

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra výkonové elektroniky a strojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh silového obvodu třífázového střídače pro
studentský projekt elektrické čtyřkolky**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Michal PLZÁK
Osobní číslo:	E19N0025P
Studijní program:	N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	Průmyslová elektronika a elektromechanika
Téma práce:	Návrh silového obvodu třífázového střídače pro studentský projekt elektrické čtyřkolky
Zadávací katedra:	Katedra výkonové elektroniky a strojů

Zásady pro vypracování

1. Vyberte klíčové komponenty střídače.
2. Navrhněte schéma výkonového střídače s ohledem na parametry elektromotoru EMRAX 188-MV-LC.
3. Navrhněte vhodné vodní chlazení pro projekt elektrické čtyřkolky, které bude využito pro výkonový střídač a chlazení elektromotoru EMRAX 188-MV-LC.
4. Zkonstruujte navržený střídač.
5. Experimentálně ověřte základní funkce střídače.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. 120kW Quad Inverter for All-Wheel Drive Electric Racecar. <https://wisconsinracing.org/>.
2. Vondrášek, František: Projektování výkonových polovodičových měničů : vybrané stati. 1. vyd. Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-653-0.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**


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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Dodatek k zadání Diplomové práce
Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni v akademickém roce 2020/2021

V souvislosti s krizovým opatřením vyhlášeným dle krizového zákona a mimořádným opatřením vydaným podle zvláštního zákona, na základě kterých došlo k omezení osobní přítomnosti studentů v prostorách vysoké školy a s ohledem na nutnost využití infrastruktury FEL při vypracování kvalifikační práce v období tohoto omezení a v plné míře s přihlédnutím k realizovatelnosti práce po dobu trvání tohoto omezení se v intencích čl. 54 odst. 4 Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni upravuje zadání práce takto:

1. Vyberte klíčové komponenty střídače.
2. Navrhněte schéma výkonového střídače s ohledem na parametry elektromotoru EMRAX 188-MV-LC
3. Navrhněte vhodné vodní chlazení pro projekt elektrické čtyřkolky, které bude využito pro výkonový střídač a chlazení elektromotoru EMRAX 188-MV-LC
4. Zkonstruuje navržený střídač
5. Experimentálně ověřte základní funkce střídače

je změněn na:

1. Vyberte klíčové komponenty střídače.
2. Porovnejte vhodné polovodičové prvky s ohledem na technologie IGBT a SiC. Diskutujte vhodnost jednotlivých technologií IGBT a SiC při použití s elektromotorem EMRAX 188-MV-LC.
3. Navrhněte schéma výkonového střídače s ohledem na parametry elektromotoru EMRAX 188-MV-LC.
4. Navrhněte vhodné chlazení pro elektrickou čtyřkolku. Diskutujte možné provedení chlazení vzduchové a kapalinové chlazení.
5. Pro jednotlivé zvolené druhy chlazení proveďte výpočty oteplení jednotlivých tranzistorů na chladiči. Simulačně ověřte vhodnost jednotlivých chlazení a výsledky simulací porovnejte s výpočty.
6. Navrhněte mechanickou konstrukci měniče s vybraným chladičem v komplexním 3D modelu. Na základě 3D modelu připravte výrobní dokumentaci.

Beru na vědomí a souhlasím.

V Plzni dne 29.4.2021

.....
Vedoucí práce:

V Plzni dne 29.4.2021

.....
Student:

V Plzni dne

.....

prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické
Západočeské univerzity v Plzni

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem silového obvodu třífázového střídače pro studentský projekt elektrické čtyřkolky. V práci je uveden výběr jednotlivých komponentů střídače, návrh výkonového zapojení včetně numerických výpočtů a simulace pomocí softwaru Solidworks. Dále je v práci zmíněn návrh vodního a chlazení pro soustavu měniče a elektromotoru EMRAX 188-MV-LC. V závěru práce je popsána finální konstrukce měniče.

Klíčová slova

Třífázový střídač, návrh měniče, výpočet ztrát měniče, Infineon Technologies AG, návrh mechanické konstrukce, návrh chlazení, výpočet chlazení, vodní chlazení, analýza přenosu tepla, 3D model

Abstract

The presented diploma thesis deals with the design of a power circuit of a three-phase inverter for a student project of an electric ATV. The work presents the selection of individual components of the inverter, the design of power connections, including numerical calculations and simulations using Solidworks software. The thesis also mentions the design of water cooling for the converter and electric motor EMRAX 188-MV-LC. At the end of the work is described the final design of the converter.

Keywords

Three-phase inverter, inverter design, inverter loss calculation, Infineon Technologies AG, mechanical design, cooling design, cooling calculation, water cooling, heat transfer analysis, 3D model

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 26.5.2021

Bc. Michal Plzák

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Štěpánkovi za cenné připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Bc. Stanislavu Benediktovi a Ing. Luboši Streitovi za pomoc při výpočtech ztrát měniče.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 VOLBA DÍLČÍCH KOMPONENT STŘÍDAČE	15
1.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ TŘÍFÁZOVÉHO NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE.....	15
1.2 MOŽNOSTI REALIZACE ZAPOJENÍ SILOVÉHO OBVODU TŘÍFÁZOVÉHO STŘÍDAČE.....	16
1.2.1 Brzdný odpor.....	17
1.2.2 Vyhlašovaci indukčnosti a přednabíjení kapacity.....	17
1.2.3 Parazitní jevy ovlivňující výkonový střídač.....	18
1.3 DÍLČÍ PRVKY STŘÍDAČE.....	20
2 POLOVODIČOVÉ PRVKY IGBT A SiC	21
2.1 POLOVODIČOVÉ PRVKY IGBT.....	21
2.2 NOVÉ MATERIÁLY POLOVODIČOVÝCH PRVKŮ.....	24
2.3 POLOVODIČOVÉ PRVKY SiC.....	25
2.3.1 Hybridní a Full SiC moduly.....	26
2.4 VLIV NAPÁJENÍ Z MĚNIČE NA ELEKTRICKÉ MOTORY.....	26
2.5 MOŽNOSTI POTLAČENÍ NEŽÁDOUCÍCH VLIVŮ MĚNIČE NA MOTOR.....	27
3 NÁVRH STŘÍDAČE	28
3.1 ZHODNOCENÍ POTŘEBY DÍLČÍCH PRVKŮ VE FINÁLNÍM ZAPOJENÍ.....	28
3.2 ZHODNOCENÍ VÝSKYTU NEŽÁDOUCÍCH VLIVŮ MĚNIČE NA MOTOR V PROJEKTU.....	29
3.3 VOLBA POLOVODIČOVÝCH MODULŮ.....	29
3.4 VOLBA A DIMENZOVÁNÍ PRVKŮ STEJNOSMĚRNÉHO MEZIOBVODU.....	30
3.5 VOLBA KONDENZÁTOROVÉ BATERIE.....	31
3.6 PROUDOVÁ ČIDLA A TEPLOTNÍ ČIDLA.....	32
3.7 VOLBA ROZMĚRŮ SVOREK NA VÝSTUPU MĚNIČE.....	33
3.8 URČENÍ ZTRÁT STŘÍDAČE.....	34
3.8.1 Vodivostní ztráty.....	35
3.8.2 Propustné ztráty na diodě.....	38
3.8.3 Spínací ztráty.....	41
3.8.4 Celkové ztráty střídače.....	43
4 NÁVRH KAPALINOVÉHO CHLAZENÍ	44
4.1 SOUSTAVA SYSTÉMU VODNÍHO CHLAZENÍ.....	44
4.2 VZDUCHOVÉ A VODNÍ CHLAZENÍ MĚNIČE.....	45
4.2.1 Vzduchové chlazení.....	45
4.2.2 Vodní chlazení.....	46
4.3 EXPANZNÍ NÁDOBA UZAVŘENÉHO CHLADICÍHO OKRUHU.....	47
4.4 ELEKTROMOTOR.....	48
4.5 TEPELNÝ VÝMĚNÍK.....	49
4.5.1 Základní výpočty pro volbu tepelného výměníku.....	50
4.6 ČERPADLO.....	54
5 VÝPOČTY CHLADIČE MĚNIČE A JEHO SIMULACE	56
5.1 ZÁKLADNÍ TEPELNÉ VÝPOČTY PRO VOLBU VODNÍHO CHLADIČE MĚNIČE.....	56
5.2 ZÁKLADNÍ TEPELNÉ VÝPOČTY PRO VOLBU VZDUCHOVÉHO CHLADIČE MĚNIČE.....	60
5.3 SPECIFIKACE MODELU VODNÍHO CHLADIČE PRO SIMULACI.....	62
5.4 SIMULACE VODNÍHO CHLADIČE MĚNIČE.....	64
5.5 SPECIFIKACE MODELU VZDUCHOVÉHO CHLADIČE PRO SIMULACI.....	66
5.6 SIMULACE VZDUCHOVÉHO CHLADIČE MĚNIČE.....	67

5.7	ZHODNOCENÍ SIMULACÍ	70
6	NÁVRH 3D MODELU KONSTRUKCE MĚNIČE	71
6.1	3D MODEL POLOVODIČOVÉHO MODULU	71
6.2	3D MODEL ZÁKLADNY MĚNIČE.....	71
6.3	3D MODEL KONDENZÁTOROVÉ BATERIE	72
6.4	3D MODEL PROUDOVÉHO ČIDLA	72
6.5	3D MODEL MĚDĚNÉHO PROFILU STEJNOSMĚRNÉHO MEZIIOBVODU	73
6.6	3D MODEL IZOLAČNÍ DESTIČKY STEJNOSMĚRNÉHO MEZIIOBVODU	74
6.7	3D MODEL PODPĚRNÝCH SLOUPKŮ STEJNOSMĚRNÉHO MEZIIOBVODU.....	74
6.8	3D MODEL VÝSTUPNÍCH SVOREK MĚNIČE.....	75
6.9	3D MODEL MĚNIČE	76
	ZÁVĚR.....	78
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	80
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	82
	SEZNAM TABULEK	83
	SEZNAM PŘÍLOH	83
	PŘÍLOHY	1

Úvod

Cílem práce je provést návrh a simulace chlazení 3f. střídače, jenž by měl zprostředkovávat chod asynchronního motoru z bateriového napájení. Toto elektrotechnické seskupení by mělo být využito k pohonu elektrické čtyřkolky, která by měla být výsledkem komplexního studentského projektu.

Předložená práce je rozdělena do šesti částí, kde první část se zaměřuje na popis jednotlivých komponentů střídače. Druhá část se zabývá problematikou týkající se materiálů polovodičových prvků a dále vlivem měničů na motory. Třetí část pak pojednává o návrhu měniče a o výpočtu ztrát měniče. Čtvrtá část pak pojednává o kapalinovém chlazení a popisuje dílčí prvky chladicího okruhu. Pátá část pak popisuje základní tepelné výpočty pro vodní a vzduchové chlazení a pro oba typy chlazení předkládá simulace konkrétního příkladu provedení pomocí programu Solidworks s nadstavbou Flow Simulation. Šestá část pak popisuje zhotovení 3D modelu střídače.

Seznam symbolů a zkratek

3f.....	třífázový
3D	trojrozměrný
SoC.....	stav nabití baterie
MOSFET	unipolární tranzistor typu MOS (DMOS)
IGBT.....	bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
SiC.....	karbid křemíku
V1 až V6	spínací polovodičová součástka
D1 až D6.....	polovodičová dioda
V_{DC}	stejnoseměrné napětí (V)
R	elektrický odpor (Ω)
C	kapacita kondenzátoru (F)
T	spínací prvek
L	indukčnost (H)
S1	spínač
L1, L2, L3	první, druhá a třetí fáze
T1, T2.....	tranzistory
L_{p1}, L_{p2}	parazitní indukčnosti (H)
L_z	indukčnost zátěže (H)
u_L	napětí na indukčnosti (V)
FET	tranzistor řízený elektrickým polem
IEGT.....	injection-enhanced gate transistor
PT.....	punch-trough
NPT.....	nonpunch-trough
Si.....	křemík
GaN.....	nitrid galia
JFET	polem řízený tranzistor s přechodovým hradlem
SBD.....	Schottkyho dioda
U_{DS}	napětí source-drain (V)
I_D	proud drainem (A)
U_{GS}	řídící napětí (V)
T_j	teplota čipu ($^{\circ}\text{C}$)

$R_{th(j-c)}$	tepelný odpor čip-pouzdro ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
$R_{th(c-r)}$	tepelný odpor pouzdro-chladič ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
FR-5.....	nenasákavý sklotextitový materiál
m	počet fází
f	frekvence (Hz)
ΔU	zvlnění napětí (V)
AC, DC.....	stejnoseměrný, střídavý
J	proudová hustota (A/mm^2)
S	plocha průřezu materiálu (mm^2)
P_C	ztráty propustným proudem (W)
P_{sw}	spínací ztráty (W)
P_b	ztráty blokovacím proudem (W)
P_L	celkové ztráty střídače (W)
U_{DD}	napájecí napětí baterie (V)
R_{Dson}	odpor drain-source při sepnutém stavu (Ω)
P_{CM}	propustné ztráty na tranzistoru (W)
I_0	maximální hodnota proudu pro sinusový průběh (A)
I_{Drms}	skutečná efektivní hodnota proudu (A)
U_{0max}	maximální sdružené výstupní napětí (V)
m_a	hloubka modulace (—)
U_{SD}	napětí source-drain (V)
I_S	proud tekoucí přes source (A)
R_D	diferenční odpor na diodě (Ω)
u_D	napětí na diodě (V)
u_{D0}	prahové napětí diody v propustném směru (V)
i_F	proud diodou v propustném směru (V)
P_{CD}	propustné ztráty na diodě (W)
I_{Fav}	střední hodnota proudu diodou (A)
I_{Frms}	skutečná efektivní hodnota proudu diodou (A)
E_{on}	ztrátová energie při zapnutí (J)
E_{off}	ztrátová energie při vypnutí (J)
E_{rr}	ztrátová energie vzniklá na diodě (J)
P_{swM}	spínací ztráty na tranzistoru (W)

f_{SW}	frekvence spínání (Hz)
P_{swD}	spínací ztráty na diodě (W)
P_M	celkové spínací ztráty na tranzistoru (W)
n_s	počet tranzistorů ve střídači
P_D	celkové spínací ztráty na diodě (W)
ρ_W	hustota vody (kg/m^3)
\dot{V}	objemový průtok (m^3/s)
\dot{m}_W	hmotnostní průtok vody (kg/m^3)
Δt_m	nevyšší možné ochlazení chlad. media ($^\circ\text{C}$)
T_w	teplota chlad. media ($^\circ\text{C}$)
T_a	teplota okolního vzduchu ($^\circ\text{C}$)
P_{mw}	chladicí výkon zajištěný vodou (W)
c_w	tepelná kapacita vody ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$)
p_n	hodnota normálního atmosférického tlaku (pa)
ρ_a	hustota vzduchu (kg/m^3)
r_a	molární plynová konstanta ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
\dot{m}_a	hmotnostní průtok vzduchu (kg/s)
P_{ztr}	ztrátový výkon odvedený chlazením (kW)
c_a	tepelná kapacita vzduchu ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$)
S_r	teplosměnná plocha chladiče (m^2)
P_{ma}	chladicí výkon zajištěný vzduchem (W)
$T_{c(AV)M}$	maximální možná střední teplota pouzdra ($^\circ\text{C}$)
T_{jmax}	maximální teplota čipu ($^\circ\text{C}$)
R_{thjc}	tepelný odpor cesty čip-pouzdro ($^\circ\text{C}/\text{W}$)
$R_{thmax\ chlad}$	maximální tepelný odpor cesty chladič-vzduch ($^\circ\text{C}/\text{W}$)
R_{thcr}	tepelný odpor cesty pouzdro-chladič ($^\circ\text{C}/\text{W}$)
R_{thra}	tepelný odpor cesty chladič-vzduch ($^\circ\text{C}/\text{W}$)
γ	měrná hmotnost kapaliny ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)
Q	průtok objemu kapaliny ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
$T_{j(AV)max}$	maximální střední teplota čipu ($^\circ\text{C}$)
$T_{c(AV)max}$	maximální střední teplota pouzdra ($^\circ\text{C}$)
$T_{r(AV)max}$	maximální střední teplota chladiče ($^\circ\text{C}$)

λ tepelná vodivost (m · K)

$T_{j(AV)}$ střední teplota čipu (°C)

$T_{c(AV)}$ střední teplota pouzdra (°C)

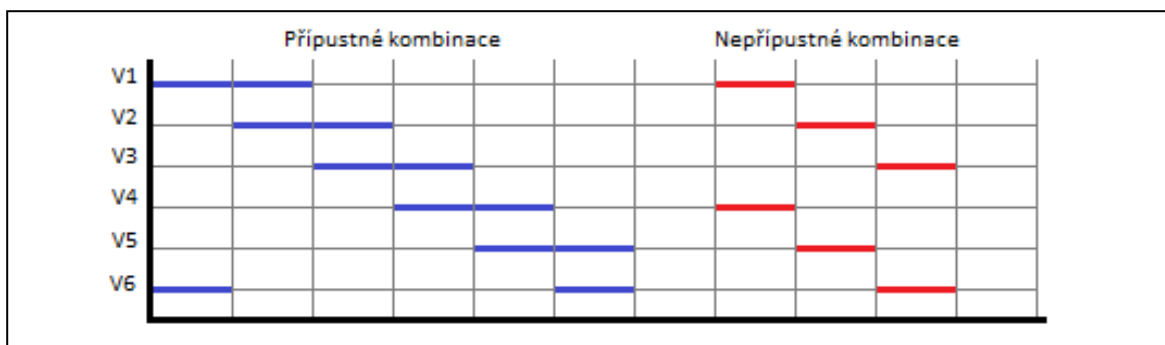
$T_{r(AV)}$ střední teplota chladiče (°C)

1 Volba dílčích komponent střídače

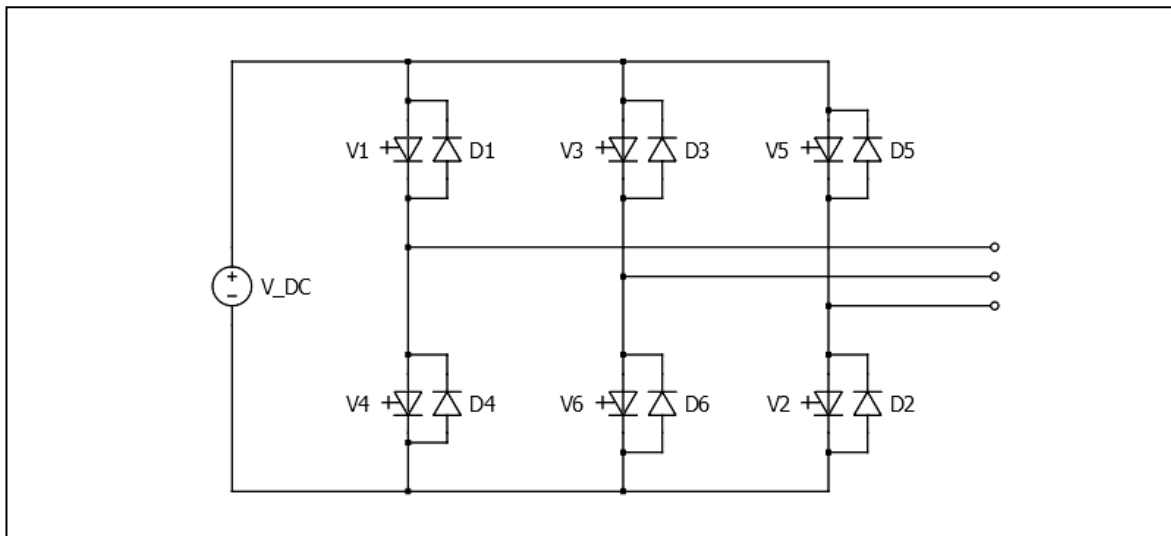
Volba dílčích komponentů střídače se odvíjí od specifikací elektrické čtyřkolky, přičemž je předpoklad špičkového výkonu tohoto vozidla až 50kW. Napájení bude zajištěno z trakční akumulátorové baterie, jejíž rozsah napětí je 183V až 227V dle SoC (State of Charge). Třífázový napěťový střídač by měl být tvořen třemi moduly polovodičových prvků, přičemž každý z modulů by měl tvořit jeden půlmůstek měniče, obsahující dva spínací prvky. Přenos energie z baterie do měniče by měl zajišťovat napěťový mezirovod (angl. busbar), jenž bude spojen s kondenzátorovou baterií. Samotný pohon čtyřkolky bude zajišťovat synchronní motor s permanentními magnety EMRAX typ 188, jenž je produktem stejnojmenné společnosti, která se zabývá vývojem a produkcí elektromotorů s axiálním tokem.

1.1 Schéma zapojení třífázového napěťového střídače.

Napěťový 3f. střídač je typ měniče, který umožňuje konverzi stejnosměrného napětí na napětí střídavé o libovolné výstupní frekvenci. Typické schéma zapojení samotného 3f. střídače je patrné z Obr. 2. Je patrné, že je tvořen trojicí půlmůstků, kdy každý půlmůstek je tvořen dvojicí vypínatelných součástek. Těmito součástkami mohou být prvky jako MOSFET či IGBT a ve schéma jsou označeny jako V1 až V6. Antiparalelně jsou ke spínacím prvkům připojeny zpětné diody, které umožňují induktivní zátěži odběr jalového proudu, či v případě rekuperace pracují jako třífázový usměrňovací můstek. Je patrné, že součástky V1, V3 a V5 tvoří takzvanou katodovou skupinu, zatímco zbylé prvky V2, V4 a V6 tvoří skupinu anodovou. Střídačem pak protéká proud, je-li sepnuta alespoň jedna součástka z katodové skupiny a zároveň alespoň jedna součástka ze skupiny anodové. Při spínání je však nepřipustné sepnout oba dva prvky jednoho půlmůstku. Tento stav označujeme jako zakázanou spínací kombinaci, při které dochází ke zkratu napájecího obvodu střídače. Výše zmíněné spínací kombinace jsou znázorněny na Obr. 1.



Obr. 1: Diagram spínacích kombinací střídače

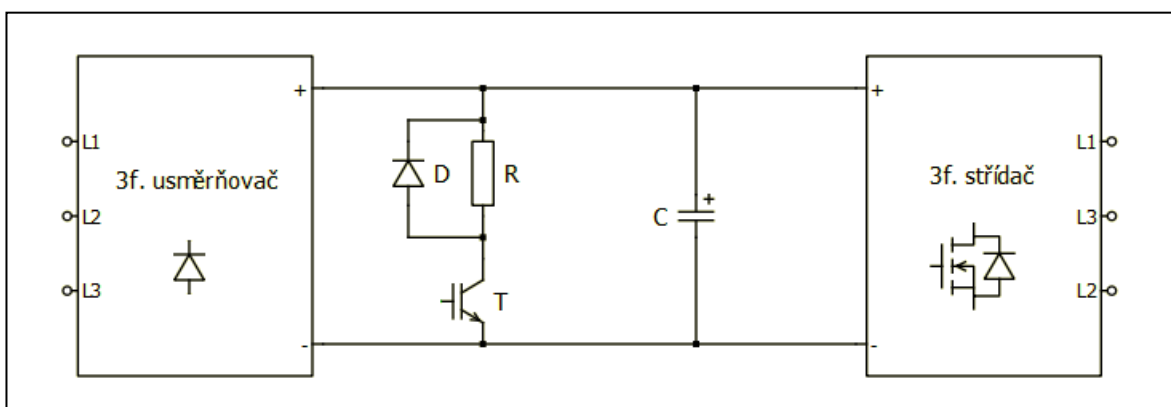


Obr. 2: Schéma zapojení napěťového střídače

1.2 Možnosti realizace zapojení silového obvodu třífázového střídače

Pro výběr dílčích komponent, které je třeba při návrhu střídače použít, je třeba zohlednit specifika napájení střídače a jeho možnosti použití. Pro uvedení do problematiky, jsou v následující kapitole na učebnicovém schéma nepřímého měniče kmitočtu diskutovány možnosti realizace napěťového meziobvodu, v souvislosti se zohledněním potřeby dílčích prvků, které mohou být v meziobvodu použity.

Typické blokové schéma zapojení nepřímého frekvenčního měniče s napěťovým meziobvodem je znázorněno na následujícím Obr. 3. Toto schéma je při popisu návrhu silového obvodu bráno jako výchozí.



Obr. 3: Zapojení meziobvodu s brzdým odporem

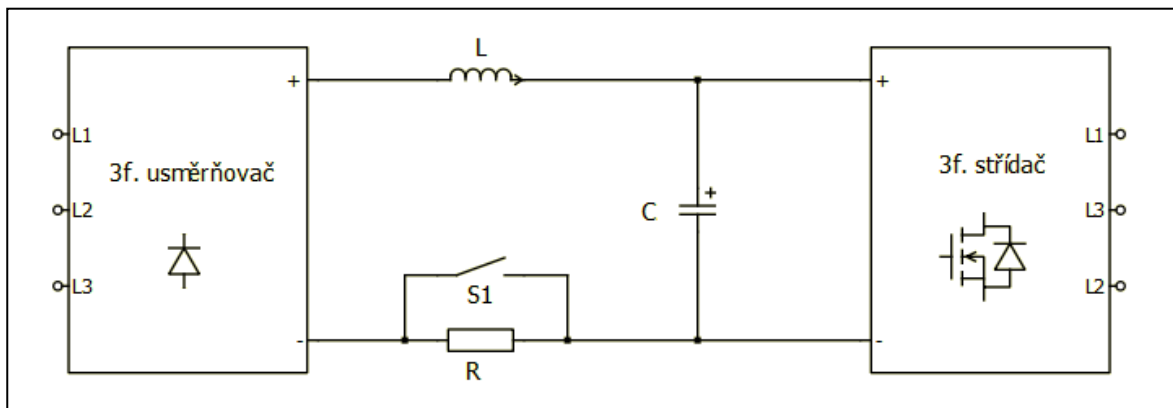
Na vstupu měniče je zapojen třífázový diodový usměrňovač, který je meziobvodem spojen s třífázovým napěťovým střídačem. Střídač posléze napájí třífázový synchronní motor. Napěťový meziobvod je tvořen unipolárním kondenzátorem C. Z hlediska střídače je tok energie možný oběma směry. To znamená, že proud může téct z meziobvodu do motoru a také opačně z motoru do meziobvodu, přičemž tento stav je označován jako rekuperace.

1.2.1 Brzdný odpor

V případě použití diodového usměrňovače na vstupu měniče je vhodné zmínit, že rekuperace do napájecího zdroje střídače není možná. Pro toto upořádání se pak napěťový meziobvod doplňuje o brzdný odpor, v kterém je energie proudící z motoru mařena. Zapojení brzdného odporu je zachyceno na předchozím Obr. 3. Spínacím prvkem T lze řídit připnutí odporu do meziobvodu. Jeho vhodným spínáním tak lze docílit hodnoty odporu od jmenovité hodnoty R teoreticky až do nekonečné hodnoty, kdy je odporník trvale odepnut. Dále je patrné, že samotný brzdný odpor R je spojen paralelně s diodou, která zajišťuje uzavření proudu, jenž vznikne na parazitní indukčnosti odporu po odpojení brzdného odporu pomocí spínacího prvku. Toto zapojení samozřejmě není třeba v případech jednodušších typů pohonů, jako je třeba pohon ventilátoru. V takovýchto případech se zpravidla nevyžaduje razantní zastavení motoru. Zastavení se pak odehrává jen za pomoci tření či odporu ventilátoru, tedy motor se nechá jednoduše doběhnout.

1.2.2 Vyhlazovací indukčnosti a přednabíjení kapacity

Diodový usměrňovač dodává na kondenzátor C průběh napětí, který je zvlněný a šesti pulzní. Vzhledem k tomu, že napětí na kondenzátoru je stavová veličina, budou se z napájecího zdroje odebírat proudové pulzy. Naopak proud je stavová veličina pro indukčnost, tedy lze docílit omezení těchto proudových špiček pomocí vhodné zvolené indukčnosti L, která se zapojuje na výstup neřízeného usměrňovače, tak jak je znázorněno na následném Obr. 4.



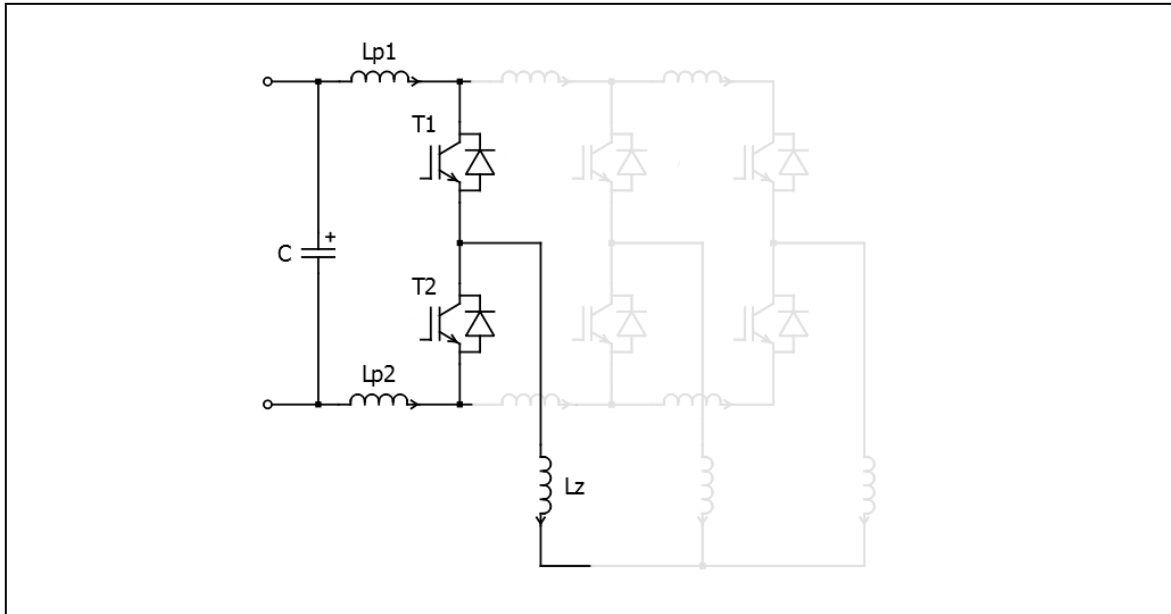
Obr. 4: Zapojení meziobvodu s vyhlazovací indukčností a rozběhovým odporem

Další variantou je zapojení trojice indukčností na vstup usměrňovače na střídavé straně. Tato varianta vykazuje lepší filtraci každé fáze zvláště, avšak vzhledem k tomu, že je na střídavé straně, vznikají na reaktanci indukčnosti úbytky napětí. To znamená, že usměrňovač poté pracuje s nižším napájecím napětím, než je napětí ze zdroje.

Další nepříznivý stav také vzniká po připojení měniče k síti. Po připojení vybitého kondenzátoru na napětí, které dodává vstupní usměrňovač, dojde k velkému nabíjecímu pulzu do kondenzátoru. Tomu lze zabránit zařazením nabíjecích odporů, které proudový pulz utlumí. Po nabití kondenzátoru se poté tyto odpory musí překlenout, jelikož kdyby měla veškerá energie do motoru proudit přes tento nabíjecí odpor, došlo by k jeho zničení. Umístění odporu je možné buď ve spodní nebo horní větvi za usměrňovačem. Zapojení ve spodní větvi je znázorněno na předešlém Obr. 4.

1.2.3 Parazitní jevy ovlivňující výkonový střídač

Dále je třeba zohlednit, že zapojení silového obvodu za úrovní kondenzátoru C má vlastní parazitní indukčnosti, které však nejsou žádoucí a je třeba je co nejvíce omezit. Z následujícího Obr. 5 je patrná dvojice tranzistorů T1 a T2 jedné fáze střídače a kondenzátor meziobvodu.



Obr. 5: Parazitní indukčnosti meziobvodu

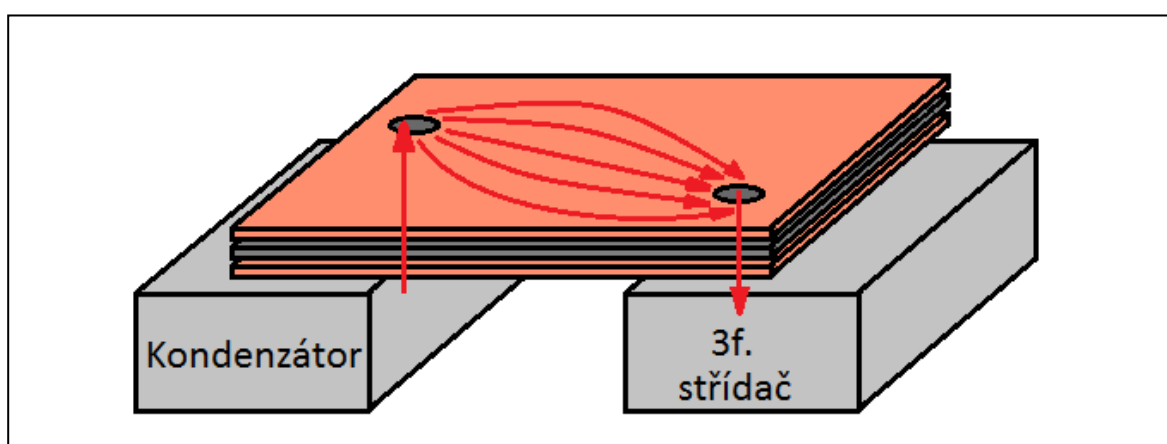
Dále je na výstupu fáze indukčnost L_z . Vede-li proud z meziobvodu přes tranzistor T1, teče do zátěže právě přes indukčnost L_z . Při rozeptnutí tranzistoru T1 a následném sepnutí tranzistoru T2, teče proud indukčností L_z stále stejným směrem a uzavírá se přes diodu, která je antiparalelně připojena k tranzistoru T2. Tento stav je pro funkci střídače zcela v pořádku. Zde však začínají mít vliv parazitní indukčnosti, znázorněné ve schéma jako L_{p1} a L_{p2} , které vznikají na vodivém propojení kondenzátoru se svorkou modulu střídače. Tedy pokud tranzistorem T1 dojde k přerušení proudu jako v předchozím případě, bude se parazitní indukčnost L_{p1} stále snažit zachovat svůj směr proudu. Velikost parazitních indukčností není velká, tedy by se mohlo zdát, že tento vliv je zanedbatelný. Nicméně, jak je patrné z následujícího vztahu, napětí na indukčnosti je závislé na rychlosti změny proudu v čase.

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad (\text{V}) \quad (1.1)$$

Moderní polovodičové spínací součástky dosahují vysokých hodnot rychlosti změny du/dt až desítky $\text{kV}/\mu\text{s}$. Tedy stačí i poměrně malá indukčnost, aby docházelo v obvodu při sepnutí ke značným přepětím. Tento jev lze snížit omezením derivace v předešlém vzorci, což v důsledku znamená snížení rychlosti spínání součástek. Tím však dochází ke zvýšení doby spínání a tím i zvýšení spínacích ztrát. V případě použití vysokých spínacích

frekvencí a nutnosti použití mrtvého času, který je konstantní, je toto řešení rovněž omezující.

Další běžně používané řešení pro omezení parazitních indukčností, je vytvoření co nejkratších spojů mezi kondenzátorem C a měničem, které konstrukce měniče umožní. Alternativou k tomuto řešení je použití takzvané sendvičové konstrukce, kdy kladný a záporný pól je tvořen celistvými vrstvami plošného spoje oddělených izolační vrstvou. V případě vysokých výkonů jsou tyto desky tvořeny nikoliv pomocí plošného spoje, ale rovnou celými měděnými plechy. Znázornění konstrukčního uspořádání a zobrazení proudění kladného proudu do střídače, je znázorněno na následujícím Obr. 6.



Obr. 6: Konstrukční znázornění sendvičového uspořádání

Princip spočívá v tom, že u jednotlivých pólů se celý proud neuzavírá pouze jednou konkrétní cestou, ale jeho část se rozprostře do plochy měděné desky. V důsledku toho pak dojde ke značnému snížení parazitní indukčnosti mezi kondenzátorem C a měničem.

1.3 Dílčí prvky střídače

Na základě výše zmíněných úvah je patrné, že měnič bude tvořen kondenzátorovou baterií a dále střídačem, jenž bude složen z polovodičových modulů. Meziobvod pak bude v konstrukčním provedení sendvičového uspořádání. Je rovněž patrné, že střídač bude vyžadovat realizaci chladiče, jenž bude odvádět jeho ztrátové teplo. Konkrétní zhodnocení potřeby dílčích prvků a návrh chladiče jsou popsány v dalších kapitolách.

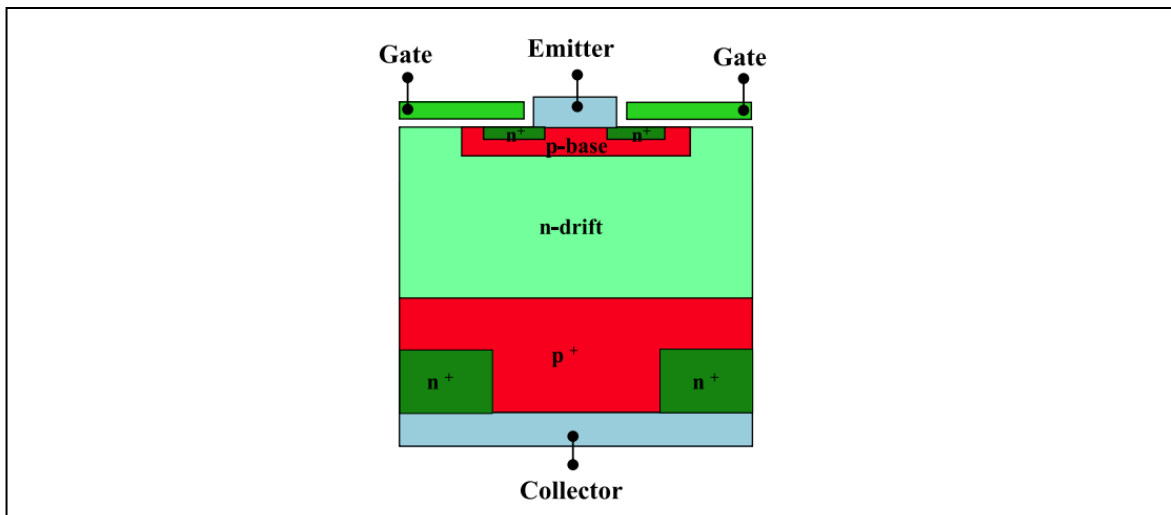
2 Polovodičové prvky IGBT a SiC

Je zřejmé, že v oblasti výkonové elektroniky ohledně konstrukce napěťových střídačů, je nutné využívat polovodičové součástky, které lze nejen zapnout ale i vypnout. V souvislosti s typem součástky a její technologií výroby se pak odvíjí i vlastnosti spínacích prvků, jako jsou například rychlost sepnutí a rozepnutí, frekvence spínání, spínací ztráty, vodivostní ztráty a mnohé další. Následující kapitola se zabývá problematikou polovodičových prvků s použitím technologie IGBT (bipolární tranzistor s izolovaným hradlem) a technologie materiálu SiC (silikon karbid).

2.1 Polovodičové prvky IGBT

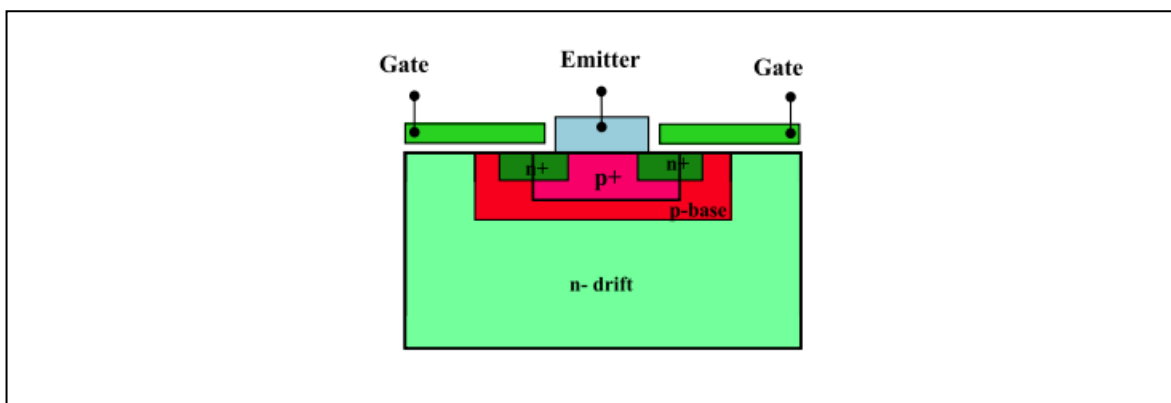
Příčinou vzniku polovodičových prvků IGBT byla vize o propojení pozitivních vlastností bipolárního tranzistoru a prvků FET (tranzistor řízený elektrickým polem), jenž by měl tyto prvky v osmdesátých letech nahradit. To se podařilo roku 1985, kdy byly první polovodičové prvky s tímto označením k dostání na trhu. U bipolárního tranzistoru je kladnou vlastností jeho malý přechodový odpor v sepnutém stavu. Naopak jeho nevýhodami jsou poměrně malý zesilovací činitel a potřeba řízení poměrně vysokými hodnotami proudu, které kladou vyšší nároky na řídicí obvody měniče. Naopak v případě prvku FET, je řízení spínání zajištěno za pomoci napěťového signálu o malém výkonu, jak je již z názvu druhého prvku patrné. [1] Kombinací těchto dvou prvků tedy vznikl prvek, jenž nabízí výhodné vlastnosti, jako jsou již zmíněné spínání pomocí napětí, velká vstupní impedance, nízký výkon řídicího signálu, vysoká spínací frekvence, či široká pracovní oblast. Dále nízký odpor s čímž souvisejí i nízké vodivostní a spínací ztráty. [2]

Maximální velikost spínaného napětí na součástce je dáno šířkou n^- driftové vrstvy. Zde je pak zajištěna vodivost pomocí minoritních nosičů. Základní struktura IGBT prvku je zobrazena na následujícím Obr. 7. [3]



Obr. 7: Řez základní strukturou IGBT. Převzato z [3]

Na horní straně této vrstvy je vytvořena struktura MOS s izolovaným gatem. Naopak zespodu je vrstva spojena s vysoce dotovanou vrstvou p^+ , ve které dochází k vodivosti za pomoci děr. [4] Je tedy patrné, že jde o PNP tranzistor, jenž je řízen pomocí struktury MOSFET. Jde o základní strukturu, jež byla postupem času zdokonalována. Její nevýhodou byla špatná schopnost odolávat jevu zvanému Latch-up, kdy zjednodušeně dochází k nechtěnému vytvoření vodivé cesty mezi napájecími vývody MOSFET prvku a tedy dohází k nadproudu a hrozí zničení součástky. Na základě tohoto nedostatku vznikla struktura zvaná Nonlatch-up, která tomuto jevu zamezovala a právě v této variantě byl IGBT poprvé uveden na trh. Uspořádání struktury je uvedeno na následujícím Obr. 8. [3]

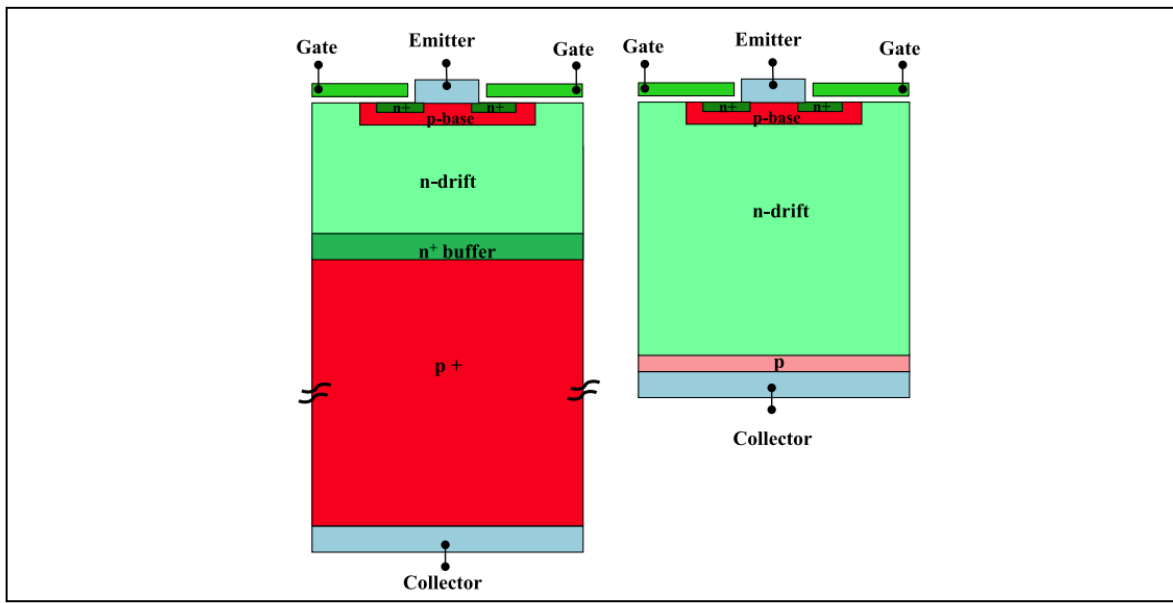


Obr. 8: Struktura Nonlatch-up. Převzato z [3]

Použití této struktury zároveň znamenalo i zvětšení pracovní oblasti součástky. Postupně došlo k dalšímu vylepšení struktury o použití n^+ vyrovnávací vrstvy, která zajistila vyšší rychlost spínání. Pro potlačení úbytku napětí na součástce, pak došlo k dalším úpravám struktury za pomoci zlepšení takzvané trench gate technologie, kdy

zlepšení v tomto směru zajistily struktury označované jako IEGT. K dalšímu vylepšování pak přispěl i vývoj simulátoru, jenž zkoumal zatížení součástky, přičemž zohledňoval vliv externích obvodů na spínací prvek. [3]

U prvků IGBT dále rozlišujeme dvě základní struktury, jimiž jsou punch-through (PT) a nonpunch-through (NPT). Grafické znázornění obou struktur je znázorněno na následujícím Obr. 9.



Obr. 9: Struktury PT IGBT a NPT IGBT. Převzato z [3]

V prvním případě se ve struktuře mezi vrstvami p^+ a n^- používá již výše zmíněná vyrovnávací vrstva. V souvislosti s možností snížení šířky vrstvy n^- u těchto polovodičů, je možné vhodně snižovat velikost úbytku napětí na součástce při zvýšení času vypnutí a naopak. Punch-through IGBT jsou schopné pracovat na nižších a středních napětích do hodnot přibližně 1200V. Jejich výhodami jsou vyšší účinnost a vyšší kmitočty spínání. Nevýhodou je negativní teplotní koeficient, jenž zapříčiňuje, že struktura není vhodná pro paralelní řazení. V případě struktury NPT IGBT již vyrovnávací vrstva n^+ použita není. Oproti PT struktuře je zde větší šířka n^- driftové oblasti, což umožňuje spínacímu prvku pracovat s většími hodnotami spínaného napětí. Dále se vyznačuje kladným teplotním koeficientem, čili je možné řadit tyto struktury paralelně. Jak struktura PT tak i NPT nejsou konstruovány tak, aby dokázaly snášet velké závěrné napětí a proto jsou spínací prvky s touto technologií doplňovány o antiparalelní spojení s diodou, která umožňuje průchod proudu v závěrném směru spínacího prvku.[3][5]

2.2 Nové materiály polovodičových prvků

Polovodičové prvky na bázi materiálů Si již dnes s díky pokročilému vývoji začínají dosahovat svého technologického maxima. Jejich další vývoj již začíná být pomalý a nedosahuje tak značných zlepšení, jako tomu bylo dříve. S vývojem technologií se v tomto odvětví začaly objevovat nové materiály, které by měly dosahovat mnohem lepších vlastností, než materiály původní. Mezi tyto nové materiály nyní nejčastěji uvažujeme karbid křemíku (SiC) a nitrid galia (GaN), které řadíme mezi polovodiče s velkou šířkou zakázaného pásu. Rovněž je označujeme i jako polovodiče složené, jelikož vznikly spojením více prvků. Jejich výhodami jsou především vyšší výkon, lepší odvod tepla z polovodiče, vyšší napětí či vyšší kmitočty spínání. Znázornění charakteristických vlastností jednotlivých polovodičových prvků, pro jejich názorné porovnání, je přiloženo v následující Tabulce 1. [6]

Tabulka 1: Vlastnosti materiálů Si, SiC a GaN. Hodnoty převzaty z [6]

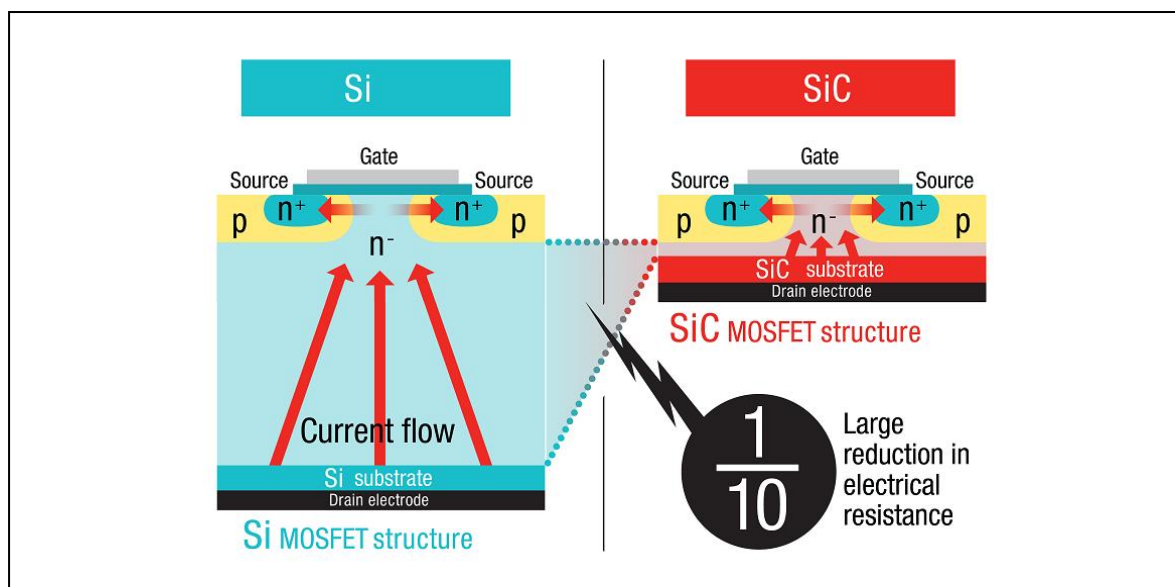
Vlastnosti	Si	SiC-4H	GaN
Šířka zakázaného pásma (eV)	1,1	3,2	3,4
Průrazné napětí (10^6 V/cm)	0,3	3	3,5
Pohyblivost nosičů náboje ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	1450	900	2000
Rychlost elektronů při nasycení (10^6 cm/sec)	10	22	25
Tepelná vodivost ($\text{W}/\text{cm}^2\cdot\text{K}$)	1,5	5	1,3

Z tabulky vlastností je patrné, že materiály SiC a GaN mají větší šířku zakázaného pásu oproti materiálu Si. Zařazení mezi materiály s velkou šířkou zakázaného pásma se odvíjí právě od velikosti těchto hodnot, přičemž toto zařazení je uvažováno přibližně od hodnoty 1 až 2 eV. Dále je patrné, že nové materiály mají řádově větší hodnotu průrazného napětí, což umožňuje spínání vyšších hodnot napětí, při malých hodnotách svodových proudů. Další dvě veličiny pohyblivost nosičů náboje a rychlost elektronů při nasycení pak určují maximální možnou velikost spínací frekvence součástky. Je zřejmé, že zde materiál SiC zaostává s hodnotou pohyblivosti nosičů náboje a právě z toho důvodu zde vzniká předpoklad, že spínací prvky na bázi GaN by měly být nejlepšími kandidáty pro aplikace s vysokým kmitočtem spínání. Poslední hodnota tepelné vodivosti je úměrná hustotě energie, se kterou je prvek schopen pracovat. Zde nejlepších hodnot dosahuje materiál SiC, přičemž v kombinaci s velkou šířkou zakázaného pásma je patrná jejich vhodnost pro spínání vysokých výkonů. [6]

2.3 Polovodičové prvky SiC

Výzkum nových polovodičových součástek na bázi SiC začal probíhat na konci 20. století. První zařízení na trhu s touto technologií byla k dostání v roce 2011, k roku 2015 pak došlo i na výkonovou aplikaci v japonských rychlovlacích. První výkonové polovodiče s touto technologií byly řízeny unipolárně, čili jako součástky JFET či MOSFET. Spínání prvků zhotovených z tohoto materiálu bipolárně, tedy po vzoru IGBT, je stále v rané fázi vývoje a jedinou možnou variantou kombinace tohoto materiálu s bipolárním řízením je spojení Si - IGBT spínacího prvku s SiC - antiparalelní diodou. Hlavní výhody technologie SiC byly v porovnání s ostatními druhy materiálů prezentovány v předchozí podkapitole. [7]

Co se týče struktury polovodičových prvků SiC, tak je velice podobná struktuře prvků Si. Porovnání těchto dvou struktur je přiloženo na následujícím Obr. 10.



Obr. 10: Porovnání struktur Si a SiC. Převzato z [8]

Patrný rozdíl je v šířce n⁻ driftové oblasti, kdy jak uvádí zdroj obrázku Mitsubishi electric [8], je tato šíře až desetkrát menší oproti materiálu Si. Další odlišnost je tedy především v použitém materiálu, kdy SiC prvky používají sloučeninu křemíku a uhlíku. V souvislosti s výhodami, již zmíněnými dříve, dosahují SiC zařízení lepší účinnosti, menší velikosti zařízení při stejné hustotě výkonu jako u Si a to z důvodu potřeby menšího počtu paralelně řazených polovodičů v pouzdru pro vysokonapěťové aplikace. Struktury jsou schopny odolávat vyšším teplotám, což snižuje nároky na chlazení. [9]

Typickými součástkami na bázi karbidu křemíku jsou SiC MOSFET a SiC Schottkyho

dioda. Díky svým lepším parametrům dnes SiC MOSFET pomalu začíná nahrazovat součástky IGBT na bázi křemíku a nachází uplatnění především v aplikacích vysoké hustoty výkonu, zejména v oblasti automotive a elektromobility díky kterým jde jejich vývoj neustále kupředu. Ohledně vlastností SiC diod lze tvrdit, že mají oproti Si diodám rovněž lepší vlastnosti. Vyznačují se nižší úbytkem napětí v propustném směru, vyšší hodnotou závěrného napětí, krátkou dobou zotavení a malými spínacími ztrátami.

2.3.1 Hybridní a Full SiC moduly

Jak již bylo zmíněno výše, lze ve výkonových modulech kombinovat Si - IGBT spínací prvek s SiC - antiparalelní diodou. Tyto moduly pak označujeme jako hybridní. Díky výhodným vlastnostem diody lze tak u hybridních modulů dosáhnout nižších spínacích ztrát a vyšších spínacích frekvencí, za stávajícího použití již osvědčených Si spínacích prvků. Moduly obsahující oba prvky na bázi materiálu SiC pak označujeme jako Full SiC moduly. Tyto pak vykazují ještě lepší vlastnosti než moduly hybridní. Zdroje uvádějí, že při nahrazení modulů Si IGBT moduly Full SiC MOSFET, lze u bateriově napájených vozidel očekávat až desetiprocentní navýšení výkonu a to při nižší hmotnosti měniče a zvýšeném dojezdu vozidla na jedno nabytí. Nižší hmotnost měniče spolu s jeho dalšími benefity je pak velice vhodná pro uplatnění i v oblasti leteckého průmyslu. [9]

2.4 Vliv napájení z měniče na elektrické motory

Je zřejmé, že napěťový střídač umožňuje plynulou regulaci motoru, přičemž jedním z požadavků je, aby se odebíraný proud motoru co nejvíce blížil sinusovému průběhu. V souvislosti s tímto požadavkem pak narůstá i spínací frekvence střídače. Toho lze docílit vysokou rychlostí spínání součástek, přičemž moderní spínací součástky dosahují rychlosti změny du/dt až desítky kV/ μ s. Ty pak vedou na zvýšené namáhání izolace motoru. Pokud je napájený motor připojen k měniči přes kabel o větší délce, může toto spojení v konečném důsledku rovněž vést ke zvýšenému namáhání izolace motoru. [10]

Namáhání izolace motoru strmými hranami je způsobeno parazitní kapacitou vinutí motoru. Velké změny du/dt mohou vést na přeskok napětí mezi jednotlivými závity vinutí motoru. To je fyzikálně způsobeno nabíjením parazitních kapacit, které jsou nabíjeny malými proudovými pulzy. Tyto proudové pulzy pak mohou způsobit nerovnoměrné rozložení napětí na vinutí a to tak, že toto napětí bude jen na části vinutí motoru. Typickým příkladem je, že na krajních závitech se objeví plné napětí a zbytek napětí se uzavře právě

přes parazitní kapacity. Z dlouhodobého hlediska toto způsobuje poškození izolace vinutí motoru a to v časovém horizontu jednotek let.

Dalším problémem je tedy vložení dlouhého kabelu mezi měnič a motor. To může vést k výskytu vysokonapěťových vysokofrekvenčních kmitů, což rovněž může způsobit poškození vinutí motoru. Vznik těchto přepětí je rovněž způsoben velkou změnou du/dt při větších délkách kabelu. V praktické aplikaci, by pak délka kabelu měla dosahovat hodnoty nanejvýš sto metrů. Se zvětšující se délkou vodiče pak narůstá i velikost přepětíových špiček, přičemž jejich rezonanční frekvence klesá. Pro délky vodiče menší dvaceti metrů se vliv délky vodiče výrazně neprojevuje. [10]

2.5 Možnosti potlačení nežádoucích vlivů měniče na motor

Lze uvést dvě možná řešení potlačení nežádoucích vlivů měniče na motor. První variantou je rovnou omezení vzniku velkých du/dt , zatímco druhou variantou je, již vzniklé velké du/dt potlačit. Možnou realizací první varianty je zmenšení výstupního du/dt střídače jeho konstrukcí a vhodným způsobem řízení. Zde lze použít zapojení střídače s rezonančním meziobvodem či kvazirezonančním meziobvodem. Realizací druhé varianty lze uvést vícero. Jako první příklad lze uvést použití takzvaných terminátorů, kdy připojením vhodného obvodu za měnič nebo za motor, lze docílit ideálního impedančního přizpůsobení soustavy měniče, kabelu a motoru. Dále lze použít filtry du/dt , které redukují strmosti napětí a napěťové špičky na hodnoty kolem $500\text{V}/\mu\text{s}$. Další možností je použití sinusových filtrů, které na svém výstupu nabízejí prakticky sinusový průběh napětí. Jejich nevýhodami jsou však vysoké ztráty a cena. Poslední a v dnešní době nejpoužívanější variantou je dimenzování vinutí motoru na napájení z napěťového střídače a to i při velkých změnách du/dt . V tomto případě pak nedochází k potlačení rychlosti spínání. [10]

3 Návrh střídače

Na základě úvah z předchozích kapitol bylo navrženo finální schéma střídače a vybrány jeho potřebné dílčí komponenty. Tyto komponenty a jejich parametry jsou konkretizovány v následujících podkapitolách. Dále je v této kapitole uveden výpočet ztrát střídače.

3.1 Zhodnocení potřeby dílčích prvků ve finálním zapojení

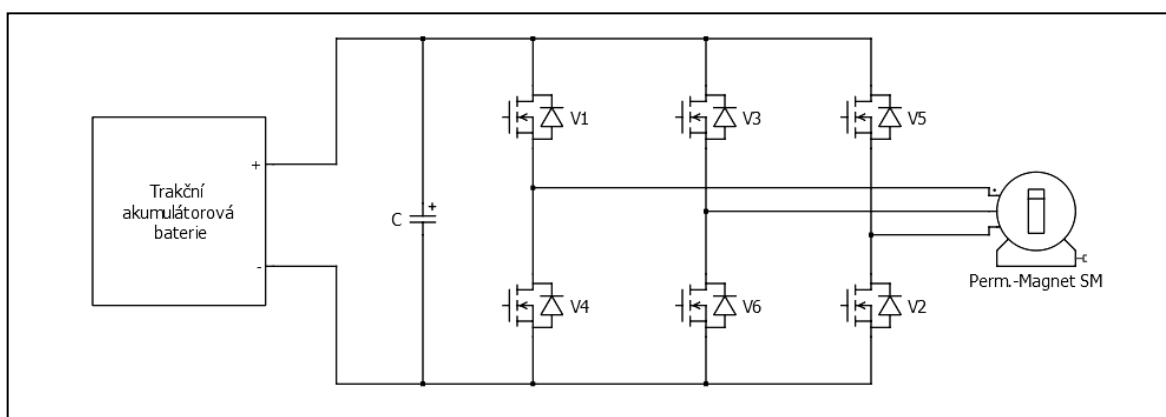
Na základě první kapitoly lze zvážit potřebu dílčích prvků meziobvodu, které v něm mohou být použity v souvislosti s realizací projektu elektrické čtyřkolky. Ohledně použití brzdného odporu je uvažováno, že rekuperovaná energie bude ukládána do kondenzátoru v meziobvodu. Případ, kdy by bylo vhodné brzdný odpor použít, je rekuperace při plně nabitě baterii. Nicméně s ohledem na nízkou účinnost rekuperace a předpokladu, že baterie tohoto stavu spíše dosahovat nebude, není předpoklad toto zapojení použít.

Ohledně použití indukčností, pro omezení proudových špiček je zde opět hlavním faktorem napájení z baterie. Vzhledem k tomu, že baterie dodává do meziobvodu konstantní velikost napětí, tedy nezměnné napětí, není pro použití filtračních indukčností v silovém obvodu předpoklad.

Z hlediska použití nabíjecího odporu je předpoklad, že by bylo vhodné nabíjecí odpor v zapojení silového obvodu použít, jelikož při připojení kondenzátoru C k napájecí baterii, bude rovněž docházet k velkému proudovému nabíjecímu pulzu. Tento odpor však bude součástí napájecí baterie, přičemž jeho spínání bude zajištěno řízením obsluhující baterii.

V souvislosti s návrhem silového obvodu pro projekt čtyřkolky, bude použita sendvičová konstrukce z měděných plechů z výše zmíněných důvodů.

Na následujícím Obr. 11 je přiloženo výsledné schéma zapojení střídače.



Obr. 11: Finální schéma zapojení střídače s meziobvodem

3.2 Zhodnocení výskytu nežádoucích vlivů měniče na motor v projektu

Jak již bylo zmíněno výše, při spojení měniče s motorem pomocí dlouhého kabelu může docházet k nežádoucím přepětovým pulzům či výbojům na vinutích motoru, které jsou způsobeny velkou strmostí du/dt . Vzhledem k tomu, že v projektu elektrické čtyřkolky nebude spojení provedeno dlouhým vodičem, není předpoklad pro zavedení výše zmíněných opatření, jelikož vliv vodiče se začíná projevovat nepříznivě zhruba od dvaceti metrů jeho délky. Očekávaná délka vodiče v projektu je do 0,8m, maximálně však 1,5m. Rovněž nepříznivý vliv rychlé změny du/dt na izolaci vinutí motoru není uvažován, jelikož je předpokládáno, že motor je vhodně dimenzován na napájení z měniče kmitočtu.

3.3 Volba polovodičových modulů

Na základě úvah z předchozích kapitol byly zvoleny tři polovodičové moduly BSM120D12P2C005 od firmy ROHM Semiconductor. [11] Každý jednotlivý modul tvoří půlmůstek se dvěma spínacími prvky SiC-DMOS a antiparalelní zpětnou diodou SiC-SBD. Základní parametry prvku, které uvádí výrobce v příslušném technickém listu [12], jsou přiloženy v následující Tabulce 2.

Tabulka 2: Parametry modulu BSM120D12P2C005. Hodnoty převzaty z [12]

Parametr	Hodnota
Napětí source-drain U_{DS}	1200V
Proud drainem I_D	134A (při $T_c=60^\circ\text{C}$)
Řídicí napětí U_{gs}	22V
Teplota čipu T_j	150°C (max. 175°C)
Tepelný odpor čip-pouzdro $R_{th(j-c)}$	$0,16^\circ\text{C/W}$ - DMOS, $0,21^\circ\text{C/W}$ -SBD
Tepelný odpor pouzdro-chladič $R_{th(c-r)}$	$0,035^\circ\text{C/W}$
Typ pouzdra (modulu)	C

Utahovací moment pro šrouby M5 sloužící k upevnění modulu na chladič je 3,5Nm. Utahovací moment pro montáž vývodů na přípojovací terminály modulu je pak pro šroub M6 roven 4,5Nm.

Z již výše zmíněných polovodičových prvků technologie SiC lze usuzovat, že nižší spínací a vodivostní ztráty jsou výhodné vlastnosti z hlediska dimenzování potřebného chlazení celého měniče a zároveň také přispívají k efektivnějšímu přenosu energie z baterie, což přispívá k prodloužení provozu vozidla na jedno nabití a životnosti baterie. Podoba polovodičového modulu je znázorněna na následujícím Obr. 12.



Obr. 12: Modul BSM120D12P2C005. Převzato z [11]

3.4 Volba a dimenzování prvků stejnosměrného meziobvodu

Stejnoseměrný meziobvod byl dle výše zmíněných důvodů zvolen v takzvaném sendvičovém provedení. Konkrétní provedení pak sestává ze dvou měděných profilů, zhotovených z měděného plechu o tloušťce 2mm. Tloušťka byla zvolena na základě zhodnocení mechanické konstrukce celého meziobvodu, rovněž pak s větším průřezem jednotlivých pólů meziobvodu klesá parazitní indukčnost, o které bylo pojednáváno v předchozích kapitolách. Profil pro kladný pól je konstrukčně navržen tak, aby byl záměnný s pólem záporným, čili při výrobě těchto profilů není třeba zhotovovat dvě rozdílné komponenty, ale stačí jedna ve dvou kusech. Mezi jednotlivými profily je poté vložena izolace, kterou tvoří frézovaná destička o tloušťce 1mm, zajišťující dostatečný izolační odpor. Materiál této izolace byl zvolen FR-5, což je nenasákový sklotextitový materiál, jehož izolační pevnost je zhruba 6kV/mm. Seskupení těchto komponent, čili celé sendvičové provedení, je na straně kondenzátoru fixováno pomocí tří podpůrných sloupků, zhotovených z izolačního sklotextitového materiálu. Tyto sloupky pak slouží pro mechanickou fixaci meziobvodu, aby nedocházelo nežádoucímu namáhání svorek polovodičových modulů. Na straně modulů již další mechanické podpěry nejsou uvažovány, jelikož je předpoklad, že fixace na straně kondenzátorové baterii je dostačující a namáhání, vznikající na rameni síly od podpěr směrem k modulům, je zanedbatelné.

3.5 Volba kondenzátorové baterie

Jak již bylo zmíněno dříve, napájení střídače bude zajištěno trakční kondenzátorovou baterií, která nevytváří zvlnění proudu jako je tomu u měniče napájeného z usměrňovače napětí. Díky tomu lze zjednodušit výběr kondenzátorové baterie. Kondenzátorová baterie slouží k pokrývání proudových špiček odebíraných střídačem, rovněž zmírňuje zvlnění proudu odebíraného z akumulátoru. Také slouží jako akumulční prvek při rekuperaci vozidla. Výpočet kapacity kondenzátorové baterie, byl proveden na základě postupu uvedeném v práci [13]. Jde o rovnici odvozenou ze vzorců pro zvlnění napětí na kondenzátorové baterii a proudového množství od střídače.

$$C = \frac{4 \cdot I_D}{m \cdot f \cdot \Delta U} \quad (\text{F}) \quad (3.1)$$

kde:

I_D ... je proud drainem tranzistoru (A)

m ... je počet fází

f ... je frekvence spínání střídače (Hz)

ΔU ... je zvlnění napětí na kondenzátorové baterii (V)

$$C = \frac{4 \cdot 110}{3 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 15} = 489 \mu\text{F} \quad (3.2)$$

Pro potřeby projektu byla zvolena kondenzátorová baterie typu FHC26J0507K-- o kapacitě 500 μF , která je dimenzována na stejnosměrné napětí 700V. Kondenzátorová baterie je produktem firmy AVX, přičemž tato řada kondenzátorů jako dielektrikum využívá segmentovaný metalizovaný polypropylen. Jak uvádí výrobce, tato konstrukce je výhodná ve způsobu, jakým se projevuje konec životnosti kondenzátoru. U elektrolytických kondenzátorů může na konci jejich životnosti dojít k jejich zkratu, zatímco kondenzátory výše zmíněné řady na konci své životnosti tvoří otevřený obvod. Čili v konečném důsledku nehrozí zkrat v napěťovém meziobvodu. Podoba kondenzátorové baterie je znázorněna na následujícím Obr. 13. [14]



Obr. 13: Kondenzátorová baterie FHC26J0507K--. Převzato z [14]

3.6 Proudová čidla a teplotní čidla

Výstupní svorky střídače jsou doplněny o tři proudová čidla typu HC5FW 500-S/SP1 od výrobce LEM. Jejich parametry udává výrobce v příslušném technickém listu [15] a jsou přiloženy v následující tabulce.

Tabulka 3: Parametry proudového čidla HC5FW 500-S/SP1. Hodnoty převzaty z [15]

Parametr	Hodnota
Série	HC5FW
Technologie měření	Hallův jev s otevřenou smyčkou
Měřená veličina	Proud AC + DC
Měřicí rozsah	$\pm 500\text{A}$
Napájecí napětí	5V DC
Výstupní signál napětí	0,2V - 4,8V
Přesnost	2%

Podoba proudového čidla je znázorněna na následujícím Obr.14.



Obr. 14: proudové čidlo HC5FW 500-S/SP1. Převzato z [15]

Pro případ selhání chlazení či přetížení, by měl být chladič doplněn o dvě čidla teploty PT100 v provedení umožňující zašroubování do závitové díry M6. Čidla PT100 jsou oproti čidlům PT1000 protékána vyšší hodnotou proudu, čímž jsou více odolná proti elektromagnetickému rušení, které se může v blízkosti měniče vyskytovat. Čidla jsou umístěna na vstup a výstup hlavních kanálů chladiče, kde snímají vstupní a výstupní teplotu chladicí vody. Z hlediska řízení by tedy bylo vhodné výstupy těchto čidel vyhodnocovat, stejně jako je tomu v případě teplotního čidla elektromotoru. Pomocí řízení měniče by pak při přetížení a následném zvýšení teploty bylo vhodné zasáhnout a snížit proud procházející měniče, případně měnič zcela odstavit.

3.7 Volba rozměrů svorek na výstupu měniče

Průřez výstupních svorek byl zvolen se zohledněním vhodné proudové hustoty, jejíž hodnota pak na základě výpočtu určuje průřez měděných profilů. Popis postupu tohoto výpočtu je převzat z mé bakalářské práce [16] a je upraven pro aplikaci návrhu měniče.

Množství proudu, protékaného plochou materiálu lze vyjádřit dle následujícího vzorce proudové hustoty.

$$J = \frac{I}{S} \quad (\text{A/mm}^2) \quad (3.3)$$

kde:

J ... je proudová hustota (A/mm^2)

I ... je proud (A)

S ... je plocha průřezu materiálu (mm^2)

Pro připojení vodičů z měniče je zařízení osazeno přípojnicemi vyřezaných pomocí laseru. Toto vodivé připojení je realizováno pomocí vyřezávaných profilů zhotovených z mědi, pro níž je uvažována proudová hustota 9A/mm^2 . Je-li známa hodnota proudové hustoty, je následně možné z upravené rovnice určit průřez profilu, potřebný pro vedení požadovaného proudu. Hodnotu průřezu pak ovlivňuje i proud drainem tranzistoru I_D , který byl zvolen na 110A.

$$J = \frac{I}{S} \rightarrow S = \frac{I}{J} = \frac{110}{9} = 12,22\text{mm}^2 \quad (3.4)$$

Z výpočtu je patrné, že je potřeba měděný profil o minimálním průřezu $12,22\text{mm}^2$. Byly tedy zvoleny minimální rozměry výstupních svorek, jimiž jsou tloušťka 5mm a šířka 9mm. Zde je zohledněno i oslabení z důvodu vrtání profilu průměrem 5,5mm pro připojení svorek vodičů motoru. Profil s těmito rozměry včetně oslabení má průřez $17,5\text{mm}^2$, jenž splňuje požadovanou hodnotu vyplývající z výpočtu. Tato hodnota se rovněž přibližuje hodnotě průřezu vodičů z motoru, jenž je 16mm^2 .

3.8 Určení ztrát střídače

Výpočet ztrát měniče se dle požadavků zadavatele opírá o postup uvedený v dokumentu Infineon Mosfet Calculation [17]. Měnič je složen ze tří modulů BSM120D12P2C005, který byl již zmíněn výše, přičemž každý modul tvoří půlmůstek střídače. Zátěž měniče bude motor EMRAX 188 Medium Voltage LC. Motor umožňuje větší odběr proudu než modul, tedy byl zvolen jmenovitý a maximální proud měniče tak, aby se co nejvíce využil potenciál měniče. Napájení střídače bude zajištěno z baterie.

Vlivem procházejícího proudu polovodičovou součástkou, vznikají na prvku ztráty. Pro potřeby návrhu polovodičových měničů, rozdělujeme pět hlavních skupin ztrát.

- 1) Ztráty propustným proudem - P_C
- 2) Spínací ztráty - P_{sw}
- 3) Ztráty blokovacím proudem P_b
- 4) Ztráty závěrným proudem
- 5) Ztráty hradlovým (spínacím) proudem

Z hlediska tohoto konkrétního návrhu jsou ztráty 3), 4) a 5) zanedbány, jelikož vůči prvním dvěma jsou jejich hodnoty zanedbatelné. Celkové ztráty P_L pak tedy získáme sečtením prvních dvou druhů ztrát. [18]

$$P_L = P_C + P_{sw} + P_b \approx P_C + P_{sw} \quad (3.5)$$

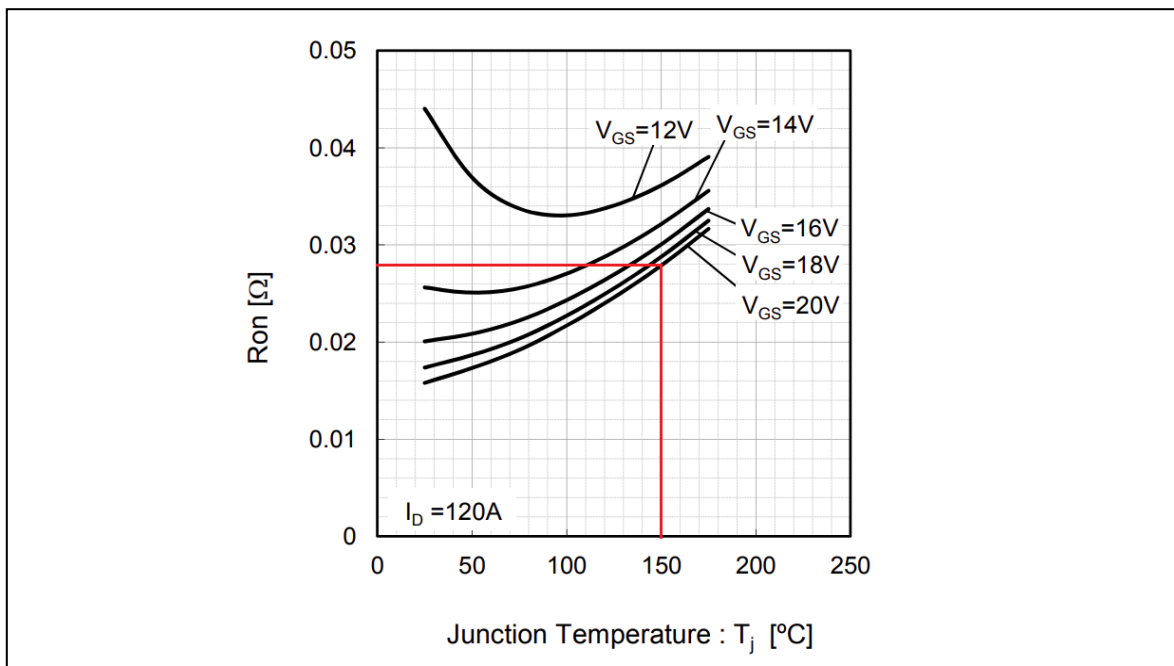
3.8.1 Vodivostní ztráty

Pro určení vodivostních ztrát je třeba pracovat s výchozími hodnotami uvedenými v následující tabulce.

Tabulka 4: Výchozí hodnoty pro návrh

Parametr	Hodnota
Teplota čipu T_j	až 150°C (katalogová hodnota [12])
Řídicí napětí U_{gs}	zvoleno 20V (max. 22V)
Proud drainem tranzistoru I_D	zvoleno 110A
Napájecí napětí baterie U_{DD}	183 až 227V dle SoC ("State of Charge")

Pro výpočet ztrát je třeba dále určit hodnotu R_{DSon} , což je odpor mezi drainem a sourcem při sepnutém stavu. Tuto hodnotu lze určit z průběhu jeho velikosti na teplotě T_j . Tuto závislost poskytuje výrobce technickém listu příslušného modulu BSM120D12P2C005 [12]. Na základě maximální teploty T_j a zvoleného řídicího napětí lze určit velikost odporu mezi drain-source při zapnutém stavu z Obr. 15.



Obr. 15: Závislost R_{DSon} na teplotě T_j . Převzato z [12]

Závislost odporu na teplotě uvádí výrobce pro proud drainem $I_D=120A$. Pro určení velikosti odporu pro zvolený proud $I_D=110A$ je uvažováno, že jeho velikost se výrazně neliší. Z příslušného grafu byla tedy odečtena hodnota $R_{DSon} = 0,028\Omega$.

Napětí mezi source-drain u_{DS} je pak rovno součinu odporu R_{DSon} a proudu protékající drainem I_D .

$$u_{DS} = R_{DSon} \cdot I_D \quad (3.6)$$

Okamžitou hodnotu propustných ztrát na tranzistoru p_{CM} lze určit z následujícího vzorce.

$$p_{CM}(t) = u_{DS}(t) \cdot i_D(t) = R_{DSon} \cdot i_D^2(t) \quad (W) \quad (3.7)$$

Časový průběh propustných ztrát na tranzistoru p_{CM} pak lze určit pomocí integrace, čili je nutné provést výpočet plochy pod křivkou.

$$P_{CM} = \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} p_{CM}(t) dt \quad (W) \quad (3.8)$$

$$P_{CM} = \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} (R_{DSon} \cdot i_{D(t)}^2(t)) dt \quad (W) \quad (3.9)$$

$$P_{CM} = R_{DSon} \cdot I_{Drms}^2 \quad (W) \quad (3.10)$$

Je samozřejmostí, že u stejnosměrného průběhu je maximální hodnota proudu stejná jako efektivní hodnota proudu, avšak pro sinusový průběh, je nutné maximální hodnotu přepočíst následovně.

$$I_0 = \sqrt{2} \cdot I_D \quad (A) \quad (3.11)$$

$$I_0 = \sqrt{2} \cdot 110 = 155,6 \text{ A} \quad (3.12)$$

Pro 3f. střídač vychází skutečná efektivní hodnota proudu drainem dle následujícího vzorce, který je rovněž pro tuto aplikaci modulů uveden v dokumentu Infineon Mosfet Calculation [17].

$$I_{Drms} = \sqrt{I_0^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{m_a \cdot \cos\varphi}{3 \cdot \pi} \right)} \quad (\text{A}) \quad (3.13)$$

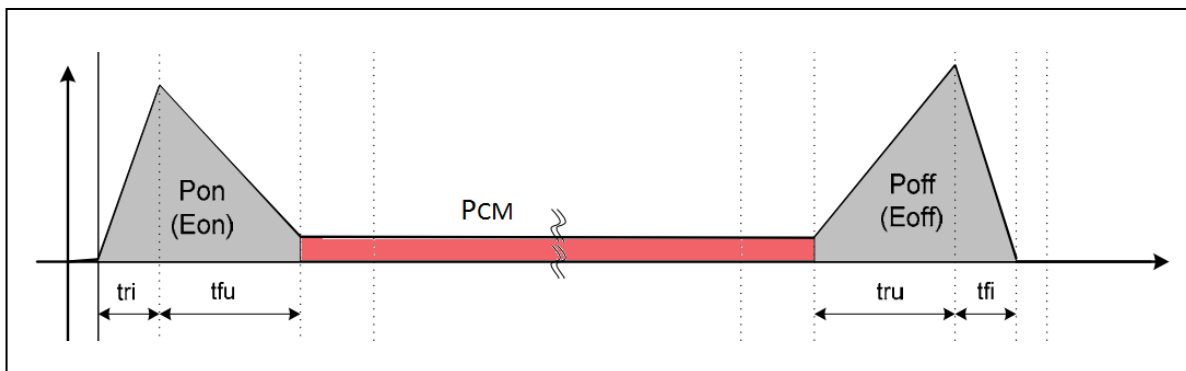
$$I_{Drms} = \sqrt{155,6^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{1 \cdot 0,81}{3 \cdot \pi} \right)} = 71,45 \text{ A} \quad (3.14)$$

Po dosazení tohoto vzorce do předchozího vzorce s integrály, již lze určit ztráty P_{CM} na tranzistoru.

$$P_{CM} = R_{DSon} \cdot I_{Drms}^2 = R_{DSon} \cdot I_0^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{m_a \cdot \cos\varphi}{3 \cdot \pi} \right) \quad (\text{W}) \quad (3.15)$$

$$P_{CM} = 0,028 \cdot 155,6^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{1 \cdot 0,81}{3 \cdot \pi} \right) = 142,9 \text{ W} \quad (3.16)$$

Znázornění ztrát P_{CM} na tranzistoru v propustném směru je patrné z následujícího Obr. 16, ve kterém jsou zvýrazněny červenou barvou.



Obr. 16: Ztráty P_{CM} na tranzistoru v propustném směru. Převzato z [12]

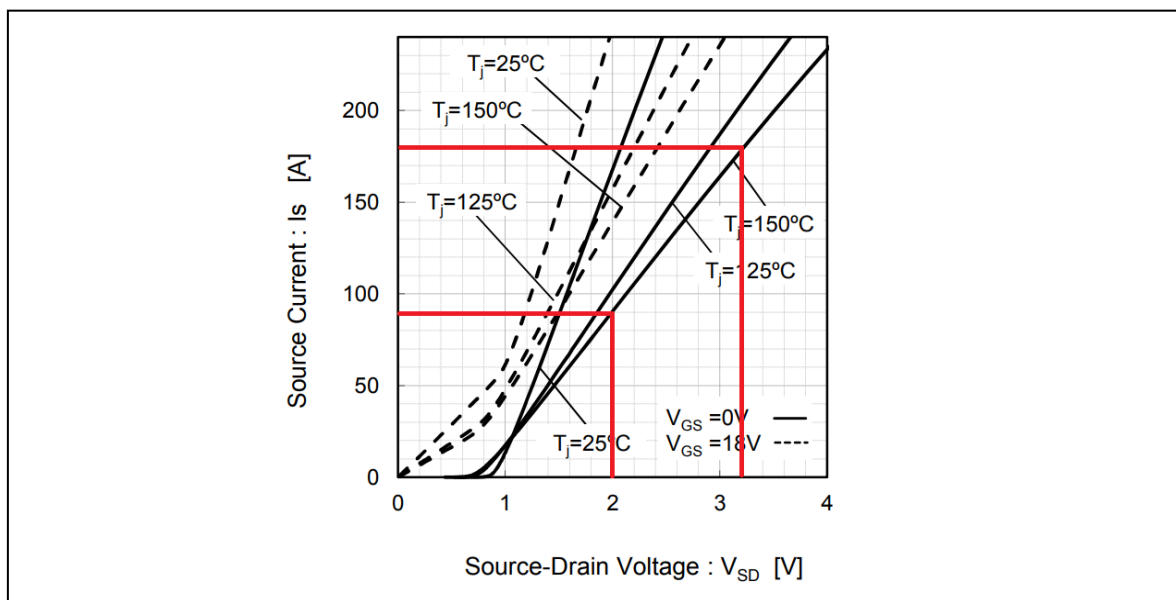
Velikost maximálního sruženého výstupního napětí střídače U_{Omax} lze určit ze vzorečku pro výpočet hloubky modulace m_a , kdy zvolíme velikost $m_a = 1$.

$$m_a = \frac{U_o \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}}{\frac{U_{DD}}{2}} \quad (-) \rightarrow U_{Omax} = \frac{\frac{U_{DD}}{2} \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{2}} \quad (V) \quad (3.17)$$

$$U_{Omax} = \frac{\frac{227}{2} \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 139 \text{ V} \quad (3.18)$$

3.8.2 Propustné ztráty na diodě

Pro výpočet ztrát je třeba určit diferenční odpor, ten lze určit z grafu propustné charakteristiky diody viz Obr. 17, kterou uvádí výrobce modulu v technickém listu [12]. Určení spočívá v aproximaci charakteristiky přímkou v lineární oblasti.



Obr. 17: Propustná charakteristika diody. Převzato z [12]

Diferenční odpor na diodě v propustném směru pak vypočteme jako poměr rozdílu odečteného napětí mezi source-drain U_{SD} a rozdílu odečteného proudu tekoucí přes source I_S .

$$R_D = \frac{\Delta U_{SD}}{\Delta I_S} = \frac{3,2 - 2}{180 - 90} = 0,0133 \Omega \quad (3.19)$$

Napětí na diodě v závislosti na proudu diodou lze pak učit dle následujícího vzorce.

$$u_D(i_D) = u_{D0} + R_D \cdot i_F \quad (\text{V}) \quad (3.20)$$

kde:

u_{D0} ...je prahové napětí diody v propustném směru - odečteno z grafu $u_{D0} = 0,7\text{V}$

i_F ...je proud diodou v propustném směru

Okamžitou hodnotu propustných ztrát diodou p_{CD} lze určit z následujícího vzorce

$$p_{CD}(t) = u_D(t) \cdot i_F(t) = u_{D0} \cdot i_F(t) + R_D \cdot i_F^2(t) \quad (\text{W}) \quad (3.21)$$

Průměrnou hodnotu ztrát na diodě P_{CD} pak lze určit pomocí integrace, čili je nutné provést výpočet plochy pod křivkou.

$$P_{CD} = \frac{1}{T_{SW}} \int_0^{T_{SW}} p_{CD}(t) dt \quad (3.22)$$

$$P_{CD} = \frac{1}{T_{SW}} \int_0^{T_{SW}} (u_{D0} \cdot i_F(t) + R_D \cdot i_F^2(t)) dt \quad (3.23)$$

$$P_{CD} = u_{D0} \cdot I_{Fav} + R_D \cdot I_{Frms}^2 \quad (3.24)$$

kde:

I_{Fav} ... je střední hodnota proudu diodou v propustném směru

I_{Frms} ...je skutečná efektivní hodnota proudu diodou v propustném směru

Pro 3f. střídač vychází střední hodnota proudu diodou v propustném směru dle následujícího vzorce.

$$I_{Fav} = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{m_a \cdot \cos\varphi}{8} \right) \quad (A) \quad (3.25)$$

$$I_{Fav} = 155,6 \cdot \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{1 \cdot 0,81}{8} \right) = 9 \text{ A} \quad (3.26)$$

Skutečnou efektivní hodnotu proudu diodou v propustném směru pak lze určit následovně.

$$I_{Frms} = \sqrt{I_0^2 \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{m_a \cdot \cos\varphi}{3\pi} \right)} \quad (A) \quad (3.27)$$

$$I_{Frms} = \sqrt{155,6^2 \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{1 \cdot 0,81}{3\pi} \right)} = 30,7 \text{ A} \quad (3.28)$$

Po dosazení těchto vzorců do předchozího vzorce s integrály, již lze určit propustné ztráty diodou P_{CD} .

$$P_{CD} = u_{D0} \cdot I_{Fav} + R_D \cdot I_{Frms}^2 \quad (W) \quad (3.29)$$

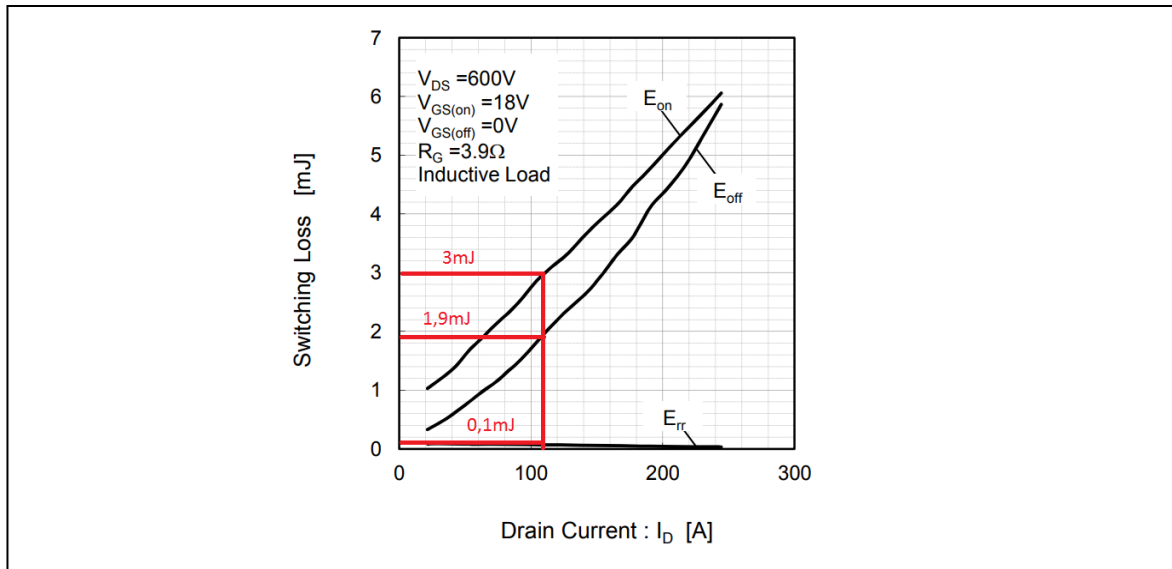
$$P_{CD} = u_{D0} \cdot I_0 \cdot \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{m_a \cdot \cos\varphi}{8} \right) + R_D \cdot I_0^2 \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{m_a \cdot \cos\varphi}{3\pi} \right) \quad (3.30)$$

$$P_{CD} = 0,7 \cdot 155,6 \cdot \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{1 \cdot 0,81}{8} \right) + 0,0133 \cdot 155,6^2 \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{1 \cdot 0,81}{3\pi} \right) \quad (3.31)$$

$$P_{CD} = 18,88 \text{ W} \quad (3.32)$$

3.8.3 Spínací ztráty

Následující postup výpočtu ztrát vychází z publikace [18]. Z grafu spínacích ztrát v závislosti na proudu drainem viz Obr. 18 je možné odečíst hodnoty E_{on} , E_{off} a E_{rr} na základě zvoleného proudu $I_D = 110\text{A}$.



Obr. 18. Spínací ztráty v závislosti na proudu I_D . Převzato z [12]

Výpočet ztrátových energií při spínání E_{on} , E_{off} a E_{rr} je nutné vynásobit poměrem napětí baterie ku napětí, pro které výrobce uvádí závislost spínacích ztrát.

$$E_{on} = E_{on(I_D)} \cdot \frac{U_{DD}}{U_{DS}} \quad (\text{J}) \quad (3.33)$$

kde:

$E_{on(I_D)}$... je ztrátová energie při zapnutí (J) - odečteno z grafu

U_{DD} ... je napětí baterie (V)

U_{DS} ... je napětí mezi drain-source (V) - uvedeno v grafu jako V_{DS}

$$E_{on} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{227}{600} = 0,001135\text{J} \rightarrow 1,135 \text{ mJ} \quad (3.34)$$

$$E_{off} = E_{off(I_D)} \cdot \frac{U_{DD}}{U_{DS}} \cdot 10^{-3} \quad (\text{J}) \quad (3.35)$$

kde:

$E_{off(I_D)}$...je ztrátová energie při vypnutí (J) - vyčteme z grafu

$$E_{off} = 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{227}{600} = 0,00072\text{J} \rightarrow 0,72 \text{ mJ} \quad (3.36)$$

$$E_{rr} = E_{rr(I_D)} \cdot \frac{U_{dd}}{U_{DS}} \cdot 10^{-3} \quad (\text{J}) \quad (3.37)$$

kde:

$E_{rr(I_D)}$...je ztrátová energie vniklá na diodě (J) - vyčteme z grafu

$$E_{rr} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{227}{600} = 0,000038\text{J} \rightarrow 0,038 \text{ mJ} \quad (3.38)$$

Na základě zjištění hodnot ztrátových energií lze nyní provést výpočet ztrátového výkonu při spínání na tranzistoru.

$$P_{swM} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{sw} \quad (\text{W}) \quad (3.39)$$

$$P_{swM} = (1,135 \cdot 10^{-3} + 0,72 \cdot 10^{-3}) \cdot 20 \cdot 10^3 = 37,08 \text{ W} \quad (3.40)$$

Stejně tak lze určit ztrátový výkon při spínání na diodě. Zde lze provést zjednodušení, kdy ztrátová energie na diodě vniklá při spínání E_{onD} a ztrátová energie na diodě vzniklá při vypínání E_{offD} odpovídají hodnotě E_{rr} .

$$P_{swD} = (E_{onD} + E_{offD}) \cdot f_{sw} \approx E_{rr} \cdot f_{sw} \quad (\text{W}) \quad (3.41)$$

$$P_{swD} \approx 0,038 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^3 = 0,76 \text{ W} \quad (3.42)$$

3.8.4 Celkové ztráty střídače

Celkové ztráty na tranzistoru vycházejí následovně.

$$P_M = P_{CM} + P_{swM} \quad (\text{W}) \quad (3.43)$$

$$P_M = 142,94 + 37,08 = 180,02\text{W} \quad (3.44)$$

Celkové ztráty na diodě pak vycházejí následovně.

$$P_D = P_{CD} + P_{swD} \quad (\text{W}) \quad (3.45)$$

$$P_D = 18,88 + 0,76 = 19,63\text{W} \quad (3.46)$$

Celkové ztráty střídače pak lze určit následovně.

$$P_L = (P_M + P_D) \cdot n_s \quad (\text{W}) \quad (3.47)$$

kde:

n_s ... je počet tranzistorů ve střídači

$$P_L = (180,02 + 19,63) \cdot 6 = 1197,87\text{W} \quad (3.48)$$

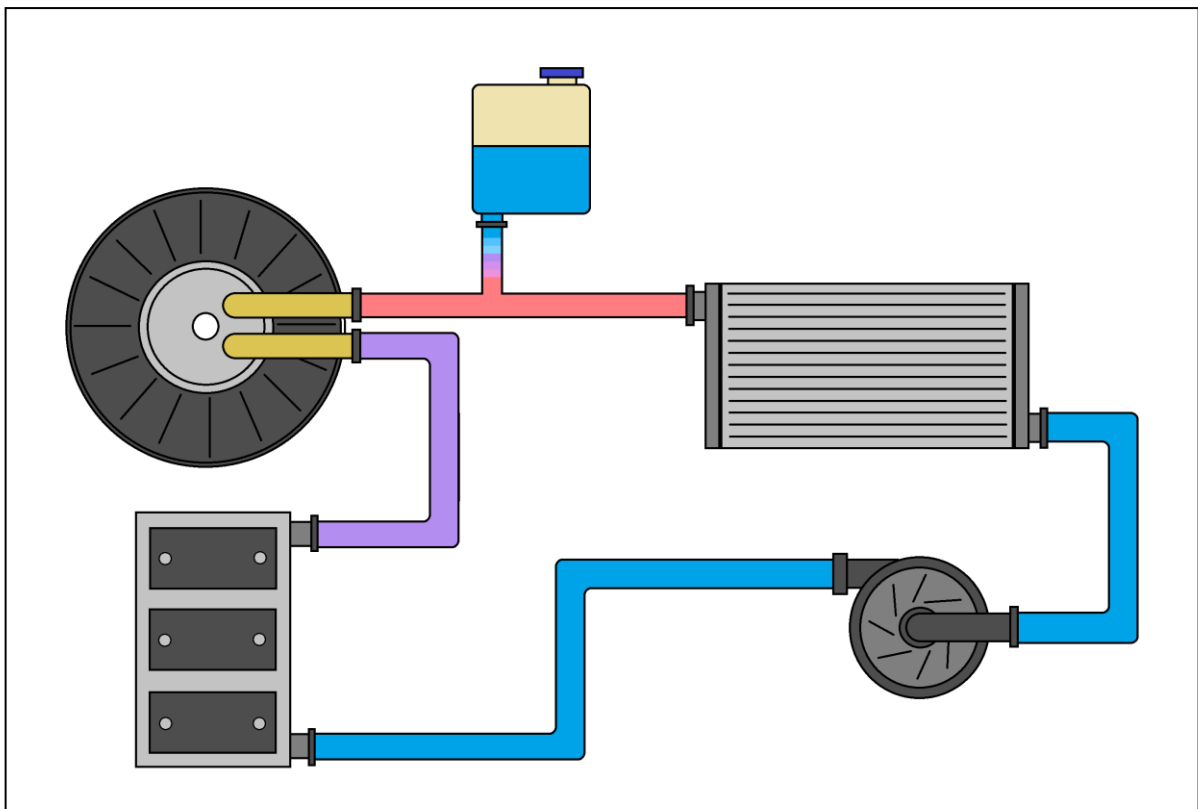
Je patrné, že celkové ztráty střídače jsou dle výpočtu téměř 1200W.

4 Návrh kapalinového chlazení

Dle požadavku by mělo být chlazení výkonového měniče a elektromotoru EMRAX 188-MV-LC zhotoveno v provedení chlazení vodou. Účel chlazení, které je použito v projektu čtyřkolky, je tedy odvádět ztrátový výkon vznikající provozem měniče, tedy ztráty o kterých pojednávala kapitola 3, a dále ztráty vznikající provozem elektromotoru.

4.1 Soustava systému vodního chlazení

Chlazení tohoto typu je nejčastěji zhotovováno se stálým oběhem chladicího média, tedy vody, či glykolu ředěným vodou. Okruh soustavy projektu čtyřkolky by měl obsahovat dvě zařízení, která je třeba chladit, tedy elektromotor a měnič. Dále by měl být okruh doplněn o čerpadlo, které bude zajišťovat cirkulaci vody, o chladič, jenž bude předávat teplo do okolního prostředí, a o expanzní nádobu, jejíž účel je zajistit možnost změny objemu vody, který se mění s její teplotou. Principiální schéma chladicího okruhu je znázorněno na následujícím Obr. 19.



Obr. 19: Schéma chladicího okruhu

4.2 Vzduchové a vodní chlazení měniče

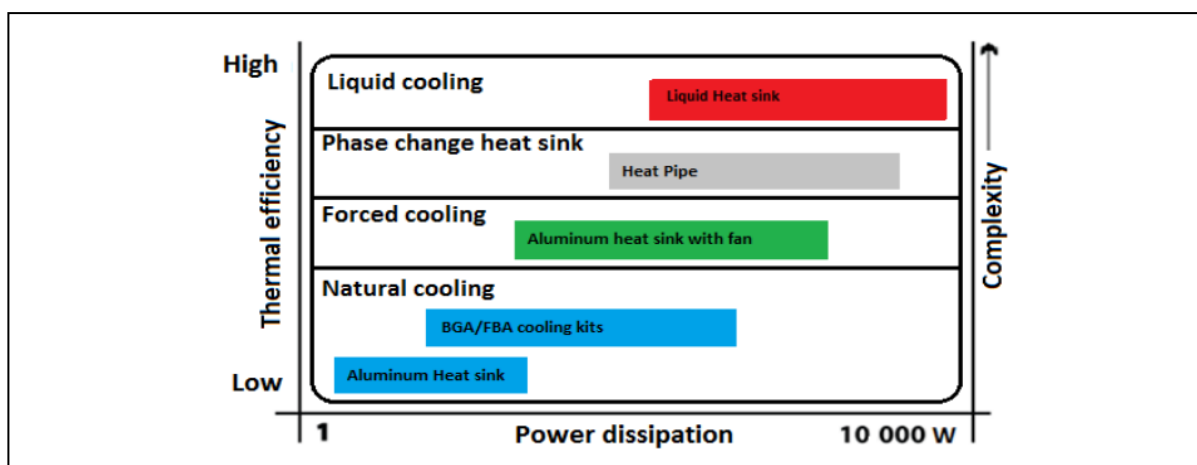
Moduly střídače jsou umístěny na hliníkovém chladiči, jenž zajišťuje odvod ztrátového tepla z pouzder modulů a předává jej do chladicího média. Je předpoklad, že měnič v projektu čtyřkolky nebude chlazen vzduchem proudícím kolem celého měniče, případně pouze minimálně, jelikož je uvažováno jeho kompletní zakrytování.

Chladicí média pro chlazení měničů pak mohou být například vzduch, voda či kapaliny s nízkou hodnotou odpařování jako jsou freon, aceton, metanol a podobně.

4.2.1 Vzduchové chlazení

Vzduchové chlazení se vyznačuje tím, že jeho konstrukce je levná, spolehlivá a jednoduchá. Vzduchové chlazení s přirozeným prouděním vzduchu se používá pro měniče nižších výkonů, chlazení s nucenou ventilací se pak běžně používá i pro měniče, jejichž výkon se může pohybovat i v řádech MW. Nucená ventilace je pak zajištěna pomocí ventilátoru. Tepelný odpor chladiče je dán zejména jeho teplosměnnou plochou. V porovnání s vodním chlazením vykazuje chlazení vzduchem menší účinnost, nicméně jeho využití nastává v aplikacích, kde je použití vodního chlazení nevhodné. Chladicí výkon vzduchového chladiče závisí i na jeho architektuře či na materiálu. [19]

Závislost ztrátového výkonu na tepelné účinnosti jednotlivých typů chlazení, je znázorněn na následujícím Obr. 20 převzatém z článku [20].



Obr. 20: Závislost ztrátového výkonu na tepelné účinnosti jednotlivých typů chlazení. Převzato z [20]

4.2.2 Vodní chlazení

Vodní chlazení se poté používá v aplikacích s vysokými výkony. Výhodou tohoto typu chlazení je, že má lepší chladicí účinek než chlazení vzduchem a to díky větší tepelné kapacitě vody. Nevýhodou je však složitější návrh vodního hospodářství celé soustavy. Další nevýhodou vodního chlazení oproti vzduchovému je možnost rychlé ztráty chladicího účinku. Ten může nastat v případě náhlé poruchy těsnosti chladicí soustavy a tedy ztráty chladicího média. Vývoj střídačů dnes stále častěji klade důraz na jejich kompaktnost, čehož lze použitím vodního chlazení docílit. Další výhodou je fakt, že tepelný výměník vodního chlazení pak nemusí být přímo součástí měniče a může být umístěn mimo měnič. Toto provedení je výhodné zejména v automotive aplikacích, kde se systém vodního hospodářství zpravidla vyskytuje běžně.

Kapalinové chlazení je samozřejmě vždy s nuceným oběhem, zde lze ovšem ještě zmínit, že existují různá řešení provedení chlazení vodou. Základním rozdělením je chlazení přímé a nepřímé.

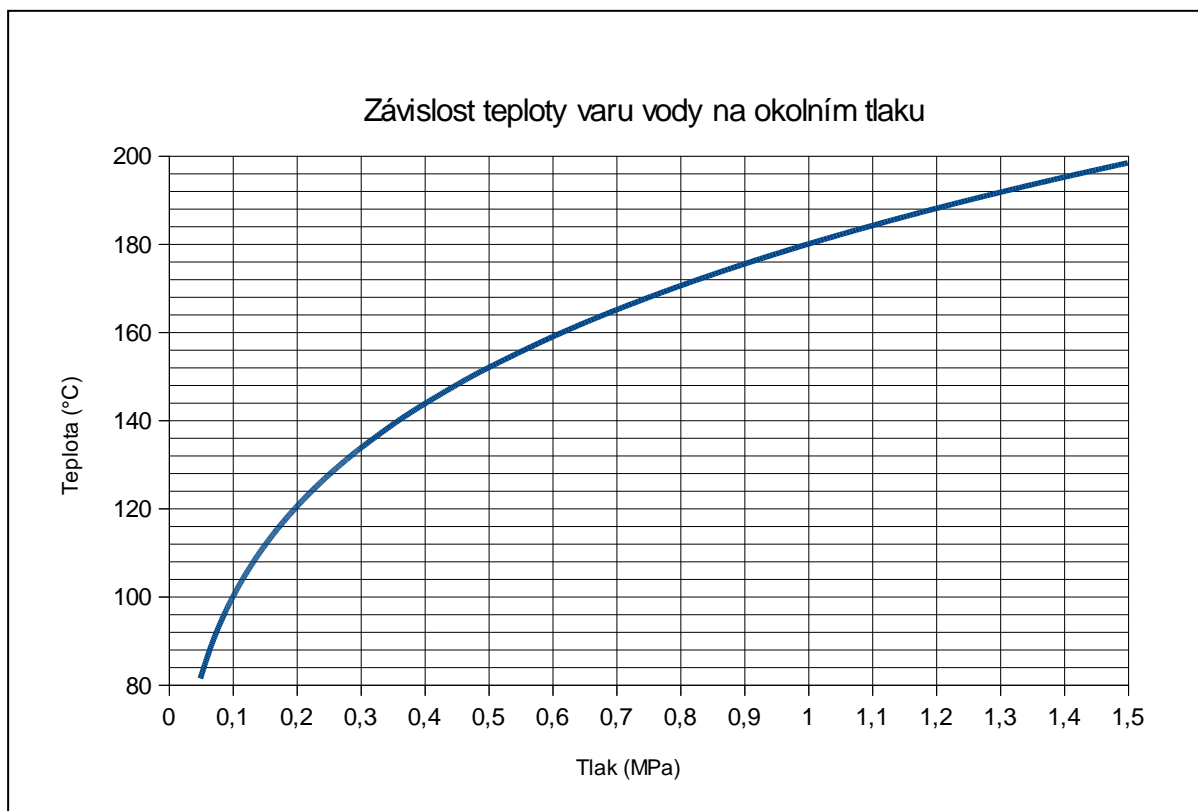
U nepřímého chlazení jsou výkonové moduly umístěny na chladicí desku (angl. cold plate/cold block) a optimální tepelný přechod mezi nimi zajišťuje použití vhodné teplovodivé pasty. Chladicí deska v sobě skrývá kanály, jimiž protéká chladicí medium. Tyto kanály pak mohou být vrtané, kdy je v hliníkovém bloku vytvořen systém kanálů, přičemž jde v praxi o nejjednodušší variantu. Dále mohou být například frézované, kdy lze touto metodou docílit optimálního protékání chladiva přímo pod místy, kde se v modulech nachází polovodičové čipy. Frézované kanály pak mohou být doplněny o různé meandry, piny či výstupky, které zvětšují jeho teplosměnnou plochu a rovněž přispívají k lepšímu odvodu tepla z chladiče na chladicí medium.

U druhé varianty přímého chlazení je chladicí blok tvořen tak, že chladicí voda přímo omývá pouzdro polovodičového modulu. Čili zde není potřeba použití chladicí pasty. Je však nutné zajistit utěsnění modulů vůči chladiči, aby nedocházelo k únikům chladiva. Základny modulů pro tuto aplikaci chlazení pak rovněž bývají doplněny o frézované piny či výstupky pro zvýšení teplosměnné plochy. Toto provedení pak vykazuje přibližně o třetinu menší přechodový odpor, než u nepřímého chlazení.

Pokročilejší variantou přímého chlazení je pak ještě takzvané chlazení postřikem. Zde je v chladicím bloku vytvořen systém trysek, jenž vytváří paprsek kapaliny na povrch desky modulu. Opět lze takto snížit přechodový odpor cesty pro přenos tepla.

4.3 Expanzní nádoba uzavřeného chladicího okruhu

Expanzní nádoba umožňuje změnu objemu vody, který se mění tím, jak se voda ohřívá. Objem chladicího média se tedy mění díky objemovému rozpínání vody. Nádoba by měla být na vozidle umístěna tak, aby byla uživatelsky snadno dostupná z důvodu dolévání chladicího média a případné kontroly hladiny. Je možné i provedení, kdy expanzní nádoba je součástí chladiče, tehdy ale musí být chladič, tedy spíše jeho horní hrana, rovněž umístěna v přístupném bodě soustavy. Nádoba je uzavřená, to znamená, že při ohřátí vody dojde v chladicím okruhu k přetlaku. Díky tomu lze docílit, že teplota varu vody, která je při atmosférickém tlaku 100°C , vzroste na hodnotu vyšší. Závislost teploty varu vody na hodnotě okolního tlaku je znázorněna na následujícím Obr. 21. Hodnoty použité pro sestrojení grafu byly převzaty z [21].



Obr. 21: Závislost varu vody na okolním tlaku. Hodnoty převzaty z [21]

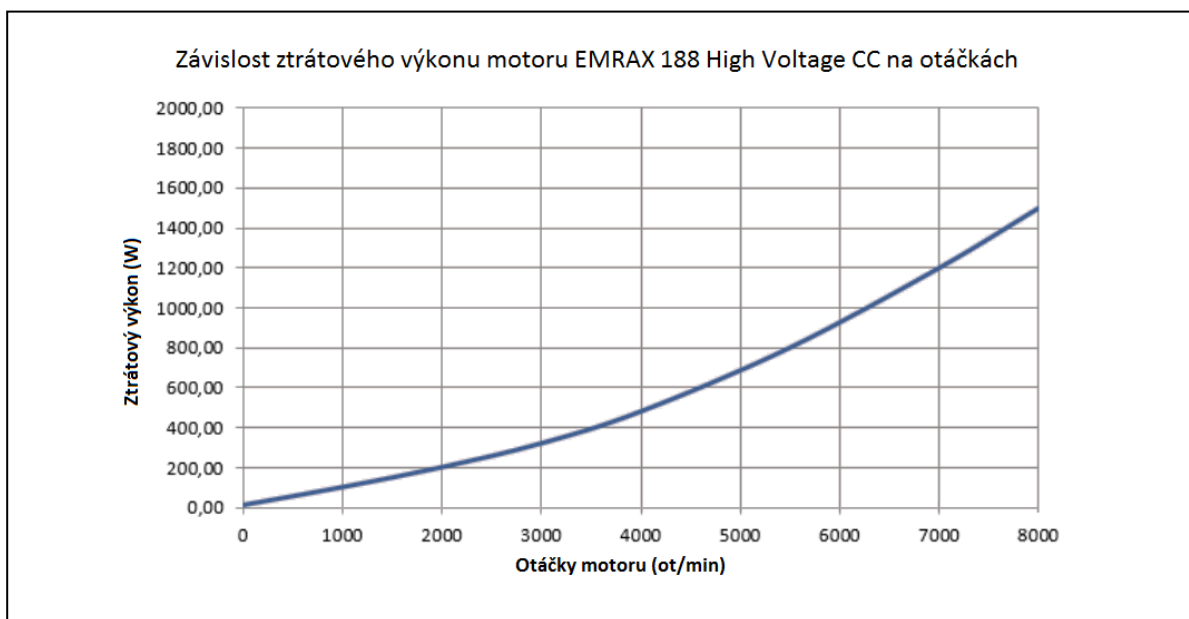
4.4 Elektromotor

Elektromotor má definované parametry chlazení v jeho listu s technickými údaji [22], které náleží ke konkrétnímu modelu. Výpis těchto parametrů je přiložen v následující tabulce.

Tabulka 5: technické parametry týkající se chlazení el. motoru. Hodnoty převzaty z [22]

Technický údaj	Typ	EMRAX 188 Střední Napětí		
Vzduchové chlazení = AC Kapalinové chlazení = LC Kombinované chlazení = Vzduchové + kapalinové =CC		AC	LC	CC
Stupeň krytí		IP21	IP61	IP21
Specifikace chladicího média (Průtok vzduchu = AF; Průtok vstupní vody / glykolu = WF; Okolní vzduch = AA) Pokud je vstupní teplota WF a/nebo teplota AA nižší, pak je hodnota stálého výkonu vyšší		AF=20m/s; AA=25°C	WF=8l/min at 50°C; AA=25°C	WF=8l/min at 50°C; AA=25°C

Výrobce v listu rovněž uvádí průběh ztrát motoru naprázdno v závislosti na otáčkách motoru. Tento průběh je znázorněn na následujícím Obr. 22 pro motor v režimu high voltage. Pro režim meduim voltage jsou průběhy obdobné, rozdíl je v hodnotách DC napětí a proudu motoru. Pro motor v režimu medium voltage je pak pro dosažení stejných výstupních hodnot potřeba 1,52 krát větší proud a třetinové napětí. [22]



Obr. 22: Závislost ztrátového výkonu na otáčkách motoru. Hodnoty převzaty z [22]

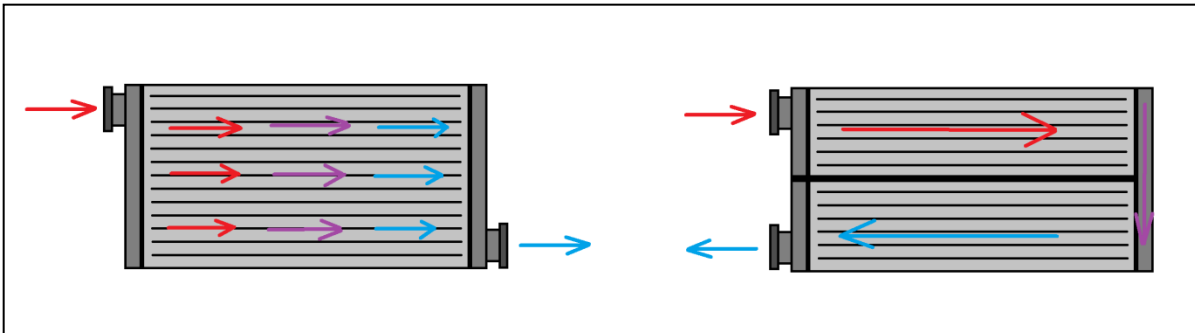
Dále lze v manuálu pro elektromotory firmy EMRAX [23] nalézt další informace ohledně chlazení, se kterými je nutné pracovat. Zde výrobce udává, že motor, ačkoli je chlazen vodou, nesmí být v uzavřené konstrukci, tedy je nutné, aby byl zajištěn přístup vzduchu k samotnému tělu motoru. Z hlediska konstrukce čtyřkolky by tento požadavek měl být snadno splněn. Pro případ selhání chlazení či přetížení, je elektromotor doplněn o čidlo teploty KTY 81-210, jehož parametry lze rovněž dohledat v příslušném datasheetu [24]. Výrobce motoru pak požaduje vyhodnocování výstupu tohoto čidla pomocí řízení měniče, přičemž při přetížení motoru a jeho následnému zvýšení teploty, by řízení měniče mělo zasáhnout a snížit proud procházející motorem. Při odpojení čidla by pak mělo dojít k úplnému odstavení motoru. Pracovní teplota motoru je dle výrobce v rozmezí -40°C až 120°C , přičemž tato teplota platí pro ložiska, vinutí a permanentní magnety. Teplota motoru se nesmí z tohoto rozsahu vychýlit.

Výrobce dále doporučuje průtok chladicí kapaliny mezi 6 až 8 l/min a to při její maximální vstupní teplotě 50°C a při teplotě okolního prostředí 25°C . V případě, že jsou hodnoty těchto dvou teplot nižší, může být trvalý výkon motoru vyšší. V případě motoru typu EMRAX 188 doporučuje výrobce konkrétní hodnoty tlaku chladicího média, při kterém dochází k jeho optimálnímu proudění. Tedy v doporučeném rozmezí průtoku 6 až 8 l/min, by tlak chladicího média měl být 0,5bar. Maximální povolený tlak je 2bar. Výrobce rovněž uvádí, že chladicí médium musí procházet filtrem, přičemž průměr nebo úhlopříčka otvorů filtru nesmí být větší než 2mm.

4.5 Tepelný výměník

Tepelný výměník je zařízení, díky kterému dochází k odvodu nadbytečného tepla do okolního prostředí. Jde tedy o druh chladiče, který je určený pro předávání tepelné energie mezi dvěma médii, jimiž jsou nejčastěji voda a vzduch. Chladič se skládá ze tří částí, vstupní komory, výstupní komory a vložky, která je umístěna mezi komorami. Vložka chladiče je zhotovena z desítek kanálků oválného, kulatého případně obdélníkového tvaru, jimiž proudí voda ze vstupní komory do komory výstupní. Na tyto kanálky jsou dále připevněny tenkostěnné pásy, pro zvětšení plochy chladiče pro odvod nadbytečného tepla. Tyto pásy pak jsou zhotovené jako rovné plíšky, nebo mohou být vytvarovány do zvlněného profilu, díky čemu opět vzrůstá plocha pro odvádění tepla. Chladič dle potřeby konstrukce může mít vstup a výstup na protějších stranách, avšak lze volit i konstrukci, kde vstup i výstup jsou zhotoveny pouze na jedné straně, tedy jedné komoře. Tato komora pak

v sobě obsahuje přepážku pro oddělení. Názorná reprezentace proudění v jednotlivých typech provedení je přiložena v následujícím Obr. 23.



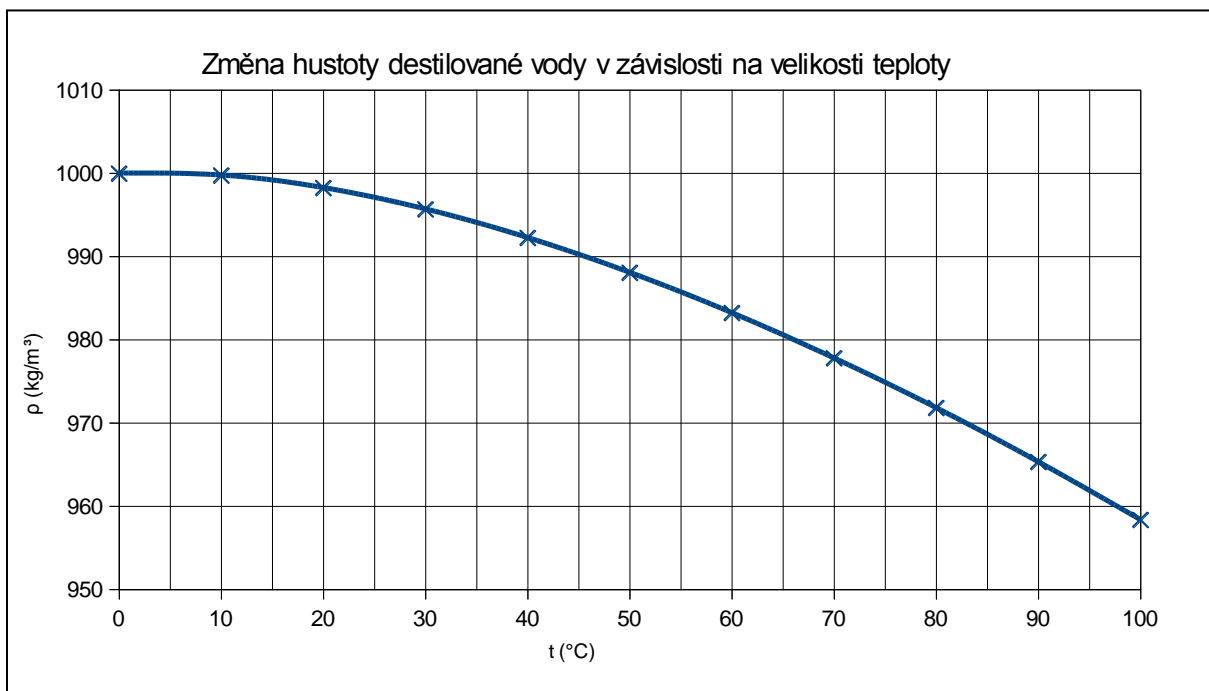
Obr. 23: Provedení vývodů chladiče

4.5.1 Základní výpočty pro volbu tepelného výměníku

Pro následující výpočty je třeba určit hustotu, kterou bude mít chladicí voda při příslušné pracovní teplotě. Pro potřeby tohoto určení jsou přiloženy tabulkové hodnoty a Obr. 24, zachycující závislost hustoty destilované vody na velikosti teploty. Hodnoty průběhu této závislosti byly převzaty z [25].

Tabulka 6: Změna hustoty destilované vody v závislosti na velikosti teploty. Hodnoty převzaty z [25]

Teplota (°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Hustota (kg/m ³)	999,94	999,71	998,21	995,65	992,22	988,04	983,20	977,76	971,79	965,30	958,35



Obr. 24: Závislost hustoty vody na velikosti teploty. Hodnoty převzaty z [25]

Následující výpočty se odvíjí od postupu uvedeném v práci [26], přičemž vzorce byly přepracovány se zohledněním potřeb aplikace pro projekt čtyřkolky. Na základě požadavku výrobce motoru na velikost teploty chladicího média, byla zvolena hustota $\rho_w = 988 \text{ kg/m}^3$. Rovněž pro výpočet byla zvolena hodnota objemového průtoku $\dot{V} = 6 \text{ l/min} = 0,0001002 \text{ m}^3/\text{s}$. Na základě těchto hodnot lze vypočítat hmotnostní průtok chladicí vody \dot{m}_w dle následujícího vzorce.

$$\dot{m}_w = \rho_w \cdot \dot{V} \quad (\text{kg/s}) \quad (4.1)$$

$$\dot{m}_w = 988 \cdot 0,0001002 = 0,0988 \text{ kg/s} \quad (4.2)$$

Určení hodnoty Δt_m . Tato hodnota představuje nevyšší možné ochlazení chladicího média. Je dána teplotou chladiva a okolní teplotou prostředí kolem chladiče.

$$\Delta t_m = T_w - T_a \quad (^\circ\text{C}) \quad (4.3)$$

kde:

T_w ...je předpokládaná hodnota, jakou dosáhne chladicí medium ($^\circ\text{C}$)

T_a ...je hodnota teploty okolního vzduchu kolem chladiče ($^\circ\text{C}$)

$$\Delta t_m = 55 - 40 = 15 \quad ^\circ\text{C} \quad (4.4)$$

Z výsledku je tedy patrné, že teoreticky je možné chladicí médium ochladit o $30 \text{ }^\circ\text{C}$ až na hodnotu $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Za těchto okolností, lze určit nejvyšší možný chladicí výkon chladiče P_{mw} , který je zajištěn pouze vodou.

$$P_{mw} = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot \Delta t_m \quad (\text{kW}) \quad (4.5)$$

kde:

c_w ...je tepelná kapacita vody ($\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$)

$$P_{mw} = 0,0988 \cdot 4,18 \cdot 15 = 6,19 \text{ kW} \quad (4.6)$$

Stejně jako v případě chladicí vody, je třeba určit hmotnostní průtok vzduchu \dot{m}_a chladičem. Pro učení této hodnoty, je třeba vypočítat hustotu vzduchu při hodnotě teploty okolního vzduchu kolem chladiče.

$$\rho_a = \frac{p_n}{r_a \cdot T_a} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (4.7)$$

kde:

p_n ...je hodnota normálního atmosférického tlaku (pa)

r_a ...je molární plynová konstanta vzduchu ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T_a ...je hodnota teploty okolního vzduchu kolem chladiče (K)

$$\rho_a = \frac{101325}{287 \cdot 313,15} = 1,127 \text{ kg/m}^3 \quad (4.8)$$

Hodnotu hmotnostního průtoku vzduchu lze nyní určit pomocí následujícího vztahu.

$$\dot{m}_a = \frac{P_{ztr}}{\Delta t \cdot c_a} \quad (\text{kg/s}) \quad (4.9)$$

kde:

P_{ztr} ...je ztrátový výkon odvedený chlazením (kW)

Δt ...je rozdíl teplot vody na vstupu a výstupu chladiče ($^{\circ}\text{C}$)

c_a ...je tepelná kapacita vzduchu ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)

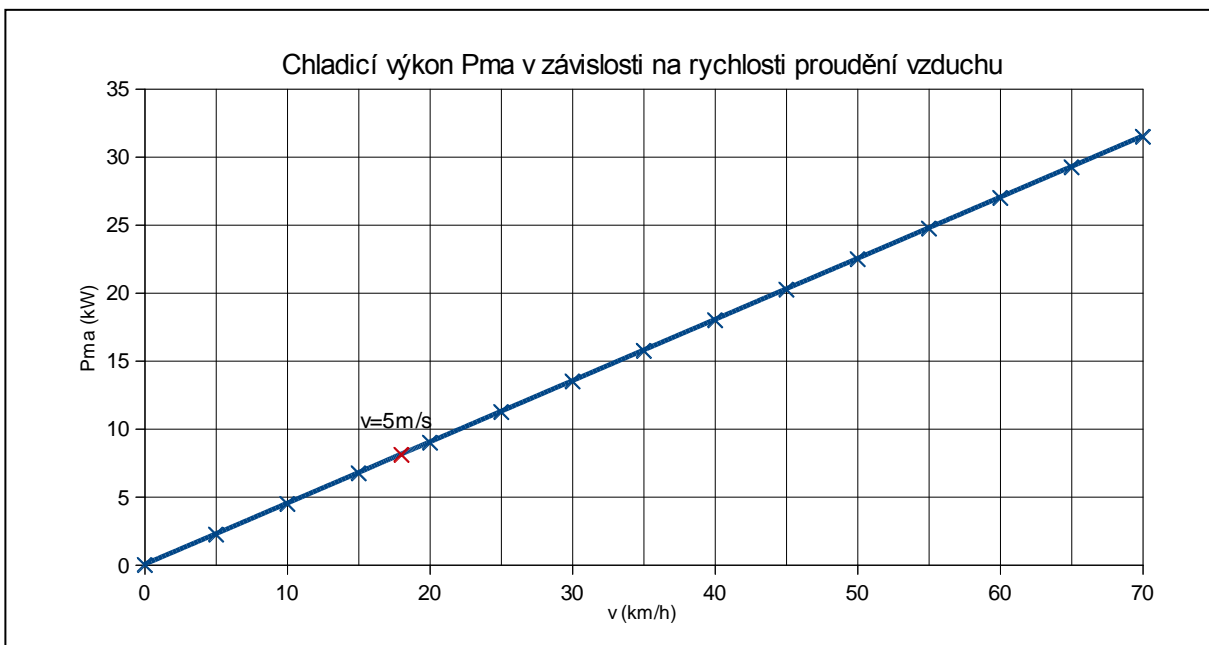
$$\dot{m}_a = \frac{2,7}{5 \cdot 1} = 0,54 \text{ kg/s} \quad (4.10)$$

Opět lze určit pro hodnotu Δt_m nejvyšší možný chladicí výkon P_{ma} , který je tentokrát zajištěn pouze chlazením vzduchem.

$$P_{ma} = \dot{m}_a \cdot c_a \cdot \Delta t_m \quad (\text{kW}) \quad (4.11)$$

$$P_{ma} = 0,54 \cdot 1 \cdot 15 = 8,1 \text{ kW} \quad (4.12)$$

Z předchozích rovnic je patrné, že velikost možného chladicího výkonu P_{ma} je značně závislá na rychlosti proudění vzduchu, přičemž tato rychlost odpovídá právě rychlosti elektrického vozidla. Tato závislost je znázorněna na následujícím Obr. 25.



Obr. 25: Chladicí výkon P_{ma} v závislosti na proudění vzduchu

Nyní lze určit velikost teplosměnné plochy chladiče S_r .

$$S_r = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \cdot v_a} \quad (\text{m}^2) \quad (4.13)$$

kde:

v_a ... je rychlost proudění vzduchu (m/s)

$$S_r = \frac{0,54}{1,127 \cdot 5} = 0,095 \text{ m}^2 \quad (4.14)$$

Výpočtem byla určena velikost teplosměnné plochy chladiče. Jeho konkrétní rozměry pak lze na základě této hodnoty určit, nicméně jsou ovlivněny umístěním chladiče v projektu čtyřkolky. Zde je rovněž ovlivněn i výběr umístění vstupu a výstupu, které bude rovněž vhodné volit s ohledem na mechanickou konstrukci čtyřkolky. Dodavatel, který se výrobou takovýchto chladičů zabývá, je například firma Halla Visteon Climate Control (HVCC).

4.6 Čerpadlo

Čerpadlo by mělo zajišťovat stálý oběh chladicího média. S ohledem na požadavky motoru ohledně chlazení, je třeba aby čerpadlo mělo průtok 6 až 8 l/min. Dále by mělo odolávat přetlaku v chladicí soustavě, jenž by měl být optimálně 0,5bar. Maximální možný tlak je daný maximální hodnotou tlaku motoru, což je 2bar, tedy i čerpadlo by mělo být dimenzováno tak, aby případné zvýšení tlaku v soustavě pro něj nebylo destruktivní. Dále by čerpadlo mělo odolávat zahřátému mediu, které bude čerpat. Jeho maximální teplota je opět dána požadavky motoru, což je 50°C. Napájení čerpadla by mělo být zajištěno z palubního napětí samotné čtyřkolky, tudíž čerpadlo by mělo být napájeno stejnosměrným napětím 12V.

Pro tuto aplikaci byla tedy zvolena vodní pumpa od firmy Bosch, která je napájena napětím 12V DC a její maximální průtok je 15l/min. Další parametry jsou dostupné z [27] a rovněž jsou přiloženy v následující tabulce.

Tabulka 7: Parametry vodní pumpy BOSCH. Hodnoty převzaty z [27]

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	12V
Odběr proudu	1,3A
Výkon pumpy	15l/min
Pracovní tlak	0,17bar
Pracovní teplota	-40°C až 130°C
Výstup	19mm
Rozměry	69x97mm
Hmotnost	250g

Pro připojení napájení k pumpě, rovněž výrobce dodatečně nabízí konektor, jenž této pumpě přísluší a umožňuje tak jednodušší realizaci připojení. Podoba vodní pumpy je znázorněna na Obr. 26.



Obr. 26: Vodní pumpa Bosch. Převzato z [27]

5 Výpočty chladiče měniče a jeho simulace

Kapitola se zabývá tepelnými výpočty pro určení vodního chladiče i chladiče pro chlazení vzduchem. Dále byly provedeny simulace obou chladičů pomocí programu Solidworks s nadstavbou Flow Simulation.

5.1 Základní tepelné výpočty pro volbu vodního chladiče měniče

Následující výpočty se opírají o postup, uvedený v publikaci [18]. Stanovení maximální možné střední hodnoty teploty pouzdra lze provést dle následujícího vzorce.

$$T_{c(AV)M} = T_{jmax} - P_L \cdot \frac{R_{thjc}}{n_s} \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.1)$$

kde:

T_{jmax} ...je maximální teplota čipu - odečteno z katalogu 150 °C

R_{thjc} ...je tepelný odpor cesty: polovodičový čip - pouzdro součástky

- katalog $R_{thjc}=0,16$ °C/W pro tranzistor (1/2 modulu)

- katalog $R_{thjc}=0,21$ °C/W pro diodu (1/2 modulu)

Jelikož v technickém listu od výrobce je uvedena hodnota R_{thjc} zvlášť pro tranzistor a zvlášť pro diodu, je třeba výpočet provést pro oba prvky. Pro tranzistor vychází výpočet následovně.

$$T_{c(AV)M} = 150 - 1197,87 \cdot \frac{0,16}{6} = 118 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.2)$$

Pro diodu je pak výpočet obdobný.

$$T_{c(AV)M} = 150 - 1197,87 \cdot \frac{0,21}{6} = 108,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.3)$$

Je patrné, že pro tranzistor vychází hodnota $T_{c(AV)M} = 118^\circ\text{C}$ a pro diodu vychází hodnota $T_{c(AV)M} = 108,1^\circ\text{C}$. Zde posléze vybereme nižší mezní teplotu, která přísluší diodě. Maximální možný tepelný odpor cesty chladič - vzduch, lze určit porovnáním levé a pravé strany následující nerovnice.

$$R_{thmax\ chlad} = (R_{thcr} + R_{thra})_{max} \leq \frac{T_{c(AV)M} - T_a}{P_L} \quad (^\circ\text{C}/\text{W}) \quad (5.4)$$

kde:

$R_{thmax\ chlad}$...je maximální možný tepelný odpor cesty: chladič - vzduch

R_{thcr} ...je tepelný odpor cesty: pouzdro - chladič,
- hodnota z katalogu $R_{thcr}=0,035^\circ\text{C}/\text{W}$ (pro celý modul)

R_{thra} ...je tepelný odpor cesty: chladič - vzduch
- hodnota z katalogu zvoleného chladiče

T_a ...je teplota chladícího média - zvoleno 40°C

Na základě dostupných hodnot lze číselně určit pravou stranu vzorce.

$$R_{thmax\ chlad} = (R_{thcr} + R_{thra})_{max} \leq \frac{108,01-40}{1197,87} \quad (^\circ\text{C}/\text{W}) \quad (5.5)$$

$$R_{thmax\ chlad} = (R_{thcr} + R_{thra})_{max} \leq 0,056 \quad ^\circ\text{C}/\text{W} \quad (5.6)$$

Kapalinové chlazení s nuceným oběhem se obvykle používá pro ztrátové výkony přibližně nad 1,5kW. Tepelný odpor R_{thra} chladič - vzduch pak představuje ekvivalentní tepelný odpor přechodu ztrátového výkonu z chladiče do kapaliny. Vztahy pro výpočet tohoto odporu jsou následující. [18]

$$R_{thra} = \frac{1}{c_w \gamma Q} \quad (^\circ\text{C}/\text{W}) \quad (5.7)$$

kde:

c_w ...je měrné teplo chladicí kapaliny (voda $c_w = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

γ ...je měrná hmotnost kapaliny ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)

Q ...je průtok objemu kapaliny za 1s ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

$$R_{thra} = \frac{1}{4180 \cdot 9731 \cdot 2,94 \cdot 10^{-6}} = 0,0084 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (5.8)$$

Pro výpočet předchozího vzorce je třeba určit měrnou hmotnost vody γ . Určení této veličiny bylo provedeno na základě hodnot uvedených v [28].

Tabulka 8: Měrná hmotnost vody. Hodnoty převzaty z [28]

Teplota ($^\circ\text{C}$)	Měrná hmotnost (kN/m^3)
0	9,805
4	9,806
10	9,804
15	9,798
20	9,789
25	9,778
30	9,764
40	9,730
50	9,689
60	9,642
70	9,589
80	9,530
90	9,467
100	9,398

Zde tedy byla zvolena měrná hustota vody $\gamma = 9730 \text{ N/m}^3$ která odpovídá teplotě 40°C . Rovněž je třeba určit průtok objemu kapaliny dle následujícího vztahu.

$$Q = \frac{P_L}{c\gamma\Delta T} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (5.9)$$

kde:

ΔT ...je rozdíl teploty na výstupu a vstupu chladiče - zvoleno 10°C

$$Q = \frac{1197,87}{4180 \cdot 9730 \cdot 10} = 2,94 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.10)$$

Po dosazení do výše zmíněné nerovnice lze již zjistit, zda chladič svými parametry vyhovuje, což nastane za předpokladu že nerovnice bude platit.

$$R_{thcr} + R_{thra} \leq R_{thmax \text{ chlad}} \quad (5.11)$$

$$\frac{0,035}{3} + 0,0084 \leq R_{thmax \text{ chlad}} \quad (5.12)$$

$$0,02^\circ\text{C/W} \leq 0,056^\circ\text{C/W} \quad (5.13)$$

Je patrné, že nerovnice je splněna. Nyní lze pro zvolený chladič určit tepelné poměry jednotlivých prvků. Střední hodnota teploty polovodičového čipu pak vychází následovně.

$$T_{j(AV)max} = P_L \cdot (R_{thjc} + R_{thcr} + R_{thra}) + T_a \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.14)$$

$$T_{j(AV)max} = 1197,87 \cdot (0,035 + 0,0116 + 0,0084) + 40 = 105,9^\circ\text{C} \quad (5.15)$$

Střední hodnota teploty pouzdra součástky pak vychází následovně.

$$T_{c(AV)max} = P_L \cdot (R_{thcr} + R_{thra}) + T_a \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.16)$$

$$T_{c(AV)max} = 1197,87 \cdot (0,0116 + 0,0084) + 40 = 64^\circ\text{C} \quad (5.17)$$

A na závěr střední hodnota teploty chladiče pak vychází následovně.

$$T_{r(AV)max} = P_L \cdot (R_{thra}) + T_a \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (5.18)$$

$$T_{r(AV)max} = 1197,87 \cdot (0,0084) + 40 = 50 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.19)$$

5.2 Základní tepelné výpočty pro volbu vzduchového chladiče měniče

Výpočty jsou obdobné jako u vodního chladiče. Zde je však výpočet zjednodušen o úvahy týkající se ryze chlazení vodou. Jako u chlazení vodou je i pro chlazení vzduchem třeba opět určit maximální možný tepelný odpor cesty chladič - vzduch porovnáním pravé a levé strany nerovnice.

$$T_{c(AV)M} = T_{jmax} - P_L \cdot \frac{R_{thjc}}{n_s} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (5.20)$$

kde:

T_{jmax} ...je maximální teplota čipu - odečteno z katalogu 150 °C

R_{thjc} ...je tepelný odpor cesty: polovodičový čip - pouzdro součástky

- katalog $R_{thjc}=0,16 \text{ }^\circ\text{C/W}$ pro tranzistor (1/2 modulu)

- katalog $R_{thjc}=0,21 \text{ }^\circ\text{C/W}$ pro diodu (1/2 modulu)

Opět uvažujeme již dříve vypočtenou maximální možnou střední hodnotu teploty pouzdra pro diodu $T_{c(AV)M}=108,1^\circ\text{C}$. Znovu lze určit pravou stranu nerovnice maximálního možného tepelného odporu cesty chladič - vzduch.

$$R_{thmax\ chlad} = (R_{thcr} + R_{thra})_{max} \leq \frac{T_{c(AV)M} - T_a}{P_L} \text{ (}^\circ\text{C/W)} \quad (5.21)$$

kde:

$R_{thmax\ chlad}$...je maximální možný tepelný odpor cesty: chladič - vzduch

R_{thcr} ...je tepelný odpor cesty: pouzdro - chladič,
- hodnota z katalogu $R_{thcr}=0,035^{\circ}\text{C/W}$ (pro celý modul)

R_{thra} ... je tepelný odpor cesty: chladič - vzduch
- hodnota z katalogu zvoleného chladiče

T_a ... je teplota okolního chladicího média - zvoleno 40°C pro vzduch

$$R_{thmax\ chlad} = (R_{thcr} + R_{thra})_{max} \leq \frac{108,01-40}{1197,87} \quad (^{\circ}\text{C/W}) \quad (5.22)$$

$$R_{thmax\ chlad} = (R_{thcr} + R_{thra})_{max} \leq 0,056 \quad ^{\circ}\text{C/W} \quad (5.23)$$

Zde již lze dosadit i do levé stany nerovnice hodnotu R_{thcr} z technického listu polovodičového modulu.

$$R_{thmax\ chlad} = \left(\frac{0,035}{3} + R_{thra}\right)_{max} \leq \frac{108,01-40}{1197,87} \quad (^{\circ}\text{C/W}) \quad (5.24)$$

$$R_{thmax\ chlad} = \left(\frac{0,035}{3} + R_{thra}\right)_{max} \leq 0,056 \quad ^{\circ}\text{C/W} \quad (5.25)$$

Jednoduchou úpravou lze vyjádřit, jakou maximální hodnotu by měl nabývat tepelný odpor cesty chladič - vzduch R_{thra} .

$$R_{thcr} + R_{thra} \leq R_{thmax\ chlad} \quad (5.26)$$

$$\frac{0,035}{3} + R_{thra} \leq 0,056 \quad (5.27)$$

$$R_{thra} \leq 0,056 - \frac{0,035}{3} \leq 0,044 \quad ^{\circ}\text{C/W} \quad (5.28)$$

Po úpravě dostaneme výsledek maximálního $R_{thra}=0,044^{\circ}\text{C/W}$.

Nyní lze pro zvolený chladič opět totožně určit tepelné poměry jednotlivých prvků. Střední hodnota teploty polovodičového pak vychází následovně.

$$T_{j(AV)max} = P_L \cdot (R_{thjc} + R_{thcr} + R_{thra}) + T_a \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.29)$$

$$T_{j(AV)max} = 1197,87 \cdot (0,035 + 0,0116 + 0,044) + 40 = 148,5^\circ\text{C} \quad (5.30)$$

Střední hodnota teploty pouzdra součástky pak vychází následovně.

$$T_{c(AV)max} = P_L \cdot (R_{thcr} + R_{thra}) + T_a \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.31)$$

$$T_{c(AV)max} = 1197,87 \cdot (0,0116 + 0,044) + 40 = 106,6^\circ\text{C} \quad (5.32)$$

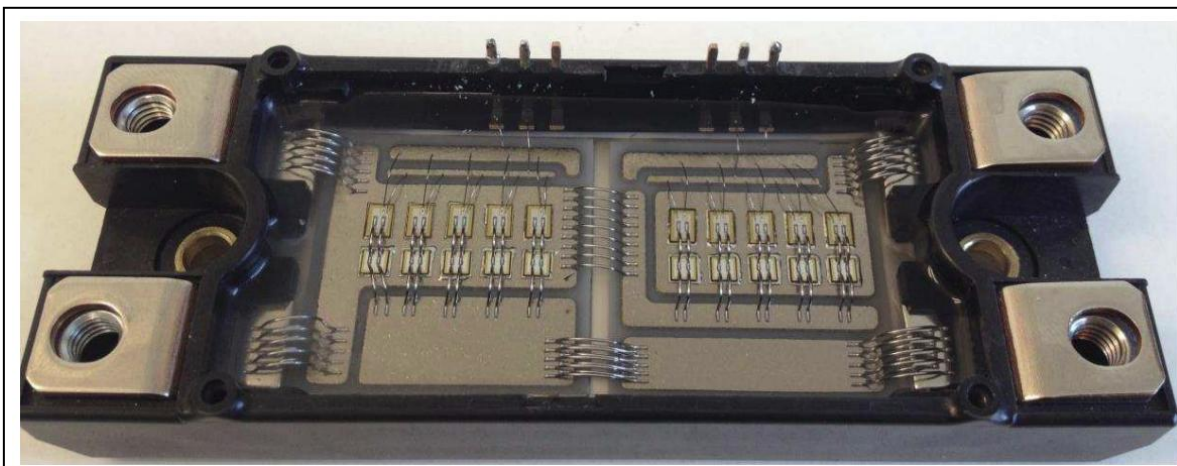
A na závěr střední hodnota teploty chladiče pak vychází následovně.

$$T_{r(AV)max} = P_L \cdot (R_{thra}) + T_a \quad (^\circ\text{C}) \quad (5.33)$$

$$T_{r(AV)max} = 1197,87 \cdot (0,044) + 40 = 92,7^\circ\text{C} \quad (5.34)$$

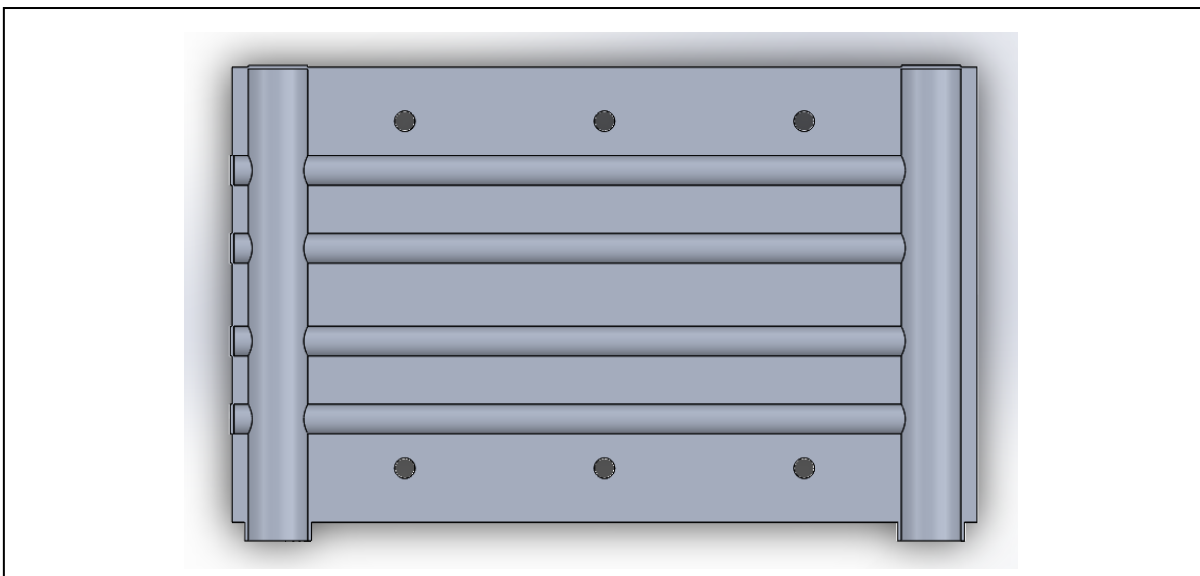
5.3 Specifikace modelu vodního chladiče pro simulaci

Vodní chladič byl navržen v provedení s vrtanými kanály, přičemž jde v praxi o nejjednodušší a nejpoužívanější metodu. Pro optimální odvod tepla do kapalinového okruhu, je vhodné umístit chladičí kanály v hladiči do míst, kde se nachází polovodičové prvky přímo v pouzdře modulu. Interní rozložení polovodičových prvků v modulu BSM120D12P2C005 je znázorněno na následujícím Obr. 27, jenž byl převzat z článku [29].



Obr. 27: Vnitřní uspořádání modulu BSM120D12P2C005. Převzato z [29]

Z obrázku je patrné, že polovodičové prvky jsou umístěny v ose montážních otvorů modulu. Z hlediska dosažení optimálnějšího chlazení, by bylo výhodné vést kanály podélně pod polovodičovými moduly. Od tohoto řešení však bylo upuštěno z důvodu nutnosti vrtání otvorů do chladiče, které samotné moduly na chladiči přidrží. Menší kanály jsou tedy vedeny napříč všemi třemi polovodičovými moduly. Řez navrženým chladičem je znázorněn na následujícím Obr. 28.



Obr. 28: Řez chladičem měniče

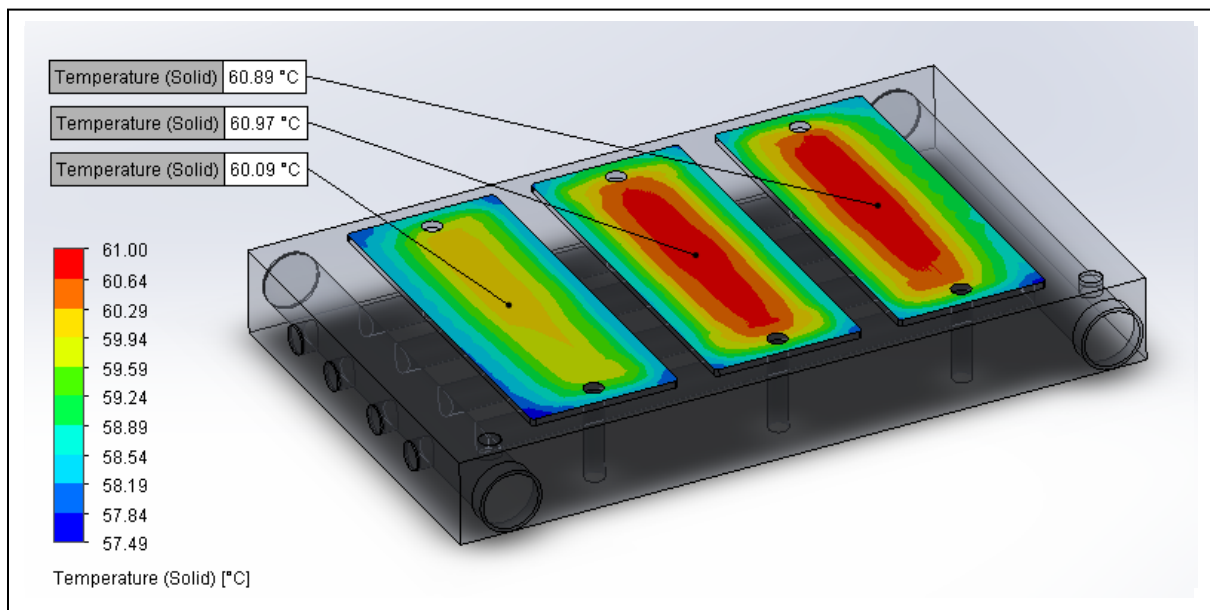
Z obrázku je patrné, že chladič je tvořen dvěma hlavními kanály o průměru 16mm a čtyřmi kanály vedoucími pod polovodičovými moduly, které mají průměr 8mm. Tímto je zajištěno, že menší kanály mají dohromady stejnou hodnotu průřezu, jako je hodnota průřezu hlavního kanálu. Takto je dosaženo rovnoměrného proudění chladicí kapaliny mezi jednotlivými menšími kanály.

Pro potřeby simulace byl tedy zhotoven 3D model chladiče v programu Solidworks a dále vytvořena soustava, jež chladič doplňuje o měděné základy všech tří modulů. Samotná simulace pak byla provedena v nadstavbě Flow Simulation.

5.4 Simulace vodního chladiče měniče

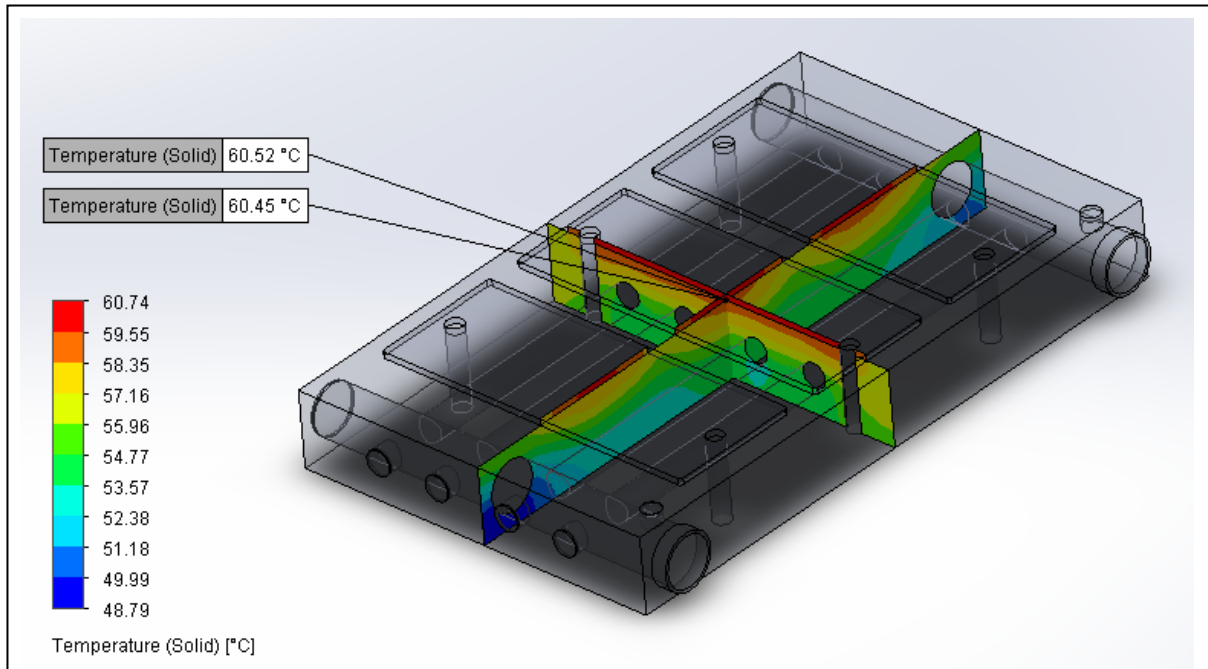
Jako vstupní parametry simulace byla zvolena teplota okolního prostředí na 40°C, vstupní objemový průtok chladicí vody 7l/min při vstupní teplotě 40°. Vyústění chladicího kanálu bylo navoleno do prostředí s atmosférickým tlakem. Na vrchní plochy základů modulů byl nastaven celkový ztrátový výkon měniče 1200W, čili každé jednotlivé základně byl přidělen zdroj ztrátového tepla v hodnotě 400W. Materiál chladiče byl navolen jako Al-6061, pro základny modulů byla použita měď. Mezi těmito prvky byl nastaven přechodový odpor 0,035°C/W, který pro modul udává výrobce při použití teplovodivé pasty s tepelnou vodivostí $\lambda=0,9\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Na následujícím Obr. 29 jsou již znázorněny výsledky simulace. Zde je patrné rozložení tepla na základnách jednotlivých modulů. Je patrné, že v souvislosti s protékáním chladicí kapaliny napříč moduly, je první modul nejchladnější, zatímco prostřední se zahřívá nejvíce, z důvodu jeho umístění uprostřed. Tepelný rozdíl nejchladnějšího a nejteplejšího modulu tak odpovídá zhruba 0,88°C. Sřední hodnota teploty pouzdra $T_{c(AV)}$ nejteplejšího modulu, jímž je v tomto případě modul prostřední, byla dle simulace určena na 59,86°C.



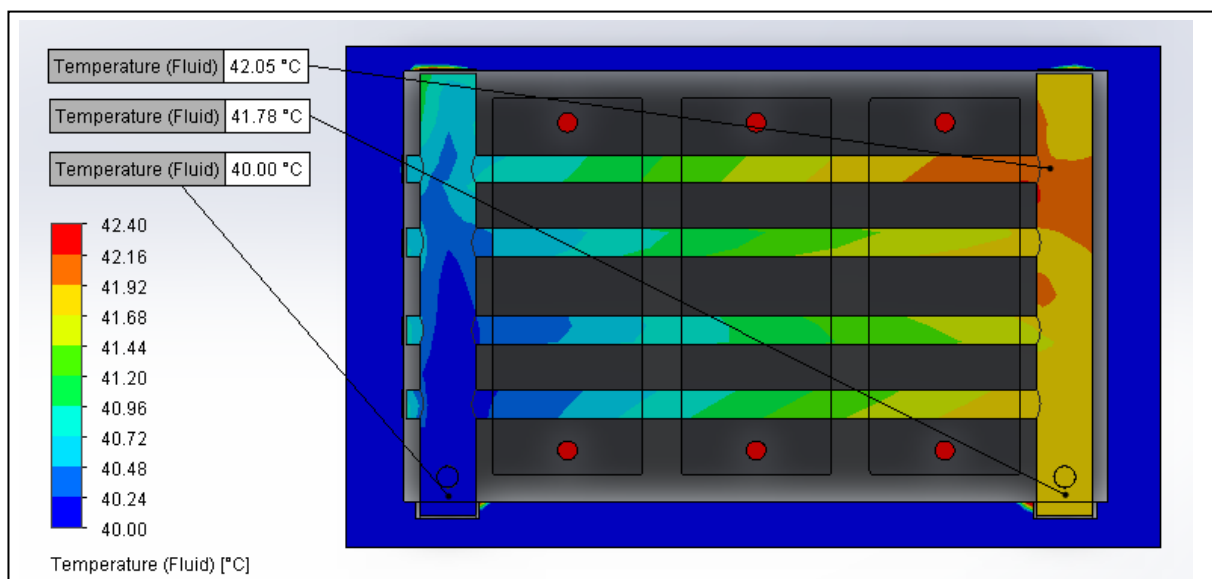
Obr. 29: Rozložení tepla na základnách modulů - vodní chlazení

Na následujícím Obr. 30 je patrný tepelný spád chladiče v podélném a příčném řezu. Je patrné, že mezi základnou nejteplejšího modulu a povrchem chladiče je tepelný rozdíl zanedbatelný, což zhruba odpovídá očekávaným výsledkům, při zanesení příslušného přechodového odporu $0,035^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Střední hodnota teploty chladiče $T_{r(AV)}$ byla dle simulace určena na $54,93^{\circ}\text{C}$.



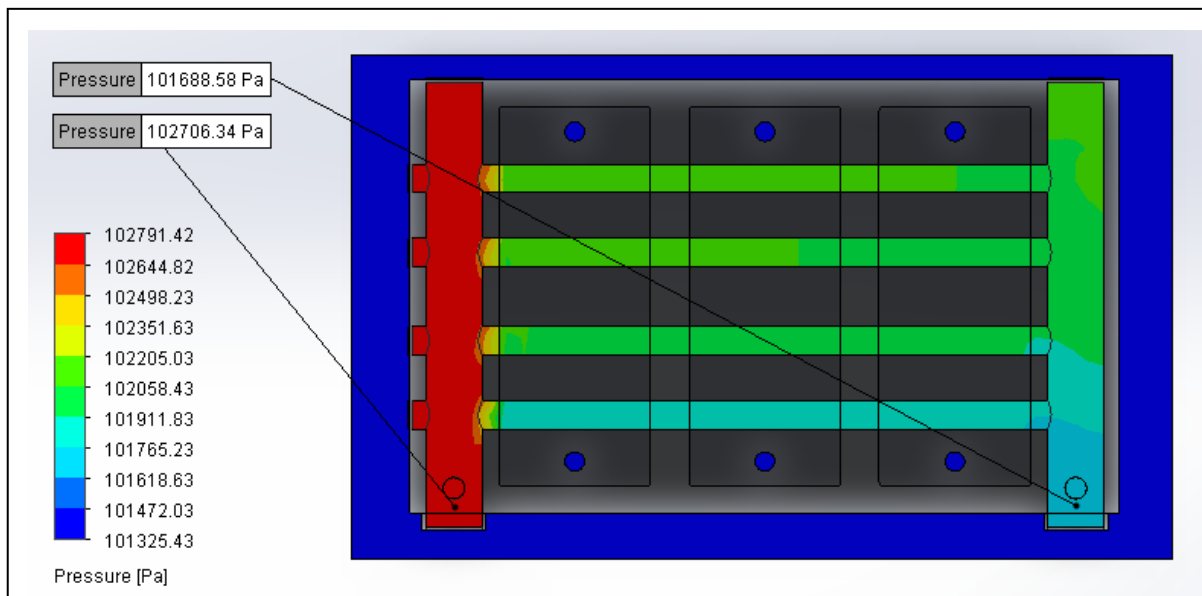
Obr. 30: Tepelný spád chladiče - vodní chlazení

Na následujícím Obr. 31 je znázorněno postupné ohřívání vody při prostupu chladičem. Je patrné, že vstupní teplota vody je 40°C a výstupní teplota je pak $41,78^{\circ}\text{C}$. Rovněž je patrné, že v nejbližším kanálu od vstupu a výstupu se voda zahřívá nejvíce, přičemž teplota vody na výstupu tohoto kanálu je dle simulace $42,05^{\circ}\text{C}$.



Obr. 31: Zahřívání vody při prostupu chladičem - vodní chlazení

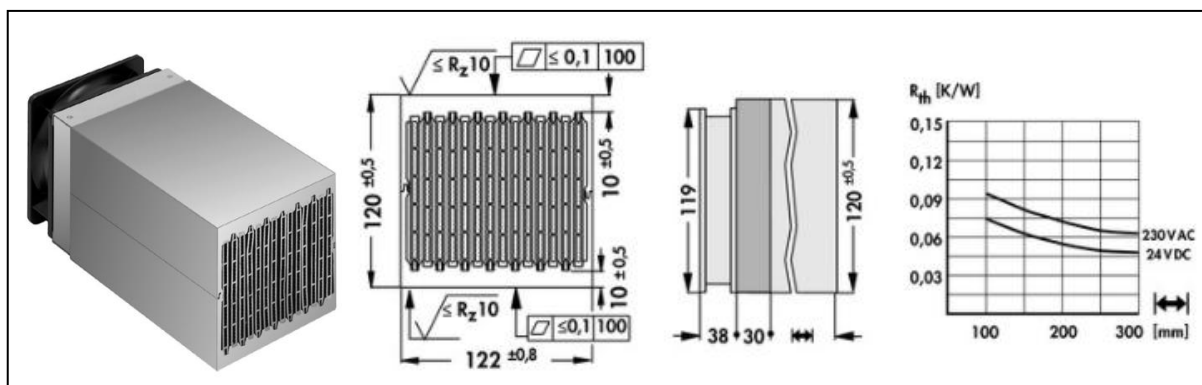
Následující Obr. 32 pak vyjadřuje, k jaké tlakové ztrátě v tomto konkrétním navrženém chladiči dojde. Ztrátu je pak třeba zohlednit v souvislosti s výkonem čerpadla, zda není příliš velká a zda čerpadlo nebude přetíženo přílišným odporem chladicí soustavy. Zde je parné, že na vstupu chladiče je tlak chladicí vody 102,71kPa a na výstupu je tlak 101,67kPa. Z rozdílu těchto hodnot je zřejmé, že tlaková ztráta v chladiči odpovídá přibližně 1kPa, což je velmi dobrá hodnota. Ta je pak pravděpodobně způsobena nízkým průtokem chladicí vody.



Obr. 32: Tlak vody při prostupu chladičem - vodní chlazení

5.5 Specifikace modelu vzduchového chladiče pro simulaci

Pro simulaci byl zvolen chladič typu LA V 17, jenž ve svém portfoliu nabízí firma Fischer Elektronik. [30] Jde o vzduchem hlazený chladič s axiálním ventilátorem. Znázornění chladiče a jeho parametrů je uvedeno v Obr. 33.



Obr. 33: Chladič LA V 17 a jeho parametry. Převzato z [30]

Axiální provedení bylo zvoleno v souvislosti s tím, že předchozí simulace vodního chladiče rovněž zahrnuje chladič, kdy chladicí kapalina protéká pod moduly napříč. Byla zvolena délka tohoto chladiče 200mm. Další konkrétní rozměry a parametry chladiče pak výrobce udává v technických parametrech [30] a jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 9: Parametry chladiče LA V 17. Hodnoty převzaty z [30]

Parametr	Hodnota
Šířka	122mm
Výška	120mm
Délka (volitelná)	100mm/150mm/200mm/250mm/300mm/400mm
Tepelný odpor	0,092-0,042K/W
Povrch	Surový odmaštěný hliník

Jak již bylo zmíněno, k chladiči přísluší konkrétní typ ventilátoru napájený buď 24V DC nebo 230V AC. Technické parametry ventilátoru typu ebmpapst 4184NXH, jenž je napájen 24V DC, rovněž výrobce udává v technických parametrech [30] a opět jsou přiloženy v následující tabulce.

Tabulka 10: Parametry ventilátoru chladiče. Hodnoty převzaty z [30]

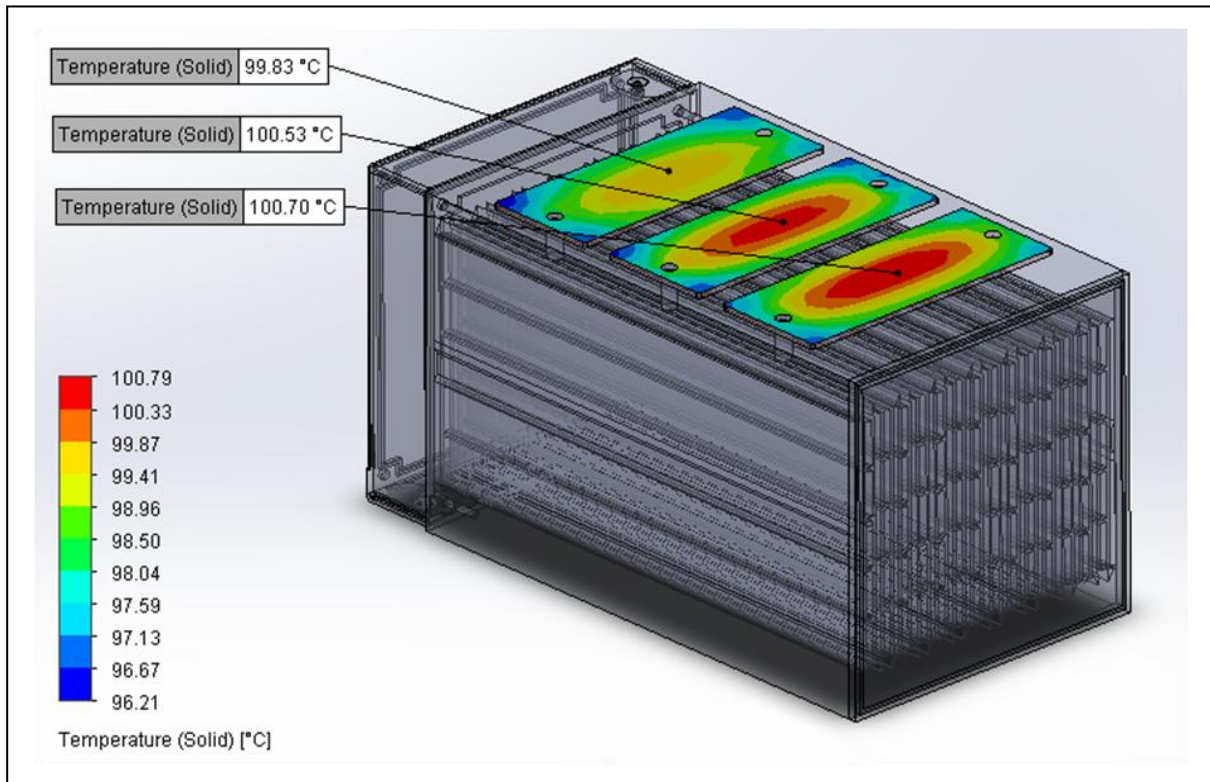
Parametr	Hodnota
Typ	ebmpapst 4184NXH
Rozměry	119x119x38mm
Napětí	24V DC
Příkon	11W
Max. objem vzduchu	237m ³ /h
Teplotní rozsah	-30°C až 70°C
Rychlost otáčení	4400ot/min

5.6 Simulace vzduchového chladiče měniče

Jako vstupní parametry simulace byla zvolena teplota okolního prostředí na 40°C, vstupní objemový průtok vzduchu skrze chladič, byl dle parametrů ventilátoru zvolen 237m³/h při vstupní teplotě 40°. Vyústění chladicích kanálů bylo navoleno do prostředí s atmosférickým tlakem. Na vrchní plochy jednotlivých základů modulů byly stejně jako v případě vodního chladiče nastaveny zdroje ztrátového tepla v hodnotě 400W. Jako materiál chladiče opět byl navolen Al-6061 a pro základny modulů měď. Mezi těmito prvky byl stejným způsobem nastaven přechodový odpor 0,035°C/W.

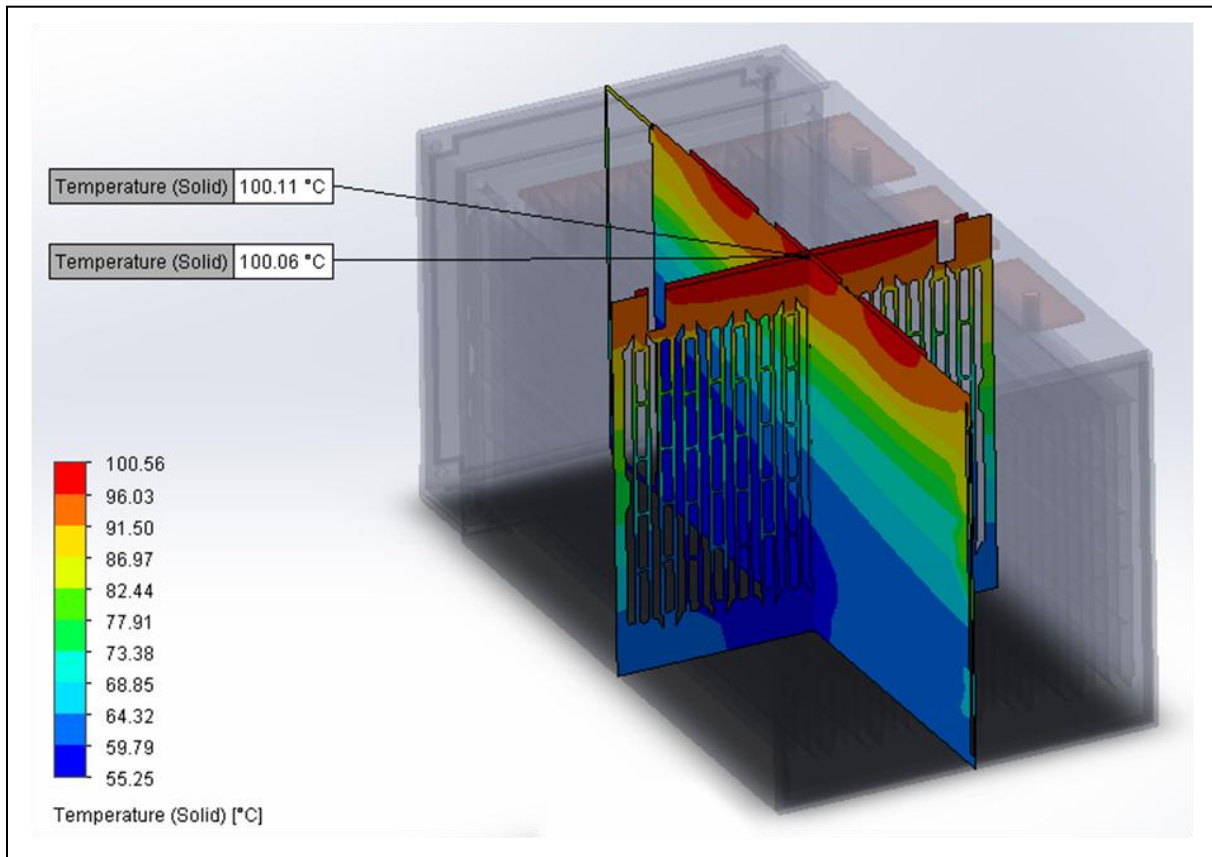
Na Obr. 34 jsou znázorněny výsledky simulace vzduchového chladiče. Zde je patrné

rozložení tepla na základnách jednotlivých modulů. Je patrné, že v souvislosti s axiálním prouděním vzduchu napříč moduly, je první modul nejchladnější, zatímco poslední se zahřívá nejvíce. Tepelný rozdíl nejchladnějšího a nejteplejšího modulu tak odpovídá zhruba $0,83^{\circ}\text{C}$. Střední hodnota teploty pouzdra $T_{c(AV)}$ nejteplejšího modulu byla dle simulace určena na $99,06^{\circ}\text{C}$.



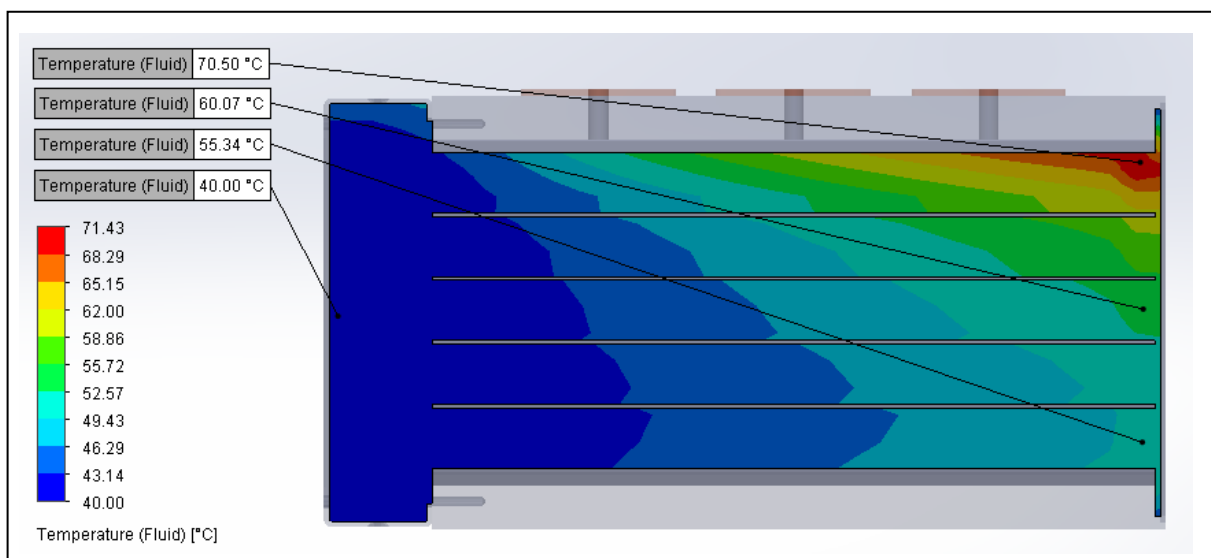
Obr. 34: Rozložení tepla na základnách modulů - vzduchové chlazení

Na následujícím Obr. 35 je patrný tepelný spád chladiče v podélném a příčném řezu, přičemž podélný řez je veden jedním z prostředních žebër chladiče. I v tomto případě bylo provedeno měření tepelného rozdílu mezi základnou prostředního modulu a povrchem chladiče, přičemž jeho hodnota je při příslušném přechodovém odporu $0,035^{\circ}\text{C}/\text{W}$ opět zanedbatelná. Střední hodnota teploty chladiče $T_{r(AV)}$ byla dle simulace určena na $73,05^{\circ}\text{C}$.



Obr. 35: Tepelný spád chladiče - vzduchové chlazení

Na následujícím Obr. 36 je znázorněno postupné ohřívání vzduchu při prostupu chladičem. Je patné, že vstupní teplota vzduchu je 40°C. Výstupní teplota vzduchu na výstupu horního kanálu uprostřed chladiče je pak 70,50°C. Výstupní teplota kanálu v ose chladiče je 60,07°C a výstupní teplota spodního kanálu uprostřed chladiče je 55,34°C.



Obr. 36: Zahřívání vzduchu při prostupu chladičem - vzduchové chlazení

5.7 Zhodnocení simulací

Rozdíly v jednotlivých simulacích a výpočtech jsou ovlivněny komplexností řešených problémů. Zatímco analytický výpočet řeší přímou cestu přechodu tepla čip-pouzdro-chladič, v simulacích již hraje roli i vyzařování tepla jednotlivých prvků do okolního prostředí. Především pak pravděpodobně vyzařování teplých měděných základů do okolního vzduchu. Další vliv na výsledky simulací může mít i zanedbání modelování jednotlivých polovodičových čipů, kdy byl ztrátový výkon zanesen přímo na základny polovodičových modulů. Hodnoty $T_{j(AV)}$ byly dopočteny na základě simulačních výsledků. Všechny výpočty a simulace byly provedeny při hodnotě $T_a = 40^\circ\text{C}$. Výsledné střední hodnoty teplot jednotlivých prvků získaných jednotlivými metodami, jsou uvedeny v následující tabulce, přičemž střední hodnota $T_{r(AV)}$ pro simulace platí pro nejteplejší základnu modulu.

Tabulka 11: Výsledky střední hodnoty teploty prvků

Prvek	Vodní chlazení - výpočet	Vzduchové chlazení - výpočet	Vodní chlazení - simulace	Vzduchové chlazení - simulace
Čip	$T_{j(AV)max} = 105,9^\circ\text{C}$	$T_{j(AV)max} = 148,5^\circ\text{C}$	$T_{j(AV)} = 101,76^\circ\text{C}$	$T_{j(AV)} = 140,96^\circ\text{C}$
Pouzdro	$T_{c(AV)max} = 64^\circ\text{C}$	$T_{c(AV)max} = 106,6^\circ\text{C}$	$T_{c(AV)} = 59,86^\circ\text{C}$	$T_{c(AV)} = 99,06^\circ\text{C}$
Chladič	$T_{r(AV)max} = 50^\circ\text{C}$	$T_{r(AV)max} = 92,7^\circ\text{C}$	$T_{r(AV)} = 54,93^\circ\text{C}$	$T_{r(AV)} = 73,05^\circ\text{C}$

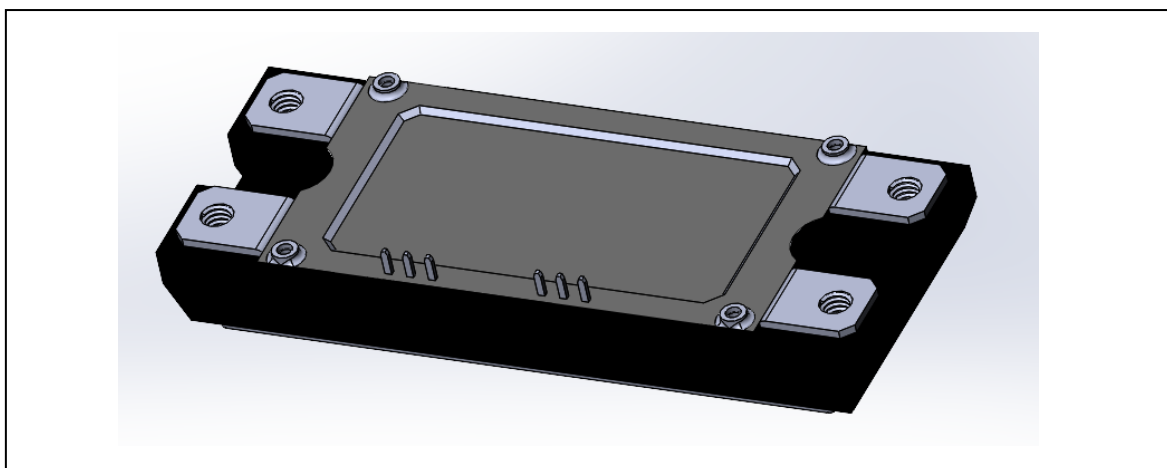
Je patrné, že výsledky simulací vycházejí pro téměř všechny prvky lépe, než výsledky získané výpočty. Výjimkou je zde střední hodnota vodního chladiče, ta je o $4,93^\circ\text{C}$ vyšší oproti vypočtené hodnotě. Nevětší rozdíl výsledných hodnot je zaznamenán u střední teploty vzduchového chladiče, kdy je střední hodnota jeho teploty u simulace nižší o $19,65^\circ\text{C}$. To je pak pravděpodobně způsobeno jeho velikostí, kdy vzdálené části chladiče od modulů, mají nízkou hodnotu oteplení. To pak pravděpodobně vede na nízkou střední hodnotu teploty vzduchového chladiče. Je však třeba podotknout, že analytické výpočty zohledňují maximální možnou hodnotu, získanou volbou mezních parametrů při určování oteplení prvků. Simulace pak pracuje již s konkrétní aplikací chladiče, jehož parametry jsou jistě lepší, než je uvažováno ve výpočtu. Dle zkušeností z praxe pak při reálné konstrukci měniče často vycházejí hodnoty oteplení jednotlivých prvků lépe, než je tomu v simulacích.

6 Návrh 3D modelu konstrukce měniče

Konečný model měniče by vytvořen v programu Solidworks. Pro jeho realizaci musely být vytvořeny některé modely výše zmíněných prvků měniče, případně dohledány konkrétní modely od výrobců. Sestava je pak doplněna o další prvky, jež jsou popsány v této kapitole.

6.1 3D model polovodičového modulu

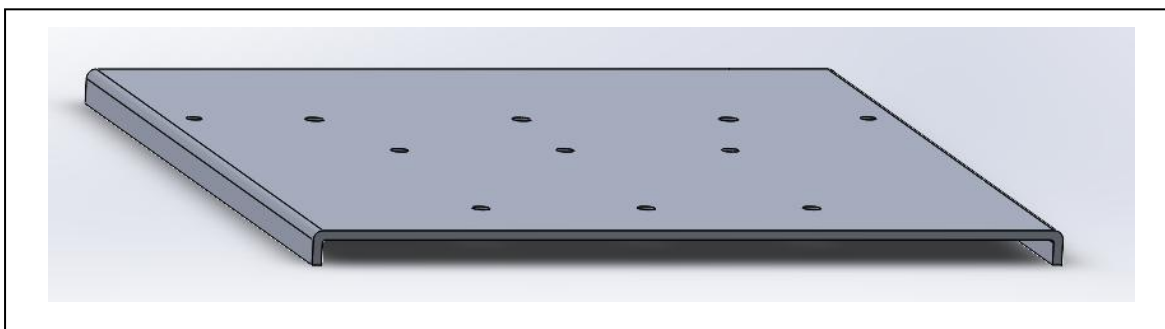
Pro potřeby návrhu 3D modelu byl dohledán pro program Solidworks model modulu BSM080D12P2C008 [31], jenž sdílí s modulem BSM120D12P2C005 stejný typ pouzdra, čili pouzdro (modul) typu C. 3D model pouzdra je znázorněn na následujícím Obr. 37.



Obr. 37: 3D model modulu BSM120D12P2C005

6.2 3D model základny měniče

Základna měniče je uvažována v provedení ohýbané hliníkové desky o tloušťce 3mm. V jejím těle je pak uvažováno vrtání otvorů, pro připevnění chladiče, kondenzátorové baterie a podpurných sloupků. Její provedení je patrné z následujícího Obr. 38.



Obr. 38: 3D model základny měniče

6.3 3D model kondenzátorové baterie

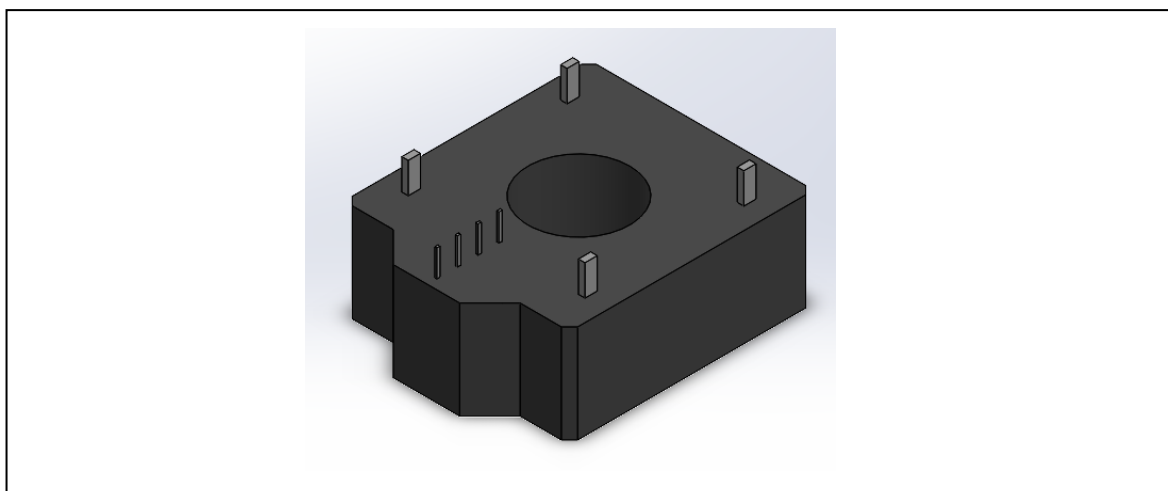
Dále byl na základě rozměrů z technického listu od výrobce zhotoven 3D model již výše zmiňované kondenzátorové baterie. 3D model pouzdra je znázorněn na následujícím Obr. 39.



Obr. 39: 3D Model kondenzátorové baterie

6.4 3D model proudového čidla

Rovněž byl vytvořen model proudového čidla HC5FW 500-S/SP1, které je osazeno na výstupních svorkách střídače. Na základě základních rozměrů dostupných z technického listu od výrobce byl zhotoven přibližný 3D model. Výsledný 3D model čidla je znázorněn na následujícím Obr. 40.

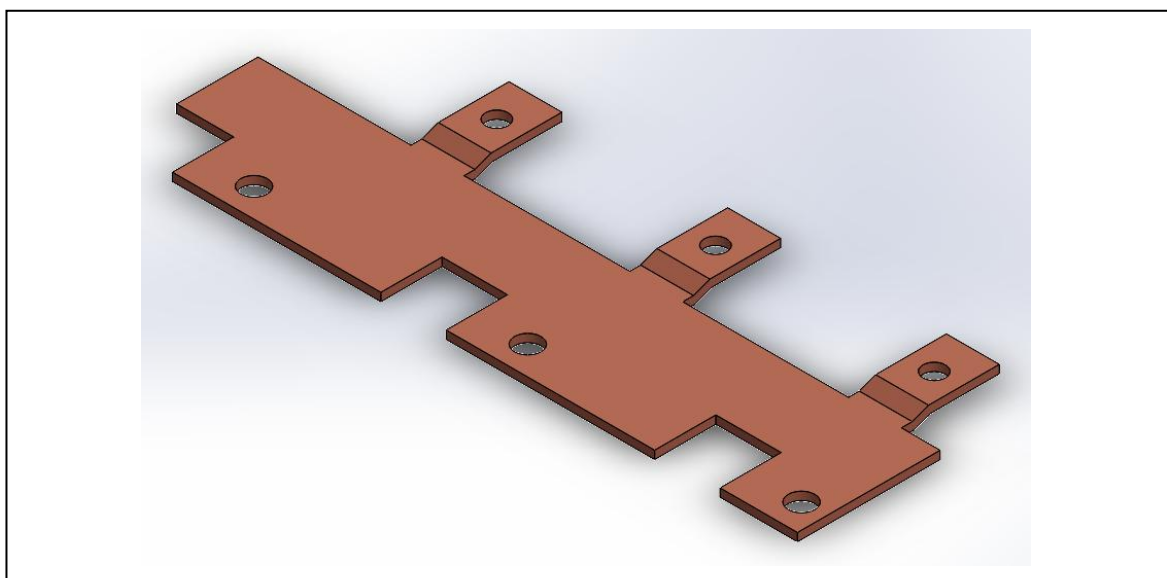


Obr. 40: 3D model čidla HC5FW 500-S/SP1

Montáž čidel je předpokládána na výstupní svorky střídače, kde budou fixovány v plošném spoji, návrh tohoto plošného spoje a jeho uchycení již není předmětem této práce.

6.5 3D model měděného profilu stejnosměrného meziobvodu

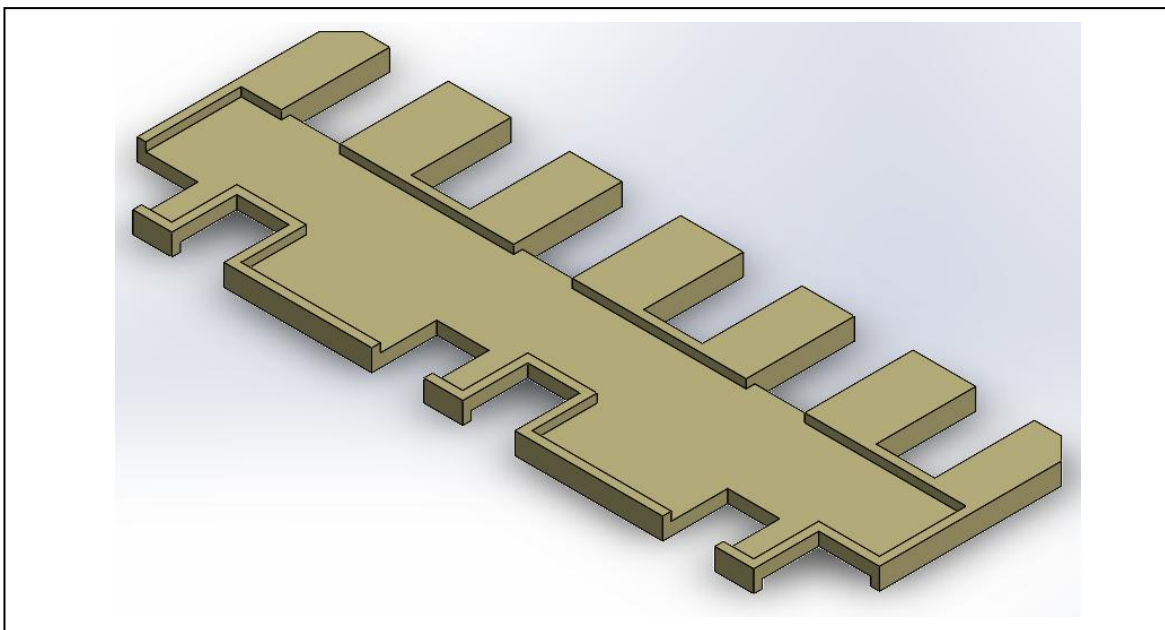
Jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, stejnosměrný meziobvod byl dle výše zmíněných důvodů zvolen v takzvaném sendvičovém provedení. Obvod je tvořen dvěma totožnými měděnými profily vyřezávaných pomocí laseru. Profily jsou zhotoveny z měděného plechu o tloušťce 2mm. Na straně kondenzátorové baterie je profil řešen tak, že jsou jednotlivé měděné profily připevněny z obou stran svorek baterie. Čili kladný pól je připevněn na svorky shora, zatímco záporný pól je připevněn na svorky zdola. Tím mohlo být docíleno maximální překrytí profilů kladného a záporného pólu, což je příznivé pro vlastnosti sendvičového stejnosměrného meziobvodu. Na straně modulů je profil tvořen jednotlivými přípojnými svorkami, jež jsou ohnuty tak, aby byly v rovině s kontakty polovodičových modulů. Kvůli tomu, že jsou právě tyto svorky v jedné rovině, není konstrukčně snadné zde dosáhnout překrytí jednotlivých profilů. Možností jak tohoto docílit, by bylo použití podložek, jež by se naletovaly buďto na kladné, nebo záporné svorky modulů a tím by bylo možné realizovat překrytí i na této straně. Z hlediska náročnosti tohoto provedení však byla zvolena první popisovaná varianta s ohýbanými profily. Znázornění profilu je uvedeno na následujícím Obr. 41.



Obr. 41: 3D model měděného profilu stejnosměrného meziobvodu

6.6 3D model izolační destičky stejnosměrného meziobvodu

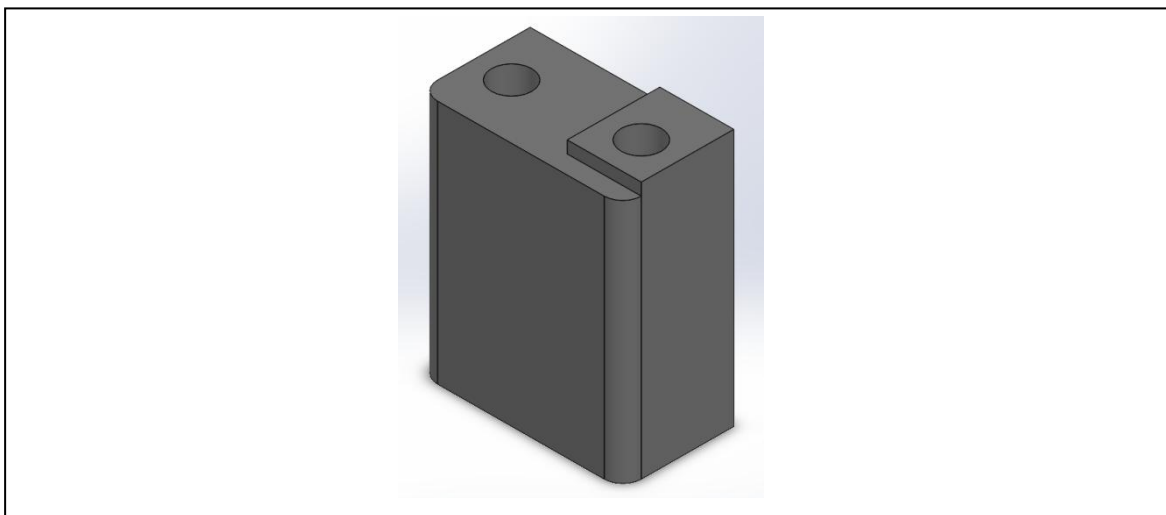
Mezi jednotlivými profily je poté vložena izolace ze sklotextitového materiálu FR-5. Jde o oboustranně frézovanou destičku, do které jsou zasazeny měděné profily stejnosměrného meziobvodu. Destička je opět oboustranně symetrická. Na straně polovodičových modulů je izolace vytažena i mezi svorkami pro zvýšení elektrické i mechanické pevnosti meziobvodu. Výsledná podoba izolační destičky je patrná z následujícího Obr. 42.



Obr. 42: 3D model izolační destičky stejnosměrného meziobvodu

6.7 3D model podpěrných sloupků stejnosměrného meziobvodu

Kompletní sendvičové provedení stejnosměrného meziobvodu, je na straně kondenzátoru fixováno za pomoci tří podpěrných sloupků, zhotovených z izolačního sklotextitového materiálu. Všechny tři sloupky jsou navzájem totožné, tedy zaměnitelné a jejich provedení je patrné z následujícího Obr. 43.

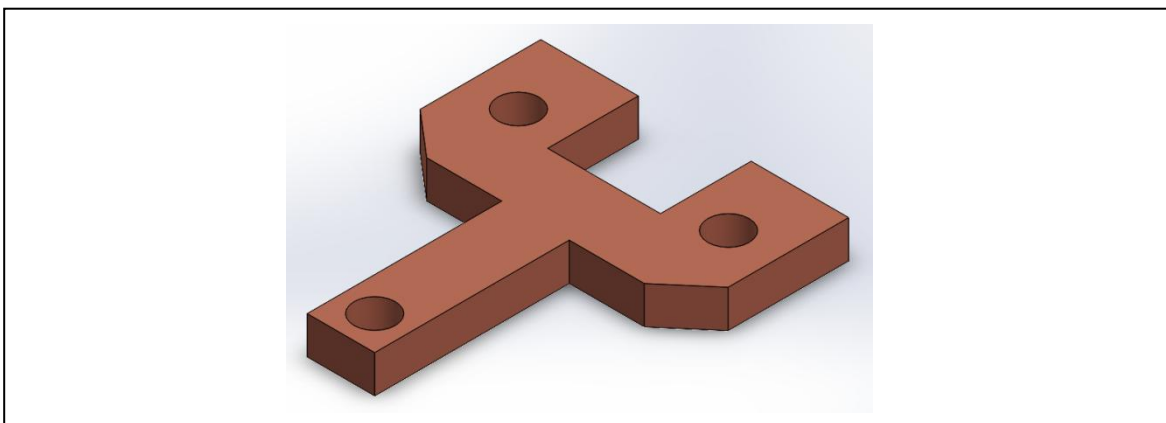


Obr. 43: 3D model podpěrného sloupku stejnosměrného meziobvodu

Je patrné, že sloupek je shora vrtán dvěma otvory pro závit M6 pro montáž šroubů připevňujících stejnosměrný meziobvod ke kondenzátorové baterii. Dále je uvažován otvor z opačné strany sloupku rovněž pro závit M6 pro uchycení do základny celého měniče

6.8 3D model výstupních svorek měniče

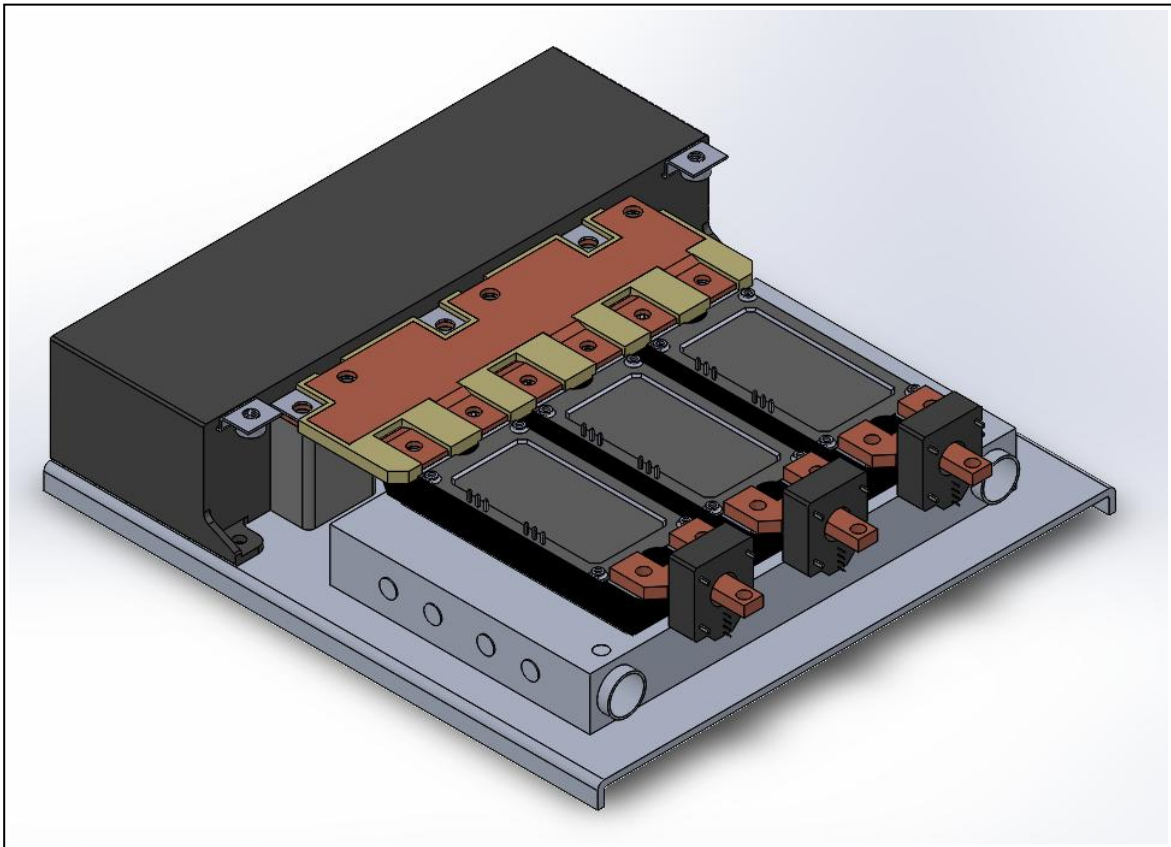
Výstupní svorky jsou opět zhotoveny z měděných profilů vyřezaných pomocí laseru. Výsledný tvar a tloušťka těchto svorek jsou pak ovlivněny použitými proudovými čidly, které jsou pro měnič zvoleny. Výstupní svorky jsou tedy tvarem uzpůsobeny tak, aby na ně proudové čidlo, jehož průměr otvoru pro provlečení vodiče je 12,5mm, bylo možné navléci. Měnič tedy disponuje třemi těmito svorkami a jejich podoba je patrná z následujícího Obr. 44.



Obr. 44: 3D model výstupní svorky měniče

6.9 3D model měniče

Výsledná podoba modelu měniče byla rovněž zhotovena v programu Solidworks. Finální uspořádání a použití konkrétních prvků vychází z podkladů uvedených v předchozích kapitolách. Měnič byl vytvořen pro variantu vodního chlazení, přičemž byl v modelu použit model chladičem jenž byl simulován v předchozí kapitole. 3D model měniče je znázorněn na následujícím Obr. 45.



Obr. 45: 3D model měniče chlazeného vodou

3D model poskytuje dobrou představu o uspořádání prvků měniče. Je patrná základní deska měniče, na níž je umístěn vodní chladič a kondenzátorová baterie. Na chladiči jsou poté umístěny polovodičové moduly, které jsou průchozími otvory v chladiči přichyceny pomocí šroubů k základně měniče. Je dobře patné i provedení stejnosměrného meziobvodu, jenž spojuje kondenzátorovou baterii a polovodičové moduly. Stejnosměrný meziobvod je pak fixován třemi podpěrnými sloupky, které byly zmíněny v jedné z předchozích kapitol. Sloupky jsou zespodu do základny přichyceny pomocí individuálních šroubů. Shora jsou na sloupky přišroubovány profily záporného a kladného pólu stejnosměrného meziobvodu. Rovněž je patrná izolační destička, která je mezi měděné

profily vložena. Na závěr jsou patrné výstupní svorky střídače i s naznačením umístění výstupních proudových čidel.

Závěr

Cílem této práce bylo provést návrh a simulace chlazení 3f střídače, jenž by měl být využit v studentském projektu k pohonu elektrické čtyřkolky. Pro návrh střídače byla provedena volba jeho dílčích komponent.

V souvislosti s bateriovým napájením měniče je stejnosměrný meziobvod tvořen kondenzátorovou baterií a další funkční prvky v meziobvodu použity nebyly. Nabíjecí odpor, který by dle úvah bylo vhodné v zapojení použít, bude součástí trakční akumulátorové baterie, přičemž její řízení pak bude spínání odporu ovládat. Také byly zhodnoceny negativní účinky měniče na motor. Zde rovněž další filtrační obvody uvažovány nebyly v souvislosti s krátkým přívodním kabelem od měniče k motoru.

Dále byly porovnány polovodičové prvky IGBT a SiC. Byl krátce popsán jejich historický vývoj a popsány typické struktury. Materiály jednotlivých prvků pak byly vzájemně porovnány, kdy bylo přidáno i srovnání s polovodičovými prvky na bázi GaN. Dle výsledků srovnání mají nové materiály lepší vlastnosti při spínání vysokých hodnot napětí. Dále bylo zjištěno, že prvky na bázi GaN mají dobré předpoklady pro spínání vysokých frekvencí, naopak prvky SiC v této aplikaci zaostávají a to i za prvky na bázi Si. Prvky SiC jsou však díky své vysoké teplené vodivosti vhodnější pro spínání vysokých výkonů. Prvky na bázi GaN mají z hlediska spínání vysokých výkonů horší vlastnosti, kterými mírně zaostávají i za prvky na bázi Si.

Na základě získaných informací byly určeny konkrétní typy prvků třífázového střídače. Byly zvoleny polovodičové Full SiC spínací prvky typu BSM120D12P2C005 a kondenzátorová baterie o kapacitě $500\mu\text{F}$ typu FHC26J0507K--. Dimenzování stejnosměrného meziobvodu bylo provedeno v souvislosti s vhodnými mechanickými vlastnostmi a s ohledem na snížení parazitních indukčností. Na základě výchozích hodnot pak bylo provedeno určení velikosti ztrát střídače, které by dle výpočtu měly dosahovat hodnoty téměř 1200W.

Dle požadavků na chlazení byla popsána soustava vodního chlazení, byly uvedeny dílčí prvky této soustavy a popsány jejich vlastnosti a požadavky související s provedením tohoto druhu chlazení. Byla určena vodní pumpa s napájecím napětím 12V DC a maximálním průtokem 15l/min. Dále byla určena velikost teplosměnné plochy výměníku $0,095\text{m}^2$. Rovněž bylo pojednáno o vlastnostech vzduchového a kapalinového chladiče pro měnič. Zde pro kapalinové chlazení vychází lepší chladicí účinek při menší velikosti

chladiče, avšak na úkor složitosti návrhu soustavy, kde vyniká vzduchové chlazení svou jednoduchostí a nízkými náklady.

Pro vodní i vzduchovou variantu chlazení pak byly provedeny základní tepelné výpočty pro volbu chladiče. Při výpočtech pro volbu vodního chladiče, bylo pracováno s konkrétními hodnotami průtoku a teploty chladicí kapaliny, které byly předurčeny požadavky motoru EMRAX 188. V porovnání s výpočty pro vzduchový chladič je pak patrné, že střední hodnoty teplot jednotlivých prvků vycházejí příznivěji pro chlazení vodou. Dále byly provedeny simulace vodního i vzduchového chlazení v programu Solidworks, kde opět vycházely příznivější výsledky pro vodní chlazení. Při porovnání výsledků získaných výpočty s výsledky získanými pomocí simulací je patrné, že výsledky ze simulací dosahují nižších středních hodnot teploty jednotlivých prvků. Nevětší rozdíl v získaných hodnotách vyplynul u vzduchového chladiče, kdy se střední hodnoty chladiče liší o 19,65°C.

V závěru práce je pak předložen návrh 3D modelu měniče, jenž dává dobrou vizuální představu o jeho podobě. Na základě tohoto modelu je pak v přílohách práce přiložena technická dokumentace jednotlivých prvků měniče.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Moderní výkonové polovodičové prvky a jejich aplikační možnosti - Časopis Elektro - Odborné časopisy* [online]. [vid. 2021-04-13]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/moderni-vykonove-polovodicove-prvky-a-jejich-aplikacni-moznosti--14473>
- [2] S. DONG ET AL. Threshold Voltage Improvement Scheme for High-voltage IGBT [online]. 2010 [vid. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9094813>
- [3] IWAMURO, Noriyuki a Thomas LASKA. IGBT History, State-of-the-Art, and Future Prospects [online]. 2017. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7851003>
- [4] ROZANOV, Yuriy, Sergey RYVKIN, Pavel VORONIN a Evgeny CHAPLYGIN. *Power Electronics Basics*. 2015. ISBN 9781482298802.
- [5] *Bipolární tranzistor s izolovanou branou (IGBT) - Elektronika 2021* [online]. [vid. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://cs.answersexpress.com/insulated-gate-bipolar-transistor-35266>
- [6] *Gallium Nitride (GaN) versus Silicon Carbide (SiC) In The High Frequency (RF) and Power Switching Applications* [online]. [vid. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.richardsonrfpd.com/docs/rfpd/Microsemi-A-Comparison-of-Gallium-Nitride-Versus-Silicon-Carbide.pdf>
- [7] *Switchcraft - Si vs SiC devices* [online]. [vid. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.switchcraft.org/learning/2016/12/9/si-vs-sic-devices>
- [8] MITSUBISHI ELECTRIC. *Silicon Carbide (SiC) UPS Technology* [online]. [vid. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.mitsubishicritical.com/technologies/sic-technology/>
- [9] KINGATUA, Amos. *Silicon Carbide's Potential to Improve Power Density and Efficiency* [online]. [vid. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://medium.com/supplyframe-hardware/silicon-carbide-sic-potential-to-improve-power-density-and-efficiency-c56a759fc0f1>
- [10] KÚS, Václav. *Nízkofrekvenční rušení*. B.m.: Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, 2003. ISBN 80-7082-976-1.
- [11] *BSM120D12P2C005 ROHM Semiconductor | Mouser Česká Republika* [online]. [vid. 2020-08-22]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/ROHM-Semiconductor/BSM120D12P2C005?qs=IDm2WsMLa1Xnup96%2FOQwnA%3D%3D>
- [12] CO, Rohm. *BSM250D17P2E004 : SiC Power Module* [online]. 2018 [vid. 2020-08-22]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/348/bsm120d12p2c005-e-1872019.pdf>
- [13] ZAVŘEL, Martin. *Napětový střídač s SiC moduly* [online]. B.m., 2016. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Dostupné z: <https://theses.cz/id/g867d6/>
- [14] AVX. *Hybrid Vehicles and Electric Vehicles Capacitors - datasheet* [online]. [vid. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.avx.com/docs/techinfo/ApplicationGuides/AVX-HEV-Capacitor-Guide.pdf>
- [15] LEM. *Automotive current transducer open loop technology HC5FW 500-S/SP1* [online]. nedatováno [vid. 2021-05-04]. Dostupné z: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/hc5fw500-s_sp1.pdf

- [16] PLZÁK, Michal. *Digitální průmyslový analyzátor sítě DMG 800* [online]. B.m., 2019 [vid. 2021-05-09]. b.n. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/39440/1/BP_Michal_Plzak.pdf
- [17] GRAOVAC, Dušan, Marco PÜRSCHHEL a Andreas KIEP. MOSFET Power Losses Calculation Using the Data- Sheet Parameters. *Infineon Technologies AG* [online]. 2006, (July), 1–23. Dostupné z: <http://application-notes.digchip.com/070/70-41484.pdf>
- [18] VONDRÁŠEK, František, Jan LANGHAMMER, Aleš PEROUTKA, Jan MĚSÍČEK a Molnár JAN. *Projektování výkonových polovodičových měničů - Vybrané stati*. B.m.: Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, 2008. ISBN 978-80-7043-653-0.
- [19] QIAN, C., A. M. GHEITAGHY, J. FAN, H. TANG, B SUN, H YE a G ZHANG. *Thermal Management on IGBT Power Electronic Devices and Modules*. 2018.
- [20] ŠPRLÁK, Roman, Daniel KALVAR, Josef OPLUŠTIL a Petr CHLEBIŠ. Design of Experimental Liquid Heat sink for High Power Electronic [online]. 2014 [vid. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6835900>
- [21] *Vlastnosti syté vodní páry při daném tlaku - TZB-info* [online]. [vid. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/9-vlastnosti-syte-vodni-pary-pri-danem-tlaku>
- [22] *EMRAX 188 Technical Data Table* [online]. [vid. 2021-03-04]. Dostupné z: https://emrax.com/wp-content/uploads/2020/03/emrax_188_technical_data_table_graphs_5.4.pdf
- [23] *Manual for EMRAX Motors / Generators* [online]. nedatováno [vid. 2020-11-16]. Dostupné z: https://emrax.com/wp-content/uploads/2020/03/manual_for_emrax_motors_version_5.4.pdf
- [24] *KTY81-210 Datasheet(PDF) - NXP Semiconductors* [online]. [vid. 2021-03-04]. Dostupné z: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/17846/PHILIPS/KTY81-210.html>
- [25] *Závislost hustoty destilované vody na teplotě* [online]. [vid. 2021-02-22]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-vody.htm>
- [26] MALOVANÝ, Daniel. *Návrh vodního chladiče pro formulový motor* [online]. B.m., 2011 [vid. 2021-05-04]. b.n. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30291786.pdf>
- [27] *Vodní pumpa Bosch 12V, 15l/min* [online]. [vid. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.escape6.cz/vodni-pumpa-bosch-12v-15l-min-id146964/>
- [28] *Water - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient* [online]. [vid. 2020-08-22]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html
- [29] TIWARI, S, O MIDTGÅRD a T. M. UNDELAND. Experimental Performance Evaluation of Two Commercially Available, 1.2 kV Half-Bridge SiC MOSFET Modules [online]. 2016 [vid. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7793535>
- [30] *Cooling aggregates with axial fan* [online]. [vid. 2021-05-04]. Dostupné z: [https://www.fischerelektronik.de/web_fischer/en_GB/heatsinks/D04/Cooling_aggregates_with_axial_fan/\\$catalogue/fischerData/PR/LA_V17_/index.xhtml](https://www.fischerelektronik.de/web_fischer/en_GB/heatsinks/D04/Cooling_aggregates_with_axial_fan/$catalogue/fischerData/PR/LA_V17_/index.xhtml)
- [31] *3D ContentCentral - Free 3D CAD Models, 2D Drawings, and Supplier Catalogs* [online]. [vid. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://www.3dcontentcentral.com/Download-Model.aspx?catalogid=171&id=1239138>

Seznam obrázků

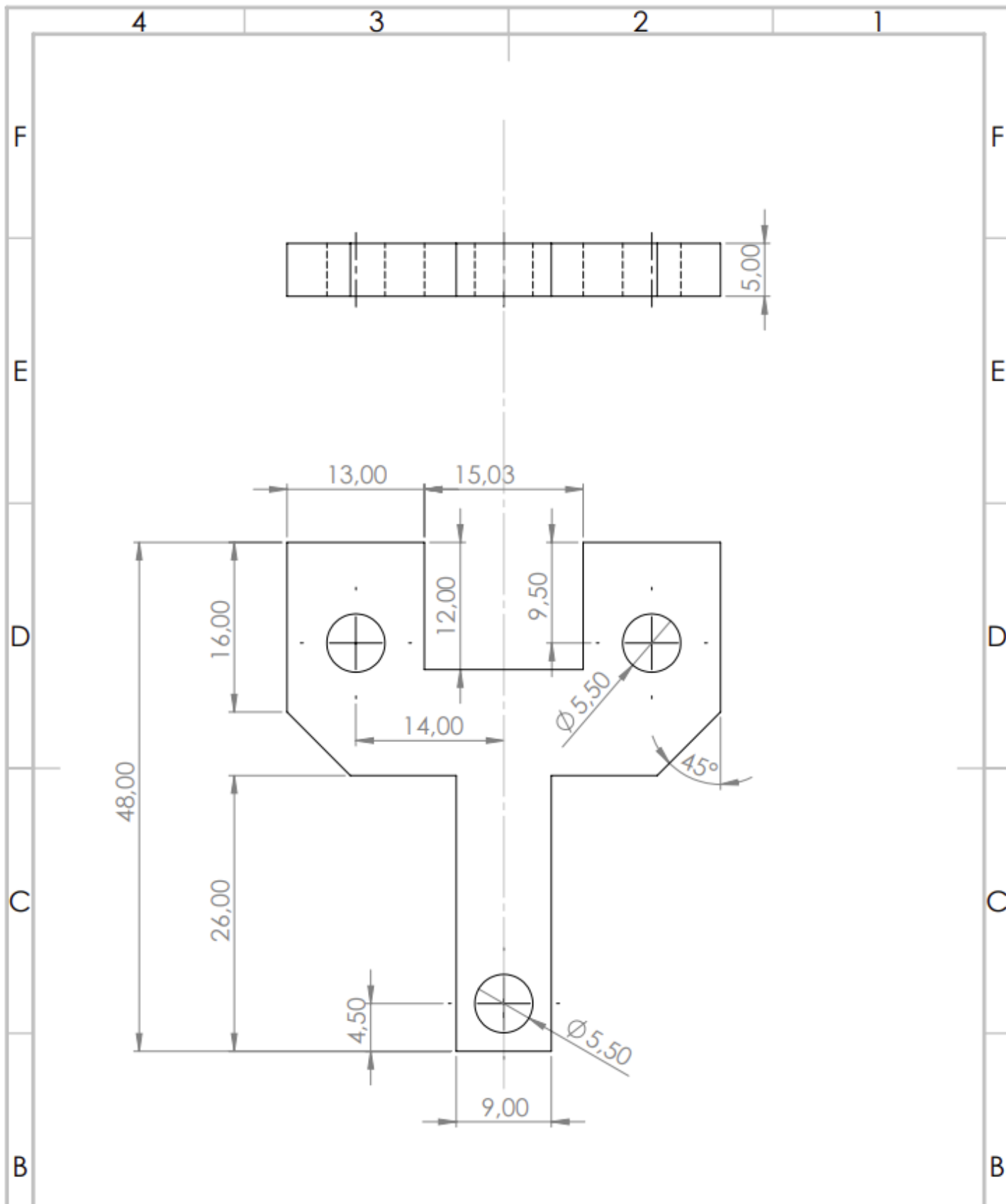
OBR. 1: DIAGRAM SPÍNACÍCH KOMBINACÍ STŘÍDAČE.....	15
OBR. 2: SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE.....	16
OBR. 3: ZAPOJENÍ MEZIOBVODU S BRZDNÝM ODPOREM.....	16
OBR. 4: ZAPOJENÍ MEZIOBVODU S VYHLAZOVACÍ INDUKČNOSTÍ A ROZBĚHOVÝM ODPOREM.....	18
OBR. 5: PARAZITNÍ INDUKČNOSTI MEZIOBVODU.....	19
OBR. 6: KONSTRUKČNÍ ZNÁZORNĚNÍ SENDVIČOVÉHO USPOŘÁDÁNÍ.....	20
OBR. 7: ŘEZ ZÁKLADNÍ STRUKTUROU IGBT. PŘEVZATO Z [3].....	22
OBR. 8: STRUKTURA NONLATCH-UP. PŘEVZATO Z [3].....	22
OBR. 9: STRUKTURY PT IGBT A NPT IGBT. PŘEVZATO Z [3].....	23
OBR. 10: POROVNÁNÍ STRUKTUR SI A SiC. PŘEVZATO Z [8].....	25
OBR. 11: FINÁLNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ STŘÍDAČE S MEZIOBVODEM.....	28
OBR. 12: MODUL BSM120D12P2C005. PŘEVZATO Z [11].....	30
OBR. 13: KONDENZÁTOROVÁ BATERIE FHC26J0507K--. PŘEVZATO Z [14].....	32
OBR. 14: PROUDOVÉ ČIDLO HC5FW 500-S/SP1. PŘEVZATO Z [15].....	32
OBR. 15: ZÁVISLOST $R_{DS(on)}$ NA TEPLITĚ T_J . PŘEVZATO Z [12].....	35
OBR. 16: ZTRÁTY P_{CM} NA TRANZISTORU V PROPUSTNÉM SMĚRU. PŘEVZATO Z [12].....	37
OBR. 17: PROPUSTNÁ CHARAKTERISTIKA DIODY. PŘEVZATO Z [12].....	38
OBR. 18: SPÍNACÍ ZTRÁTY V ZÁVISLOSTI NA PROUDU I_D . PŘEVZATO Z [12].....	41
OBR. 19: SCHÉMA CHLADICÍHO OKRUHU.....	44
OBR. 20: ZÁVISLOST ZTRÁTOVÉHO VÝKONU NA TEPELNÉ ÚČINNOSTI JEDNOTLIVÝCH TYPŮ CHLAZENÍ. PŘEVZATO Z [20].....	45
OBR. 21: ZÁVISLOST VARU VODY NA OKOLNÍM TLAKU. HODNOTY PŘEVZATY Z [21].....	47
OBR. 22: ZÁVISLOST ZTRÁTOVÉHO VÝKONU NA OTÁČKÁCH MOTORU. HODNOTY PŘEVZATY Z [22].....	48
OBR. 23: PROVEDENÍ VÝVODŮ CHLADIČE.....	50
OBR. 24: ZÁVISLOST HUSTOTY VODY NA VELIKOSTI TEPLoty. HODNOTY PŘEVZATY Z [25].....	50
OBR. 25: CHLADICÍ VÝKON PMA V ZÁVISLOSTI NA PROUDĚNÍ VZDUCHU.....	53
OBR. 26: VODNÍ PUMPA BOSCH. PŘEVZATO Z [27].....	55
OBR. 27: VNITŘNÍ USPOŘÁDÁNÍ MODULU BSM120D12P2C005. PŘEVZATO Z [29].....	63
OBR. 28: ŘEZ CHLADIČEM MĚNIČE.....	63
OBR. 29: ROZLOŽENÍ TEPLA NA ZÁKLADNÁCH MODULŮ - VODNÍ CHLAZENÍ.....	64
OBR. 30: TEPELNÝ SPÁD CHLADIČE - VODNÍ CHLAZENÍ.....	65
OBR. 31: ZAHŘÍVÁNÍ VODY PŘI PROSTUPU CHLADIČEM - VODNÍ CHLAZENÍ.....	65
OBR. 32: TLAK VODY PŘI PROSTUPU CHLADIČEM - VODNÍ CHLAZENÍ.....	66
OBR. 33: CHLADIČ LA V 17 A JEHO PARAMETRY. PŘEVZATO Z [30].....	66
OBR. 34: ROZLOŽENÍ TEPLA NA ZÁKLADNÁCH MODULŮ - VZDUCHOVÉ CHLAZENÍ.....	68
OBR. 35: TEPELNÝ SPÁD CHLADIČE - VZDUCHOVÉ CHLAZENÍ.....	69
OBR. 36: ZAHŘÍVÁNÍ VZDUCHU PŘI PROSTUPU CHLADIČEM - VZDUCHOVÉ CHLAZENÍ.....	69
OBR. 37: 3D MODEL MODULU BSM120D12P2C005.....	71
OBR. 38: 3D MODEL ZÁKLADNY MĚNIČE.....	71
OBR. 39: 3D MODEL KONDENZÁTOROVÉ BATERIE.....	72
OBR. 40: 3D MODEL ČIDLA HC5FW 500-S/SP1.....	72
OBR. 41: 3D MODEL MĚDĚNÉHO PROFILU STEJNOSMĚRNÉHO MEZIOBVODU.....	73
OBR. 42: 3D MODEL IZOLAČNÍ DESTIČKY STEJNOSMĚRNÉHO MEZIOBVODU.....	74
OBR. 43: 3D MODEL PODPĚRNÉHO SLOUPKU STEJNOSMĚRNÉHO MEZIOBVODU.....	75
OBR. 44: 3D MODEL VÝSTUPNÍ SVORKY MĚNIČE.....	75
OBR. 45: 3D MODEL MĚNIČE CHLAZENÉHO VODOU.....	76

Seznam tabulek

TABULKA 1: VLASTNOSTI MATERIÁLŮ Si, SiC A GAN. HODNOTY PŘEVZATY Z [6]	24
TABULKA 2: PARAMETRY MODULU BSM120D12P2C005. HODNOTY PŘEVZATY Z [12]	29
TABULKA 3: PARAMETRY PROUDOVÉHO ČIDLA HC5FW 500-S/SP1. HODNOTY PŘEVZATY Z [15]	32
TABULKA 4: VÝCHOZÍ HODNOTY PRO NÁVRH	35
TABULKA 5: TECHNICKÉ PARAMETRY TÝKAJÍCÍ SE CHLAZENÍ EL. MOTORU. HODNOTY PŘEVZATY Z [22]	22
TABULKA 6: ZMĚNA HUSTOTY DESTILOVANÉ VODY V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI TEPLoty. HODNOTY PŘEVZATY Z [25]	50
TABULKA 7: PARAMETRY VODNÍ PUMPY BOSH. HODNOTY PŘEVZATY Z [27]	54
TABULKA 8: MĚRNÁ HMOTNOST VODY. HODNOTY PŘEVZATY Z [28]	58
TABULKA 9: PARAMETRY CHLADIČE LA V 17. HODNOTY PŘEVZATY Z [30]	67
TABULKA 10: PARAMETRY VENTILÁTORU CHLADIČE. HODNOTY PŘEVZATY Z [30]	67
TABULKA 11: VÝSLEDKY STŘEDNÍ HODNOTY TEPLoty PRVKŮ	70

Seznam příloh

- PŘÍLOHA A: TECHNICKÁ DOKUMENTACE - ACPOL
- PŘÍLOHA B: TECHNICKÁ DOKUMENTACE - PODPĚRA
- PŘÍLOHA C: TECHNICKÁ DOKUMENTACE - ZÁKLADNA
- PŘÍLOHA D: TECHNICKÁ DOKUMENTACE - CHLADIČ
- PŘÍLOHA E: TECHNICKÁ DOKUMENTACE - IZOLACE
- PŘÍLOHA F: TECHNICKÁ DOKUMENTACE - DCPOL



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
 DRSNOST:
 TOLERANCE:
 LINEÁRNÍ:
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

	JMÉNO	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Ptáček M.		
PŘEZKOUSEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

NÁZEV:
ACpol

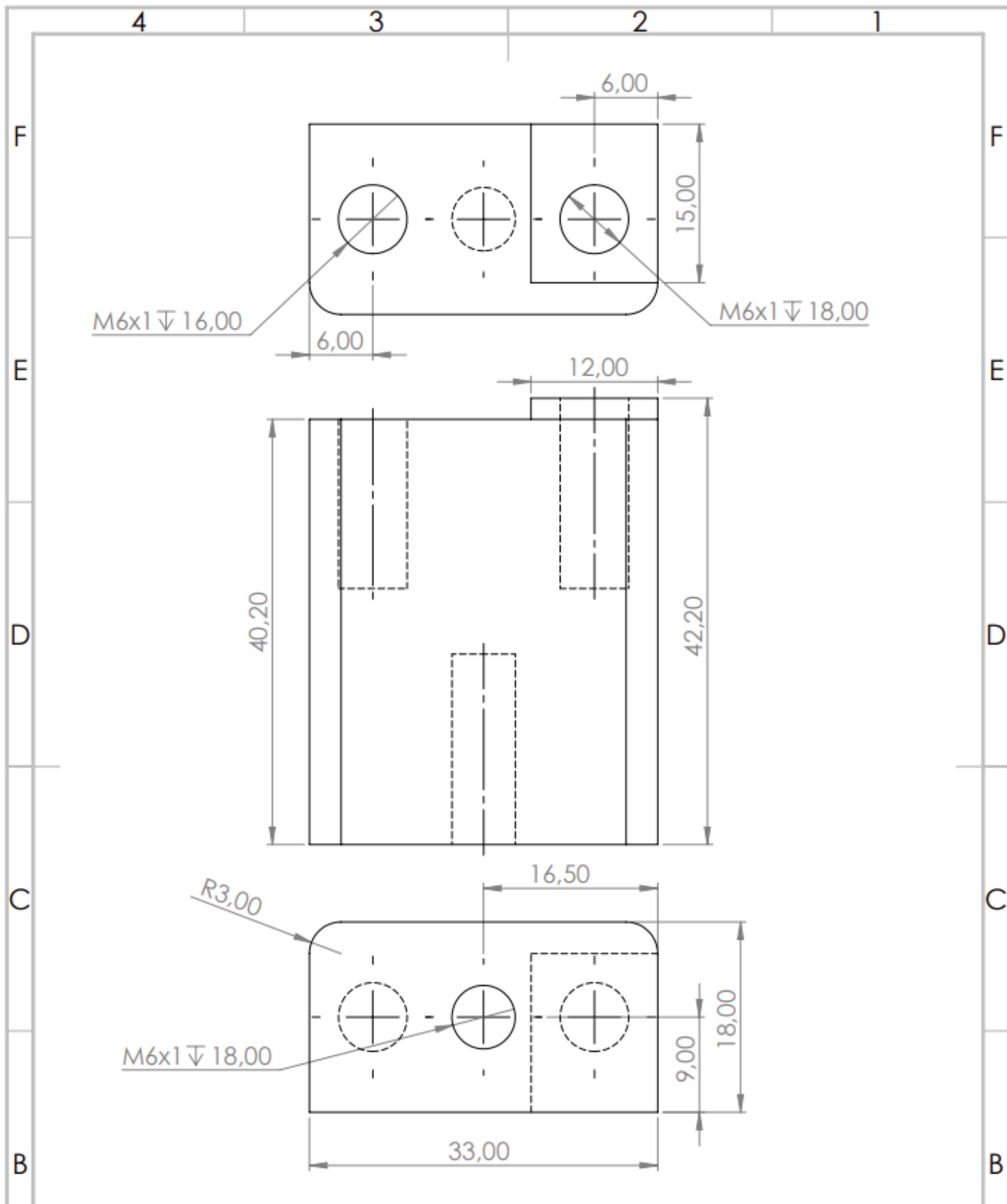
Č. VÝKRESU
1

MĚŘÍTKO: 1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ

MATERIÁL:
Měď

A4



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
 DRSNOST:
 TOLERANCE:
 LINEÁRNÍ:
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

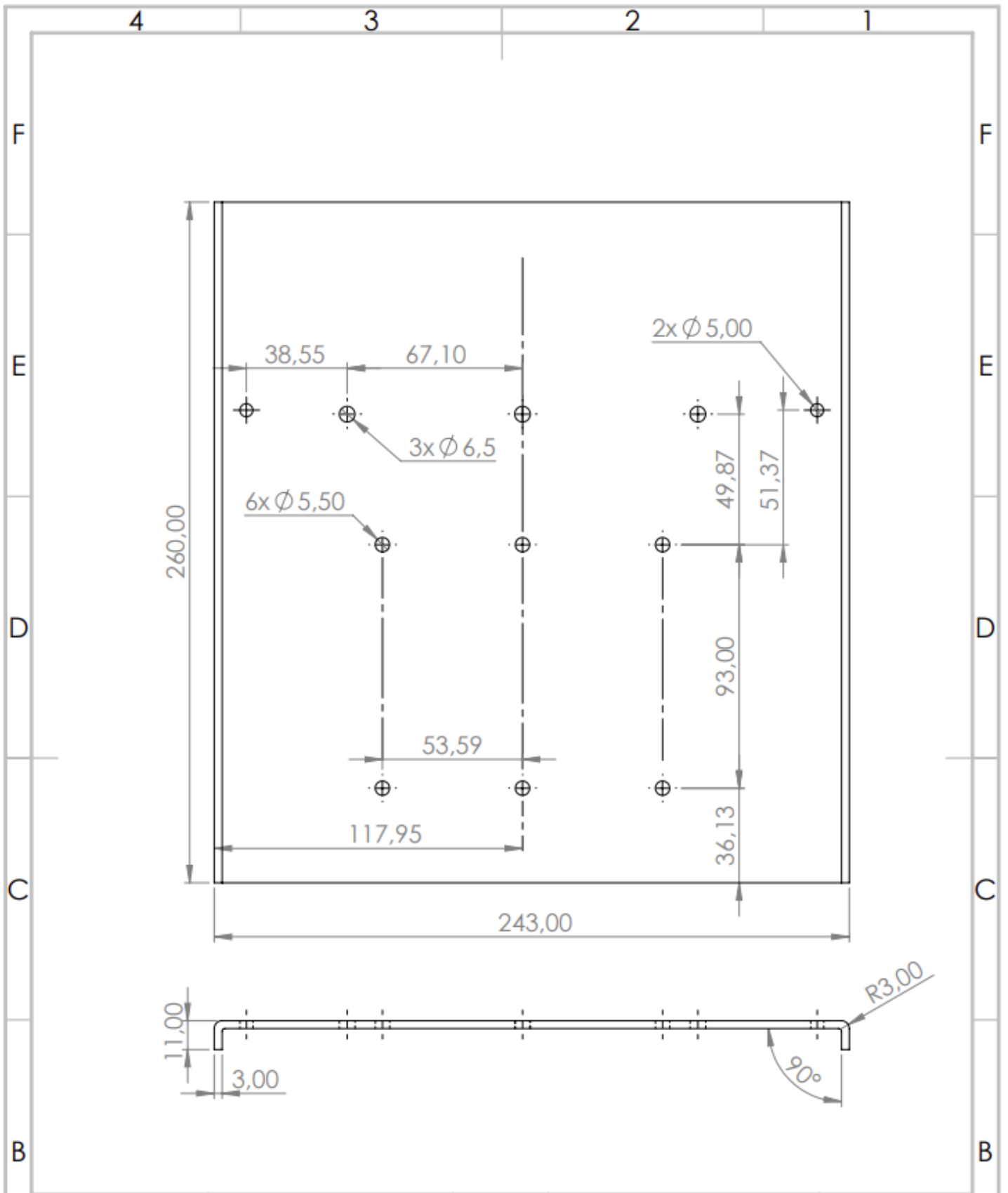
ZMĚNA

	JMÉNO	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Plzák M.		
PŘEZKOUSEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

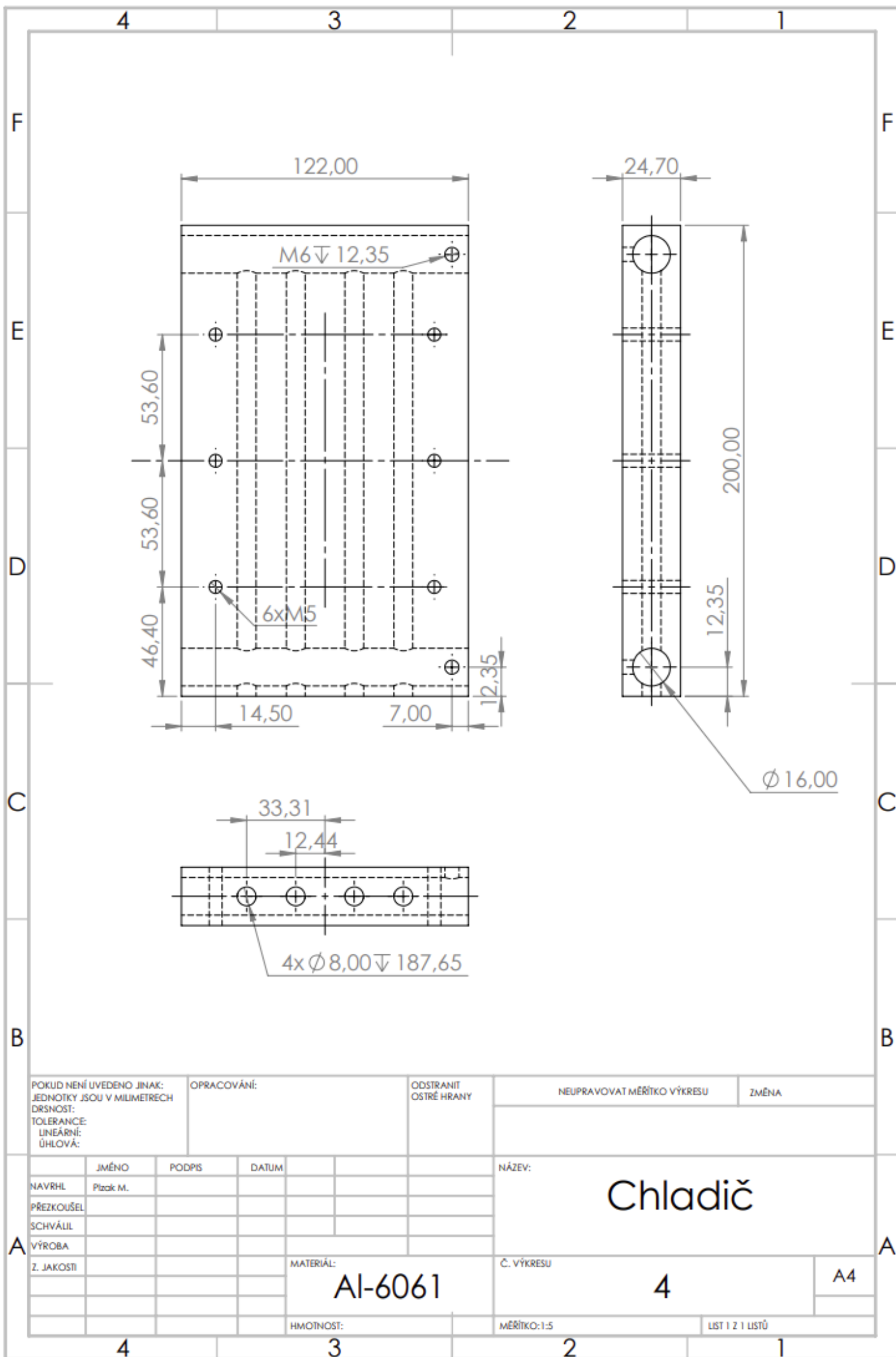
NÁZEV:	Podpěra	
Č. VÝKRESU		
MĚŘÍTKO:2:1		LIST 1 Z 1 LISTŮ

MATERIÁL:
FR-5

A4



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU	ZMĚNA
NAVRHL		JMÉNO	PODPIS	DATUM	NÁZEV: Základna	
PŘEZKOUSEL					Č. VÝKRESU 3	
SCHVÁLIL						
VÝROBA		MATERIÁL: Al			A4	
Z. JAKOSTI		HMOTNOST:			MĚŘITKO: 1:5	LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
 DRSNOST:
 TOLERANCE:
 LINEÁRNÍ:
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

	JMÉNO	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Pizak M.		
PŘEZKOUSEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

MATERIÁL:
Al-6061

HMOTNOST:

NÁZEV: Chladič
Č. VÝKRESU 4
MĚŘÍTKO: 1:5
LIST 1 Z 1 LISTŮ

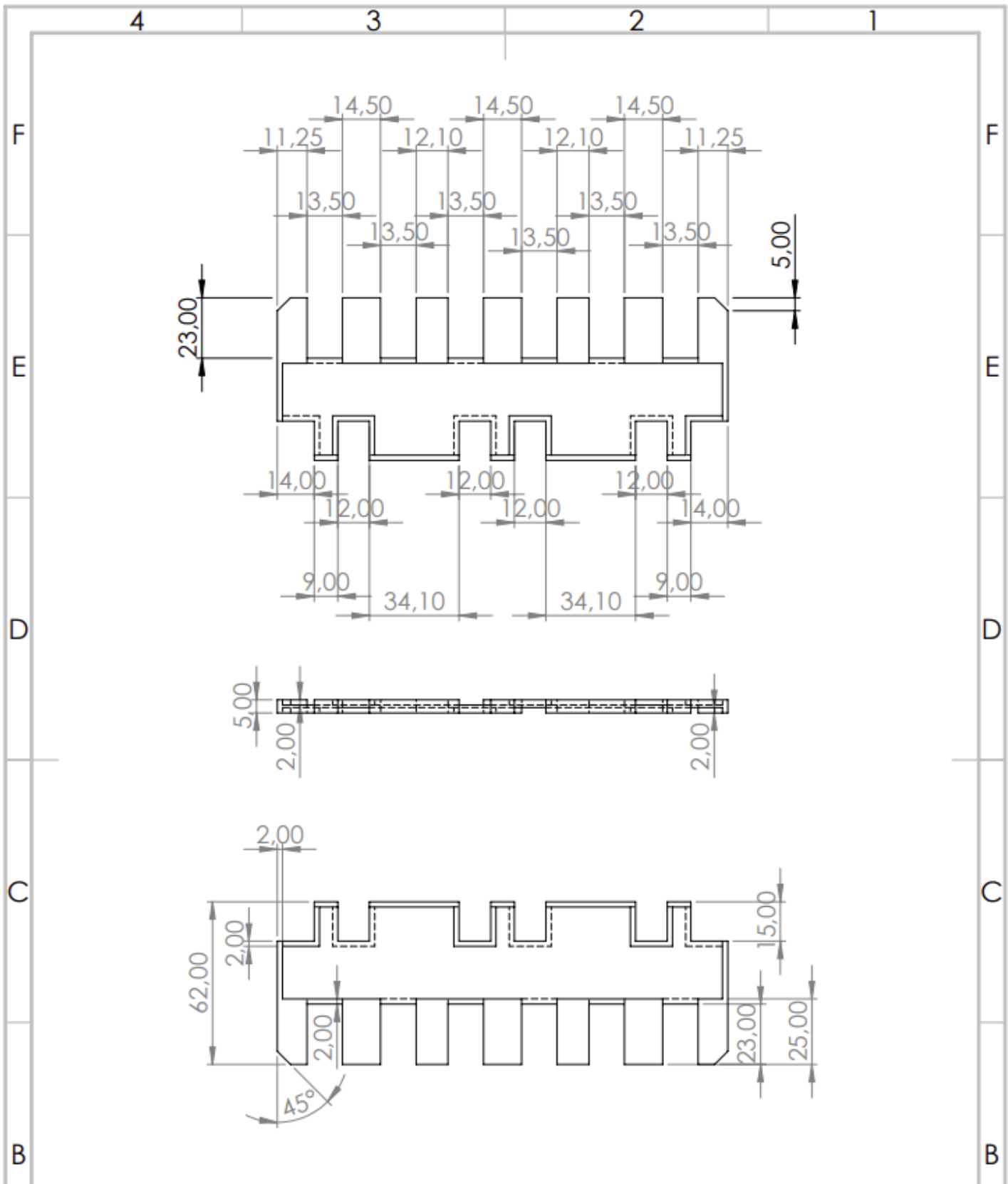
A4

4

3

2

1



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
 DRSNOST:
 TOLERANCE:
 LINEÁRNÍ:
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU

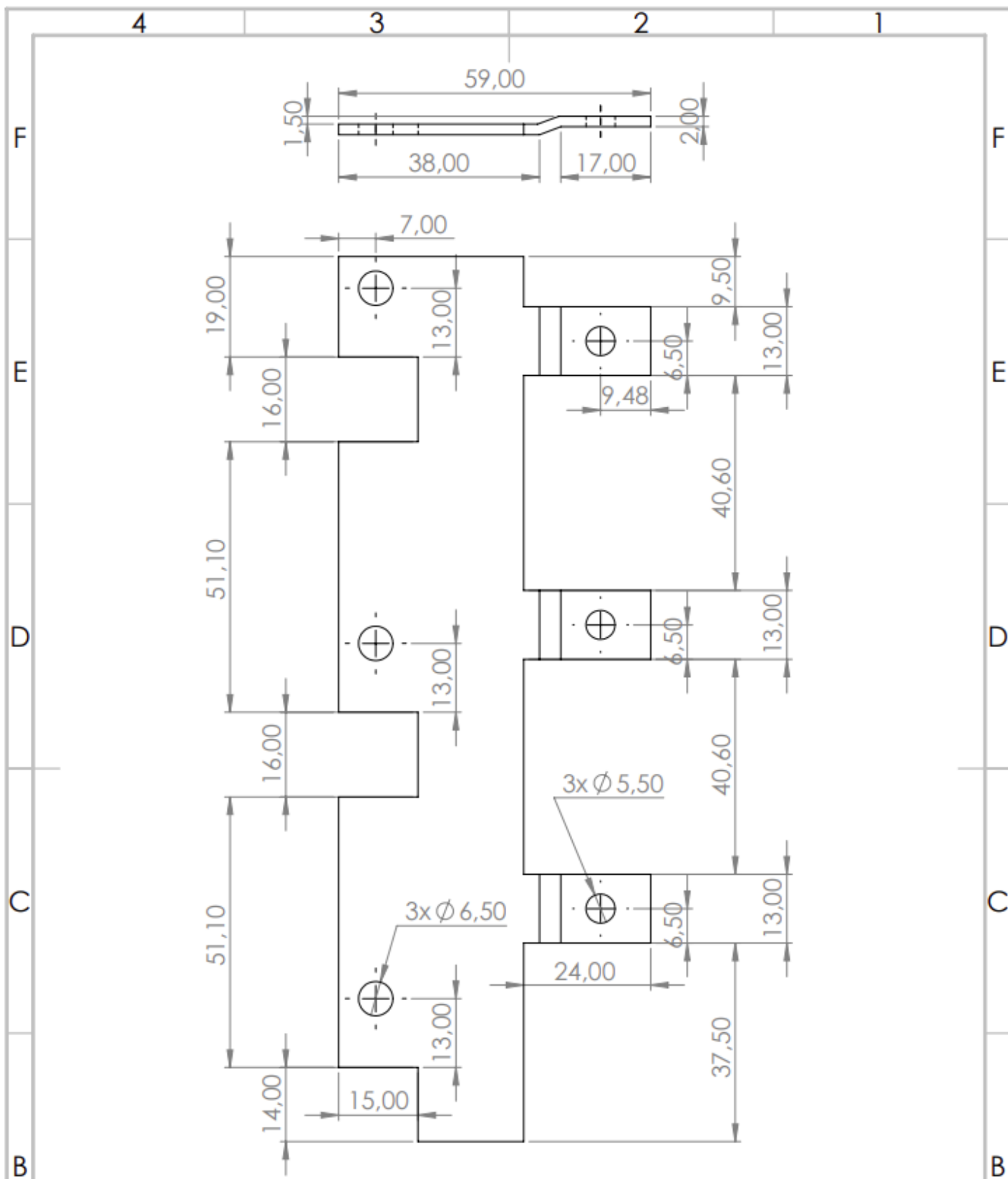
ZMĚNA

JMÉNO	PODPS	DATUM
NAVRHL	Ptáček M.	
PŘEZKOUSEL		
SCHVÁLIL		
VÝROBA		
Z. JAKOSTI		

NÁZEV:	Izolace	
Č. VÝKRESU	5	A4
MĚŘITKO: 1:5	LIST 1 Z 1 LISTŮ	

MATERIÁL:
FR-5

HMOTNOST:



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
 DRSNOST:
 TOLERANCE:
 LINEÁRNÍ:
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

	JMÉNO	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Plzák M.		
PŘEZKOUSEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

NÁZEV:	DCpol	
Č. VÝKRESU	6	A4
MĚŘÍTKO: 1:2	LIST 1 Z 1 LISTŮ	

MATERIÁL:
Měď

HMOTNOST: