

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Usměrňovač 1200V/200A**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Dominik SOUKUP**

Osobní číslo: **E16B0054P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Usměrňovač 1200V/200A**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte parametry vytipovaného usměrňovače.
2. Proveďte návrh a dimenzování připojovacích vodičů a svorek.
3. Navrhněte řešení po elektrické i konstrukční stránce. Zapojení realizujte.
4. Proveďte a vyhodnoťte oteplovací zkoušku.
5. Shrňte výsledky a proveďte zhodnocení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

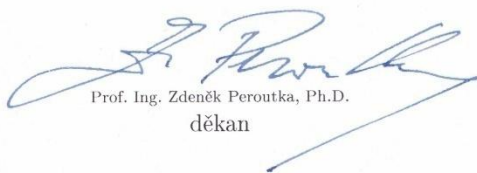
1. <https://www.semikron.com/>.

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019

  
Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh a realizaci výkonového usměřňovače, který bude sloužit pro laboratorní účely, zejména k napájení kotev stejnosměrných motorů. Práce se zabývá dimenzováním chladiče, návrhem přípojovacích svorek a následnou oteplovací zkouškou.

## **Klíčová slova**

Usměřňovač, dioda, dimenzování chladiče, přípojovací svorky, oteplovací zkouška

**Abstract**

The proposed bachelor thesis is focused on proposal and realization of power rectifier which is meant to be used for laboratory purposes, especially for powering armature direct current engines. The thesis is based around dimensioning a heatsink, designing connecting clamps and result testing.

**Key words**

Rectifier, diode, dimensioning a heatsink, connecting clamps, heating test

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 10.6.2019

Dominik Soukup

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ELEKTROTECHNICKÉ MATERIÁLY</b> .....	<b>12</b>
1.1 POLOVODIČE.....	12
1.1.1 Vodivost typu N.....	13
1.1.2 Vodivost typu P.....	13
1.2 PN PŘECHOD.....	14
<b>2 VÝKONOVÉ POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY</b> .....	<b>16</b>
2.1 DIODA.....	16
2.1.1 Dynamické vlastnosti.....	17
2.1.2 Komutace diody.....	18
2.1.3 Mezní kmitočety diody.....	18
2.2 DRUHY DIOD.....	19
2.2.1 Vysokonapěťové diody.....	19
2.2.2 Rychlé a vysokofrekvenční diody.....	19
2.2.3 Schottkyho usměrňovací dioda.....	19
2.2.4 Lavinové diody.....	19
<b>3 USMĚRŇOVAČE</b> .....	<b>20</b>
3.1 USMĚRNĚNÉ NAPĚTÍ A PROUD, VLIV ZÁTĚŽE.....	21
3.1.1 Vliv indukčnosti zátěže.....	22
3.1.2 Vliv kondenzátoru zátěže.....	22
3.2 NEŘÍZENÉ USMĚRŇOVAČE.....	23
3.2.1 Usměrňovače v uzlovém zapojení.....	23
3.2.2 Usměrňovače v můstkovém zapojení.....	24
<b>4 DIMENZOVÁNÍ POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK</b> .....	<b>25</b>
4.1 POUŽITÍ.....	25
NAPĚŤOVÉ DIMENZOVÁNÍ SOUČÁSTEK.....	25
PROUDOVÉ DIMENZOVÁNÍ SOUČÁSTEK.....	25
4.2 VÝBĚR VÝKONOVÉHO MODULU.....	26
4.3 VÝKONOVÝ MODUL SEMIX501D17Fs.....	26
<b>5 ZTRÁTY POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK</b> .....	<b>27</b>
5.1 ZTRÁTY NA USMĚRŇOVAČI.....	28
5.1.1 Výpočet ztrát usměrňovače.....	29
5.2 ZPŮSOBY CHLAZENÍ.....	30
5.2.1 Vzduchové chlazení.....	30
5.3 TEPELNÉ DIMENZOVÁNÍ.....	31
5.4 NÁHRADNÍ TEPELNÉ SCHÉMA.....	32
5.5 TEPLTNÍ ČIDLO.....	32
<b>6 KONSTRUKCE PŘIPOJOVACÍCH SVOREK</b> .....	<b>33</b>
6.1 NÁVRH A DIMENZOVÁNÍ.....	33
<b>7 REALIZACE A TESTOVÁNÍ USMĚRŇOVAČE</b> .....	<b>35</b>
7.1 MĚŘENÍ VELIČIN.....	36
7.2 OTEPLOVACÍ ZKOUŠKA.....	37



---

7.2.1	Postup měření kontaktní sondou.....	38
7.2.2	Naměřené hodnoty.....	39
7.2.3	Grafické zobrazení naměřených hodnot .....	40
7.3	VYHODNOCENÍ OTEPLOVACÍ ZKOUŠKY .....	41
<b>ZÁVĚR</b> .....		<b>42</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....		<b>44</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....		<b>45</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....		<b>45</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....		<b>1</b>

## Úvod

Cílem této práce je navrhnout a zkonstruovat výkonový usměrňovač. Úkolem zařízení je převedení střídavého proudu na stejnosměrný. Usměrňovač bude napájen pomocí autotransformátoru a bude sloužit pro vysokovýkonné laboratorní aplikace. U těchto aplikací je důležité udržet optimální teplotu polovodičových součástek pomocí chlazení.

Bakalářská práce je rozdělena do sedmi hlavních částí. V první části se práce zaměřuje na elektrotechnické materiály a PN přechod. Dále se práce zabývá výkonovými polovodičovými součástkami. Třetí část je věnována polovodičovým usměrňovačům. Čtvrtá část popisuje dimenzování polovodičových součástek a výběr výkonného modulu. Pátá část práce je věnována ztrátám usměrňovače a tepelnému dimenzování chladiče. Návrh a realizace připojovacích svorek je popsána v šesté části práce. Poslední část práce je zaměřena na realizaci výkonového usměrňovače a jeho následné testování.

## Seznam symbolů a zkratk

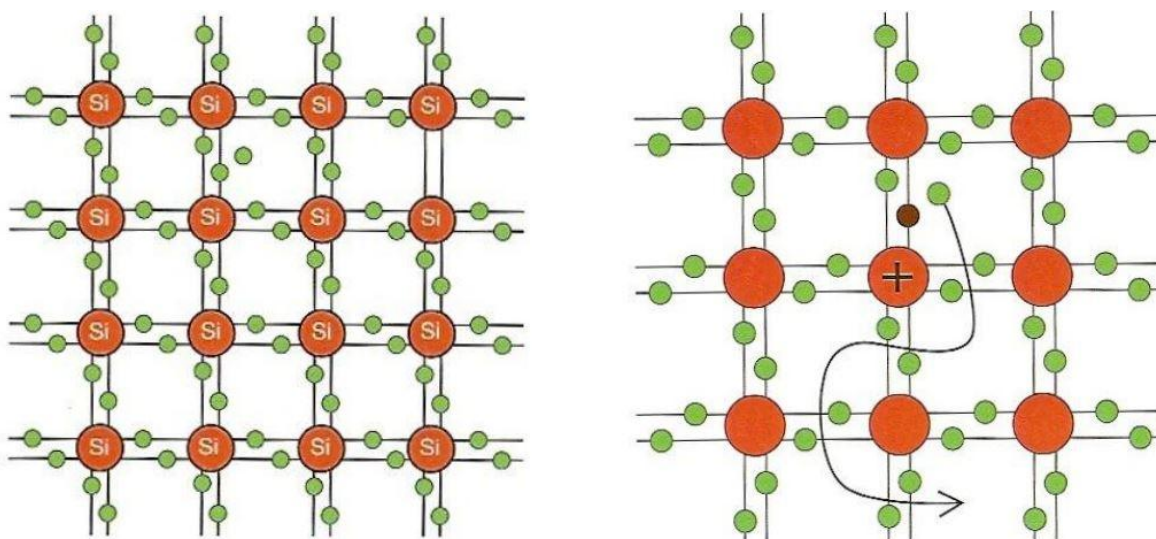
t	čas (s)
T	teplota (°C)
T <sub>a</sub>	teplota okolí (°C)
T <sub>j</sub>	teplota polovodičového čipu (°C)
T <sub>r</sub>	teplota chladiče (°C)
R <sub>v</sub>	diferenciální odpor (Ω)
P <sub>tot</sub>	celkový ztrátový výkon (W)
P <sub>fw</sub>	propustný ztrátový výkon (W)
I	proud (A)
U	napětí (V)
P	výkon (W)
J	proudová hustota (A/m <sup>2</sup> )
R <sub>thjc</sub>	tepelný odpor mezi čipem a pouzdrem (K/W)
R <sub>thcs</sub>	tepelný odpor mezi pouzdrem a chladičem (K/W)
R <sub>thra</sub>	tepelný odpor mezi chladičem a okolím (K/W)
Δθ	oteplení (K)
τ	časová konstanta (s)
U <sub>i</sub>	indukované napětí (V)
R	rezistor (Ω)
L	indukčnost (H)
RICE	Regionální inovační centrum elektrotechniky

# 1 Elektrotechnické materiály

Materiály v elektrotechnice jsou děleny do tří skupin: vodiče, izolanty a polovodiče. Vodič je materiál, který slouží k vedení elektrického proudu. Obsahuje volné částice s nábojem, které vedou elektrický proud. Izolant neobsahuje volné částice s nábojem, a proto na rozdíl od vodiče nevede elektrický proud. Používáme ho k izolaci živých částí elektrického obvodu. Polovodič je materiál, který obsahuje PN přechod. Elektrická vodivost materiálu závisí na vnějších podmínkách.

## 1.1 Polovodiče

Polovodiče jsou při pokojových teplotách prakticky nevodivé. Vodivými se stávají zahřátím. Nejpoužívanější polovodičový materiál je křemík, který má čtyři valenční elektrony. Pomocí nich vytváří vzájemně pevné krystalické vazby. Při zahřívání dochází k rychlejšímu kmitání atomů, a proto jsou vazby mezi atomy silněji namáhány. Následně může dojít k přerušení vazby a uvolnění některého valenčního elektronu, po kterém vznikne díra. Volné elektrony mají záporný náboj, díry mají naopak náboj kladný. Po přiložení napětí na polovodič se pohybují volné elektrony ke kladnému a díry k zápornému pólu zdroje napětí. Vodivost způsobená zahřátím polovodiče se nazývá vlastní vodivost.



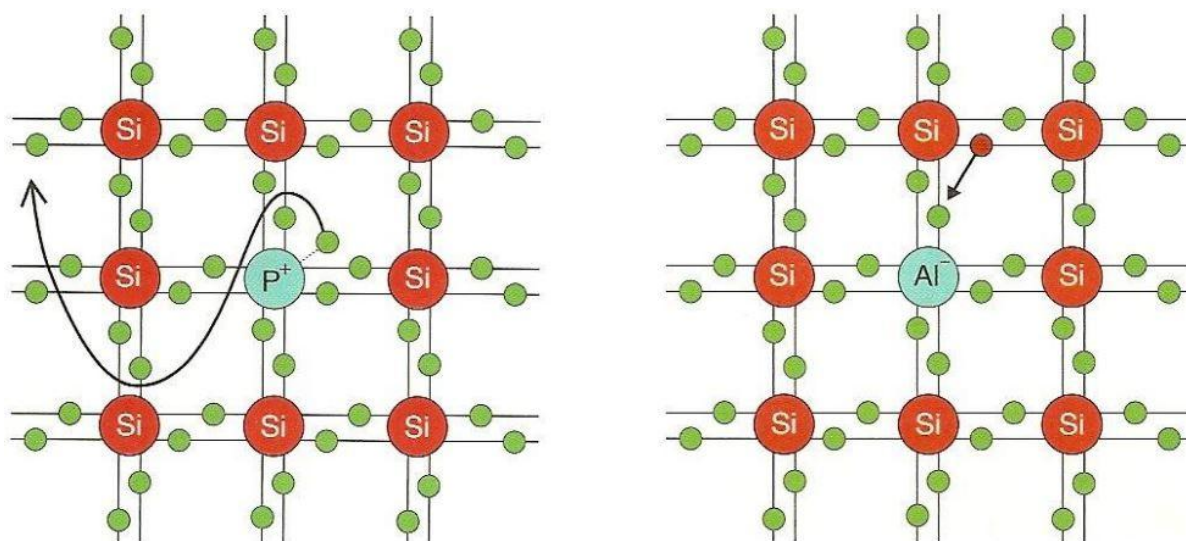
Obrázek 1: Krystalická mřížka křemíku, za normálních podmínek (vlevo), po zahřátí (vpravo) [12]

### 1.1.1 Vodivost typu N

Pokud se do krystalu křemíku přidá příměs prvku, který má pět valenčních elektronů, pak se atomy tohoto prvku mohou zapojit do krystalické mřížky, jen když každý uvolní jeden valenční elektron. Uvolněné elektrony jsou nositeli záporného náboje. Atomy příměsi zapojené do krystalické mřížky mají kladný náboj. Příměsi dodávající polovodiči volné elektrony vytvářejí polovodič typu N. [1]

### 1.1.2 Vodivost typu P

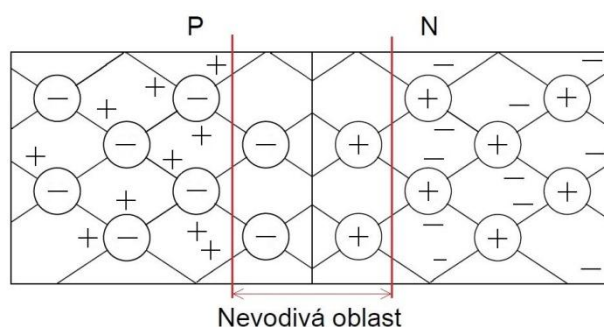
Pokud se do krystalu křemíku přidá příměs prvku, který má pouze tři valenční elektrony, pak se atomy tohoto prvku mohou zapojit do krystalické mřížky, jen když získají z okolí jeden potřebný elektron. Atomy příměsi zapojené do krystalické struktury mají záporný náboj a po získaných elektronech vzniknou v jiných atomech polovodiče díry, které jsou velmi pohyblivé a mají kladný náboj. Příměsi dodávající polovodiči díry vytvářejí polovodič typu P. [1]



Obrázek 2: Polovodič typu P (vlevo) a polovodič typu N (vpravo) [12]

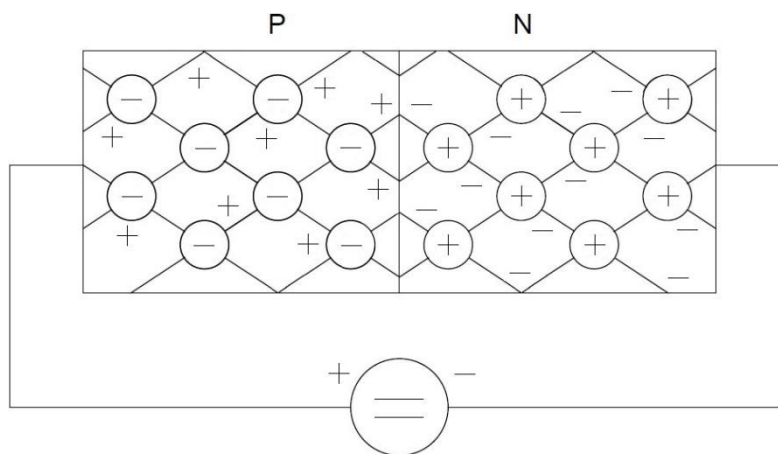
## 1.2 PN přechod

PN přechod je tvořen polovodičem typu P a polovodičem typu N. V místě dotyku mají díry tendenci proniknout z polovodiče typu P k volným elektronům do polovodiče typu N a naopak. Tento jev se nazývá difúze. Pohyb nosičů při difúzi můžeme označit jako difúzní proud. Tento proud po určité době zaniká. Výsledkem difúze je, že dojde k zániku volných nosičů z oblasti PN přechodu. Oblast přechodu se stává nevodivou a rozdělení nábojů na přechodu představuje nabitý kondenzátor, na kterém se objeví napětí. Toto napětí nazýváme difúzní napětí PN přechodu. [1]



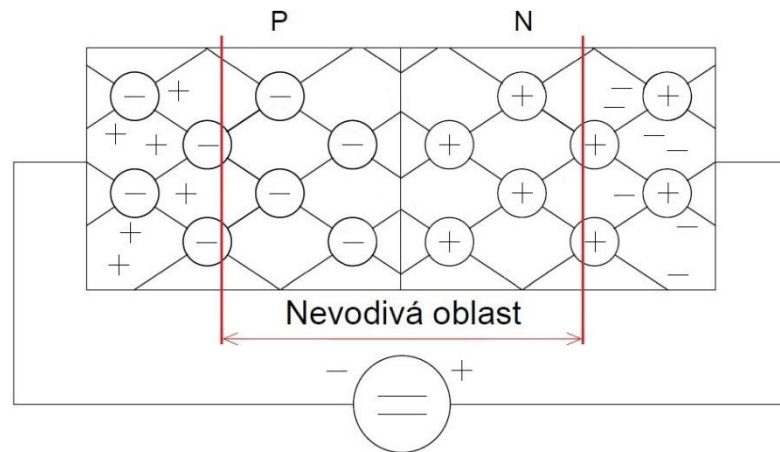
Obrázek 3: PN přechod

Bude-li připojen na polovodič typu P kladný pól napětí, jsou volné nosiče náboje v polovodiči typu P a v polovodiči typu N odpuzovány od pólu vnějšího zdroje k PN přechodu. Při překročení prahového napětí se volné nosiče posunou směrem k přechodu a nevodivá oblast zaniká. Přes PN přechod začne procházet proud. [1]



Obrázek 4: Propustně polarizovaný PN přechod

Bude-li připojen na polovodič typu P záporný pól napětí, jsou volné díry z polovodiče typu P přitahovány k zápornému a volné elektrony naopak ke kladnému pólu napětí. Dochází k nabíjení PN přechodu a nevodivá oblast v místě přechodu se zvětšuje. [1]



Obrázek 5: Závěrně polarizovaný PN přechod

## 2 Výkonové polovodičové součástky

Ve výkonové elektronice mohou být součástky:

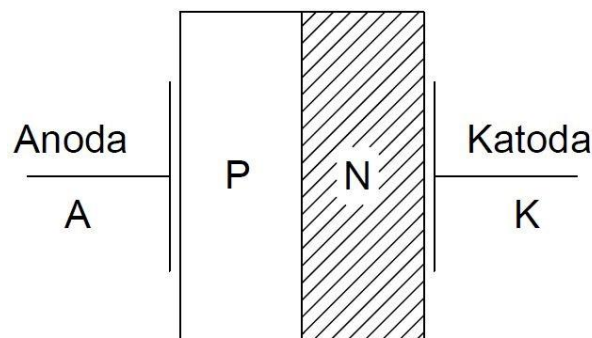
- neřízené
- s řízeným zapínáním
- s řízeným zapínáním i vypínáním

Mezi neřízené polovodičové součástky patří dioda, která se používá v aplikacích, kde není nutné řídit velikost napětí. Součástky s řízeným zapínáním např. tyristor, triak, lze po splnění určitých podmínek pomocí zapínacího impulzu spínat. Součástky s řízeným zapínáním i vypínáním je možné pomocí řídicího signálu zapnout i vypnout. Mezi tyto součástky jsou řazeny např. unipolární tranzistory, IGBT a GTO tyristory. [3]

Pro problematiku dané práce bude pozornost věnována neřízeným polovodičovým součástkám.

### 2.1 Dioda

Polovodičová dioda je nelineární dvojpól, který obsahuje jeden PN přechod s usměrňujícím účinkem. Ve výkonové elektronice je dioda hlavní stavební jednotkou. Používá se v mnoha aplikacích např. neřízený usměrňovač. [2]

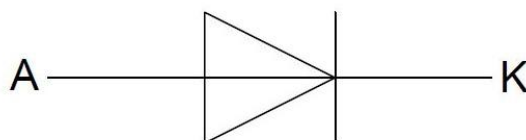


Obrázek 6: Struktura diody

Dioda je zapojená v propustném stavu tehdy, pokud je na anodu A připojen kladný pól a na katodu K záporný pól. V tomto stavu je na diodě velmi malé napětí. Velikost proudu je dána parametry obvodu. Naopak, pokud je připojeno kladné napětí na katodu K a záporné napětí na anodu A, bude dioda v závěrném směru. Procházející proud v závěrném směru je velmi malý, velikost napětí je dána parametry obvodu. Velikost



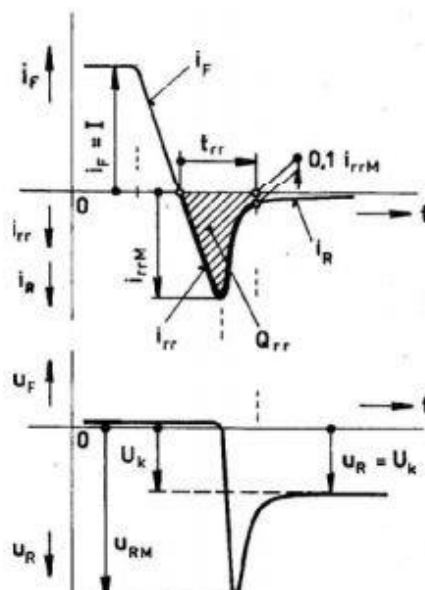
závěrného napětí je udávána výrobcem. Po překročení této hodnoty může dojít k průrazu PN přechodu a k nevratné destrukci diody. Existují určité typy diod, které se používají v závěrném směru, a slouží převážně ke stabilizaci napětí. [2]



Obrázek 7: Schématická značka diody

### 2.1.1 Dynamické vlastnosti

Zapínání a vypínání diody neprobíhá skokově. Při zapínání diody se nosiče elektrického náboje nerozloží okamžitě v celé křemíkové destičce. K tomu dochází až po určité době, která odpovídá  $10^{-6}$  až  $10^{-8}$  s. Průběh zapínání je také závislý na strmosti nárůstu hustoty propustného proudu. Při vyšší hustotě může vzniknout na diodě napěťová špička, která může dosáhnout až desítek voltů. Vypínání diody také není skokové, protože musí dojít k obnovení závěrné vlastnosti diody. Dobu obnovení nebo také dobu zotavení označujeme  $t_{rr}$ . Po poklesu proudu diodou k nule zůstane v PN přechodu zotavovací náboj  $Q_{rr}$ , který způsobí proud v závěrném směru, dokud nedojde k vybití náboje uvnitř polovodiče. Na PN přechodu se začne vytvářet oblast prostorového náboje a na diodě začne narůstat závěrné napětí. [3]



Obrázek 8: Časový průběh vypínání diody [7]

### 2.1.2 Komutace diody

Komutace je přechod diody z propustného do závěrného stavu vlivem změněné polaroty vnějšího napětí. V prvním okamžiku prochází závěrný proud, jehož hodnota je podstatně větší než hodnota proudu v ustáleném stavu. Tento jev nazýváme komutace diody. Časový úsek mezi okamžikem, kdy proud prošel nulou a okamžikem, kdy dosáhl hodnoty ustáleného stavu, označujeme za dobu komutace diody nebo za závěrnou zotavovací dobu. [4]

### 2.1.3 Mezní kmitočet diody

Doba komutace neprobíhá skokovou změnou, a proto nemůžeme použít polovodičové diody pro usměrnění napětí o libovolné frekvenci. Při vyšším kmitočtu se výrazněji projevuje vliv komutační špičky závěrného proudu. Od určitého kmitočtu ztrácí dioda úplně svůj usměrňující účinek. Kmitočet, při kterém dioda dokáže usměrňovat s rozumnou účinností, označujeme jako mezní kmitočet diody. [4]

## 2.2 Druhy diod

### 2.2.1 Vysokonapět'ové diody

Jedná se o diody, které mají napět'ovou zatížitelnost vyšší než 1600 V. S nárůstem napět'ové zatížitelnosti také narůstá zotavovací náboj a propustné napětí. Naopak klesá proudová zatížitelnost. [1]

### 2.2.2 Rychlé a vysokofrekvenční diody

Tento druh diod se vyznačuje velmi malými hodnotami  $Q_{rr}$  a  $t_{rr}$ . Dokážou pracovat při spínacích kmitočtech až desítky kHz. Čím je menší doba  $t_{rr}$  při dané napět'ové zatížitelnosti, tím je větší propustné napětí. Dále platí, že čím je při dané zatížitelnosti vyšší napět'ová zatížitelnost, tím je také větší doba  $t_{rr}$ . [1]

### 2.2.3 Schottkyho usměrňovací dioda

Schottkyho diody jsou polovodičové součástky s usměrňujícím přechodem kov – polovodič. Vyznačují se velmi nízkým propustným napětím, přibližně polovičním ve srovnání s běžnou diodou, a dále také zanedbatelnou dobou zotavení. Nevýhodou je poměrně velký závěrný proud a především velmi nízká proudová a napět'ová zatížitelnost. [1]

### 2.2.4 Lavinové diody

Druh diod, který je určen pro spínací frekvence do 60 Hz. Lavinové diody jsou navrženy, aby se pracovní bod mohl pohybovat i v oblasti průrazného napětí v závěrné charakteristice. Používají se jako omezovače přepětí. [1]



### 3.1 Usměrněné napětí a proud, vliv zátěže

Průběh okamžité hodnoty usměrněného napětí  $u_d$  se vyznačuje střídavou složkou superponovanou na střední hodnotu  $U_d$ . Usměrňovač vybírá ze střídavého napájecího napětí pro stejnosměrnou zátěž pouze takovou část, aby napětí na zátěži bylo stejnosměrné. Průběh usměrněného proudu  $i_d$  je stanoven průběhem  $u_d$  a zátěží. [2]

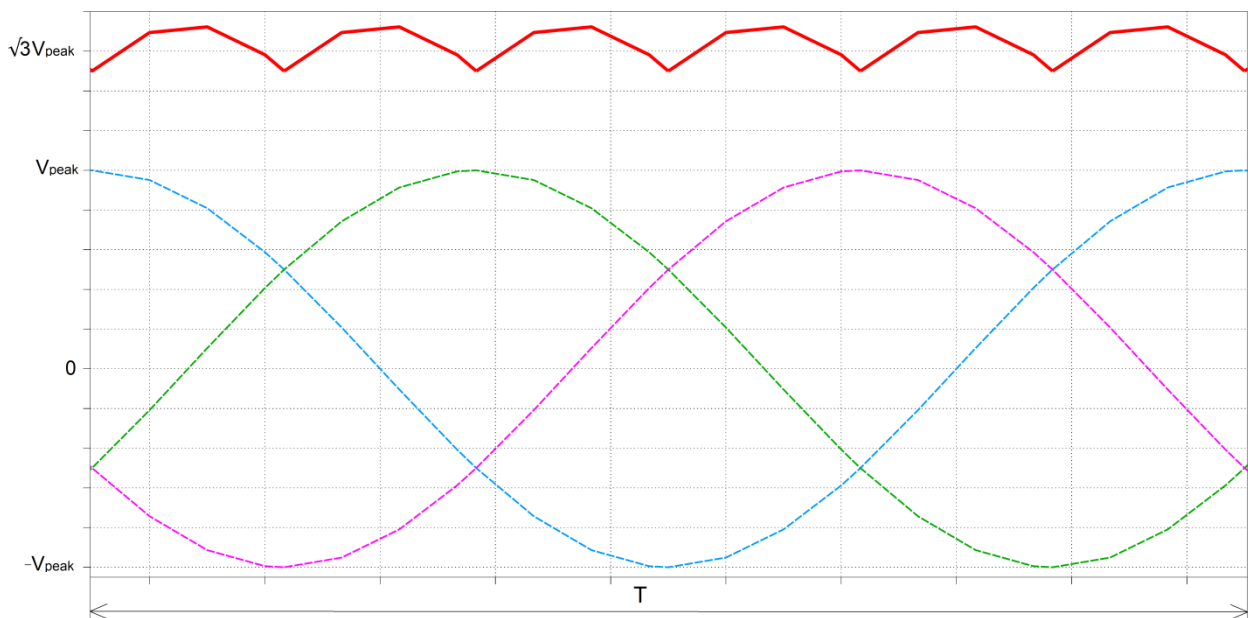
Průběh usměrněného napětí podle frekvence 1. harmonické střídavé složky je vyjádřen vztahem:

$$p = \frac{f_{(1)}}{f} \quad (3.1)$$

$f_{(1)}$  je frekvence 1. harmonické střídavé složky

$f$  je frekvence napájecího napětí

Hodnota  $p$  vyjadřuje počet kladných půlvln za periodu původního signálu. [2]



Obrázek 9: Usměrněné napětí šestipulzního usměrňovače

### 3.1.1 Vliv indukčnosti zátěže

Pro obecné odvození je uvažovanou zátěží stejnosměrný motor. Tato zátěž je charakterizována prvky  $R$ ,  $L$  a  $U_i$ . Připojením zátěže dochází k nárůstu proudu do ustálené hodnoty. [2]

Pro ustálený stav platí:

$$u_d = U_d + u_\sigma \quad (3.2)$$

$$i_d = I_d + i_\sigma \quad (3.3)$$

kde  $u_\sigma$ ,  $i_\sigma$  jsou střídavé složky průběhu  $u_d$ ,  $i_d$ . Pro stejnosměrnou složku platí:

$$I_d = \frac{U_d - U_i}{R} \quad (3.4)$$

Pro střídavou složku platí:

$$I_{\sigma n} = \frac{U_{\sigma n}}{\sqrt{R^2 + (\omega_n \cdot L)^2}} \quad (3.5)$$

Index  $n$  označuje příslušný řád harmonické efektivní hodnoty napětí nebo proudu. Ze vztahu je patrné, že k dosažení nulové střídavé složky proudu je zapotřebí velká indukčnost. V reálném zapojení se indukčnost do obvodu usměrňovače připojuje za účelem snížení střídavé složky proudu. [2]

### 3.1.2 Vliv kondenzátoru zátěže

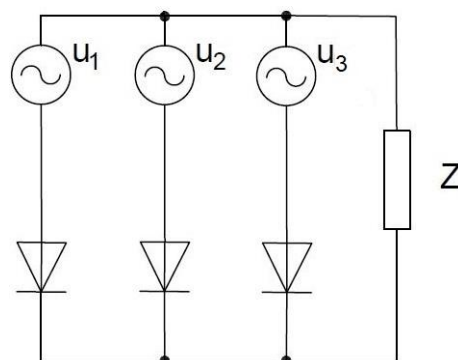
Výstupní průběh usměrněného napětí  $u_d$  je zvlněný a to může mít nepříznivý vliv na činnost připojených spotřebičů. K získání vyhlazeného průběhu usměrněného napětí je připojen na stejnosměrný výstup filtr. Nejjednodušší napěťový filtr je kondenzátor, který je připojený paralelně k zátěži. Při nárůstu napětí dochází k nabíjení kondenzátoru, při poklesu napětí se kondenzátor vybíjí přes zátěž. Tím se zvyšuje střední hodnota usměrněného napětí. [2]

## 3.2 Neřízené usměrňovače

Neřízené usměrňovače jsou tvořeny diodami. Změnu výstupního stejnosměrného napětí nebo proudu lze dosáhnout jen mimo vlastní usměrňovač, např. napájecím napětím, např. pomocí autotransformátoru. Neřízené usměrňovače se používají v můstkovém a uzlovém zapojení, v aplikacích, kde není nutné provádět změny velikosti výstupního napětí nebo proudu pomocí spínání polovodičových prvků. [2]

### 3.2.1 Usměrňovače v uzlovém zapojení

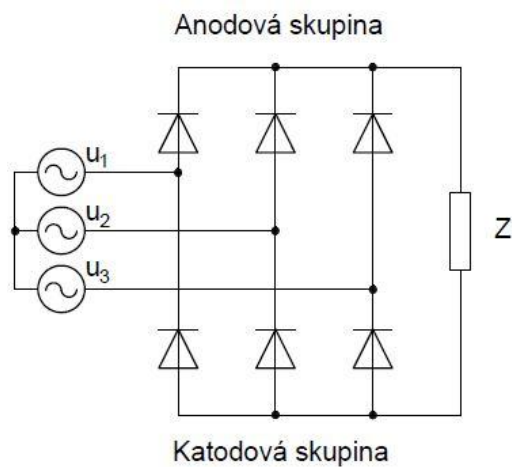
Jedná se o nejjednodušší zapojení usměrňovače. Jednopolzní neřízený usměrňovač je tvořen pouze usměrňovací diodou. Uzlové spojení vzniká připojením další usměrňovací větve. Zátěž je připojena mezi uzlem  $m$  – fázového zdroje a uzlem katod polovodičových součástek. V reálném zapojení se používá spojení  $m = 2, 3, 6$ . Realizace jiného počtu fází se docílí vhodným spojením sekundárního vinutí měničového transformátoru. [5]



Obrázek 10: Uzlové 3 - fázové zapojení

### 3.2.2 Usměrňovače v můstkovém zapojení

Sériové spojení dvou uzlových usměrňovačů vytvoří můstkové zapojení. Používá se v jednofázovém a třífázovém zapojení. U můstkových zapojení prochází proud jednotlivými fázemi v obou směrech. Skupinu hlavních větví polovodičových součástek usměrňovače, které opakovaně komutují nezávisle na jiných, označujeme jako komutační skupinu. Anodovou komutační skupinu tvoří součástky, které jsou připojeny anodami ke zdroji střídavého napětí. Katodovou komutační skupinu tvoří součástky, které jsou naopak připojeny ke zdroji střídavého napětí katodami. [5]



Obrázek 11: Můstkové trojfázové zapojení



## 4 Dimenzování polovodičových součástek

### 4.1 Použití

Tento usměrňovač je realizován pro laboratorní účely, zejména pro napájení kotev stejnosměrných strojů. Jedná se tedy o vysokovýkonné aplikace. U těchto aplikací je velmi důležité, aby usměrňovač zvládl odolávat vysokým závěrným napětím a možným proudovým přetížením.

#### Napět'ové dimenzování součástek

Velmi krátký napět'ový impuls může způsobit napět'ový průraz PN přechodu a poškodit jeho strukturu. Při napět'ovém dimenzování se stanovuje pouze maximální hodnota závěrného nebo blokovacího napětí. [3]

#### Proudové dimenzování součástek

Pro proudové dimenzování polovodičových součástek je důležité znát hodnotu proudu, který bude součástkami procházet. Proudové zatížení součástky je omezeno teplotou přechodu  $\vartheta_j$ . [3]

Velikost teploty je vázána na:

- ztráty vznikající v PN přechodu
- tepelný odpor  $R_{thja}$  chladícího obvodu
- teplotě okolí  $T_a$

Tabulka 1: Zadané hodnoty

Závěrné napětí $U_{RRM}$	1200 V
Jmenovitý proud $I_D$	200 A

## 4.2 Výběr výkonového modulu


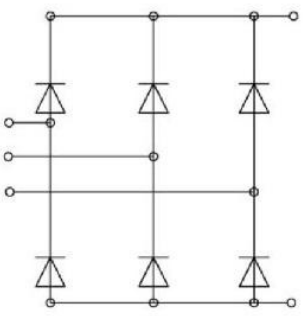
Výběr výkonového modulu byl ovlivněn požadavkem na použití a zadanými hodnotami. Při nežádoucím řízeném usměrnění byla spínacím prvkem zvolena dioda. Nakonec byl vybrán výkonový modul SEMiX501D17Fs od firmy Semikron, který se jmenovitým závěrným napětím 1700 V odolá přepětovým špičkám. Jmenovitý proud 494 A je dostatečný pro možná proudová přetížení.

## 4.3 Výkonový modul SEMiX501D17Fs

Strukturu modulu tvoří třífázové můstkové zapojení diod. Spodní strana modulu je hliníková a slouží pro mechanické spojení s chladičem a k odvodu ztrátového výkonu. Výkonový modul se používá jako rychlý vstupní usměrňovač pro řízení motorů, jako zdroj napájení a pro vysokofrekvenční aplikace. Tabulka 2 zobrazuje důležité elektrické parametry a strukturu modulu.

Tabulka 2: Důležité parametry modulu SEMiX501D17Fs

Absolute Maximum Ratings						
Symbol	Conditions		Values	Unit		
<b>Rect. Diode</b>						
$I_D$	$T_j = 150\text{ °C}$ sinus 180°	$T_c = 85\text{ °C}$	494	A		
		$T_c = 100\text{ °C}$	417	A		
$I_{FSM}$	10 ms	$T_j = 25\text{ °C}$	2740	A		
		$T_j = 150\text{ °C}$	2140	A		
$V_{RSM}$			1700	V		
$V_{RRM}$			1700	V		
$T_j$			-40 ... 150	°C		
<b>Characteristics</b>						
Symbol	Conditions		min.	typ.	max.	Unit
<b>Rectifier Diode</b>						
$V_F$	$T_j = 25\text{ °C}$ , $I_F = 300\text{ A}$ , chiplevel				1.90	V
$V_{(TO)}$	$T_j = 125\text{ °C}$ , chiplevel				1.10	V
$r_T$	$T_j = 125\text{ °C}$ , chiplevel				2.7	mΩ
$I_{RD}$	$T_j = 125\text{ °C}$ , $V_{RD} = V_{RRM}$				14.4	mA
$R_{th(j-c)}$	sin. 180	per diode			0.165	K/W
						K/W
<b>Module</b>						
$R_{th(c-s)}$	per chip					K/W
	per module			0.04		K/W

## 5 Ztráty polovodičových součástek

Při průchodu proudu polovodičovými součástkami vznikají výkonové ztráty, které se projevují jako ztrátový výkon. Ztrátový výkon je obecně určen součinem proudu procházejícího součástkou a napětím na součástce. Způsobuje zahřívání polovodičových součástek. Nadměrné zahřívání součástky má vliv na vlastnosti její polovodičové struktury, při opakovaném zahřívání dochází k předčasnému stárnutí součástky, které může vést ke zničení součástky. Z tohoto důvodu je nutné polovodičové součástky vhodným způsobem chladit a omezovat jejich ztrátový výkon. [6]

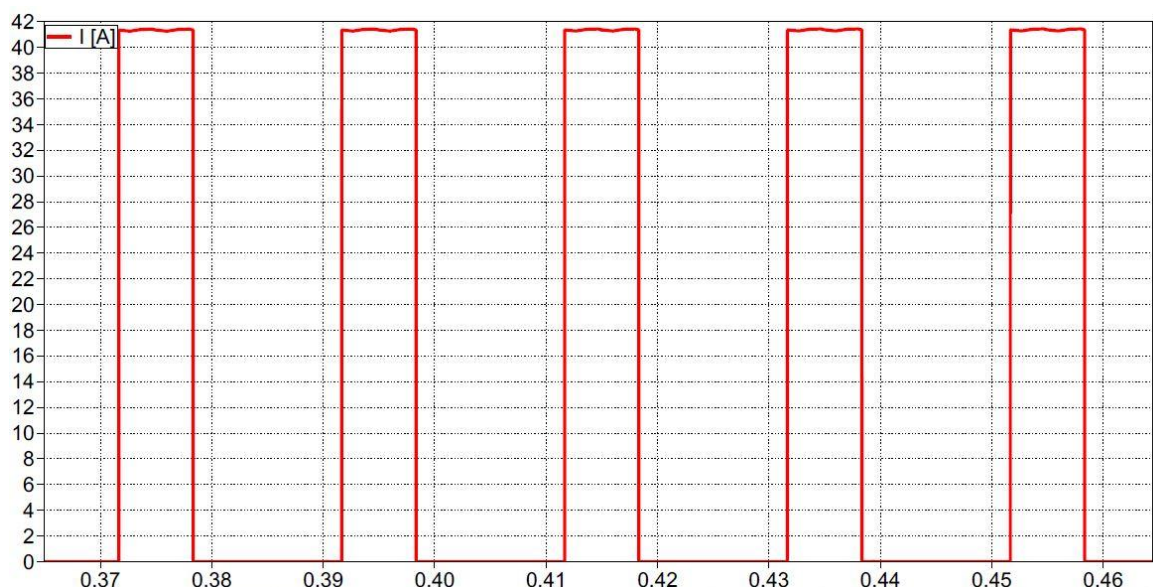
Na součástkách rozlišujeme ztráty:

- propustným proudem
- spínací
- blokovacím proudem
- závěrným proudem
- řídicím proudem

Pro diodové usměrňovače, u kterých jsou spínací kmitočty 50 Hz, jsou ztráty omezeny pouze na ztráty propustným proudem. [6]

## 5.1 Ztráty na usměrňovači

Obrázek 12 zobrazuje průběh proudu procházející usměrňovací diodou do zátěže. Pro výpočet ztrát usměrňovače byla zátěž charakterizována náhradním zapojením stejnosměrného motoru. Pro získání střední a efektivní hodnoty proudu byla použita simulace v programu Plecs.



Obrázek 12: Průběh proudu usměrňovací diodou

Tabulka 3: Vstupní hodnoty simulace

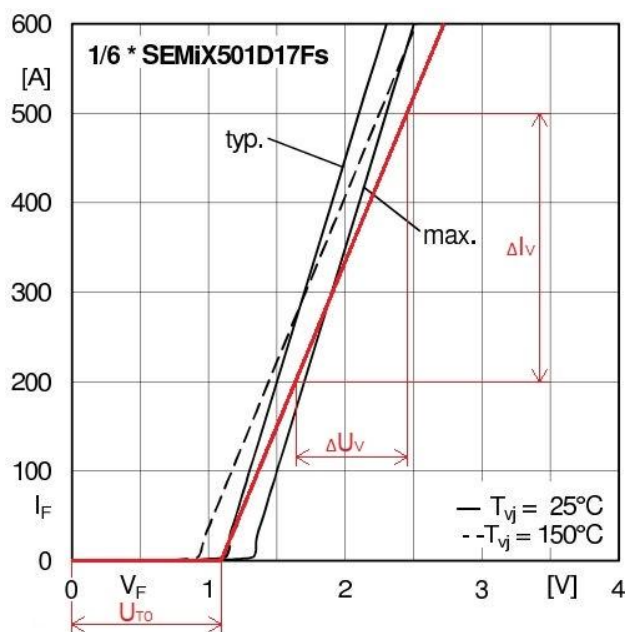
3-fázový zdroj napětí	120 V
Frekvence	50 Hz
Prahové napětí diody	1,9 V
Odpor diody v propustném směru	2,7 mΩ
Parazitní indukčnost vinutého odporu	5 mH
Rezistor	2 Ω
Stejnoseměrný zdroj napětí	120 V

Tabulka 4: Výstupní hodnoty simulace

Amplituda proudu	41,45 A
Střední hodnota proudu $I_{av}$	13,79 A
Efektivní hodnota proudu $I_{RMS}$	23,88 A

### 5.1.1 Výpočet ztrát usměrňovače

Výpočet ztrát propustným proudem vychází z propustných charakteristik polovodičových součástek. Průběh charakteristik zobrazuje Obrázek 13. Při výpočtu se provádí linearizace průběhu, která slouží k získání diferenciálního odporu. [6]



Obrázek 13: V-A charakteristika usměrňovací diody [9]

Výpočet diferenciálního odporu:

$$R_V = \frac{\Delta U_V}{\Delta I_V} = \frac{0,85}{300} = 2,83 \text{ m}\Omega \quad (5.1)$$

Výpočet propustných ztrát:

$$\begin{aligned} P_{fw(AV)} &= U_{TO} \cdot I_{V(AV)} + R_V \cdot I_{Vef}^2 = 1,08 \cdot 13,791 + 2,83 \cdot 10^{-3} \cdot 23,886^2 \\ &= 16,509 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Výsledkem jsou propustné ztráty jedné součástky. Pro získání celkových ztrát modulu musí být tato hodnota vynásobena příslušným počtem prvků v modulu.

Tabulka 5: Ztráty na usměrňovači

	propustné ztráty jedné součástky [W]	celkové ztráty modulu [W]
Usměrňovací dioda	16,509	99,504

## 5.2 Způsoby chlazení

Polovodičová součástka má poměrně malou hmotu, a proto také velmi krátkou tepelnou konstantu. Časové konstanty se pohybují v rozmezí jedné až několika vteřin, proto součástky nesnesou časově náročná přetížení. Optimální vlastnosti součástky lze dodržet jen do určité mezní teploty. Tato teplota se nejčastěji pohybuje od 125 °C do 190 °C. [6]

Tepelný ztrátový výkon, který vzniká průchodem proudu polovodičovou součástkou, se odvádí vedením na povrch chladiče. Úkolem chladiče, na kterém je součástka mechanicky připevněna, je udržovat mezní teplotu součástky. Konstrukce chladiče pro polovodičové součástky vychází z typu chladícího média. [6]

Chladiče mohou být:

- vzduchové
- kapalinové
- odparné

Pro přehlednost a konkrétní použití bude pozornost věnována pouze vzduchovým chladicím systémům.

### 5.2.1 Vzduchové chlazení

Velikost a tvar chladiče závisí na velikosti ztrátového výkonu, rychlosti proudění chladícího vzduchu a použitém materiálu. Vzduchové chladiče jsou nejčastěji vyráběny z hliníku a jeho slitin. Zvětšení chladicí plochy a zlepšení odvodu tepla se provádí žebrováním. Součástka je mechanicky spojena s chladičem takovým způsobem, aby tepelný odpor byl co nejmenší. V místě dotyku pouzdra výkonového modulu a chladiče se nejčastěji používá speciální silikonová pasta, která má za úkol vyplnit nerovnosti a nahradit je vzduchem. [6]

Vzduchové chlazení rozlišujeme na chlazení s přirozenou ventilací a na chlazení s nucenou ventilací. Pro malé hodnoty ztrátového výkonu se používají deskové chladiče a využívá se pouze přirozené ventilace. Profilové chladiče s přirozenou i nucenou ventilací se používají pro vyšší hodnoty ztrátového výkonu. [6]

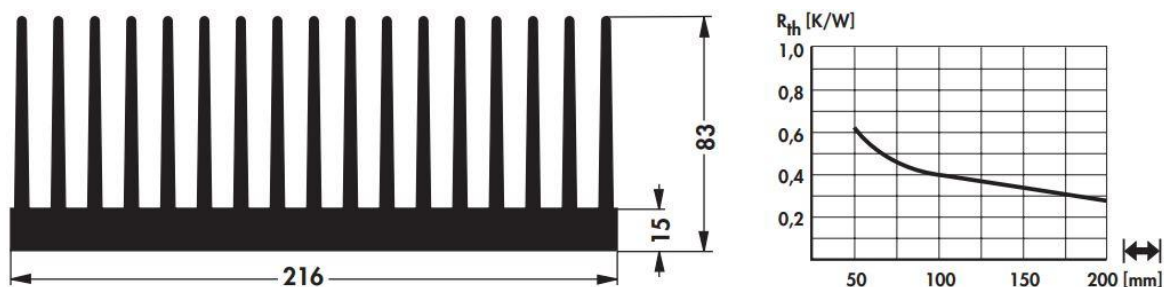
### 5.3 Tepelné dimenzování

Výpočet tepelného odporu chladiče:

$$R_{thra} = \frac{T_{jmax} - T_a - R_{th(j-c)} \cdot P_{tot} - R_{th(c-s)} \cdot P_{tot}}{P_{tot}} \quad (5.3)$$

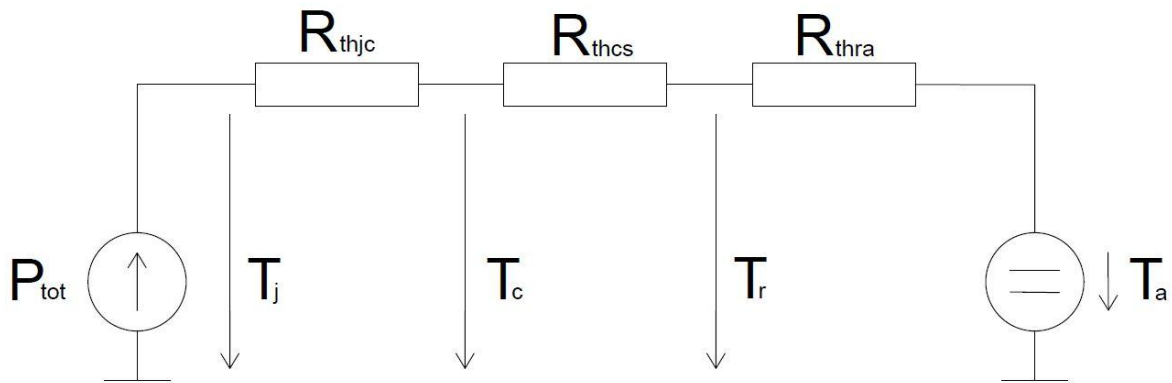
$$R_{thra} = \frac{150 - 40 - 0,165 \cdot 99,054 - 0,04 \cdot 99,054}{99,054} = 0,9 \text{ K/W} \quad (5.4)$$

Tepelný odpor chladiče je 0,9 K/W. Byl vybrán chladič od firmy Fischer Elektronik typ SK 102. Z Obrázek 14 je patrné, že hodnota tepelného odporu chladiče při délce 200 mm odpovídá 0,3 K/W. Vybraný chladič je dlouhý 300 mm a hodnota tepelného odporu je přibližně 0,2 K/W.



Obrázek 14: Chladič SK102, hodnota tepelného odporu chladiče [10]

## 5.4 Náhradní tepelné schéma



Obrázek 15: Náhradní tepelné schéma [6]

Teplota čipu usměrňovací diody:

$$T_j = P_{tot} \cdot (R_{thjc} + R_{thcs}) + P_{tot} \cdot R_{thra} + T_a \quad (5.5)$$

$$T_j = 99,054 \cdot (0,165 + 0,04) + 99,054 \cdot 0,2 + 40 = 80,12 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.6)$$

Teplota chladiče:

$$T_r = P_{tot} \cdot R_{thra} + T_a \quad (5.7)$$

$$T_r = 99,054 \cdot 0,2 + 40 = 59,81 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.8)$$

## 5.5 Teplotní čidlo

Pro optimální funkci usměrňovače je zapotřebí snímání teploty, a proto byl chladič opatřen teplotním čidlem. Jedná se o rozpínací bimetalový termostat TRSA075, který reaguje při teplotě 75 °C. Toto čidlo může být použito v ovládacím obvodu, např. pro vypnutí silového okruhu nebo pro snížení výkonu, resp. pro sepnutí ventilátoru pro aktivní chlazení.



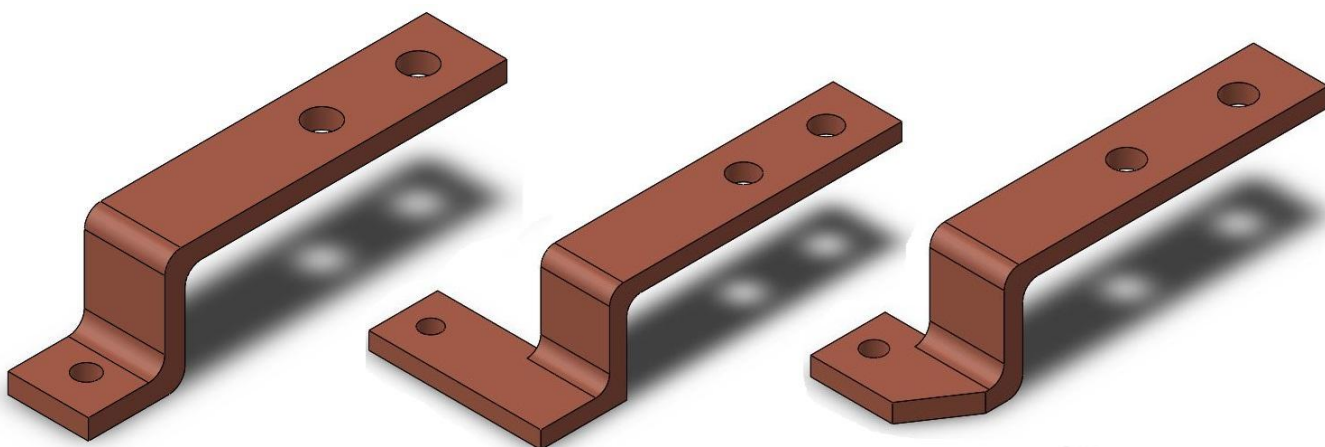


svorek zvolena měď. Volba rozměru měděného pásu byla podřízena maximální proudové hustotě. Proudová hustota je veličina, která udává velikost protékajícího proudu plochou. Je známo, že maximální proudová hustota mědi je  $4 \text{ A/mm}^2$ . Výpočet minimální plochy byl dimenzován pro hodnotu výstupního stejnosměrného proudu 200 A.

$$J = \frac{I}{S} \rightarrow S = \frac{I}{J} = \frac{200}{4} = 50 \text{ mm}^2 \quad (6.1)$$

Z výsledku je zřejmé, že pro zmiňovanou hodnotu proudu je zapotřebí minimální průřez  $50 \text{ mm}^2$ . Při výběru měděného pásu byl brán ohled na možné přetěžování, a také na mechanickou pevnost svorek. Nakonec byl vybrán pás o průřezu  $125 \text{ mm}^2$ .

Následně muselo dojít k řezání měděného pásu na příslušné rozměry a docílení potřebného ohybu. Ohyb byl proveden ohýbacím zařízením ve výzkumném centru RICE. Dalším krokem bylo svaření částí měděných pásů pro docílení konstrukce svorek. Svařování mědi bylo provedeno tvrdým pájením pomocí stříbrné pájky. Po dosažení navržených rozměrů následovalo vyvrtání otvorů pro mechanické spojení. Na závěr došlo k rozleštění měděných svorek pro zlepšení vizuálního efektu.



Obrázek 17: Výsledné modely připojovacích svorek

## 7 Realizace a testování usměrňovače

První fází realizace výkonového usměrňovače bylo mechanické spojení modulu s chladičem. Modul byl umístěn do středu hliníkového chladiče tak, aby bylo dosaženo optimálního rozložení teploty. Před mechanickým spojením byla styková plocha modulu a chladiče opatřena speciální silikonovou pastou, která zaplní nerovnosti a nahradí tak špatně tepelně vodivé vzduchové mezery.

Následně probíhalo připevnění izolátorů k hliníkovému chladiči. Izolátory byly rozmístěny na chladič podle konstrukce jednotlivých připojovacích svorek, aby nedocházelo k mechanickému namáhání. Izolátory jsou spojeny s chladičem pomocí závitových tyčí.

Poslední fází bylo osazení teplotního čidla na chladič. Čidlo je umístěno v blízkosti modulu, kde se předpokládá největší oteplení. Výstup čidla je připevněn k chladiči přes pertinaxovou destičku a z důvodu snadného přístupu je vyveden na okraj chladiče.

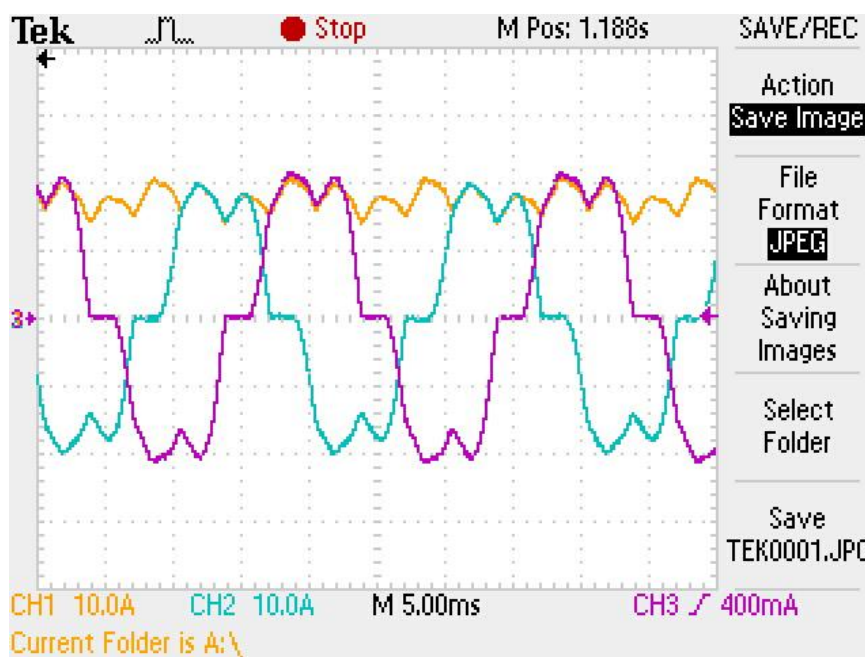


Obrázek 18: Usměrňovač

## 7.1 Měření veličin

Cílem měření bylo ověření správného usměrnění střídavého proudu. Pro získání průběhu proudu je potřeba speciální proudové sondy. Proudová sonda je střídavý proudový převodník, který funguje na principu transformátoru. Primární strana je tvořena jedním závitěm, sekundární strana má závitů více. Jako magneticky vodivé jádro slouží toroidní kroužek, nebo u průmyslového provedení skládání jádro bez vzduchové mezery, které je zabudované do proudových kleští. Proudová sonda umožňuje galvanické oddělení měřicího obvodu. Používá se např. pro měření průběhu proudů spínaných zdrojů, výkonových a frekvenčních měničů. [8]

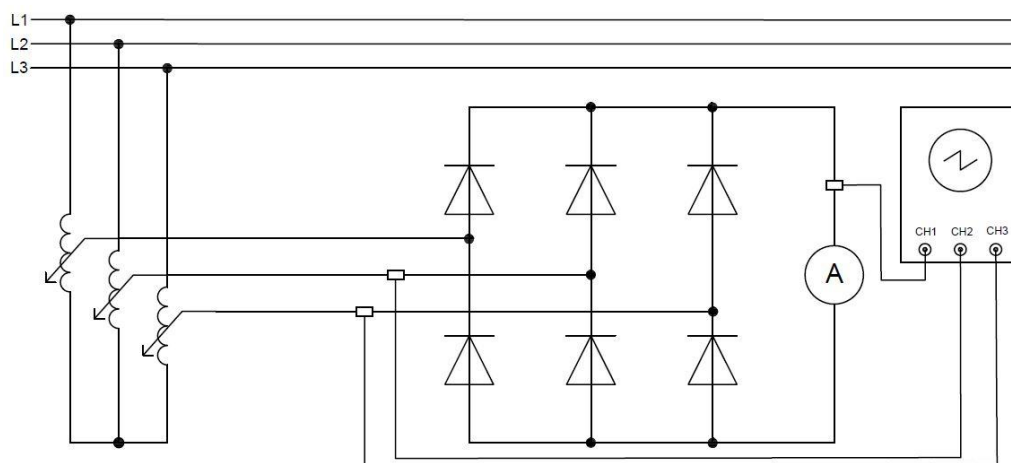
Obrázek 19 znázorňuje proudové průběhy. Fialový a modrý průběh znázorňuje vstupní střídavé proudy. Žlutý průběh naopak výstupní stejnosměrný proud.



Obrázek 19: Vstupní a výstupní průběhy proudu

## 7.2 Oteplovací zkouška

Výkonový usměrňovač byl podroben oteplovací zkoušce. Zkouška měla za úkol stanovit trvalý proud při pasivním chlazení. Z datového listu byla zvolena mezní provozní teplota chladiče na 80 °C.



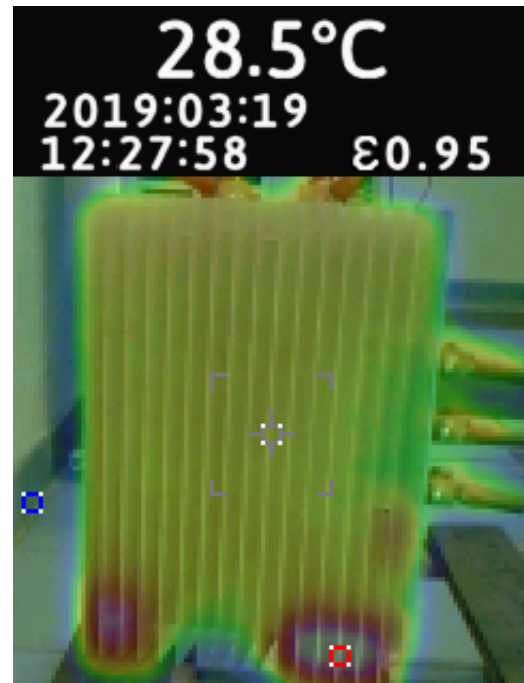
Obrázek 20: Schéma zapojení při oteplovací zkoušce a měření osciloskopem

Usměrňovač byl připojen k třífázovému transformátoru a výstupní svorky byly spojeny nakrátko. Spojení nakrátko bylo tvořeno dvěma paralelními vodiči, které sloužily k rovnoměrnému rozložení proudu a předejití tepelnému namáhání izolace. Usměrňovač byl umístěn v optimální vertikální pozici, aby byl zajištěn přístup vzduchu k žebrování chladiče. Teplota chladiče byla odebrána pomocí kontaktní termočláňkové sondy. Po dobu měření byla sonda přiložena na pevně daném místě chladiče. Tento bod byl v těsné blízkosti modulu, kde se předpokládalo největší ohřívání chladiče. K získání závislosti proudu na teplotě byla hodnota výstupního proudu měřena klešťovým ampérmetrem.

Pro kontrolu rozložení teploty chladiče a modulu byla použita termokamera Fluke VT04. Pořízené snímky bylo následně možné zobrazit v počítači pomocí programu SmartView. Snímky jsou k nalezení v přílohách této práce.



Obrázek 21: Termovizní snímek usměrňovače



Obrázek 22: Termovizní snímek usměrňovače

### 7.2.1 Postup měření kontaktní sondou

Po zapojení bylo potřeba pomocí autotransformátoru nastavit hodnotu výstupního stejnosměrného proudu. K ověření tepelného chování usměrňovače byla prvotní hodnota nastavena s velkou rezervou oproti jmenovitému proudu. Při měření byla odečítána teplota chladiče v ekvidistančních časových intervalech.

Hodnota odebíraného proudu byla 80 A. Hodnoty teploty a proudu byly odebrány z počátku v časovém intervalu tří minut, následně byly intervaly prodlužovány. Pro získání průběhu oteplení chladiče byly okamžité hodnoty teploty zaznamenávány do tabulkového programu Excel, který rovnou vytvářel grafické zobrazení. Na základě toho bylo možné určit, kdy dojde k ustálení teploty chladiče. Při této hodnotě proudu se teplota chladiče po 60-ti minutách ustálila na teplotě 70,2 °C. Pro získání mezní teploty chladiče bylo potřeba zvýšit hodnotu odebíraného proudu. Pro další měření byla zvolena hodnota 96 A.

## 7.2.2 Naměřené hodnoty

Tabulka 6: Naměřené hodnoty

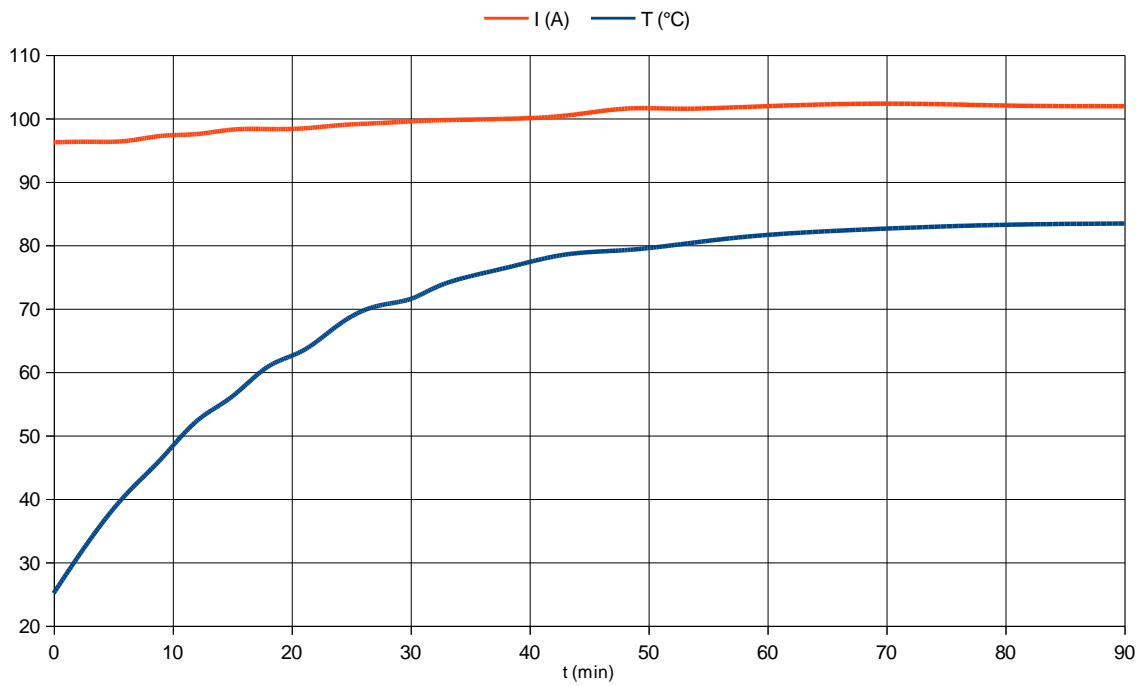
t (min)	$T_r$ (°C)	$\Delta\vartheta$ (K)	I (A)
0	25,1	0	96,2
3	33,4	8,3	96,3
6	40,5	15,4	96,4
9	46,2	21,1	97,2
12	52,2	27,1	97,5
15	56,1	31	98,2
18	60,8	35,7	98,3
21	63,4	38,3	98,4
24	67,5	42,4	98,9
27	70,3	45,2	99,2
30	71,5	46,4	99,5
33	74	48,9	99,7
38	76,4	51,3	99,9
43	78,5	53,4	100,4
48	79,2	54,1	101,5
53	80,2	55,1	101,5
60	81,6	56,5	101,9
70	82,6	57,5	102,3
80	83,2	58,1	102
90	83,4	58,3	101,9

Při měření byla určena okolní teplota pomocí termočláňkové sondy  $T_a = 25$  °C.

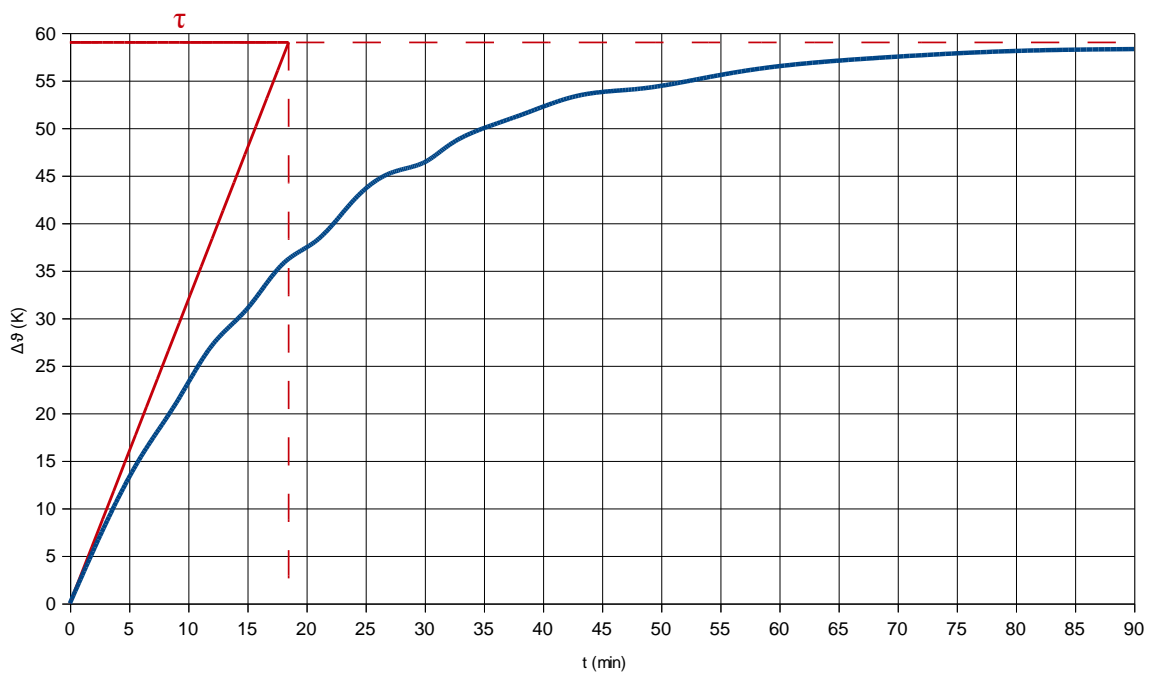
Výpočet oteplení:

$$\Delta\vartheta = T_r - T_a = 70,3 - 25,1 = 45,2 \text{ K} \quad (7.1)$$

### 7.2.3 Grafické zobrazení naměřených hodnot



Obrázek 23: Závislost proudu a teploty na čase



Obrázek 24: Oteplovací charakteristika



### 7.3 Vyhodnocení oteplovací zkoušky

Z naměřených hodnot je patrné, že při výstupním proudu 96 A bylo dosaženo mezní teploty chladiče 80 °C. Po 40 minutách oteplovací zkoušky už nedocházelo k výraznému oteplení chladiče. Teplota chladiče se ustálila po 90 minutách na hodnotě 83,4 °C. Při měření by se měla hodnota proudu udržovat konstantní. V konkrétním měření vykazuje závislost výstupního proudu na teplotě mírný nárůst. Z teoretických předpokladů je známo, že hodnota proudu by měla klesat se zvyšujícím se oteplením. Nárůst proudu může být zřejmě způsobený zvyšujícím se napětím v síti.

Obrázek 24 zobrazuje průběh oteplení chladiče. Z oteplovací charakteristiky byla graficky určena časová konstanta  $\tau$  na hodnotu 18 min. Je obecně dáno, že za dobu  $5\tau$  dojde k ustálení průběhu, pro konkrétní průběh době  $5\tau$  odpovídá 90 minut. Z výsledných hodnot je patrné, že po této době se průběh oteplení stává konstantním.

Cílem zkoušky bylo stanovení trvalého odebíraného proudu při pasivním chlazení. Z oteplovací zkoušky je zřejmé, že pasivní chlazení bude dostačující pro proudy do 90 A.

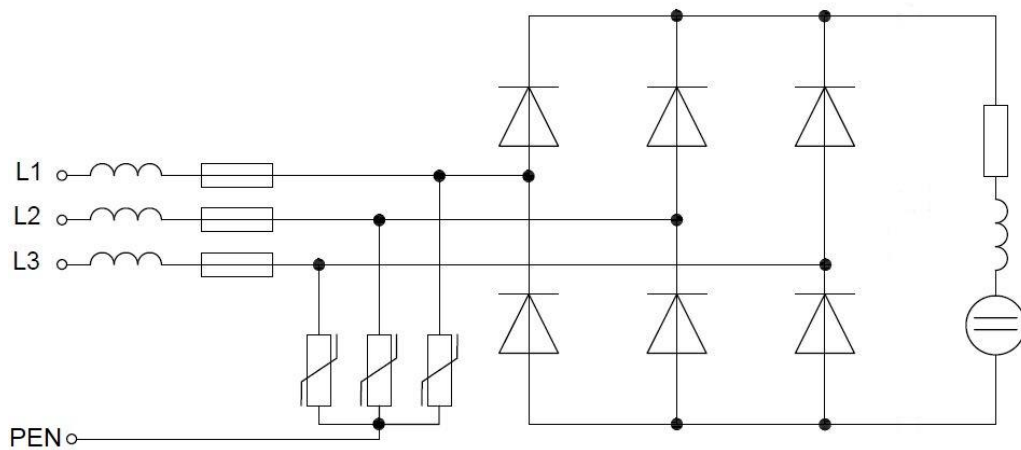
## Závěr

Výsledkem práce je usměrňovač, který bude sloužit pro laboratorní měření. Tento měnič bude nejčastěji napájen pomocí laboratorních pultů. Usměrňovač je tvořen výkonovým modulem SEMiX501D17Fs od firmy Semikron, který je určen na jmenovitý proud 417 A a napětí 1200 V. Práce obsahuje výpočet ztrátového výkonu, který byl stanoven na hodnotu 99,504 W. Následně bylo provedeno tepelné dimenzování, které určilo hodnotu tepelného odporu chladiče na 0,9 K/W. Byl vybrán chladič SK102 od firmy Fischer Elektronik s tepelným odporem 0,2 K/W. Bodem zadání bylo navrzení a realizace měděných svorek. Pro stavbu svorek byl vybrán měděný pás o průřezu 125 mm<sup>2</sup>, který splňuje elektrické i mechanické požadavky. Podle návrhu v programu SolidWorks následovalo konstrukční provedení. Výsledkem je pět připojovacích svorek, které slouží k snadnému používání měniče při výuce.

Požadavkem práce bylo opatřit zařízení teplotním čidlem TRSA075 pro sledování teploty chladiče. Toto čidlo může být zapojeno do ovládacího obvodu pomocí stykače a při překročení mezní teploty může dojít např. k odpojení napájecího zdroje.

Zařízení bylo podrobena oteplovací zkoušce, která měla stanovit trvalý jmenovitý proud při vybraném pasivním chlazení. Postup měření je popsán v kapitole 7.2. Tento způsob chlazení je dostačující pro trvalé proudové zatížení do 90 A. Dalším testováním bylo zobrazení správně usměrněného proudu digitálním osciloskopem. Pro ověření optimálního rozložení teploty chladiče byla použita termokamera. Dalším plánovaným testováním bylo získání hystereze spínání teplotního čidla, které se z časových důvodů nestihlo.

Dalším cílem této práce je zvýšení hodnoty trvalého odebíraného proudu. K uskutečnění tohoto cíle bude zapotřebí aktivního chlazení, které bude odvádět teplý vzduch z prostoru žeber chladiče. Při realizaci výkonového usměrňovače bez zadaného konstrukčního provedení by výsledné zařízení bylo vybaveno jištěním. Pro jištění proti nadproudům se používají rychlé pojistky. K ochraně proti přepětí se používají varistory. Zapojením indukčnosti do obvodu dochází k vyhlazení odebíraného proudu ze sítě. Obrázek 25 zobrazuje schéma zapojení usměrňovače doplněné o jistící prvky a zátěž, která je tvořena náhradním zapojením stejnosměrného motoru.



Obrázek 25: Schéma usměrňovače s jištěním

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika*. V Plzni: Západočeská univerzita, 1994. ISNB 80-7082-136-1.
- [2] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonový elektronika*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2005. ISNB 80-7043-422-8.
- [3] PAVELKA, Jiří a Zdeněk ČEŘOVSKÝ. *Výkonová elektronika* [online]. [cit. 2019-5-18]. Dostupné z: <http://cvut.falconis.cz/semestr-4/ve1/vykonova-elektronika-Cerovsky-Pavelka.pdf>
- [4] KOLEKTIV AUTORŮ. *Dioda, tranzistor a tyristor názorně*. Praha, 1979. L26-B1-IV-31/52 372.
- [5] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003. ISNB 80-7082-695-9.
- [6] VONDRÁŠEK, František, Jan LANGHAMMER, Aleš PEROUTKA, Jan MĚŠÍČEK a Jan MOLNÁR. *Projektování výkonových polovodičových měničů-vybrané stati*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISNB 978-80-7043-653-0.
- [7] CHLEBIŠ, Petr. *Výkonová elektronika I* [online]. [cit. 2019-5-18]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~ste37/Elektricke%20pohony%202018/03f%20-%20Vykonova%20elektronika%20I.pdf>
- [8] Osciloskopické sondy. [online]. [cit. 2019-5-18]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=5482>
- [9] SEMiX501D17Fs. *Semikron* [online]. [cit. 2019-5-18]. Dostupné z: <https://www.semikron.com/products/product-classes/bridge-rectifier-modules/detail/semix501d17fs-27891400.html>
- [10] SK 102. *Fischer elektronik*. [online]. [cit. 2019-5-18]. Dostupné z: [https://www.fischerelektronik.de/fileadmin/fischertemplates/download/Katalog/heat\\_sinks.pdf](https://www.fischerelektronik.de/fileadmin/fischertemplates/download/Katalog/heat_sinks.pdf)
- [11] SEMiX. *Semikron* [online]. [cit. 2019-5-18]. Dostupné z: <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-technical-explanation-semixr-igbt-modules-bridge-rectifier-family-en-2009-10-14-rev-03.pdf>
- [12] KUBIŠ, Vojtěh a Martin ŠTURC. *Křemík, 2. nejrozšířenější prvek na Zemi* [online]. [cit. 2019-5-12]. Dostupné z: <https://ukolysturc.elektropotkan.cz/chemie/data1/kremik/kremik.pdf>

## Seznam obrázků

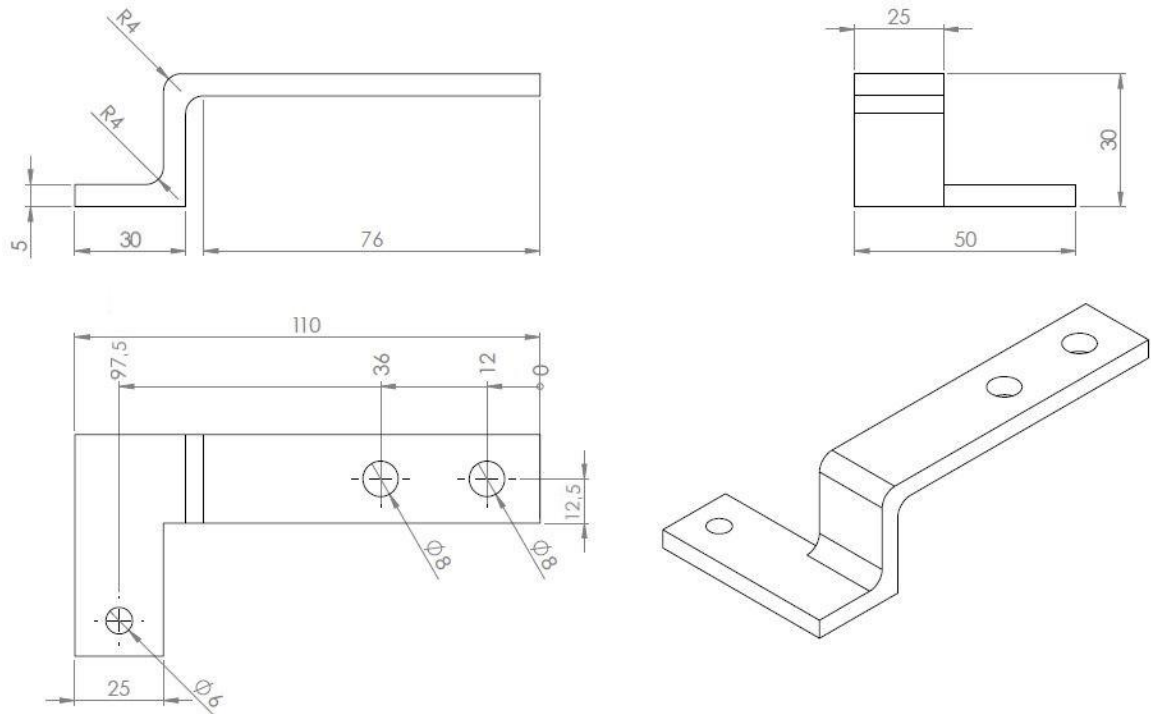
OBRÁZEK 1: KRYSTALICKÁ MŘÍŽKA KŘEMÍKU, ZA NORMÁLNÍCH PODMÍNEK (VLEVO), PO ZAHŘÁTÍ (VPRAVO) [12].....	12
OBRÁZEK 2: POLOVODIČ TYPU P (VLEVO) A POLOVODIČ TYPU N (VPRAVO) [12] .....	13
OBRÁZEK 3: PN PŘECHOD .....	14
OBRÁZEK 4: PROPUSTNĚ POLARIZOVANÝ PN PŘECHOD .....	14
OBRÁZEK 5: ZÁVĚRNĚ POLARIZOVANÝ PN PŘECHOD.....	15
OBRÁZEK 6: STRUKTURA DIODY .....	16
OBRÁZEK 7: SCHÉMATICKÁ ZNAČKA DIODY.....	17
OBRÁZEK 8: ČASOVÝ PRŮBĚH VYPÍNÁNÍ DIODY [7] .....	18
OBRÁZEK 9: USMĚRNĚNÉ NAPĚTÍ ŠESTIPULZNÍHO USMĚRŇOVAČE.....	21
OBRÁZEK 10: UZLOVÉ 3 - FÁZOVÉ ZAPOJENÍ.....	23
OBRÁZEK 11: MŮSTKOVÉ TROJFÁZOVÉ ZAPOJENÍ .....	24
OBRÁZEK 12: PRŮBĚH PROUDU USMĚRŇOVACÍ DIODOU.....	28
OBRÁZEK 13: V-A CHARAKTERISTIKA USMĚRŇOVACÍ DIODY [9].....	29
OBRÁZEK 14: CHLADIČ SK102, HODNOTA TEPELNÉHO ODPORU CHLADIČE [10].....	31
OBRÁZEK 15: NÁHRADNÍ TEPELNÉ SCHÉMA [6] .....	32
OBRÁZEK 16: ILUSTRÁČNÍ VÝKRES PŘIPOJOVACÍ SVORKY.....	33
OBRÁZEK 17: VÝSLEDNÉ MODEL Y PŘIPOJOVACÍCH SVOREK .....	34
OBRÁZEK 18: USMĚRŇOVAČ .....	35
OBRÁZEK 19: VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ PRŮBĚHY PROUDU .....	36
OBRÁZEK 20: SCHÉMA ZAPOJENÍ PŘI OTEPLOVACÍ ZKOUŠCE A MĚŘENÍ OSCIOSKOPEM.....	37
OBRÁZEK 21: TERMOVIZNÍ SNÍMEK USMĚRŇOVAČE.....	38
OBRÁZEK 22: TERMOVIZNÍ SNÍMEK USMĚRŇOVAČE.....	38
OBRÁZEK 23: ZÁVISLOST PROUDU A TEPLoty NA ČASE .....	40
OBRÁZEK 24: OTEPLOVACÍ CHARAKTERISTIKA .....	40
OBRÁZEK 25: SCHÉMA USMĚRŇOVAČE S JIŠTĚNÍM.....	43

## Seznam tabulek

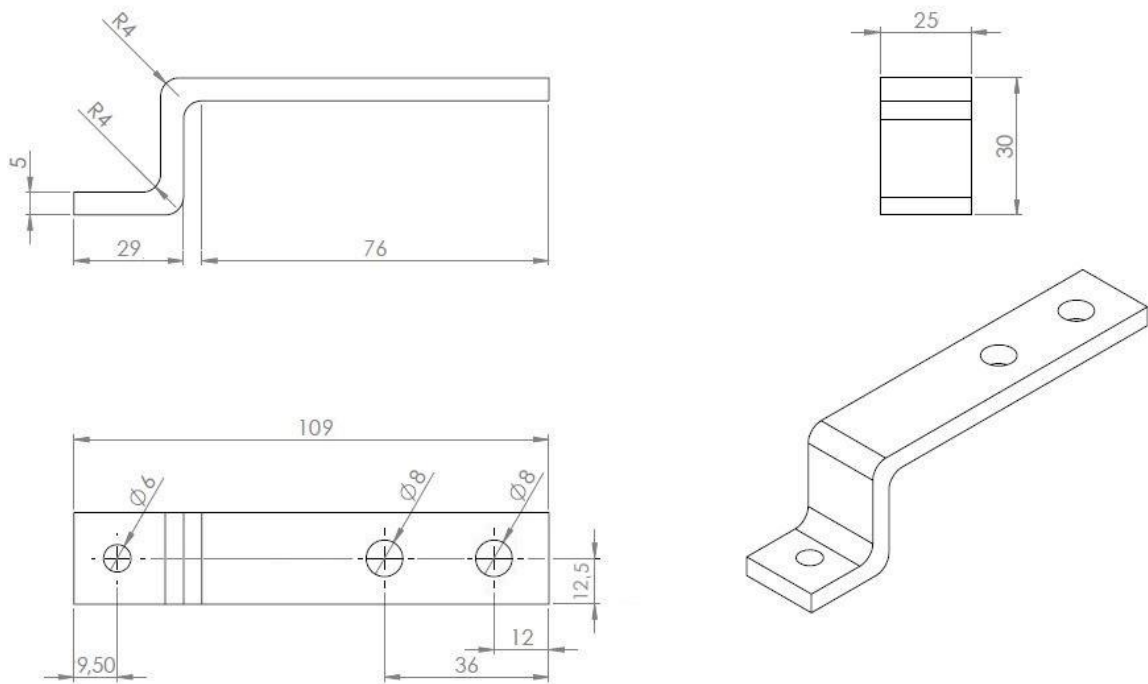
TABULKA 1: ZADANÉ HODNOTY .....	25
TABULKA 2: DŮLEŽITÉ PARAMETRY MODULU SEMIX501D17Fs .....	26
TABULKA 3: VSTUPNÍ HODNOTY SIMULACE .....	28
TABULKA 4: VÝSTUPNÍ HODNOTY SIMULACE .....	28
TABULKA 5: ZTRÁTY NA USMĚRŇOVAČI .....	29
TABULKA 6: NAMĚŘENÉ HODNOTY .....	39

## Přílohy

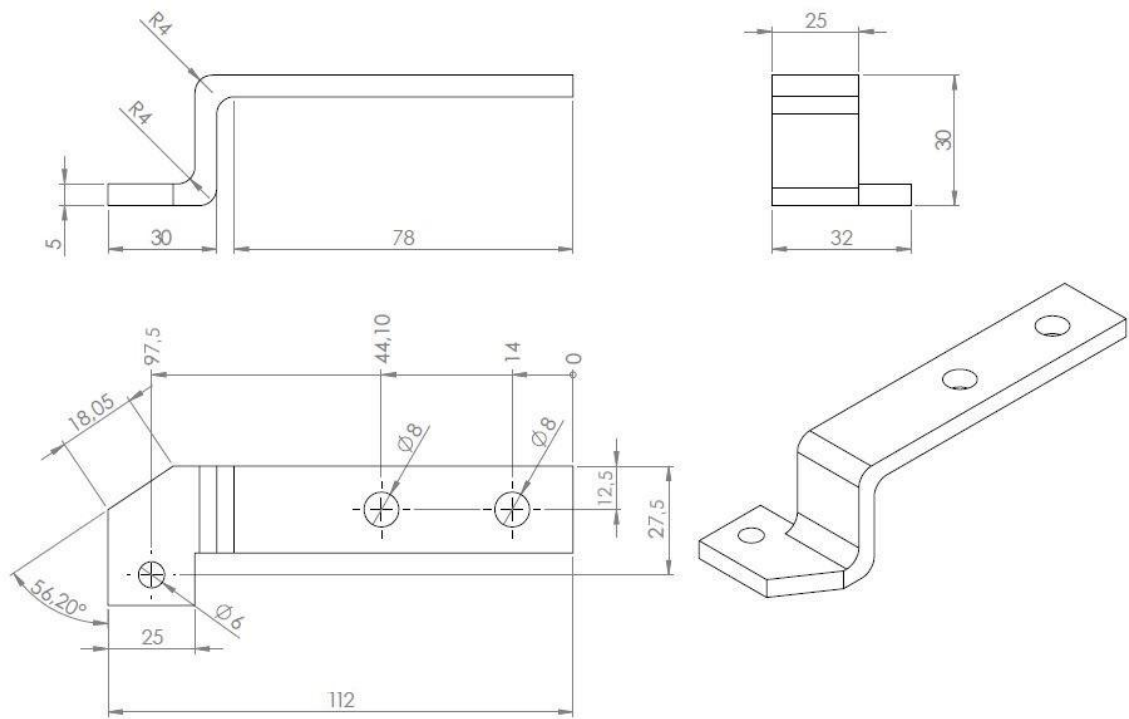
### Příloha A. 1 – Výkres přípojovací svorky č. 1



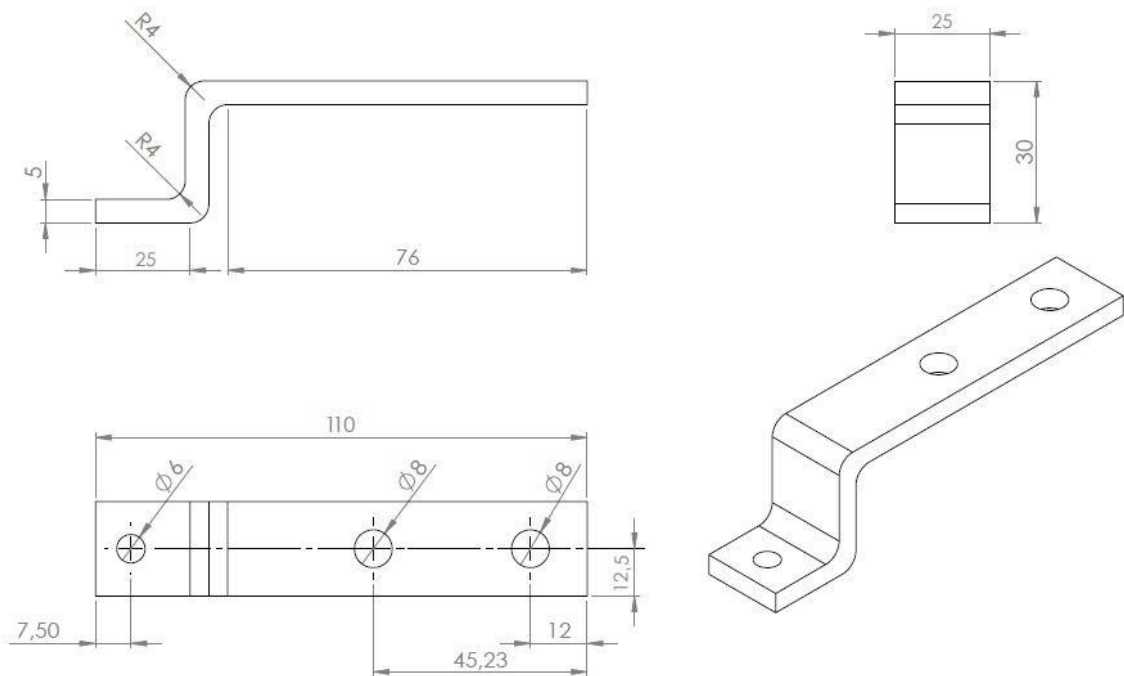
### Příloha A. 2 – Výkres přípojovací svorky č. 2



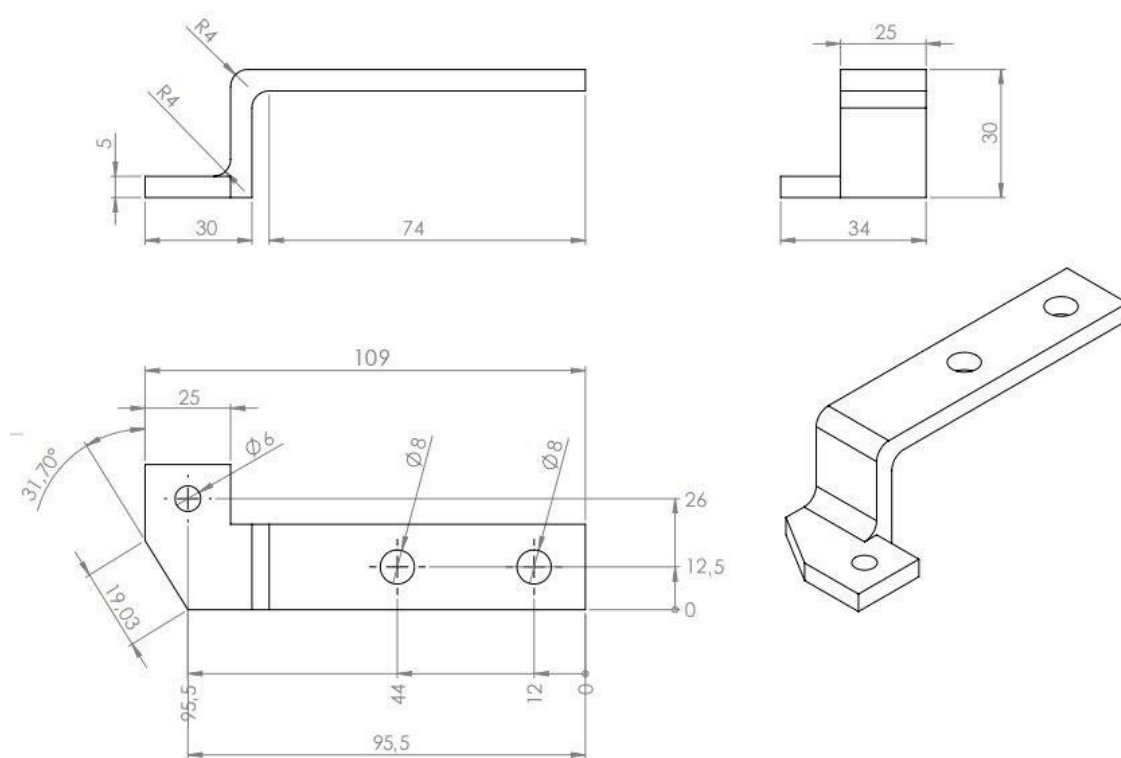
**Příloha A. 3 – Výkres připojovací svorky č. 3**



**Příloha A. 4 – Výkres připojovací svorky č. 4**



**Příloha A. 5 – Výkres připojovací svorky č. 5**

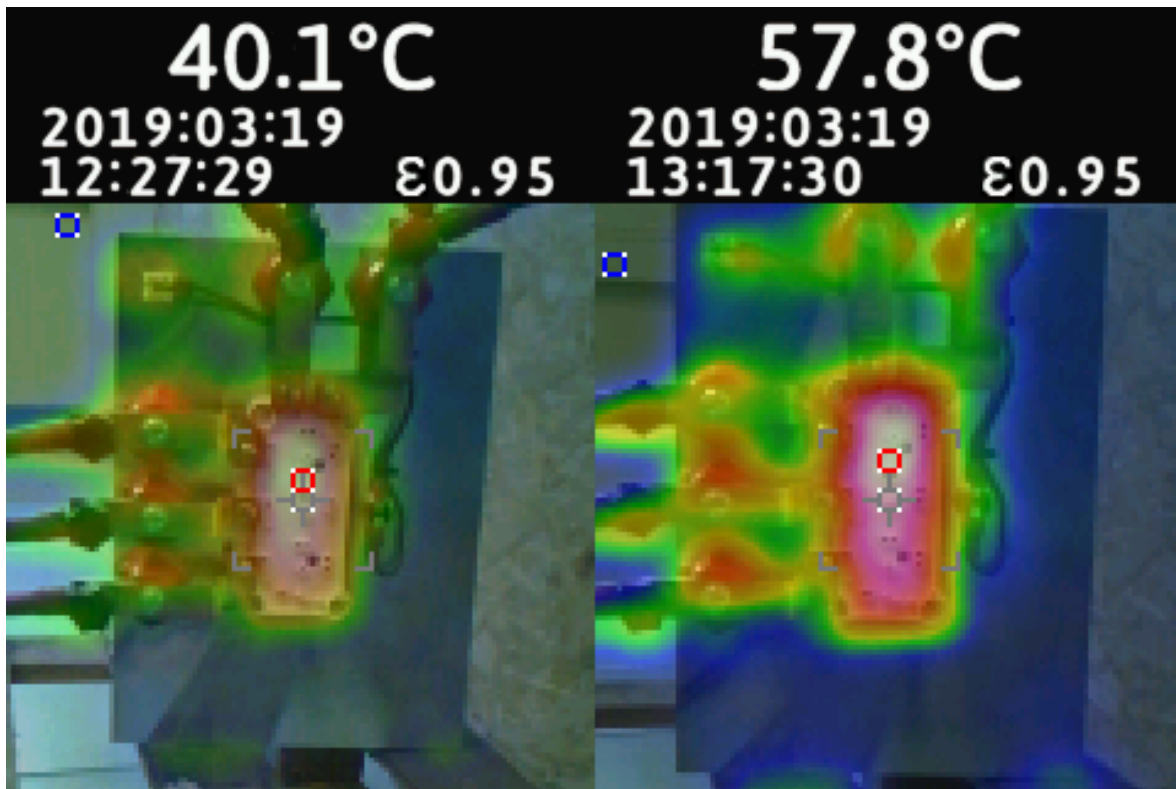


**Příloha A. 6 – Připojovací svorky**





**Příloha B. 1** – Snímek z termokamery – detail usměrňovače



**Příloha B. 2** – Snímek z termokamery – detail chladiče

