

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích**  
**Pedagogická fakulta**  
**Katedra fyziky**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Konstrukce a realizace zdroje vn pro čištění sondy**

**Vedoucí práce: doc. PaedDr. Petr Adámek, Ph.D.**

**České Budějovice 2007**

**Zbyněk Tůma**

## **Anotace**

Bakalářská práce je zaměřena na konstrukci a realizaci zdroje napětí pro čištění Langmuirovy sondy. Práce krátce seznamuje s problematikou sondové diagnostiky plazmatu a možnými problémy její aplikace v plazmatu, kde dochází ke znečišťování diagnostické Langmuirovy sondy. Hlavní součástí práce je analýza technického řešení čištění Langmuirovy diagnostické sondy. Výstupem práce je konkrétní technické řešení a realizace zdroje napětí pro čištění diagnostické sondy.

## **Abstract**

This work is focused on the construction and realization of voltage source for cleaning of Langmuir probe. The work shortly acquaint with the questions of probe plasma diagnostics and the potential problems of her application in plasma, where comes to pollution of diagnostic Langmuir probe. The main part of this work is the analysis of the technical solution of cleaning Langmuir probe. The output of this work is the concrete technical solution and realization of voltage source for cleaning Langmuir probe.

### **Čestné prohlášení autora**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a dalších pramenů uvedených v seznamu literatury.

V Českých Budějovicích 20.4.2007

.....

Zbyněk Tůma

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce doc. Petru Adámkovi za cenné připomínky při realizaci práce.

# Obsah

<b>1. Úvod.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Cíle práce.....</b>	<b>9</b>
<b>3. Výběr vhodného principu funkce zdroje pro čištění sondy.....</b>	<b>10</b>
3.1 Napájecí zdroje.....	11
<b>4. Návrh a projekt zdroje pro čištění Langmuirovy sondy.....</b>	<b>12</b>
4.1 Celková koncepce zdroje pro čištění Langmuirovy sondy.....	12
4.2 Zdroj nižšího nebo vyššího napětí pro čištění sondy.....	13
4.2.1 Síťový transformátor.....	14
4.2.2 Výběr síťového transformátoru.....	16
4.2.3 Násobiče napětí.....	17
4.2.4 Návrh násobiče napětí.....	19
4.2.5 Schéma zapojení zdroje napětí pro čištění sondy.....	20
4.3 Zdroj napětí pro měřicí obvod.....	21
4.3.1 Výběr síťového transformátoru.....	21
4.3.2 Usměrňovače.....	21
4.3.3 Návrh usměrňovače.....	24
4.3.4 Stabilizátor napětí.....	24
4.3.5 Návrh stabilizátoru napětí.....	26
4.3.6 Panelové měřidlo pro měření výstupního proudu a napětí.....	26
4.3.7 Návrh a výpočet snímacího rezistoru pro měření proudu.....	27
4.3.8 Návrh a výpočet předřadníku pro měření napětí.....	28
4.3.9 Schéma zapojení zdroje napětí pro měřicí obvod.....	29
<b>5. Konstrukce zdroje.....</b>	<b>29</b>
5.1 Oživení zdroje.....	30
5.2 Seznam součástek.....	31
5.3 Schéma tištěného spoje.....	32
5.4 Schéma osazení součástek.....	33
5.5 Technické údaje.....	34
<b>6. Velikost výstupního napětí a proudu z hlediska bezpečnosti.....</b>	<b>35</b>
6.1. Účinky elektrického proudu na člověka - 3 stupně.....	35
<b>7. Aplikace a využití zdroje.....</b>	<b>36</b>

<b>8. Závěr.....</b>	<b>37</b>
<b>9. Seznam použité literatury.....</b>	<b>38</b>
<b>10. Přílohy.....</b>	<b>40</b>

## 1. Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku konstrukce a realizace zdroje napětí pro čištění Langmuirovy sondy. Tato sonda, elektroda, se používá k sondové diagnostice plazmatu, respektive k určení některých parametrů, důležitých jak pro vlastní zkoumání výboje, tak pro získání informací nezbytných pro stanovení technologických podmínek například pro úspěšné deponování tenkých vrstev v současných špičkových plazmových technologiích. Plazmové technologie v současnosti zasahují do mnoha oblastí techniky, jako jsou elektronika, strojírenství, výroba automobilů, optika, textilní průmysl. Dalšími oblastmi z hlediska vědy a aplikací jsou zdravotnictví, archeologie, likvidace toxických látek, a mnohé další [1]. Na základě požadavků výše uvedených, stále se rozvíjejících plazmových technologií, je stále potřeba rozvíjet a zdokonalovat diagnostiku plazmatu. Je používáno několik principů a metod diagnostiky plazmatu jako jsou například optická diagnostika, hmotnostní spektroskopie, mikrovlnná diagnostika a též, výše uvedená, sondová diagnostika.

Přesto, že sondová diagnostika plazmatu je známa již 80 let, je stále používanou diagnostickou technikou. Principem sondové diagnostiky je měření volt – ampérové charakteristiky na elektrodě, zpravidla malých rozměrů, která je vložena do plazmatu, a referenční elektrodě o velké ploše, která je zpravidla elektrodou výboje nebo stěnou vodivé nádoby, ve které je výboj generován. Elektroda malých rozměrů, zpravidla válcová, je nazývána sondou Langmuirovou. Získaná volt – ampérová, respektive sondová charakteristika je potom dle vhodné teorie a metodiky zpracována a vyhodnocena. Zpracováním a vyhodnocením jsou získány základní parametry plazmatu, jako jsou například: teploty nabitých částic elektronů a iontů, respektive jejich energie, koncentrace těchto částic, rozložení potenciálu ve výboji a rozdělovací funkce elektronů podle energie [2].

Pro správnou funkci Langmuirovy sondy je nezbytná čistota jejího aktivního povrchu, který je v přímém styku s plazmatem. Pokud tomu tak není, mohou být sondová měření zatížena značnými chybami nebo mohou být měření zcela znemožněna.

Při procesech ve výboji se na povrchu sondy vytvářejí vrstvy, které mění charakteristiku sondy a znehodnocují tak měření. Tyto znečišťující vrstvy mohou vznikat jako vlastní proces vytváření vrstev v chemicky aktivním plazmatu. Například, pokud je sonda pokrývána vodivou vrstvou, narůstá její povrch. Tak může být při vyhodnocení chybně určena koncentrace nabitých částic. Pokud je sonda pokrývána

vrstvou s malou vodivostí, projeví se to pomalejším nárůstem sondového proudu v závislosti na napětí a tak může být chybně určena teplota elektronů. Pokud je vrstva vznikající na sondě tvořena izolantem, je měření prakticky znemožněno.

Tedy, nezbytnou podmínkou pro dosažení správných výsledků měření parametrů plazmatu Langmuirovou sondou je udržování čistého a deponovanými vrstvami neovlivněného aktivního povrchu sondy. Povrch sondy je proto nutno před zahájením měření čistit [2].

Proces čištění Langmuirovy sondy je možno provádět pomocí dopadu akcelerovaných kladných iontů na povrch sondy. Tento dopad akcelerovaných kladných iontů na povrch sondy je způsoben pomocí napětí záporné polaroty přivedeného na sondu. Dopadem kladných iontů ionizovaného plynu na povrch sondy dochází k narušení znečištění povrchu sondy a následnému odletu atomů nečistot z povrchu sondy. Tato metoda se nazývá dle anglického originálu „ion bombardment“.

Další metodou čištění povrchu sondy je její ohřev. Některé druhy vrstev vytvořené na sondě lze odstranit například ohřátím sondy na vysokou teplotu. Toho je též možné dosáhnout bombardováním sondy elektrony, které jsou značně lehčí než ionty. Principem čištění Langmuirovy sondy pomocí dopadu akcelerovaných záporných elektronů je připojení kladného napětí na sondu vzhledem k potenciálu plazmatu a následný ohřev sondy způsobený dopadem akcelerovaných elektronů. Jiným způsobem ohřevu je přímé žhavení proudem procházejícím sondou ve tvaru smyčky.

Samotný proces čištění sondy je též zdrojem dalších komplikací. Časté a intenzivní čištění sondy pomocí bombardování sondy ionty, její ohřev, či žhavení, způsobuje odprašování vlastního povrchu. Dochází tak k opotřebování povrchu sondy a k dalším nedefinovatelným změnám jejího povrchu. Výsledky měření mohou být touto skutečností ovlivněny, proto je nutné sondu po určité době vyjmout z aparatury, zkontrolovat stav jejího povrchu, přeměřit její rozměry a případně ji vyměnit [2].

Úkolem této bakalářské práce je zkonstruovat a realizovat zdroj napětí, který bude vhodný pro zmiňovaný proces čištění diagnostické Langmuirovy sondy. Tento zdroj musí splňovat specifika, která jsou dána jeho ne zcela běžným použitím a musí též splňovat požadavky na bezpečnost obsluhy z hlediska úrazu elektrickým proudem.



## 2. Cíle práce

Hlavním cílem této bakalářské práce je zkonstruovat a realizovat zdroj nižšího nebo vyššího napětí pro čištění Langmuirovy diagnostické sondy. Vyvinutý zdroj má sloužit pro čištění povrchu Langmuirovy sondy v různých podmínkách, mikrovlnného výboje v plazmatu generovaného povrchovou vlnou a vysokofrekvenčního výboje v reaktoru magnetronového typu. Čištění diagnostické sondy je požadováno jak v čistém laboratorním plazmatu, tak též v podmínkách depozice různých vrstev.

Jednotlivé etapy postupu řešení vedoucí ke splnění cílů práce jsou:

**1. Zvolit vhodný zdroj pro čištění sondy** – dle zadaných parametrů a požadavků vytipovat vhodný typ zdroje napětí s omezením proudu.

**2. Navrhnout a vypracovat projekt daného zdroje** – navrhnout jednotlivé obvody, desku tištěných spojů a další části zdroje a vybrat odpovídající komponenty pro konstrukci.

**3. Sestavit, oživit zdroj a ověřit jeho parametry** – zhotovit desku plošných spojů, následně osadit vhodnými součástkami a oživit celé zapojení.

**4. Aplikace** – využít zdroj v konkrétním měřícím systému s Langmuirovou sondou pro její čištění při sondové diagnostice plazmatu.

### 3. Výběr vhodného principu funkce zdroje pro čištění sondy

Před návrhem a konstrukcí speciálního zdroje byla provedena analýza požadavků kladených na tento zdroj.

Zdroj čistícího napětí, provedený jako kompaktní celek s vlastním napájením, pojistkou proti přetížení, případně možností trvalého zkratu. Dále s možností zobrazení hodnot odebíraného proudu a velikosti výstupního napětí. Dalšími požadavky z hlediska bezpečnosti jsou: Galvanické oddělení od energetické napájecí sítě, skříňka s dvojitou izolací a bezpečnostními svorkami.

Základními součástmi systému čistícího zdroje byly stanoveny:

- Vlastní čistící zdroj nižšího nebo vyššího napětí.
- Napájecí zdroj pro použité panelové měřidlo.
- Panelové měřidlo pro monitorování odebíraného čistícího proudu, případně velikosti výstupního napětí.

#### **Zdroj nižšího nebo vyššího napětí pro čištění sondy**

Při volbě vhodného zdroje se vycházelo ze zadaných požadavků na hodnoty napětí a proudu. Maximální požadovaný výstupní proud zdroje pro čištění Langmuirovy sondy je stanoven na 2 mA. Velikost maximálního výstupního proudu byla stanovena jednak z požadavku na čištění – proud zdroje nesmí narůst do desítek nebo stovek mA, protože by mohlo dojít ke zničení čištěné sondy, dále pak z požadavku na bezpečnou hodnotu proudu při možném kontaktu s obsluhou, což je dalším omezujícím činitelem.

Výstupní stejnosměrné napětí je možno volit ve dvou rozsazích a to 100 V a 300 V. Zdroj musí být z důvodu možnosti vzniku zemních smyček, které by mohly jednak ovlivňovat vlastní měření a jednak způsobit poškození měřicí sondové aparatury, galvanicky oddělen od sítě.

Pro splnění těchto požadavků bylo zvoleno kombinované řešení. Toto řešení vychází z komerčního síťového transformátoru malého výkonu 3 VA, který zabezpečuje galvanické oddělení od sítě. Síťový transformátor je testován výrobcem na průrazné napětí 4 kV. Vzhledem k relativně malému přenášenému výkonu má transformátor velký vnitřní odpor a jeho výstupní napětí značně kolísá s velikostí odebíraného proudu. Toto je výhodné pro omezení odebíraného proudu při čištění sondy. Transformátor je též odolný proti trvalému zkratu. Zvolený transformátor má dvojí sekundární vinutí, což

umožňuje jednoduchou volbu dvou výstupních napětí. Pro dosažení vyšších hodnot výstupního napětí zdroje pro čištění sondy bylo výstupní napětí transformátoru násobeno pomocí zvoleného kaskádního násobiče napětí. Tento násobič opět zabezpečuje omezení výstupního proudu a umožňuje teoreticky trvale zkrat na výstupu, aniž by byl zdroj poškozen.

### **Zdroj napětí pro panelové měřidlo měřícího obvodu**

Při volbě tohoto zdroje byly rozhodující požadavky výrobce digitálního panelového měřidla PM - 428. Požadované napájecí napětí pro panelové měřidlo je  $(8 \div 12)$  V při odběru 1 mA. Jako napájecí zdroj bylo zvoleno stabilizované stejnosměrné napájecí napětí 9 V. Napájení tohoto modulu bylo řešeno samostatným zdrojem, který se skládal z transformátoru 230/9 V, usměrňovače a stabilizátoru.

## **3.1 Napájecí zdroje**

**Definice napájecího zdroje:** Napájecím zdrojem rozumíme zařízení, které je schopné dodat elektrickému zařízení napětí či proud potřebný k jeho činnosti [3].

V současné době nás obklopuje mnoho elektrických a elektronických zařízení, která potřebují ke své činnosti a funkci elektrický napájecí zdroj. Úkolem každého zdroje napájení je dodat elektrickému zařízení požadované hodnoty napájecího napětí a proudu. Tento požadavek souvisí s potřebou stanovit hodnoty použitých komponentů a parametry obvodů ve zdroji dle požadovaných hodnot výstupních veličin.

### **Rozdělení napájecích zdrojů:**

- 1) Podle typu dodávaného výkonu,
  - zdroje stejnosměrného napětí a proudu,
  - zdroje střídavého napětí a proudu,
- 2) Podle základního fyzikálního principu a činnosti,
  - elektrochemické (primární a sekundární články),
  - elektromechanické (generátory, dynamo, alternátory),
  - zdroje využívající elektrickou rozvodnou síť (elektronické),

3) Podle povahy vnitřních dějů,

- zdroje neregulované,
- zdroje regulované (se spojitou či nespojitou regulací)

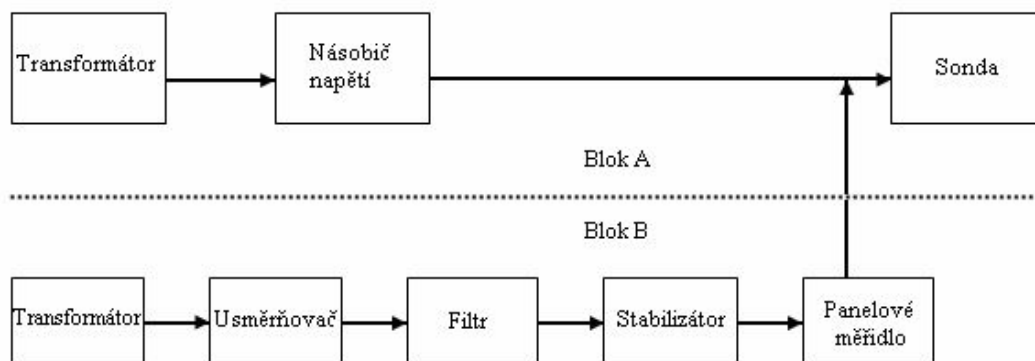
Tyto typy patří k nejrozšířenějším zdrojům v mnoha oblastech elektroniky. Toto rozdělení není konečné, některé typy napájecích zdrojů mohou být kombinované a využívat tak více principů současně [3].

#### 4. Návrh a projekt zdroje pro čištění Langmuirovy sondy

Po vytipování vhodného typu zdroje pro proces čištění Langmuirovy sondy je nutno před samotnou realizací zdroje nejdříve navrhnout jednotlivé obvody zdroje a zvolit vhodné součástky. V této kapitole je podrobněji popsána teorie a návrh celkové koncepce zdroje a jednotlivých částí zdroje.

##### 4.1 Celková koncepce zdroje pro čištění Langmuirovy sondy

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole 3, můžeme zdroj rozdělit do dvou částí, bloků viz obr. č. 1. První blok A tvoří nejdůležitější část celé aparatury. Je to část zdroje stejnosměrného napětí pro čištění Langmuirovy sondy. Druhý blok B tvoří zdroj stejnosměrného napětí pro panelové měřidlo, které slouží k měření výstupního napětí a výstupního proudu. Na základě těchto hodnot lze soudit, zda probíhá čistící proces nebo lze odhadnout míru znečištění sondy.



Obr. č. 1. Blokové schéma zdroje pro čištění Langmuirovy sondy.

## **Blok A**

Blok A se skládá z transformátoru, který galvanicky odděluje obvod od sítě a převede vstupní (síťové) napětí na nižší hodnotu. Zde bylo použito transformátoru s dvěma sekundárními vinutími, pro jednoduchou volbu dvou výstupních napětí. Za transformátorem následuje kaskádní násobič napětí, který zvyšuje hodnotu výstupního napětí a snižuje hodnotu výstupního proudu. Napětí v každé větvi sekundárního vinutí transformátoru je násobeno zvlášť a v případě potřeby vyššího výstupního napětí jsou tyto jednotlivé větve spojeny do série, což umožňuje jednoduchou volbu dvou výstupních napětí. Na toto výstupní napětí je potom připojena sonda, kde probíhá vlastní proces čištění.

## **Blok B**

Blok B je sestaven jako stabilizovaný zdroj stejnosměrného napětí dle požadavků napájení číslicového měřidla pro měření proudu a napětí. Tento blok se skládá ze síťového transformátoru, který galvanicky odděluje měřící obvod od sítě a transformuje vstupní (síťové) napětí na přibližnou (požadovanou) hodnotu napájecího napětí. Transformované napětí se dále pomocí usměrňovače usměrní na napětí stejnosměrné, kondenzátorem vyhladí zvlnění a pomocí stabilizátoru napětí stabilizuje na požadovanou hodnotu napětí pro napájení číslicového měřidla.

## **4.2 Zdroj nižšího nebo vyššího napětí pro čištění sondy**

V této kapitole jsou podrobněji popsány jednotlivé části obvodu zdroje nižšího nebo vyššího napětí pro čištění sondy, kterými jsou síťový transformátor a kaskádní násobič napětí. Na základě popsané teorie a principu jednotlivých částí zdroje byl vybrán vhodný transformátor a navržen násobič napětí s odpovídajícími součástkami. Nakonec je zde zobrazeno schéma zapojení zdroje nižšího nebo vyššího napětí pro čištění sondy, kde je znázorněno celkové zapojení těchto komponentů.

### 4.2.1 Síťový transformátor

Prvním stavebním blokem elektronických napájecích zdrojů je síťový napájecí transformátor. Problematika transformátoru včetně návrhu, výroby a provozu transformátoru je značně složitá a rozsáhlá, proto bude v této kapitole popsána jen základní vlastnost a činnost tohoto síťového transformátoru [3].

**Definice transformátoru:** Transformátor je netočivý elektrický stroj, jehož úkolem je přeměnit (transformovat) vstupní střídavé (zpravidla harmonické) napětí a proudy na střídavé (harmonické) napětí a proudy při nezměněném kmitočtu obvykle 50 Hz [3].

#### Princip činnosti klasického transformátoru

Princip činnosti transformátoru je založen na principu zákona elektromagnetické indukce. Zákon elektromagnetické indukce vyjadřuje (vedle silových účinků) další fyzikální projev magnetického pole. Objevil jej M. Faraday v r. 1831 na základě svých experimentů, které ukázaly, že v uzavřeném elektrickém obvodu vzniká proud, jestliže v jeho okolí dochází k jakýmkoliv změnám magnetického pole [18]. Jestliže je vodivý obvod například rovinný závit v časově proměnném magnetickém poli, pak v obvodu vzniká elektrické pole a na koncích obvodu je elektromotorické napětí. Elektromotorické napětí je reakce na časovou změnu toku indukce magnetického pole obepnutého vodičem. Každá reakce klade odpor akci, která ji způsobila. To znamená že  $u_i$  působí tak, aby jím vyvolaný proud vytvořil takovou časovou změnu vlastního toku indukce, která alespoň částečně eliminuje změnu původního toku dle rovnice (1) [15].

$$u_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

kde  $u_i$  = změna magnetického toku  $d\Phi$  za čas  $dt$

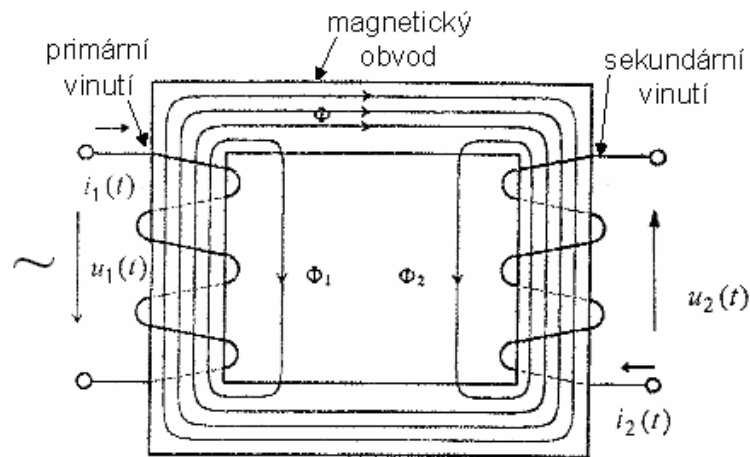
U síťového transformátoru je tomu následovně. Do sebe uzavřený vodič se sice nepohybuje, ale mění se hodnota magnetického toku  $\Phi$ , jak je tomu třeba například v sekundárním vinutí transformátoru. Střídavý proud v primární cívce vytváří magnetické pole, které je v důsledku velké magnetické permeability železa prakticky

soustředěno v železném jádře. Střídavý indukční tok  $\Phi$  v sekundární cívkce indukuje elektromotorické napětí. Tvar sekundární cívkky nerozhoduje, podstatné je, že závitky cívkky obepínají tok magnetické indukce  $\Phi$ . V důsledku časové změny toku indukce  $\Phi$  ve vodiči sekundární cívkky vzniká intenzita elektrického pole a její dráhový integrál podél vodiče udává hodnotu elektromotorického napětí [15].

Protéká-li cívkou elektrický proud  $i$ , vytváří se vlastní indukční tok  $\Phi$  cívkky, který je úměrný proudu  $i$ . Z toho vyplývá úměrnost  $\Phi = L \cdot i$ , kde  $L$  je konstanta zvaná indukčnost cívkky. Při měnícím se proudu  $i$  se indukuje na cívkce elektromotorické napětí, které je v souladu s Faradayovým indukčním zákonem viz rovnice (2) [15].

$$u_i = -L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2)$$

Princip činnosti transformátoru je naznačen na obr. č. 2., který je převzatý a upravený z [17].



Obr. č. 2. Síťový transformátor.

### Konstrukce síťového transformátoru

Síťový transformátor pracuje v Evropě s kmitočtem sítě 50 Hz. Konstrukčně se standardně skládá ze dvou vinutí, primárního a sekundárního, které jsou navinuty jako cívkka na magnetický obvod (jádro). Pro vinutí se používá měděný drát určitých rozměrů a vlastností. Pro magnetický obvod (vzájemně izolované plechy ze slitin železa) se používá materiál s vysokým obsahem křemíku (křemíkové plechy). Pro ideální

transformátor platí, že při chodu transformátoru naprázdno se velikosti napětí transformují v poměru počtu závitů. Proudů se naopak při chodu transformátoru nakrátko transformují v opačném poměru počtu závitů [18] (3).

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3)$$

Síťový transformátor má v praxi obvykle dvě hlavní funkce:

- Přizpůsobit napětí rozvodné sítě z efektivní hodnoty 230 V na požadovanou, pro správnou činnost následného obvodu.
- Druhou funkcí je galvanicky oddělit další obvody napájecího zdroje od sítě vzhledem k bezpečnosti při provozu.

Ze vstupní strany, primárního vinutí, je síťový transformátor zapojen do síťového rozvodu, na straně výstupní, sekundární, je pak zatížen nejčastěji nějakou zátěží, spotřebičem či obvodem. Konstrukční uspořádání obou vinutí může být v praxi různé, například cívky mohou být vinuty jedna přes druhou. Počet výstupních vinutí může být také různý podle požadavků [4].

#### 4.2.2 Výběr síťového transformátoru

Při volbě vhodného síťového transformátoru bylo rozhodnuto dle zadaných požadavků na hodnoty napětí a proudu, kterými jsou maximální požadovaný výstupní proud zdroje stanovený na maximální velikost 2 mA a výstupní stejnosměrné napětí s možností volby dvou hodnot v rozsazích 100 V a 300 V.

Úkolem transformátoru je galvanicky oddělit obvod od síťového napětí a transformovat toto napětí na bezpečnou hodnotu. Jako bezpečná hodnota napětí transformátoru byla zvolena hodnota napětí 18 V (u transformátoru naprázdno nebo při malých odběrech proudu je tato hodnota napětí vyšší). Podle normy ČSN 33 200-4-41 (ochrana před úrazem elektrickým proudem) je tato hodnota bezpečného střídavého napětí stanovena maximálně do 50 V v normálních prostorech [14]. Z důvodu jednoduché volby dvou výstupních napětí byl vybrán transformátor s dvěma sekundárními vinutími. Výkonnostní požadavky na síťový transformátor nebyly nikterak náročné, protože při odběru proudu zátěží o maximální velikost 2 mA při napětí 300 V činí tento maximální příkon zátěže 0,6 W. Z těchto důvodů byl vybrán



komerční síťový transformátor 2x18 V, který byl výrobcem testován na průrazné napětí 4 kV s celkovou nominální hodnotou výkonu 3 VA, kdy každá větev sekundárního vinutí má nominální hodnotu výkonu 1,5 VA.

### 4.2.3 Násobiče napětí

Násobiče napětí se zpravidla používají tam, kde potřebujeme vyšší hodnotu napětí, než je schopen dát například síťový transformátor a nepotřebujeme vysoké hodnoty proudu. Pro velmi malé proudy a vysoké hodnoty napětí se nevyplatí konstruovat síťové transformátory s vysokým sekundárním napětím. Řešením je užití násobiče napětí, kterým lze násobit napětí teoreticky nekonečně mnohokrát, prakticky přibližně 10 krát.

Násobiče napětí lze realizovat opakováním jednotlivých usměrňovačů tak, aby z hlediska střídavého napájení byly všechny jejich stupně spojeny paralelně a z hlediska jejich výstupních stejnosměrných napětí byly jejich výstupy v sérii [5].

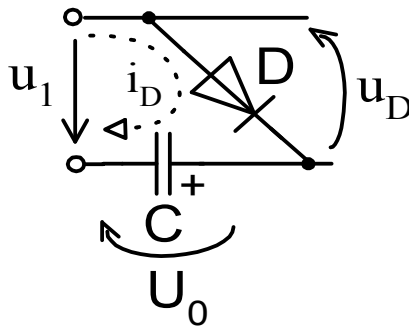
#### Jednostupňový násobič napětí

Obvodově se jakýkoliv násobič skládá z řady jednocestných usměrňovačů, kde základem je jeden stupeň násobiče viz obr. č. 3., převzatý z [4].

Kondenzátor C se nabije (při nulovém proudu zátěže) na maximální hodnotu napětí sekundárního vinutí transformátoru (vstupního napětí usměrňovače), která má velikost :

$$U_0 = \sqrt{2} \cdot U_{vst} = \sqrt{2} \cdot U_{sek} \quad (4)$$

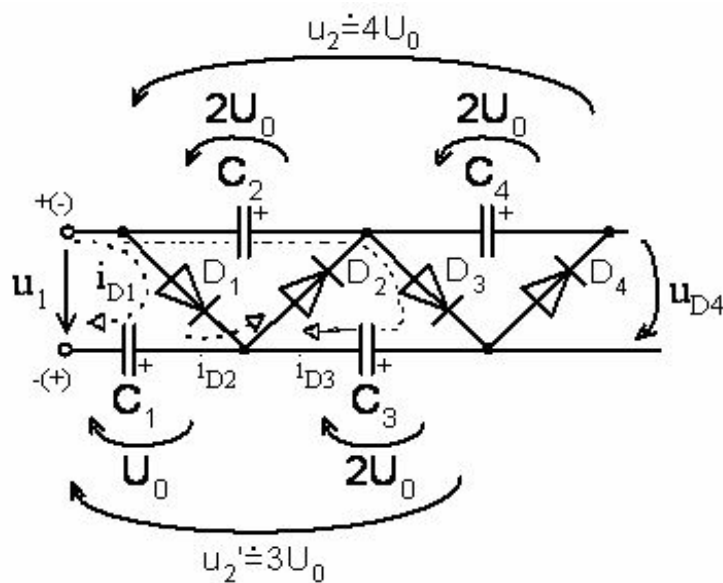
Na toto napětí se kondenzátor nabije během kladné půlperrody sekundárního napětí transformátoru, tedy v čase, kdy je na horní vstupní svorce kladné napětí oproti spodní vstupní svorce. V dalším časovém okamžiku, kdy horní svorka je záporná vzhledem ke svorce spodní, je dioda D v závěrném stavu, neprotéká přes ní proud. Je-li paralelně k této diodě připojen další jednocestný usměrňovač, je získán dvoustupňový násobič napětí, též zdvojovač napětí či Delonův násobič [5].



Obr. č. 3. Jednostupňový násobič napětí.

### Kaskádní násobič napětí

Kaskádní násobiče se používají při větším požadovaném napětí, kde potřebujeme velké napětí a malý proud (osciloscropy, televize). Po přivedení střídavého napětí se diody střídavě otevírají a zavírají a v průběhu několika period vstupního napětí se na kondenzátorech vytvoří vyznačené hodnoty napětí dle obr. č. 4., který je převzatý a upravený z [3].



Obr. č. 4. Kaskádní násobič napětí.

Na tomto obrázku můžeme demonstrovat funkci kaskádního násobiče napětí. Přivedeme-li na horní svorku vstupního napětí  $U_1 +$  a na dolní svorku  $-$ , protéká násobičem proud  $i_{D1}$  přes diodu  $D_1$ , nabíjí kondenzátor  $C_1$  na hodnotu  $U_0$  a vrací se na spodní svorku  $U_1$ . Při opačné polaritě  $U_1$  prochází násobičem proud  $i_{D2}$ , který protéká

přes kondenzátor  $C_1$ , diodou  $D_2$ , nabíjí kondenzátor  $C_2$  na hodnotu  $2U_0$  vyznačené polaritu. Jde v podstatě o dva sériově zapojené zdroje, proto se napětí sčítají. Při další půlperiodě se pomocí proudu  $i_{D1}$  protékajícího přes diodu  $D_1$  nabíjí opět kondenzátor  $C_1$  a pomocí proudu  $i_{D3}$ , který prochází přes kondenzátor  $C_2$  a diodu  $D_3$ , se nabíjí kondenzátor  $C_3$  na hodnotu  $2U_0$ . Jde o tři sériově zapojené zdroje, z nichž jeden má opačnou polaritu, proto se z  $3U_0$  odečítá  $U_0$  a z toho plyne, že se kondenzátor  $C_3$  nabíjí na hodnotu  $2U_0$ . Obecně platí, že se všechny kondenzátory nabíjí na napětí  $2U_0$  kromě kondenzátoru  $C_1$ . Tímto způsobem se nabije celý násobič během několika period [6].

#### 4.2.4 Návrh násobiče napětí

Jak již bylo zmíněno v předchozí části, násobiče napětí se používají tam, kde je potřeba vysokých hodnot napětí a není potřeba vyšších hodnot proudu. V našem případě je podmínkou malá hodnota výstupního proudu stanovena maximálně na 2 mA vzhledem k bezpečnosti při práci s tímto zdrojem a požadavkům pro čištění sondy. Zadány byly také výstupní hodnoty stejnosměrného napětí ve dvou rozsazích a to 100 V a 300 V. Podle normy ČSN 33 200-4-41 (ochrana před úrazem elektrickým proudem) je tato hodnota bezpečného stejnosměrného napětí stanovena maximálně do 100 V v normálních prostorech. Požadované výstupní napětí navrženého zdroje tuto hodnotu bezpečného napětí překračuje, proto je nutno dle již zmiňované normy ČSN 33 200-4-41 splnit podmínku, aby velikost maximálního výstupního proudu nepřesáhla hodnotu 3 mA bezpečného proudu u stejnosměrného proudu [14]. Tato podmínka je splněna, protože u navrženého zdroje je tato hodnota maximálního výstupního proudu nastavena na 2 mA.

Požadovaného výstupního napětí s jednoduchou volbou dvou napětí bylo dosaženo pomocí síťového transformátoru s dvěma sekundárními vinutími, přičemž se každá větev sekundárního vinutí násobila zvlášť a v případě potřeby vyššího výstupního napětí se tyto větve násobeného napětí spojily do série. Na obou větvích síťového transformátoru při chodu naprázdno byla naměřena výstupní hodnota napětí okolo 40 V. Spodní větev je násobena 3 krát na napětí 125 V, odtud je odebíráno napětí 125 V. Horní větev je násobena 4 krát na napětí 165 V. Tudiž při sériovém zapojení obou

násobených větví sekundárního vinutí se tyto dvě napětí sečtou a výstupní napětí je 290 V. Velikost výstupního napětí byla volena pomocí páčkového přepínače.

Pro dosažení určitého proudu musíme správně zvolit hodnoty kapacity kondenzátorů, které fungují jako zásobníky elektrické energie. Z toho vyplývá, čím vyšší hodnota kapacity kondenzátorů, tím vyšší hodnoty výstupního proudu. Pro výpočet kapacity kondenzátorů bylo využito následujícího vzorce (5) dle [5],

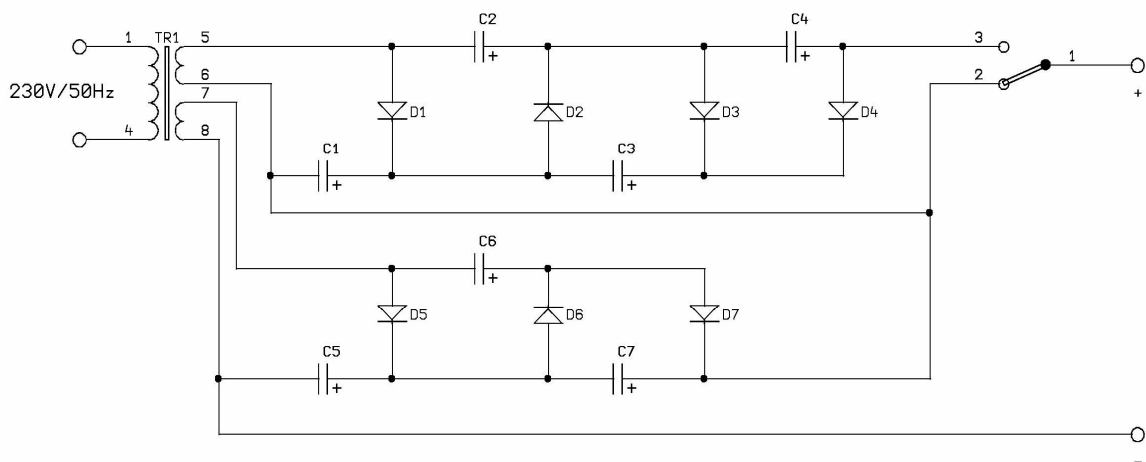
$$C \geq \frac{2 \cdot n \cdot (n + 2) \cdot I}{U_0 \cdot f} \cdot 10^6 \quad [\mu F; A, V, Hz] \quad (5)$$

Zde  $n$  představuje počet stupňů násobiče,  $I$  je střední hodnota proudu do zátěže,  $U_0$  je střední hodnota napětí základního stupně,  $f$  kmitočet vstupního napětí (sítě). Prostřednictvím tohoto vzorce byla vypočtena přibližná hodnota kapacity, při samotné realizaci bylo však nutno postupovat experimentálně.

Obecně platí, že se všechny kondenzátory nabíjí na napětí  $2 \cdot U_0$  kromě prvního. Proto se kondenzátory dimenzují na  $2 \cdot U_0$ . Tudiž jsou diody dimenzovány na závěrné napětí  $2 \cdot U_0$ .

Jako vhodné součástky násobiče napětí byly zvoleny tyto: Elektrolytické kondenzátory  $C_1$  až  $C_7$  22  $\mu F$  dimenzované na napětí 100 V, usměrňovací diody  $D_1$  až  $D_7$  1N4007, které jsou dostatečně dimenzované jak proudově tak napěťově. Procházející maximální proud těmito diodami může být až 1 A a závěrné napětí může být až řádově stovky voltů.

#### 4.2.5 Schémata zapojení zdroje napětí pro čištění sondy



Obr. č. 5. Schéma zapojení zdroje napětí pro čištění sondy

## 4.3 Zdroj napětí pro měřící obvod

V této kapitole jsou podrobněji popsány jednotlivé části obvodu zdroje napětí pro napájení digitálního panelového měřidla, kterými jsou síťový transformátor, usměrňovač a stabilizátor napětí. Na základě popsané teorie a principu jednotlivých částí zdroje je vybrán vhodný síťový transformátor a navrženo usměrnění a stabilizace napětí pro měřící obvod. Nakonec je zde zobrazeno schéma zdroje napětí pro měřící obvod, kde je znázorněno celkové zapojení těchto komponentů.

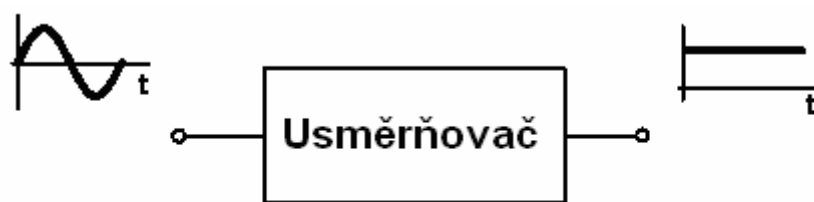
### 4.3.1 Výběr síťového transformátoru

Při výběru vhodného síťového transformátoru bylo rozhodnuto dle zadaného požadavku na hodnotu napětí a proudu. Požadavkem na síťový transformátor bylo transformovat síťové napětí na přibližnou hodnotu 9 V při odběru proudu zhruba 3 mA. Spotřeba panelového měřidla, usměrňovače a stabilizátoru napětí je zhruba 3 mA, což je téměř zanedbatelné z hlediska spotřeby dostupných výkonů komerčních transformátorů. V potaz se musel brát pouze úbytek napětí na Grätzovo můstku a stabilizátoru napětí. Při malém zatížení transformátoru je většinou na jeho výstupu vyšší hodnota napětí, než je udávaná. Z tohoto důvodu byl vybrán síťový transformátor 230/9 V s nominální hodnotou výkonu 3 VA.

### 4.3.2 Usměrňovače

Druhým typickým blokem napájecích zdrojů jsou usměrňovače, jež jsou zapojeny za síťovým transformátorem. Usměrňovač je elektrické zařízení, které se používá k přeměně střídavého elektrického napětí a proudu (dále psáno jen proud) na proud stejnosměrný. Protože elektronické obvody ke své činnosti obvykle potřebují stejnosměrný proud a k distribuci elektrické energie se využívá proud střídavý, bývá usměrňovač součástí většiny elektrických přístrojů napájených z elektrické sítě [19].

**Definice usměrňovače:** Usměrňovačem rozumíme obvod, jehož úkolem je usměrnit signál (napětí a proud), nejčastěji harmonický, tedy přeměnit jej na signál stejnosměrný [3].

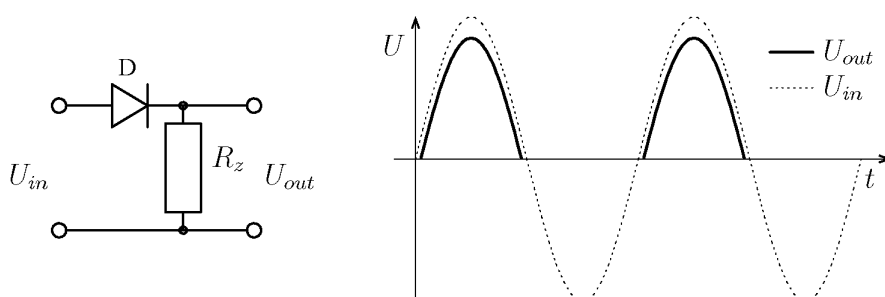


Obr. č. 6. Ideální usměrňovač.

Na obr. č. 6., který je převzatý a upravený z [3] je vidět napěťový přenos ideálního usměrňovače. Tuto přeměnu může způsobit pouze nelineární nebo parametrický prvek jako je dioda, tyristor, tranzistor. Naznačená změna časového průběhu a tím současně spektrálního složení napětí či proudu je v usměrňovačích dosahována nejčastěji polovodičovými diodami nebo tyristory. Z hlediska časových průběhů se tyto prvky chovají jako ventily, tedy propouštějí proud jen jedním směrem. Většinou je součástí usměrňovače ještě nějaký kmitočtový filtr typu dolní propust, kterým jsou potlačeny vyšší harmonické složky spektra, které vznikají působením polovodičových ventilů [3].

### Jednocestný usměrňovač

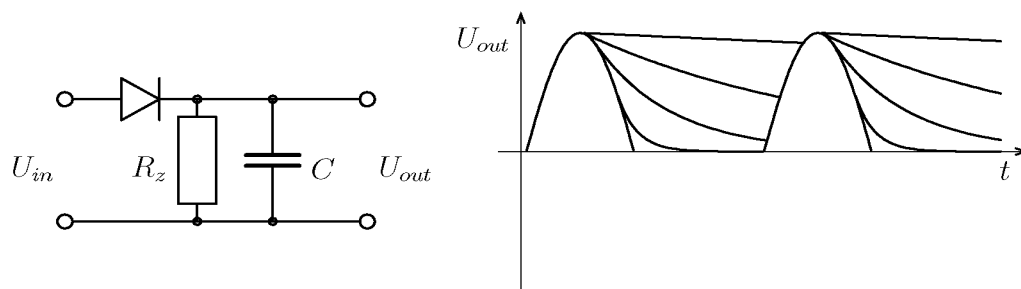
Nejjednodušší usměrňovač z hlediska zapojení je usměrňovač jednocestný (jednofázový) s odporovou zátěží. Obsahuje jen jeden usměrňovací prvek, zpravidla diodu, zátěží je rezistor viz obr. č. 7., který je převzatý a upravený z [8].



Obr. č. 7. Jednocestný usměrňovač a průběh napětí.

Jak lze zjistit z průběhu napětí na obrázku, pracuje tento usměrňovač jako omezovač jedné polaroty. Usměrňovací dioda propouští tehdy, je-li na svorce transformátoru, kde je dioda zapojena, kladná půlvlna střídavého napětí. Je-li na této

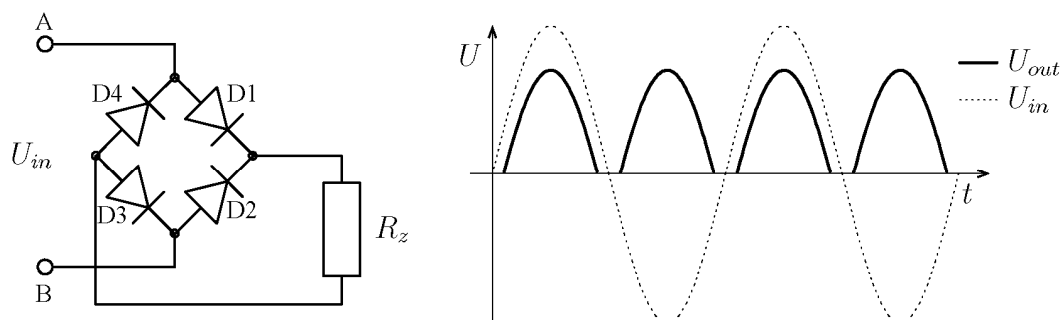
svorce záporná půlplna, je dioda polarizována v závěrném směru a nepropouští. Napětí na zátěži je tedy pouze v době kladných půlpln, zatímco v době záporných půlpln není na zátěži žádné napětí. Připojíme-li paralelně k zátěži kondenzátor viz obr. č. 8., převzatý z [8], nabíjí se při kladné půlplně usměrněným proudem a při záporné půlplně, kdy dioda nepropouští, se vybíjí přes zátěž. Na zátěži tedy vzniká kolísající napětí, je to v podstatě stejnosměrné napětí zvlněné střídavou složkou. Výhodou takového usměrňovače je jednoduché zapojení obvodu a možnost napájení přímo ze sítě (bez transformátoru). Nevýhodou je značně zvlněný usměrněný proud zátěže, stejnosměrný proud procházející sekundárním vinutím transformátoru, který přesycuje jádro, zvětšuje magnetizační proud, tím zvětšuje ztráty v železe a způsobuje zahřívání transformátoru. Další nevýhodou je zkreslení průběhu sekundárního napětí. Nejčastěji se tento usměrňovač využívá u zařízení přímo napájených ze sítě [7].



Obr. č. 8. Výstupní napětí jednocestného usměrňovače při různých hodnotách  $R_zC$ .

### Dvojcestný usměrňovač v můstkovém (Grätzovo) zapojení

Polarizováním diod v můstku dochází u tohoto usměrňovače k střídavému omezování polarity vždy dvěma sériově zapojenými diodami. Je-li na svorce A sekundárního vinutí transformátoru kladná půlplna, projde proud diodou D1, zátěží  $R_z$  a diodou D3 k svorce B transformátoru. Je-li na svorce B kladná půlplna, je svorka A záporná a proud projde diodou D2, zátěží  $R_z$  diodou D4 k svorce A transformátoru. Výhodou těchto usměrňovačů je použití jednoduchého transformátoru a nižší napěťové namáhání diod oproti dvojcestnému usměrňovači. Nevýhodou je menší účinnost než u dvojcestného usměrňovače a potřeba čtyř diod [7]. Princip dvojcestného usměrňovače lze odvodit z obr. č. 9., převzatý z [8].



Obr. č. 9. Můstkové zapojení dvojcestného usměrňovače a průběh napětí.

### 4.3.3 Návrh usměrňovače

Požadavkem na tento usměrňovač bylo stabilizovat napětí na přibližnou hodnotu 9 V při odběru proudu zhruba 3 mA. Jako nejlepší a nejjednodušší řešení byl vybrán můstkový usměrňovač (Grätzův můstek) B250D, dimenzovaný na napětí 250 V a proud 1 A. K vyhlazení zvlnění usměrňovaného napětí byl za tento usměrňovač ještě paralelně připojen elektrolytický kondenzátor 470  $\mu\text{F}/50\text{ V}$ .

### 4.3.4 Stabilizátor napětí

Dalším stavebním blokem napájecích zdrojů je stabilizátor napětí. Úkolem stabilizátoru napětí je udržovat stálou hodnotu napětí na zátěži, na svém výstupu, tedy zabezpečit, aby se tato hodnota měnila co možná nejméně při změnách některých veličin, například: vstupní napětí, výstupní proud, teplota. Navíc stabilizátory podstatně snižují zvlnění, tedy střídavou složku stejnosměrného napětí (filtrační účinek). Je pochopitelné, že od stabilizátoru současně požadujeme stabilizované napětí a zároveň aby byl schopen do zátěže dodat potřebný výkon (proud) [3].

**Definice stabilizátoru napětí:** Stabilizátorem napětí rozumíme obvod, jehož úkolem je stabilizovat hodnotu napětí na svém výstupu vůči změnám některých veličin (vstupní napětí, proud do zátěže, teplota apod.), výrazně snížit zvlnění stabilizovaného napětí a dodat do zátěže potřebný výkon [3].



Časový průběh ideálního stabilizátoru napětí je znázorněn na obr. č. 10., který je převzatý a upravený z [3]. Jde o znázornění jedné z nejdůležitějších vlastností a tou je odstranění zvlnění vstupního napětí.



Obr.č. 10. Ideální stabilizátor.

Stabilizátory napětí se zapojují mezi napájecí zdroj a zátěž. Obecně se používají dva způsoby stabilizace stejnosměrného výstupního napětí. Ty se liší svými vlastnostmi a především účinností. Kvalitu stabilizátoru hodnotíme dvěma parametry. Jde o činitel stabilizace napětí, v ideálním případě se blíží nekonečnu (6) a vnitřní odpor stabilizátoru (7), který je v ideálním případě co nejmenší. Přesnost stabilizace je definována jako poměr relativní změny vstupního a výstupního napětí [9].

$$S_U = \frac{\Delta u_1 / u_1}{\Delta u_2 / u_2} = \frac{\Delta u_1}{\Delta u_2} \cdot \frac{u_2}{u_1} [-], \quad i_2 = konst. \quad (6)$$

$$R_i = \frac{\Delta U_2}{\Delta I_2} \quad (7)$$

### Způsoby stabilizace

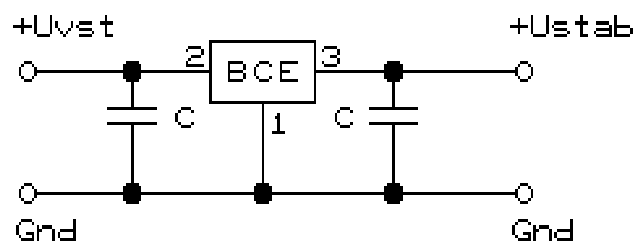
**Pasivní** - využívají ke své stabilizaci nelineární prvek především Zenerovu diodu.

**Aktivní** - využívají ke své stabilizaci zpětnovazební obvody, které dále rozlišujeme na:

- s možností regulace
- bez možnosti regulace

**Bez možnosti regulace** – Jednouúčelové stabilizátory, výstupní napětí je dáno předepsanou hodnotou, která se bez změny zapojení nedá měnit. Jsou schopné pracovat samostatně bez dalších součástek. Jako příklad této skupiny jsou uvedeny stabilizátory napětí řady 78XX viz obr. č. 11. Jedná se o třísvorkové výkonové monolitické

stabilizátory kladných napětí různé velikosti (dáno číslem XX), s výstupní hodnotou proudu maximálně 1 A, vnitřní tepelnou ochranou, vnitřní ochranou proti zkratu na výstupu a vnitřní ochranou proti sekundárnímu průrazu. Nestabilizované vstupní napětí musí být nejméně o 2 až 3 V vyšší než stabilizované výstupní (jmenovité) napětí. Aby nedošlo k nežádoucímu rozkmitání obvodů stabilizátoru napětí, připojují se na vstup a výstup stabilizátoru kondenzátory bezindukčního typu jako jsou například kondenzátory keramické. Jejich kapacita je řádově stovky nanofaradů [6]. Zapojení stabilizátoru napětí 78XX doplněné o dvojici kondenzátorů je znázorněno na obr. č. 11., převzatý z [10].



Obr. č. 11. Zapojení stabilizátoru 78XX.

### 4.3.5 Návrh stabilizátoru napětí

Pro napájení digitálního panelového měřidla pro měření výstupního proudu a napětí bylo požadováno napětí o přibližné velikosti 9 V. Z tohoto důvodu byl vybrán neregulovatelný stabilizátor napětí 7809, který stabilizuje napětí na 9 V. K zamezení rozkmitání obvodů stabilizátoru napětí byly ještě na vstup a výstup stabilizátoru připojeny dva keramické kondenzátory 100 nF.

### 4.3.6 Panelové měřidlo pro měření výstupního proudu a napětí

Jak již bylo zmíněno v obsahu koncepce zdroje, panelové měřidlo slouží pro měření hodnot výstupního napětí a proudu zdroje pro čištění Langmuirovy sondy.

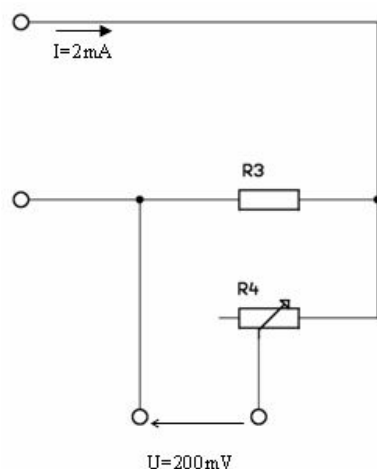
K tomuto účelu bylo zakoupeno digitální panelové měřidlo (Digital Panelmeter PM-428) viz příloha. Panelové měřidlo je napájeno stabilizovaným zdrojem stejnosměrného napětí o velikosti 9 V.

Maximální vstupní stejnosměrné napětí panelového měřidla pro měření napětí nebo proudu je 200 mV. Aby bylo možné měřit hodnoty napětí nebo proudu v požadovaném rozsahu, je nutno na vstup panelového měřidla, respektive na výstup obvodu zdroje nižšího nebo vyššího napětí pro čištění Langmuirovy sondy, sériově zapojit snímací rezistor pro měření výstupního proudu a paralelně zapojit předřadník pro měření výstupního napětí. Volba měření napětí nebo proudu byla provedena pomocí páčkového přepínače.

### 4.3.7 Návrh a výpočet snímacího rezistoru pro měření proudu

Měření výstupního proudu zdroje nižšího nebo vyššího napětí pro čištění Langmuirovy sondy je provedeno pomocí snímacího rezistoru tak, že je na výstup tohoto zdroje sériově zapojen rezistor  $R_3$  a k němu paralelně připojen víceotáčkový trimr  $R_4$ . Na tomto rezistoru a víceotáčkovém trimru je pak měřen úbytek napětí, zobrazeno na obr. č. 12. Dle parametrů maximálního vstupního napětí panelového měřidla musí tento maximální úbytek napětí být roven 200 mV. Pomocí zvoleného snímacího rezistoru je tento úbytek napětí 200 mV roven hodnotě výstupního proudu 2000  $\mu\text{A}$ . Maximální rozsah panelového měřidla pro měření proudu je tedy  $\pm 2000 \mu\text{A}$  s rozlišením 1  $\mu\text{A}$  ( $\pm 1 \mu\text{A}$ ). Hodnotu snímacího rezistoru lze vyjádřit z této rovnice (8).

$$R_{3,4} = \frac{U}{I} \quad R_{3,4} = \frac{0,2}{0,002} \quad R_{3,4} = 100 \Omega \quad (8)$$



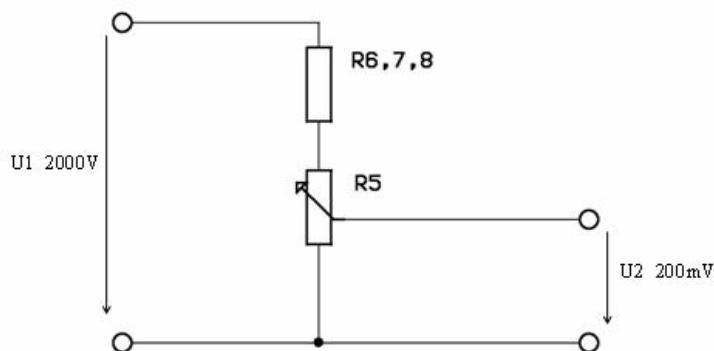
Obr. č.12 Návrh snímacího rezistoru.

Přesné hodnoty odporu snímacího rezistoru je docíleno tím, že je paralelně k rezistoru  $R_3$  připojen víceotáčkový trimr  $R_4$ , pomocí něhož je nastavena přesná hodnota celkového odporu. Pomocí víceotáčkového trimru  $R_4$  je také možno nastavit hodnotu výstupního proudu vůči jinému ampérmetru.

#### 4.3.8 Návrh a výpočet předřadníku pro měření napětí

Měření výstupního napětí zdroje nižšího nebo vyššího napětí pro čištění Langmuirovy sondy je provedeno pomocí předřadníku (předřadných rezistorů a snímacího víceotáčkového trimru) tak, že se na výstup tohoto zdroje paralelně zapojí rezistory  $R_{6,7,8}$  a k těmto rezistorům se sériově připojí víceotáčkový trimr  $R_5$ , na němž je měřen úbytek napětí, zobrazeno na obr. č. 13. Dle parametrů maximálního vstupního napětí panelového měřidla musí tento maximální úbytek napětí být roven 200 mV. Aby platilo, že úbytek napětí 200 mV na víceotáčkovém trimru  $R_5$  byl roven výstupnímu napětí 2000 V, musí být tyto úbytky napětí mezi víceotáčkovým trimrem  $R_5$  a rezistory  $R_{6,7,8}$  v poměru  $1:10^4$ . Pomocí zvoleného předřadníku je tento úbytek napětí 200 mV roven hodnotě výstupního napětí 2000 V. Maximální rozsah digitálního měřidla pro měření napětí je tedy  $\pm 2000$  V s rozlišením 1 V ( $\pm 1$  V). Hodnotu odporu snímacího víceotáčkového trimru lze vyjádřit z této rovnice (9). Velikost odporu předřadného rezistoru je sestavena z rezistorů  $R_{6,7,8}$  je 9,999 M $\Omega$ . Tato hodnota je uvedena v manuálu panelového měřidla viz příloha.

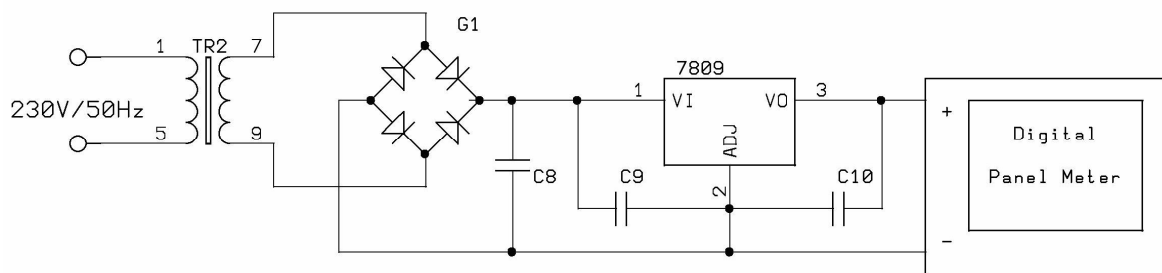
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad R_5 = R_{6,7,8} \cdot \frac{U_2}{U_1} \quad R_5 = 9,999e^6 \cdot \frac{0,2}{2000} \quad R_5 = 1000 \Omega \quad (9)$$



Obr. č. 13. Návrh předřadníku.

Přesný poměr hodnot odporů mezi rezistory  $R_{6,7,8}$  a víceotáčkovým trimrem  $R_5$  je docílen tím, že sériově k rezistorům  $R_{6,7,8}$  je připojen víceotáčkový trimr  $R_5$ . Pomocí víceotáčkového trimru  $R_5$  je také možno nastavit hodnotu výstupního napětí vůči jinému voltmetru.

### 4.3.9 Schéma zapojení zdroje napětí pro měřící obvod



Obr. č. 14. Schéma zapojení zdroje napětí pro měřící obvod.

## 5. Konstrukce zdroje

Dle zadaného úkolu bylo nejprve nakresleno schéma zapojení a poté navrženo schéma tištěného spoje (kliše) vytvořené v programu PCB Design Systém - Formica. K výrobě desky plošného spoje byla použita jednostranná, jednovrstvá deska plošného spoje s fotocitlivou vrstvou. Deska plošného spoje se pomocí ultrafialového záření ozářila přes schéma tištěného spoje vytištěné na průhlednou folii a tím se odstranila zmiňovaná fotocitlivá vrstva. Poté byla deska plošného spoje vložena do nádoby s obsahem chloridu železitého, kde došlo k vyleptání mědi ozářených ploch. Poté byly vyvrtány otvory pro příslušné součástky a komponenty. Nakonec byla na desku plošného spoje nanесena ochranná vrstva (rozpuštěná kalafuna v lihu). Na takto připravenou desku už bylo možno osazovat součástky. Po osazení součástkami byl obvod vložen, zabudován do vhodně zvolené plastové krabičky a připojen na jednotlivé svorky (napájení, vypínače, přepínačů, výstupu, panelového měřidla).

## 5.1 Oživení zdroje

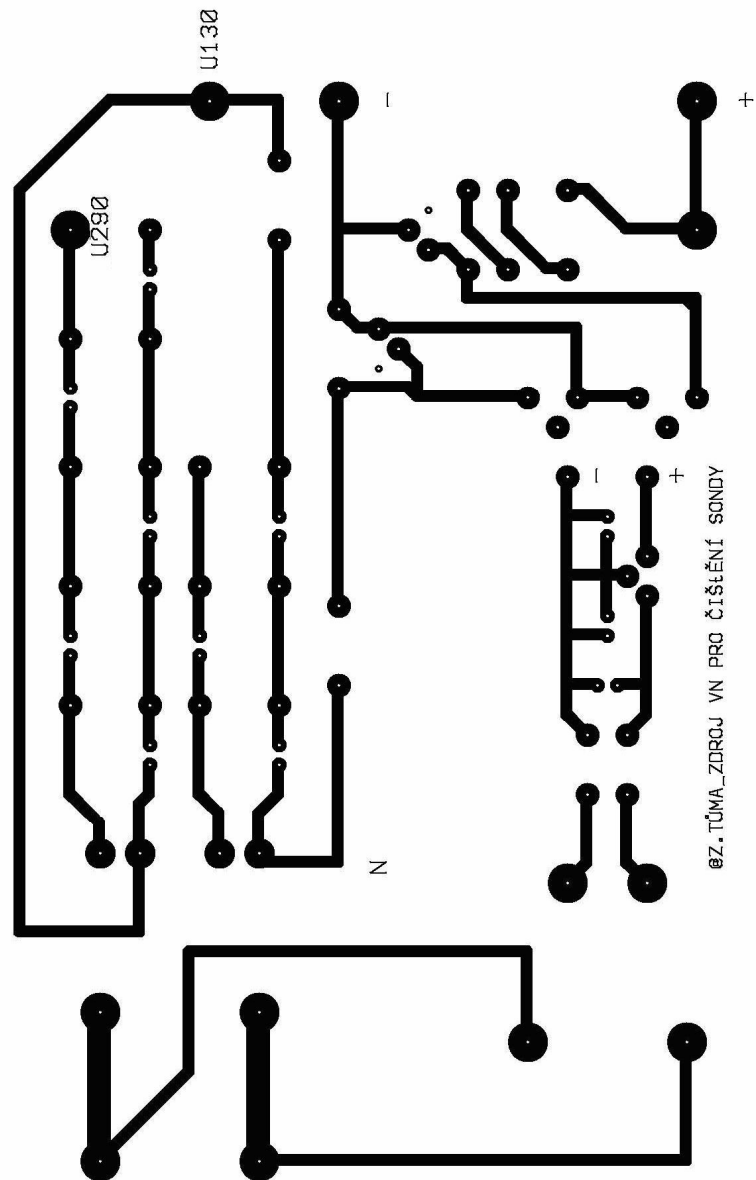
Po kontrole správnosti zapojení jednotlivých částí zdroje byl zdroj připojen do elektrické rozvodné sítě a přeměřeny jeho výstupní hodnoty. Podle polohy přepínače SW1 (volby napětí) byly naměřeny výstupní hodnoty napětí 125 V a 290 V. Tyto hodnoty napětí byly pro daný problém čištění sondy přijatelné, proto se už nemusely dále upravovat. Problém nastal při měření proudu, kde ve skutečnosti byl naměřen maximální výstupní zkratový proud zdroje o málo vyšší než stanovených 2 mA. V potaz bylo nutno brát velikost maximálního odebíraného proudu tohoto zdroje, aby nedošlo například ke spálení sondy nebo k odprášení vlastního materiálu sondy z důvodu vyšší hodnoty odebíraného proudu při čištění povrchu sondy. Také proto, aby se nemusel měnit rozsah měřeného výstupního proudu na panelovém měřidle, který byl nastaven na  $\pm 2000 \mu\text{A}$ . Z tohoto důvodu byl na výstup jednotlivých větví násobiče napětí sériově zapojen rezistor pro snížení maximální hodnoty odebíraného proudu.

Dalším problémem, který se musel řešit, bylo měření správných hodnot napětí a proudu pomocí panelového měřidla. Podle polohy přepínače SW2 je zvoleno, zda se bude měřit napětí nebo proud. Aby tyto měřené výstupní hodnoty napětí a proudu byly správné, byl použit pomocný měřicí obvod pro měření napětí a proudu, kde se odečítaly správné hodnoty a pomocí odporu víceotáčkových trimrů  $R_4$  a  $R_5$  se tyto hodnoty nastavily i na panelovém měřidle.

## 5.2 Seznam součástek:

R1	100 k $\Omega$
R2	60 k $\Omega$
R3	150 $\Omega$
R4 (T93YB) víceotáčkový trimr	1 k $\Omega$
R5 (T93YB) víceotáčkový trimr	4,7 k $\Omega$
R6	3,3 M $\Omega$
R7	3,3 M $\Omega$
R8	3,3 M $\Omega$
C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7	E22 $\mu$ F/100V
C8	E470 $\mu$ F/50V
C9, C10	100 nF
D1, D2, D3, D4, D5, D5, D6, D7	1N4007
F1, F2	125 mA
TR1	230/2x18 V, 3VA
TR2	230/9 V, 3VA
G1	Usměrňující můstek B250C 250V, 1 A
7809	Stabilizátor napětí +9V, 0.1 A
SW1, SW2	Páčkové přepínače
1x	Digital Panelmeter

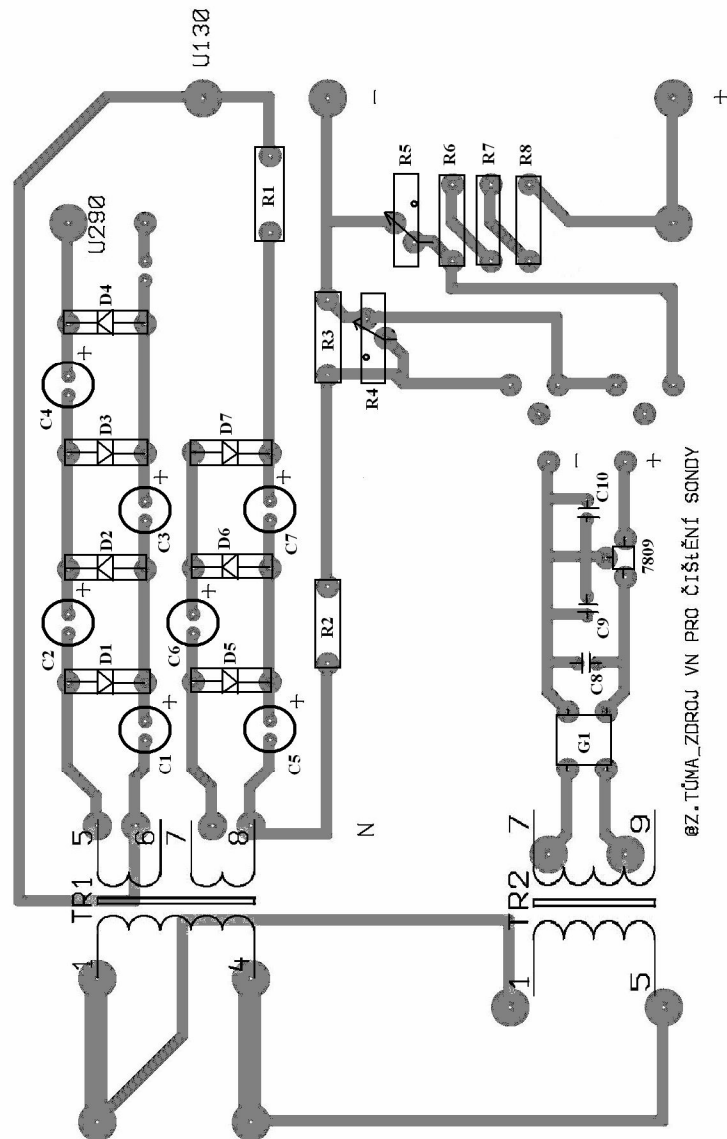
### 5.3 Schéma tištěného spoje



Obr. č. 15. Schéma tištěného spoje.



## 5.4 Schéma osazení součástek



Obr. č. 16. Schéma osazení součástek.

## 5.5 Technické údaje:

- Napájecí napětí: 230 V, 50Hz AC,
- Výstupní napětí 1: 125 V DC,
- Výstupní napětí 2: 290 V DC,
- Výstupní proud: max. 1999  $\mu$ A

Zdroj byl zabudován do plastové krabičky. Pro ukázkou jsou zde uvedeny dvě fotografie konstruovaného zdroje.



Obr. č. 17. Přední strana konstruovaného zdroje.



Obr. č. 18. Zadní strana konstruovaného zdroje.

## 6. Velikost výstupního napětí a proudu z hlediska bezpečnosti

Lidské tělo můžeme chápat jako elektrický odpor, kterým protéká elektrický proud. Velikost odporu závisí na cestě, kudy proud prochází. Největší odpor představuje lidská kůže, zvláště kůže ztvrdlá, zrohovatělá. Střední hodnota odporu 1 cm<sup>2</sup> kůže je asi 8000 Ω. Pro napětí větší jak 50 V dochází k postupnému průrazu pokožky. Proud určuje vnitřní impedance. Svaly, klouby, krevní dráha představují odpor asi 1 000 Ω. Uvedené hodnoty jsou průměrné, protože každý jedinec je jiný. Více ohroženi el. proudem jsou lidé se sklonem k pocení nebo s jemnou pokožkou (ženy, děti). Dále záleží na psychickém stavu jedince (únava, alkohol, úlek, ...) a druhu proudu. Stejnoseměrný proud má zhruba 3x menší účinky z hlediska bezpečnosti při úrazu elektrickým proudem než proud střídavý [12].

Hodnota bezpečného stejnosměrného napětí podle normy ČSN 33 200-4-41 (ochrana před úrazem elektrickým proudem) je stanovena maximálně do 100 V v normálních prostorech. Požadavky výstupního napětí navrženého zdroje tuto hodnotu bezpečného napětí překračují, proto je nutno dle již zmiňované normy ČSN 33 200-4-41 splnit podmínku, aby velikost maximálního výstupního proudu nepřesáhla stanovanou hodnotu 3 mA u stejnosměrného proudu [14]

### 6.1. Účinky el. proudu na člověka - 3 stupně [11]

#### 1. Práh vnímání **do 1 mA**:

Počátek nervového podráždění, cítíme brnění, mravenčení.  
Ještě není zdraví škodlivý.

#### 2. Mez uvolnění (**1÷10 mA**):

Nervové podráždění, cítíme brnění, mravenčení.  
Jsme schopni vůlí se vyprostit z obvodu.  
Nad touto hodnotou nastává svalová křeč.

#### 3. Hranice fibrilace **nad 10 mA**:

Nebezpečný proud, proud způsobí ochrnutí srdce a dalších svalů, například bránice, mezižeberního svalstva, tj. funkce dýchání.  
Srdce přestává pracovat, ustává krevní oběh.

Kromě velikosti proudu bude záležet i na době průchodu proudu, a to jak z hlediska trvání průchodu, tak i vzhledem k okamžité funkci srdce. Dle normy ČSN 33 200-4-41 (ochrana před úrazem elektrickým proudem) bezpečný proud jako mezní hodnota pro stejnosměrný proud je 10 mA. Snížená mezní hodnota pro úchop do ruky je 3 mA [12].

Navržený zdroj dosahuje maximální hodnoty proudu 1.9 mA, tudíž se jedná o proud, který není z hlediska úrazu elektrickým proudem nebezpečný s ohledem na citlivé jedince a délku trvání průchodu proudu lidským organizmem. Zdroj byl také vybaven bezpečnostními svorkami.

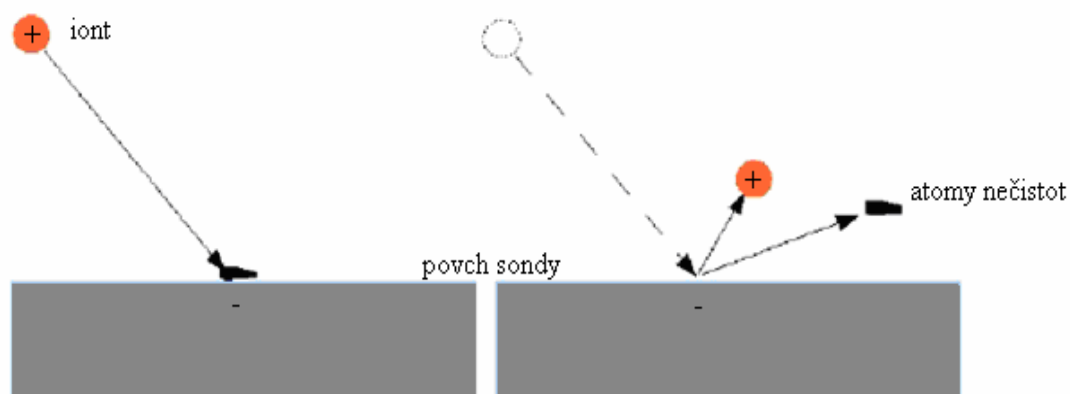
## 7. Aplikace a využití zdroje

Nyní se tento konstruovaný zdroj používá jako školní pomůcka při konkrétních fyzikálních experimentech pro čištění povrchu Langmuirovy sondy v mikrovlnném výboji v plazmatu generovaného povrchovou vlnou v Českých Budějovicích.

Jak již bylo psáno v úvodní části, na povrchu sondy se vytvářejí nežádoucí vrstvy, které vznikají při měření a diagnostice plazmatu. Zdroj slouží k čištění povrchu Langmuirovy sondy pomocí dvou metod.

Jednou z metod čištění povrchu Langmuirovy sondy je metoda, která je založena na principu dopadu kladných iontů ionizovaného plynu na povrch sondy, čímž dojde k narušení povrchu sondy a k následnému odletu, odprášení atomů nečistot z povrchu sondy. Princip čištění pomocí dopadu kladných iontů na povrch sondy je znázorněn na obr. č. 19., který je převzatý a upravený z [13].

Další metodou čištění povrchu Langmuirovy sondy je metoda, která je založena na principu dopadu záporných elektronů ionizovaného plynu na povrch sondy, čímž dojde k ohřevu sondy a k následnému odstranění nežádoucích vrstev z povrchu sondy.



Obr. č. 19 Princip čištění povrchu sondy.

## 8. Závěr

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku konstrukce a realizace zdroje napětí pro čištění Langmuirovy sondy. Na základě rozboru problémů, které mohou vznikat při sondové diagnostice plazmatu díky znečišťování diagnostické sondy, které jsou krátce popsány v úvodní části práce, byl zvolen vhodný princip čištění sondy bombardováním nabitými částicemi. K tomuto účelu nejlépe vyhověl zdroj nižšího nebo vyššího napětí s omezením výstupního proudu. Tento zdroj o výstupním stejnosměrném napětí řádově  $10^2$  V byl navržen společně s dalšími pomocnými obvody, jako je obvod měření výstupního napětí a proudu a jeho autonomní napájení. Pro získání stejnosměrného napětí pro obvod čištění sondy byla zvolena kombinace síťového transformátoru se zaručenou elektrickou pevností, galvanického oddělení od napájecí sítě a kaskádní diodový násobič napětí. Měřicí obvod byl realizován pomocí komerčního panelového měřidla, ke kterému bylo nutno teoreticky navrhnout a zkonstruovat autonomní stabilizovaný napájecí zdroj a snímací obvod sériového rezistoru pro měření výstupního proudu a předřadníky pro měření výstupního napětí.

Realizovaný zdroj napětí pro čištění diagnostické Langmuirovy sondy dosahuje těchto parametrů:

Zdroj je umístěn v plastové krabičce s dvojitou izolací viz ochrana před nebezpečným dotykem, elektrické předměty, krytí - ČSN IEC 742 (35 1330), je vybaven bezpečnostními svorkami pro vysoké napětí, signalizací zapnutého stavu a je galvanicky oddělen od sítě. Měřicí obvody jsou díky autonomnímu napájení taktéž galvanicky odděleny od napájecí sítě. Proti přetížení jsou obvody zdroje chráněny tavnými pojistkami.

Výstupní napětí je volitelné 125 V nebo 290 V

Výstupní proud je maximálně 1999  $\mu$ A

Měření výstupního napětí v rozsahu  $\pm 2000$  V s rozlišením 1 V ( $\pm 1$  V)

Měření výstupního proudu v rozsahu  $\pm 2000$   $\mu$ A s rozlišením 1  $\mu$ A ( $\pm 1$   $\mu$ A)

Zdroj byl využit při konkrétních fyzikálních experimentech pro čištění Langmuirovy sondy v mikrovlnném plazmatu v Českých Budějovicích a dále při zahraniční stáži Dr. Straňáka při měření ve vysokofrekvenčním výboji v plazmochemickém reaktoru magnetronového typu v Greifswaldu, kde byla ověřena jeho funkce a parametry, které splňují s rezervou požadavky kladené na dané zařízení.

## 9. Seznam použité literatury

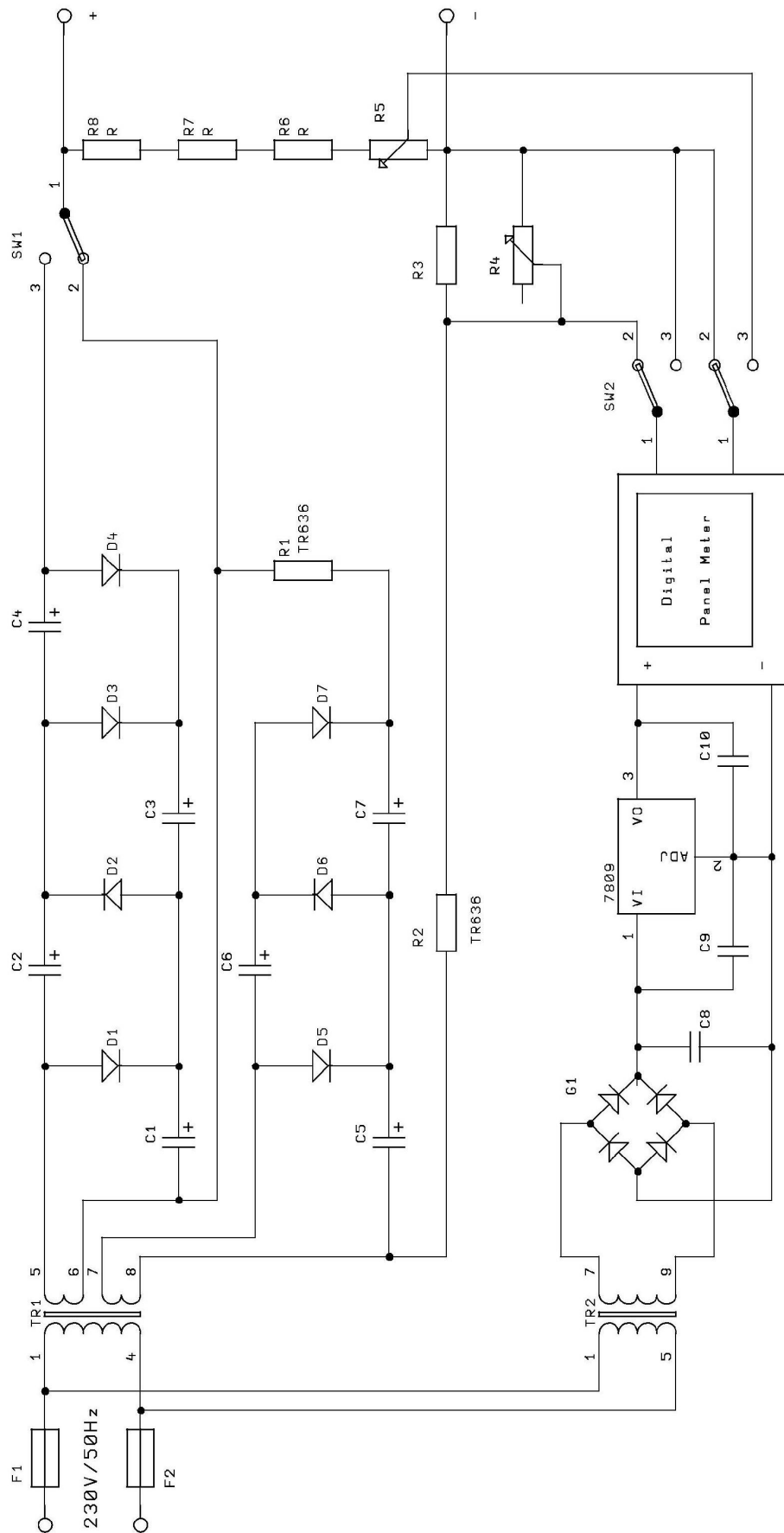
- [1] AUBRECHT, V., Technické aplikace plazmatu, Brno: VUT v Brně FEKT, 2003.
- [2] ADÁMEK, P., Problematika sondové diagnostiky stejnosměrného, vysokofrekvenčního a mikrovlnného výboje., Habilitační práce, Liberec: TUL PF, 2005.
- [3] ZAPLATÍLEK, K., Elektronické obvody, teorie obvodů, napájecí zdroje, Skripta v elektronické podobě.  
[http://www.vabo.cz/stranky/zaplatilek/Obecne/Skripta\\_napajeci%20zdroje/Skripta.htm](http://www.vabo.cz/stranky/zaplatilek/Obecne/Skripta_napajeci%20zdroje/Skripta.htm)
- [4] HUSÁK, M., Napájecí zdroje v elektronice, Praha: ČVUT, 1998.
- [5] KREJČIŘÍK, A., Napájecí zdroje I., Praha: BEN, 1996.
- [6] BEZDĚK, M., Elektrotechnika 1, České Budějovice: KOPP, 2002.
- [7] HRÁZSKÝ, J., ANDRLE, H., Kurs elektronických obvodů pro průmyslovou automobilku, Praha: SNTL, 1976.
- [8] STRÝHAL, Z., SEDLÁK, D., Elektronika 1, Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2004.
- [9] SIROVÁTKO, M., ČERNOCH, B., Zapojení s integrovanými obvody, Praha: SNTL, 1987.
- [10] <http://www.volny.cz/fufik/elektro/stabil/stabil.htm>
- [11] <http://wiki.ondrej.org/vyhlaska50:start>
- [12] [http://durci.sps-pi.cz/te/V\\_50N.pdf](http://durci.sps-pi.cz/te/V_50N.pdf)

- [13] PODANÝ, P., KŘÍŽ, A., The effect of ion bombardment upon the properties of thin layer substrate system. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005.
- [14] CIPRA, M., KŘÍŽ, M., KŮLA, V., Úvod do elektrotechniky, Praha: ČVUT, 2004.
- [15] SZÁNTÓ, L., Maxwellovy rovnice, Praha: BEN, 2003.
- [16] SVOBODA, E., Přehled středoškolské fyziky, Praha: PROMETHEUS, 1998.
- [17] BARTOŠ, V., Elektrické stroje, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004.
- [18] SEDLÁK, B., ŠTOLL, I., Elektřina a magnetismus, Praha: ACADEMIA, 2002.
- [19] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Usm%C4%9Br%C5%88ova%C4%8D>

## **10. Přílohy**



# Schéma zapojení zdroje



# Digital Panelmeter PM428

Best.Nr. 830 198

## Eigenschaften

Das Spannungs-Messmodul mit I.C.-Display ist speziell zum Einbau in Gehäuse gedacht. Die Montage erfolgt durch Snap-In Montage. Die Kommastelle des Displays wird durch das Verbinden einer der 3 Lötbrücken verschoben. Es können Spannungen von 0,01...999 V- gemessen werden. Zur Spannungsanpassung muss der Spannungsteiler mit entsprechenden Widerständen beschaltet werden. Die Messung anderer Werte (Strom, Widerstand, Temperatur, Kapazität usw.) kann nur mit entsprechender Außenbeschaltung erfolgen.

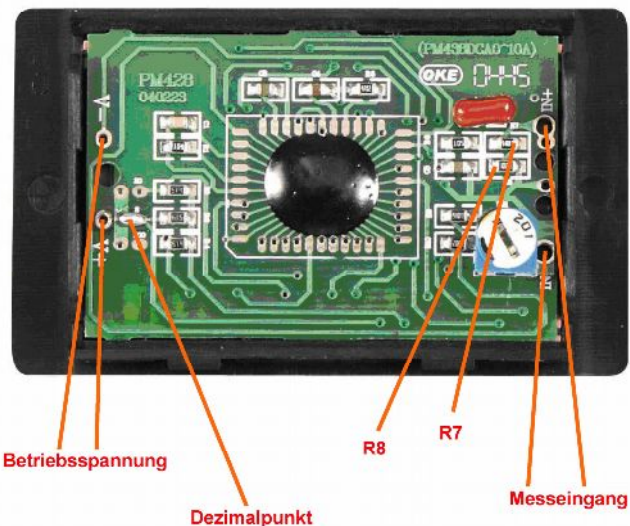


## Technische Daten

- Betriebsspannung: 9 V- (8... 12 V-)
- Stromaufnahme: 1 mA
- Display: 3½-stellig, Ziffernhöhe 13 mm
- Messgenauigkeit:  $\pm 0,5 \%$
- Messhäufigkeit: 2...3 Messungen pro Sekunde
- Betriebstemperaturbereich: 0... 50 °C
- Display-Fenstergröße: 47x19 mm
- Erforderliche Einbauöffnung: 54x38 mm
- Einbautiefe: 16 mm
- Nullpunkt einstellbar über Potentiometer
- Automatische Polaritätsanzeige (-)

## Spannungsteiler

Max. Messspannung	Einzubauende Widerstände
200 mV	R7 = 0 $\Omega$ , R8 = 10 M $\Omega$
2 V	R7 = 9 M $\Omega$ , R8 = 1 M $\Omega$
20 V	R7 = 9,9 M $\Omega$ , R8 = 100 K $\Omega$
200 V	R7 = 9,99 M $\Omega$ , R8 = 10 K $\Omega$
1000 V	R7 = 9,999 M $\Omega$ , R8 = 1 K $\Omega$



## Sicherheitshinweise

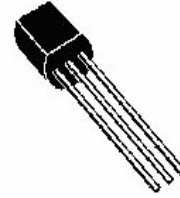
- Schützen Sie das Panel vor Feuchtigkeit, Hitze und elektromagnetischen Feldern
- Benutzen Sie das Panel nur im geschlossenen Gehäuse
- Vorsicht bei Spannungen größer 25 V/AC und 35 V/DC
- Der Anschluss sollte nur von kompetenten Technikern durchgeführt werden
- Bei unsachgemäßer Bedienung oder Anschluss erlischt die Garantie

## Description the 7809

### DESCRIPTION

The L78L00 series of three-terminal positive regulators employ internal current limiting and thermal shutdown, making them essentially indestructible. If adequate heatsink is provided, they can deliver up to 100 mA output current. They are intended as fixed voltage regulators in a wide range of applications including local or on-card regulation for elimination of noise and distribution problems associated with single-point regulation. In addition, they can be used with power pass elements to make high-current voltage regulators.

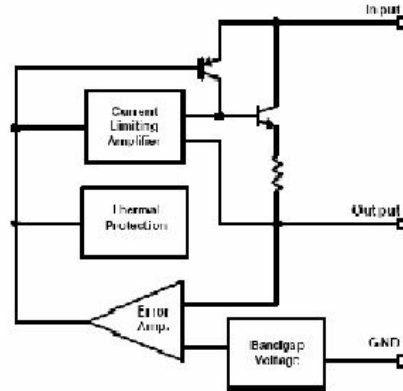
The L78L00 series used as Zener diode/resistor combination replacement, offers an effective



TO-92

output impedance improvement of typically two orders of magnitude, along with lower quiescent current and lower noise.

### ■ Functional Block Diagram



**ELECTRICAL CHARACTERISTICS FOR L78L09** (refer to the test circuits,  $T_J = 0$  to  $125$  °C,  $V_I = 15$  V,  $I_o = 40$  mA,  $C_I = 0.33$   $\mu$ F,  $C_o = 0.1$   $\mu$ F unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_o$	Output Voltage	$T_J = 25$ °C	8.28	9	9.72	V
$V_o$	Output Voltage	$I_o = 1$ to 40 mA $V_I = 11.5$ to 23 V $I_o = 1$ to 70 mA $V_I = 15$ V	8.1 8.1		9.9 9.9	V V
$\Delta V_o$	Line Regulation	$V_I = 11.5$ to 23 V $T_J = 25$ °C $V_I = 12$ to 23 V $T_J = 25$ °C			250 200	mV mV
$\Delta V_o$	Load Regulation	$I_o = 1$ to 100 mA $T_J = 25$ °C $I_o = 1$ to 40 mA $T_J = 25$ °C			80 40	mV mV
$I_d$	Quiescent Current	$T_J = 25$ °C $T_J = 125$ °C			6 5.5	mA mA
$\Delta I_d$	Quiescent Current Change	$I_o = 1$ to 40 mA			0.2	mA
$\Delta I_d$	Quiescent Current Change	$V_I = 12$ to 23 V			1.5	mA
eN	Output Noise Voltage	$B = 10$ Hz to 100 kHz $T_J = 25$ °C		70		$\mu$ V
SVR	Supply Voltage Rejection	$I_o = 40$ mA $f = 120$ Hz $T_J = 25$ °C $V_I = 12$ to 23 V	36	44		dB
$V_d$	Dropout Voltage			1.7		V