

# **Obsah**

<b>1</b>	<b>Elektrické obvody</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Ideální součástky elektronických obvodů</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Polovodičové součástky</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Nelineární rezistory</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Feroelektrické kondenzátory</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>Porovnání VA charakteristik různých typů fv modulů</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>Vlastnosti vysokofrekvenčních cívek</b>	<b>30</b>
<b>8</b>	<b>Vlastnosti kondenzátorů a rezistorů při kmitočtech do 1 MHz</b>	<b>33</b>
<b>9</b>	<b>Vlastnosti kondenzátorů a rezistorů při kmitočtech nad 1 MHz</b>	<b>37</b>
<b>10</b>	<b>Osazování DPS</b>	<b>41</b>

# 1 Elektrické obvody

## 1.1 Úvod

Alespoň určitá schopnost návrhu elektrického obvodu musí patřit mezi základní vědomosti absolventa technického oboru se zaměřením na elektrotechniku. Elektrické obvody lze třídit z mnoha hledisek. Podle použitých součástek je lze rozdělit například na aktivní, tj. ty které obsahují zdroje energie a pasivní, tj. ty které energii pouze spotřebovávají. Dále pak na vysokofrekvenční, nízkofrekvenční, lineární, nelineární atd.

V tomto cvičení je pozornost zaměřena na pasivní děliče napětí. Ačkoliv se jedná o velice jednoduchý stavební blok elektrických obvodů, patří také mezi ty nejpoužívanější. Prakticky v žádném elektronickém obvodu je nelze vynechat. Lze se s nimi setkat ve zpětných vazbách zesilovačů, při nastavování pracovních bodů tranzistorů, lze jimi impedančně přizpůsobovat výstupy zdrojů napětí, používají se v sondách osciloskopů atd.

### 1.1.1 Dělič napětí

Pasivní dělič napětí je realizován dvěma rezistory. Vstupní napájecí napětí je rozděleno v podobě úbytků napětí v poměru daném hodnotami obou rezistorů. Výstupní napětí se obvykle získává pouze z rezistoru se společnou zemí s napájecím zdrojem. Vztah pro dělící poměr nezatíženého děliče lze získat z Ohmova zákona:

$$U_{20} = R_2 \cdot I = R_2 \cdot \frac{U_1}{R_1 + R_2} \implies \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \quad (1)$$

Podle Theveninova teorému lze spojení děliče napětí a napěťového zdroje nahradit zdrojem napětí s napětím  $U_{20}$  a s vnitřním odporem  $R_i$ . Vnitřní odpor náhradního zdroje je získán jako odpor mezi výstupními svorkami po nahrazení všech zdrojů napětí v obvodu zkratem. V případě děliče jsou pak oba odpory paralelně a získáváme vztah:

$$R_i = \frac{R_2 \cdot R_1}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

Uvedené úvahy neplatí jen pro rezistory, ale i pro obecnou impedanci (tj. v dělící mohou být i reaktance).

### 1.1.2 Frekvenční přizpůsobení

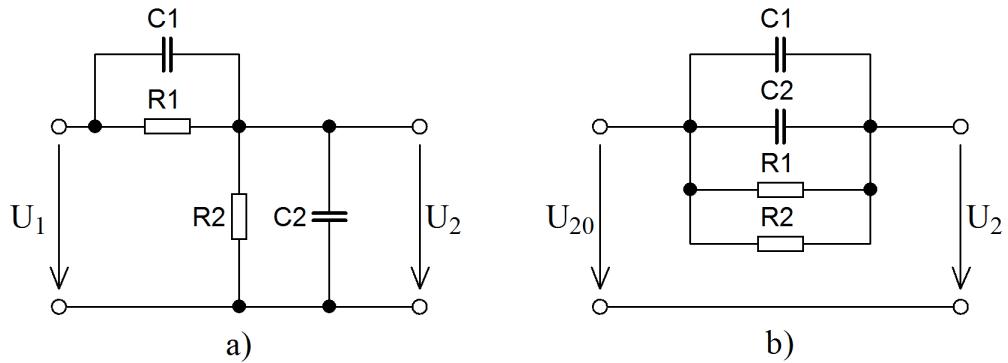
Výstupní napětí  $U_2$  odporového děliče může být frekvenčně závislé v důsledku přítomnosti parazitních reaktancí. Při spojování funkčních bloků, jako například zdroj napětí a zátěž, je obvykle třeba kompenzovat především kapacitu zátěže  $C_2$ . Pomyšlný dělič napětí vzniká mezi vnitřním odporem zdroje  $R_1$  a odporem zátěže  $R_2$ . Připojená kapacita s rostoucí frekvencí snižuje výslednou impedanci zátěže a napětí na záteži klesá. Daný jev lze kompenzovat připojením dalšího kondenzátoru  $C_1$  paralelně k vnitřnímu odporu zdroje  $R_1$ . Pro dělící poměr daného obvodu lze postupně odvodit:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{R_2}{1+j\omega R_2 C_2}}{\frac{R_1}{1+j\omega R_1 C_1} + \frac{R_2}{1+j\omega R_2 C_2}} = \frac{1}{1 + \frac{R_1 \cdot (1+j\omega R_2 C_2)}{R_2 \cdot (1+j\omega R_1 C_1)}} \quad (3)$$

V rovnici (3) je  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  uhlova frekvence. Zřejmě bude dělící poměr frekvenčně nezávislý za předpokladu:

$$\frac{R_1 - \frac{j}{\omega \cdot C_1}}{R_2 - \frac{j}{\omega \cdot C_2}} = K, \quad (4)$$

kde  $K$  je určitá reálná konstanta. Hodnotu konstanty lze odvodit při znalosti jednotlivých prvků obvodu a tento úkol je součástí následujících cvičení. Vnitřní impedanční náhradního zdroje napětí lze opět odvodit dle Theveninova teorému, čímž získáme všechny čtyři prvky děliče paralelně.



Obrázek 1: a) frekvenčně kompenzovaný dělič napětí, b) náhradní schéma zdroje podle Thevenina

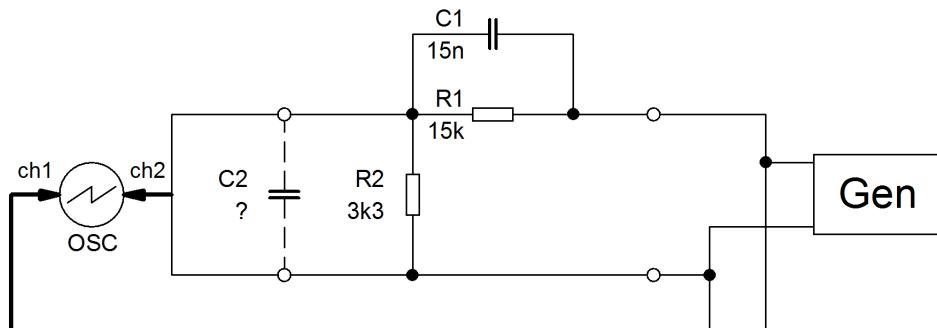
## 1.2 Frekvenční přizpůsobení pasivního děliče napětí

### 1.2.1 Úkol měření

- Pro daný frekvenčně nepřizpůsobený dělič spočtěte vhodnou hodnotu kapacity výstupního kondenzátoru, kterým zajistíte konstantní dělící poměr výstupního napětí v širokém rozsahu frekvencí.
- Svůj návrh ověřte měřením na přípravku pro vstupní napětí obdélníkového průběhu o frekvenci 500 Hz. Zaznamenejte výstupní průběh napětí pro překompenzovaný, nedostatečně kompenzovaný a frekvenčně kompenzovaný dělič napětí.
- Pomocí osciloskopu a generátoru sinusového napětí změřte frekvenční závislost výstupního napětí děliče po připojení kondenzátorů o hodnotách 150 nF, 68 nF a 33 nF. Měření proveděte pro rozsah frekvencí 100 Hz až 10 kHz.

Vysvětlete v závěru rozdíly mezi frekvenčními charakteristikami.

### 1.2.2 Schéma zapojení



### 1.2.3 Postup měření

- ad a)** Úkol lze vyřešit více způsoby. Hodnotu vhodné kapacity lze určit výpočtem úpravou vztahu (4). Tak získáme přímo závislost mezi jednotlivými prvky obvodu děliče. Druhou možností je odzkoušet jednotlivé měřené vzorky kondenzátorů připojováním na výstup děliče při napájení děliče obdélníkovým signálem. Pro správnou hodnotu kapacity bude výstupní obdélníkový signál nezkreslený. Při znalosti správné hodnoty kapacity pak lze dodatečně snadno vyvodit její závislost na ostatních prvcích obvodu.
- ad b)** Při ověřování připojte 1. kanál osciloskopu na vstup funkčního generátoru a 2. kanál na výstup děliče. Generátor připojte na vstup děliče a nastavte na něm obdélníkový průběh o amplitudě 5 V a frekvenci 500 Hz. Jednotlivé výstupní průběhy obdélníkových signálů zaznamenejte na paměťové medium nebo překreslete do sešitu.
- ad c)** Na funkčním generátoru nastavte výstupní sinusový průběh. Zapojení osciloskopu a generátoru je stejné jako v předchozím úkolu. Pomocí osciloskopu měřte amplitudu vstupního (nemění se) a výstupního sinusového průběhu. K měření amplitudy lze využít rastru stínítka osciloskopu nebo cursorů (seznamte se s uvedenými možnostmi). Frekvenci v daném rozsahu měňte s logaritmickým krokem 100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz. Části rychlých změn amplitudy výstupního napětí proměřte s menším krokem. Napěťový přenos určete jako poměr výstupního ke vstupnímu napětí a vyneste jej do společného grafu pro jednotlivé kondenzátory připojené k výstupu.

## 1.3 Impedanční přizpůsobení vstupu zesilovače

### 1.3.1 Úkol měření

Přepínačem vyřaďte sériovou kapacitu děliče a provedte následující úkoly:

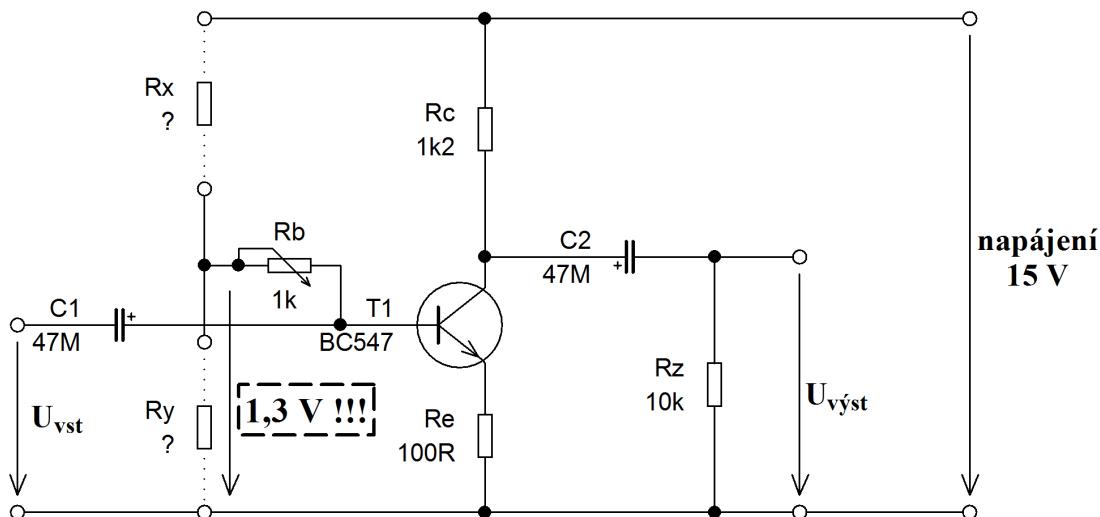
- a) Spojení generátoru a děliče uvažujte jako zdroj obdélníkového napětí s definovaným vnitřním odporem. Vrcholovou hodnotu obdélníkového průběhu napětí nastavte na generátoru na 5 V. Určete (a změřte):

- vrcholovou hodnotu napětí naprázdno - spočtěte a ověřte osciloskopem nebo voltmetrem při napájení stejnosměrným zdrojem 5 V,
- vnitřní (výstupní) odpor děliče - spočtěte a ověřte pomocí měření se stejnosměrným zdrojem.

Do sešitu zakreslete náhradní schéma tohoto zdroje s určenými hodnotami prvků.

- b) Upravený zdroj propojte s přípravkem tranzistorového zesilovače s napěťovým zesílením  $A_U = 20 \text{ dB}$ . Navrhněte a zapojte dělič v bázovém obvodu, kterým nastavíte stejnosměrný pracovní bod tranzistoru a zároveň definujete vstupní odpor zesilovače. Vstupní odpor zesilovače zvolte tak, aby po propojení s děličem byl na výstupu zesilovače obdélníkový signál o vrcholové hodnotě 4 V, 3 V nebo 2 V (určí vedoucí cvičení). Dělič napájejte z generátoru obdélníkovým signálem o vrcholové hodnotě 5 V a frekvenci 1 kHz. Svůj návrh popište do sešitu a jeho správnost ověřte měřením pomocí osciloskopu.

### 1.3.2 Schéma zapojení



### 1.3.3 Postup měření

- ad a) Jelikož je dělič frekvenčně kompenzovaný, bude napětí naprázdno  $U_0$  dáno poměrem obou rezistorů. Ověření měřením provedeme pro takřka nezatížený dělič, kdy na jeho výstup připojíme voltmetr a vstup budeme napájet stejnosměrným zdrojem o napětí 5 V. Vnitřní odpor děliče  $R_i$  lze spočítat po zjednodušení obvodu podle Theveninova teorému. Hodnotu lze ověřit měřením několika, avšak podobnými způsoby. Ten nejjednodušší spočívá ve zkratování děliče pomocí ampérmetru při napájení děliče stejnosměrným

zdrojem. Z ampérmetru odečteme zkratový proud náhradního zdroje napětí. Vnitřní odpor pak získáme jako podíl napětí naprázdno a zkratového proudu.

**ad b)** Vstupní odpor zesilovače zatíží připojený zdroj signálu, v důsledku čehož poklesne jeho svorkové napětí. V prvním kroku je tedy nutné určit, na jakou hodnotu může klesnout vstupní napětí. Pro příklad uvažujme, že výstupní špičkovou hodnotu napětí zesilovače požadujeme 6 V. Jelikož zesilovač zesiluje  $10\times$ , pak požadovaným vstupním napětím je 0,6 V.

Vnitřní odpor zdroje signálu  $R_i$  (určeno v předchozím bodě) a vstupní odpor zesilovače  $R_{vst}$  společně vytvářejí dělič napětí  $U_0$ , který je nezatížený. Požadované výstupní napětí je v předchozím kroku spočtených 0,6 V. Ze vztahu pro výstupní napětí nezatíženého děliče 1 vypočítáme požadovanou hodnotu vstupního odporu zesilovače  $R_{vst} = R_2$ .

Při návrhu děliče nastavující pracovní bod tranzistoru zanedbejte odběr bázového obvodu. Předpokládejte, že je dělič nezatížený a neuvažujte ani hodnotu připojeného potenciometru  $R_b$ , který slouží pouze k doladění výsledné hodnoty vstupního odporu. Pro správné nastavení pracovního bodu, musí být výstupní napětí děliče rovno **1,3 V** při napájení 15 V. Vnitřní odpor navrhovaného děliče musí být roven požadovanému vstupnímu odporu zesilovače, tj. hodnotě  $R_{vst}$ . Podle příslušných vztahů dopočítejte hodnoty prvků  $R_x$  a  $R_y$ . K řešení této úlohy lze přistupovat různými způsoby. Ten nejpracnější je vyřešit soustavu dvou rovnic o dvou neznámých:

$$U_{bias} = 1,3 \text{ V} = 15 \text{ V} \cdot \frac{R_y}{R_x + R_y} \quad (5)$$

$$R_{vst} = \frac{R_x \cdot R_y}{R_x + R_y} \quad (6)$$

Z řady E12 zvolte nejbližší hodnoty odporů. Obvodové prvky připojte na příslušné svorky přípravku zesilovače. Vstup celého obvodu napájejte obdélníkovým signálem o špičkové hodnotě 5 V a frekvenci 1 kHz. Výstup zesilovače zobrazte na osciloskopu. Pokud nebylo možné získat hodnotu vstupního odporu přesně, pokuste se jej doladit pomocí potenciometru na přípravku. Pokud je špičková hodnota průběhu napětí odlišná (více jak o 0,4 V) od požadované, pak je třeba návrh děliče přehodnotit.

#### 1.3.4 Použitý materiál

1. Rezistory řady hodnot E12, 1 k $\Omega$  - 82 k $\Omega$
2. Foliové kondenzátory, 33 nF, 68 nF, 150 nF
3. Keramické kondenzátory řady hodnot E12, 10 nF - 330 nF
4. Přípravek tranzistorového zesilovače

## 2 Ideální součástky elektronických obvodů

### 2.1 Úvod

Při návrhu elektrických obvodů zpravidla jednotlivé obvodové prvky považujeme za ideální a výjma polovodičových součástek také za lineární. Toto cvičení se zaměřuje na popis a chování elektronických obvodů složených z pasivních součástek, jakými jsou rezistor, cívka a kondenzátor při harmonickém (sinusovém) napájení. Přitom předpokládáme, že uvedené prvky vykazují pouze svůj hlavní charakter a neuvažujeme jejich parazitní vlastnosti, jako například svodový odpor u kondenzátoru nebo odpor vinutí u cívky.

#### 2.1.1 Odpor, reaktance, impedance

Při harmonickém napájení lze průběhy obvodových veličin popsat fázorovým diagramem a využít možností operátorového počtu Steinmetzovy transformace (někde i Fourierovy transformace), který nahradí derivace a integrace násobením a dělením členem  $j\omega$ .  $\omega$  zde má význam úhlové frekvence zkoumaného signálu. Zřejmě se tento typ transformace hodí především pro analýzu harmonického ustáleného stavu obvodu. Tímto způsobem získáme pro ideální obvodové prvky operátorové impedance (odpor, induktivní reaktance, kapacitní reaktance), které jsou definované následující vztahy:

$$R = \frac{\hat{U}_R}{\hat{I}_R} \quad (7)$$

$$\frac{-j}{\omega C} = \frac{\hat{U}_C}{\hat{I}_C} \quad (8)$$

$$j\omega L = \frac{\hat{U}_L}{\hat{I}_L} \quad (9)$$

Ze vztahů plyne, že po zobrazení fázorů (vektorů, komplexních čísel) napětí a proudu v komplexní (Gaussově) rovině dochází u kapacitoru a induktoru mezi oběma veličinami k fázovému posunu o  $90^\circ$ . U ideální cívky (induktor) se proud za napětím zpožďuje o  $90^\circ$ , zatímco u ideálního kondenzátoru (kapacitor) proud napětí o  $90^\circ$  předbíhá. Dále je zřejmý i vliv frekvence, kdy v případě ideální cívky je reaktance úměrná frekvenci, tj. její hodnota roste, zatímco u kondenzátoru reaktance s frekvencí klesá a to nepřímo úměrně.

Při spojování více prvků využíváme počítání s komplexními čísly. Obecný komplexní výsledek nazýváme impedancí obvodu a označujeme jí  $\hat{Z}$ . Platí pro ní stejná vyjádření jako pro komplexní čísla. Například impedanci sériového spojení rezistoru a induktoru lze popsat jako:

$$\hat{Z} = R + jX_L = R + j\omega L \quad (10)$$

nebo

$$\hat{Z} = |Z| \cdot e^{j\varphi} \quad (11)$$

Pro členy v rovnici (11) platí:

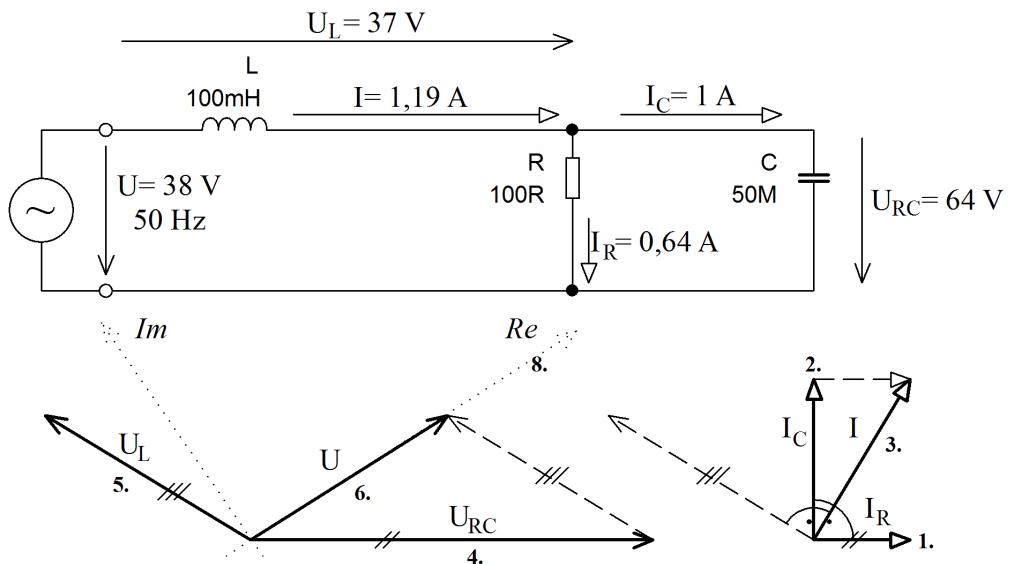
$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (12)$$

$$\varphi = \arctg \left( \frac{\omega L}{R} \right) \quad (13)$$

## 2.1.2 Fázorový diagram

Fázorové diagramy jsou vlastně zobrazením hodnot obvodových veličin v komplexní rovině. Diagram musí vždy splňovat Kirchhoffovy zákony, proto součet všech fázorů proudů v jednom uzlu musí být nula a stejně tak i součet všech fázorů napětí jedné smyčky (jinými slovy, v diagramu tyto fázory musí tvořit uzavřený obrazec). Pokud známe hodnoty napětí, proudů a fází v jednotlivých částech obvodu, je jedno, který fázor nakreslíme jako první. V ostatních případech vždy začínáme od fázoru, který je v obvodu nejdále od napájecích svorek, tak jako bychom obvod řešili postupným zjednodušováním. Dále máme možnost volby natočení reálné a imaginární osy vůči celému diagramu. U komplikovanějších obvodů bývá obvyklé (ne předepsané) u napájení napěťovým zdrojem umisťovat do reálné osy fázor napájecího napětí a při napájení zdrojem proudu fázor napájecího proudu. U jednoduchých zapojení (1-3 prvky) se do reálné osy obvykle umisťuje obvodová veličina, která je společná všem prvkům.

Pořadí kreslení jednotlivých fázorů pro určitý obvod ukazuje obrázek 2. Pro přehlednost jsou odděleny fázory napětí a proudu. Diagram začíná vyřešením fázorů proudu v RC obvodu. Proud rezistorem je v měřítku zakreslen horizontálně. Jelikož napětí na paralelní kombinaci je oběma prvkům společné a ve fázi s proudem rezistoru, musí proud kapacitorem předbíhat o  $90^\circ$ . Součet obou fázorů pak dává výsledný proud  $I$ . Následuje zakreslení napětí  $U_{RC}$  ve fázi s proudem rezistoru. Napětí na cívce musí o  $90^\circ$  předbíhat výsledný proud  $I$  a součet obou napětí dá výsledné napětí zdroje. Jako poslední se zakreslují osy, vůči kterým se měří všechny fázové úhly a podle potřeby se diagram otočí (překreslí).



Obrázek 2: Ukázka kreslení fázorového diagramu

## 2.1.3 Rezonance

Při sériovém resp. paralelním spojení induktoru a kapacitoru může dojít k jevu, kdy se o fázory napětí resp. proudu vzájemně kompenzují (odečtou) a obvod dosáhne nejnižší resp. nejvyšší možné impedance. K danému jevu dojde když se absolutní hodnoty kapacitní a induktivní reaktance rovnají. Z této podmínky lze odvodit tzv. Thomsonův vztah pro rezonanci:

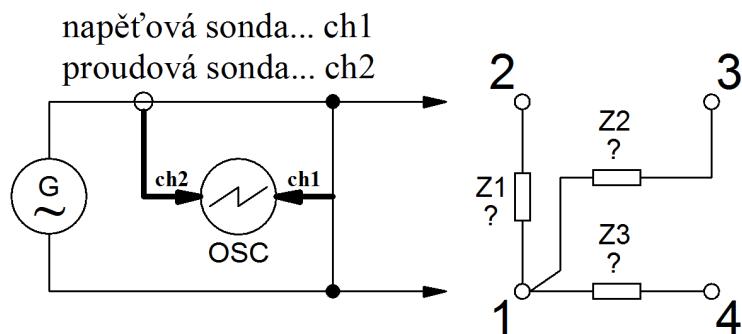
$$\omega_{REZ}L = \frac{1}{\omega_{REZ}C} \implies \omega_{REZ} = 2 \cdot \pi \cdot f_{REZ} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (14)$$

## 2.2 Měření impedance a frekvenční vlastnosti obvodových prvků

### 2.2.1 Úkol měření

- Pomocí funkčního generátoru a osciloskopu identifikujte typ obvodového prvku, který je připojen uvnitř měřeného přípravku mezi svorkami: 2-1, 3-1, 4-1;
- Určete hodnoty hlavních parametrů jednotlivých prvků ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ );
- Změřte závislosti impedancí daných prvků na frekvenci v rozsahu 200 Hz až 2 kHz.

### 2.2.2 Schéma zapojení



### 2.2.3 Postup měření

- ad a)** Dle schématu zapojení připojte osciloskop a funkční generátor k měřenému přípravku. Na funkčním generátoru nastavte sinusový průběh o amplitudě 5 V a frekvenci 500 Hz. Z průběhů na osciloskopu u vysledujte, zda existuje kladný nebo záporný fázový posun mezi napětím a proudem. Dále změňte frekvenci na 200 Hz a 1 kHz a sledujte, zda a jak se mění amplituda měřeného proudu. Uvedené zopakujte pro všechny impedance.
- ad b)** Z hodnot z předešlého měření nebo dalším měřením stanovte z Ohmova zákona hodnotu impedance. Podle typu obvodového prvku dopočítejte hlavní parametr:
- ad c)** Zapojení zůstává nezměněno. Změřte závislost amplitudy (příp. efektivní hodnoty) proudu daným prvkem a napětí (nemění se) na frekvenci v rozsahu 200 Hz až 2 kHz. Frekvenci nastavujte pomocí funkčního generátoru. Ze změřených obvodových veličin určete podle Ohmova zákona impedance a vyneste je do společného grafu v závislosti na frekvenci.

### 2.2.4 Měřené vzorky

- Black box - přípravek RLC s nepopsanými vstupy

## 2.3 Měření RLC - fázorové diagramy

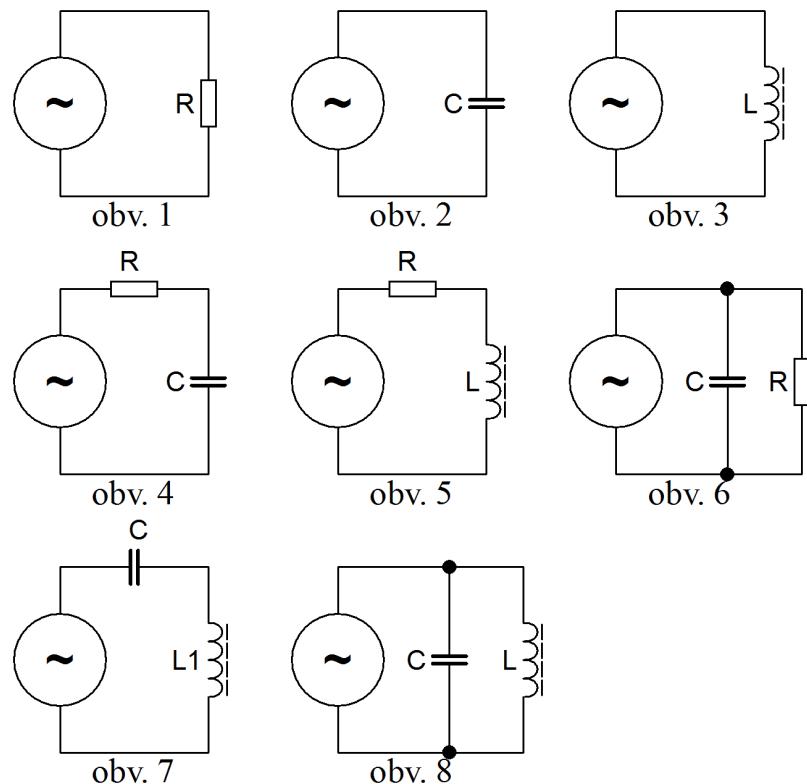
### 2.3.1 Úkol měření

Na osciloskopu zobrazte průběhy napětí a proudu u jednotlivých spojení pasivních obvodových prvků:

- obv. 1. rezistor samostatně,
- obv. 2. kapacitor samostatně,
- obv. 3. induktor samostatně,
- obv. 4. sériové spojení kapacitoru a rezistoru,
- obv. 5. sériové spojení induktoru a rezistoru,
- obv. 6. paralelní spojení rezistoru a kapacitoru,
- obv. 7. sériové spojení induktoru a kapacitoru,
- obv. 8. paralelní spojení induktoru a kapacitoru.

Naměřené obvodové veličiny zakreslete do vektorových diagramů. U obvodů obsahujících spojení induktoru a kapacitoru vypočtěte rezonanční frekvenci. Zjistěte, zda jsou tyto obvody v rezonanci. Hodnoty hlavního parametru jednotlivých obvodových prvků určete ohmovou metodou tak, jak byly určovány v předcházejícím úkolu měření v bodě b). Získané výsledky porovnejte s měřením na RLC můstku.

### 2.3.2 Schéma zapojení



### 2.3.3 Postup měření

Jednotlivé obvody zapojujte dle schémat zapojení. Pro napájení obvodů využívejte **výhradně** připraveného zdroje vyhlazené sinusovky o frekvenci 50 Hz. Tento zdroj má měkkou výstupní charakteristiku (nenulový vnitřní odpor), jelikož některá obvodová spojení vytvářejí velmi ma-

lou výslednou impedanci. Napájení jiným zdrojem (s tvrdou charakteristikou) může způsobit jeho zničení nebo destrukci součástek.

Každý zde měřený obvod má jednu společnou obvodovou veličinu. V případě sériových spojení teče skrz všechny součástky stejný proud, u paralelních spojení je na všech součástkách shodné napětí. Tuto společnou veličinu vždy uvažujte jako referenční (fázový úhel je  $\varphi = 0^\circ$ , tj. fázor ukazuje ve směru reálné osy). Vůči referenční hodnotě obvodové veličiny měřte fázové posuny ostatních veličin. Pro takto jednoduché obvody tímto způsobem vždy získáme ve fázorovém diagramu veličiny na odporu ve směru reálné osy a na reaktancích ve směru imaginární osy.

**POZOR:** Při zobrazování průběhů by měly být sondy osciloskopu umisťovány ve stejném smyslu, v jakém uvažujeme tok proudu a jím vyvolané úbytky napětí (ať měření respektuje Kirchhoffovy zákony). Při prohazování konců sond může dojít k nežádoucímu posunu průběhu o  $180^\circ$ .

Fázorové diagramy vynášejte v amplitudách, tj. z osciloskopu odečítejte vždy amplitudy průběhů. Je vhodné zaznamenat si všechny naměřené hodnoty (vždy amplituda + fáze) do tabulky a pak teprve vynést jednotlivé fázorové diagramy.

#### 2.3.4 Měřené vzorky

1. Drátový rezistor
2. Foliový kondenzátor
3. Cívka na jádře z magnetických plechů

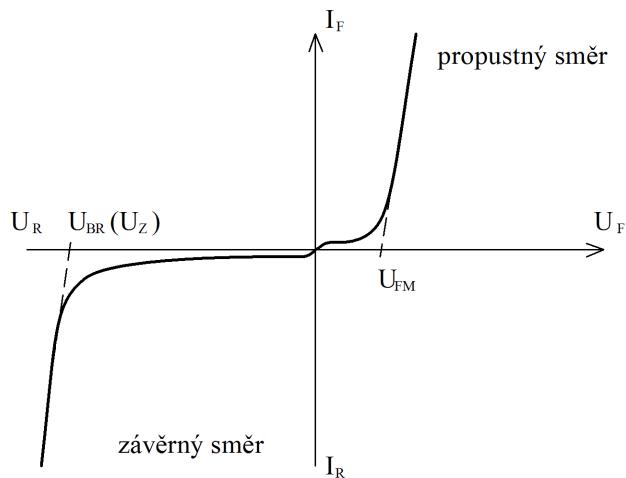
# 3 Polovodičové součástky

## 3.1 Úvod

Polovodičové součástky jsou nedílnou součástí moderních elektronických zařízení. Nejpoužívanějšími prvky jsou především diody a tranzistory. Oba prvky mají nelineární charakteristiky (vztah mezi proudy a napětími) a ke správnému návrhu obvodu je nutné tyto charakteristiky znát nebo změřit.

### 3.1.1 Diody

Diody jsou součástky s jedním přechodem PN nebo s přechodem kov polovodič (Schottkyho dioda). Tyto prvky mají různá uplatnění závisející na parametrech VA charakteristiky. Ta vypadá tvarově téměř vždy stejně, viz obrázek 3. Hlavní odlišnosti se týkají hodnot prahového napětí  $U_{FM}$  v propustném směru a průrazného napětí  $U_{BR}$  v závěrném směru. Usměrňovací diody se vyznačují malým napětím v propustném směru (0,3 V Schottkyho dioda, 0,6 V křemíková dioda s přechodem PN), ale velkým průrazným napětím (řádově stovky voltů). Naproti tomu Zenerovy diody mají průrazné napětí nízké. To bývá v závislosti na dotaci od zhruba 4 V do více než 100 V. Různá hodnota průrazných (Zenerových) napětí  $U_Z$  těchto diod se v obvodech využívá jako napěťová reference. Všimněte si v charakteristikách, že po překročení určité hodnoty proudu se napětí na diodě mění jen málo. Největší napětí v propustném směru mají zpravidla LED (Light Emitting Diode). Jelikož napětí v propustném směru i barva světelného záření jsou závislé na šířce zakázaného pásu polovodiče, liší se napětí LED navíc podle barvy vyzařovaného světla.



Obrázek 3: VA charakteristika diody

### 3.1.2 Bipolární tranzistor

Bipolární tranzistor je polovodič se dvěma přechody PN, který je převážně používán pro zesilování nebo pro spínací účely. Podle struktury rozlišujeme typ NPN a PNP. Jedná se o tří vývodovou součástku s elektrodami: kolektor (C), emitor (E) a báze (B). Velikost protékajícího proudu mezi kolektorem a emitorem je závislá na velikosti proudu protékajícího mezi bází a emitorem. Obvodově lze tedy na tranzistor pohlížet jako na zdroj proudu řiditelný proudem.

Tranzistor je pokládán za dvojbran, přičemž v tomto měření je emitorový vývod společný oběma branám. Vlastnosti tohoto zapojení lze popsát pomocí různých typů charakteristik. V

katalozích se převážně uvádějí hybridní h parametry. Tranzistorový dvojbran je tedy popsán následující soustavou rovnic:

$$U_{BE} = h_{11E} \cdot I_B + h_{12E} \cdot U_{CE} \quad (15)$$

$$I_C = h_{21E} \cdot I_B + h_{22E} \cdot U_{CE} \quad (16)$$

Jednotlivé parametry, jak už jejich jednotky napovídají, mají různé významy:

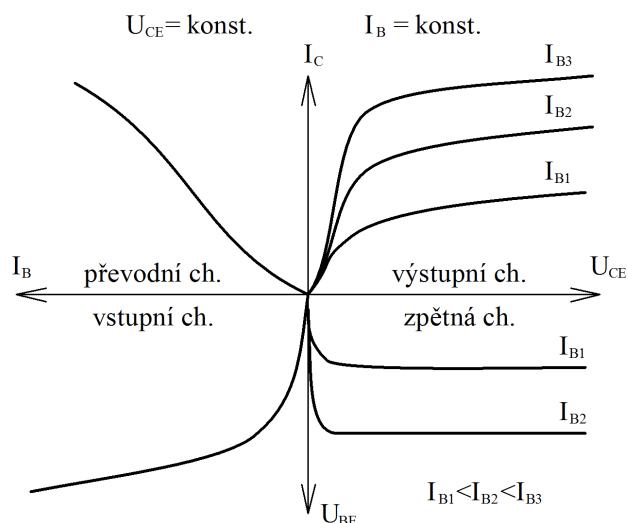
$h_{11E}$  je vstupní impedance tranzistoru ( $\Omega$ ),

$h_{12E}$  je zpětný napěťový přenos (-),

$h_{21E}$  je proudový zesilovací činitel (-),

$h_{22E}$  je výstupní admitance tranzistoru (S).

$h$  parametry lze pokládat za konstantní pouze pro určité okolí pracovního bodu. Pro různé pracovní body se jejich hodnoty obvykle liší. Proto se vlastnosti tranzistoru popisují mimojiné graficky vynesením jednotlivých charakteristik ze změřených dat.



Obrázek 4: VA charakteristika tranzistoru

### 3.1.3 Měření VA charakteristiky pulzní metodou

VA charakteristika polovodivého prvku vždy závisí na teplotě. Při statickém měření stejněnosměrným proudem dochází vlivem ztrát k ohřívání měřeného prvku. Při pomalém měření jsou tak jednotlivé body charakteristiky změřeny při různých teplotách. Do VA charakteristiky můžeme takto zavléci i určitou hysterezu, pokud budeme měřit z nulového proudu do maxima a následně zpět. Pracovní bod ohřátého prvku totiž poběží po jiné křivce.

Ohřívání prvku se vyhneme napájením prvku co nejnižší efektivní hodnotou měřícího proudu. Snížení efektivní hodnoty proudu, aniž bychom museli měnit měřený rozsah proudu, dosáhneme napájením pomocí pulzů. Celé měření tak proběhne v rámci jednoho krátkého pulzu a nedojde k výraznému ohřátí součástky.

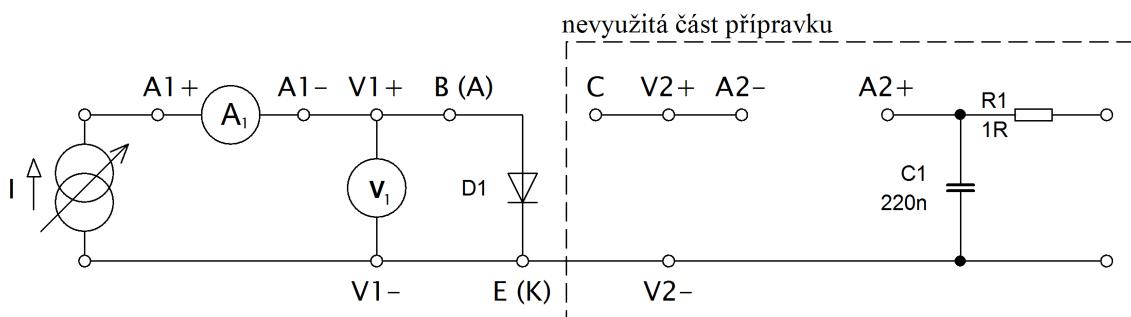
## 3.2 Měření VA charakteristik různých typů diod

### 3.2.1 Úkol měření

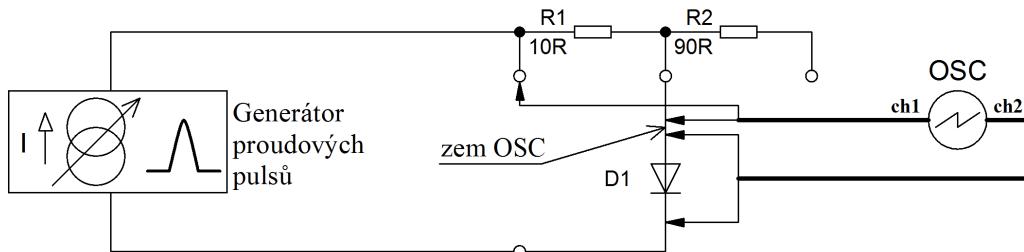
Změřte VA charakteristiky  $I=f(U)$  v propustném směru předložených polovodičových diod. Naměřené hodnoty vyneste do grafu a vzájemně je porovnejte. Vyberte si jednu diodu, jejíž charakteristiku změříte statickou metodou. Charakteristiky ostatních diod měřte pulzně generátorem a osciloskopem. U Zenerovy diody navíc změřte a vyneste i charakteristiku v závěrném směru.

### 3.2.2 Schéma zapojení

#### Statické měření



#### Pulzní měření



### 3.2.3 Postup měření

Při statickém měření použijte přípravek pro měření VA charakteristik tranzistoru a obvod zapojte dle příslušného schéma zapojení. Propustný směr diody bude měřen, pokud bude anoda připojena na svorku B (báze) a katoda na svorku E (emitor). Pro vzorky 1,2,3 a 5 měřte v rozsahu proudu 0-200 mA. U vzorku 4 měřte jen do maxima proudu 20 mA. Nastavený proud odečítejte z ampérmetru A<sub>1</sub> a vzniklý úbytek napětí z voltmetru V<sub>1</sub>. Charakteristika všech diod je prudce nelineární. Pro snadné vynášení do grafu je třeba podrobně proměřit oblast kolene vynášené křivky. Proto danou oblast, kde se napětí s proudem prudce mění, měřte s velmi malým krokem proudu.

U pulsního měření připojujte jednotlivé diody na měřící svorky dle schéma zapojení a zobrazujte jejich VA charakteristiky v XY režimu na osciloskopu. Data sejměte ve formátu CSV a uložte na vhodné medium (flash disk). V tomto případě grafy při zpracování vyneste za pomocí odpovídajícího softwaru - EXCEL, MATLAB apod. Napětí bude v datech zobrazeno přímo, avšak proud je snímán jako úbytek napětí na  $10\Omega$  odporu. Proto provedte příslušný přepočet! Pokud máte danou možnost, otestujte jak se změní VA charakteristika vlivem změny teploty.

### 3.2.4 Měřené vzorky

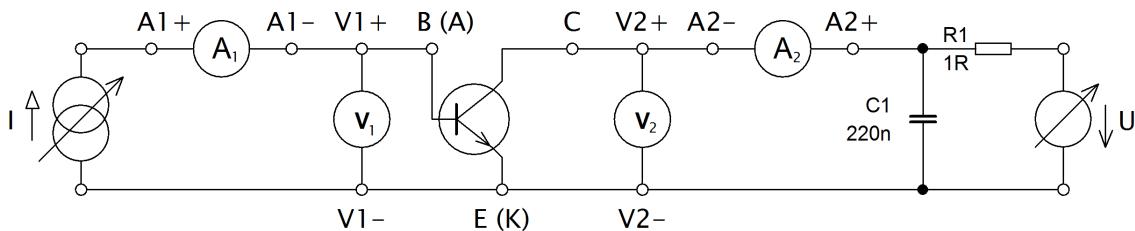
1. Shottkyho dioda typ 1N5819, parametry  $I_{max} = 1 \text{ A}$ ,  $U_{max} = 40 \text{ V}$ .
2. Křemíkova dioda univerzální typ 1N4007, parametry  $I_{max} = 1 \text{ A}$ ,  $U_{max} = 1000 \text{ V}$ .
3. LED 5 mm bílá 9000 mcd, parametry  $U_f = 4 \text{ V}$ ,  $I_{max} = 100 \text{ mA}$ .
4. LED 10 mm červená, parametry  $U_f = 1,9 \text{ V}$ ,  $I_{max} = 20 \text{ mA}$ .
5. Zenerova dioada typ 1N5337, parametry  $U_z = 4,7 \text{ V}$ ,  $I_{zmax} = 1 \text{ A}$ ,  $P_{max} = 5 \text{ W}$ .

## 3.3 Měření stejnosměrných charakteristik tranzistoru

### 3.3.1 Úkol měření

- a) Změřte výstupní charakteristiky předložených tranzistorů v zapojení se společným emitem pro proudy báze  $I_B = 1, 2, 5, 10 \text{ mA}$ . Při měření nepřesáhněte maximální mez stejnosměrného napětí 10 V v kolektorovém obvodě tranzistoru.
- b) Změřte převodní charakteristiku předložených tranzistorů pro napětí  $U_{CE} = 10 \text{ V}$ .
- c) Změřte vstupní charakteristiku předložených tranzistorů pro napětí  $U_{CE} = 10 \text{ V}$ .

### 3.3.2 Schéma zapojení



### 3.3.3 Postup měření

- ad a)** Regulovatelným proudovým zdrojem I (knoflíkem na přípravku) nastavte požadovaný proud obvodem báze. Pomocí regulovatelného napěťového zdroje U, ampérmetru A<sub>2</sub> a voltmetru V<sub>2</sub> nastavujte napětí a měřte proud obvodem kolektoru. Napětí nastavujte v rozsahu 0 – 10 V.
- ad b)** Regulovatelným napěťovým zdrojem U nastavte napětí  $U_{CE} = 10 \text{ V}$ . Pomocí regulovatelného proudového zdroje I, ampérmetru A<sub>1</sub> a A<sub>2</sub> nastavujte proud bází  $I_B$  a měřte proud obvodem kolektoru  $I_C$ . Proud kolektorem nesmí přesáhnout hodnotu 1,2 A.
- ad c)** Regulovatelným napěťovým zdrojem U nastavte napětí  $U_{CE} = 10 \text{ V}$ . Pomocí regulovatelného proudového zdroje U, ampérmetru A<sub>1</sub> a voltmetru V<sub>2</sub> nastavujte proud bází  $I_B$  a měřte napětí mezi bází a emitorem. Proud kolektorem nesmí přesáhnout hodnotu 1,2 A.

Naměřené hodnoty zapisujte do tabulek a zároveň je vynášejte na milimetrový papír. Tabulky i vynesené charakteristiky si následně členové skupiny okopírují do vlastních sešitů (existuje 1 originál tabulky a 1 originál charakteristiky!!).

### 3.3.4 Měřené vzorky

1. BD239, tranzistor NPN,  $U_{CE} = 100 \text{ V}$ ,  $I_C = 2 \text{ A}$
2. BD711, tranzistor NPN,  $U_{CE} = 100 \text{ V}$ ,  $I_C = 12 \text{ A}$

## 4 Nelineární rezistory

### 4.1 Úvod

V praxi se nejčastěji setkáváme s lineárními rezistory, tj. součástkami, u nichž předpokládáme konstantní velikost odporu nezávislou na vnějších podmínkách aplikace, tj. nezávislost na teplotě, frekvenci, mechanických vlivech apod. Odlišují se výkonovou zatížitelností, teplotní a frekvenční závislostí podle použitých materiálů a technologií výroby, tolerancí jmenovité hodnoty a provedením. Předpoklad konstantní velikosti odporu vyhovuje obvykle při aplikacích do frekvencí 50 kHz až 1 MHz (podle provedení). Pro vyšší frekvence je nutné uvažovat úplné náhradní schéma rezistoru s jeho reaktančními prvky.

Nelineární rezistory jsou na rozdíl od lineárních konstruovány tak, aby velikost odporu byla výrazně závislá na vnějších podmínkách, např. teplotě (termistory NTC, PTC) nebo přiloženému napětí (varistory) a pokud možno nezávisela na dalších vlivech aplikace. Vzhledem k této vlastnosti se využívají k měření teploty, v obvodech pro tepelnou ochranu přístrojů, strojů a zařízení, jako přepěťové ochrany atd.

#### 4.1.1 Teplotní závislost odporu

Hodnota odporu je u všech rezistorů teplotně závislá. Tuto závislost v případě drátových, metalizovaných, metaloxidových a uhlíkových rezistorů můžeme pro malé změny teplot považovat za lineární. Zpravidla jí popisujeme teplotním koeficientem odporu, který udává poměrnou změnu odporu  $dR/R_0$  v závislosti na změně teploty  $d\vartheta$ :

$$\alpha = \frac{dR}{R_0 \cdot d\vartheta} \quad (17)$$

Úpravou tohoto vztahu získáme často používanou approximaci závislosti odporu:

$$R_\vartheta = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0)) \quad (18)$$

Výsledný vztah lze s malou chybou využít především v případě kovových materiálů. Všimněte si, že se jedná o lineární závislost. Kovové odporové teploměry tedy lze využít pro měření teploty tam, kde je nutný lineární vztah mezi teplotou a odporem.

#### 4.1.2 Termistory

Termistory jsou polovodivé prvky s velkou závislostí odporu součástky na teplotě. Rozlišujeme dva typy, NTC a PTC. NTC rezistory mají záporný teplotní koeficient, tj. jejich odpor s teplotou klesá. Závislost lze modelovat pomocí exponenciální funkce:

$$R = R_\infty \cdot e^{B/T} \quad (19)$$

V rovnici (19) jsou  $R_\infty$ ,  $B$  parametry rovnice a  $T$  je absolutní teplota v K. Hodnoty odporu  $R_\infty$  dosáhne rezistor při pomyslné nekonečné teplotě. NTC rezistory lze mimo měření teploty využít i jako ochranné prvky při startu elektrických obvodů. Po přivedení napětí je termistor studený a jeho odpor je vysoký, v důsledku čehož nepropustí velký nárazový proud. Průchodem proudu se postupně ohřívá a jeho odpor klesá a dochází k postupnému zvyšování proudu.

PTC rezistory mají kladný teplotní koeficient. Jejich odpor s teplotou roste a podobně jako u NTC rezistorů je tato závislost na teplotě exponenciální (parametr  $B$  je záporný). Opět se používají jako ochranné prvky, např. jako vratná pojistka.

#### 4.1.3 Varistory

Varistor je odporový prvek, jehož odpor je závislý na přiloženém napětí. Jedná se o VA charakteristiku s lichou mocninou typu:

$$I = k \cdot U^\alpha \quad (20)$$

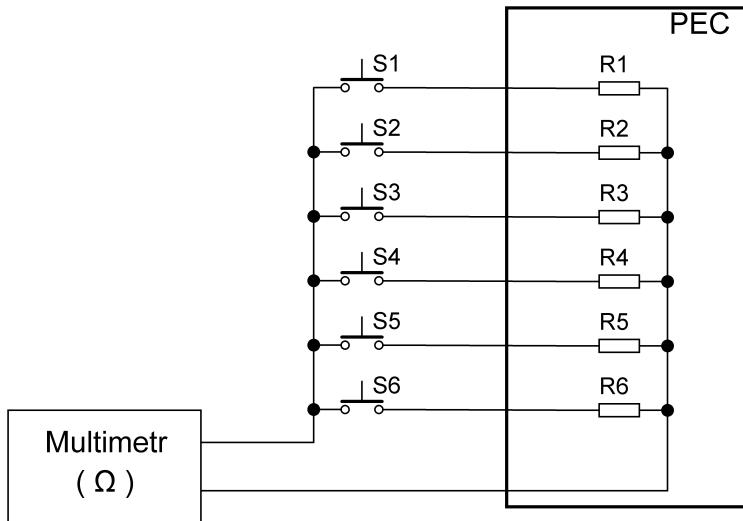
V rovnici (20) je  $k$  koeficient mocninné funkce a  $\alpha$  je mocnina popisující tvar VA charakteristiky. Pokles odporu po přiložení napětí je velmi prudký (řádově desítky nanosekund), což tento prvek předurčuje pro použití v přepěťových ochranách.

## 4.2 Měření teplotní závislosti termistorů

### 4.2.1 Úkol měření

Změřte závislost odporu 6 vzorků rezistorů a termistorů pro změnu teploty 20 °C až 120 °C. Naměřené závislosti  $R = f(\vartheta)$  vyneste do grafu! Ověřte, zda dané charakteristiky odpovídají teoretickým vztahům (lineární závislost, exponenciální závislost apod.)

### 4.2.2 Schéma zapojení



### 4.2.3 Postup měření

Měřené vzorky jsou umístěny na destičce v pícce a vyvedeny na přepínač měřicích míst. K měření teploty slouží orientačně teploměr, který je součástí konstrukce pece. Pro přesné měření využijeme Pt odporový teploměr s lineární závislostí odporu na teplotě. Pro odpor Pt teploměru uvažujte následující vztah:

$$R_\vartheta = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0)) \quad (21)$$

- $R_0$  ... je odpor v  $\Omega$  při 0 °C,
- $\alpha$  ... je teplotní koeficient odporu, pro platinový teploměr je  $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,
- $\vartheta$  ... je teplota okolí ve °C nebo K,
- $\vartheta_0$  ... je teplota ve °C nebo K, při které byl měřen odpor  $R_0$ , zde 0 °C.

### 4.2.4 Měřené vzorky

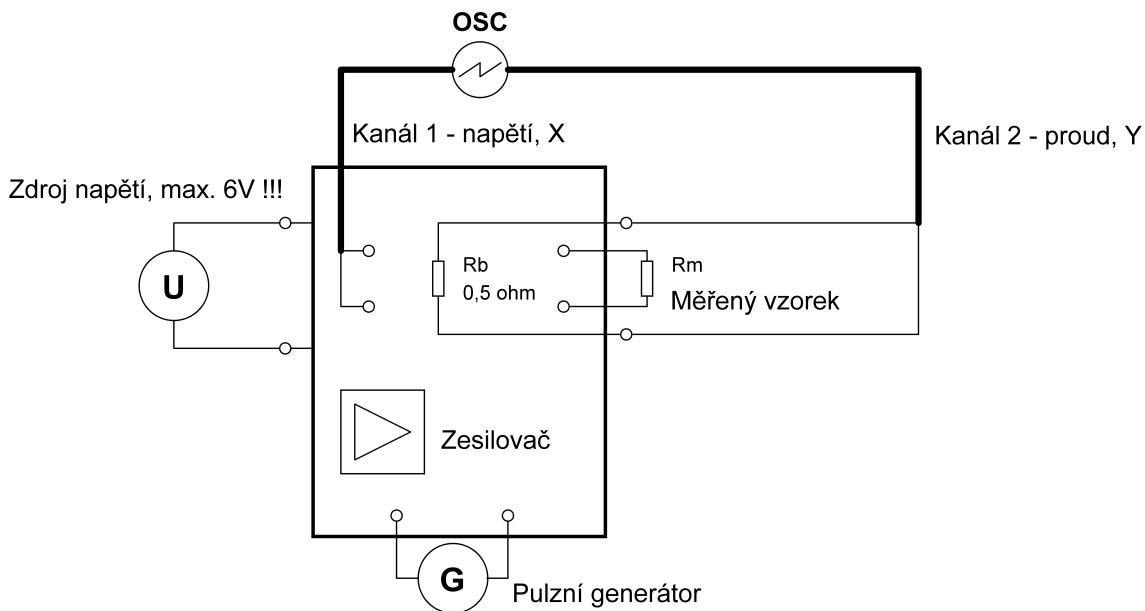
- |   |  |
|---|--|
| 1. odporový Pt teploměr 100 $\Omega$ při 0 °C | 4. rezistor uhlíkový TR 212 4,7 k $\Omega$ |
| 2. termistor NTC 100 $\Omega$                 | 5. termistor NTC 6,8 k $\Omega$            |
| 3. rezistor metaloxidový TR154 6,8 k $\Omega$ | 6. termistor PTC 60 $\Omega$               |

## 4.3 Měření VA charakteristiky varistorů

### 4.3.1 Úkol měření

Změřte voltampérovou charakteristiku 5 vzorků varistorů pomocí osciloskopu, který pracuje v režimu x/y (souřadnicový zapisovač). Ověřte, zda údaje uvedené k jednotlivým vzorkům odpovídají měření.

### 4.3.2 Schéma zapojení



### 4.3.3 Postup měření

Měřený vzorek umístíme do přípravku. Pro měření použijeme zdroj krátkých napěťových pulzů nastavitelné velikosti. Pozor při výměně vzorků - před manipulací snižte napětí na 0 V! Napětí na vzorku snímáme sondou s děličem 1:100 (nastaveno na osciloskopu – zkontovalovat!), proud je snímán jako úbytek napětí na odporu  $0,5 \Omega$  nebo pomocí proudové sondy. Sejmuty charakteristiky zaznamenejte na disketu v osciloskopu, přeneste do PC a uložte na vhodné paměťové medium pro vytisknutí do referátu z měření.

### 4.3.4 Měřené vzorky

1. 15D201K, 200 V, zelený
2. 14D220K, 22 V, modrý
3. 14D101K, 100 V, světle modrý
4. S20K20, 40 V, velký modrý
5. TR 152, 100 Ohmů, lineární rezistor

# 5 Feroelektrické kondenzátory

## 5.1 Úvod

Kondenzátor je součástka, pomocí níž v elektrickém obvodu realizujeme kapacitu. Podobně jako ostatní součástky vykazuje řadu vedlejších závislostí (indukčnost, sériový a paralelní odpor, teplotní a napěťovou závislost). Hodnota kapacity  $C$  závisí, jak známo, na ploše elektrod ( $S$ ), dielektrické konstantě ( $\epsilon$ ) a nepřímo na vzdálenosti elektrod ( $d$ ). Z toho vycházejí odlišné konstrukce kondenzátorů (plošné - např. slídové, svitkové, keramické, elektrolytické). Požadavek na minimální rozměry předpokládá použití materiálů dielektrika s vysokou poměrnou dielektrickou konstantou (tzv. feroelektrika). Tyto materiály jsou však při vyšších teplotách značně teplotně závislé a jejich  $\epsilon_r$  při vyšší teplotě rychle klesá.

### 5.1.1 Teplotní závislost kapacity

Teplotní závislost kapacity kondenzátoru závisí především na typu dielektrika (na teplotní závislosti relativní permitivity). Nejmenší závislost tak lze očekávat od vzduchových nebo vakuových kondenzátorů. Velmi dobře jsou na tom i foliové kondenzátory. Teplotní závislost keramických kondenzátorů je naproti tomu velmi rozdílná. Kapacita může s teplotou růst i klesat a to navíc různě v různých teplotních intervalech. Konkrétní typ teplotní závislosti popisují výrobci písmenným a číselným označením např. X7R, Z5U, NP0 atd. K těmto značením následně existují tepelné charakteristiky relativní změny kapacity. Nejstabilnější keramické kondenzátory nesou označení NP0, nicméně tyto mají obvykle jen malou kapacitu.

Teplotní závislost pro malé změny teploty se linearizuje a vyjadřuje pomocí teplotního koeficientu kapacity:

$$\alpha = \frac{dC}{C_0 \cdot d\vartheta} \quad (22)$$

Konkrétní hodnotu kapacity tak můžeme přibližně určit pomocí vztahu:

$$C_\vartheta = C_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0)) \quad (23)$$

Při měření teplotní závislosti je vhodné následně do grafu vynášet relativní změnu kapacity  $dC/C_0$ .

### 5.1.2 Napěťová závislost kapacity

Napěťová závislost kapacity je nejvýznamnější u polárních nebo feroelektrických dielektrik. Do této skupiny patří velkou měrou opět keramiky. Závislost na napětí nebývá lineární. Závislost lze podobně jako u teploty popsat napěťovým koeficientem závislosti kapacity a po částech linearizovat:

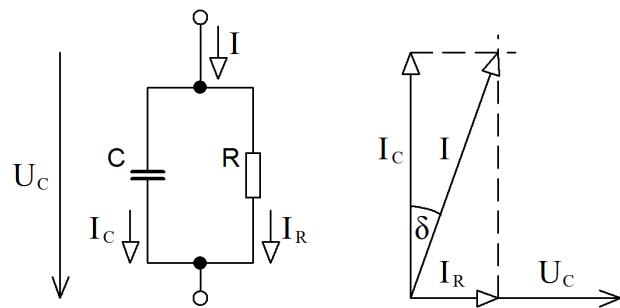
$$\beta = \frac{dC}{C_0 \cdot dU} \approx \frac{C - C_0}{C_0 \cdot (U - U_0)} \quad (24)$$

### 5.1.3 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel udává poměr ztrátového výkonu kondenzátoru k jeho jalovému výkonu. Jako náhradní obvod kondenzátoru obvykle v tomto případě uvažujeme paralelní spojení kapacitoru a rezistoru, viz obrázek 5. Pro ztrátový činitel  $D$  (nebo také  $\operatorname{tg}\delta$ ) lze pomocí činného  $P$  a jalového výkonu  $Q$  odvodit:

$$D = \frac{P}{Q} = \frac{U_C^2/R}{U_C^2 \cdot \omega C} = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega RC} = \operatorname{tg}\delta \quad (25)$$

Paralelní odpory modeluje převážně ztráty v dielektriku a podobně jako kapacita obvykle je teplotně závislý.



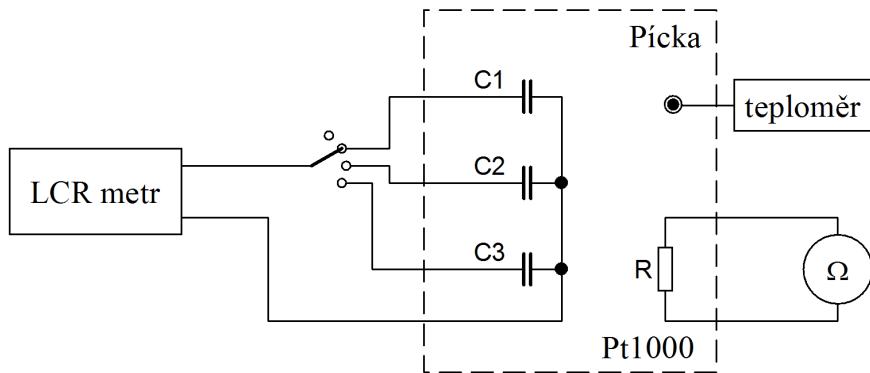
Obrázek 5: Náhradní schéma kondenzátoru pro určení ztrátového činitele

## 5.2 Měření teplotní závislosti kapacity a ztrátového činitele vybraných vzorků kondenzátorů

### 5.2.1 Úkol měření

Změřte závislost kapacity  $C$  a ztrátového činitele  $D$  u tří vzorků keramických kondenzátorů s odlišným dielektrikem na teplotě  $T$  pro teploty 20 °C až 120 °C. Závislosti  $C = f(T)$ ,  $D = g(T)$  vyneste do grafu.

### 5.2.2 Schéma zapojení



### 5.2.3 Postup měření

Měřené vzorky jsou umístěny na destičce v pícce a vyvedeny na přepínač měřicích míst. K měření teploty slouží orientačně dotykový teploměr zasazený do měrné jímky na tělese pícky. Kapacitu vzorků a ztrátový činitel měříme RLC metrem. K přesnému změření teploty slouží odporový teploměr (čidlo Pt1000,  $R_0 = 1008 \Omega$  při 0 °C,  $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ), jehož odpor měříme pomocí multimetu. Teplotu vypočteme z údajů uvedených výše v návodu a za předpokladu lineární závislosti mezi hodnotou odporu a teplotou:

$$R_\vartheta = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0)) \quad (26)$$

- $R_0$  ... je odpor v  $\Omega$  při 0 °C,
- $\alpha$  ... je teplotní koeficient odporu, pro platinový teploměr je  $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,
- $\vartheta$  ... je teplota okolí ve °C nebo K,
- $\vartheta_0$  ... je teplota ve °C nebo K, při které byl měřen odpor  $R_0$ , zde 0 °C.

### 5.2.4 Měřené vzorky

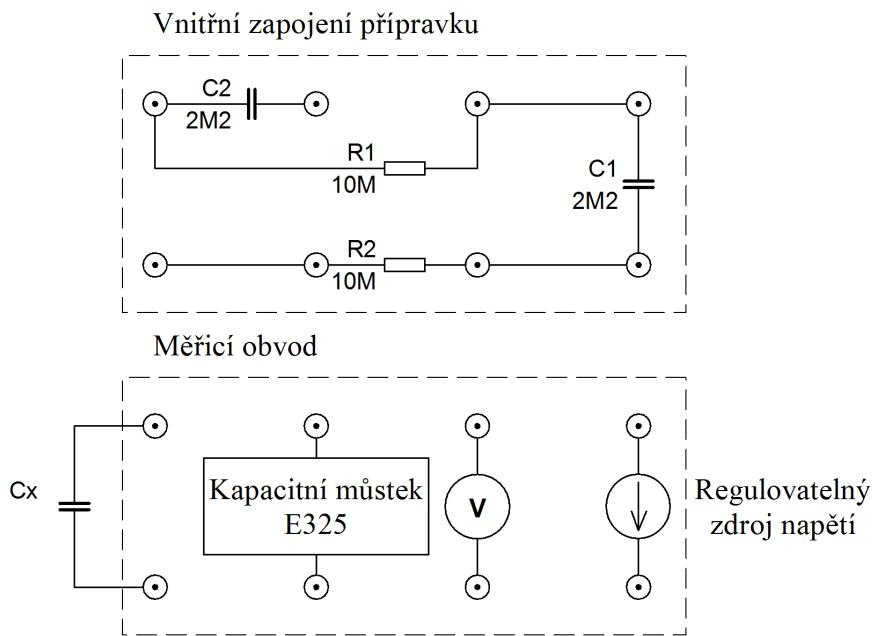
1. keramický kondenzátor 100 nF, hmota Supermit
2. keramický kondenzátor 1 nF, hmota N1500
3. keramický kondenzátor 1 nF, hmota SQM
4. slídový kondenzátor 1 nF, hmota – slída
5. foliový kondenzátor 100 nF, dielektrikum PP
6. MP kondenzátor 150 nF, dielektrikum - papír

## 5.3 Měření napěťové závislosti kapacity vybraných vzorků kondenzátorů

### 5.3.1 Úkol měření

Změřte závislost kapacity tří vzorků keramických kondenzátorů na velikosti přiloženého stejnosměrného napětí. Závislost  $C = f(U)$  vyneste do grafu.

### 5.3.2 Schéma zapojení



### 5.3.3 Postup měření

Měřené vzorky postupně zapojujeme na svorky „ $C_X$ “ měřicího přípravku, který umožňuje oddělení přiloženého napětí (z bateriového DC zdroje) a měřicího malého střídavého napětí, které využíváme pro měření kapacity. Při měření dbáme na to, aby nebylo překročeno jmenovité provozní napětí vzorku.

### 5.3.4 Měřené vzorky

1. keramický kondenzátor TK666, 40 V, 100 nF, hmota Supermit (kotoučový, hnědý)
2. keramický kondenzátor 4H30, 40 V, 33 nF (zelený)
3. sítikový kondenzátor CF2, 63 V, 100 nF, tereftalátový (žlutý)

## 5.4 Měření uvolnění náboje feroelektrického kondenzátoru

V objemu dielektrika feroelektrického kondenzátoru je obecně vždy vázán malý zbytkový náboj  $Q_1$ . Jemu odpovídá nízké napětí  $U_1$  na svorkách kondenzátoru, které je dáno rovnicí:

$$U_1 = \frac{Q_1}{C_1} \quad (27)$$

Při zvýšení teploty dochází u feroelektrik k výraznému zmenšení jejich kapacity (z  $C_1$  na  $C_2$ ) díky zmenšení relativní permitivity z  $\epsilon_{r1}$  na  $\epsilon_{r2}$ . Aby zůstal zachován zbytkový náboj ( $Q_1 = Q_2$ ), musí na kondenzátoru výrazně vzrůst napětí ( $U_2$ ). V ideálním případě platí, že vzrůst napětí ( $U_2/U_1$ ) je roven změně permitivity ( $\epsilon_{r1}/\epsilon_{r2}$ ).

### 5.4.1 Úkol měření

Ověřte uvolnění elektrického náboje u předloženého vzorku kondenzátoru z feroelektrického materiálu.

### 5.4.2 Postup měření

Kondenzátor připojený k elektrostatickému voltmetru nabijte na plné napětí bateriového zdroje (asi 120 V). Kondenzátor vybijte a po chvíli ohřejte v olejové lázni na cca 150 °C. Odečtěte maximální napětí kondenzátoru.

# 6 Porovnání VA charakteristik různých typů fv modulů

## 6.1 Úvod

Fotovoltaické moduly jsou sestaveny z článků, které můžeme podle technologie rozdělit do několika skupin:

- Krystalické
  - Křemíkové
    - \* Multikrystalické
    - \* Monokrystalické
    - \* Páskové
  - GaAs
- Tenkovrstvé
  - Křemíkové
    - \* Amorfní
    - \* Mikrokrytalické
  - CI(G)S
  - CdTe
  - GaAs
  - Organické
  - DSSC
  - Vícepřechodové
- Hybridní (HIT)

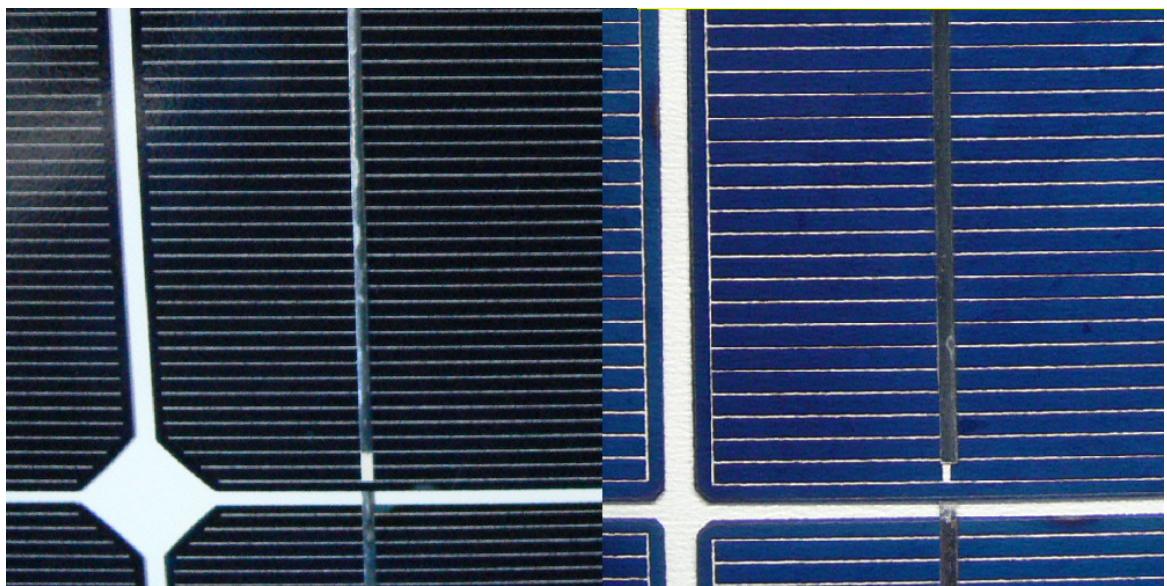
Nejrozšířenějšími články jsou články na bázi křemíku, které jsou levné a mají relativně vysokou účinnost.

### 6.1.1 Monokrystalický Si fotovoltaický článek

Výroba mono-Si článků je relativně náročná, ale díky rozsáhlému použití mono-Si v elektrotechnice dobře zvládnutá. Výroba začíná přípravou monokrystalického Si ingotu. Nejčastějším způsobem výroby je tažení monokrystalu z taveniny (tzv. Czochralskoho metoda) pomocí zárodečného krystalu. Hotový ingot je poté pomocí diamantové pily rozřezán na destičky. Následuje odlepání zhmožděné vrstvy, texturace povrchu, difuzní procesy, nanesení antireflexní vrstvy a sítotisk kontaktů. Vzhledem ke kruhovému průřezu ingotu mají monokrystalické články tzv. pseudočtvercový tvar, tzn. mají oblé rohy. Viz obrázek 6, vlevo.

### 6.1.2 Multikrystalický Si fotovoltaický článek

Výroba multikrystalických článků je levnější než výroba monokrystalických článků, nicméně účinnost je vlivem vyšších rekombinačních ztrát nižší. Ingot je tažen v bloku z roztaveného křemíku. V případě potřeby je ingot rozřezán na menší ingoty a ty jsou následně rozřezány (obdobně jako u mono-Si) na destičky. K předchozím operacím je navíc realizována tzv. pasivace vodíkem, která snižuje rekombinační ztráty na hranicích zrn. Výsledné články jsou čtvercové. Příklad vzhledu multikrystalického článku je na obrázku 6, vpravo.



Obrázek 6: Detail FVČ - monokrystalický (vlevo), multikrystalický (vpravo)



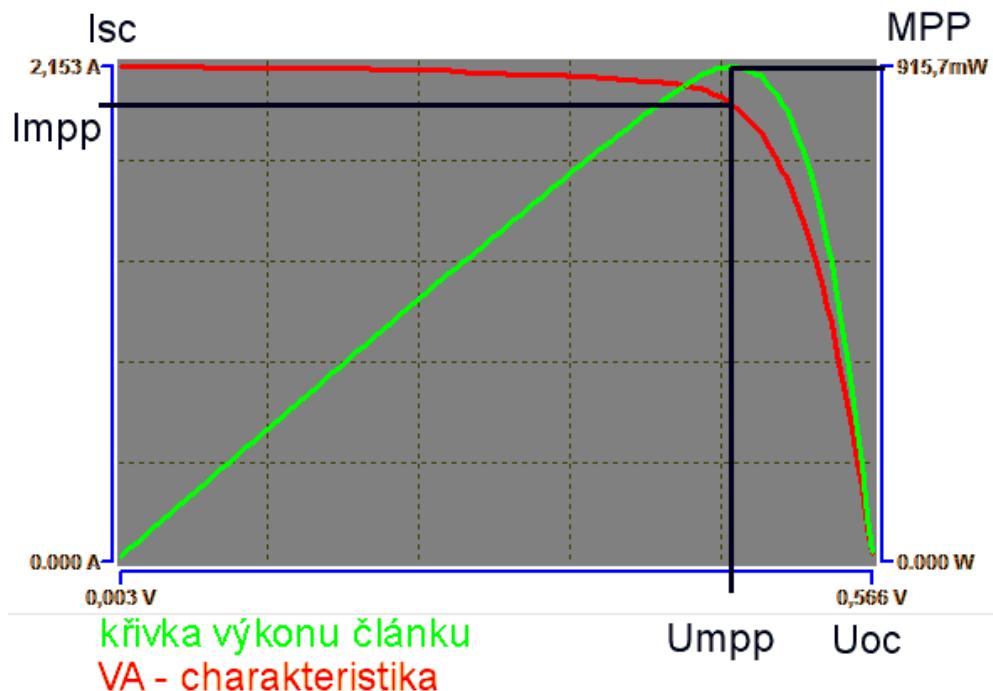
Obrázek 7: CdTe amorfni fotovoltaický panel

### 6.1.3 Amorfni Si fotovoltaický článek

V současné době nastává boom tenkovrstvých technologií. Tenkovrstvé články mají sice horší parametry (především účinnost), ale jejich výroba je velmi levná a navíc umožňuje nanesení vrstvy na prakticky libovolný povrch a v libovolné ploše. Na substrát jsou postupně nanášeny vrstvy TCO (transparentní vodivý oxid), které fungují jako kontakty, aktivní vrstvy a kontaktní vrstvy. Jednotlivé články jsou odděleny laserem. Výhodou tenkovrstvých článků proti krystalickým je kromě nižší ceny vyšší teplotní stabilita parametrů. Po výrobě sice účinnost článku rychle klesne, ale poté již stárne obdobným způsobem jako krystalické moduly. Ukázka panelu je na obrázku 7.

### 6.1.4 Volt – ampérová charakteristika fotovoltaického modulu (článku).

Při vyhodnocování parametrů fotovoltaických modulů (článků) hraje poměrně značnou roli voltampérová charakteristika testovaného modulu (článku). Příklad charakteristiky sejmuté zařízením PROVA 210 je na obrázku 8. Křivka byla zaznamenána při ozařování článku halogenovou žárovkou ze vzdálenosti cca 15 cm.

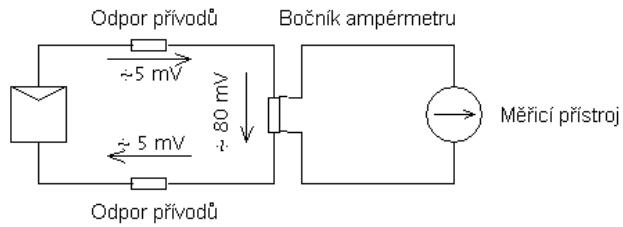


Obrázek 8: VA charakteristika fotovoltaického článku

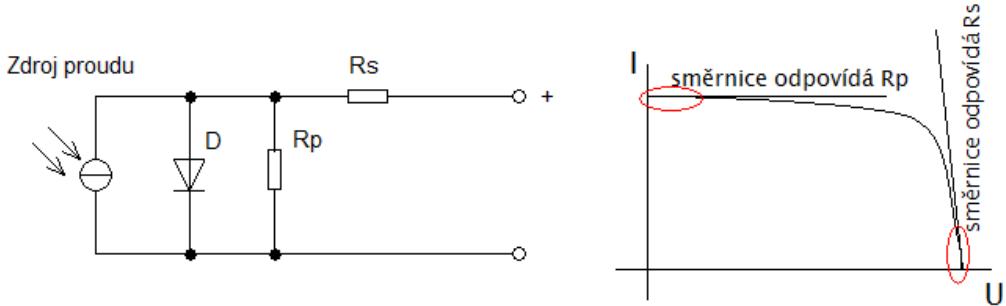
### 6.1.5 Měření základních parametrů FV modulu

**Proud nakrátko** určíme pomocí ampérmetru; vzhledem k metodě měření proudu pomocí úbytku napětí na bočníku je tato hodnota pro teoretickou podmínu nulového napětí na svorkách článku obtížně určitelná. V reálném obvodu se započtením všech vnitřních odporů lze za nulové považovat napětí o velikosti okolo 100 mV. Lépe je tato skutečnost patrna na schématu, viz obrázek 9. V případě určování dalších parametrů je s touto podmínkou nutno počítat.

**Napětí naprázdno** určíme změřením napětí na rozpojených svorkách osvětleného článku voltmetrem s dostatečným vnitřním odporem.



Obrázek 9: Vliv odporu bočníku na měření  $I_{sc}$



Obrázek 10: Náhradní schéma FVČ a vyznačení oblasti VA charakteristiky pro výpočet  $R_S$  a  $R_P$

**Paralelní odpor** určujeme z hodnot v blízkosti proudu nakrátko, tedy:

$$\frac{1}{R_P} = \frac{dI}{dU} \quad (28)$$

**Sériový odpor** pak určíme z hodnot naměřených v oblasti napětí naprázdno, tedy při malém zatížení testovaného článku. Postupujeme dle rovnice:

$$R_S = -\frac{dU}{dI} \quad (29)$$

Tato metoda určení parametrů náhradního obvodu modulu (článku), viz obrázek 10, je metodou přibližnou, jejíž přesnost závisí na určení hodnot  $dU$  a  $dI$ . Tečnu se snažíme vždy umístit do bodu  $I_{SC}$  respektive  $U_{0C}$ .

**Bod maximálního výkonu** je nejsnáze určitelný z podmínky  $dP/dU = 0$ . Je tady nutné nejprve vypočítat průběh křivky výkonu modulu, jako součin naměřeného napětí a proudu. Poté nalezneme nejvyšší dosaženou hodnotu, kterou můžeme považovat za hodnotu  $MPP$ . Při ručním měření je třeba zaznamenat dostatečné množství dat v oblasti předpokládaného bodu  $MPP$  (viz obrázek 8).

**Činitel plnění** je definován dle vztahu:

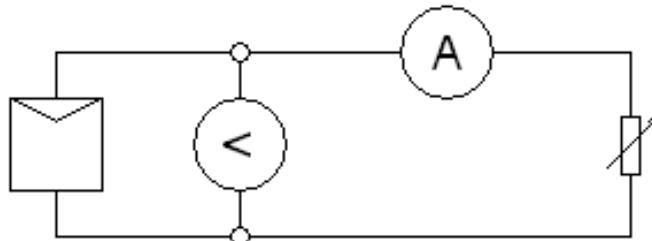
$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{0C} \cdot I_{SC}} \quad (30)$$

## 6.2 Měření VA charakteristik fotovoltaických modulů

### 6.2.1 Úkol měření

- a) Změřte voltampérové charakteristiky předložených fotovoltaických modulů a určete jejich typ. Každý modul změřte dvakrát. První měření proveděte při teplotě cca 20°C (aktuální teplota laboratoře). Postupujte rychle, aby nedošlo k ohřátí fotovoltaického modulu. Druhé měření proveděte po ustálení teploty na fotovoltaickém modulu. Pro měření teploty má každý z modulů nalepen na spodní straně termočlánek.
- b) Pro každý modul určete následující parametry a proveděte jejich vzájemné porovnání:
  - proud nakrátko  $I_{SC}$ ,
  - napětí naprázdno  $U_{OC}$ ,
  - paralelní odpor  $R_P$  reprezentující poruchy v článku,
  - sériový odpor  $R_S$  reprezentující elektrické ztráty,
  - bod maximálního výkonu  $MPP$  (resp.  $P_{MAX}$ ),
  - činitel plnění (fill factor)  $FF$ .
- c) Do společného grafu vyneste závislosti  $I = f(U)$ ,  $P = f(U)$  všech testovaných modulů a průběhy porovnejte. Totéž proveděte pro různé teploty.
- d) Porovnejte moduly z hlediska výkonu vztaveného na plochu ( $\text{W/m}^2$ ).

### 6.2.2 Schéma zapojení



### 6.2.3 Postup měření

Nejprve zakryjte měřený modul hliníkovou folií a pak zapněte osvětlení (halogen), počkejte cca 1 minutu, než dojde k stabilizaci světelného toku a poté odstraňte krycí folii.

Při prvním měření modulu při teplotě cca 20 °C (aktuální teplota je měřena termočlánkem umístěným na spodní straně modulu) proveděte měření napětí naprázdno a proudu na krátko rychle, tak aby se co nejméně změnila teplota modulu během měření. Po dokončení prvního měření nechte zdroj světla (halogen) zapnutý a počkejte, až se ustálí teplota modulu (cca 50 až 60 °C) a poté změřte napětí naprázdno, proud na krátko a celou VA charakteristiku.

Zátěž je realizována přepínatelnou odporovou kaskádou nebo posuvným rezistorem. S měřením začínáme v chodu naprázdno a poté postupně snižujeme odpor až do chodu nakrátko. Pro chod naprázdno rozpojíme svorky zátěže, pro chod nakrátko je zkratujeme. Odečítáme příslušné hodnoty napětí a proudu. Celé měření opakujeme pro všechny typy modulů.

Pro všechny testované moduly vypočteme hodnoty dle druhého bodu zadání. Vyneste grafy závislostí požadované v bodu c). V závěru měření se pokuse o srovnání parametrů jednotlivých článků. Při tomto srovnání berte v úvahu i osvětlenou plochu článku.

# 7 Vlastnosti vysokofrekvenčních cívek

## 7.1 Úvod

Indukčnost v elektrickém obvodu je obvykle realizována cívou, tj. uspořádáním vodičů ve tvaru závitů. Cívka může být navinuta z vodičů obvykle kruhového průřezu do válcového nebo diskového tvaru nebo např. vytvořena jako obrazec na desce plošných spojů. Indukčnost cívky závisí na počtu závitů, rozdílech vinutí, vzájemné poloze závitů a na magnetické vodivosti prostředí, kterým se uzavírají siločáry magnetického toku cívky (vzduch, ferromagnetický materiál). Při použití cívky v obvodech s vysokými frekvencemi napětí se výrazně uplatní také odpor a kapacity vinutí, skinefekt a vf. vlastnosti magnetických materiálů.

### 7.1.1 Činitel jakosti - převýšení

Narozdíl od kondenzátorů nelze u cívek zanedbat parazitní sériový odpor. Jen ve velmi ojedinělých případech není třeba při konstrukci obvodu hodnotu tohoto odporu uvažovat, neboť je hlavní příčinou vzniku ztrát a z toho plynoucího ohřevu cívky (Jouleovy ztráty ve vinutí, ztráty v mag. obvodu atd.). Činitel jakosti je definován jen v rezonančních obvodech. Zde udává poměr akumulované energie ke ztracené energii.

Při sériovém spojení kondenzátoru a cívky vznikne rezonanční obvod, jehož energie se ztrácí především na parazitním odporu cívky. Rezonanční  $LC$  obvod tak přechází na rezonanční  $RLC$  obvod. Úbytek napětí na odporu je úměrný ztrátám v obvodu a napětí na indukčnosti (resp. kapacitě) je úměrné jalovému výkonu, tudíž jde o energii akumulovanou v rezonančním obvodu. Analýzou tohoto faktu získáme pro činitel jakosti vztah:

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (31)$$

Zřejmě můžeme činitel jakosti uvažovat jako převrácenou hodnotu ztrátového činitele nebo jako poměr imaginární a reálné části impedance cívky. Jelikož je odpor cívky relativně malý, dosahuje činitel jakosti na frekvencích řádově kHz hodnot řádově desítek až stovek.

### 7.1.2 Napětí na prvcích v rezonanci

Během rezonance sériového  $RLC$  obvodu dochází ke zvýšení amplitudy napětí na cívce a kondenzátoru. Analýzou vztahů pro impedanci a napětí na jednotlivých prvcích lze odvodit původ tohoto jevu. Zde celou věc zjednodušíme úvahou. Při rezonanci platí, že induktivní reaktance cívky je až na znaménko rovna kapacitní reaktanci kondenzátoru. Jejich součet je nulový a impedance obvodu má pouze reálnou část danou hodnotou odporu. Pro fázor proudu tak získáváme vztah:

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}}{\hat{Z}} = \frac{\hat{U}}{\hat{R}} \quad (32)$$

Reaktance cívky a kondenzátoru je stále v obvodu přítomna a procházející proud vyvolá na obou prvcích napětí, která budou vzájemně v protifázi (vůči sobě posunuta o  $180^\circ$ ):

$$\hat{U}_L = \hat{I} \cdot jX_L = \hat{U} \cdot \frac{j\omega L}{R} = \hat{U} \cdot jQ \quad (33)$$

$$\hat{U}_C = \hat{I} \cdot (-jX_C) = \hat{U} \cdot \frac{-j}{\omega CR} = \hat{U} \cdot (-jQ) \quad (34)$$

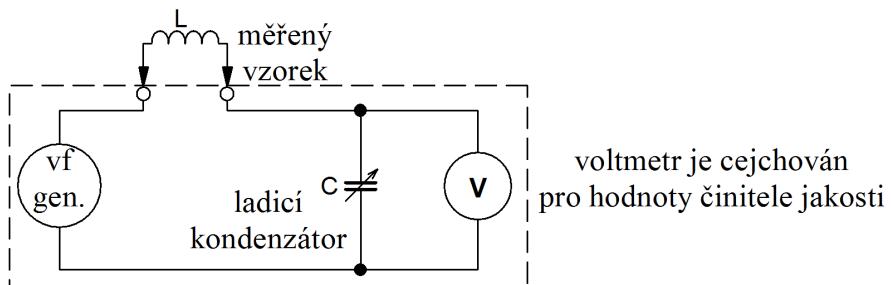
Z rovnic vyplývá (33) a (34), že výsledné napětí na obou reaktancích bude zesíleno velikostí činitele jakosti.

## 7.2 Měření frekvenční závislosti činitele převýšení $Q$

### 7.2.1 Úkol měření

Zjistěte měřením kmitočtové závislosti činitele převýšení  $Q$  daných vzorků cívek vliv konstrukčního provedení (délky vinutí, rozměrů a formy vodičů) na jejich kvalitu. Naměřené hodnoty vyneste do grafu! Diskutujte vliv provedení vinutí na vlastnosti cívky. Ověřte vliv feritového jádra na vlastnosti cívek.

### 7.2.2 Schéma zapojení



### 7.2.3 Postup měření

Měřte na Q-metru v kmitočtovém rozsahu určeném nejmenší a největší kapacitou ladicího kondenzátoru přístroje (obvod s cívkou se ladí do rezonance). Kmitočtový krok volte tak, abyste u každé cívky změřili alespoň 5 hodnot rovnoměrně rozložených v kmitočtovém intervalu. Vložením feritového jádra do cívek 1 až 3 (vzorky 4-6) zjistěte změnu jejich el. parametrů.

### 7.2.4 Měřené vzorky

1. cívka  $D = 40 \text{ mm}$ ,  $l = 27 \text{ mm}$ , 13 závitů vodičem  $\varnothing 1,2 \text{ mm}$
2. cívka  $D = 40 \text{ mm}$ ,  $l = 27 \text{ mm}$ , 27 závitů vodičem  $\varnothing 0,6 \text{ mm}$
3. cívka  $D = 40 \text{ mm}$ ,  $l = 27 \text{ mm}$ , 57 závitů vodičem  $\varnothing 0,3 \text{ mm}$
4. cívka  $D = 40 \text{ mm}$ ,  $l = 27 \text{ mm}$ , 13 závitů vodičem  $\varnothing 1,2 \text{ mm}$ , feritové jádro z mat. N1
5. cívka  $D = 40 \text{ mm}$ ,  $l = 27 \text{ mm}$ , 27 závitů vodičem  $\varnothing 0,6 \text{ mm}$ , feritové jádro z mat. N1
6. cívka  $D = 40 \text{ mm}$ ,  $l = 27 \text{ mm}$ , 57 závitů vodičem  $\varnothing 0,3 \text{ mm}$ , feritové jádro z mat. N1
7. cívka MESC (GES Electronic),  $10 \mu\text{H}$ , feritové jádro tyčinka
8. cívka 09P (GM Electronic),  $560 \mu\text{H}$ , feritové jádro cívka

## 7.3 Měření frekvenční závislosti indukčnosti $L_S$ a činitele převýšení $Q$ vzorků na feritových jádrech

### 7.3.1 Úkol měření

Změřte sériovou indukčnost  $L_S$  a činitel převýšení  $Q$  v závislosti na frekvenci. Najděte frekvenci pro maximální hodnotu  $Q$  a frekvenci vlastní rezonance fr. Měření provedte pomocí LCR metru HP4284A.

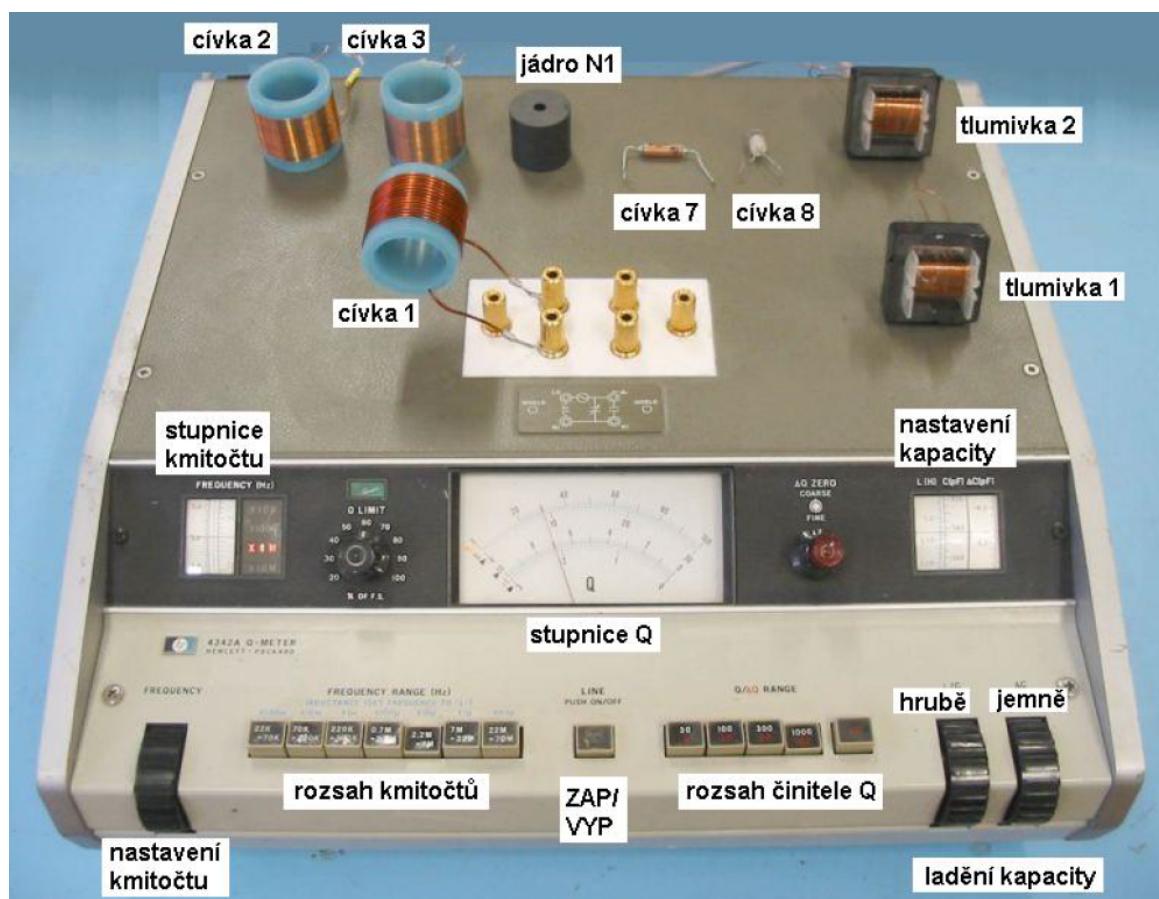
### 7.3.2 Postup měření

Měřte na Q-metru v kmitočtovém rozsahu určeném nejmenší a největší kapacitou ladicího kondenzátoru přístroje (obvod s cívkou se ladí do rezonance). Kmitočtový krok volte tak, abyste u každé cívky změřili alespoň 5 hodnot rovnoramenně rozložených v kmitočtovém intervalu. Vložením feritového jádra do cívek 1 až 3 (vzorky 4-6) zjistěte změnu jejich el. parametrů.

### 7.3.3 Měřené vzorky

1. tlumivka 3,7 mH (feritové jádro obdélníkové)
2. tlumivka 600  $\mu$ H (feritové jádro obdélníkové)

## 7.4 Obrázková příloha



# 8 Vlastnosti kondenzátorů a rezistorů při kmitočtech do 1 MHz

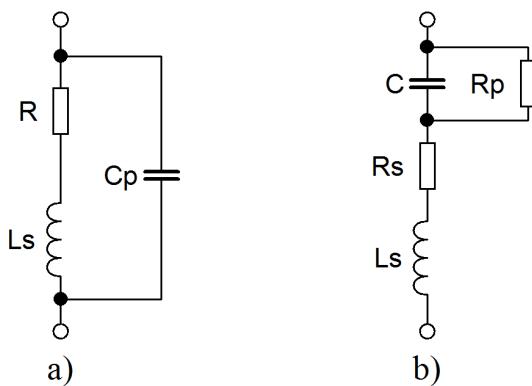
## 8.1 Úvod

Reálné součástky (obvodové prvky) vykazují kromě svého hlavního parametru také parametry parazitní. V případě rezistorů je to při frekvencích do 1 MHz paralelní kapacita nebo sériová indukčnost, v případě kondenzátorů především parazitní odpor. Na těchto frekvencích zpravidla ještě u většiny součástek nedochází k vlastní rezonanci. Přesto identifikování hodnoty parazitního parametru má svůj význam. Parazitní kapacita odporu například může způsobit frekvenční závislost výstupního napětí napěťového děliče, nebo v případě kondenzátorů působí parazitní odpor přídavné ztráty v obvodu, se kterými je třeba počítat. Cvičení se zaměřuje na identifikaci jednotlivých parazitních parametrů v závislosti na technologii součástky a hodnotě jejího hlavního parametru. Vliv parazit na součástku budeme posuzovat pomocí frekvenční závislosti její impedance.

### 8.1.1 Náhradní schémata pasivních prvků

Vlastnosti skutečných součástek lze přiblížit náhradními obvody na obrázku 11. Na frekvencích do 1 MHz se v náhradním obvodu kondenzátorů zpravidla neuplatní parazitní sériová indukčnost. Výjimku tvoří elektrolytické kondenzátory, které mimojiné kvůli své vysoké kapacitě často rezonují již v tomto pásmu. Podobně lze obvykle zanedbat i sériový odpor, jelikož jeho hodnota je relativně malá v porovnání s reaktancí kondenzátoru a vliv jeho ztrát se projeví až při větších proudech. Náhradní obvod kondenzátoru lze tedy pro dané frekvenční pásmo obvykle zjednodušit na paralelní spojení odporu a kapacity. Hodnoty parametrů náhradního schéma závisejí především na technologii konstrukce kondenzátorů.

Náhradní obvod rezistoru je na frekvencích do 1 MHz závislý na hodnotě odporu. Pro jeho nízké hodnoty (méně než  $330 \Omega$ ) převažuje vliv indukčnosti. Pro vysoké hodnoty odporu (více než  $330 \Omega$ ) převažuje vliv kapacity. Pro hodnoty kolem  $330 \Omega$  se oba vlivy dokonce kompenzují a součástka jeví jen malou frekvenční závislost. Pochopitelně frekvenční vlastnosti ovlivňuje také konstrukce rezistoru. Drátové (vinuté) výkonové rezistory mají obvykle vyšší indukčnost než vrstvové rezistory se stejným odporem, ale na nižší výkony.



Obrázek 11: a) Náhradní schéma rezistoru, b) náhradní schéma kondenzátoru

### 8.1.2 Frekvenční závislost RL a RC prvku

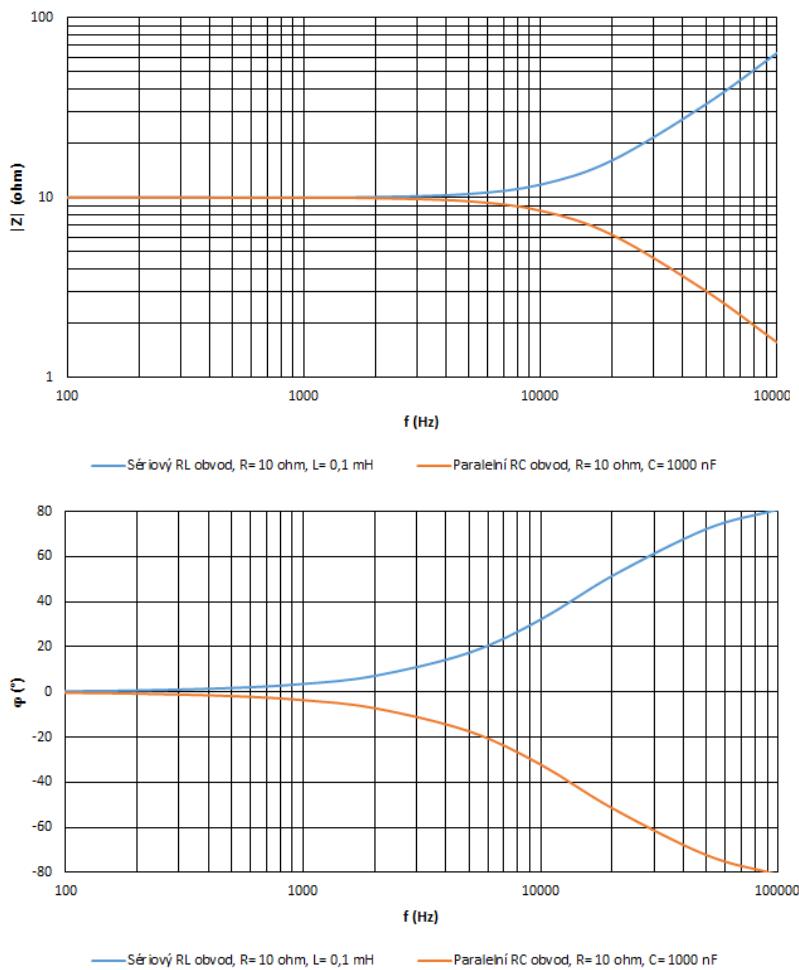
Po zjednodušení náhradních schémat pro frekvence do 1 MHz lze rezistory i kondenzátory modelovat buď sériovým spojení odporu a indukčnosti nebo paralelním spojením odporu a kapacity. Pro impedanci sériového RL obvodu platí vztah:

$$Z_{RL} = R + j\omega L \quad (35)$$

a pro impedanci paralelního RC obvodu platí vztah:

$$Z_{RC} = \frac{R}{1 + j\omega RC} \quad (36)$$

Frekvenční charakteristiky těchto obvodů jsou vyneseny na obrázku 12. Podobné výsledky očekáváme i při měření konkrétních součástek. Všimněte si, že v obvodu s dominantní sériovou indukčností impedance roste a fáze je kladná, zatímco u paralelní kapacity je to naopak. Pokud by tyto charakteristiky patřily například rezistoru, pak by jeho použití mělo smysl zhruba do frekvencí 1 kHz. Zde si stále ještě uchovává přibližně počáteční hodnotu impedance a nedochází k velkému fázovému posunu mezi napětím a proudem.



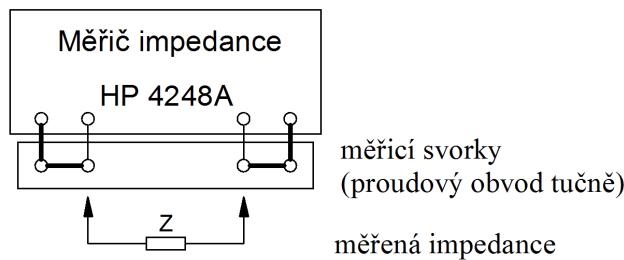
Obrázek 12: Frekvenční charakteristika impedance a fáze pro sériový RL a paralelní RC obvod.

## 8.2 Kmitočtová závislost rezistorů

### 8.2.1 Úkol měření

Pro zadané vzorky rezistorů změřte závislost impedance (absolutní hodnoty  $|Z|$ , fáze  $\varphi$ ) nebo jiných ekvivalentních složek ( $R$ ,  $X$ ) vyjadřujících komplexní impedanci rezistoru na kmitočtu. Naměřené hodnoty vyneste do grafu, volte vhodné (logaritmické) měřítko na kmitočtové ose!

### 8.2.2 Schéma zapojení



### 8.2.3 Postup měření

Měření provedte v rozsahu kmitočtů od cca 50 Hz až do 1 MHz s použitím přístroje HP 4284A. Volte vhodný krok, abyste pokryli rovnoměrně všechny měřené řady (Hz, kHz, MHz). Pro vynášení v logaritmické měřítku je vhodný krok 1-2-5-10 nebo 1-3-10. Přístroj umožňuje nastavení kmitočtu jen s určitým krokem z předvolené řady hodnot. Dbejte, aby při upnutí součástek byl minimalizován vliv jejich přívodů (tj. připojovat krátkými přívody).

U odporů tzv. malých hodnot (řádově jednotky až desítky  $\Omega$ ) vyhodnoťte sériovou indukčnost  $L_S$  (z měření impedance), u odporů tzv. velkých hodnot (řádově od  $k\Omega$  výše) paralelní kapacitu  $C_P$ . Povšimněte si též chování vykompenzovaných odporů s hodnotami rezistivity kolem  $330 \Omega$ . Při závěrečném hodnocení se venujte i vlivu konstrukce rezistorů na jejich chování.

### 8.2.4 Měřené vzorky

1.  $10 \Omega / 330 \Omega / 10 \text{ k}\Omega$  rezistor metalizovaný, 0,6 W, velikost 0207
2.  $10 \Omega / 330 \Omega / 10 \text{ k}\Omega$  rezistor metalizovaný, 2 W, velikost 0414
3.  $10 \Omega / 330 \Omega / 10 \text{ k}\Omega$  rezistor drátový, 5 W, keramické pouzdro

## 8.3 Kmitočtová závislost kondenzátorů

### 8.3.1 Úkol měření

Pro zadané vzorky kondenzátorů změřte závislost impedance (absolutní hodnoty  $|Z|$ , fáze  $\varphi$ ) nebo kapacity  $C$  a ztrátového činitele  $D$  na kmitočtu. Naměřené hodnoty vyneste do grafu, volte vhodné (logaritmické) měřítko na kmitočtové ose!

### 8.3.2 Postup měření

Měření provedte v rozsahu kmitočtů od cca 50 Hz až do 1 MHz s použitím přístroje HP 4284A. Volte vhodný krok, abyste pokryli rovnoměrně všechny měřené řady (Hz, kHz, MHz). Pro vynášení v logaritmické měřítku je vhodný krok 1-2-5-10 nebo 1-3-10. Přístroj umožňuje nastavení kmitočtu jen s určitým krokem z předvolené řady hodnot. Dbejte, aby při upnutí součástek

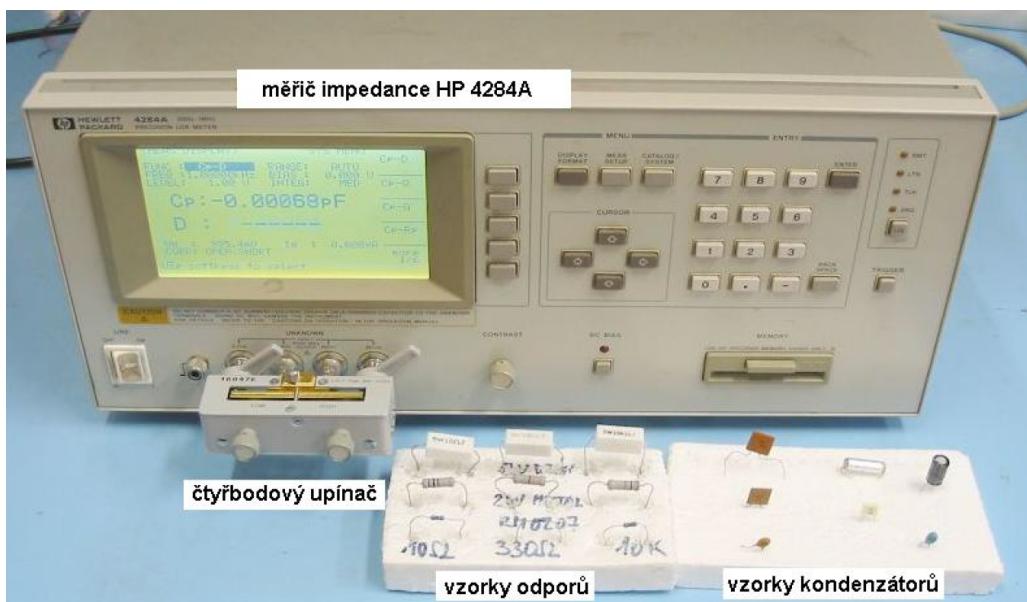
byl minimalizován vliv jejich přívodů (tj. připojovat krátkými přívody). Pokuste se porovnat jednotlivé technologie kondenzátorů mezi sebou z pohledu jejich frekvenční charakteristiky.

POZN.: Během měření kapacity a ztrátového činitele se může stát, že kapacita i ztrátový činitel budou indikovány záporné. V takovém případě se nemusí jednat o chybu. Pokud k danému jevu došlo na vyšších frekvencích, prošla pravděpodobně součástka rezonancí a nadále se chová jako cívka.

### 8.3.3 Měřené vzorky

1. 1 nF/10 nF/68 nF miniaturní keramické
2. 10 nF plastový s radiálními vývody WIMA
3. 10 nF plastový s axiálními vývody
4. 330  $\mu$ F/25 V elektrolytický hliníkový
5. 22  $\mu$ F/10 V elektrolytický tantalový

## 8.4 Obrázková příloha



# 9 Vlastnosti kondenzátorů a rezistorů při kmitočtech nad 1 MHz

## 9.1 Úvod

Rezistory a kapacitory nejsou ideální součástky, takže mimo svou dominantní vlastnost (odpor, kapacita) vykazují ještě parazitní vlastnosti (indukčnost, kapacitu, sériový a paralelní odpor). Při frekvencích nad 1 MHz způsobují parazitní parametry vlastní rezonanci. Jelikož se po rezonanci mění charakter součástky, může dojít k chybné funkci obvodu v daném pásmu frekvencí. Problém je významný především u pasivních filtrů, kde se významně mění předpokládaná frekvenční charakteristika. Pro příklad jednoduchý RC filtr 1. řádu typu dolní propust se změní po vlastní rezonanci kondenzátoru na RL filtr 1. řádu typu horní propust. Výsledná frekvenční charakteristika odpovídá ve své podstatě pásmové zádrži. Obecně konstrukce obvodů nad 1 MHz je nesnadný úkol, který klade velké nároky na výběr součástek.

### 9.1.1 Vlastní rezonance součástek

Náhradní modely reálných rezistorů a kondenzátorů jsou na obrázku 11. Pro frekvence nad 1 MHz již nelze tyto obvody dále zjednodušit. Zřejmě v případě rezistoru se jedná o zapojení paralelního rezonančního obvodu a v případě kondenzátoru o zapojení sériového rezonančního obvodu. Impedance náhradních obvodů vyjadřují vztahy:

$$Z_R = \frac{R + j\omega L_S}{1 - \omega^2 L_S C_P + j\omega R C_P} \quad (37)$$

$$Z_C = \frac{R_P}{1 + j\omega R_P C} + R_S + j\omega L_S \quad (38)$$

Oba vztahy dosahují extrému v blízkosti frekvence dané podmínkou:

$$\omega^2 LC = 1 \quad (39)$$

Jde vlastně o vyjádření Thomsonova vztahu. Ve skutečnosti je rezonanční frekvence nižší, než by odpovídalo vztahu (39). Její přesná hodnota navíc závisí na útlumu, který je úměrný poměru odporu k indukčnosti. Posun lze vidět na ilustračních obrázku 14, kde jsou vyneseny impedanční a fázové charakteristiky náhradního schéma rezistoru a kondenzátoru. Zřejmě pro zkoumané hodnoty prvků by podle vztahu (39) mělo dojít u obou součástek k rezonanci ve stejném místě (přibližně při 5 MHz). Nicméně u rezistoru, kde je poměr odporu k indukčnosti a tím i útlumu vyšší je maximální impedance posunuta mírně doleva. Všimněte si, že při rezonanci obě součástky vykazují výhradně odporový charakter. Ve fázové charakteristice je na rezonanční frekvenci fáze vždy  $0^\circ$ .

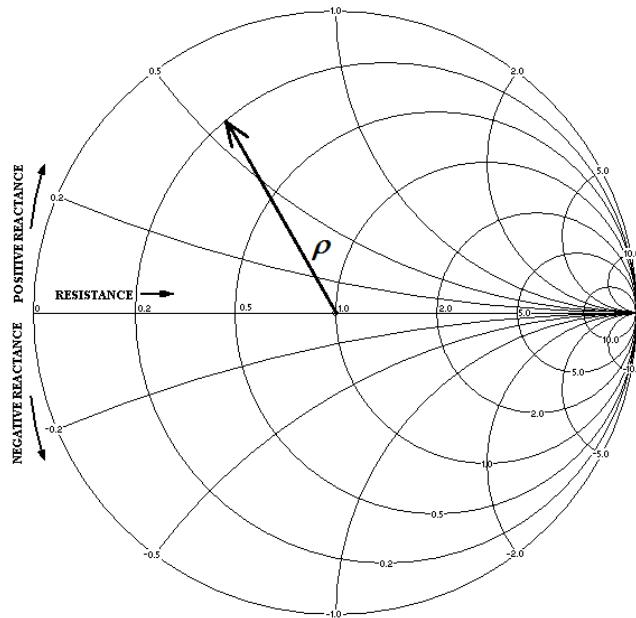
### 9.1.2 Smithův diagram

Měřící přístroj Agilent E5062A zobrazuje naměřené frekvenční charakteristiky pomocí Smithova diagramu. Smithův diagram graficky znázorňuje hodnotu činitele odrazu  $\rho$  v závislosti na zakončovací impedanci měřícího vedení  $Z$ .

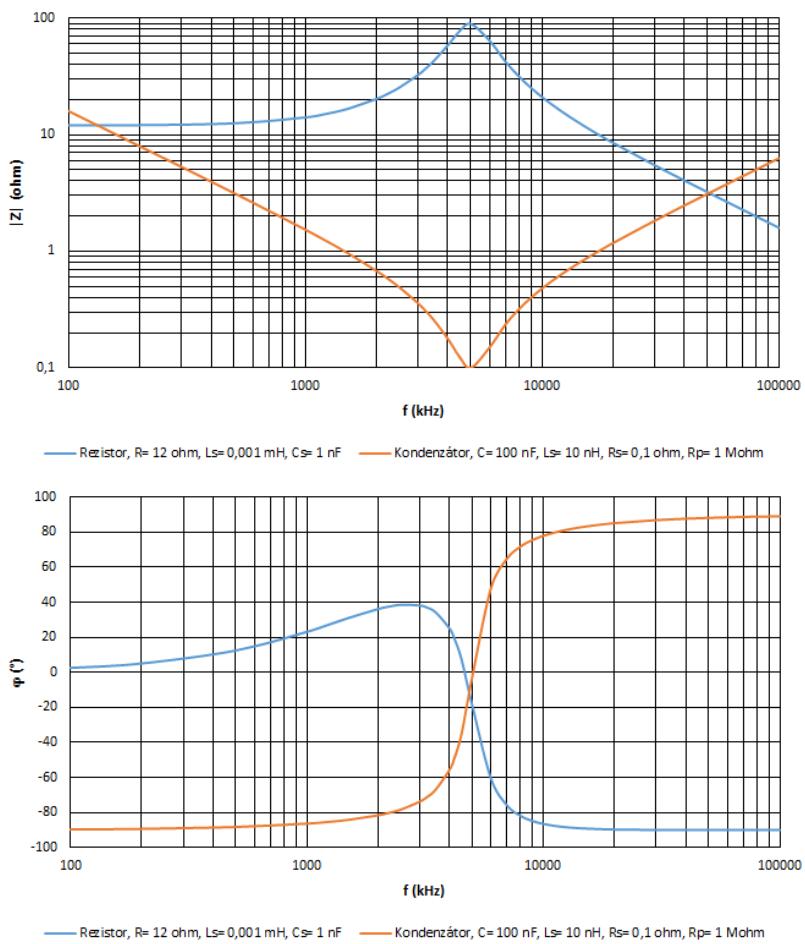
$$\rho = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{Z/Z_0 - 1}{Z/Z_0 + 1} \quad (40)$$

Při změřeném činiteli odrazu  $\rho$  lze při známé charakteristické impedanci vedení  $Z_0$  določit určovanou impedanci  $Z$ . Charakteristická impedance je v tomto případě čistě reálná (odporová)  $Z_0 = 50 \Omega$ . Odtud plyne, že horizontální osa Smithova diagramu zobrazuje činitele odrazu pro

čistě odporové zakončení. Výchylky nad touto osou odpovídají přítomnosti indukčnosti a pod osou přítomnosti kapacity.



Obrázek 13: Smithův diagram



Obrázek 14: Frekvenční charakteristika impedance a fáze pro náhradní obvod rezistoru a kondenzátoru

## 9.2 Kmitočtová závislost rezistorů

### 9.2.1 Úkol měření

Pro zadané vzorky rezistorů změřte závislost absolutní hodnoty impedance a fáze ( $|Z|$ ,  $\varphi$ ) na kmitočtu. Naměřené hodnoty vyneste do grafu. V závěru diskutujte vliv hodnoty a technologie rezistoru na naměřené frekvenční charakteristiky.

### 9.2.2 Postup měření

Měření provedte v rozsahu frekvencí 1 MHz až 100 MHz s použitím přístroje Agilent E5062A. Vyhodnoťte, jak se jednotlivé vzorky projevují v závislosti na jejich hodnotě a technologii. Zaznamenejte rezonanční frekvence jednotlivých součástek.

### 9.2.3 Měřené vzorky

1.  $10 \Omega / 330 \Omega / 10 \text{ k}\Omega$  rezistor metalizovaný, 0,6 W, velikost 0207
2.  $10 \Omega / 330 \Omega / 10 \text{ k}\Omega$  rezistor metalizovaný, 2 W, velikost 0414
3.  $10 \Omega / 330 \Omega / 10 \text{ k}\Omega$  rezistor drátový, 5 W, keramické pouzdro

## 9.3 Kmitočtová závislost kondenzátorů

### 9.3.1 Úkol měření

Pro zadané vzorky kondenzátorů změřte závislost kapacity a ztrátového činitele ( $C$ ,  $tg\delta$ ) na kmitočtu. Naměřené hodnoty vyneste do grafu. V závěru diskutujte vliv technologie kondenzátoru na naměřené frekvenční charakteristiky.

### 9.3.2 Postup měření

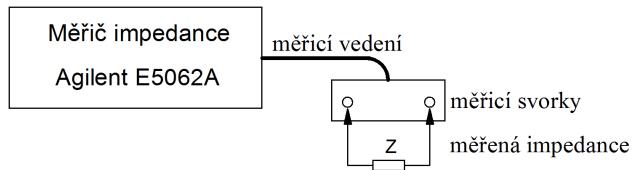
Měření provedte v rozsahu frekvencí 1 MHz až 100 MHz s použitím přístroje Agilent E5062A. Vyhodnoťte, jak se jednotlivé vzorky projevují v závislosti na jejich technologii. Zaznamenejte rezonanční frekvence jednotlivých součástek.

### 9.3.3 Měřené vzorky

- |   |  |
|---|--|
| 1. Elektrolytický kondenzátor hliníkový, $330 \mu\text{F} / 25 \text{ V}$ | 5. Keram. kondenzátor, $1 \text{ nF}$  |
| 2. Elektrolytický kondenzátor tantalový, $22 \mu\text{F} / 10 \text{ V}$  | 6. Keram. kondenzátor, $10 \text{ nF}$ |
| 3. Foliový kondenzátor radiální, $10 \text{ nF} / 100 \text{ V}$          | 7. Keram. kondenzátor, $68 \text{ nF}$ |
| 4. Foliový kondenzátor axiální, $10 \text{ nF} / 100 \text{ V}$           |  |

## 9.4 Měření přístrojem Agilent E5062A

### 9.4.1 Schéma zapojení



### 9.4.2 Postup měření

Bez založeného vzorku na začátku měření zkонтrolujeme kalibraci přístroje – kurzor ukazuje na pravý okraj kružnice na displeji (poloha 3 hodiny). Pokud ne, je třeba kalibrovat:

„Save/Recall“ / „Recall/State“ / „File Dialog“ / „Lab.sta“ / „Open“

Založíme vzorek do čelistí. Tlačítky **START** a **STOP** lze zadat z klávesnice počáteční a konečnou frekvencí měření. Body křivky můžeme číst manuálně nebo zaznamenat celou křivku automaticky na paměťové medium.

#### Manuální nastavení frekvence:

Aktuální frekvenci můžeme nastavit při nastavení volby Marker /Marker1. Frekvenci nastavujeme otáčením voliče nebo z klávesnice. Na displeji je možné odebýt údaje v následujícím pořadí: frekvence ( $f$ ), odpor ( $R$ ), reaktance ( $X$ ), indukčnost ( $L$ ) nebo kapacita ( $C$ ) podle znaménka reaktance.

#### Automatické měření:

Měření probíhá kontinuálně. Data zapisujeme na flash disk. Postupně volíme:

„Save/Recall“ / „Save Trace Data“

**Nezapomeňte zvolit vhodné uložitě!!!**. Jméno souboru je nutné zadat z klávesnice. Stiskem „Save“ se data uloží ve formátu CSV. Formát ukládání je CSV. Tento formát souborů lze běžně editovat softwary Excel, Matlab apod.

# 10 Osazování DPS

## 10.1 Úvod

Pájení je způsob spojování dvou kovových materiálů pomocí jiného roztaveného kovového materiálu, tzv. pájky. Teplota tání pájky je obvykle mnohem nižší, než je tomu u pájených materiálů, proto při pájení nedochází k tavení spojovaných součástí. V elektrotechnice se pro vytváření vodivých spojů používají téměř výhradně tzv. měkké pájky. To jsou materiály, u nichž je teplota tání nižší než 400 °C. Lze se setkat se dvěma skupinami používaných slitin: Pájky obsahující olovo – jsou založeny na slitině Sn-Pb. Jejich výhodou je nízký bod tání, který je pouze 183 °C. Nevýhodou je obsah olova, které je toxické. Používání těchto pájek je omezeno směrnicí RoHS pouze pro speciální účely. Pájky bez olova – jde o slitiny cínu a dalších kovů, jako například Ag, Zn, Cu a další. Teplota tání je vyšší než u pájek s olovem a její obvyklá hodnota je 217 °C. Tavidla jsou nekovové materiály usnadňující pájení. Zlepšují smáčivost daných materiálů pájkou a brání oxidaci roztavené pájky. Nejčastěji se pro tento účel používá kalafuna.

## 10.2 Osazování desky plošného spoje

### 10.2.1 Úkol měření

Osaděte připravený plošný spoj a pomocí přípravku ověřte jeho funkčnost.

- Pomocí tabulky zkuste určit hodnotu odporu jednoho rezistoru. Zbývající rezistory měřte pomocí ohmmetru.
- Polaritu diod ověřujte pomocí multimetru.
- U LED s průhledným pouzdrem najděte způsob jak ověřit polaritu i barvu světla.

### 10.2.2 Popis zapojení

Schéma zapojení osazovaného obvodu je na obrázku 15. Jedná se o generátor tónů. Nejnižší je tón „a“ na 440 Hz. Další tři tóny jsou generovány při různém propojení kolíků 1 a 2 konektoru SL1 se zemí. Oba kolíky jsou určeny pro připojení tlačítka proti zemi. Odstupňování frekvencí odpovídá velmi zhruba půltónu. Napájecími svorkami jsou kolíky 3 (kladná polarita zdroje) a 4 (záporná polarita zdroje) na stejném konektoru. Obvod je možné napájet napětím v rozmezí 5 V až 15 V.

Funkce obvodu je založena na integrovaném časovači NE555 (lze použít i TS555 nebo 7555). Ten generuje obdélníkový signál, jehož frekvence je určena jednak časovou konstantou prvků R6 a C1 a pak napěťovým posunem komparační úrovně na pinu CV obvodu IC1. Akustický piezoměnič se připojuje na svorky LSP1 a LSP2 a kvůli možnému stejnosměrnému předpětí je od výstupu časovače oddělen elektrolytickým kondenzátorem C3. Komparační úrovně půltónů jsou nastavovány dělicem realizovaným rezistory R1, R2, R3 a R4. Vyřazováním rezistorů R3, R4 nebo dochází ke snížování komparační úrovně na pinu CV integrovaného obvodu IC1 a tím k generování vyšších tónů. R3 a R4 zároveň realizují předřadný odpor pro LED. Proto by měla být zelená dioda, která je na vyšší napětí připojena k nižší hodnotě předřadného rezistoru a červená k vyšší hodnotě. Obecně však lze vzájemné pozice rezistorů R3 a R4 nebo vzájemné pozice led LED1 a LED2 zaměnit.

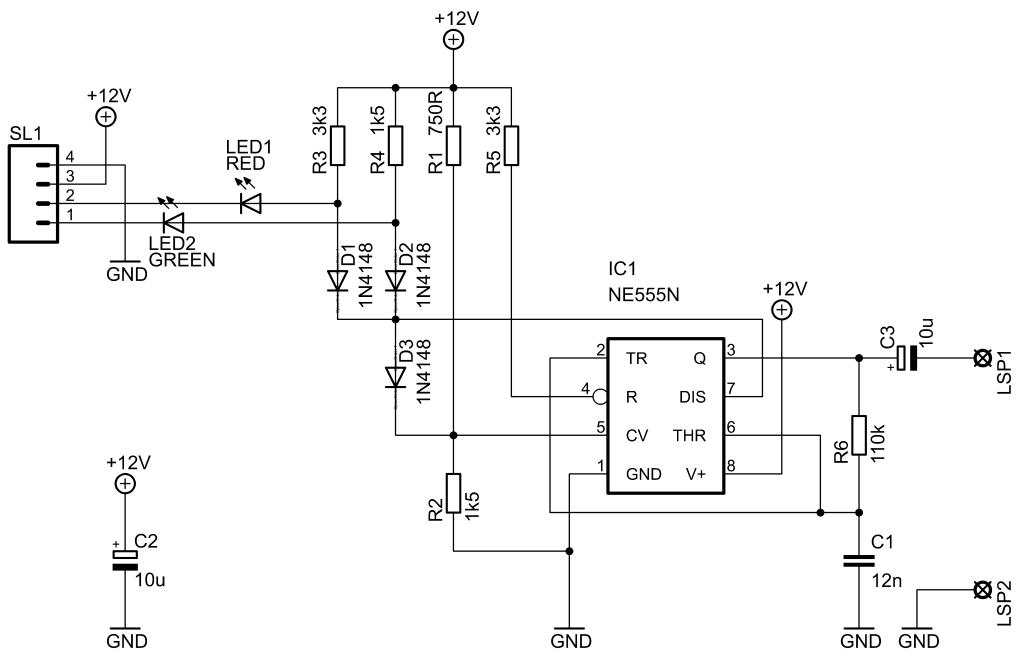
### 10.2.3 Postup pájení

Desku plošného spoje osazujeme dle obrázku 16, který ukazuje pozice součástek ze strany součástek (druhá strana se nazývá strana plošného spoje a jsou na ní vyleptané vodivé trasy). Dbáme na polaritu diod a elektrolytických kondenzátorů a také na správné natočení pouzdra integrovaného obvodu, které je vyznačeno klíčem (symbol na pouzdře – tečka, výřez apod.). Při osazování je vhodné začít součástkami s nízkým profilem (výškou). Pájení bude jednodušší, pokud si desku plošného spoje upevníme do držáku. Spoje pájíme následujícím postupem:

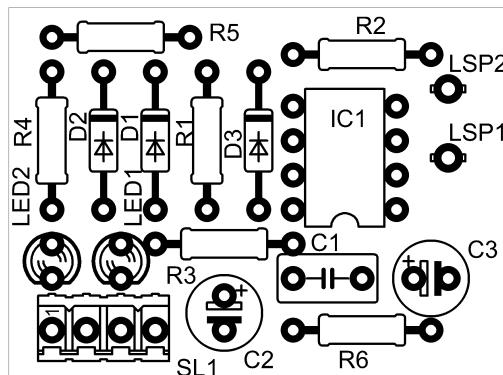
1. Páječku držíme v jedné ruce, trubičkovou pájku ve druhé.
2. Přiložíme páječku ke spoji a začneme jej prohřívat (případně ještě předtím namočíme páječku do kalafuny).
3. Dotkneme se pájkou prohřívaného spoje – trocha pájky se roztaží a zůstane na páječce a spoji. Páječkou stále prohříváme spoj!!!
4. Poté co se pájka rozteče po spoji, páječku odejmeme. Vždy se snažíme, zkrátit dobu pájení na minimum.

Výsledný pájený spoj by měl mít vzhled sopky.

#### 10.2.4 Schéma zapojení



Obrázek 15: Schéma zapojení generátoru tónů



Obrázek 16: Pokládací (osazovací) schéma

#### 10.2.5 Značení rezistorů

Barva	1. pruh	2. pruh	3. pruh	Násobitel	Tolerance
černá	0	0	0	1	
hnědá	1	1	1	10	1%
červená	2	2	2	100	2%
oranžová	3	3	3	$10^3$	
žlutá	4	4	4	$10^4$	
zelená	5	5	5	$10^5$	0,5%
modrá	6	6	6	$10^6$	0,25%
fialová	7	7	7	$10^7$	0,1%
šedá	8	8	8	$10^8$	0,05%
bílá	9	9	9	$10^9$	
zlatá				0,1	5%
stříbrná				0,01	10%