



Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

NÁVRH USMĚRŇOVAČE

Autor práce: Jan Leffler

Vedoucí práce: doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.

Plzeň 2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan LEFFLER**
Osobní číslo: **E14B0033P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Návrh usměrňovače**
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. Uvedte možná zapojení 1f a 3f usměrňovačů.
2. Navrhněte konkrétní usměrňovač pro 1f a 3f síť, sin 50 Hz.
3. Dimenzujte chladič pro součástky.
4. Zapojení realizujte a odzkoušejte.
5. Shrňte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- 1. Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

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

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kás, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá problematikou návrhu a realizace usměrňovače, který je schopen po snadné změně v topologii zapojení usměrnit jednofázový či třífázový průběh napětí. Práce obsahuje teoretickou část, která slouží jako přehled pro danou problematiku. V této části práce jsou shrnuty základní poznatky o polovodičích, součástkách, z nichž jsou usměrňovače sestaveny, typech usměrňovačů, topologiích polovodičových usměrňovačů a chlazení výkonových měničů. Praktická část se již zaměřuje na návrh obvodu, ověření jeho správné funkce simulací a případné modifikace zařízení. Dále je zde řešeno dimenzování vodičů i chladiče a samotná realizace měniče a jeho testování.

Klíčová slova

Usměrňovač, návrh, simulace, dimenzování, chlazení, konstrukce, testování

Abstract

This submitted Bachelors Thesis deals with the problematics of design and realization of rectifier, which is capable rectify one-phase or three-phase waveform of voltage after easy change of topology of connection. The thesis contains Theoretical part, which is an overview of the matter. This part summarizes a basic knowladge of semiconductors, the components which are rectifiers made of, types of rectifiers, topologies of semiconductor rectifiers and cooling of power converters. Practical part is focusing on a design of circuit, verification of correct function by simulation and possible modifications of device. Furthermore dimensioning of conductors and heatsink, realization of converter and its testing are solved.

Keywords

Rectifier, design, simulation, dimensioning, cooling, construction, testing

Prohlášení

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, který byl použit při řešení této bakalářské práce, byl legální.

.....
podpis

V Plzni dne 2. června 2017

Jan Leffler

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Bohumilu Skalovi, Ph.D. za pomoc v oblasti metodiky, rady, konstruktivní připomínky a postřehy. Rovněž bych rád poděkoval Katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky za umožnění spolupráce a uvolnění prostor a prostředků pro splnění zadaného úkolu. Dále bych touto cestou rád poděkoval své rodině, která mi při studiu byla oporou.

Obsah

Úvod	12
1 Polovodiče a polovodičové součástky	13
1.1 Polovodivost	13
1.2 Dioda	13
1.3 Tyristor	14
1.4 IGBT tranzistor	16
2 Usměrňovače	17
2.1 Důvody použití usměrňovačů	17
2.2 Zatěžování usměrňovačů	17
2.2.1 Konkrétní aplikace pro usměrňovače	17
2.3 Typy usměrňovačů dle historického vývoje	18
2.3.1 Mechanické usměrňovače	18
2.3.2 Elektronkové usměrňovače	18
2.3.3 Rtuťové usměrňovače	18
2.3.4 Polovodičové usměrňovače	19
2.4 Typy usměrňovačů dle možnosti řízení	19
2.4.1 Neřízené usměrňovače	19
2.4.2 Polořízené usměrňovače	19
2.4.3 Plně řízené usměrňovače	20
2.5 Typy usměrňovačů dle typu komutace	20
3 Provedení 1f a 3f usměrňovačů	21
3.1 Pulznost usměrňovače	21
3.2 Jednofázové polovodičové usměrňovače	21
3.2.1 Jednocestné usměrnění	21
3.2.2 Dvoucestné usměrnění	22
3.3 Třífázové polovodičové usměrňovače	23
3.3.1 Trojpulzní zapojení	23
3.3.2 Šestipulzní zapojení	23
3.3.3 Dvanáctipulzní zapojení	24
3.4 Pulzní usměrňovače	24
4 Chlazení výkonových měničů	26
4.1 Vliv změny teploty na měnič	26
4.2 Základní způsoby přenosu tepla	26

4.2.1	Přenos tepla vedením	26
4.2.2	Přenos tepla prouděním	26
4.2.3	Přenos tepla radiací	27
4.2.4	Shrnutí	27
4.3	Způsoby chlazení používané v elektronice	28
4.3.1	Chlazení vzduchem - pasivní	28
4.3.2	Chlazení vzduchem - aktivní	29
4.3.3	Chlazení pomocí kapalného média	30
4.3.4	Další způsoby chlazení	30
5	Návrh usměrňovače	32
5.1	Požadavky	32
5.2	Výběr součástek	32
5.3	Schéma zapojení	33
5.4	Simulace a jejich výstupy	34
5.4.1	Pracovní režim 1f USM	34
5.4.2	Pracovní režim 1f USM s C modifikací	35
5.4.3	Pracovní režim 3f USM	37
5.4.4	Pracovní režim 3f USM s RL zátěží	37
5.5	Volba vodičů	39
5.6	Výpočet střední hodnoty výstupu	40
5.7	Dimenzování chladiče	40
6	Realizace a testování	43
6.1	Stavba zařízení	43
6.2	Kontrola správné činnosti	43
6.2.1	Měření osciloskopem	44
6.3	Zatěžovací zkouška	44
6.3.1	Měření termokamerou	45
6.3.2	Kontaktní měření teploty	46
6.4	Určení tepelného odporu reálného chladiče	46
6.5	Kryt	47
7	Závěr	49
	Přílohy	52

Seznam použitých symbolů a zkratek

C	[F]	kapacita
C_F	[F]	kapacita filtračního kondenzátoru
f	[Hz]	frekvence/kmitočet
I_C	[A]	proud filtračním kondenzátorem
I_F	[A]	proud v propustném směru
K	[H]	koeficient přestupu tepla
L	[H]	indukčnost
p	[–]	pulznost
P_d	[W]	ztrátový výkon
R	[Ω]	elektrický odpor
R_{c-h}	[K/W]	tepelný odpor přechodu pouzdro - chladič
R_h	[K/W]	tepelný odpor chladiče
R_{j-c}	[K/W]	tepelný odpor přechodu PN přechod - pouzdro
R_t	[K/W]	tepelný odpor
S	[m ²]	plocha chladiče
T	[s]	perioda
t	[s]	čas
T_a	[°C]	teplota okolí
T_c	[°C]	teplota pouzdra
T_h	[°C]	teplota chladiče
T_j	[°C]	teplota PN přechodu
U_{1fAV}	[V]	střední hodnota usměrněného jednofázového napětí
U_{3fAV}	[V]	střední hodnota usměrněného třífázového napětí
U_{AV}	[V]	střední hodnota usměrněného napětí
U_{BO}	[V]	blokovací napětí tyristoru (Break-Over voltage)
U_C	[V]	napětí na filtračním kondenzátoru
U_d	[V]	výstupní napětí usměrňovače
U_F	[V]	úbytek napětí v propustném směru
U_m	[V]	maximální hodnota napětí/amplituda sinusového průběhu napětí
ΔT	[°C]	rozdíl teplot
ΔU	[V]	zvlnění napětí
Φ	[W]	tepelný tok
φ	[°]	fázový posun
ω	[rad · s ⁻¹]	úhlová frekvence

Seznam použitých zkratek

1f	jednofázový / jednofázové
3f	třífázový / třífázové
DPS	deska plošných spojů
GTO	Gate Turn Off
HVDC	High-Voltage Direct Current
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IR	Infrared
PVC	polyvinylchlorid
PWM	Pulse Width Modulation
USM	usměrňovač

Úvod

Cílem této práce je vyhotovení návrhu, stavba a odzkoušení usměrňovače pro laboratorní účely. Mezi stěžejní body práce patří návrh a dimenzování komponent konkrétního usměrňovače, který by byl schopen po snadné změně v topologii zapojení usměrnit jednofázové či třífázové napětí sinusového průběhu pro běžnou síťovou frekvenci 50 Hz. Toto zařízení je k dispozici Katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky.

Práce je členěna do dvou hlavních částí. První z nich je část teoretická, která slouží jako přehled a úvod do dané problematiky a byla vypracována na základě odborné literatury a internetových zdrojů. Druhá část je částí praktickou. Je zde řešen konkrétní postup při návrhu a realizaci zařízení. Nachází se zde také výsledky provedených zkoušek a výpočtů pro ověření provedených návrhů a správné funkce.

Obě zmíněné části jsou dále členěny do šesti kapitol. V první kapitole se nachází teoretický úvod do problematiky polovodičů a přehled polovodičových součástek, ze kterých jsou usměrňovače sestavovány. V druhé kapitole je uveden princip usměrňovače, důvody jeho použití, jeho možné zatěžování a jeho aplikace. Nalézá se zde rovněž stručné rozřídění usměrňovačů dle historického vývoje, dle možnosti jejich řízení a dle typu komutace. Třetí kapitola obsahuje přehled topologií obvodů jednofázových a třífázových usměrňovačů a jejich charakterizování. Čtvrtá kapitola je věnována problematice chlazení výkonových měničů. Tato kapitola shrnuje základní poznatky o přenosu tepla a dále řeší způsoby chlazení, které jsou využívány v oblasti elektroniky. V páté kapitole je již přistoupeno k praktické části práce, tedy k návrhu usměrňovače. Tento návrh obsahuje požadavky na zařízení, výběr součástek, návrh obvodu a případné modifikace zařízení. Základní zapojení a možné modifikace byly ověřeny simulacemi a případnými výpočty. Dále se zde nachází dimenzování vodičů a chladiče pro zařízení. Šestá a poslední kapitola se zabývá realizací a testováním zařízení. Mezi tyto patří samotná stavba, kontrola správné činnosti, zatěžovací zkouška a kontrola chladiče.

1 Polovodiče a polovodičové součástky

V této kapitole budou uvedeny základní poznatky o polovodivosti a polovodičových součástkách, které lze využít při stavbě usměrňovačů.

V zásadě lze charakterizovat tři hlavní druhy materiálů v elektrotechnice. Jsou to vodiče, polovodiče a izolanty. Vodiče elektrický proud vedou a jsou k tomuto účelu primárně používány. Naproti tomu izolanty proud nevedou a používáme je tedy k oddělení živých částí elektrických obvodů. Polovodiče obsahující PN přechod však vykazují vedení elektrického proudu v závislosti na smyslu přiloženého napětí.

V sestaveném zařízení figurují vodiče pro přívod, propojení a vyvedení výstupu a jsou opatřené izolací, která zajišťuje ochranu před dotykem obsluhou. Pro konstrukci předmětu této práce je však zapotřebí zejména polovodičových součástek, které zajišťují požadovanou funkci. Pro zorientování v problematice se tato kapitola bude zabývat shrnutím základních poznatků o polovodivosti, polovodičových diodách, tyristorech a IGBT tranzistorech.

1.1 Polovodivost

Tento jev nastane, pokud k sobě přiložíme polovodič typu P a polovodič typu N. Na rozhraní těchto polovodičů vzniká oblast rozhraní, ve které rekombinují nosiče náboje, a tak se tato oblast také nazývá vyčerpaná oblast. Při přiložení napětí v propustném směru se tato oblast zmenšuje až prakticky zmizí a elektrický proud tak může procházet. Pokud přechod polarizujeme záporně, nosiče náboje jsou přitahovány tak, že se tato oblast zvětšuje a přechod elektrický proud nevede. [2]

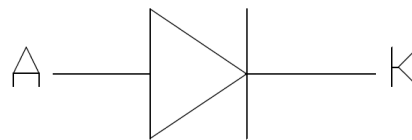
1.2 Dioda

Pro realizace jakéhokoliv polovodičového usměrňovače je zapotřebí polovodičových diod. Diody požadovanou funkci plní díky vlastnostem PN přechodu, kdy při zapojení v propustném směru nekladou elektrickému proudu velký odpor a je na nich pouze úbytek vznikající na PN přechodu. Naopak zapojení závěrně orientované diody znamená, že klade výrazný elektrický odpor a v tomto stavu dioda elektrický proud téměř nevede. Takto zapojená dioda však nemůže tímto způsobem pracovat pro libovolné napětí. V katalogu bývá výrobcem uvedena hodnota maximálního závěrného napětí. Při překročení této hodnoty nastane průraz PN struktury a součástka je nenávratně zničena. Existují však i typy diody, které dokážou po překročení určité hodnoty závěrného napětí začít vést elektrický proud. Tyto se však používají v jiných aplikacích.

Diod je více druhů, pro vytvoření usměrňovače však potřebujeme diody dosahující usměrňujícího efektu.

a) Usměrňovací dioda

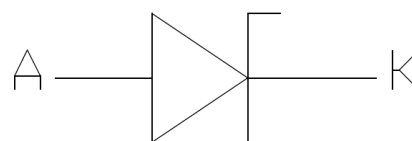
Využívány jsou nejčastěji klasické usměrňovací diody, které jsou nejvíce vyráběné na bázi křemíku. Mají relativně velkou kapacitu PN přechodu, proto není vhodné tyto diody používat pro obvody s vyššími frekvencemi, jelikož by mohlo docházet k potížím s přechodem do závěrného směru, a tak by se mohlo stát, že pro vysokou frekvenci dioda nebude propouštět pouze kladnou půlvlnu, ale i část, či dokonce celou půlvlnu zápornou. Přechodu diody z propustného stavu do závěrného se říká komutace diody.



Obrázek 1.1: Schématická značka polovodičové diody

b) Schottkyho dioda

Schottkyho dioda, někdy též označována jako rychlá dioda, je polovodičová součástka využívající usměrňujícího účinku styku kovu a polovodiče. Tyto diody lze využít při konstrukci usměrňovačů pro vyšší frekvence. Tento typ diod má dále nižší prahové napětí než dioda křemíková, a tedy menší úbytek napětí v propustném směru. V záporném směru vykazuje vyšší hodnoty závěrného proudu ve srovnání s diodou křemíkovou. [1]



Obrázek 1.2: Schématická značka Schottkyho diody

1.3 Tyristor

Tato polovodičová součástka je využívána v různých aplikacích. V souvislosti s usměrňovači je však zařazena do topologie obvodů řízených usměrňovačů. Možností výběru okamžiku sepnutí lze řídit střední hodnotu usměrněného napětí a dostáváme tak možnost regulace pomocí řízení zapínacích signálů pro hradla tyristorů.

Součástku lze sepnout při splnění požadavků pro sepnutí. Primárně se jako způsob pro sepnutí tyristoru volí postup propustné polarizace součástky a následné přivedení kladného proudového impulsu do řídicí elektrody. Pokud se vyskytuje na součástce propustné

napětí, ale nebyl přiveden impuls pro zapnutí, mluvíme o blokovacím stavu tyristoru. Alternativně lze tedy tyristor sepnout při překročení velikosti propustného napětí U_{BO} . Tento způsob se ale nepoužívá, jelikož hodnota blokovacího U_{BO} je relativně veliká a tento způsob spínání není efektivní. Pro provedení sepnutí zůstává součástka v sepnutém stavu. Komutace s obnovením blokovací schopnosti je zajištěna třemi různými způsoby, které jsou popsány níže.

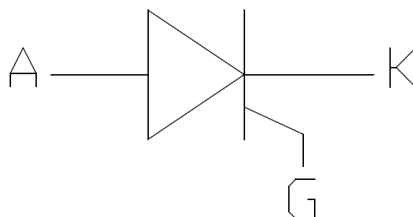
1) Přirozenou komutací v obvodech střídavého napětí

Díky sinusovému průběhu se při záporné půlčlenně mění polarizace tyristoru na závěrnou a klesá proud tyristorem. Nastává tedy přirozená komutace a následné obnovení blokovací schopnosti tyristoru. [1]

Kvůli této skutečnosti se občas tyristorové usměrňovače označují za měniče s vnější komutací či jako měnič komutovaný sítí.

2) Nucenou komutací ve stejnosměrných obvodech

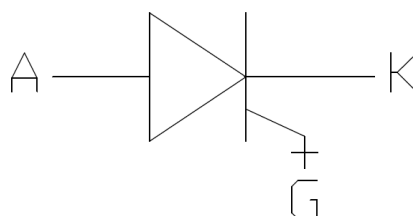
Ve stejnosměrných obvodech je nutno uchýlit se k použití komutačních obvodů. Tento se obvykle realizuje tak, že se paralelně k tyristoru připojuje kondenzátor s polaritou napětí takovou, která zajistí závěrnou polarizaci tyristoru. [1]



Obrázek 1.3: Schématická značka tyristoru

3) Použitím GTO tyristoru

Použitím GTO (Gate Turn-Off) tyristoru, namísto klasického tyristoru, můžeme řídit jak okamžik zapnutí přivedením kladného proudového impulsu do řídicí elektrody, tak i okamžik vypnutí tyristoru impulsem záporným. [1]

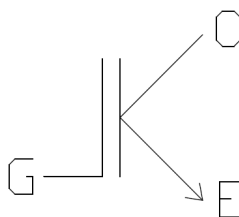


Obrázek 1.4: Schématická značka GTO tyristoru

GTO tyristory nacházejí uplatnění ve stejnosměrných výkonových obvodech. Důvodem k jejich aplikaci je skutečnost, že není zapotřebí komutačního obvodu.

1.4 IGBT tranzistor

Těž Insulated Gate Bipolar Transistor, tedy v překladu bipolární tranzistor s izolovaným hradlem. Tento typ součástek lze označit za moderní, které spojují výhody bipolárního a unipolárního tranzistoru. Toto spojení výhod spočívá ve skutečnosti, že bipolární část součástky přebírá napěťové a proudové zatížení a ovládání zůstává části unipolární. Výsledkem toho je, že lze součástku spínat menším, tedy ne výkonovým, signálem a má tedy nízkou spínací energii. Další nezanedbatelnou výhodou je malý úbytek napětí v sepnutém stavu. Součástka rovněž vykazuje dobré dynamické vlastnosti. [3]



Obrázek 1.5: Schématická značka IGBT tranzistoru

V současné době se jedná o hojně využívané prvky v obvodech měničů. V souvislosti s usměrňovači bychom mluvili o pulzních usměrňovačích, které budou dále zmíněny v následujících kapitolách.

2 Usměrňovače

Náplní této kapitoly bude rozřídění jednotlivých typů usměrňovačů dle různých hledisek, jako je historický vývoj, možnosti řízení nebo jejich komutace. Bude zde rovněž uveden důvod jejich využívání a způsob jejich zatěžování.

Usměrňovačem obecně rozumíme zařízení, které ze střídavého průběhu napětí a proudu na vstupu produkuje průběh jedné polarity týchž veličin na výstupu. Dosahujeme tím stejnosměrného výstupu obou veličin.

Nejčastěji mluvíme o usměrňovači jako o polovodičovém měniči. Jsou nejstarším druhem měničů. Usměrňovače jsou také součástí nepřímých měničů kmitočtu. [3]

2.1 Důvody použití usměrňovačů

Standardní elektrická síť v České republice je definovaná napětovými hladinami od přenosové soustavy 400 kV do 400/230 V v nízkonapětových rozvodech. Podstatné však je, že jde o střídavou síť se sinusovým průběhem a frekvencí 50 Hz. Existuje mnoho aplikací, kde je ale zapotřebí napájet systém stejnosměrným napětím a proudem. Pokud není k dispozici stejnosměrný zdroj, jakým je například dynamo či baterie elektrochemických článků, je zapotřebí usměrnit síťové napětí pomocí usměrňovače.

Právě totiž střídáva rozvodná síť je ve většině případů zdrojem pro usměrňovače. Usměrňovače mohou být připojeny k síti přímo, přes tlumivku nebo přes transformátor. [3]

2.2 Zatěžování usměrňovačů

Zátěž pro usměrňovače bývá tvořena zařízeními, které vyžadují stejnosměrný zdroj. Na svorky usměrňovaného výstupu lze připojit odporovou zátěž, ale většinou jsou to však aplikace, kde v náhradním schématu figuruje činný odpor, induktor a případně i indukované protinapětí. Toto náhradní schéma koresponduje se zařízením, jakým je stejnosměrný motor. Elektrický odpor a indukčnost reprezentuje vinutí stroje a indukované protinapětí vzniká pohybem vodičů rotoru v magnetickém poli stroje.

2.2.1 Konkrétní aplikace pro usměrňovače

Další aplikace, kde se lze s usměrňovači setkat, mohou být například měničky pro napájení trakčního vedení [3] pro elektricky poháněná vozidla, se kterými se lze setkat v městské zástavbě na vozovkách i kolejových cestách, ale i mimo zástavbu v kolejové přepravě. Dále to mohou být měničky v soustavách HVDC, kde se výstupní střídavé napětí alternátoru usměrní a je přenášeno na dlouhou vzdálenost stejnosměrným vedením, na jehož

konci se nachází střídač, který elektrické veličiny upraví pro konvenční střídavou distribuční nebo přenosovou síť. Dále to mohou být vstupní části nepřímých měničů frekvence. Neméně důležitou aplikací usměrňovačů je usměrnění pro budící vinutí stejnosměrných či synchronních strojů.

2.3 Typy usměrňovačů dle historického vývoje

Zde lze přistoupit k přehledu usměrňovacích zařízení z historického hlediska od mechanických, přes elektronkové a rtuťové, až k dnes nejvíce používaným polovodičovým usměrňovačům.

2.3.1 Mechanické usměrňovače

Za mechanický usměrňovač lze považovat komutátor stejnosměrného stroje, který pracuje v generátorickém režimu, je tedy otáčeno mechanickou silou hřídelí a přes kartáče přiložené na komutátoru odebíráme stejnosměrné napětí a proud. Pokud by stejnosměrný stroj pracoval v režimu motorickém, mluvíme zde o komutátoru jako o mechanickém střídači.

2.3.2 Elektronkové usměrňovače

Elektronkové usměrňovače fungují relativně podobným způsobem jako usměrňovače polovodičové. Zde je však jako usměrňovací prvek použita elektronková dioda. Usměrňujícího efektu dosahuje podobným způsobem jako u diod polovodičových, tj. záleží na polaritě a velikosti napětí, které je přiloženo k elektronkové diodě. V elektronkovém provedení diody se využívá tzv. termoemise elektronů. [5]

2.3.3 Rtuťové usměrňovače

Tyto usměrňovače se někdy mohou nazývat usměrňovači ignitronovými. Z dnešního pohledu na toto zařízení o něm mluvíme jako o historickém řešení, které se již prakticky nevyužívá. Důvody jsou složitost a mohutnost zařízení. Dále bychom mohli také uvažovat zdravotní závadnost rtuti, která by mohla uniknout při poškození nádoby zařízení. Základem pro funkci je rtuťový ventil - ignitron. Ignitron je usměrňovací výbojka v kovové či skleněné nádobě. V této nádobě se dále nachází rtuťové páry a zapalovací elektroda. Hodnota napětí na výstupu je regulována zpožděním zapalovacího impulsu ze zapalovací elektrody. Tato zařízení byla využívána v trakčních měnících pro stejnosměrnou trakci a byla nahrazena tyristorovými usměrňovači. [6], [7]

2.3.4 Polovodičové usměrňovače

Praktičtějším a modernějším řešením jsou polovodičové usměrňovače. Tyto jsou nejčastěji sestaveny z usměrňovacích křemíkových diod pro neřízený usměrňovač nebo z tyristorů pro usměrňovač řízený. V současné době se již využívají i usměrňovače pulzní, které ve svém zapojení obsahují tranzistory IGBT.

O topologiích zapojení jednotlivých polovodičových usměrňovačů a jejich vlastnostech bude uvedeno více v následující kapitole.

2.4 Typy usměrňovačů dle možnosti řízení

Usměrňovače můžeme dále rozlišovat dle způsobu řízení. Řízením rozumíme možnost sepnutí součástky, dle vstupního požadavku na střední hodnotu napětí. Tohoto řízení můžeme dosáhnout využitím spínatelných součástek v obvodu usměrňovače. Používanou součástí je tedy tyristor.

2.4.1 Neřízené usměrňovače

Neřízený usměrňovač je sestaven z usměrňovacích diod. Jedná se o relativně jednoduchá zapojení, kde součástky nejsou řízeny. Diody jsou většinou zapojeny v jednofázovém či třífázovém můstkovém nebo uzlovém zapojení. Aplikace s většími výkony jsou již připojovány k třífázovému zdroji.

Změnu výstupního proudu a napětí lze pak provádět pouze mimo vlastní usměrňovač, a to například změnou napájecího napětí autotransfornátorem. Tyto usměrňovače jsou využívány v aplikacích, které nepožadují regulaci výstupního napětí vlivem změny okamžiku sepnutí tyristorů. Mohou být také používány jako vstupní usměrňovač pro nepřímé měniče kmitočtu. [3]

2.4.2 Polořízené usměrňovače

Předchozí neřízené diodové můstky mohou být modifikovány na můstky polořízené, a to tak, že polovinu diod v můstku zaměníme za spínatelnou součástku - tyristor. Tím dosáhneme možnosti řízení.

Zapojení může být pro jednofázové můstky rozlišováno dle rozmístění tyristorů na symetrické a nesymetrické zapojení, přičemž výsledné usměrnění je při stejném řídicím úhlu stejné. Pro můstky třífázové se potom umísťují tyristory na anodovou skupinu a katodovou skupinu tvoří diody či naopak.

Tyto polořízené usměrňovače neumožňují rekuperaci, což je jejich nevýhoda. Tuto nevýhodu může však vyvažovat fakt, že dioda je stále levnější součástí než tyristor, a tak můžeme při realizaci můstku ušetřit finanční prostředky.

2.4.3 Plně řízené usměrňovače

Pro konstrukci takovýchto usměrňovačů je zapotřebí sestavit celý můstek ze spínatelných součástí. Takovýto usměrňovač lze provozovat v invertorovém chodu, který se také někdy označuje jako střídačový chod. Jde vlastně o změnu toku energie od stejnosměrného zařízení, které se v dané situaci stává zdrojem, k napájecímu střídavému zdroji, který se zde stává spotřebičem.

Principem tohoto řízení usměrňovačů je změna řídicího úhlu spínání tyristorů, což jinými slovy vlastně znamená, že je měněn okamžik sepnutí tyristorů. Tímto postupem lze měnit střední hodnotu výstupních veličin.

Za zmínku jistě stojí skutečnost, že řízené a polořízené usměrňovače musí být vybaveny řídicími obvody, které mají za úkol přivádět na řídicí elektrody tyristorů impulzy požadovaného tvaru a velikosti v přesně definovaném čase. [4]

2.5 Typy usměrňovačů dle typu komutace

Ve své podstatě lze obecně třídit výkonové měniče na měniče s vlastní komutací, vnější komutací a bez komutace. V případě usměrňovačů byla z historického hlediska tato zařízení dlouho řazena k měničům s vnější komutací. Jinými slovy byly komutovány sítí. Tyto usměrňovače sestávaly z diod pro neřízené a z tyristorů pro řízené usměrňovače.

S rozvojem výkonových polovodičových součástí bylo možno začít využívat tranzistory coby vypínatelné součástky i pro velké výkony, a tím pádem získat výhody, které sebou nese vlastní komutace měniče. Tento typ usměrňovače se také nazývá pulzní usměrňovač. Více o usměrňovači s vlastní komutací bude uvedeno v následující kapitole.

3 Provedení 1f a 3f usměrňovačů

Tato kapitola obsahuje přehled topologií obvodů usměrňovačů. V současnosti se již v naprosté většině případů využívá polovodičových usměrňovačů. V první řadě lze rozlišovat, zda je vyžadováno usměrnění jednofázového či třífázového zdroje a dále je zvažován požadavek na kvalitu usměrněného výstupu. Pak mluvíme zejména o pulznosti usměrňovače a o možnosti použití výstupního filtračního kondenzátoru. V návaznosti na cenu a složitost řízení je nutno zvážit typ využitých polovodičových součástek a volbu topologie zapojení.

3.1 Pulznost usměrňovače

Pulznost je velice důležitý parametr každého usměrňovače. Ve své podstatě říká, kolik kladných půlvln usměrňovač vytvořil za periodu původního signálu.

Pro jednofázové usměrňovače můžeme dosáhnout pulznosti $p = 1$ a $p = 2$, což znamená, že je za periodu původního signálu vytvořen jeden kladný pulz využitím jednocestného usměrnění, či dva kladné pulzy pomocí usměrnění dvoucestného.

Pro třífázové usměrňovače lze dosáhnout pulzností vyšších. V praxi jsou to nejčastěji $p = 3$, $p = 6$ a $p = 12$.

3.2 Jednofázové polovodičové usměrňovače

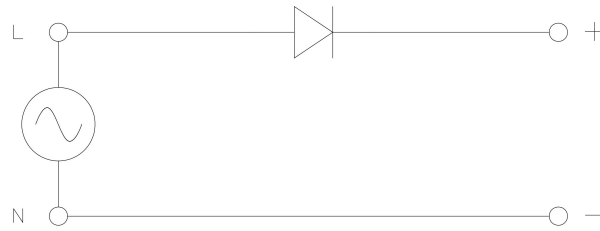
V některých případech je dostačující usměrnění jedné fáze. To lze realizovat několika způsoby. Aplikace pro takovýto typ usměrňovače jsou napájeny zejména spotřebitelskou sítí nízkého napětí. Většinou je před samotným měničem snižující transformátor a na jeho výstupní svorky je teprve připojen usměrňovač, ze kterého je napájen obvod, který potřebuje stejnosměrný zdroj.

3.2.1 Jednocestné usměrnění

V tomto provedení stačí využít usměrňujícího efektu jedné diody. Pokud je na vstup připojen standardní sinusový průběh, na výstupu se objeví pouze kladné pulzy a záporné půlvlny nejsou kvůli aplikované diodě propuštěny. Výsledný průběh je tedy jednopulzní.

Nevýhodou tohoto zapojení je jeho nízká pulznost. Výhodou však je, že lze použít pouze jednu diodu.

Pokud bychom toto zapojení modifikovali vhodně zvoleným výstupním kondenzátorem, můžeme stále dosáhnout velmi uspokojivého usměrňujícího efektu s malým zvlněním napětí.

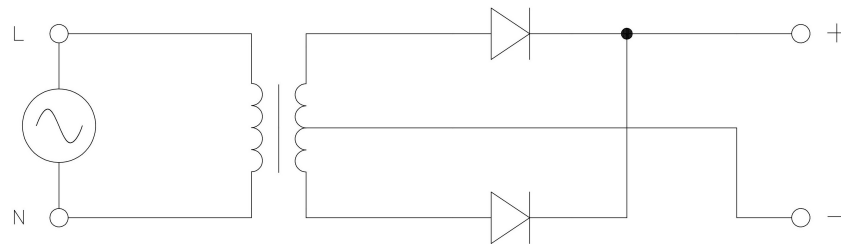


Obrázek 3.1: Jednocestný usměrňovač

3.2.2 Dvoucestné usměrnění

a) Transformátor s vyvedeným středem sekundárního vinutí

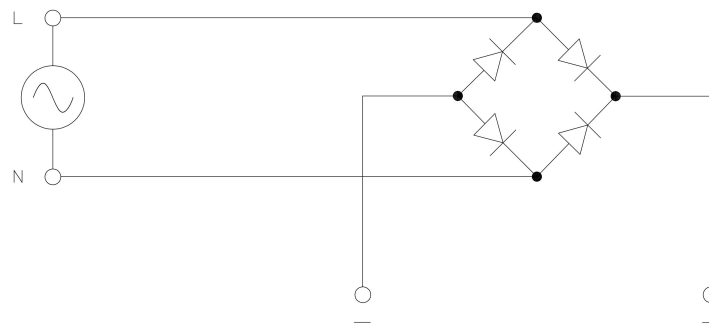
Toto zapojení umožňuje usměrnit sinusový vstup dvoupulzně pomocí pouze dvou diod. Menší počet polovodičových součástí je výhodou tohoto zapojení, ale je nutno použít transformátor s vyvedeným středem sekundárního vinutí. Pro vyšší výkony je cena takto uzpůsobeného transformátoru již značná a přechází se k následující alternativě - použití můstkového usměrňovače. [9]



Obrázek 3.2: Dvoucestný usměrňovač s transformátorem s vyvedeným středem

b) Můstkové zapojení

V tomto zapojení je usměrnění dosaženo pomocí čtyř diod v můstkovém zapojení. Tato varianta vyžaduje více polovodičových součástí, ale vylučuje nutnost použití transformátoru, který má vyvedený střed sekundárního vinutí. Tyto usměrňovací můstky se také vyrábí v již integrovaných modulech.



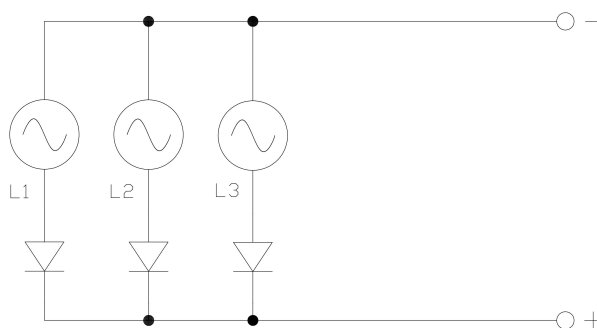
Obrázek 3.3: Dvoucestný můstkový usměrňovač

3.3 Třífázové polovodičové usměrňovače

Usměrnění třífázového průběhu se využívá již pro vyšší výkony a je z hlediska kvality usměrněného výstupu lepším řešením. Výstup má vyšší pulznost, a tak je tedy zvlnění usměrněného napětí menší, a proto se usměrněný výstup více přibližuje k stejnosměrnému průběhu. [4]

3.3.1 Trojpulzní zapojení

Tento typ zapojení je někdy nazýván třífázovým uzlovým zapojením. Je možno použít pouze tři diody, ovšem dostaneme nižší pulznost. Výhodou je nižší počet potřebných součástek za cenu horší kvality, tedy nižší pulznosti výstupního napětí.

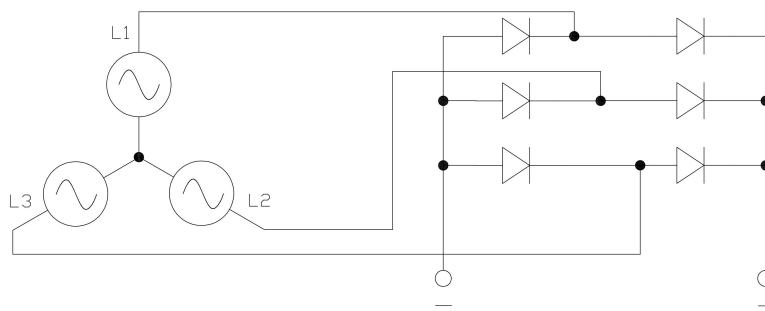


Obrázek 3.4: Třífázový trojpulzní usměrňovač

3.3.2 Šestipulzní zapojení

Toto zapojení se také nazývá třífázové můstkové zapojení. Pro toto zapojení existuje vcelku rozšířená nabídka integrovaných třífázových můstků, které nabízí velkou konstrukční výhodu v podobě snadné montáže a rychlého připojení vodičů. Ovšem je zde stále možnost obvod sestavit z jednotlivých diod.

Pro řadu aplikací se považuje šestipulzní usměrnění za dostačující a je tedy proto hojně využíváno.

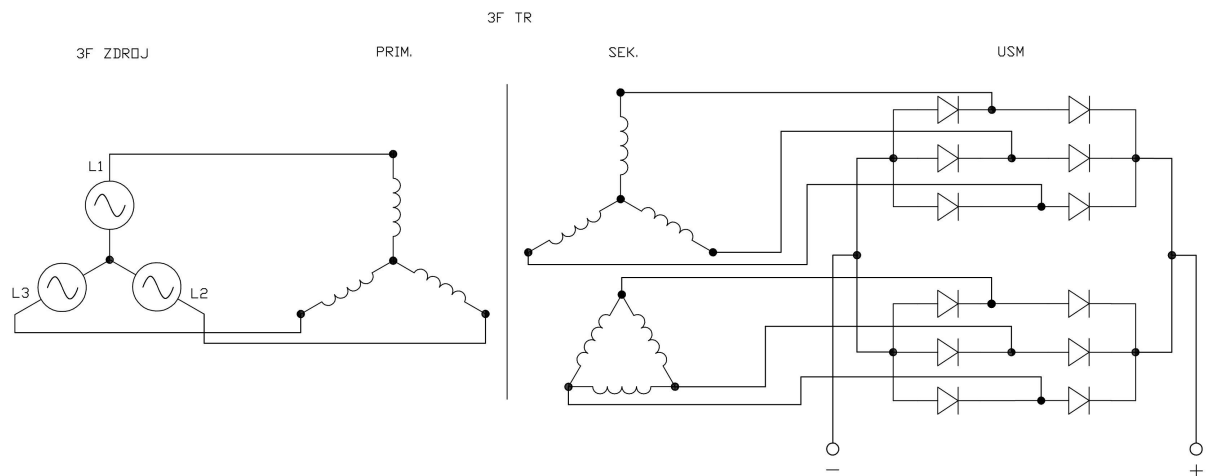


Obrázek 3.5: Třífázový šestipulzní usměrňovač

3.3.3 Dvanáctipulzní zapojení

Dvanáctipulzní usměrňovač má již vysokou pulznost, a tak můžeme mluvit o kvalitním usměrnění. Tento způsob realizace byl a stále je využíván v měnících pro stejnosměrnou trakci.

Pro toto zapojení je nutno použít třífázový transformátor se třemi vinutími. Jedno vinutí na straně nižšího napětí je zapojeno do hvězdy a druhé do trojúhelníku. Na obou těchto vinutích jsou připojeny šestipulzní můstky sestavené z diod či tyristorů. Tyto můstky můžeme poté spojit paralelně či sériově. Paralelní spojení můstků je více náchylné na disbalance, které jsou zapříčiněny dvěma různými převody sekundárních vinutí a způsobují nesrovnalosti mezi úrovněmi teoretických a skutečných vyšších harmonických složek napětí v napájecí soustavě. Tyto různé převody mohou vznikat tak, že obě sekundární vinutí mají různá zapojení. Pokud bychom se chtěli vyhnout různým převodům, museli bychom obě sekundární vinutí vyrobit tak, aby na jejich výstupu bylo naprosto stejné napětí s respektováním přepočtu mezi fázovou a sdruženou hodnotou. To však nemusí být reálně proveditelné, neboť počet závitů musí být celé číslo. Sériové spojení můstků je na problematiku různých převodů méně citlivé, avšak jsou zde větší ztráty při zatížení, a to nelze při dimenzování usměrňovače zanedbat, jelikož ztrátový výkon je téměř dvojnásobný. Cena i velikost transformátoru uzpůsobeného pro tento měnič je značná. [8], [9]



Obrázek 3.6: Třífázové dvanáctipulzní usměrnění s paralelním spojením usměrňovačů

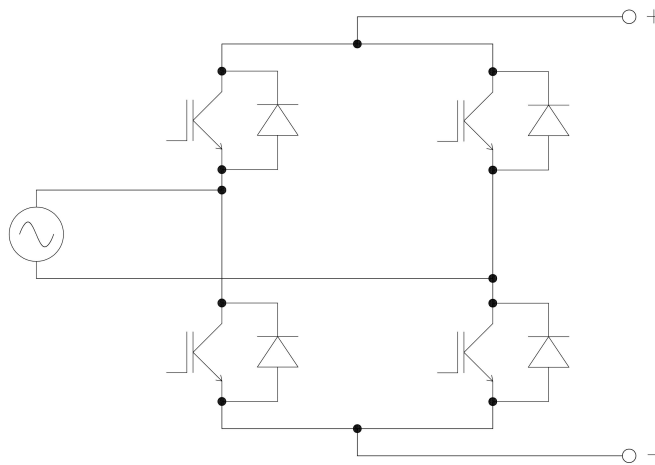
Dvanáctipulzního usměrnění lze také alternativně dosáhnout použitím šestipulzního usměrňovače, kterému by byl předřazen frekvenční měnič, jehož výstupem by bylo napětí o dvojnásobné frekvenci, tedy 100Hz.

3.4 Pulzní usměrňovače

Tento typ usměrňovače lze sestavit rovněž v jednofázové i třífázové variantě. Topologií i využitými součástkami se ve své podstatě jedná o střídač, který je napájen střídavým

zdrojem, a výstup je požadován usměrněný. Tedy podobně jako střídač se skládá z vypínatelných výkonových součástí, kterými mohou být například tranzistory IGBT či tyristory GTO.

Účinník, který je určován z fázového posunu, v plně řízených tyristorových usměrňovačích odpovídá úhlu řízení. To znamená, že účinník se mění spolu s napětím dle požadavku na jeho střední hodnotu, a tím pádem závisí na spínání tyristorů v usměrňovači. Kromě této skutečnosti mají výstupní proudy vysoký obsah vyšších harmonických složek. K odstranění těchto negativních vlivů, které má usměrňovač s vnější komutací, lze použít pulzní usměrňovač. Tento typ měniče využívá pulzně šířkovou modulaci. Činnost tohoto usměrňovače je dána vhodným spínáním tranzistorů v obvodu. [3]



Obrázek 3.7: Jednofázový pulzní usměrňovač

Při shrnutí vlastností pulzního usměrňovače lze konstatovat, že jeho použití má příznivý vliv na kvalitu proudu, který je z něj odebírán. Dále je nespornou výhodou, že podobně jako plně řízený tyristorový usměrňovač, umožňuje rekuperaci. Topologie obvodu takto sestaveného usměrňovače je shodná s topologií obvodu střídače pro stejný počet fází. Lze tedy provozovat tento měnič jako usměrňovač nebo jako střídač. Na obrázku 3.7 je uvedeno schéma zapojení jednofázového pulzního usměrňovače. Mezi negativní vlastnosti pulzního usměrňovače patří jeho vyšší cena a fakt, že je zde omezena jeho schopnost regulovat napětí. Tato regulace je omezena zespoda. Nelze odevzdat na výstupu měniče usměrněné napětí, které by bylo menší než napětí zdroje, kterým je měnič napájen. To je způsobeno tím, že antiparalelní diody IGBT tranzistorů tvoří můstkový neřízený usměrňovač.

4 Chlazení výkonových měničů

V této kapitole se nachází přehled základních způsobů přenosu tepla a přehled možných běžně použitelných způsobů chlazení polovodičových součástek.

4.1 Vliv změny teploty na měnič

V některých aplikacích v oblasti elektroniky, a v elektrotechnice obecně, je nezbytné výkonové prvky či celá zařízení chladit kvůli tepelným ztrátám, které produkují. To lze realizovat několika postupy. Pokud nebude chlazení zajištěno, může dojít k nepříznivým dopadům na funkci zařízení či na zařízení samotné, jelikož by nemusela být dodržena stanovená pracovní teplota součástky, nebo by mohla být dokonce tepelně zničena.

Pokud bychom se zaměřili na vliv teploty na vlastnosti polovodičových součástek, pak by zjištění při zkoumání diody byla následující. Vlastní vodivost polovodiče se zvětší. To je způsobeno tím, že vyšší teplota přispívá ke generaci páru elektron-díra. Zvětšuje se proud v závěrném i v propustném zapojení. Průrazné napětí, tedy maximální závěrné napětí, je menší než při teplotě nižší. Dále v propustném směru dojde i k mírnému snížení prahového napětí diody. [11]

Za zmínku jistě stojí rovněž skutečnost, že zvyšující se teplota má nepříznivý dopad na elektrický odpor vodičů, který se s vyšší teplotou zvyšuje. Vyšší teplota také urychluje degradaci elektroizolačních systémů.

4.2 Základní způsoby přenosu tepla

Než bude přistoupeno k samotným způsobům chlazení, jsou zde uvedeny a charakterizovány tři základní způsoby přenosu tepla, od kterých jsou postupy pro chlazení odvozeny.

4.2.1 Přenos tepla vedením

Rovněž lze tento způsob vedení tepla označit jako přenos tepla kondukcí. Tento způsob se uplatňuje ve všech látkových skupenstvích, zejména v přenosu tepla v tuhých látkách. [11]

Jestliže je jedna stěna tělesa teplejší než stěna druhá, pak dle druhého termodynamického zákona dochází k tepelné výměně mezi stěnami, a to od té s vyšší teplotou k té s teplotou nižší. [11]

4.2.2 Přenos tepla prouděním

Tento způsob se alternativně nazývá také přenos tepla konvekcí. Uplatňuje se především při přenosu v kapalných a plynných látkách. Přenos tepla prouděním je charakterizován

jako přestup tepla mezi povrchem tělesa v pevném skupenství a kapalinou či plynem, který toto těleso obklopuje. Konvekci lze dále v zásadě dělit na přirozenou, tedy volnou, či na nucenou. V případě nucené konvekce je k vyvolání tlaku pro oběh média nutno použít pomocného zařízení, čímž je například ventilátor v případě plyných médií či čerpadlo při využití média kapalného. [11]

Pro tento typ předání tepla může být například uvedena nejčastější situace, kdy součástka odevzdává své ztrátové teplo okolí. Rovněž může být k součástce přimontován chladič, který svou uzpůsobenou konstrukcí a svými parametry tomuto tepelnému předání napomáhá. Okolí takové součástky může být vzduch nebo jiné chladicí médium, s přirozeným či nuceným oběhem.

4.2.3 Přenos tepla radiací

Přenos tepla radiací či také přenos tepla sáláním. Přenos tepla tímto způsobem se uskutečňuje formou elektromagnetického záření. Nejjednodušším příkladem je tepelné záření slunce. Při dopadu tepelného záření mohou nastat tři následující situace. Tepelné záření bude tělesem propuštěno, odraženo či pohlceno. Tepelná propustnost závisí na druhu látky tělesa, ze které bylo zhotoveno, a na vlnové délce záření. Odrazivost závisí rovněž na druhu látky tělesa a vlnové délce záření, ale dále také na úpravě jeho povrchu. Pohltivost záření závisí na povrchu tělesa a jeho barvě. [11]

4.2.4 Shrnutí

Pokud bychom výše zmíněné náležitosti chtěli popsat stručněji, mohly by být formulovány následujícím způsobem.

Ztrátové teplo vzniklé na součástce je k povrchu předáváno kondukcí - vedením, kde na rozhraní s chladicím médiem plyným či kapalným dochází k přenosu konvekcí - prouděním. Toto teplo je následně vyzářeno radiací do okolí.

Stanovení jednotlivých podílů jednotlivých typů přestupu tepla je poměrně náročná činnost, protože se vždy uplatňuje jejich spolupůsobení. Proto je zavedena hodnota tepelného odporu R_t , která toto spolupůsobení kvantifikuje a je vztažena na plochu 1 m^2 . Jednotlivé materiály lze mezi sebou podle této hodnoty porovnávat. Stanovení hodnoty tepelného odporu probíhá empiricky na základě měření. To je důvod proč, jsou v této hodnotě zahrnuty všechny způsoby přenosu tepla. Tepelný odpor se se změnou teploty a odváděného ztrátového výkonu může měnit, proto bývá výrobcí chladičů vyjádřen tabulkou či grafem. [11]

4.3 Způsoby chlazení používané v elektronice

V této oblasti se využívá několik různých druhů chlazení¹. Kromě typu chlazení a využití chladiva lze dále rozlišovat také to, jestli je zařízení v otevřeném prostoru, či jestli je uzavřeno.

4.3.1 Chlazení vzduchem - pasivní

Přirozené chlazení vzduchem se nejčastěji používá u zařízení, které neprodukují větší množství ztrátového tepla. Takovou situací může být například deska plošných spojů osazená polovodičovými prvky, které nedosahují větších výkonů. Jedná se o nejjednodušší a nejlevnější způsob chlazení. [11]

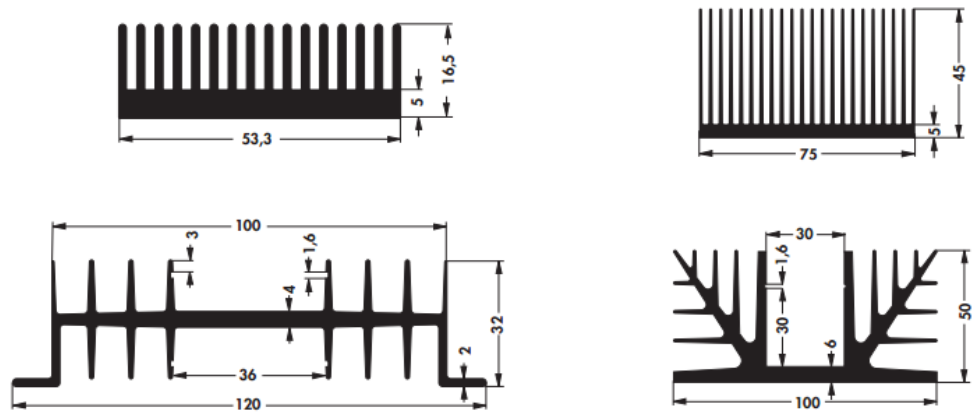
První komplikace nastává, pokud je nutno zařízení umístit do krytu, například v podobě skříně či jiné obdobné uzavřené schránky. Odvod tepla závisí na tvaru skříně, jejích rozměrech a v neposlední řadě pak na ploše horní a dolní stěny této schránky. Důležitou záležitostí mohou být rovněž přepážky mezi jednotlivými bloky uvnitř schránky, ve které je zařízení umístěno. Tyto přepážky svým tvarem mohou příznivě ovlivňovat průchod vzduchu, který zde působí jako chladicí médium. [11]

Pokud pro odvod tepla nestačí povrch samotné součástky, lze přistoupit k modifikaci tepelného obvodu chladičem. Tento chladič může mít různá provedení. Provedení se mohou lišit povrchovou úpravou chladiče, materiálem, ze kterého byl vyroben, jeho tvarem či jeho zamýšlenou orientací v prostoru.

Chladiče můžeme dělit na dvě hlavní sekce. První z nich jsou chladiče deskové. Nejčastěji se tak využívá segment hliníkového plechu, který je připevněn k chlazené součástce a zvyšuje se plocha, která odvádí ztrátové teplo. Není zcela zbytečné zmínit fakt, že kovy vykazují mimo dobré elektrické vodivosti i dobrou vodivost tepelnou. Druhou skupinou využívaných chladičů pak mohou být chladiče žebrované. Tento vznikne tak, že jsou na kovovou platformu vytvořeny kolmé plochy z téhož kovového materiálu, z jakého je zhotovena platforma. Zde lze zaznamenat významný nárůst plochy chladiče. K tomuto vzniklému celku je následně připevněna chlazená součástka. Pro tento typ chladiče existuje mnoho různých provedení. Na dále uvedeném obrázku 4.1 je zobrazeno několik namátkou vybraných typů chladičů od jednoduchých tvarů až k těm složitějším.

Žebrované chladiče se nejčastěji vyrábějí z hliníku či duralových slitin. Takto vyrobený prvek má také jistý typ povrchové úpravy či optimalizaci tvaru pro efektivní umístění a uchycení součástky. Povrch běžně používaných pasivních chladičů může být bez speciálních úprav, nebo se můžeme relativně často setkat s tzv. eloxovaným hliníkovým chladičem. Eloxování je elektrolytické ošetření povrchu hliníkové součásti. Toto ošetření spočívá v nánosu ochranné oxidové vrstvy. Vzniklá oxidová vrstva zvyšuje odolnost sou-

¹Jako dobrý přehled využívaných typů chlazení mohou sloužit počítačové stanice. Často se v nich nachází kombinace dvou, tří či více z uvedených typů chlazení.



Obrázek 4.1: Různé typy chladičů výrobce Fischer Elektronik [12]

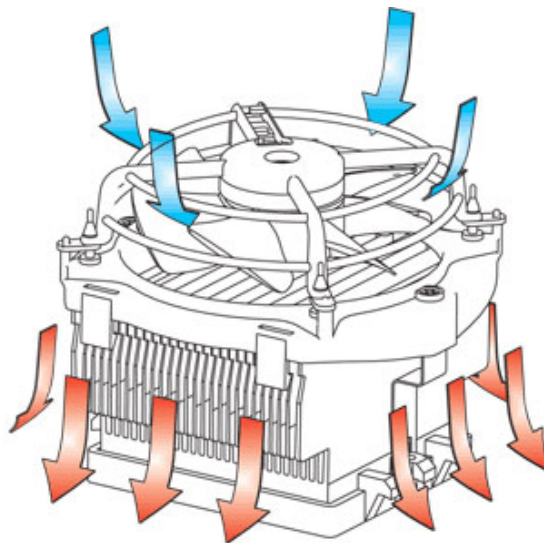
části vůči korozi, její tvrdost a ošetrivost. Tato vrstva má nejčastěji černou matnou barvu. [11], [15]

Prostor, kde se dotýkají plochy součástky a jejího chladiče, může být doplněn nánosem vrstvy teplovodivé pasty, která má nízký tepelný odpor a příznivě tak ovlivňuje přenos tepla mezi součástkou a chladičem.

4.3.2 Chlazení vzduchem - aktivní

Pokud se tepelný tok z použitých polovodičových součástek zvýší a přesáhne jistou mez, kdy nestačí aplikace pouze pasivního chlazení, přechází se k použití nuceného oběhu vzduchu. Vzniklou nucenou ventilací se zlepšuje činitel přestupu tepla pro proudění a urychluje se obměna chladicího vzduchu. [11]

Často pak dochází k situaci, která je zachycena na obrázku 4.2. Jde o kombinaci žebrovaného hliníkového chladiče a ventilátoru, který zajišťuje zmíněný nucený oběh vzduchu a zvyšuje tak efektivitu celého chladicího procesu.



Obrázek 4.2: Aktivní chlazení v kombinaci s pasivním [14]

V případě umístění výkonových součástí na DPS spolu s ostatními součástkami se umístění výkonových prvků s velkým ztrátovým výkonem volí co nejbližší k výstupům teplého vzduchu, aby tak neohřívaly další prvky. [11]

Pokud je zařízení uzavřeno ve schránce, může ventilátor plnit funkci odtahu ohřátého vzduchu či naopak může hnát okolní chladný vzduch na chlazené prvky. Je tedy nutné, aby kromě samotných ventilátorů byla schránka vybavena otvory, kterými lze vzduch odevzdávat či nasávat. Je dobré zároveň vybavit ventilátory filtry pro zachycení nečistot a prachových částic a zamezit tak zanášení systému, který je uložený ve schránce a zároveň také zabránit zanášení samotných ventilátorů.

Lze klasifikovat dva základní typy chlazení pomocí proudícího vzduchu. Nejdříve je to již zmíněný způsob, kdy je pomocí ventilátoru hnán vzduch okolím součástí produkujících ztrátové teplo či jejich chladičů. Dalším způsobem je aktivní chlazení výměňkového chladiče, který je využíván pro chlazení pomocí kapalného média. [11]

4.3.3 Chlazení pomocí kapalného média

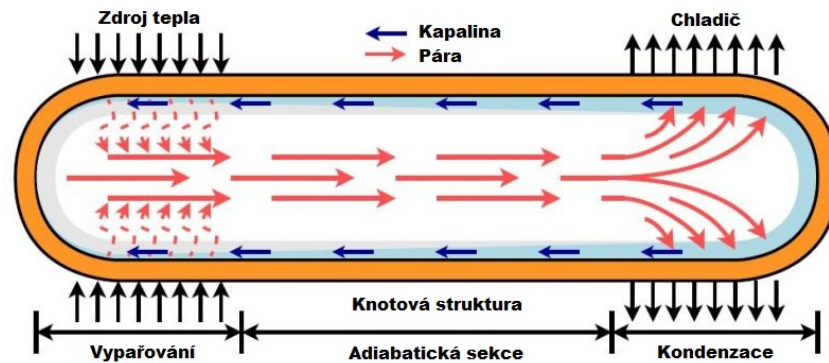
Pro chlazení ještě výkonnější a tím pádem z hlediska ztrát náročnější aplikace se využívá chladičového efektu, který je dosažen oběhem kapalného média. Chladičových médií v tomto skupenství je více druhů, ale nejvyužívanější je chladičová voda. Pokud je používána voda, je to z technologických důvodů především voda destilovaná. [11]

Zde se tento typ chlazení rozlišuje opět na dva základní typy. Prvním je přímé kapalinové chlazení, kdy dochází k přímému kontaktu chlazeného prvku s chladičovým médiem. Druhým způsobem je kapalinové chlazení nepřímé. Při aplikaci nepřímého kapalného chlazení je chladičové médium ohříváno ve výměníku, umístěném v blízkosti chlazené součástky. Tento typ kapalinového chlazení je v praxi využíván častěji. Od součástky ohřáté kapalně médium je v obou případech hnáno oběhovým čerpadlem ke svému chladiči, umístěnému mimo chlazený systém, kde své teplo odevzdá a je odesláno opět k ochlazení součástky, a tím se chladičový okruh uzavírá. [11]

4.3.4 Další způsoby chlazení

Pro dosažení chlazení součástí či celých zařízení je možno využít i alternativních způsobů chlazení. Jedním z nich by mohlo být použití tzv. tepelných trubic (z angl. Heatpipes). Tepelnou trubici lze charakterizovat jako uzavřené duté těleso naplněné těkavou látkou. Pokud je toto těleso na jedné straně ohříváno například součástkou se ztrátovým teplem, těkavá látka, která byla v kapalném skupenství, se odpaří a postupuje k chladnější straně, kde své teplo odevzdá a zkondenzuje. Po kondenzaci je kapalná látka, pomocí úpravy vnitřního povrchu tohoto tělesa, dopravena zpět k teplejšímu konci a děj se následně může opakovat. Díky úpravě vnitřních stěn knotovou strukturou je možné provozovat tepelné trubice v libovolné poloze a zhotovovat je v různých tvarech. Jelikož tepelné trubice

neobsahují žádné pohyblivé části, je jejich provozní spolehlivost vysoká. Tepelné trubice také snášejí otřesy. Další výhodou tvoří jejich bezhlučný a autonomní provoz. [11], [13], [14]



Obrázek 4.3: Schématická ilustrace principu tepelné trubice [13]

Alternativně lze celé elektrické zařízení umístit do elektricky nevodivé lázně a nechat ho samočinně ochlazovat. Pro zvýšení chladicího účinku by bylo možné lázeň se zařízením dovybavit čerpadlem a zajistit tak nucený oběh média. Tato alternativa prakticky vychází z přímého chlazení kapalným médiem. Pro více náročné aplikace lze využít pro výrazné ochlazení zkapalněné plyny a jejich lokální aplikaci na součástku. [11]

Praktickým doplněním by mohla být aplikace Peltierových článků, jako termoelektrického chlazení. Principem je přivedení tepla na straně jedné a zajištění chladnějšího prostředí na straně druhé. Jako doplňující jev je zde vznik elektrického potenciálu, který je poměrně malý a závislý na rozdílu teplot teplejší a chladnější strany. Lze tento článek provozovat i v opačném režimu. Tedy po připojení zdroje elektrického napětí jím prochází elektrický proud a jedna strana se stává teplou a druhá chladnou. Výhodou tohoto článku je tedy to, že kromě odvedení ztrátové energie dále dokáže pracovat jako zdroj pro méně náročný subsystém. Další výhodou je možný autonomní a bezhlučný provoz. Dále je možné v režimu napájení tento měnič řídit PWM modulací a dosáhnout tak plynulé regulace tepla, které vyvíjí horká strana článku. Nevýhodou je jeho malá účinnost. V souvislosti s chlazením se více využívá pro chlazení aplikací s menšími ztrátovými výkony. [16]

Ovšem jsou zde zajímavé kombinace využití konvenčních způsobů chlazení výkonových aplikací a Peltierových článků, které stojí za zmínku. Například situace, kdy by ztrátový výkon chlazené součástky byl větší než ten, který dokáže Peltierův článek přeměnit na elektrickou energii, mohla by být chladnější strana doplněna o chladič, a ten by mohl být případně ofukován ventilátorem, který by tvořil subsystém napájený Peltierovými články. Chladná strana článku by byla lépe chlazená, zvýšil by se rozdíl teplot na obou stranách Peltierova článku a zlepšila by se tak jeho účinnost a zároveň chladicí proces měniče.

5 Návrh usměrňovače

V následující kapitole bude uvedeno, jaké aspekty zařízení byly pro návrh klíčové a jak bylo při návrhu postupováno. Důraz je kladen na potřebné simulace, jejich výsledky a potřebné výpočty k dimenzování zařízení.

Pro zadané požadavky byl proveden návrh a následná realizace usměrňovače, který by mohl rychlou modifikací topologie elektrického obvodu měnit svou činnost. Jedná se o změnu pracovního režimu z jednofázového na třífázové usměrnění.

5.1 Požadavky

Zařízení bylo konstruováno pro laboratorní účely. Požadavkem na usměrňovač bylo usměrnění jak jednofázového, tak třífázového průběhu napětí a proudu. Nebylo žádoucí zařízení při změně typu usměrnění fyzicky přestavovat, změna pracovního režimu je proto zajištěna pouze změnou zapojení vodičů. Volba součástek byla taková, aby mohl být obvod použit pro co nejvíce aplikací, a to v rozumném cenovém horizontu. Pro zamýšlené využití zařízení vyhovuje šestipulzní třífázové usměrnění a nebylo nutné modifikovat zapojení vyhlazovacím kondenzátorem. Pro jednofázový pracovní režim je dostačující usměrnění s pulzností $p = 2$.

5.2 Výběr součástek

Z hlediska parametrů, spolehlivosti, konstrukce, modularity zařízení a pořizovací ceny součástek byly vybrány dva můstkové usměrňovací moduly Diotec KBPC5010FP, coby nejlepší východisko pro zmíněné parametry. Jeden tento modul je určen pro efektivní hodnotu napětí 700 V a proud 50 A. V přílohách této práce je k nalezení datový list těchto usměrňovacích můstků.

Tyto moduly skýtají velkou konstrukční výhodu. Jedná se o integrovanou součástku čtyř usměrňovacích diod v můstkovém zapojení. Uprostřed pouzdra je otvor pro šroub, kterým lze modul upevnit k chladiči.

Druhou velkou výhodou použití těchto modulů pro sestavovaný usměrňovač je, že lze relativně snadnou změnou v topologii zapojení měnit pracovní režim usměrňovače z jednofázového na třífázový a naopak. Toto umožňují nožové kontakty integrované součástky, kterými je realizováno připojení vodičů.

Tyto dvě zmíněné výhody rovněž zajišťují modularitu zařízení, a proto lze snadno vyměnit přívodní vodiče nebo usměrňovací moduly v případě poruchy či modifikace zařízení.

Další nespornou výhodou této volby byla cena. V tabulce níže je vidět porovnání cen jednotlivých součástek, ze kterých by mohlo být zařízení sestaveno.

Tabulka 5.1: Porovnání pořizovacích cen součástek

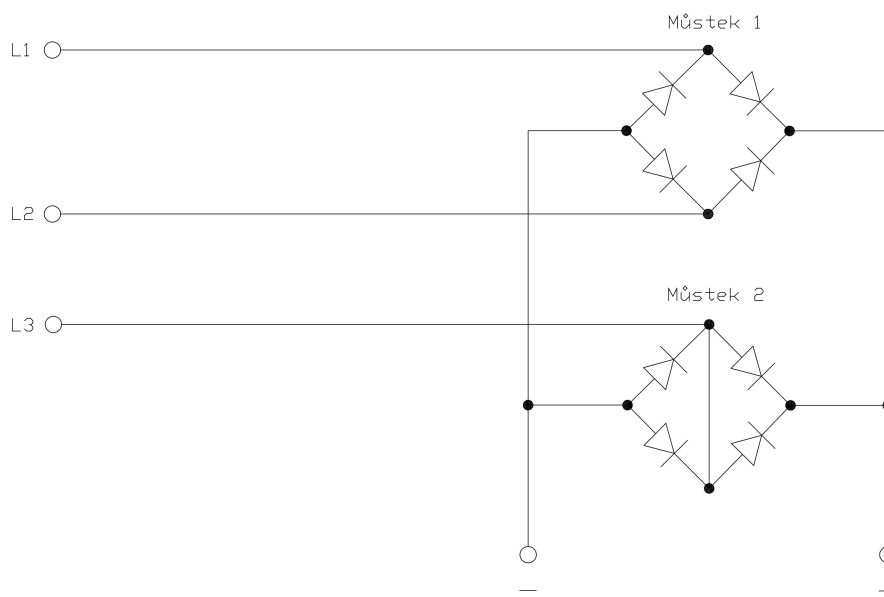
Součástka	Cena [kč/ks]	Počet [ks]	Výsledná cena [kč]
3f diodový můstek - integrovaný (35A a 1200V)	cca 350,-	1	350,-
1f diodový můstek - integrovaný (50A a 1000V)	cca 75,-	2	150,-
Usměrňovací dioda (40A a 600V)	cca 80,-	6	480,-

Hlavní parametrem byl elektrický proud, který je součástka schopna usměrnit při maximální hodnotě vstupního střídavého napětí.

5.3 Schéma zapojení

Pro jednofázové usměrnění je modul usměrňovacího můstku zapojen standardním způsobem pomocí fázového a nulového vodiče. Posléze odebíráme usměrněný výstup pomocí dvou vodičů - kladná a záporná polarita. Druhý modul zůstává nezapojen. V tomto režimu zařízení funguje jako standardní neřízený dvoupulzní usměrňovač.

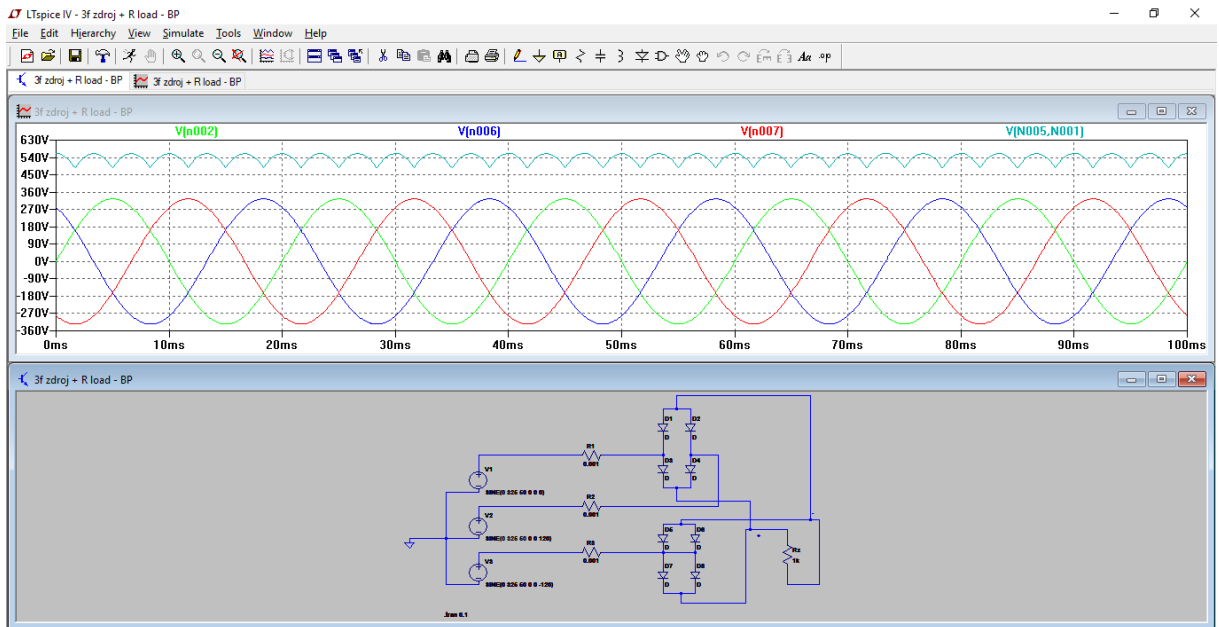
Pokud je vyžadována práce v režimu třífázového usměrnění, je připojen i druhý modul, kde jsou diody zapojeny ve dvou paralelních větvích, jak je vidět na obrázku 5.1. V tomto provedení je třífázový zdroj připojen pomocí tří fázových vodičů a usměrněný výstup je opět vyveden pomocí dvou vodičů. Druhý usměrňovací modul je díky svému zapojení méně proudově zatížen, a proto je i při provozu chladnější, což je podrobněji popsáno v následující kapitole. V tomto režimu zařízení pracuje jako neřízený třífázový šestipulzní usměrňovač.



Obrázek 5.1: Schéma zapojení univerzálního usměrňovače

5.4 Simulace a jejich výstupy

Jako software pro simulace byl primárně zvolen LTspice IV, coby nejdostupnější program pro simulace elektrických obvodů. Na obrázku 5.2 je vyobrazeno pracovní prostředí tohoto softwaru.



Obrázek 5.2: Prostředí softwaru LTspice IV

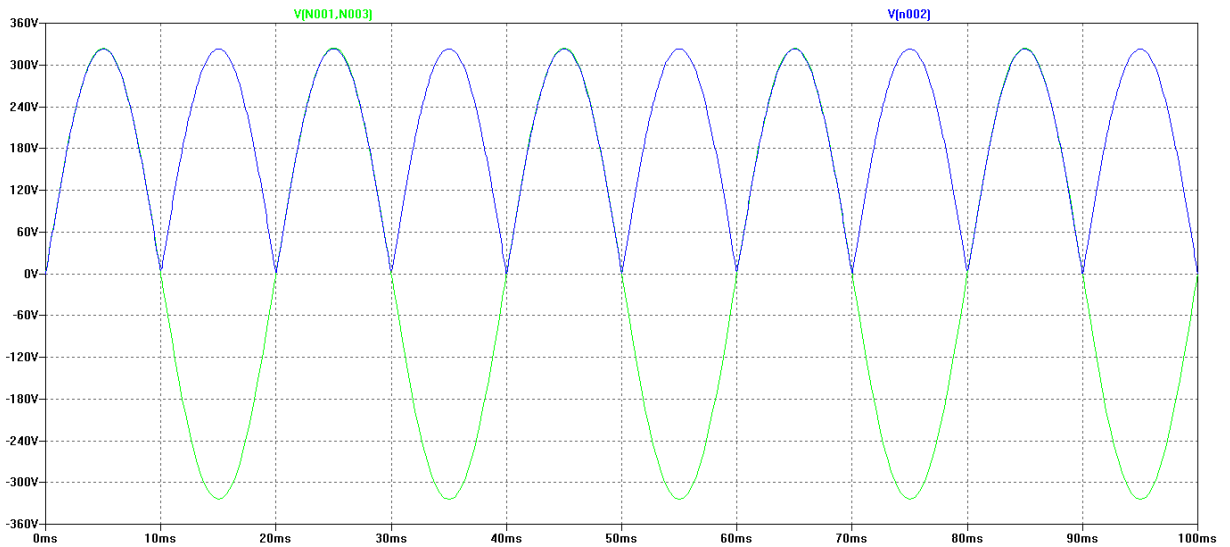
Obdobné simulace funkce zapojení by bylo rovněž možné provést v Simulinku - nadstavbě pro software MATLAB. Pro sestavení obvodu a generování výsledků simulací by byla využita knihovna Plecs.

Pro oba zamýšlené pracovní režimy usměrňovače byly vytvořeny a vyhodnoceny příslušné simulace elektrického obvodu. Vyhodnocována byla zejména správná funkce, která měla odpovídat očekávaným teoretickým předpokladům.

5.4.1 Pracovní režim 1f USM

Jako k první bylo přistoupeno k simulaci pro režim jednofázového usměrňovače. V tomto pracovním režimu je zapojena pouze jedna ze dvou integrovaných součástek ze schématu 5.1. Zdroj tvořil standardní střídavý jednofázový zdroj s amplitudou napětí $U_m = 325$ V, frekvencí $f = 50$ Hz.

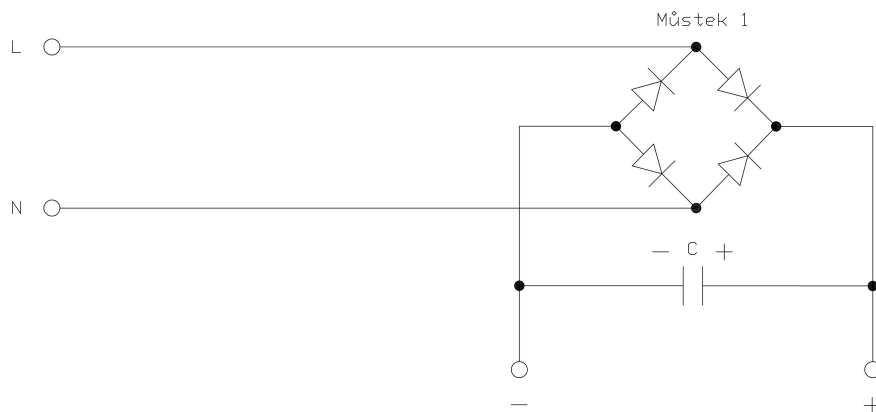
Na výše uvedeném výsledku simulace lze vidět předpokládaný průběh napětí. Vzhledem k aplikované odporové zátěži by proudy měly podobný průběh, ale s rozdílnou amplitudou.



Obrázek 5.3: Průběh vstupního a výstupního napětí v režimu 1f usměrnění

5.4.2 Pracovní režim 1f USM s C modifikací

Pokud by nebylo dvoupulzní usměrnění v jednofázovém usměrňovacím režimu z určitých důvodů vyhovující, bylo by možné přistoupit k modifikaci zapojení paralelním připojením kondenzátoru k výstupním svorkám. Schéma zapojení pro tento pracovní režim je zobrazeno na obrázku 5.4. Předpoklad je takový, že by výstupní průběh napětí měl mít výrazně menší zvlnění.



Obrázek 5.4: Schéma zapojení 1f usměrňovače s C modifikací

Výpočet filtračního kondenzátoru může být proveden několika způsoby. Jedním z nich je použití zjednodušených vztahů pro jeho výpočet, do kterých se dosazuje přímo zvolené zvlnění spolu s dalšími parametry.

$$C_F = \frac{I_z}{\Delta U \cdot f} = \frac{50}{32,36 \cdot 100} = 0,01545 \text{ F} \doteq 1,5 \text{ mF} \quad (5.1)$$

Zde je C_F hodnota kapacity výstupního kondenzátoru, I_z je proud zátěží, ΔU značí zvlnění napětí a f je označení pro frekvenci.

Lze provést i relativně přesnější výpočet, kde jsou zohledněny i úbytky na diodách, které jsou spolu v taktu vedení v sérii. Tento korektnější výpočet by vypadal následovně.

V rovnici níže je uveden vztah pro výpočet proudu kondenzátorem.

$$i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt} \quad (5.2)$$

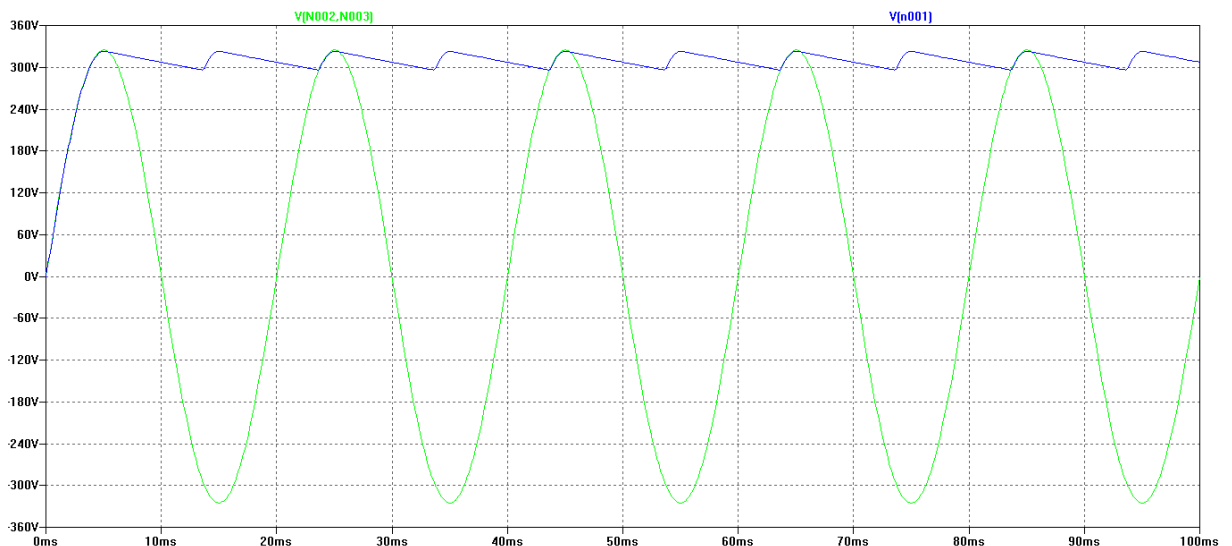
Symbol i_C značí proud kondenzátorem, C je kapacita kondenzátoru a $\frac{du_C}{dt}$ je časová derivace napětí kondenzátoru.

Odtud lze odvodit výpočet filtračního kondenzátoru, který je uveden v následujícím vztahu.

$$C_F = \frac{I_z \cdot T}{U_{dmax} - 2 \cdot U_F - U_{dmin}} = \frac{50 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{325 - 2 \cdot 0,7 - 291,24} = 0,01545 \text{ F} \doteq 1,5 \text{ mF} \quad (5.3)$$

Označení C_F opět reprezentuje hodnotu kapacity filtračního kondenzátoru. Dále hodnota U_{dmax} značí maximální napětí, které by se mohlo na výstupu objevit, to znamená, že jde o amplitudu střídavého zdroje. U_{dmin} je volená hodnota v závislosti na požadovaném zvlnění. Písmeno T značí periodu signálu a I_z je opět proud zátěží, což je v našem případě dosažený nominální proud námi zvoleného můstku.

V obou případech byl vyhlazovací kondenzátor výstupu volen pro nominální proudové zatížení usměrňovače a pro ohmickou zátěž. Lze si povšimnout, že započítaný vliv úbytku na diodách v propustném směru nemá na výsledek prakticky žádný dopad. Výpočtená hodnota napětí U_{dmin} byla stanovena jako 10% z amplitudy zdroje. Jinými slovy se jedná o zvlnění výstupního napětí 10%.



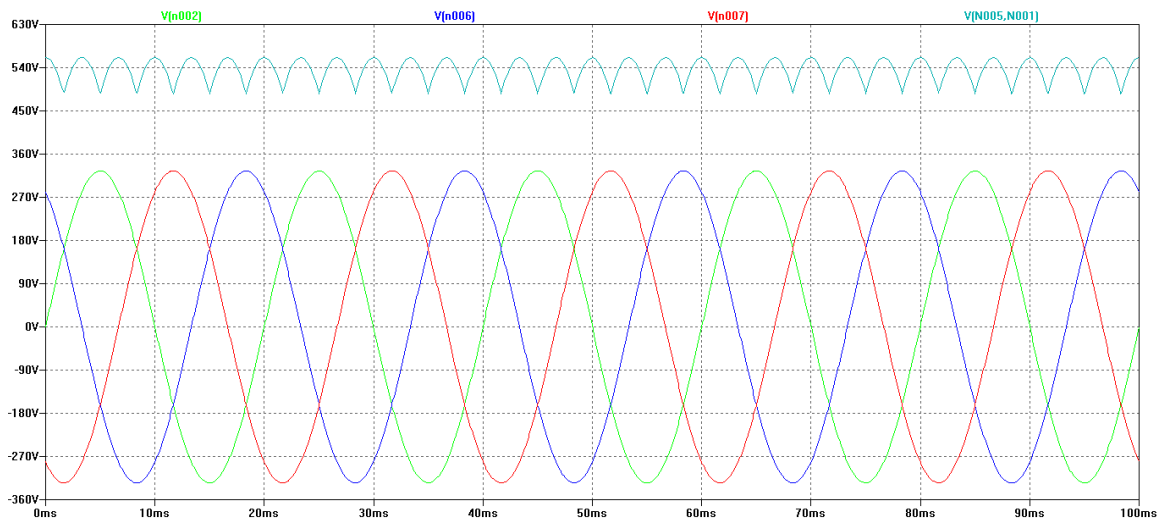
Obrázek 5.5: Průběhy napětí v režimu 1f usměrnění s výstupním C

Ve výstupu simulace na obrázku 5.5 lze vidět markantní zlepšení průběhu výstupního napětí po aplikaci výstupního kondenzátoru. Tato modifikace je pouze navrhovaným

řešením pro případ, že by kvalita usměrnění v jednofázovém režimu přestala vyhovovat. V současné verzi zařízení k připojení výstupního kondenzátoru nebylo přistoupeno.

5.4.3 Pracovní režim 3f USM

Navrhované zařízení mělo primárně pracovat jako třífázový usměrňovač. Pro tuto skutečnost byl sestaven obvod v souladu se skutečnou topologií zapojení, tj. osm diod ve dvou můstcích, zapojení dle schématu 5.1. Jako třífázový zdroj byly vloženy tři zdroje střídavého napětí s amplitudou $U_m = 325$ V, frekvencí $f = 50$ Hz a vzájemným fázovým posunem všech zdrojů o $\varphi = 120^\circ$.



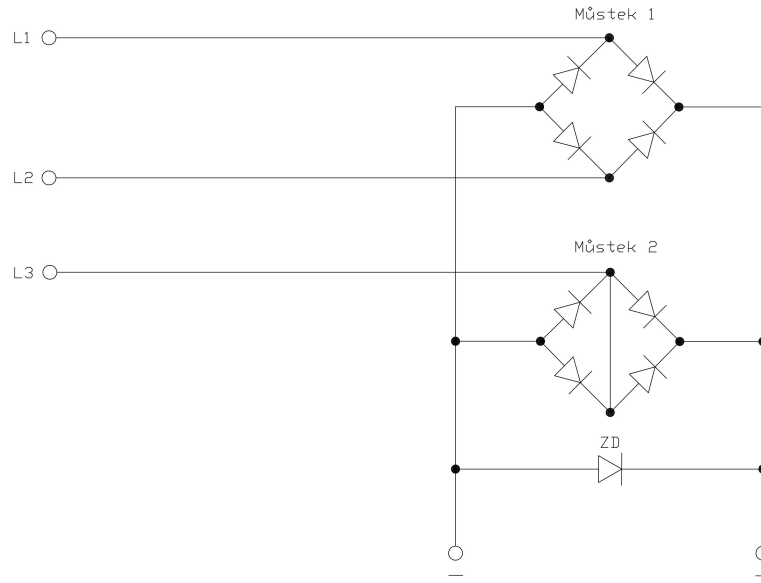
Obrázek 5.6: Průběh vstupních napětí a výstupního napětí v režimu 3f usměrnění

Pro třífázové šestipulzní usměrnění nebyl návrh kondenzátoru připraven ani teoreticky, protože pro usměrnění s pulzností $p = 6$ je kvalita výstupních veličin z hlediska zvlnění již dostačující.

5.4.4 Pracovní režim 3f USM s RL zátěží

Pokud by bylo zapotřebí připojit na výstup usměrňovače zátěž typu RL, mělo by být zapojení modifikováno zpětnou diodou. Upravené zapojení je uvedeno na obrázku 5.7. Takováto zátěž by mohla být reprezentována například budícím vinutím či jinou aplikací, kde se nachází dráha vodičů provedená podobným způsobem, tedy závity. Mohou to být například i větší odporníky.

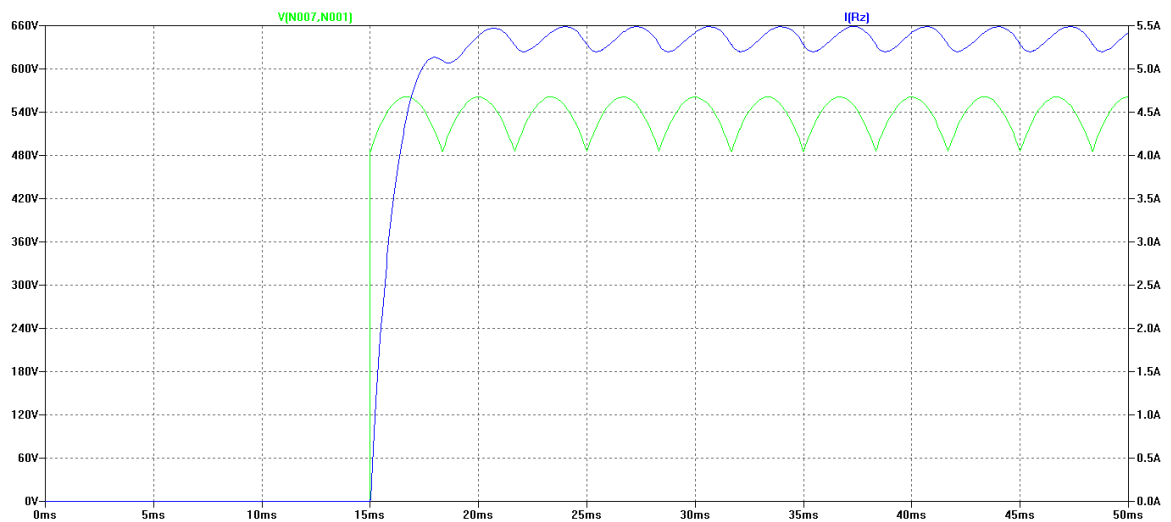
Při akumulování proudu touto indukčností, je nezbytné uvažovat následky plynoucí z náhlého odpojení napájení. Proud akumulovaný cívkou je stavová veličina, která se mění spojitě, a indukčnost zátěže by na náhlý zánik napájení reagovala přepětím, které by mohlo poškodit polovodičové součástky. Proto by bylo nutno zapojení usměrňovače vybavit zpětnou diodou, která v této situaci umožní vybití akumulované energie indukčnosti v zátěži.



Obrázek 5.7: Schéma zapojení 3f usměrňovače pro RL zátěž

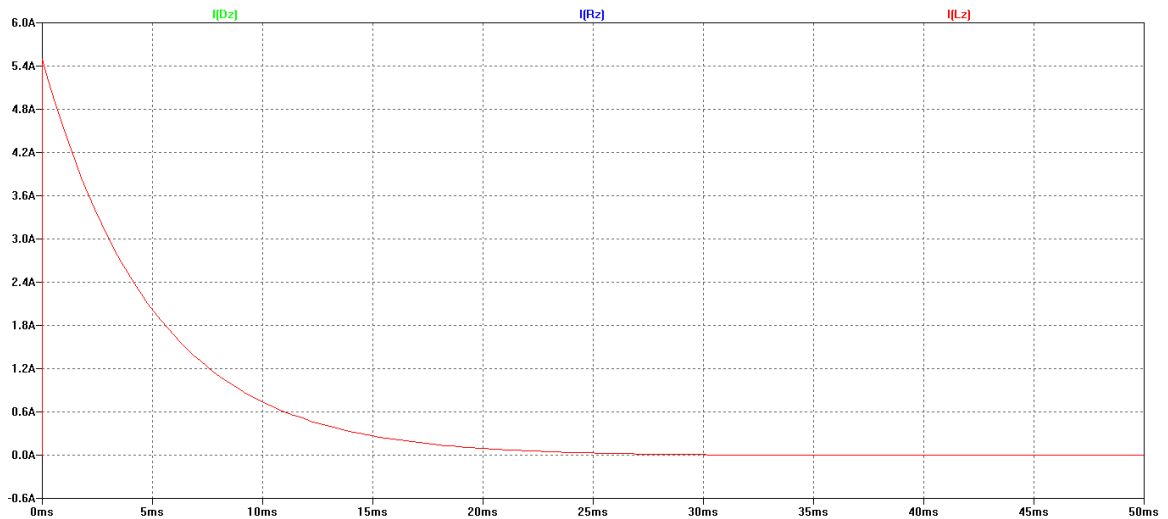
Je rovněž důležité dimenzovat zpětnou diodu pro celé proudové zatížení, které usměrňovač dodává zátěži tohoto typu.

Po připojení zátěže je možno sledovat postupný nárůst proudu indukčností až do ustálené hodnoty, kdy proud pulzuje podobně jako usměrňené napětí, ovšem s jistým fázovým posunem, který je dán velikostí indukčnosti v zátěži.



Obrázek 5.8: Průběh napětí a proudu po připojení 3f zdroje k RL zátěži

Pokud obvod odpojíme od zdroje, antiparalelní dioda zátěže začne vést proud akumulovaný indukčností a postupně se přes zátěž vybije. Při analýze simulovaného obvodu bylo vysledováno, že proudy a napětí v můstcích, tj. mimo zátěž, jsou nulové, což vyhovuje požadavku. Rovněž bylo ověřeno, že celý vybíjecí proud diodou je shodný s proudem odporu a indukčnosti v zátěži.



Obrázek 5.9: Průběh proudu po odpojení 3f zdroje od RL zátěže

5.5 Volba vodičů

S ohledem na možnost ohybu vodičů byly vybrány vodiče typu CYA. Tedy vodiče měděné, lanové s jednovrstvou izolací. Měděné vodiče jsou z hlediska mechanické pevnosti i elektrické vodivosti lepší volbou než vodiče hliníkové. Nevýhodou může být jejich vyšší cena či vyšší hmotnost, ale tyto parametry nebyly při výběru vodičů pro toto zařízení relevantní. Lanové vodiče jsou splétané z dílčích tenkých vodičů a celek tak získává lepší mechanické vlastnosti, zejména co se týče ohybu. Lepší ohyb je pro předpokládanou častou manipulaci s vodiči důležitým parametrem. Jednovrstvá PVC izolace zamezuje osobám v blízkosti pracujícího zařízení, aby se přímo dotkly vodičů, které jsou při provozu protékány elektrickým proudem.

Pro přehled je uvedena následující tabulka 5.2, kde je k nalezení shrnutí nejdůležitějších parametrů jednotlivých typů vodičů vhodných k použití pro konstruované zařízení. Tyto parametry jsou průřez a proudová zátěžitelnost.

Tabulka 5.2: Přehled vodičů

Typ vodiče	Průřez [mm ²]	Proudová zátěžitelnost [A]
CY (plný průřez)	2,5	30
CY (plný průřez)	4	41
CY (plný průřez)	6	53
CYA (lanový průřez)	2,5	33
CYA (lanový průřez)	4	44
CYA (lanový průřez)	6	57

V ideálním případě by byl zvolen průřez 6mm², kde by bylo možné zařízení proudově zatížit více jak 50 A, což je jmenovitý proud vybraných usměrňovacích modulů.

5.6 Výpočet střední hodnoty výstupu

Střední hodnota usměrněného výstupu je hlavním charakteristickým parametrem usměrňovače.

Základním vztahem, ze kterého se vychází, je definice střední hodnoty.

$$U_{AV} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (5.4)$$

Pokud jsou do vztahu dosazeny hodnoty pro jednofázové dvoupulzní usměrnění, pak lze odvodit vztah pro výpočet střední hodnoty příslušného usměrnění.

$$U_{1fAV} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi U_m \sin(\omega t) dt \Rightarrow \frac{2U_m}{\pi} \quad (5.5)$$

Analogicky lze odvodit vztah pro střední hodnotu třífázového šestipulzního usměrnění.

$$U_{3fAV} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} U_m \sin(\omega t) dt \Rightarrow \frac{3U_m}{\pi} \quad (5.6)$$

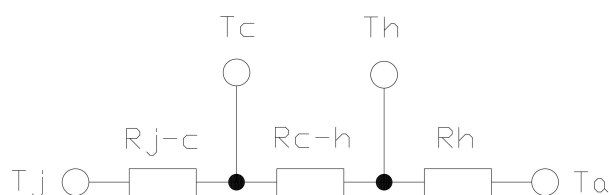
Ve výsledném vztahu pro jednofázové usměrnění je hodnota U_m maximální hodnotou napětí. Pro usměrnění třífázové je to maximální hodnota sdruženého napětí.

Lze tedy vidět, že při lepším vyhlazení výstupu, tj. vyšší pulznosti, se zvětší střední hodnota výstupu a výstup se svou maximální hodnotou přiblíží více k hodnotě maxima, kterou by zdroj dovedl dodávat při dokonalém usměrnění.

5.7 Dimenzování chladiče

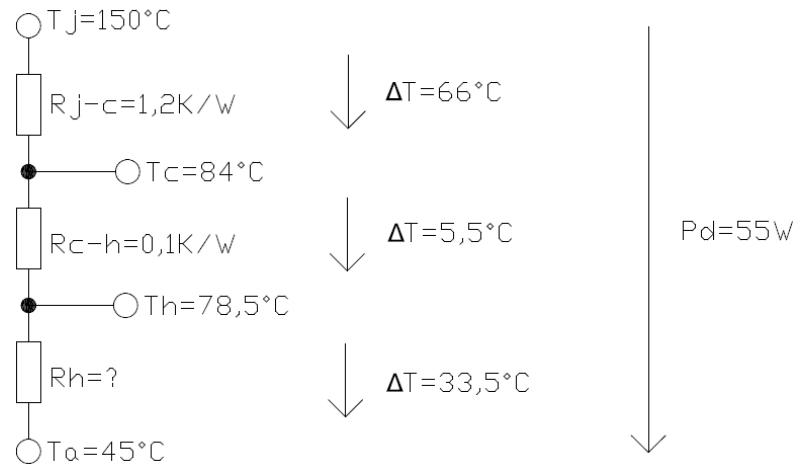
Pro určení tepelného odporu chladiče, který nese polovodičové součástky, byl proveden výpočet pomocí analogie tepelných obvodů k obvodům elektrickým. Je zde totiž možnost využití podobného fyzikálního chování námi známých i neznámých veličin, které v tepelném schématu figurují. [10]

Jinými slovy je použito schéma, kde se rozdíl teplot chová jako rozdíl potenciálů (analogicky k potenciálům napěťovým), odváděný tepelný výkon je analogií k elektrickému proudu a tepelný odpor odpovídá odporu elektrickému. Toto schéma je zobrazeno na následujícím obrázku 5.10.



Obrázek 5.10: Schéma tepelného obvodu

Výstupem takového výpočtu je tepelný odpor hledaného chladiče. V nabídce dodavatelů pasivních chladičů pro elektrotechnické aplikace figuruje jako charakteristický parametr právě tepelný odpor. Dle tohoto parametru lze tedy najít vhodný chladič k zamýšlené aplikaci.



Obrázek 5.11: Ilustrace pro výpočet tepelného odporu chladiče

Pro výpočet byly zapotřebí vstupní hodnoty. Byla zvolena teplota okolí chladiče $T_a = 45^\circ\text{C}$. Teplota okolí je chápána jako teplota prostředí, ve kterém se dané zařízení nachází a ve kterém pracuje. V případě tohoto zařízení jsou laboratoře prostorem pro zamýšlené využití, kde teplota okolí dosahuje obvykle $T_a = 25^\circ\text{C}$. Chladič zařízení je tedy předdimenzován a lze ho tak použít v prostorách s vyšší teplotou okolí. Další parametry byly vyhledány v datovém listu. Je to maximální teplota přechodu PN T_j , úbytek napětí na součástce U_F při protékání jmenovitého proudu I_F a následně odvozený výkon P_d , který je nutno odvést.

$$P_d = U_F \cdot I_F = 1,1 \cdot 50 = 55 \text{ W} \quad (5.7)$$

Pro tento ztrátový výkon by byl dimenzován chladič při použití jednoho usměrňovacího modulu. Moduly jsou však dva, na tuto skutečnost je nutno pamatovat při výběru skutečného chladiče. Dle různých pohledů na problematiku lze počítat odváděný ztrátový výkon jako 80% z tohoto výsledku. Chladič byl však pro jistotu více dimenzován, a to na plný ztrátový výkon.

Další známou proměnnou je tepelný odpor přechodu mezi PN přechodem a pouzdrem součástky R_{j-c} . Tepelný odpor pro přechod mezi pouzdrem a chladičem R_{c-h} byl volen s pesimistickým odhadem. Figuruje zde předpoklad, že tento přechod bude ošetřen vrstvou teplovodivé pasty, která má velice dobrou tepelnou vodivost. Zvolená hodnota je tedy pro výpočet volena horší, než jaká by se skutečně vyskytovala v reálné situaci. Praktickým dopadem zmíněné skutečnosti by byl lepší odvod tepla ze součástky na chladič, menší úbytek teploty na této vrstvě pasty a bylo by možné aplikovat chladič s vyšší hodnotou tepelného odporu. Dále je přistoupeno k využití zmíněné analogie elektrického a tepelného obvodu pro výpočet chladiče.

$$R_t = \frac{\Delta T}{P_d} \quad (5.8)$$

$$\Delta T = R_t \cdot P_d \quad (5.9)$$

Pomocí těchto jednoduchých rovnic a odváděného tepelného výkonu je možné vypočítat jednotlivé úbytky teplot, jednotlivé teploty a z nich nakonec potřebný tepelný odpor chladiče. Situace je znázorněna na obrázku 5.11. Odpor chladiče byl stanoven na hodnotu 0,6 K/W. Výsledný vypočtený tepelný odpor odpovídá chladiči, který by bylo nutno využít pro chlazení jednoho modulu. Pro chlazení obou modulů by bylo nutné použít chladič s alespoň polovičním tepelným odporem, tedy 0,3 K/W. Je však možné uvažovat i skutečnost, že druhý můstek je dvakrát méně proudově zatížen, a tak je jeho ztrátové teplo nutné k odvedení rovněž dvakrát menší než v můstku prvním. Tato skutečnost byla ignorována se záměrem předimenzovat chladič zařízení. Výpočet byl proveden pro ustálený stav všech veličin, které ve výpočtech figurují.

6 Realizace a testování

Tato kapitola shrnuje průběh stavby zařízení a výsledky provedených zkoušek. Bylo provedeno dimenzování chladiče a zařízení bylo sestaveno v laboratořích Katedry elektromechaniky a výkonové elektroniky. S přihlédnutím ke snížení cenové náročnosti projektu byly využity některé komponenty a materiál, který byl v těchto prostorách nalezen.

6.1 Stavba zařízení

Při konstrukci a kontaktování vodičů na usměrňovací moduly bylo použito vodičů, které se momentálně nacházely v prostorách laboratoří. Zde byly k dispozici vodiče CYA, ale pouze s průřezem 2,5 a 4 mm², a proto nelze můstky zatížit jmenovitým proudem, ale pouze proudem cca 33 A. Jak bylo ale zmíněno v předchozí kapitole, není časově ani finančně náročné v případě potřeby modifikovat usměrňovač a nahradit stávající vodiče za vodiče s větším průřezem a zvýšit tak jejich možné proudové zatížení. Vybrané vodiče byly opatřeny vidlicovými kabelovými oky příslušné velikosti na vstupní straně střídavého zdroje a výstupní usměrněné straně. Pro zapojení usměrňovacích modulů byly vodiče vybaveny fastonovými konektory. Vstupní přívodní vodiče mají černou barvu izolace a výstupní vodiče modrou - značení pro mínus a červenou - značení pro plus. Přívodní vodiče od střídavého napájení a vodiče usměrněného výstupu byly z důvodů lepší manipulace sdruženy do svazků pomocí stahovacích pásek.

Samotné usměrňovací moduly byly k chladiči připevněny pomocí segmentu závitové tyče, uložené v závitové díře vyvrtané do chladiče a upravené závitníkem. Zmíněné tyče byly našroubovány do takové úrovně, aby jejich část zůstala nad chladičem a mohly na ní být umístěny součástky. Následně byly oba moduly usazeny. Po tomto usazení byly zajištěny maticí s podložkou.

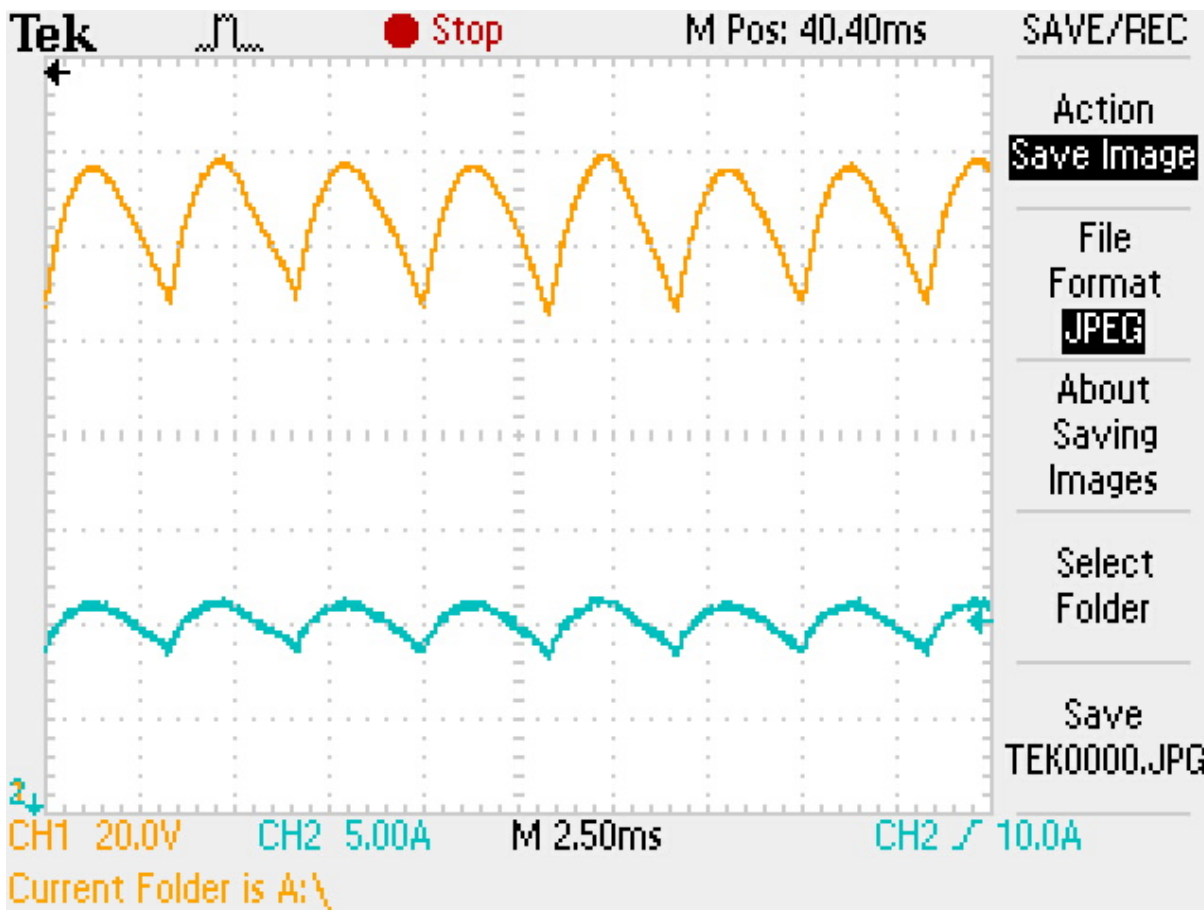
Po osazení můstků bylo provedeno připojení vodičů a zařízení bylo připraveno k použití.

6.2 Kontrola správné činnosti

Přímo navazujícím krokem po sestavení usměrňovače bylo ověření, zda zařízení plní funkci, pro kterou bylo sestaveno. Toto testování bylo provedeno pomocí osciloskopu. Kontrola oteplení zařízení byla provedena termokamerou a multimetrem s připojenou termočlánkovou sondou v rámci zatěžovací zkoušky. Všechny zkoušky byly prováděny pro pracovní podmínky, ve kterých má být zařízení využíváno nejvíce. Jde tedy zejména o režim třífázového usměrnění v prostorách laboratoří.

6.2.1 Měření osciloskopem

Toto měření bylo důležité pro ověření průběhu výstupních veličin usměrňovače a kvality usměrnění. Mělo v první řadě bezprostředně ověřit správnost simulací a realizace zařízení. Měřením byl ověřen teoretický předpoklad o pulznosti a průběhu výstupu. Oproti výsledkům simulací je zde patrná malá odchylka ve tvaru pulzů. Tento fenomén byl přisouzen disbalanci zdroje, který sloužil pro třífázové napájení usměrňovače. Jako zátěž při tomto měření sloužily laboratorní reostaty, tedy zátěž typu R.



Obrázek 6.1: Průběh výstupních veličin změřený pomocí osciloskopu

Z osciloskopu byly exportovány naměřené průběhy ve formátu *.JPG, které jsou zobrazeny na obrázku 6.1. Dále byly exportovány i soubory datových logů vhodné pro vykreslení a analýzu v softwaru MATLAB nebo alternativně v tabulkovém procesoru Excel ze softwarové nabídky Office od společnosti Microsoft.

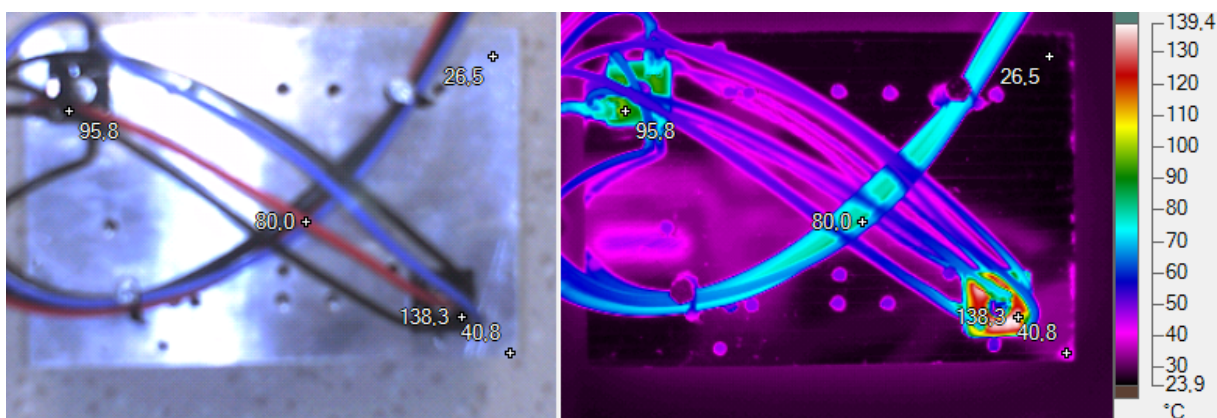
6.3 Zatěžovací zkouška

Po dokončení zařízení a kontrole činnosti byla provedena zatěžovací zkouška. Zátěž byla tvořena dvěma nastavitelnými odporů. Usměrňovač byl připojen k laboratornímu panelu, který je napájen ze zdrojovny. Efektivní hodnota napájecího proudu byla 33 A.

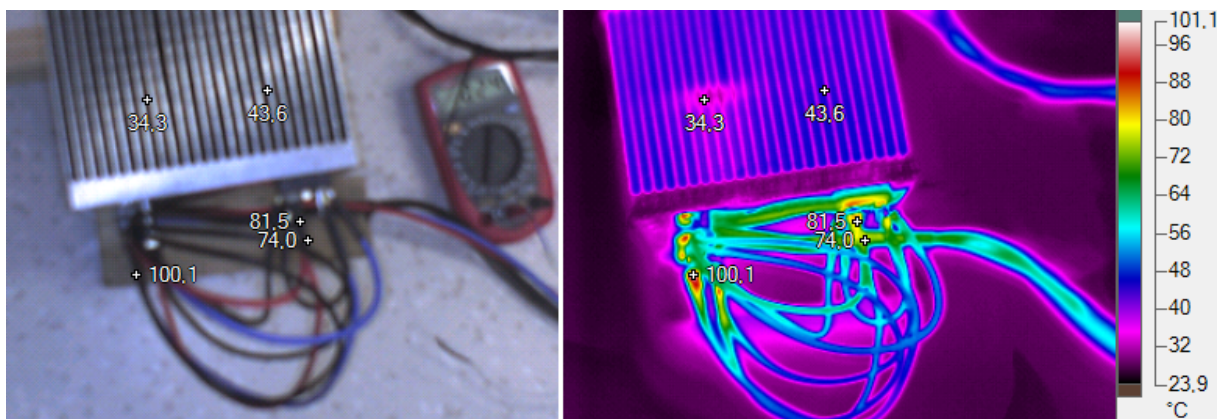
6.3.1 Měření termokamerou

Pomocí termokamery Fluke Ti55 bylo kontrolováno oteplení při zatížení zařízení. Jak bylo předpokládáno, můstek zatížený první a druhou fází se ohřívá rychleji než můstek zatížený pouze třetí fází. Při měření bylo možné sledovat nabíjení tepelné kapacity hliníkového chladiče. Rovněž bylo možné sledovat ohřívání přírodních vodičů a postupné dohřívání diodových můstků. Při tomto měření byla kamera uchycena na tripodovém stativu a byla tak zajištěna její neměnná poloha. To umožnilo snímkovat postupný nárůst teploty ze stejného místa.

Oteplovací zátěžová zkouška proběhla při neoptimální - horizontální poloze chladiče, a proto se teplý vzduch z prostoru mezi žebry nemohl efektivně odvést mimo chladič přirozeným způsobem. Tato situace je vyobrazena na obrázku 6.2. Při pootočení zařízení do polohy, kdy žebra chladiče byla v optimálním - vertikálním natočení, stoupal ohřátý vzduch ze žebor chladiče přirozeným způsobem mnohem lépe a bylo dosaženo lepšího chlazení při stejných zatěžovacích podmínkách. Je však nutné zařízení podložit a zajistit tak přirozenou cirkulaci vzduchu mezi žebry chladiče. Toto zlepšení provozních podmínek je zachyceno na obrázku 6.3.



Obrázek 6.2: Snímek z termokamery Fluke Ti55 - horizontální poloha



Obrázek 6.3: Snímek z termokamery Fluke Ti55 - vertikální poloha

V neoptimální poloze hodnota povrchové teploty teplejšího z můstků dosáhla téměř 140°C. Po změně polohy zařízení do optimální polohy je již možné pozorovat výrazně lepší chlazení součástek. Hodnota povrchové teploty více zatěžovaného můstku poté dosahovala pouze 100°C. Méně zatížený můstek má v obou případech vždy nižší teplotu než můstek více zatěžovaný, a to zhruba o 30% než můstek vytíženější v poloze neideální a o 20% v poloze ideální. Dále lze sledovat, že se i teplota vodičů zařízení mírně snížila. Navzdory stejnému proudovému zatížení zařízení zde již probíhá volná konvekce, a tak okolní vzduch v blízkosti vodičů cirkuluje lépe. Svrchní plocha chladiče v horizontální poloze dosahuje teploty od 25°C v nejchladnějším místě do 40°C v místě nejteplejším. Při pootočení usměrňovače je možné zachytit teplotu vzduchu v prostoru mezi žebry hliníkového chladiče a tato teplota v optimální poloze dosahovala zhruba 45°C. Teplota samotných žebor byla pomocí IR snímování určena zhruba na 35°C.

V prostředí softwaru Smart View 2.0, který výrobce dodal k termokameře, bylo později možné editovat snímky z termokamery. Tato editace spočívá v přidávání pozorovaných bodů, ke kterým je přiřazena změřená teplota. Dále jsou zde možnosti změny zobrazení snímků a další nástroje, které jsou při pozdější analýze velice nápomocné. Na obrázku 6.2 a 6.3 jsou například snímky z termokamery zobrazeny v IR spektru i ve viditelném spektru.

6.3.2 Kontaktní měření teploty

Pro ověření bylo provedeno i kontaktní měření teploty pomocí termočláňkové sondy připojené k multimetru. Toto měření je z pohledu aparatury, přípravy i provedení mnohem méně náročné. Bylo k němu tedy přistoupeno jako k doplňujícímu měření teploty a bylo realizováno pouze v některých časech měření a pouze v některých oblastech zařízení. Tyto oblasti pak byly zejména povrchy můstků a několik náhodných bodů na chladiči. Toto měření ověřilo měření termokamerou.

6.4 Určení tepelného odporu reálného chladiče

Při konstrukci byl použit chladič, který byl dle odhadu dostačující pro zamýšlené zatížení usměrňovače. Byla tedy provedena kontrola, zda jeho tepelný odpor koresponduje s navrhovanou hodnotou tepelného odporu chladiče z předchozí kapitoly.

Dle následujícího vztahu lze vypočítat průchozí tepelný tok Φ , jakožto součin koeficientu přestupu tepla K , povrchu chladiče S a rozdílu teplot v okolí chladiče ΔT . [11] Tento rozdíl teplot je rozdíl teplot T_h , což je teplota mezi chladičem a pouzdrem součástky, a T_a , což je teplota okolí chladiče.

$$\Phi = K \cdot S \cdot \Delta T \quad (6.1)$$

Pokud bychom z uvedeného vztahu vyjádřili poměr rozdílu teplot ΔT a odváděného tepelného toku Φ , dostaneme tak vztah pro výpočet tepelného odporu, kde figurují pouze zbývající proměnné. V tomto případě je chladicím médiem volné konvekce vzduch. Koeficient přestupu tepla pro nenucený oběh plynného chladicího média byl zvolen jako průměr z intervalu, ze kterého ho lze volit, tj. $K = 6$. [11] Tento byl určen dle převzaté tabulky 6.1. Povrch chladiče byl po přeměření rozměrů určen jako $S = 1,28 \text{ m}^2$.

Tabulka 6.1: Tabulka hodnot K pro různá média a jejich proudění [11]

Chladicí médium	Volné proudění $K [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	Nucené proudění $K [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
plyn	2-10	10-100
olej	200-300	300-1000
voda	200-600	1000-3000
nasyčená pára	-	800-10000
kondenzát vodní páry	-	800-12000
voda ve varu	500	45000

$$R_t = \frac{\Delta T}{\Phi} = \frac{1}{K \cdot S} = \frac{1}{6 \cdot 1,28} = 0,13 \text{ K/W} \quad (6.2)$$

Takto byl určen tepelný odpor použitého chladiče na hodnotu $R_t = 0,13 \text{ K/W}$. Tato hodnota je téměř poloviční než hodnota, která byla navržena v předchozí kapitole. S přihlédnutím ke skutečnosti, že již návrh byl předimenzován, lze konstatovat, že použitý chladič by měl být vyhovující i pro neoptimální podmínky používání zařízení. Tyto podmínky mohou být vyšší teplota pracovního prostředí či dříve zmíněná nevhodná poloha zařízení.

6.5 Kryt

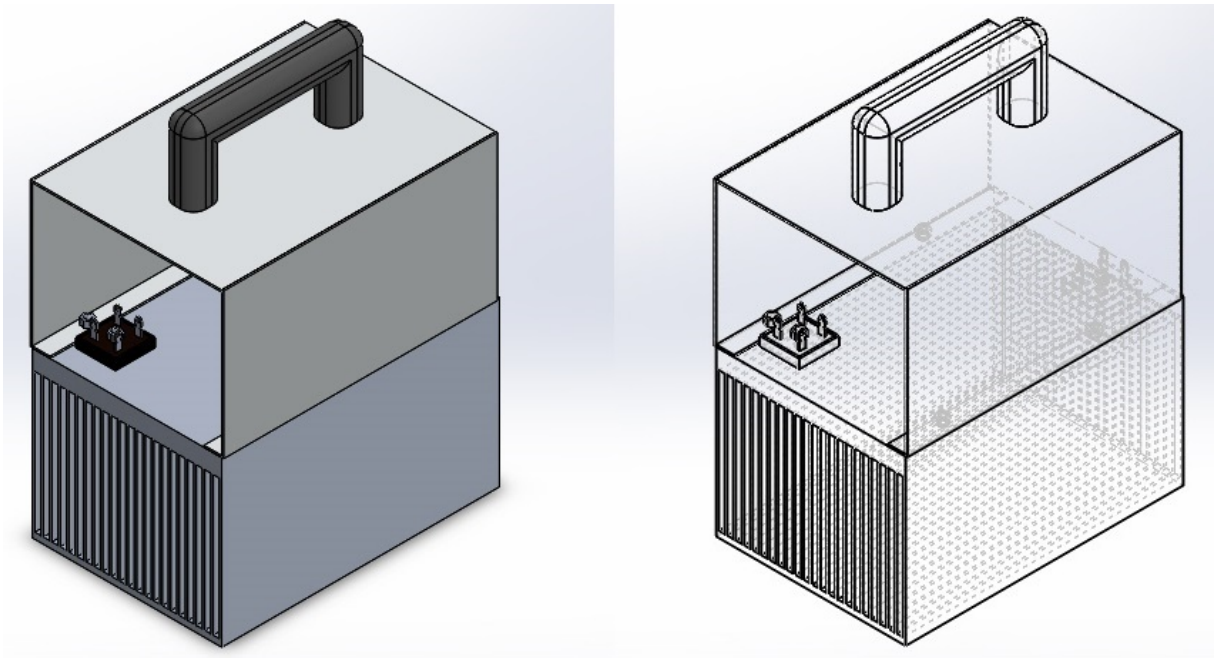
Po sestavení zařízení, provedení zkoušky funkce a realizaci zatěžovací zkoušky bylo vyhodnoceno, že by bylo účelné vyzbrojit zařízení krytem.

Hlavním důvodem je, že zařízení je relativně malé a snadno přenositelné. Pro praktickou mobilitu by bylo efektivnější umístit ze shora zařízení kryt opatřený madlem vhodným pro úchyt.

Rovněž je možné uschovat přívodní vodiče zařízení do prostoru mezi můstkem a krytem. Tím se sníží pravděpodobnost jejich poškození.

Další provozní výhodou po montáži krytu je i to, že se laboratorní pracovník nemůže snadno dotknout funkčních částí usměrňovače a nemůže se tedy poranit. Takovým zraněním by pravděpodobně byly lehké popáleniny. V pracovním režimu totiž stoupá teplota přívodních vodičů, ale hlavně stoupá povrchová teplota usměrňovacích můstků. Krytem lze také do jisté míry zamezit dotyku osob s živými částmi zařízení.

Ilustrativní 3D model byl zhotoven v softwaru SolidWorks a je zobrazen na obrázku 6.4. Výrobní výkres pro kryt byl vyhotoven v softwaru progeCAD 2014 Professional.



Obrázek 6.4: Model zařízení vybaveného krytem

7 Závěr

Hlavními body práce bylo uvedení možných využívaných topologií zapojení polovodičových jednofázových a třífázových usměrňovačů, návrh konkrétního usměrňovače pro jednofázovou a třífázovou střídavou síť o frekvenci 50 Hz, dimenzování chladiče pro součástky, realizace a odzkoušení zařízení. Zmíněné zásadní úkoly byly splněny.

V teoretické části byly shrnuty základní poznatky o polovodivosti a polovodičových součástkách, které jsou pro usměrňovače využívány. V návaznosti byly uvedeny důvody využití usměrňovačů, jejich možné zatěžování a roztřídění usměrňovačů dle několika různých hledisek, jako je historický vývoj, možnosti řízení či komutace usměrňovače. Dále byly uvedeny možné topologie zapojení polovodičových usměrňovačů pro jednofázové a třífázové napájení.

V praktické části byl již proveden návrh konkrétního usměrňovače. Návrh obvodu byl ověřen simulací pomocí softwaru LTSpice IV. Dále byly také navrženy, a stejným způsobem ověřeny, některé možné modifikace zařízení. Těmito modifikacemi jsou následující: filtrační kondenzátor pro jednofázové dvoupulzní usměrnění či zpětná dioda při připojení RL zátěže. Byl proveden výběr vodičů pro jmenovité proudové zatížení a chladič byl dimenzován pro ztrátový výkon součástek při stejném zatížení. Následoval popis stavby a skutečného provedení zařízení. Po něm byla vyhodnocena zkouška správné činnosti provedená pomocí osciloskopu a oteplovací zkouška odporovou zátěží, která byla sledována termokamerou.

Při testování zařízení byla osciloskopem ověřena správná činnost, a to šestipulzní třífázové usměrnění při zapojení obou modulů, což je hlavní zamýšlený pracovní režim. Po analyzování snímků získaných termokamerou při oteplovací zkoušce lze konstatovat, že pro současné maximální možné zatížení je chladič dostačující i pro práci v neoptimální - horizontální poloze. Sdružení přívodních a výstupních vodičů do svazku má jistou výhodu při manipulaci s vodiči, ale tato výhoda je doprovázena značnou nevýhodou, a tou je vyšší teplota vodičů ve svazku. Tuto situaci je možné rovněž pozorovat na snímcích z termokamery, které jsou uvedeny v přílohách této práce. V případě, že by se tato skutečnost stala problémovou, je v budoucnu kdykoliv možné svazek vodičů rozdělit.

Zařízení je kompletní a připravené k použití. Vzhledem k současně instalovaným vodičům je proudově zatížitelné do 33 A. Usměrňovač je vhodné provozovat v optimální - vertikální poloze a vhodným podložením chladiče zajistit efektivní přirozenou konvekci. Zařízení je využíváno jako zdroj pro stejnosměrné aplikace v laboratořích příslušné katedry dle potřeb jejích pracovníků.

Ke zdokonalení zařízení by mohly být doplněny rozměrově vhodné Peltierovy články mezi moduly a chladič. Bylo by tak dosaženo lepšího chladícího účinku a při použití správných článků by jimi mohl být napájen systém nucené ventilace chladiče, a chlazení tak ještě více zefektivnit.

Literatura a internetové zdroje

- [1] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*. 3., rozš. vyd. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-1241-5.
- [2] FROHN, Manfred. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-123-3.
- [3] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-422-8.
- [4] PAVELKA, Jiří, Zdeněk ČEŘOVSKÝ a Jiří LETTL. *Výkonová elektronika*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03626-6.
- [5] SCHURE, Alexander. *Vacuum tube rectifiers*. New York: J. F. Rider, 1958.
- [6] ŠVESTKA, David. *Trakční transformátory, usměrňovače* [online]. AtlasLokomotiv.net: ©2004-2017 [cit. 25.4.2017]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/page-transformatory.html>
- [7] Edison Tech Center. *Mercury Arc Rectifiers* [online]. [cit. 25.4.2017]. Dostupné z: <http://www.edisontechcenter.org/MercArcRectifiers.html>
- [8] ABB. *ABB traction rectifiers* [online]. [cit. 27.4.2017]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/2c94715f41cc5e11c12577a0004872b6/ABB%20traction%20rectifiers_4128PL219-W2-en_09-2010.pdf
- [9] ALL ABOUT CIRCUITS. *Rectifier Circuits Chapter 3 - Diodes and Rectifiers* [online]. EETech Media [cit. 18.3.2017]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-3/rectifier-circuits/>
- [10] FUKÁTKO, Jaroslav, Jiří ŠINDELKA a Tomáš FUKÁTKO. *Teplo a chlazení v elektronice*. Praha: BEN - technická literatura, 1997. ISBN 80-86056-24-4.

- [11] FUKÁTKO, Tomáš a Jaroslav FUKÁTKO. *Teplo a chlazení v elektronice II*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-199-3.
- [12] Fischer Elektronik. *Katalog* [online]. [cit. 28.4.2017]. Dostupné z: <http://www.fischerelektronik.de/fileadmin/fischertemplates/download/Katalog/chladice.pdf>
- [13] *Heat Pipe .nl*. [online]. Heat Pipe .nl, ©2010 [cit. 28.4.2017]. Dostupné z: <http://www.heatpipe.nl/index.php?page=heatpipe&lang=EN>
- [14] STACH, Jan. Základy PC: chlazení a tichý počítač. *pctuning* [online]. EMPRESA MEDIA, a.s. [cit. 28.4.2017]. ISSN 1214-0201. Dostupné z: http://pctuning.tyden.cz/navody/zaklady-stavba-pc/7167-zaklady_pc-chlazení_a_tichy_pocitac
- [15] BOMEX. *Eloxování* [online]. Bomex, ©2016 [cit. 18.3.2017]. Dostupné z: <https://www.bomex.cz/technologie/eloxovani#>
- [16] BRÁZDIL, Marian. *Peltierův článek pro chlazení malých výkonů*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

Přílohy

Příloha A.1 Datasheet integrovaných můstků KBPC5010FP - strana č.1

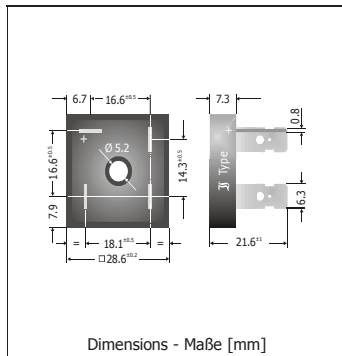


KBPC5000FP ... KBPC5012FP

KBPC5000FP ... KBPC5012FP

Silicon-Bridge-Rectifiers Silizium-Brückengleichrichter

Version 2008-10-29



Nominal current Nennstrom	50 A
Alternating input voltage Eingangswchelspannung	35...800 V
Plastic case with alu bottom Plastikgehäuse mit Alu-Boden	28.6 x 28.6 x 7.3 [mm]
Weight approx. Gewicht ca.	17 g
Compound has classification UL94V-0 Vergussmasse nach UL94V-0 klassifiziert	
Standard packaging bulk Standard Lieferform lose im Karton	



Recognized Product – Underwriters Laboratories Inc.® File E175067
Anerkanntes Produkt – Underwriters Laboratories Inc.® Nr. E175067

Maximum ratings

Grenzwerte

Type Typ	Max. alternating input voltage Max. Eingangswchelspannung V_{VRMS} [V]	Repetitive peak reverse voltage Periodische Spitzensperrspannung V_{RRM} [V] ¹⁾
KBPC5000FP	35	50
KBPC5001FP	70	100
KBPC5002FP	140	200
KBPC5004FP	280	400
KBPC5006FP	420	600
KBPC5008FP	560	800
KBPC5010FP	700	1000
KBPC5012FP	800	1200

Repetitive peak forward current Periodischer Spitzenstrom	f > 15 Hz	I_{FRM}	90 A ²⁾
Peak forward surge current 50/60 Hz half sine-wave Stoßstrom für eine 50/60 Hz Sinus-Halbwell	$T_A = 25^\circ\text{C}$	I_{FSM}	400/450 A
Rating for fusing, t < 10 ms Grenzlastintegral, t < 10 ms	$T_A = 25^\circ\text{C}$	i ² t	800 A ² s
Operating junction temperature – Sperrschichttemperatur Storage temperature – Lagerungstemperatur		T_j T_s	-50...+150°C -50...+150°C

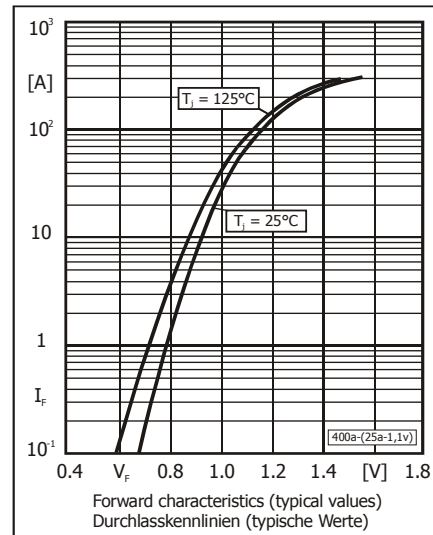
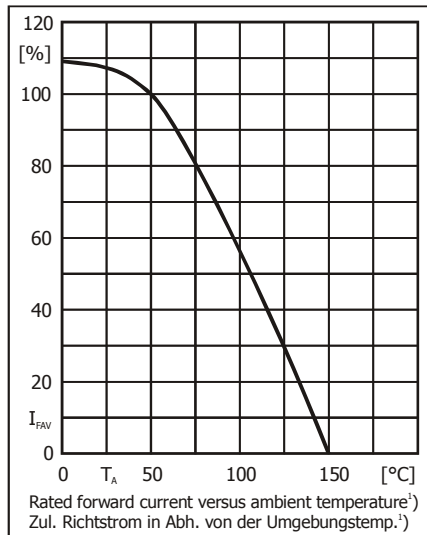
1 Valid per diode – Gültig pro Diode
2 Valid, if the temperature of the case is kept to $T_c = 120^\circ\text{C}$ – Gültig, wenn die Gehäusetemperatur auf $T_c = 120^\circ\text{C}$ gehalten wird

Příloha A.2 Datasheet integrovaných můstků KBPC5010FP - strana č.2



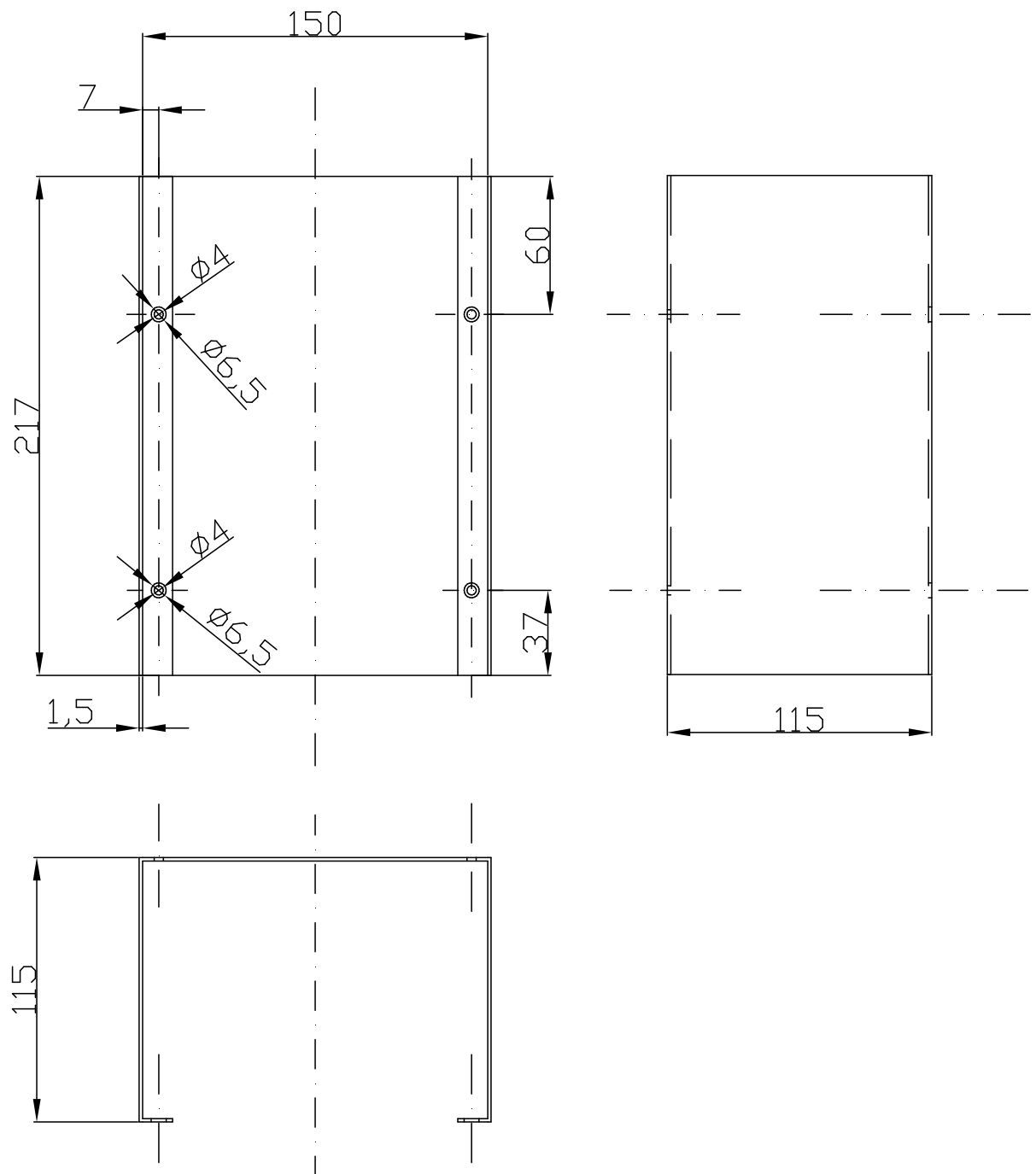
KBPC5000FP ... KBPC5012FP

Characteristics	Kennwerte			
Max. current with cooling fin 300 cm ² Dauergrenzstrom mit Kühlblech 300 cm ²	T _A = 50°C	R-load C-load	I _{FAV} I _{FAV}	50 A 46 A
Forward voltage – Durchlass-Spannung	T _j = 25°C	I _F = 25 A	V _F	< 1.1 V ²⁾
Leakage current – Sperrstrom	T _j = 25°C	V _R = V _{RRM}	I _R	< 25 μA
Isolation voltage terminals to case Isolationsspannung Anschlüsse zum Gehäuse			V _{ISO}	> 2500 V
Thermal resistance junction to case Wärmewiderstand Sperrschicht – Gehäuse			R _{thc}	< 1.2 K/W
Admissible torque for mounting Zulässiges Anzugsdrehmoment		10-32 UNF M5		18 ± 10% lb.in. 2 ± 10% Nm

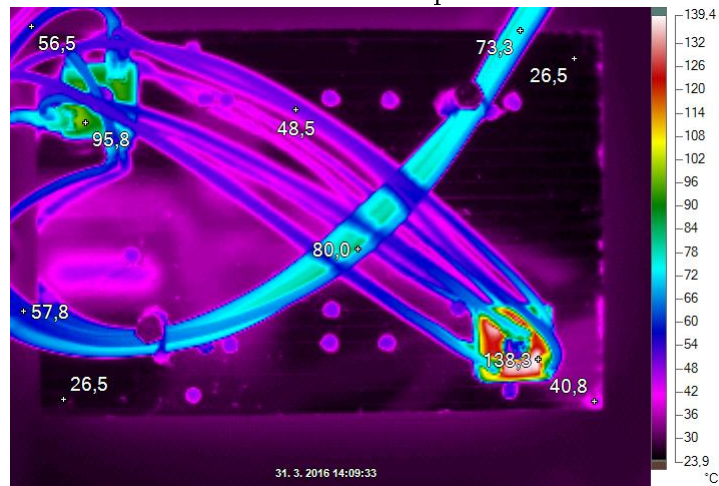


2 Valid per diode – Gültig pro Diode

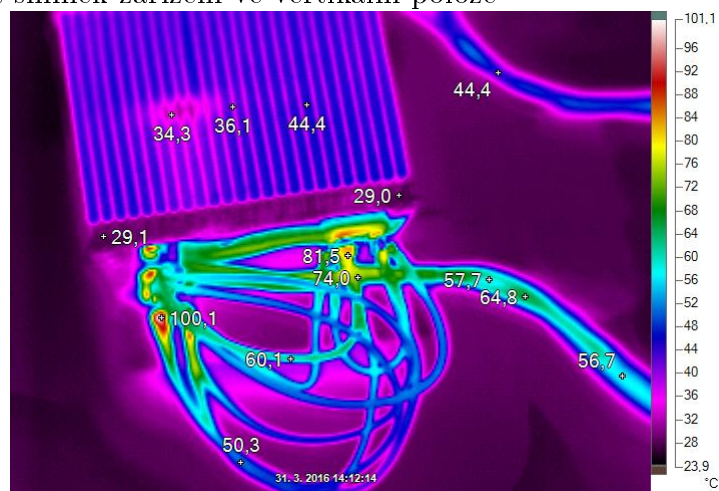
Příloha B Výrobní výkres pro kryt usměrňovače



Příloha C.1 IR snímek zařízení v horizontální poloze



Příloha C.2 IR snímek zařízení ve vertikální poloze



Příloha C.3 IR snímek zařízení ve vertikální poloze - detail chladiče

