7,04	6,57	23,46	2,07
8,11	6,03	24,44	1,97
9,09	5,56	25,48	1,87
10,11	5,12	26,47	1,79
11,13	4,73	27,46	1,71
12,14	4,34	28,48	1,67
13,18	4,01	29,56	1,58
14,20	3,71	30,59	1,51
15,21	3,44		

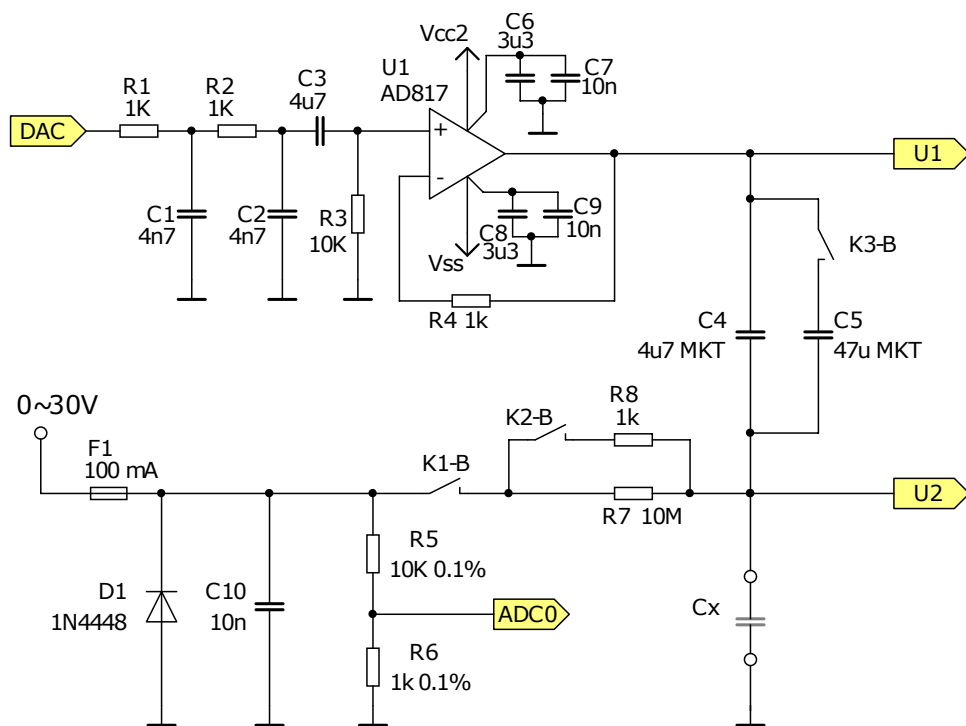
**Tabulka A.4.** Měření na přípravku, naměřené hodnoty kapacity v závislosti na napětí pro kondenzátor  $100\ \mu\text{F}$ .

$U$ (V)	$C_{100}$ ( $\mu\text{F}$ )
0,00	71,3
0,46	71,6
0,97	69,3
1,48	66,5
1,98	62,7
2,48	58,1
3,01	53,7
3,52	49,3
4,01	46,0
4,54	42,0
5,03	38,9
5,51	36,1
6,04	33,0
6,57	30,4
7,07	28,4
7,59	26,4
8,07	24,6
8,59	23,1
9,13	21,7
9,60	20,6
10,12	19,4

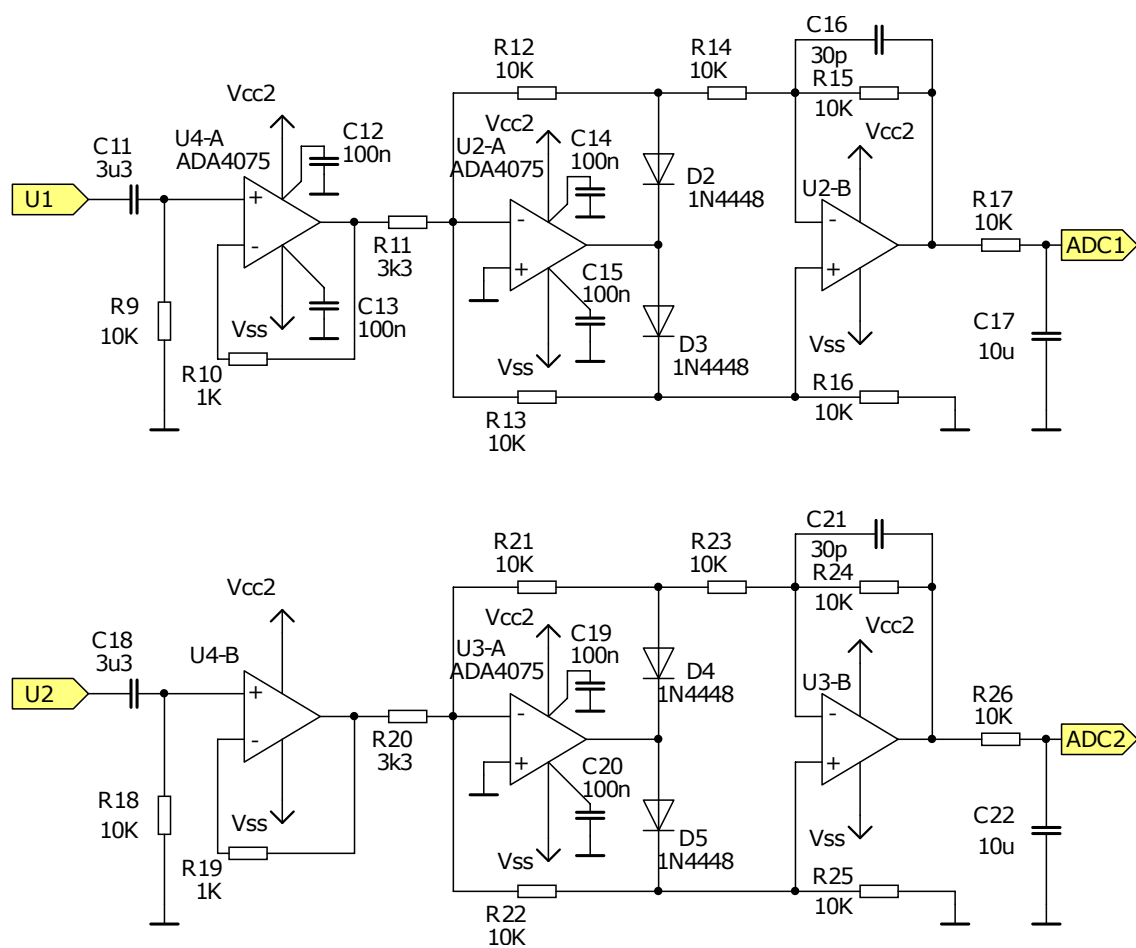
## B Schéma



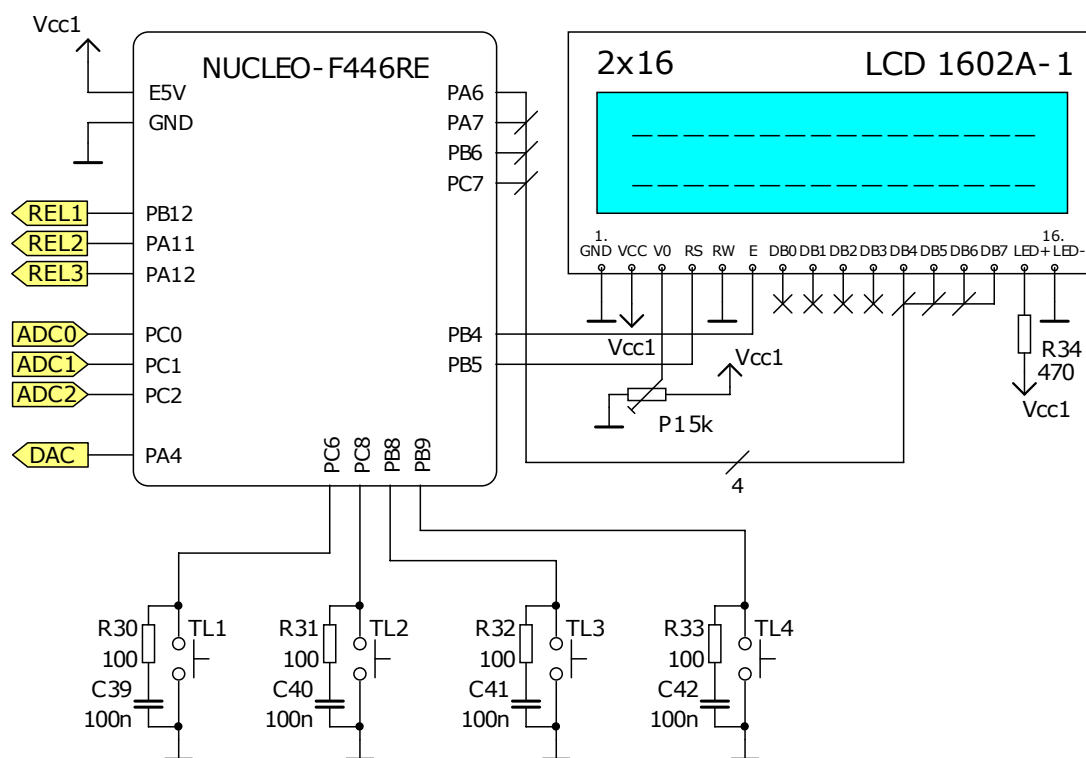
**Obrázek B.1.** Blokové schéma měřicího přípravku.



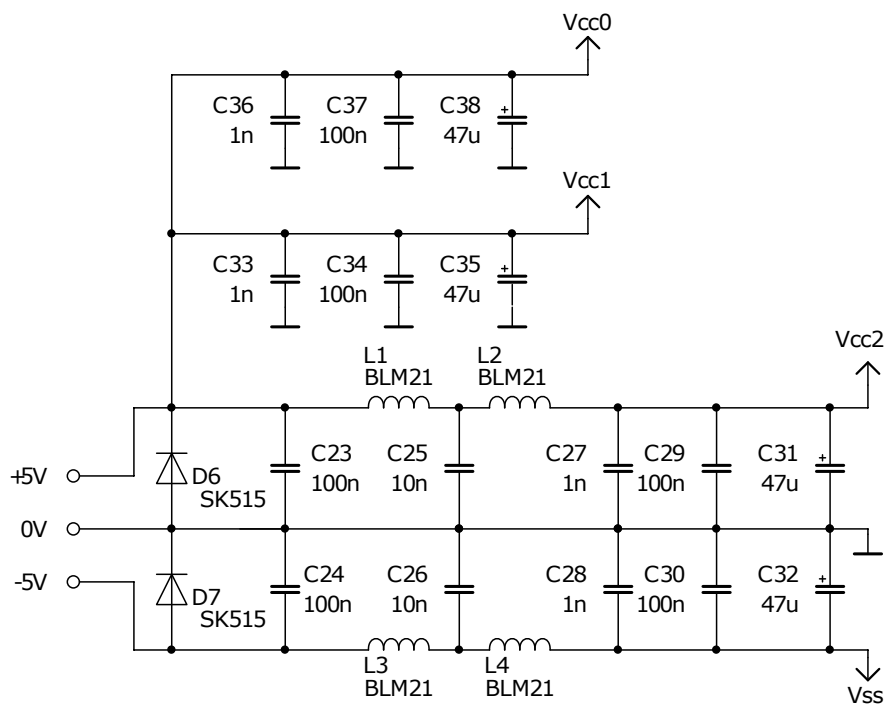
**Obrázek B.2.** Schéma, generátor měřicího napětí a zdroj stejnosměrného předpětí.



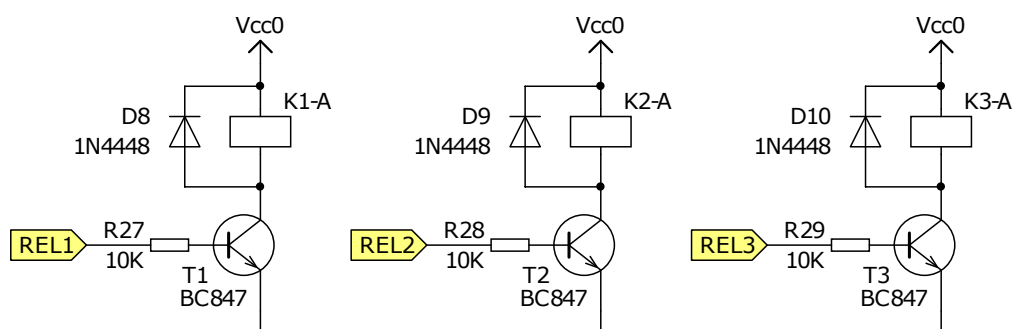
**Obrázek B.3.** Schéma, operační usměrňovače.



**Obrázek B.4.** Schéma, digitální blok.



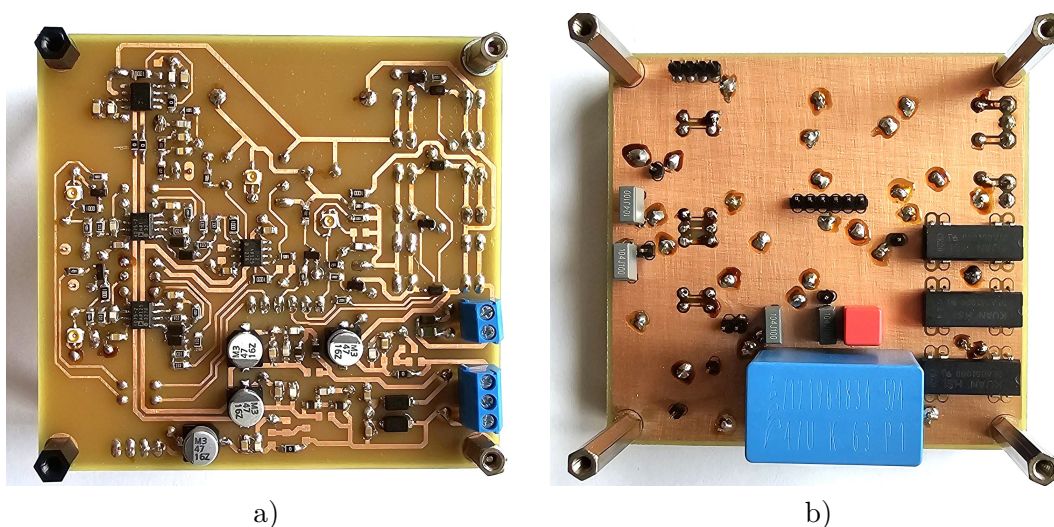
**Obrázek B.5.** Schéma, filtrace napájení.



**Obrázek B.6.** Schéma, signálová relé pro řízení procesu měření.



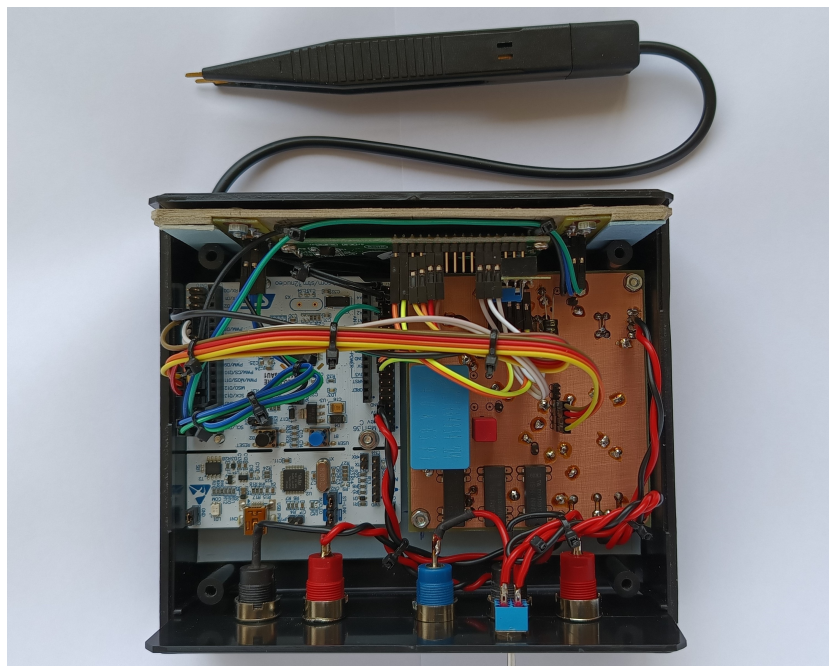
## C Fotografická dokumentace



**Obrázek C.1.** Analogový blok - deska plošného spoje. (a) - strana spojů s SMD součástkami, (b) - strana s rozlitou zemí a vývodovými součástkami.



**Obrázek C.2.** Měřicí přípravek vestavěný do krabičky. Vlevo vývojová deska Nucleo-F446RE, vpravo vyrobená analogová deska.



**Obrázek C.3.** Měřicí přípravek vestavěný do krabičky, včetně měřicí pinzety.



**Obrázek C.4.** Měřicí přípravek, čelní panel.



**Obrázek C.5.** Měřicí přípravek, zadní panel.

## D Návod k použití



**Obrázek D.1.** Měřicí přípravek, čelní a zadní panel.

### Čelní panel

- 1 Posun v seznamu měřených hodnot o úroveň níže
- 2 Posun v seznamu měřených hodnot o úroveň výše
- 3 LCD displej
- 4 Nové měření
- 5 Další měření

### Zadní panel

- 6 Spínač napájení
- 7 Napájení, stejnosměrné napětí 0–30 V
- 8 Napájení, symetrické stejnosměrné napětí  $\pm 5$  V

## D.1 Spuštění přípravku

Před spuštěním by měl být spínač napájení v poloze „vypnuto“. Nejprve je potřeba připojit napájení  $\pm 5$  V a 0–30 V z laboratorního zdroje. Zdroj 0–30 V by měl mít výstupní proud alespoň 100 mA a zdroj  $\pm 5$  V alespoň 200 mA. Přípravek se spustí přepnutím spínače do polohy „zapnuto“.

Pozn.: Záporný pól zdroje 0–30 V a zem symetrického zdroje  $\pm 5$  V jsou uvnitř přípravku propojeny!

## ■ D.2 Měření

Na začátku měření je třeba nejprve připojit měřený kondenzátor uchopením do měřicí pinzety a poté stisknout tlačítko „nové měření“. Proběhne měření kapacity při nulovém stejnosměrném předpětí a je automaticky vybrán vhodný měřicí rozsah, buď 1–10  $\mu\text{F}$ , nebo 10–100  $\mu\text{F}$ , případně je vypsána hláška „Kapacita mimo rozsah“. Změřená hodnota se zobrazí na displeji a je uložena do paměti jako první bod charakteristiky.

V dalším kroku je možné nastavit požadovanou hodnotu vstupního stejnosměrného předpětí na připojeném laboratorním zdroji v rozsahu 0–30 V. Stiskem tlačítka „další měření“ se spustí měření při nastaveném stejnosměrném předpětí a do paměti se uloží další bod charakteristiky. Na displeji se zobrazuje zjištěná kapacita, hodnota stejnosměrného předpětí a zvolený rozsah měření – RNG1 pro rozsah 1–10  $\mu\text{F}$  a RNG2 pro 10–100  $\mu\text{F}$ . Po každém měření se na displeji vždy zobrazí poslední změřená hodnota. Změřené body charakteristiky se ukládají do seznamu, ve kterém je možno se pohybovat pomocí dvou tlačítek „nahoru“ a „dolů“.

Při každé výměně měřeného kondenzátoru je potřeba začít měření stiskem tlačítka „nové měření“, protože pouze tehdy proběhne automatická detekce rozsahu. Při každém stisku tlačítka „nové měření“ jsou hodnoty z předchozího měření smazány. Seznam měřených hodnot má délku omezenou na 20 položek a při jejím překročení jsou přepisovány nejstarší uložené hodnoty.

Pozn.: Pokud je spuštěno měření bez připojeného kondenzátoru, zobrazí se hláška „Kapacita mimo rozsah“. Je třeba kondenzátor připojit a znovu stisknout tlačítko měření.