

Obsah

1	Elektrické obvody	2
2	Ideální součástky elektronických obvodů	7
3	Polovodičové součástky	12
4	Porovnání VA charakteristik různých typů fv modulů	16
5	Vlastnosti vysokofrekvenčních cívek	21

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 dělicí poměr nezatíženého děliče lze získat z Ohmova zákona:

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

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 děliči mohou být i reaktance).

1.1.2 Frekvenční přizpůsobení

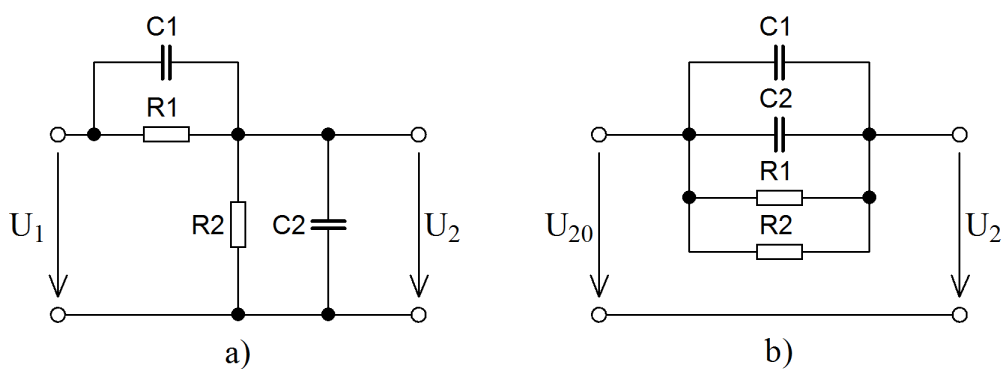
Výstupní napětí U_2 odporového děliče může být frekvenčně závislé v důsledku přítomnosti parazitních reaktancí. Při spojování funkčních bloků, jako například zdroj napětí a zátěž, je obvykle třeba kompenzovat především kapacitu zátěže C_2 . Pomyslný dělič napětí vzniká mezi vnitřním odporem zdroje R_1 a odporem zátěže R_2 . Připojená kapacita s rostoucí frekvencí snižuje výslednou impedanci zátěže a napětí na zátěži klesá. Daný jev lze kompenzovat připojením dalšího kondenzátoru C_1 paralelně k vnitřnímu odporu zdroje R_1 . Pro dělicí 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 dělicí 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 konstanta. Hodnotu konstanty lze odvodit při znalosti jednotlivých prvků obvodu a tento úkol je součástí následujících cvičení. Vnitřní impedanci 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

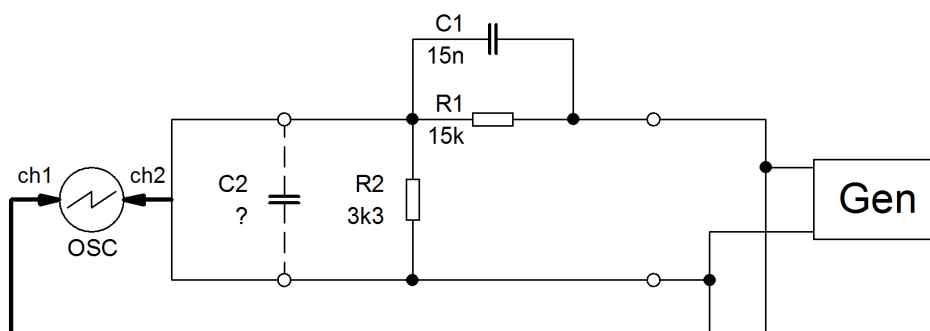
1.2 Frekvenční přizpůsobení pasivního děliče napětí

1.2.1 Úkol měření

- Pro daný frekvenčně nepřizpůsobený dělič spočítejte vhodnou hodnotu kapacity výstupního kondenzátoru, kterým zajistíte konstantní dělicí 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 proveďte 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 nezkrácený. 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 kursorů (seznamte se s uvedenými možnostmi). Frekvenci v daném rozsahu měňte s logaritmickým krokem 100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1 kHz, ..., 10 kHz. Části rychlých změn amplitudy výstupního napětí proměřte s menším krokem. Napěťový přenos určete jako poměr výstupního ke vstupnímu napětí a vynesete jej do společného grafu pro jednotlivé kondenzátory připojené k výstupu.

1.3 Impedanční přizpůsobení vstupu zesilovače

1.3.1 Úkol měření

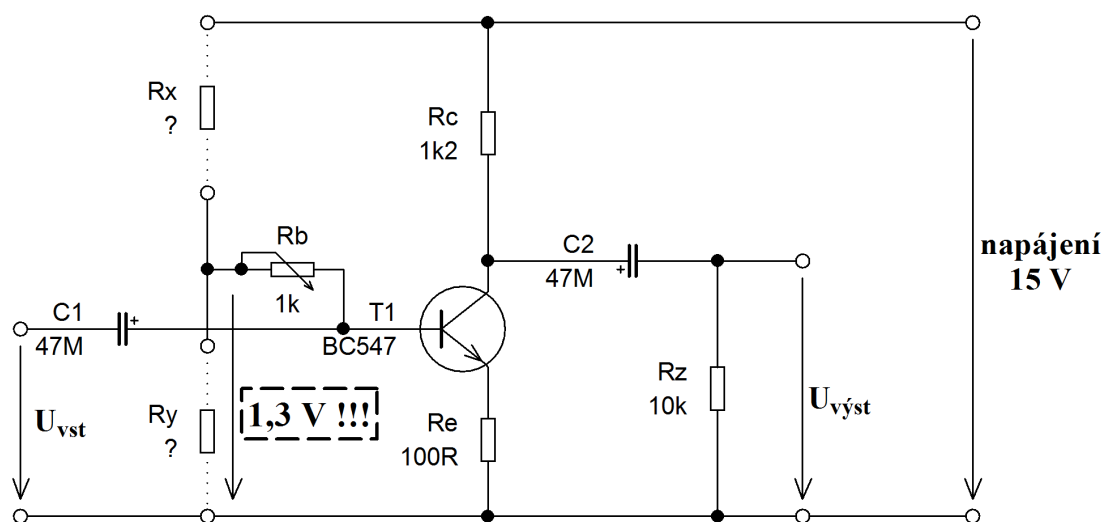
Přepínačem vyřadíte sériovou kapacitu děliče a provedete následující úkoly:

- 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 - spočtete a ověříte osciloskopem nebo voltmetrem při napájení stejnosměrným zdrojem 5 V,
 - vnitřní (výstupní) odpor děliče - spočtete a ověříte 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 napětovým zesílením $A_U = 20$ dB. Navrhněte a zapojte dělič v bázevém 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.
- c) Zcela dobrovolně: Pokuste se vykompenzovat spojení generátor-dělič-zesilovač, ve chvíli, kdy je do děliče vřazen kondenzátor 15 nF.

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 a vstupní odpor zesilovače R_{vst} společně vytvářejí dělič napětí naprázdno U_0 zdroje signálu. Výstupní napětí daného děliče požadujeme právě spočtených 0,6 V. Ze vztahu pro výstupní napětí nezatíženého děliče vypočítáme požadovanou hodnotu vstupního odporu zesilovače R_{vst} .

Při návrhu děliče nastavující pracovní bod tranzistoru zanedbejte odběr báze 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 je roven požadovanému vstupnímu odporu zesilovače. Podle příslušných vztahů dopočítejte hodnoty prvků R_x a R_y .

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.

- ad c)** Z odvozených vztahů z předchozí úlohy a znalosti vstupního odporu zesilovače přepočítejte kompenzační kapacitu a odpovídající kondenzátor připojte na svorky děliče. Výsledný průběh by měl být opět obdélníkový signál bez derivačních špiček.

1.3.4 Použitý materiál

1. Rezistory řady hodnot E12, 1 k Ω - 82 k Ω
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 vyjma 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 $j\omega$. ω 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:

$$R = \frac{\hat{U}_R}{\hat{I}_R} \quad (5)$$

$$\frac{-j}{\omega C} = \frac{\hat{U}_C}{\hat{I}_C} \quad (6)$$

$$j\omega L = \frac{\hat{U}_L}{\hat{I}_L} \quad (7)$$

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° . U ideální cívky (induktor) se proud za napětím zpožďuje o 90° , zatímco u ideálního kondenzátoru (kapacitor) proud napětí o 90° 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:

$$\hat{Z} = R + jX_L = R + j\omega L \quad (8)$$

nebo

$$\hat{Z} = |Z| \cdot e^{j\varphi} \quad (9)$$

Pro členy v rovnici (9) platí:

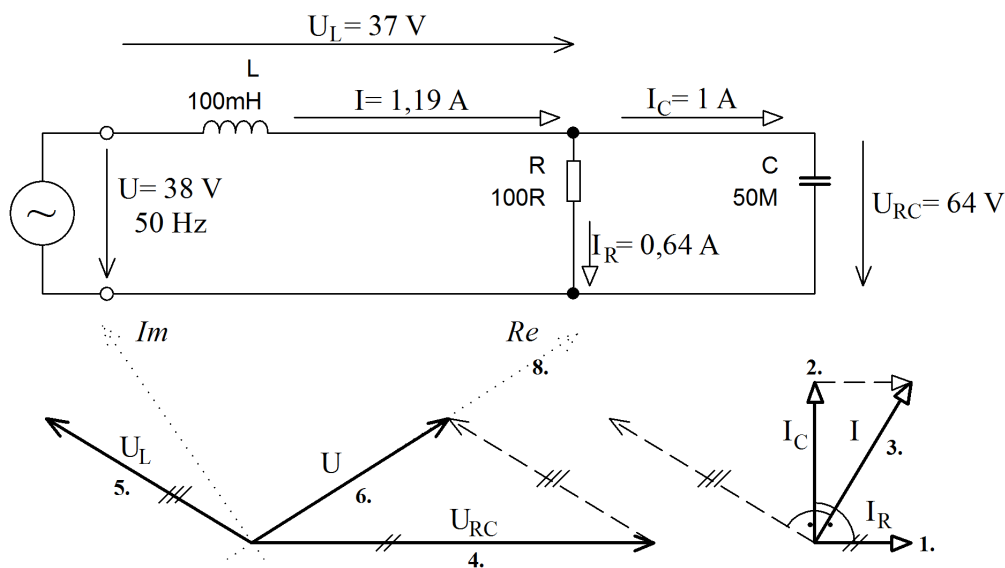
$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (10)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (11)$$

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 diagram 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 napětíovým zdrojem umístit 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 umísťuje 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° . Součet obou fázorů pak dává výsledný proud I . Následuje zakreslení napětí U_{RC} ve fázi s proudem rezistoru. Napětí na cívce musí o 90° 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 rezanci:

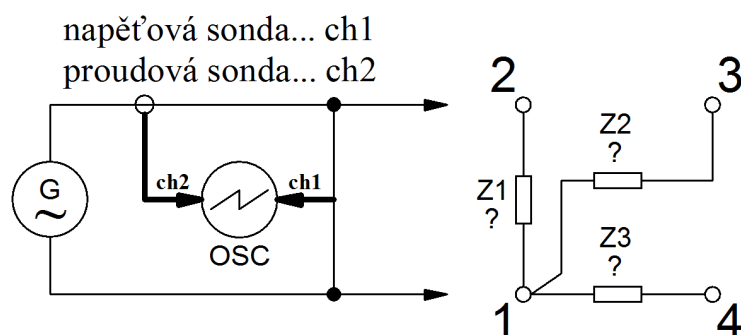
$$\omega_{REZ}L = \frac{1}{\omega_{REZ}C} \Rightarrow \omega_{REZ} = 2 \cdot \pi \cdot f_{REZ} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (12)$$

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 osciloskop u výsledků, 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 vynesete 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

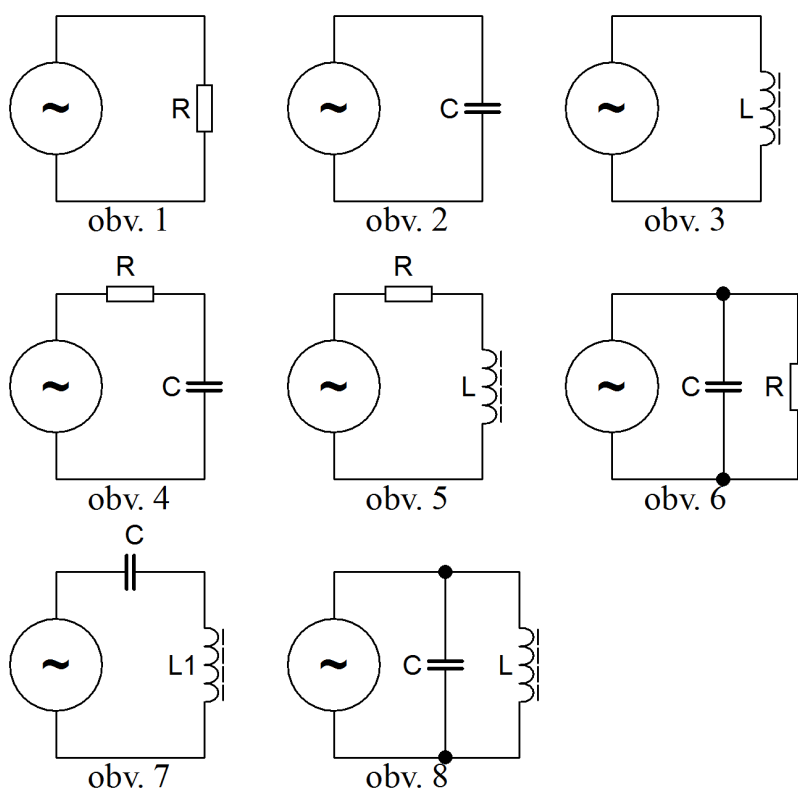
2.3.1 Úkol měření

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 vypočtete 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° .

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

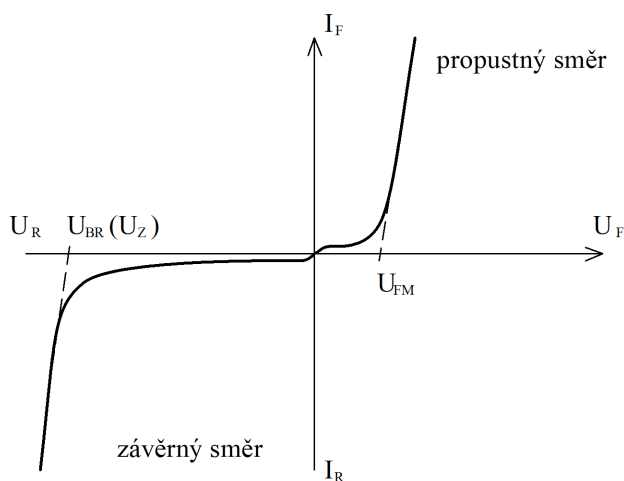
3 Polovodičové součástky

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 závisující 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. Usměrnovací 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 říditelný proudem.

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

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

$$U_{BE} = h_{11E} \cdot I_B + h_{12E} \cdot U_{CE} \quad (13)$$

$$I_C = h_{21E} \cdot I_B + h_{22E} \cdot U_{CE} \quad (14)$$

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

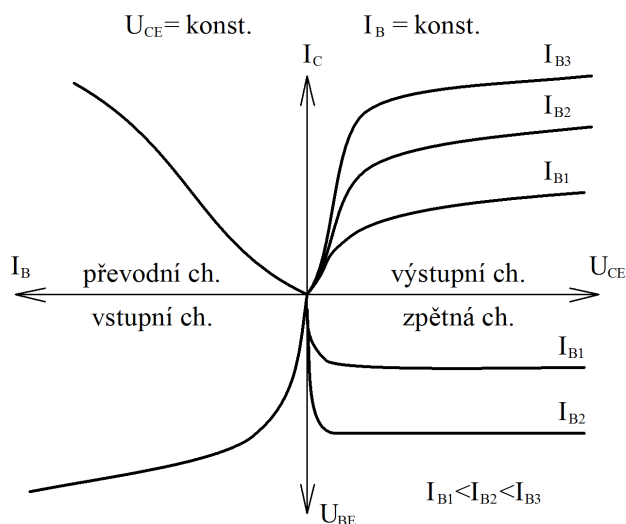
h_{11E} je vstupní impedance tranzistoru (Ω),

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 mimo jiné graficky vynesáním 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 stejnosměrným 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 hysterezi, 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 měřicího 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.

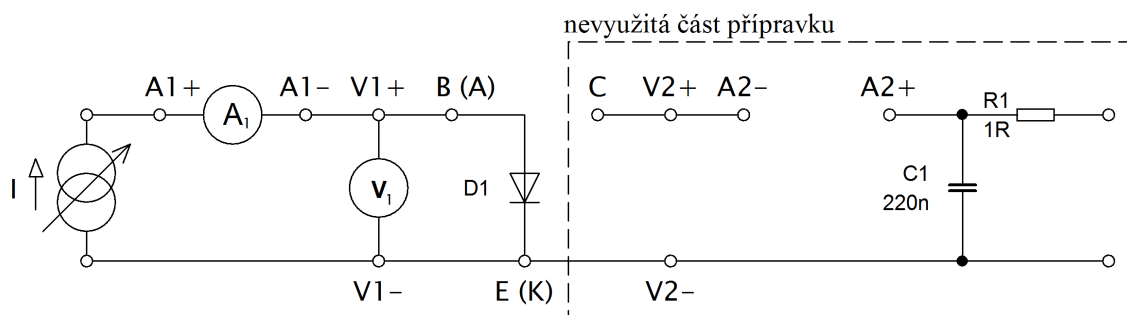
3.2 Měření VA charakteristik různých typů diod

3.2.1 Úkol měření

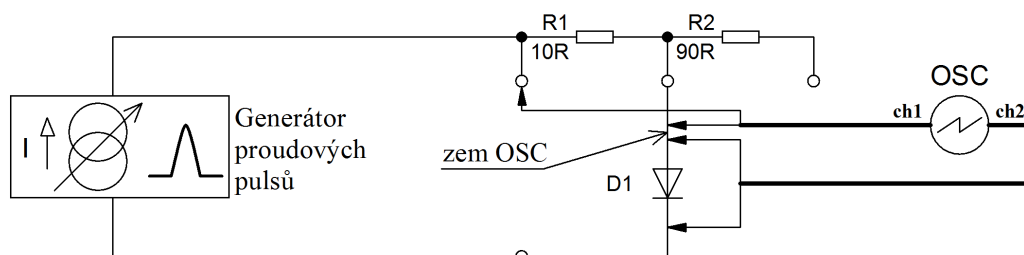
Změřte VA charakteristiky $I=f(U)$ v propustném směru předložených polovodičových diod. Naměřené hodnoty vynesete do grafu a vzájemně je porovnejte. Vyberte si jednu diodu, jejíž charakteristiku změříte statickou metodou. Charakteristiky ostatních diod měřte pulzně generátorem a osciloskopem. U Zenerovy diody navíc změřte a vynesete 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 proudů 0-200 mA. U vzorku 4 měřte jen do maxima proudu 20 mA. Nastavený proud odečítejte z ampérmetru A_1 a vzniklý úbytek napětí z voltmetru V_1 . 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 měřicí 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 vynesete za pomoci odpovídajícího softwaru - EXCEL, MATLAB apod. Napětí bude v datech zobrazeno přímo, avšak proud je snímán jako úbytek napětí na 10 Ω odporu. Proto proveďte příslušný přepočet! Pokud máte danou možnost, otestujte jak se změní VA charakteristika vlivem změny teploty.

3.2.4 Měřené vzorky

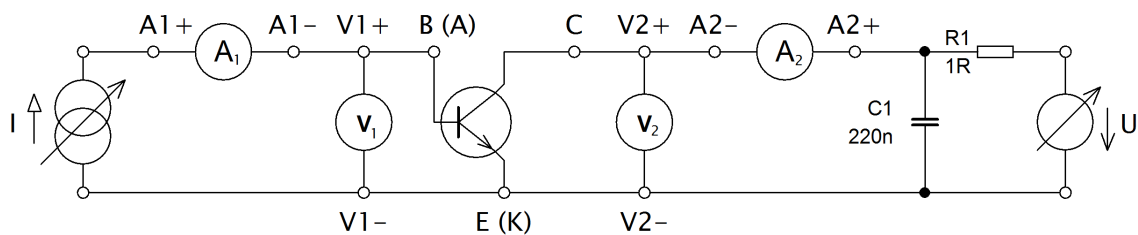
1. Shottkyho dioda typ 1N5819, parametry $I_{max} = 1 \text{ A}$, $U_{max} = 40 \text{ V}$.
2. Křemíková dioda univerzální typ 1N4007, parametry $I_{max} = 1 \text{ A}$, $U_{max} = 1000 \text{ V}$.
3. LED 5 mm bílá 9000 mcd, parametry $U_f = 4 \text{ V}$, $I_{max} = 100 \text{ mA}$.
4. LED 10 mm červená, parametry $U_f = 1,9 \text{ V}$, $I_{max} = 20 \text{ mA}$.
5. Zenerova dioda 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 emitorem pro proudy báze $I_B = 1, 2, 5, 10 \text{ mA}$. Při měření nepřesáhněte maximální mez stejnosměrného napětí 10 V v kolektorovém obvodu 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_2 a voltmetru V_2 nastavujte napětí a měřte proud obvodem kolektoru. Napětí nastavujte v rozsahu $0 - 10 \text{ V}$.
- ad b)** Regulovatelným napěťovým zdrojem U nastavte napětí $U_{CE} = 10 \text{ V}$. Pomocí regulovatelného proudového zdroje I , ampérmetru A_1 a A_2 nastavujte proud báze I_B a měřte proud obvodem kolektoru I_C . Proud kolektorem nesmí přesáhnout hodnotu $1,2 \text{ A}$.
- ad c)** Regulovatelným napěťovým zdrojem U nastavte napětí $U_{CE} = 10 \text{ V}$. Pomocí regulovatelného proudového zdroje I , ampérmetru A_1 a voltmetru V_2 nastavujte proud báze I_B a měřte napětí mezi bází a emitorem. Proud kolektorem nesmí přesáhnout hodnotu $1,2 \text{ A}$.

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 Porovnání VA charakteristik různých typů fv modulů

4.1 Úvod

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

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

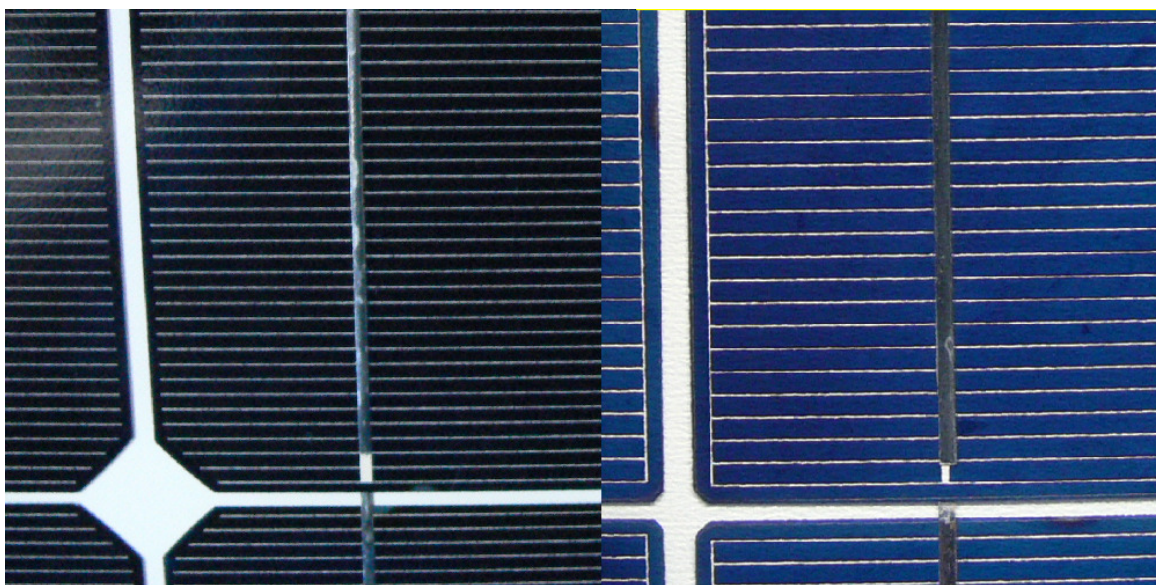
Nejrozšířenějšími články jsou články na bázi křemíku, které jsou levné a mají relativně vysokou účinnost.

4.1.1 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. Czochralskiho metoda) pomocí zárodečného krystalu. Hotový ingot je poté pomocí diamantové pily rozřezán na destičky. Následuje odleptání 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 5, vlevo.

4.1.2 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 5, vpravo.



Obrázek 5: Detail FVČ - monokrystalický (vlevo), multikrystalický (vpravo)



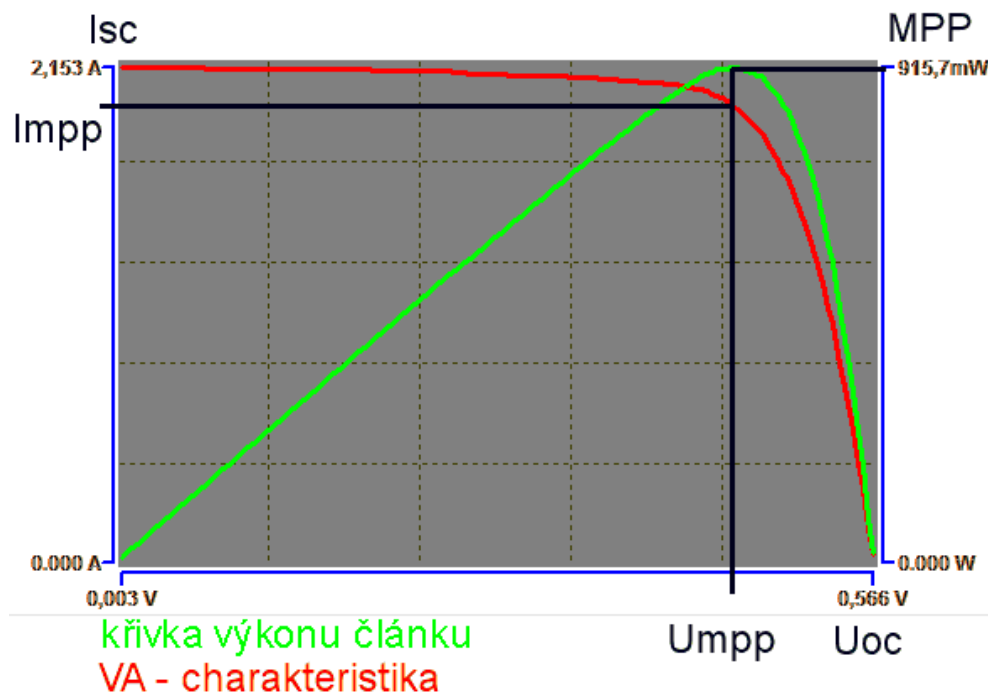
Obrázek 6: CdTe amorfnní fotovoltaický panel

4.1.3 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 nanášení 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 6.

4.1.4 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 7. Křivka byla zaznamenána při ozařování článku halogenovou žárovkou ze vzdálenosti cca 15 cm.

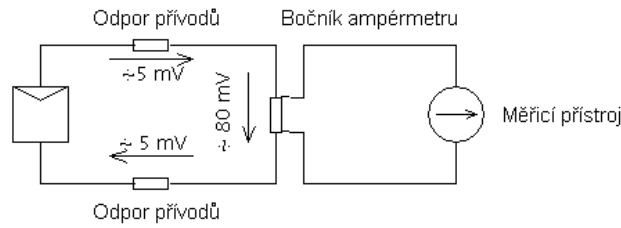


Obrázek 7: VA charakteristika fotovoltaického článku

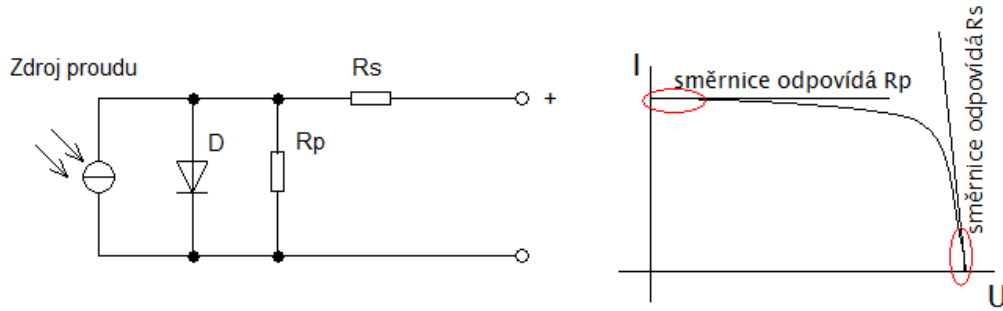
4.1.5 Měření základních parametrů FV modulu

Proud nakrátko určíme pomocí ampérmetru; vzhledem k metodě měření proudu pomocí úbytku napětí na bočníku je tato hodnota pro teoretickou podmínku 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 8. 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 8: Vliv odporu bočníku na měření I_{sc}



Obrázek 9: 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:

$$\frac{1}{R_P} = \frac{dI}{dU} \quad (15)$$

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

$$R_S = -\frac{dU}{dI} \quad (16)$$

Tato metoda určení parametrů náhradního obvodu modulu (článku), viz obrázek 9, 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 tedy 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 7).

Činitel plnění je definován dle vztahu:

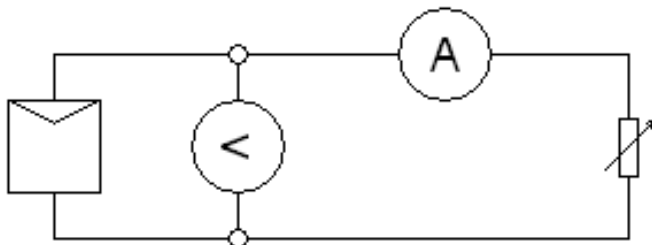
$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{0C} \cdot I_{SC}} \quad (17)$$

4.2 Měření VA charakteristik fotovoltaických modulů

4.2.1 Úkol měření

- Změřte voltampérové charakteristiky předložených fotovoltaických modulů a určete jejich typ. Každý modul změřte dvakrát. První měření proveďte při teplotě cca 20 °C (aktuální teplota laboratoře). Postupujte rychle, aby nedošlo k ohřátí fotovoltaického modulu. Druhé měření proveďte po ustálení teploty na fotovoltaickém modulu. Pro měření teploty má každý z modulů nalepen na spodní straně termočlánek.
- Pro každý modul určete následující parametry a proveďte 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 .
- Do společného grafu vynesete závislosti $I = f(U)$, $P = f(U)$ všech testovaných modulů a průběhy porovnejte. Totéž proveďte pro různé teploty.
- Porovnejte moduly z hlediska výkonu vztaženého na plochu (W/m^2).

4.2.2 Schéma zapojení



4.2.3 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 termočlánekem umístěným na spodní straně modulu) proveďte 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. Vynesete grafy závislostí požadované v bodu c). V závěru měření se pokuste o srovnání parametrů jednotlivých článků. Při tomto srovnání berte v úvahu i osvětlenou plochu článku.

5 Vlastnosti vysokofrekvenčních cívek

5.1 Úvod

Indukčnost v elektrickém obvodu je obvykle realizována cívkou, 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, rozměrech 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, skin efekt a vř. vlastnosti magnetických materiálů.

5.1.1 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. Rezananční 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:

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (18)$$

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.

5.1.2 Napětí na prvcích v rezonanci

Během rezonance sériového RLC obvodu dochází ke zvýšení amplitudy napětí na cívkě 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:

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}}{\hat{Z}} = \frac{\hat{U}}{\hat{R}} \quad (19)$$

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°):

$$\hat{U}_L = \hat{I} \cdot jX_L = \hat{U} \cdot \frac{j\omega L}{R} = \hat{U} \cdot jQ \quad (20)$$

$$\hat{U}_C = \hat{I} \cdot (-jX_C) = \hat{U} \cdot \frac{-j}{\omega CR} = \hat{U} \cdot (-jQ) \quad (21)$$

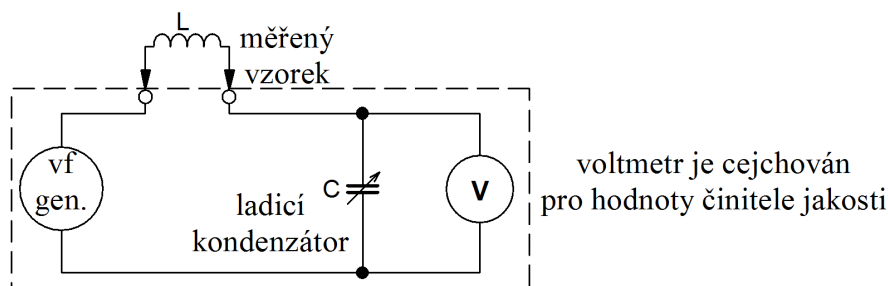
Z rovnic vyplývá (20) a (21), že výsledné napětí na obou reaktancích bude zesíleno velikostí činitele jakosti.

5.2 Měření frekvenční závislosti činitele převýšení Q

5.2.1 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 vynesete do grafu! Diskutujte vliv provedení vinutí na vlastnosti cívky. Ověřte vliv feritového jádra na vlastnosti cívek.

5.2.2 Schéma zapojení



5.2.3 Postup měření

Měřte na Q -metru v kmitočtovém rozsahu určeném nejmenší a největší kapacitou ladícího 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.

5.2.4 Měřené vzorky

1. cívka $D = 40$ mm, $l = 27$ mm, 13 závitů vodičem $\varnothing 1,2$ mm
2. cívka $D = 40$ mm, $l = 27$ mm, 27 závitů vodičem $\varnothing 0,6$ mm
3. cívka $D = 40$ mm, $l = 27$ mm, 57 závitů vodičem $\varnothing 0,3$ mm
4. cívka $D = 40$ mm, $l = 27$ mm, 13 závitů vodičem $\varnothing 1,2$ mm, feritové jádro z mat. N1
5. cívka $D = 40$ mm, $l = 27$ mm, 27 závitů vodičem $\varnothing 0,6$ mm, feritové jádro z mat. N1
6. cívka $D = 40$ mm, $l = 27$ mm, 57 závitů vodičem $\varnothing 0,3$ 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

5.3 Měření frekvenční závislosti indukčnosti L_S a činitele převýšení Q vzorků na feritových jádrech

5.3.1 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 f_r . Měření proveďte pomocí LCR metru HP4284A.

5.3.2 Postup měření

Měřte na Q-metru v kmitočtovém rozsahu určeném nejmenší a největší kapacitou ladícího 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) zjistíte změnu jejich el. parametrů.

5.3.3 Měřené vzorky

1. tlumivka 3,7 mH (feritové jádro obdélníkové)
2. tlumivka 600 μ H (feritové jádro obdélníkové)

5.4 Obrázková příloha

