

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Projekční a konstrukční řešení nabíječe trakční baterie

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš ROSECKÝ**
Osobní číslo: **E10N0030K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Projekční a konstrukční řešení nabíječe trakční baterie**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Navrhněte topologii měniče.
2. Vyberte a dimenzujte komponenty.
3. Určete výkonové ztráty a navrhněte chlazení měniče.
4. Popište konstrukční řešení měniče.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Vondrášek, F.: Výkonová elektronika, část 1-6, Skripta ZČU Plzeň, 2003
2. Přednášky či skripta z doporučených předmětů
3. Katalogy výrobců komponent měničů
4. Firemní literatura ŠKODA
5. Odborné články

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Dr. Ing. Jiří Flajtingr**

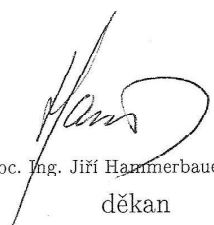
Škoda Electric, Plzeň

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jakub Kůstka**

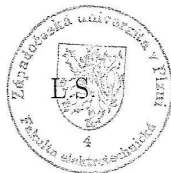
Škoda Electric , a. s.

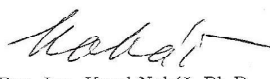
Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na řešení projekčního a konstrukčního návrhu nabíječe vozové baterie trakčního vozidla. Práce popisuje obecný návrh topologie měniče a požadované parametry. Řeší výběr a dimenzování komponent a výpočet výkonových ztrát. Popisuje konstrukční návrh nabíječe vozové baterie trakčního vozidla a návrh jeho chladicího systému. Závěrem hodnotí dosažené výsledky.

Klíčová slova

Nabíječ, baterie, měnič, pulzní snižovač napětí, jednofázový střídač, můstkový usměrňovač, spínací ztráty, propustné ztráty, analýza proudění, sdílení tepla, chlazení, výkonová elektronika, tranzistor IGBT, dioda.

Abstract

The master thesis presents solutions, the projection and the design, of the traction vehicle battery charger. The work describes the general design of the inverter topology and the required parameters. Solves selection and dimensioning of components, calculation of power losses. Describes the design of the vehicle battery charger and design of the cooling system. Finally, evaluate the results.

Key words

Charger, battery, inverter, pulse step-down inverter, single-phase inverter, bridge rectifier, switching losses, static losses, flow analysis, heat transfer, cooling, power electronics, IGBT, diode.

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.

V Plzni dne 29.4.2013

Lukáš Rosecký

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Dr. Ing. Jiřímu Flajtingrovi za příležitost zpracovat toto téma diplomové práce, za metodické vedení práce, za cenné rady a připomínky.

Rád bych poděkoval konzultantovi diplomové práce Ing. Jakubu Kůstkovi za odborné konzultace, profesionální rady a připomínky. Za jeho vstřícný přístup, čas a trpělivost.

Dále bych rád poděkoval společnosti Škoda Electric a.s., významnému výrobcí výkonových měničů, elektrických pohonů a trakčních motorů.

Děkuji také své rodině, přátelům a kolegům za podporu v průběhu celého studia.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 VYMEZENÍ TÉMATU PRÁCE	12
1.1 TECHNICKÉ PARAMETRY NABÍJEČE	12
1.2 SPECIFIKA NABÍJENÍ LITHIOVÝCH BATERÍ	13
1.3 NÁVRH TOPOLOGIE MĚNIČE	16
2 NÁVRH A DIMENZOVÁNÍ NABÍJEČE BATERIE	18
2.1 DIMENZOVÁNÍ VSTUPNÍHO MĚNIČE (-A1)	18
2.1.1 <i>Teoretický rozbor vstupního měniče – obecný popis funkce</i>	18
2.1.2 <i>Popis realizace vstupního měniče</i>	21
2.1.3 <i>Výkonové ztráty vstupního měniče</i>	25
2.2 DIMENZOVÁNÍ A REALIZACE TRANSFORMÁTORU A TLUMIVKY (-A3)	29
2.2.1 <i>Výkonové ztráty transformátoru a tlumivky</i>	30
2.3 DIMENZOVÁNÍ VÝSTUPNÍHO USMĚRŇOVAČE (-A2)	30
2.3.1 <i>Teoretický rozbor výstupního usměrňovače – obecný popis funkce</i>	30
2.3.2 <i>Popis realizace výstupního usměrňovače</i>	31
2.3.3 <i>Výkonové ztráty výstupního usměrňovače</i>	32
3 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ NABÍJEČE BATERIE	33
3.1 POŽADAVKY NA KONSTRUKCI MĚNIČE	33
3.2 KONSTRUKCE NABÍJEČE	33
3.3 VSTUPNÍ MĚNIČ (-A1)	38
3.4 TRANSFORMÁTOR A TLUMIVKA (-A3)	39
3.5 VÝSTUPNÍ USMĚRŇOVAČ (-A2)	40
4 CHLADICÍ SYSTÉM MĚNIČE	41
4.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	41
4.2 ANALÝZA PROUDĚNÍ A SDÍLENÍ TEPLA	42
4.3 ZJEDNODUŠENÉ TEPELNÉ NÁHRADNÍ SCHÉMA	47

4.4	VÝPOČET MAXIMÁLNÍ TEPLoty PŘECHODŮ POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK	49
5	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	51
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	52
	PŘÍLOHY	

Úvod

Na základě rozhodnutí vedoucího diplomové práce se projekční a konstrukční návrh nabíječe baterie věnuje návrhu nabíječe pro trakční baterii 110 V stejnosměrných, ze které jsou napájeny řídicí, regulační a další obvody kolejového vozidla.

Diplomová práce je členěna na 4 logické celky. První část popisuje obecný návrh topologie měniče a jeho parametry, druhá řeší návrh měniče a jeho členění na jednotlivé funkční bloky. Třetí část popisuje stavbu a konstrukční řešení měniče. Čtvrtá se zabývá návrhem chladicího systému měniče. Závěr práce hodnotí dosažené výsledky.

Seznam symbolů a zkratek

C_{th}	tepelná kapacita polovodičového přechodu
$E_{on/T}$	ztrátová energie zapínání tranzistoru
$E_{off/D}$	ztrátová energie vypínání diody
$E_{off/T}$	ztrátová energie vypínání tranzistoru
f	frekvence
f_s	spínací frekvence
G_{th}	tepelná vodivost
I, i	elektrický proud
I_C	proud kolektorem
I_d, i_d	střední hodnota proudu
$I_{d/D}, I_F$	střední hodnota proudu diodou
$I_{d/T}$	střední hodnota proudu tranzistorem
i_{LL}	minimální hodnota okamžitého proudu
i_{LH}	maximální hodnota okamžitého proudu
i_{on}, i_{off}	okamžité hodnoty proudu při spínání tranzistoru
i_v	proud zdroje
i_z	proud na zátěži
k	obecná konstanta
l	délka
L	vlastní indukčnost
max, min	indexy - maximální, minimální
P_{fa}	tlaková ztráta
$P_{on/T}$	ztráty při zapínání tranzistoru
$P_{off/D}$	ztráty při vypínání diody
$P_{off/T}$	ztráty při vypínání tranzistoru
$P_{fw/D}$	ztráty propustné - diody
$P_{fw/T}$	ztráty propustné - tranzistoru
P_{tot}	celkový ztrátový výkon
$P_{tot/D}$	ztráty celkové - diody
$P_{tot/T}$	ztráty celkové - tranzistoru
P_I	příkon

P_2	výkon
Q, V	objemový průtok chladícího média
Q_{min}	minimální hodnota objemového průtoku chladícího média
R	elektrický odpor
R_{th}	tepelný odpor
S	průřez
T	perioda, teplota
t	čas
T_j	teplota přechodu polovodičové součástky
$T_{j/D}$	maximální teplota polovodičového přechodu diody
$T_{j/T}$	maximální teplota polovodičového přechodu tranzistoru
T_R	teplota chladiče
T_1, T_2	intervaly sepnutí součástek
U, u	elektrické napětí
U_{CC}	napájecí napětí tranzistoru
U_{CE}	napětí kolektor – emitor
U_d, u_d, u_z	napětí na zátěži
U_F	napětí diody
U_{GE}	řídící napětí
U_i	indukované napětí
U_L	napětí na cívce
u_r	řídící napětí (signál)
U_1, U_2	vstupní napětí, výstupní napětí
z	poměrná doba zapnutí
Δ	rozdíl
ΔT	rozdíl teplot
Δi_d	rozdíl maximální a minimální okamžité hodnoty proudu
λ_{th}	měrná tepelná vodivost
ρ_{th}	měrná tepelná vodivost
σ_I	zvlnění proudu
ψ	programovaný úhel (interval) sepnutí
ψ_R	úhel sepnutí zpětných diod
ψ_S	skutečný úhel sepnutí polovodičových spínačů

1 Vymezení tématu práce

Cílem této práce je projekční a konstrukční návrh výkonového měniče – nabíječe vozové baterie trakčního vozidla, z hlediska:

- Návrhu topologie měniče
- Dimenzování komponent
- Návrhu chlazení měniče dle jeho výkonových ztrát
- Návrhu a popisu konstrukčního řešení

1.1 Technické parametry nabíječe

Nabíječ baterie je umístěn ve strojovně trakčního vozidla a společně s bateriovým systémem tvoří samostatnou síť nízkého napětí.

V následujících dvou tabulkách (*Tab. 1.1 Elektrické parametry* [7]) jsou uvedeny požadavky na vstupní a výstupní elektrické veličiny, rozměry a další vlastnosti.

Tab. 1.1 Elektrické parametry [7]

Vstupní parametry	
Jmenovité vstupní napětí	630 V ss
Poznámka: Dovolena tolerance vstupního napětí je 450 V – 660 V ss.	
Jmenovité stabilizované vstupní ovládací napětí	24 V ss
Výstupní parametry	
Jmenovité výstupní napětí	110 V ss
Poznámka: Velikost výstupního napětí nabíječe je proměnná v intervalu 105 V – 120 V, v závislosti na provozní teplotě baterií.	
Jmenovitý výstupní proud při napětí 110 V	91 A
Maximální výstupní proud při napětí 110 V	136 A / 10 sekund
Jmenovitý výstupní výkon	10 kW

Tab. 1.2 Mechanické parametry [7]

Vnější rozměry (délka x hloubka x výška)	599 x 498 x 1498 mm
Hmotnost	210 kg ± 5%
Stupeň krytí - vnitřní prostor skříně	IP44
Stupeň krytí - vzduchový kanál	IP20
Stupeň krytí - konektory	IP65
Způsob chlazení	AF - vzduchové chlazení s nucenou ventilací
Provozní teplota prostředí	-25°C to 45°C
Dovolená skladovací teplota	-40°C to 70°C
Navrženo dle norem	<p>ČSN EN 61287-1</p> <p>Drážní zařízení - Výkonové měniče instalované v drážních vozidlech - Část 1: Charakteristiky a zkušební metody</p> <p>ČSN EN 50155</p> <p>Drážní zařízení - Elektronická zařízení drážních vozidel</p>

1.2 Specifika nabíjení lithiových baterií

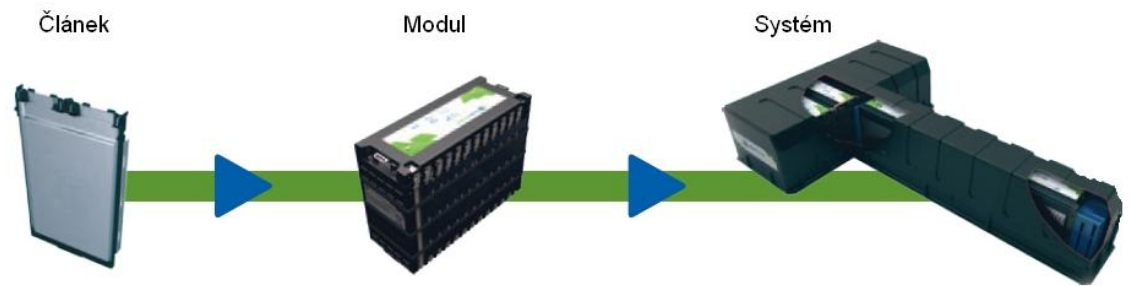
Lithiové akumulátory mají díky svým přednostem pevnou pozici v oblasti spotřební elektroniky a výpočetní techniky. Díky intenzivnímu vývoji se zlepšují jejich vlastnosti a zároveň se významně snižuje jejich cena. V posledních letech dochází k širokému uplatnění lithiových akumulátorů jako zdrojů energie v průmyslových aplikacích, v automobilovém průmyslu a dopravní technice. Proto je užitečné tuto kapitolu věnovat lithiovým bateriím a uvést specifika jejich nabíjení.

V oblasti dopravní techniky jsou využívány jejich klíčové vlastnosti:

- Vysoká energetická hustota (až 150 Wh/kg)
- Velmi dlouhá životnost (vysoký počet nabíjecích/vybíjecích cyklů)
- Zvýšená bezpečnost (stabilita během provozu, odolnost proti vznícení, chemická a teplotní stabilita při poškození akumulátoru)
- Nezávadnost pro životní prostředí

Základním stavebním kamenem akumulátoru je článek. Moderní lithiové články mají obvykle napětí 2,7 až 3,8 V. Původní materiály kladných elektrod tzv. lithium-metal-oxidy

(LiCoO_2 , $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$, LiNiO_2) jsou dnes nahrazovány jinými materiály, např. nano-lithium-titanáty (nLTO) nebo lithium-železo-fosfáty (LiFePO_4 , LiFeMgPO_4).



Obr. 1.1 Bateriový článek, modul a systém [9]

Jednotlivé články jsou poskládány do rozličných modulů tak, aby jejich vzájemnou kombinací bylo dosaženo požadovaného napětí a kapacity. Využití článků jako základních komponent poskytuje možnost jednoduché a efektivní stavby rozmanitých modulů pro konkrétní potřeby (**Obr. 1.1** Bateriový článek, modul a systém [9]).

Sestavy bateriových modulů tvoří bateriové systémy, které poskytují ucelené řešení pro konkrétní aplikaci. Ty jsou konstruovány tak, aby měly požadované elektrické vlastnosti, aby efektivně využily konkrétní prostor a aby byla optimálně rozložena jejich hmotnost.

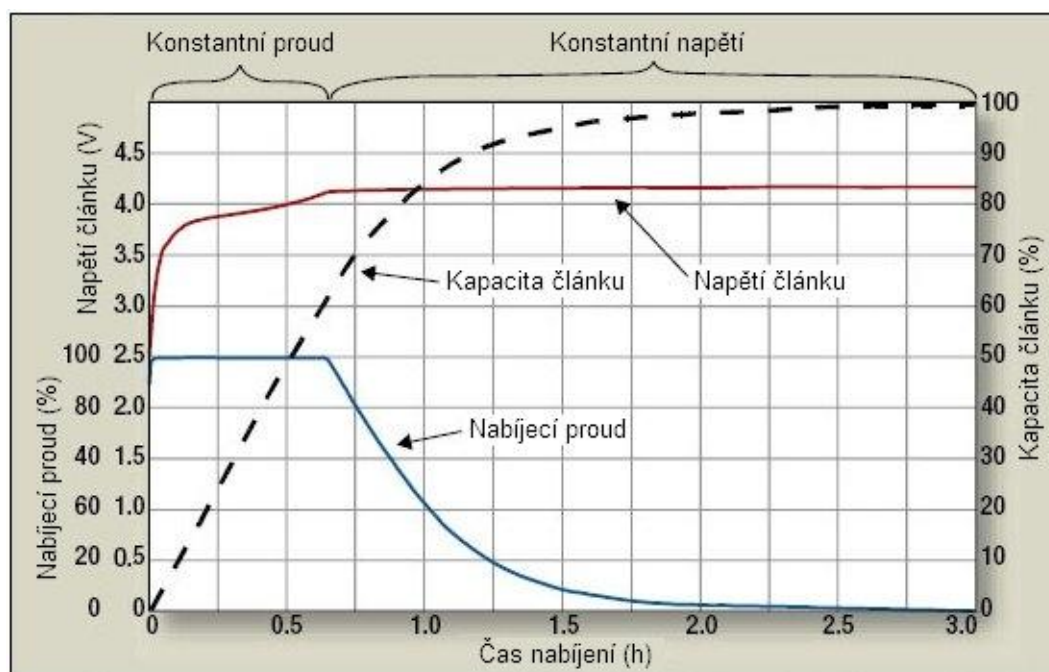
Bateriové systémy jsou zpravidla vybaveny řídicí soustavou, která zajišťuje jejich bezchybný a bezúdržbový provoz. Jejím úkolem je zejména:

- Monitorování a řízení kritických parametrů, jako je napětí článků a teplota modulů
- Maximalizace dostupné kapacity, energetické účinnosti a počtu nabíjecích cyklů
- Řízení režimu nabíjení
- Poskytování komunikačního rozhraní hostitelského systému: CAN, Ethernet, RS232, RS485
- Zajištění rovnoměrného nabití jednotlivých článků pomocí inteligentního algoritmu (tzv. balancování)

Elektrochemické procesy probíhající při nabíjení a vybíjení lze zjednodušeně popsat jako pohyb iontů Li^+ . Při nabíjení se jedná o pohyb iontů od kladné elektrody směrem k záporné elektrodě, během vybíjení jde o pohyb iontů od záporné elektrody k elektrodě kladné.

Vhodná metoda pro nabíjení lithiových akumulátorů se v zahraniční literatuře označuje jako CCCV (Constant Current folowed by Constant Voltage). Jde o nabíjení

konstantním proudem, dokud akumulátor nedosáhne předem stanoveného napětí a poté nabíjení tímto konstantním napětím (*Obr. 1.2*). Ukončení nabíjení se provádí, když nabíjecí proud klesne na předem stanovenou hodnotu, ve většině případů se doporučuje hodnota proudu odpovídající $1,5 \div 2 \%$ jmenovité kapacity, vyjádřená v jednotkách proudu.



Obr. 1.2 Nabíjecí charakteristika lithiového článku [10]

Konkrétní představu o parametrech nabíjení a vlastnostech současně vyráběných lithiových článků poskytují údaje výrobce European Batteries. Jedná se o technickou specifikaci článku jmenovité kapacity 45 Ah.

Pro optimální funkci článku o jmenovitém napětí článku 3,2 V jsou klíčové doporučené hodnoty napětí: limitní nabíjecí napětí 3,55 V a limitní vybíjecí napětí 2,5 V resp. 2 V. Jedná se o hodnoty, při jejichž překročení dochází k chemické degradaci článku, která vede k trvalému poklesu výkonnosti a případnému zničení článku.

Neméně důležitým parametrem, který má vliv na elektrické parametry a životnost článku, je hodnota nabíjecího a vybíjecího proudu. V zahraniční literatuře bývá označena jako C/x , kde C je jmenovitá kapacita článku. Doporučené hodnoty nabíjecího a vybíjecího proudu článku je třeba respektovat.

Pro optimální funkci a životnost je třeba také dodržovat výrobcem stanovené limity skladovacích a provozních teplot baterií. Kompletní údaje jsou uvedeny v katalogovém listu v příloze. [8,9,12]

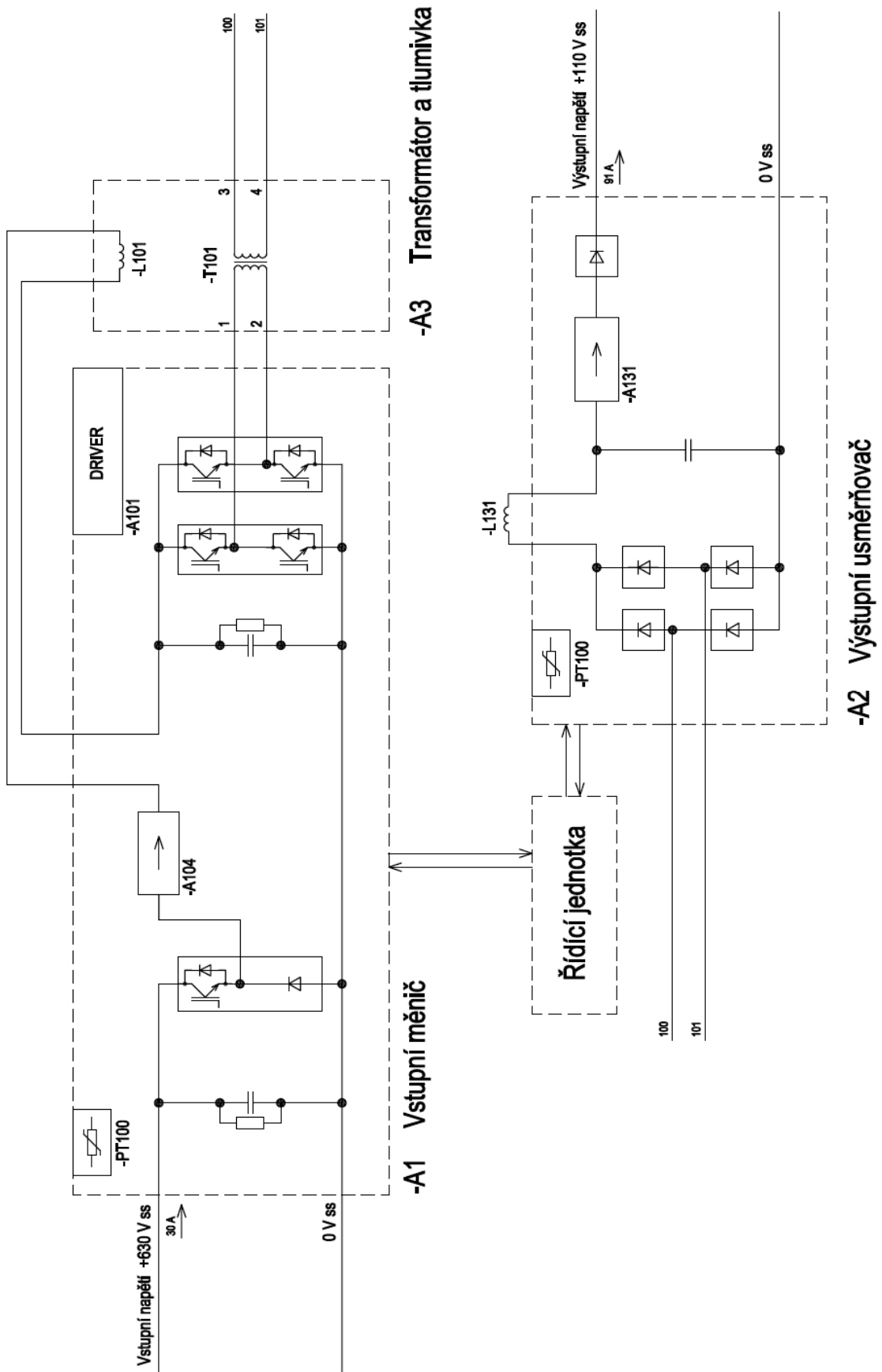
1.3 Návrh topologie měniče

Nabíječ vozové baterie je napájen ze stejnosměrného výstupu 630 V jednotky pomocných pohonů. Stejnosměrný výstup nabíječe 110 V je určen pro nabíjení baterie. Výkonová část nabíječe je členěna do tří samostatných jednotek – bloků.

Na následující straně je zobrazeno obvodové schéma měniče (*Obr. 1.3*). Na vstupu je napájen první blok - Vstupní měnič (-A1), který zajišťuje dvě základní funkce. První z funkcí je snížení a stabilizace napětí pomocí obvodu pulzního snižovacího měniče. Druhá funkce zajišťuje změnu stejnosměrného napětí na střídavé pomocí jednofázového napěťového střídače na hodnotu vhodnou pro napájení dalšího obvodu.

Výstup Vstupního měniče (-A1) je vyveden na primární vinutí snižovacího středofrekvenčního transformátoru (-A3-T101). Transformátor zajišťuje galvanické oddělení obvodů na straně primárního a sekundárního vinutí. Sekundární vinutí slouží jako zdroj pro Výstupní usměrňovač (-A2).

Výstupní usměrňovač (-A2) mění střídavé napětí na požadované stejnosměrné napětí 110V vhodné pro nabíjení baterie, které tvoří samostatnou síť nízkého napětí. [7]



Obr. 1.3 Obvodové schéma měniče [7]

2 Návrh a dimenzování nabíječe baterie

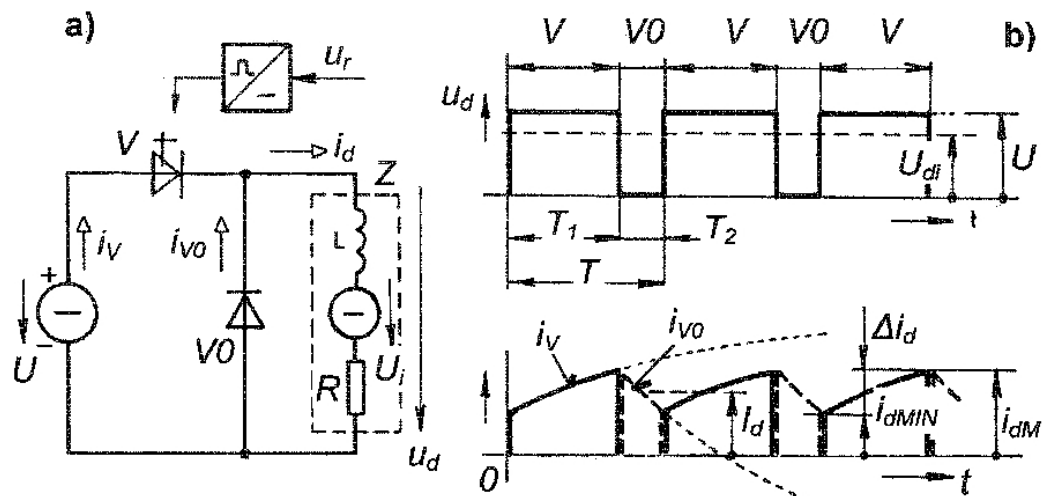
Tato kapitola popisuje projekční návrh měniče, stavbu a strukturu jednotlivých obvodů a dimenzování použitých součástek.

2.1 Dimenzování vstupního měniče (-A1)

Vstupní měnič (-A1) je tvořen obvodem **pulzního snižovacího měniče** a obvodem jednofázového **napětového střídače** v můstkovém zapojení.

2.1.1 Teoretický rozbor vstupního měniče – obecný popis funkce

Pulzní měnič pro snižování napětí je tvořen spínačem V a nulovou diodou VO (*Obr. 2.1*). Uvedené spojení slouží k řízení napětí na zátěži Z na hodnotu menší, než je napětí napájecího zdroje. Zátěž je uvažována obecná R, L, U_i . Předpokladem provozu je $U_i < U$.



Obr. 2.1 Pulzní měnič pro snižování napětí - a) schéma, b) průběhy proudů a napětí [6]

Pro funkci je využíván periodicky spínaný polovodičový spínač. Při sepnutém V je na zátěži napětí $u_d=U$. Proud zátěže se uzavírá přes spínač ($i_d=i_v$). Křivku proudu tvoří část exponenciály narůstající k hodnotě $(U-U_i)/R$. Nestačí-li i_d v intervalu vypnutí klesnout k nule, je nepřerušovaný, a v celém intervalu vypnutí je na zátěži $u_d=0$.

Z průběhu u_d lze snadno usoudit, že střední hodnota napětí na zátěži při nepřerušovaném chodu je

$$U_{di} = \frac{T_1}{T} U = zU$$

Indexem i je rozlišena uvedená, zřejmě ideální, střední hodnota od hodnot U_d , které jsou v dalším určeny s menší mírou idealizace nebo pro chod s přerušovaným proudem.

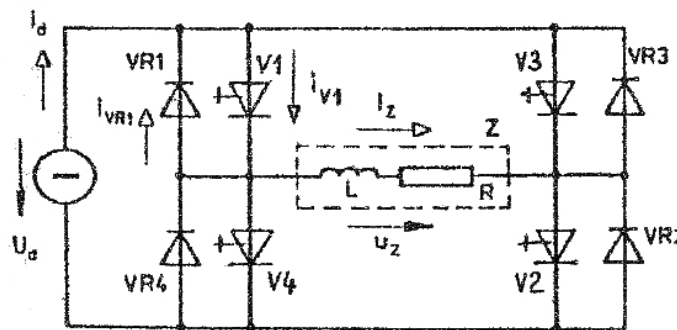
z je poměrná doba zapnutí. Řízení z se provádí signálem u_r vstupujícím do bloku řízení. Teoreticky je možno řídit v rozmezí $0 \leq z \leq 1$. Tomu odpovídá regulační rozsah napětí $0 \leq U_{di} \leq U$.

Střední hodnotu proudu zátěže při ustáleném stavu lze určit, uvážíme-li, že v ustáleném stavu je střední hodnota napětí L nulová, pak vychází

$$I_d = \frac{U_{di} - U_i}{R}$$

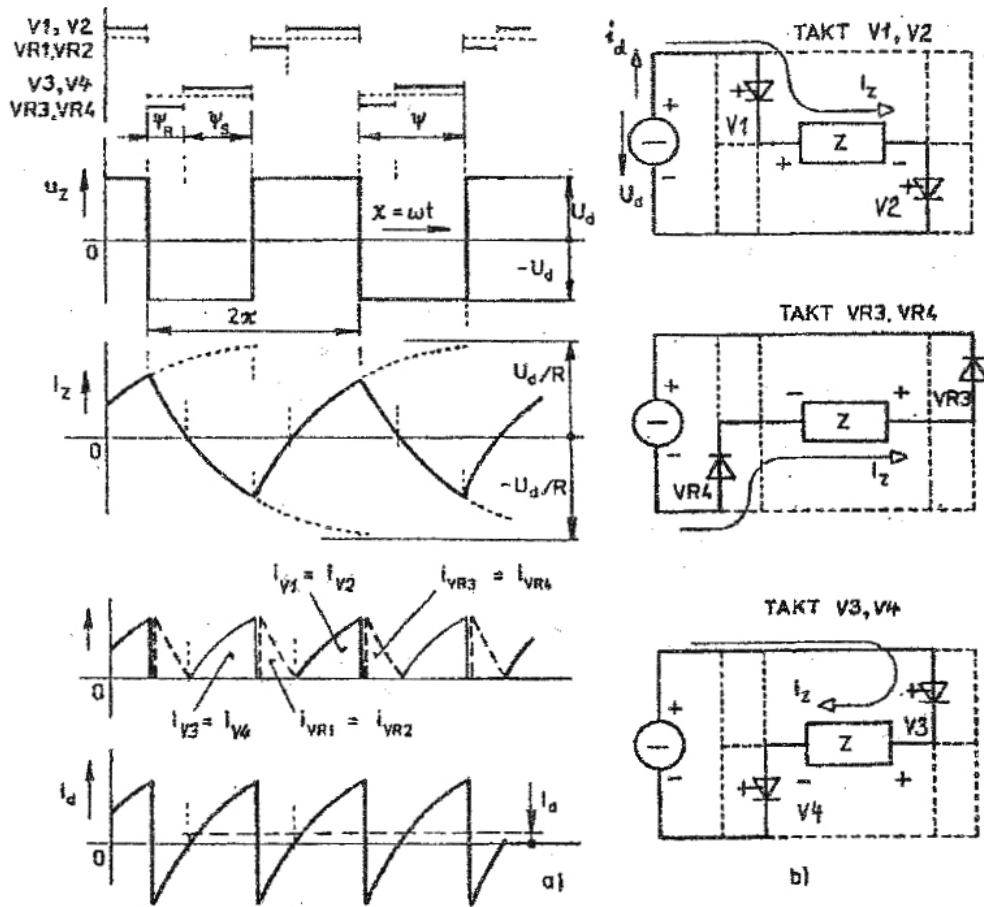
Výkon je možno přenášet pouze ze zdroje U do zátěže Z . Je-li V sepnut, přijímá zátěž energii ze zdroje. Část se jí akumuluje v L , část přijímá zdroj U_i a část se ztrácí na R . Při vypnutém V se energie nahromaděná v předchozím intervalu na L uvolňuje. Část uvolněné energie přijímá U_i a zbytek se ztrácí na R . [6]

Moderní napět'ové střídače mění stejnosměrné napětí na střídavé a řízení výstupního napětí je zpravidla realizováno pulzní šířkovou modulací. Čím vyšší je kmitočet řídicích pulzů, tím menší je pak zvlnění vyhlazeného výstupního proudu. Spínací frekvence moderních spínacích zdrojů jsou kolem 20 kHz, tedy nad oblastí slyšitelných kmitočtů a zvlnění výstupního proudu je nepatrné.



Obr. 2.2 Jednofázový napět'ový střídač v můstkovém zapojení [6]

Analýza činnosti jednofázového napět'ového střídače v můstkovém zapojení, při obdélníkovém řízení, je popsána na základě schématu zapojení na **Obr. 2.2**. V něm jsou $V1$ až $V4$ vypínatelné součástky (tranzistory nebo vypínací tyristory). K nim jsou antiparalelně připojeny zpětné diody $VR1$ až $VR4$, které spolu tvoří zpětný usměrňovač. Předpokládána je zátěž L, R . Proudové a napět'ové poměry při $\psi = \pi$ a příslušný spínací diagram jsou naznačeny na **Obr. 2.3**. Úhel ψ je programovaný úhel (interval) sepnutí jednotlivých vypínatelných součástek – dále jen *úhel sepnutí*. Je to interval mezi začátkem a koncem zapínacího impulsu vysílaného na součástku. Ve spínacích diagramech jsou tyto intervaly vyznačeny tečkovaně. Skutečné intervaly sepnutí vypínatelných součástek jsou nad tímto tečkováním vyznačeny plně. Pod tečkováním jsou plně vyznačeny intervaly sepnutí zpětných diod. Dále jsou popsány stavy obvodu v jednotlivých taktech.



Obr. 2.3 Napěťový střídač: a) spínací diagram a proudové a napěťové poměry, b) stav obvodu v jednotlivých takttech [6]

Takt $V1, V2$: Při sepnutých $V1, V2$ je na zátěži napětí $u_z = U_d$. Proud zátěže i_z exponenciálně narůstá k hodnotě U_d/R . Část energie přijatá ve sledovaném taktu zátěží ze stejnosměrného zdroje se ztrácí na R , část se akumuluje v L . Takt končí vypnutím $V1, V2$ (na konci příslušné tečkované čáry, tj. s koncem zapínacího impulsu).

Takt $VR3, VR4$: Po vypnutí $V1, V2$ proud i_z nezaniká, ale vlivem působení L pokračuje v původním směru přes $VR3, VR4$. Tím je na zátěž připojeno napětí $u_z = -U_d$. Proud i_z exponenciálně klesá k hodnotě $(-U_d/R)$. Část energie přijatá v předchozím taktu indukčností L se nyní ztrácí na R , část se vrací přes $VR3, VR4$ zpět do stejnosměrného zdroje (jalová energie). Takt $VR3, VR4$ končí poklesem i_z na nulu.

Takt $V3, V4$: Ze spínacího diagramu vyplývá, že v průběhu sepnutí $VR3, VR4$ je již programováno sepnutí $V3, V4$ (je na ně vysílán zapínací impuls). Spínače $V3, V4$ se nezapnou jen proto, že sepnuté zpětné diody na nich udržují závěrné napětí (cca IV). Je zřejmé, že $V3, V4$ se zapnou vzápětí po zániku proudu zpětných diod. Po sepnutí $V3, V4$ zůstává $u_z = -U_d$. Proud i_z prochází zátěží se změněným směrem – klesá k hodnotě $(-U_d/R)$. Energie je zátěží

opět přijímána. Část se opět ztrácí na R , část se opět akumuluje v L . Takt končí vypnutím $V3, V4$.

Takt $VR1, VR2$: Po vypnutí $V3, V4$ pokračuje proud i_z s předchozím smyslem přes $VR1, VR2$. Na zátěž je tím připojeno napětí $u_z = U_d$. Proud i_z narůstá k hodnotě U_d/R , atd. [6]

Význam úhlů ψ, ψ_S, ψ_R :

ψ ... programovaný úhel (interval) sepnutí polovodičových spínačů

ψ_S ... skutečný úhel sepnutí polovodičových spínačů

ψ_R ... úhel sepnutí zpětných diod

2.1.2 Popis realizace vstupního měniče

Pulzní měnič pro snižování napětí

Při návrhu měniče dle topologie na **Obr. 1.3 Obvodové schéma měniče** [7] jsem si stanovil cíl dosáhnout účinnosti 82 %. Z výstupního výkonu $P_2 = 10 \text{ kW}$ je vypočten vstupní příkon měniče

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{10}{0,82} = 12,2 \text{ kW}$$

Vstupní napětí $U_1 = 630 \text{ V}$, výstupní napětí pulzního měniče pro snižování napětí je stanoveno na $U_2 = 350 \text{ V}$, spínací frekvence $f_s = 10 \text{ kHz}$ a zvlnění proudu $\sigma_I = 25 \%$.

Výpočet poměrné doby zapnutí z a doby zapnutí T_1

$$U_2 = \frac{T_1}{T} U_1 = z U_1$$

$$z = \frac{U_2}{U_1} = \frac{350}{630} = 0,56$$

$$0,56 = \frac{T_1}{T}$$

$$T_1 = 0,56 T = \frac{0,56}{f_s} = \frac{0,56}{10000} = 56 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Střední hodnota proudu

$$I_d = \frac{P_1}{U_2} = \frac{12200}{350} = 34,9 \text{ A}$$

Rozdíl maximální a minimální okamžité hodnoty proudu Δi_d

$$\sigma_i = \frac{\Delta i_d}{I_d}$$

$$\Delta i_d = 2 \sigma_i I_d = 2 \cdot 0,25 \cdot 34,9 = 17,45 \text{ A}$$

Napětí na cívce –L101 a vlastní indukčnost

$$U_1 = U_L + U_2$$

$$U_L = U_1 - U_2 = 630 - 350 = 280 \text{ V}$$

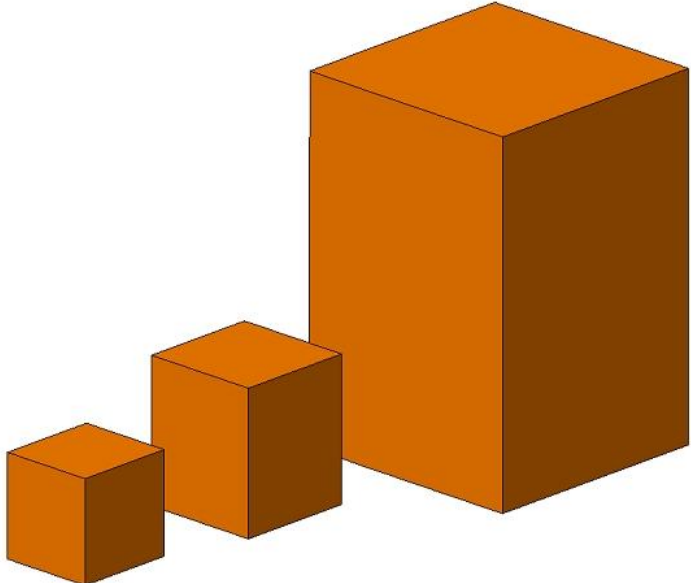
$$U_L = L \frac{di}{dt}$$

$$L = U_L \frac{dt}{di} = U_L \frac{T_1}{\Delta i_d} = 280 \frac{56 \cdot 10^{-6}}{17,45} = 0,88 \text{ mH}$$

Je zřejmé, že s rostoucí spínací frekvencí f_s klesá hodnota indukčnosti L .

V **Tab. 2.1** jsem uvedl rámcový návrh tří variant tlumivek společnosti Tronic s.r.o., který vychází z mého zadání pro 3 různé spínací frekvence. Tomu odpovídají rozměry a hmotnosti jednotlivých tlumivek.

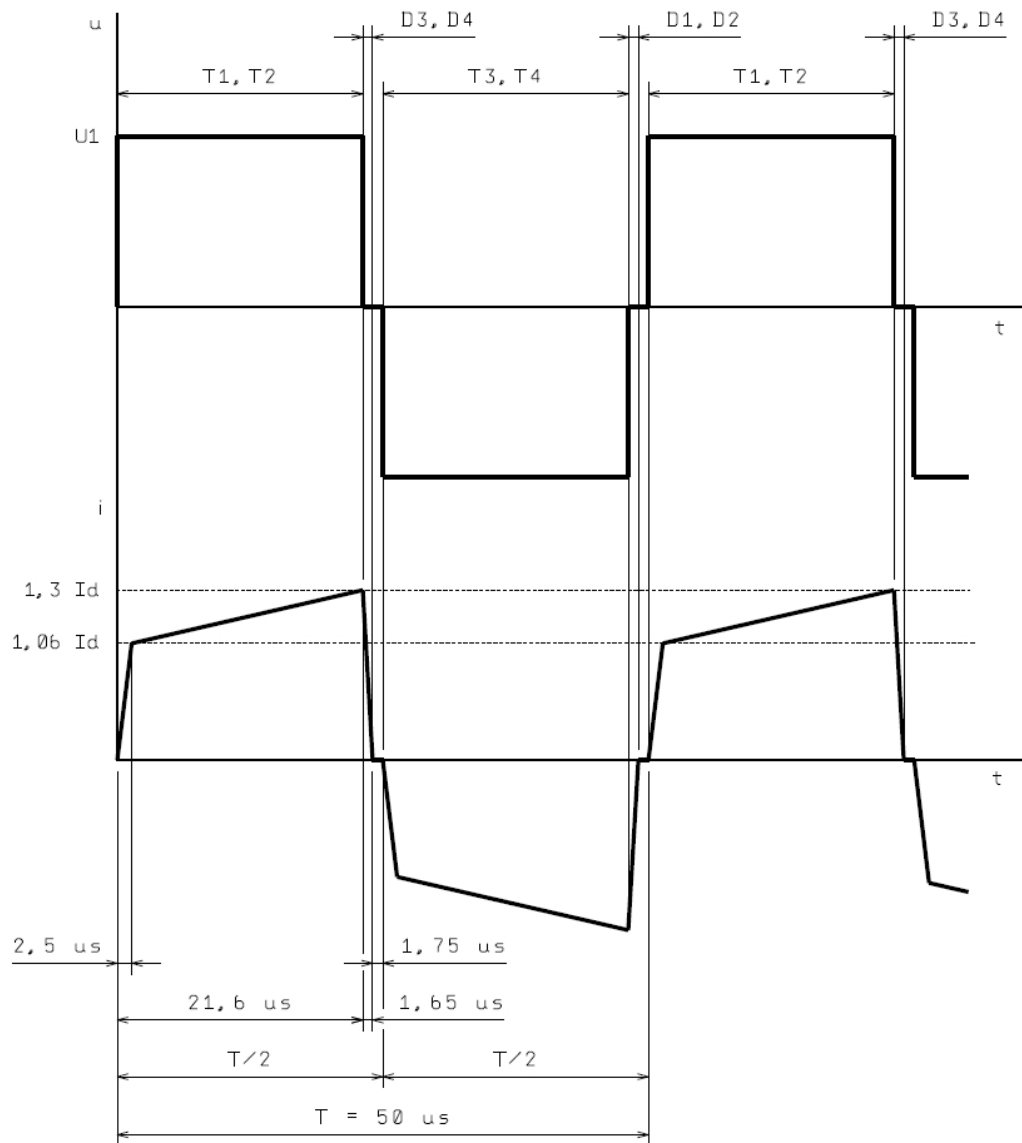
Tab. 2.1 Návrh tří variant tlumivek

Jmenovitý / Maximální proud	35 A / 60 A		
Spínací frekvence	100 kHz	10 kHz	1 kHz
Indukčnost	0,088 mH	0,88 mH	8,8 mH
Rozměry (š x v x h)	85 x 85 x 80 mm	100 x 120 x 100 mm	200 x 300 x 200 mm
Hmotnost (vinutí měď)	1,5 kg	2,4 kg	25 kg
Vizualizace rozměrů			

Pro realizaci pulzního měniče pro snižování napětí byl na základě výpočtu vybrán IGBT modul Semikron SKM200GB12T4.

Napěťový střídač

Na základě zkušeností a naměřených hodnot na napěťových střídačích je znám průběh proudu zátěží, viz **Obr. 2.4**.



Obr. 2.4 Napěťový střídač – průběh napětí a proudu

Vstupní napětí střídače je $U_1 = 350 \text{ V}$, velikost proudu $I_d = 34,9 \text{ A}$, spínací frekvence $f_s = 20 \text{ kHz}$, $T = 50 \text{ } \mu\text{s}$. Mrtvý čas (úhel) mezi jednotlivými takty trvá $1,75 \text{ } \mu\text{s}$. Jedná se o interval mezi vypnutím a zapnutím jednotlivých spínačů, aby nedošlo ke zkratu.

Směrnice rovnice přímky

$$i_l = k T_l + q$$

$$k = \frac{i_1}{T_1} + q$$

$$i(t) = \frac{i_1}{T_1} \cdot t$$

Velikost proudu v čase t

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

Směrnice přímky v intervalu $t = \langle 2,5, 21,6 \rangle \mu s$

$$k = \frac{\Delta i}{\Delta T} = \frac{1,3 I_d - 1,06 I_d}{21,6 - 2,5} = \frac{1,3 \cdot 34,9 - 1,06 \cdot 34,9}{21,6 - 2,5} = 0,44$$

$$i_l = k T_l + q$$

$$1,06 \cdot 34,9 = 0,44 \cdot 2,5 + q$$

$$q = 35,89$$

Výpočet střední hodnoty proudu tranzistorem

$$I_{d/T} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} \cdot \left\{ \int_0^{2,5 \cdot 10^{-6}} \frac{1,06 \cdot 34,9}{2,5 \cdot 10^{-6}} t dt + \int_{2,5 \cdot 10^{-6}}^{21,6 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{1,3 \cdot 34,9}{19,1 \cdot 10^{-6}} t + 35,89 \right) dt + \int_{21,6 \cdot 10^{-6}}^{50 \cdot 10^{-6}} \frac{0}{28,4 \cdot 10^{-6}} t dt \right\}$$

$$I_{d/T} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} \cdot \left\{ \frac{36,99}{2,5 \cdot 10^{-6}} \cdot \left[\frac{t^2}{2} \right]_0^{2,5 \cdot 10^{-6}} + \left[2,38 \cdot 10^6 \cdot \frac{t^2}{2} + 35,89 t \right]_{2,5 \cdot 10^{-6}}^{21,6 \cdot 10^{-6}} \right\}$$

$$I_{d/T} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} \cdot \left\{ \left[\frac{36,99}{2,5 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{(2,5 \cdot 10^{-6})^2}{2} \right] + \left[2,38 \cdot 10^6 \cdot \frac{(21,6 \cdot 10^{-6})^2}{2} + 35,89 \cdot 21,6 \cdot 10^{-6} \right] - \left[2,38 \cdot 10^6 \cdot \frac{(2,5 \cdot 10^{-6})^2}{2} + 35,89 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \right] \right\}$$

$$I_{a/T} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} \cdot \{ 4,62 \cdot 10^{-5} + 1,33 \cdot 10^{-3} - 9,72 \cdot 10^{-5} \}$$

$$I_{a/T} = 25,58 \text{ A}$$

Výpočet střední hodnoty proudu diodou

$$I_{a/D} = \left(\frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} \int_0^{1,65 \cdot 10^{-6}} \frac{1,3 \cdot 34,9}{1,65 \cdot 10^{-6}} t dt \right)$$

$$I_{a/D} = \left(\frac{45,37}{8,25 \cdot 10^{-11}} \cdot \left[\frac{t^2}{2} \right]_0^{1,65 \cdot 10^{-6}} \right)$$

$$I_{a/D} = \frac{45,37}{8,25 \cdot 10^{-11}} \cdot \frac{(1,65 \cdot 10^{-6})^2}{2}$$

$$I_{a/D} = 0,75 \text{ A}$$

Na základě výpočtu byly použity pro realizaci pulzního měniče pro snižování napětí rovněž IGBT moduly Semikron SKM200GB12T4.

Poznámka: Unifikace použitých komponent při návrhu zařízení snižuje výrobci náklady v rámci životního cyklu výrobku (vývoj, nákup, sklad, výroba, servis).

2.1.3 Výkonové ztráty vstupního měniče

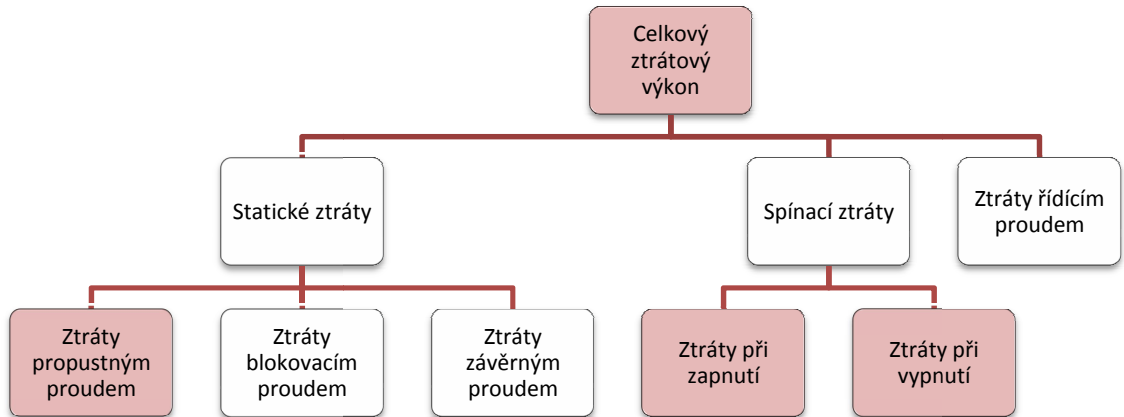
Průchod proudu polovodičovými součástkami způsobuje výkonové ztráty, kterými jsou tyto součástky zahřívány. Nadměrná teplota součástky působí nepříznivě na vlastnosti její polovodičové struktury, případně i na spoje v jejím konstrukčním uspořádání. Polovodičové součástky je proto nutno vhodně chladit a jejich ztrátový výkon omezovat.

Dimenzování součástek vychází z kontroly oteplení především jejich polovodičové struktury. Kontrola oteplení předpokládá znalost ztrátového výkonu a znalost parametrů charakterizujících odvod tepla ze součástky při zvoleném chladicím systému. Z **Obr. 2.5** je patrné, jak jsou rozlišovány celkové výkonové ztráty polovodičové součástky.

Obecně je ztrátový výkon určen součinem proudu i procházejícího součástkou a napětí u na součástce:

$$p = u \cdot i$$

Typický průběh ztrátového výkonu v závislosti na spínání polovodičové součástky je znázorněn na **Obr. 2.6**. Přijme-li se na místě ztrát střední hodnota ztrátového výkonu, pak zmíněný obrázek napovídá, že ztráty blokovacím, závěrným a řídicím proudem jsou zanedbatelné a činí jednotky procent celkových ztrát. Ztráty spínací je třeba respektovat až od vyšších spínacích kmitočtů (stovky Hz).

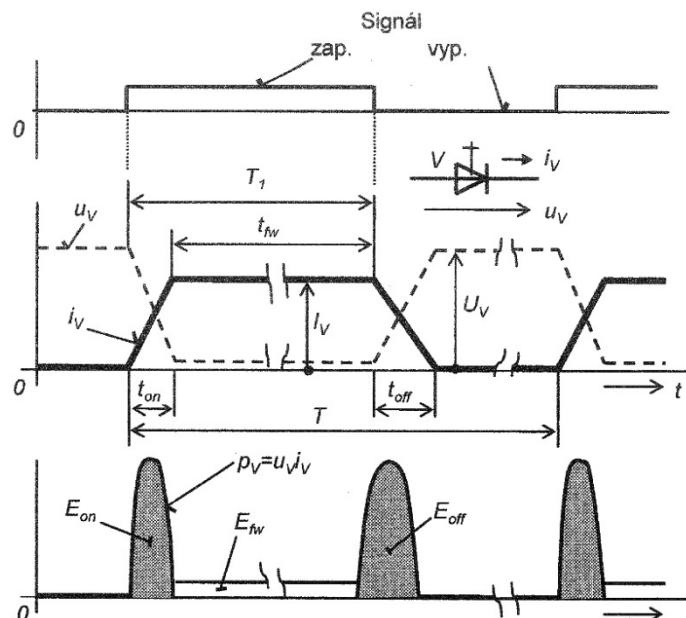


Obr. 2.5 Celkový ztrátový výkon spínací polovodičové součástky [2]

Při volbě součástek pro měniče s vnější (síťovou) komutací, tj. pro tyristorové a diodové usměrňovače, u nichž jsou běžné spínací kmitočty 50 Hz , jsou proto rozhodující pouze ztráty propustným proudem.

Při volbě součástek pro měniče s vlastní komutací, u nichž jsou běžně spínací kmitočty *stovky i tisíce Hz*, je třeba respektovat jak ztráty propustným proudem, tak i ztráty spínací. Spínací ztráty zde činí $\frac{1}{4}$ až $\frac{1}{2}$ celkových ztrát. Suma všech (podstatných) ztrát je nazývána celkovým (totálním) ztrátovým výkonem P_{tot} .

Při dimenzování součástek pro konkrétní měnič slouží k základní rychlé orientaci výpočet střední hodnoty ztrátového výkonu. [3]



Obr. 2.6 Ztráty v polovodičové součástce [3]

U pulzního měniče pro snižování napětí se zohledňují následující výkonové ztráty - ztráty tranzistoru IGBT a ztráty nulové diody.

Ztráty propustné - tranzistoru

Z grafu katalogového listu (viz příloha) IGBT modulu Semikron SKM200GB12T4 Fig. 1 *Output characteristic* bylo odečteno napětí U_{CE} na základě hodnoty I_C , kde $I_C = I_d$. Teplota přechodu $T_j = 150^\circ\text{C}$, $U_{GE} = 15\text{V}$.

$$P_{fw/T} = I_d U_{CE} z = 34,9 \cdot 1 \cdot 0,56 = 19,54 \text{ W}$$

Ztráty spínací - tranzistoru

Z grafu katalogového listu (viz příloha) Fig. 3 *Turn on/off energy* byla odečtena ztrátová energie pro I_C , kde I_C nabývá minimální hodnoty okamžitého proudu i_{LL} a maximální hodnoty okamžitého proudu i_{LH} . Platí pro $U_{CC} = 600 \text{ V}$, byl proveden přepočít pro $U_I = 630\text{V}$.

$$k = \frac{U_1}{U_{CC}} = \frac{630}{600} = 1,05$$

$$i_{LL} = \left(I_d - \frac{\Delta i_d}{2} \right) k = \left(34,9 - \frac{17,45}{2} \right) 1,05 = 27,49 \text{ A}$$

$$i_{LH} = \left(I_d + \frac{\Delta i_d}{2} \right) k = \left(34,9 + \frac{17,45}{2} \right) 1,05 = 45,81 \text{ A}$$

Ztráty při zapínání tranzistoru

$$P_{on/T} = f_s E_{on/T} (i_{LL}) = 10000 \cdot 0,005 = 50 \text{ W}$$

Ztráty při vypínání tranzistoru

$$P_{off/T} = f_s E_{off/T} (i_{LH}) = 10000 \cdot 0,007 = 70 \text{ W}$$

Ztráty celkové - tranzistoru

$$P_{tot/T} = P_{fw/T} + P_{on/T} + P_{off/T} = 19,54 + 50 + 70 = 139,54 \text{ W}$$

Ztráty propustné - diody

Z grafu katalogového listu (viz příloha) IGBT modulu Semikron SKM200GB12T4 Fig. 10 *Diode forward characteristic* bylo odečteno napětí U_F na základě hodnoty I_F , kde $I_F = I_d$. Teplota přechodu $T_j = 150^\circ\text{C}$.

$$P_{fw/D} = I_d U_F (1 - z) = 34,9 \cdot 1,1 \cdot (1 - 0,56) = 16,89 \text{ W}$$

Ztráty spínací - diody při vypínání diody

Z grafu katalogového listu (viz příloha) Fig. 3 *Turn on/off energy* byla odečtena ztrátová energie pro I_C , kde I_C nabývá minimální hodnoty okamžitého proudu i_{LL} .

$$P_{off/D} = f_s E_{off/D} (i_{LL}) = 10000 \cdot 0,005 = 50 \text{ W}$$

Ztráty celkové - diody

$$P_{tot/D} = P_{fw/D} + P_{off/D} = 16,89 + 50 = 66,89 \text{ W}$$

Z výpočtu je zřejmé, že propustné ztráty jsou závislé na výkonu a ztráty spínací na frekvenci. [2]

Pro napěťový střídač se zohledňují následující výkonové ztráty tranzistorů IGBT a ztráty zpětných diod.

Ztráty propustné - tranzistoru

Z grafu katalogového listu (viz příloha) IGBT modulu Semikron SKM200GB12T4 Fig. 1 *Output characteristic* bylo odečteno napětí U_{CE} na základě hodnoty I_C , kde $I_C = I_d$. Teplota přechodu $T_j = 150^\circ\text{C}$, $U_{GE} = 15\text{V}$.

$$P_{fw/T} = I_{d/T} \cdot U_{CE} = 25,58 \cdot 0,85 = 21,74 \text{ W}$$

Ztráty spínací - tranzistoru

Z grafu katalogového listu (viz příloha) Fig. 3 *Turn on/off energy* byla odečtena ztrátová energie pro I_C , kde I_C nabývá hodnoty $1,06 I_d$ a $1,3 I_d$. Platí pro $U_{CC} = 600 \text{ V}$, byl proveden přepočít pro $U_l = 350 \text{ V}$.

$$k = \frac{U_l}{U_{CC}} = \frac{350}{600} = 0,58$$

$$i_{on} = 1,06 \cdot I_d \cdot k = 1,06 \cdot 34,9 \cdot 0,58 = 21,46 \text{ A}$$

$$i_{off} = 1,3 \cdot I_d \cdot k = 1,3 \cdot 34,9 \cdot 0,58 = 26,31 \text{ A}$$

Ztráty při zapínání tranzistoru

$$P_{on/T} = f_s E_{on/T} (i_{on}) = 20000 \cdot 0,004 = 80 \text{ W}$$

Ztráty při vypínání tranzistoru

$$P_{off/T} = f_s E_{off/T} (i_{off}) = 20000 \cdot 0,0048 = 96 \text{ W}$$

Ztráty celkové - tranzistoru

$$P_{tot/T} = P_{fw/T} + P_{on/T} + P_{off/T} = 8,27 + 80 + 96 = 184,27 \text{ W}$$

Ztráty celkové – 4 tranzistorů v obvodu napěťového střídače

$$P_{tot/4T} = 4 \cdot P_{tot/T} = 4 \cdot 184,27 = 737,08 \text{ W}$$

Ztráty propustné - diody

Z grafu katalogového listu (viz příloha) IGBT modulu Semikron SKM200GB12T4 Fig. 10 *Diode forward characteristic* bylo odečteno napětí U_F na základě hodnoty I_F , kde $I_F = I_d$. Teplota přechodu $T_j = 150^\circ\text{C}$.

$$P_{fw/D} = I_d U_F = 0,75 \cdot 0,1 = 0,08 \text{ W}$$

Ztráty spínací – diody při vypínání diody

Z grafu katalogového listu (viz příloha) *Fig. 3 Turn on/off energy* byla odečtena ztrátová energie pro I_C , kde I_C nabývá okamžité hodnoty proudu i_d při vypínání diody. Proud i_d se v tomto okamžiku blíží k nule.

$$P_{off/D} = f_s E_{off/D} (i_d) = 20000 \cdot 0,0001 = 2 \text{ W}$$

Ztráty celkové - diody

$$P_{tot/D} = P_{fw/D} + P_{off/D} = 0,08 + 2 = 2,08 \text{ W}$$

Ztráty celkové - 4 diod v obvodu napěťového střídače

$$P_{tot/4D} = 4 \cdot P_{tot/D} = 4 \cdot 2,08 = 8,32 \text{ W}$$

2.2 Dimenzování a realizace transformátoru a tlumivky (-A3)

Jednotka -A3 je složena z jednofázového snižovacího transformátoru (-T101) a tlumivky (-L101), která je součástí Vstupního měniče (-A1).

Požadavky na tlumivku –L101 jsou následující [7]:

Indukčnost	1 mH
Frekvence	10 kHz
Jmenovitá hodnota proudu (ss)	40 A

Výsledné parametry tlumivky stanovené výrobcem STS GmbH & Co. KG [7]:

Rozměry (š x v x h)	145 x 140 x 120
Celková hmotnost	10 kg
Hmotnost vinutí (měď)	5,3 kg
Ztráty ve vinutí	35 W
Ztráty v železe	5 W

Požadavky na transformátor –T101 jsou následující [7]:

Jmenovitý výkon	12 kVA
Frekvence	20 kHz
Primární napětí	400 V
Sekundární napětí	130 V

Výsledné parametry transformátoru stanovené výrobcem STS GmbH & Co. KG [7]:

Rozměry (š x v x h)	207 x 142 x 100
Celková hmotnost	8,5 kg
Hmotnost vinutí (měď)	3,8 kg
Ztráty ve vinutí	22 W
Ztráty v železe	8 W

Převod (ideálního) transformátoru

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{400}{130} = 3,08$$

2.2.1 Výkonové ztráty transformátoru a tlumivky

Ztráty celkové - tlumivky (-L101) a transformátoru (-T101)

$$P_{tot/-L101,-T101} = 35 + 5 + 22 + 8 = 70 \text{ W}$$

2.3 Dimenzování výstupního usměrňovače (-A2)

Výstupní usměrňovač (-A2) je tvořen jednofázovým můstkovým usměrňovačem.

2.3.1 Teoretický rozbor výstupního usměrňovače – obecný popis funkce

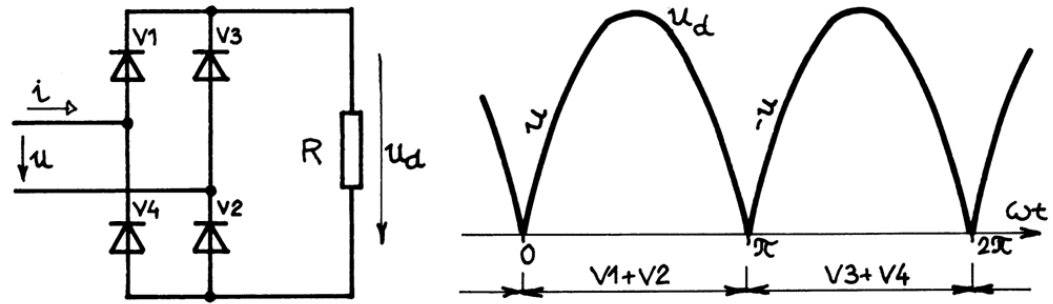
Usměrňovač v můstkovém spojení je v podstatě sériové spojení dvou uzlových usměrňovačů. Obecně mohou být můstková spojení též m-fázová. Prakticky se však používají jen trojfázová a jednofázová.

Při dvojpulzním můstkovém zapojení jsou využívány obě půlvlny (dva pulzy) každé periody střídavého proudu k získání stejnosměrného proudu na výstupu usměrňovače.

Na **Obr. 2.7** jsou naznačeny průběhy obou usměrňovaných napětí pro případ neřízeného usměrňovače. Je-li fázové napětí u (vstupní napětí na můstku) kladné, prochází proud přes diodu $V1$, zátěž R a přes diodu $V2$. Je-li napětí u záporné, prochází proud přes diodu $V3$, zátěž R a přes diodu $V4$.

Termín *komutační skupina* je používán pro skupinu hlavních větví polovodičových součástek měniče, které cyklicky komutují nezávisle na jiných.

Přes zátěž R tedy prochází pulzující stejnosměrný proud a je na ní pulzující stejnosměrné napětí u_d . Při dvojpulzním můstkovém zapojení jsou tedy využity obě půlvlny sinusového střídavého napětí a střední hodnota usměrňovaného napětí na prázdko $U_{dAV(0)} \sim 0,9 U$. [1,5]

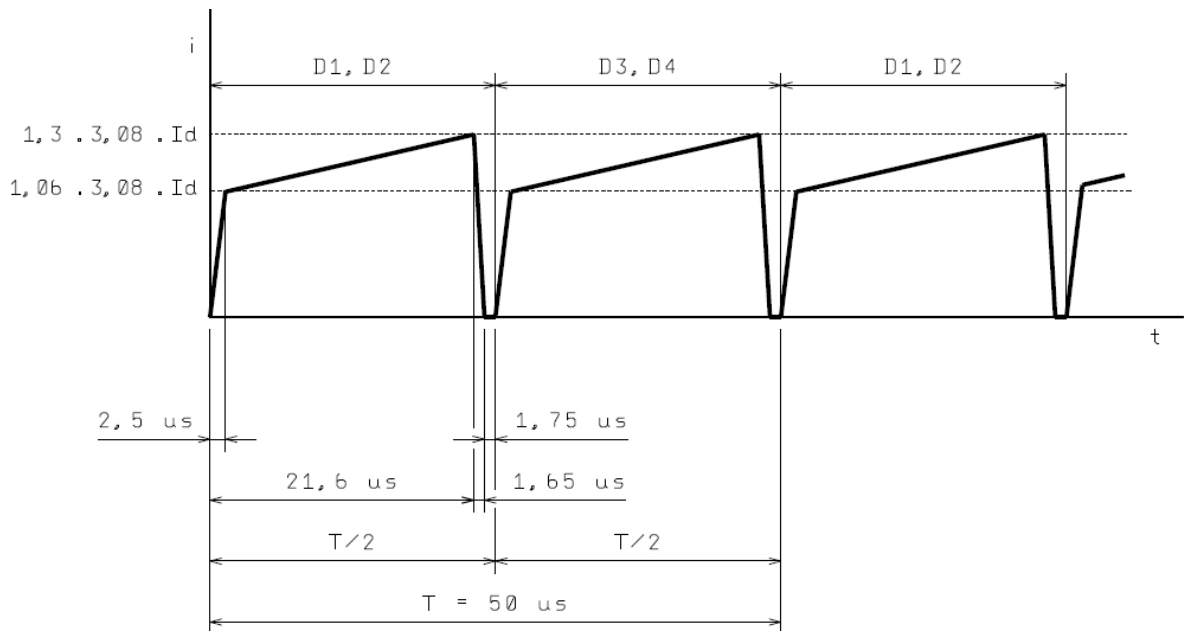


Obr. 2.7 Jednofázový můstkový usměrňovač a průběh usměrněného napětí [1]

2.3.2 Popis realizace výstupního usměrňovače

Vstupní napětí usměrňovače je $U_1 = 130 \text{ V}$, velikost proudu $I_d = 34,9 \text{ A}$, frekvence $f = 20 \text{ kHz}$, $T = 50 \mu\text{s}$.

Průběh usměrněného proudu je vidět na Obr. 2.8.



Obr. 2.8 Průběh usměrněného proudu

Pro realizaci výstupního usměrňovače jsou vybrány diodové moduly IXYS DSEP 2x 101-04A.

Výpočet střední hodnoty proudu diodovým modulem

$$I_{d/D} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} \cdot \left\{ \int_0^{2,5 \cdot 10^{-6}} \frac{1,06 \cdot 3,08 \cdot 34,9}{2,5 \cdot 10^{-6}} t dt + \int_{2,5 \cdot 10^{-6}}^{21,6 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{1,3 \cdot 3,08 \cdot 34,9}{19,1 \cdot 10^{-6}} t + 35,89 \right) dt + \int_0^{1,65 \cdot 10^{-6}} \frac{1,3 \cdot 3,08 \cdot 34,9}{1,65 \cdot 10^{-6}} t dt \right\}$$

$$I_{d/D} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} \cdot \left\{ 4,56 \cdot 10^7 \cdot \left[\frac{t^2}{2} \right]_0^{2,5 \cdot 10^{-6}} + \left[7,32 \cdot 10^6 \cdot \frac{t^2}{2} + 35,89 t \right]_{2,5 \cdot 10^{-6}}^{21,6 \cdot 10^{-6}} + 8,47 \cdot 10^7 \cdot \left[\frac{t^2}{2} \right]_0^{1,65 \cdot 10^{-6}} \right\}$$

$$I_{d/D} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} \cdot \left\{ \left[4,56 \cdot 10^6 \cdot \frac{(2,5 \cdot 10^{-6})^2}{2} \right] + \left[7,32 \cdot 10^6 \cdot \frac{(21,6 \cdot 10^{-6})^2}{2} + 35,89 \cdot 21,6 \cdot 10^{-6} \right] - \left[7,32 \cdot 10^6 \cdot \frac{(2,5 \cdot 10^{-6})^2}{2} + 35,89 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} \right] + \left[8,47 \cdot 10^7 \cdot \frac{(1,65 \cdot 10^{-6})^2}{2} \right] \right\}$$

$$I_{d/D} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} \cdot \{ 1,43 \cdot 10^{-4} + 2,48 \cdot 10^{-3} - 1,13 \cdot 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-4} \}$$

$$I_{d/D} = 52,5 A$$

Střední hodnota usměrněného proudu

$$I_d = 2 \cdot I_{d/D} = 2 \cdot 52,5 = 105 A$$

2.3.3 Výkonové ztráty výstupního usměrňovače

Při výpočtu výkonových ztrát usměrňovače se zohledňují ztráty 4 diodových modulů.

Ztráty propustné - diody

Z grafu katalogového listu (viz příloha) diody IXYS DSEP 2x 101-04A Fig. 1 Forward current I_F versus V_F bylo odečteno napětí U_F na základě hodnoty I_F , kde $I_F = I_{d/D}$. Teplota přechodu $T_j = 150^\circ C$.

$$P_{fw/D} = I_{d/D} U_F = 52,5 \cdot 1,2 = 63 W$$

Modul obsahuje 2 paralelně řazené diody. Ztráty jednoho diodového modulu jsou

$$P_{fw/Dmodul} = 2 \cdot P_{fw/D} = 2 \cdot 63 = 126 \text{ W}$$

Ztráty spínací – diody při vypínání diody

Použitá usměrňovací dioda se vyznačuje extrémně nízkými spínacími ztrátami. Jedná se o diodu s tzv. měkkým zotavením: velmi krátkou dobou zpětného zotavení (reverse recovering) t_{rr} v řádu desítek nanosekund a nízkou maximální hodnotou zotavovacího proudu I_{rrM} v řádu jednotek ampér. Z toho důvodu jsou tyto ztráty zanedbány. [4]

Ztráty celkové - čtyř diodových modulů v obvodu usměrňovače

$$P_{tot/4D} = 4 \cdot P_{fw/Dmodul} = 4 \cdot 126 = 504 \text{ W}$$

3 Konstrukční řešení nabíječe baterie

3.1 Požadavky na konstrukci měniče

Elektrické a mechanické požadavky na měnič jsou přehledně uvedeny v kapitole

1.1 Technické parametry nabíječe.

Další požadavky definované zákazníkem, které je třeba respektovat, jsou zejména:

- Způsob manipulace se skříní
- Upevnění skříně v prostoru trakčního vozidla
- Umístění sacího a výfukového otvoru vzduchového chlazení
- Požadavky na kryty skříně
- Umístění konektorů na skříní měniče

3.2 Konstrukce nabíječe

Zařízení jsem navrhl pomocí CAx systému Catia V5 – softwaru pro 3D konstruování.

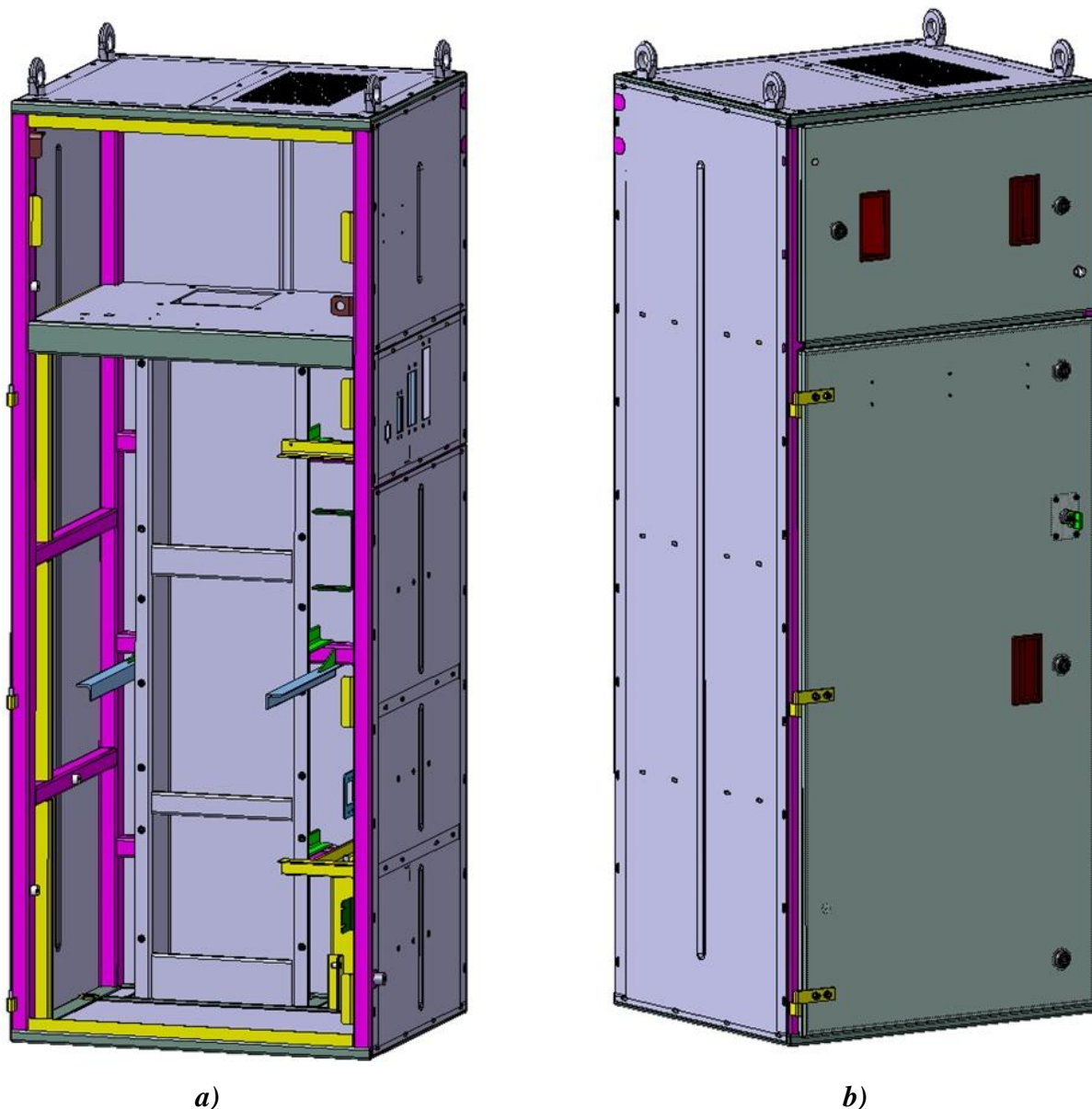
Konstrukce nabíječe je řešena jako stojanová skříň. Pro jednoduchou a bezpečnou manipulaci pomocí zdvihací techniky jsou do horního rámu skříně montovány 4 šrouby M16 s oky.

Skříň měniče je umístěna v prostoru strojovny trakčního vozidla. Dolní rám skříně je fixován upevňovacími šrouby k rámu podlahy vozidla, na konkrétní místo. V horní části je skříň zajištěna pomocí 2 konzol přišroubovaných k držákům na stěně strojovny.

Vzduch pro chlazení měniče je nasáván skrz mřížku stropem skříně, přímo z prostoru strojovny. Výstup vzduchu je realizován otvorem v dolním rámu, v podlaze měniče.

Kostra skříně je ocelová. Jedná se o svařenec z uzavřených obdélníkových profilů. Dolní a horní rám z profilů o rozměru 40x20x2 mm. Stojny a příčky z profilů o rozměrech 40x30x2 a 30x30x2 mm. Stěny skříně jsou z ocelového plechu o tloušťce 1,5 mm.

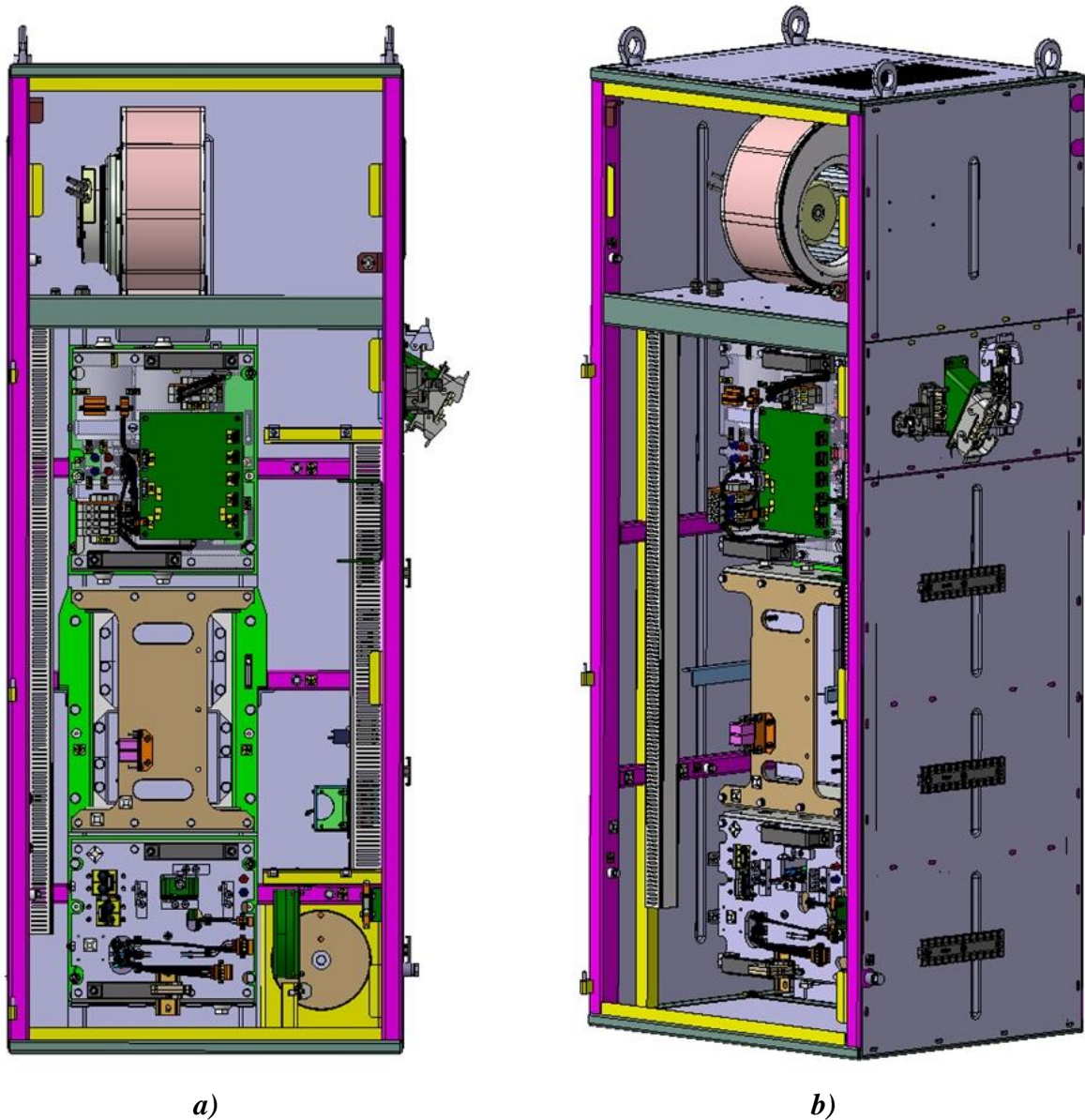
Pro vnitřní konstrukci - chladicí kanál, příčku, držáky, výztuhy, lávky a montážní plechy jsou použity následující polotovary: tyče průřezu L o rozměrech 25x25x3 mm a 20x20x3 mm, profil o rozměru 50x20x2 mm, plechy o tloušťce 2 mm, 2,5 mm, 3 mm a tyče kruhové o průměrech 6, 16 a 20 mm. Viz **Obr. 3.1 a**.



Obr. 3.1 a) Kostra měniče, b) Kostra měniče s kryty (axonometrické pohledy) [7]

Kryty skříně jsou hliníkové. Vrchní kryt je plně odnímatelný. Je osazen dvěma kompresními zámky, plastovými madly, vodícím a zemnicím kolíkem. Hliníkové přední dveře s kovovými venkovními panty jsou osazeny plastovým madlem, třemi kompresními zámky a jedním bezpečnostním zámekem - **Obr. 3.1 b**.

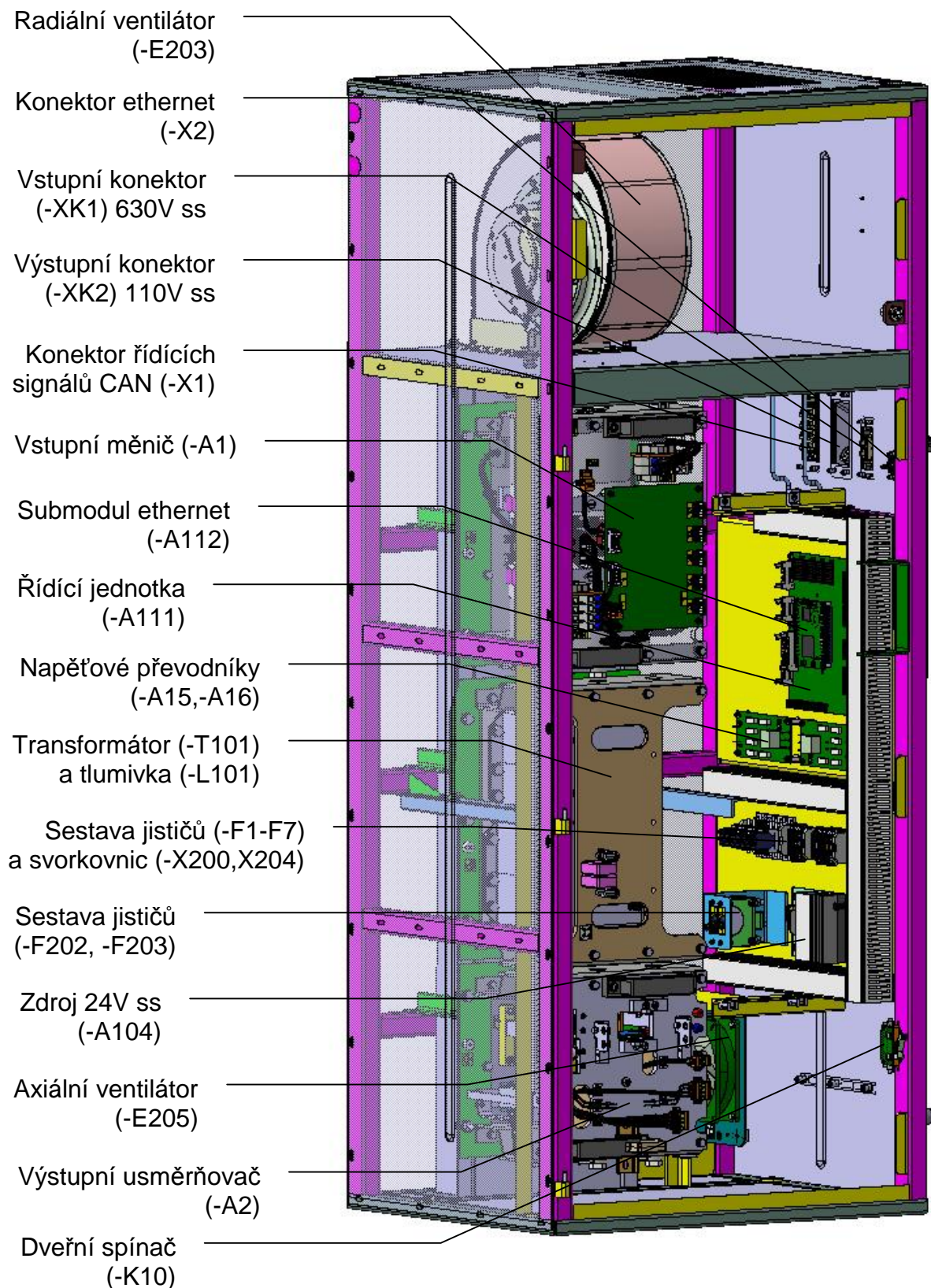
Prostor pro silnoproudé, ovládací a komunikační konektory je na pravém boku skříně, při pohledu zepředu – viz **Obr. 3.2**.



Obr. 3.2 Elektrovýzbroj nabíječe: a) pohled z předu, b) axonometrický pohled [7]

Horní čtvrtina skříně je vyhrazena jako prostor pro ventilátor chlazení. Jedná se o tzv. nečistý prostor, stupeň krytí je IP20. Radiální ventilátor v provedení IP54 nasává vzduch z prostoru strojovny trakčního vozidla a vhání ho do chladicího kanálu. V prostoru ventilátoru není umístěno žádné další elektrické zařízení. Proto zde nehrozí úraz elektrickým proudem dotykem živých částí. Z toho důvodu není nutné vnější kryt vybavit bezpečnostním zámkem.

Ve vnitřním prostoru měniče, označovaném jako tzv. čistý prostor, se nachází vlastní elektrovýzbroj. Prostor ventilátoru a čistý prostor je vzájemně oddělen nepropustnou příčkou. Stupeň krytí čistého prostoru je IP44, z důvodu zamezení vniku velmi drobných nečistot i stříkající vodě. Kvůli ochraně osob a zařízení jsou dveře vybaveny bezpečnostním zámkem. Otevření dveří je signalizováno dveřním spínačem.



Obr. 3.3 Popis elektrovýzbroje nabíječe baterie (axonometrický pohled) [7]

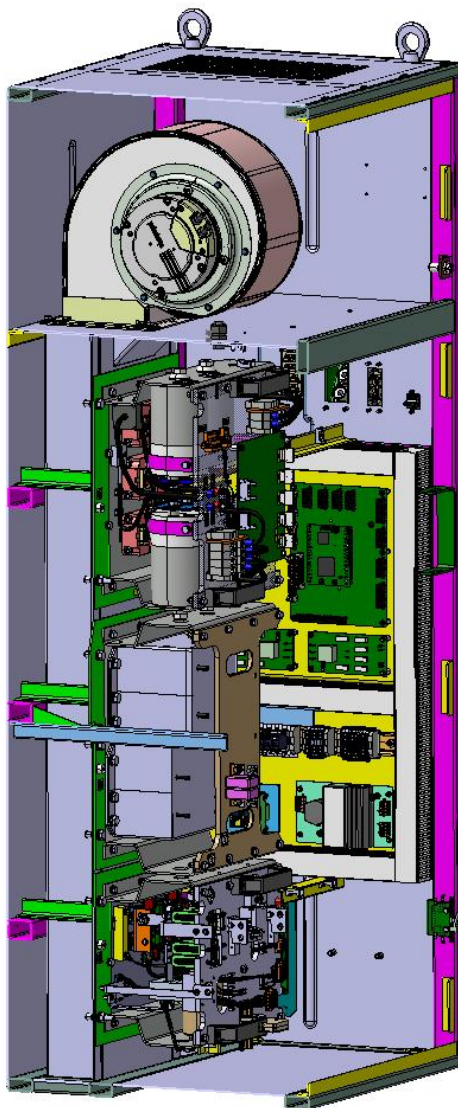
Umístění elektrovýzbroje měniče a její stručný popis je patrný z axonometrického pohledu **Obr. 3.3**.

Měnič tvoří tři samostatné jednotky – bloky:

- Vstupní měnič (-A1)
- Transformátor (-T101) a tlumivka (-L101) – blok (-A3)
- Výstupní usměrňovač (-A2)

Bloky jsou logicky umístěny v sérii do prostoru chladicího kanálu (**Obr. 3.4**). Toto rozčlenění umožňuje snadnou zaměnitelnost bloků a tím rychlý a efektivní servis zařízení v případě poruchy.

Všechny elektrotechnické komponenty měniče jsou funkčně pospojovány vodiči a kabely odpovídajícího průřezu. Kabely jsou taženy v předepsaných trasách pomocí kabelových kanálů, lávek a příchyttek.



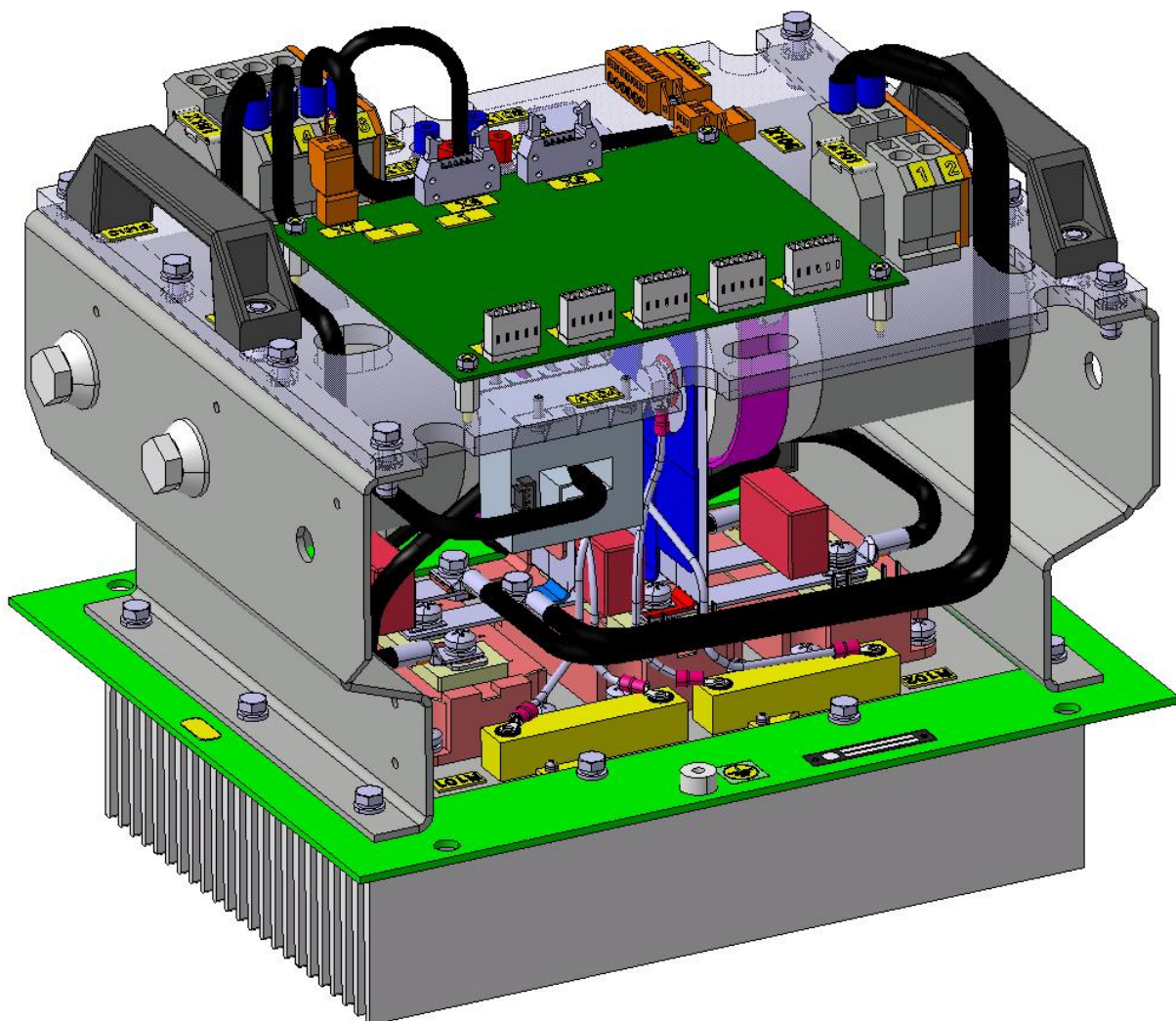
Obr. 3.4 Rozmístění bloků (axonometrický pohled – řez) [7]

3.3 Vstupní měnič (-A1)

Základnu Vstupního měniče tvoří chladič KE 215 (viz katalogový list v příloze) o délce 303 mm. Na něj jsou umístěny IGBT moduly a rezistory, které pro svou funkci vyžadují odvádění tepla ztrátového výkonu. Na chladič je umístěn ocelový rám, který dosedá na otvor v chladicím kanálu určený pro tento konkrétní blok. Rám je z důvodu utěsnění styčné plochy s chladicím kanálem podlepen těsněním.

Dvě hliníkové bočnice slouží jako nosiče horní desky a zároveň jsou v nich upevněny elektrolytické kondenzátory. Horní deska z izolačního materiálu UPM je určena pro upevnění vstupní a výstupní svorkovnice, konektorů, kondenzátorů, převodníku proudu, měřících svorek a řídicí desky.

Elektrotechnické součástky a obvody jsou pospojovány měděnými pasy, vodiči a kabely odpovídajícího průřezu.



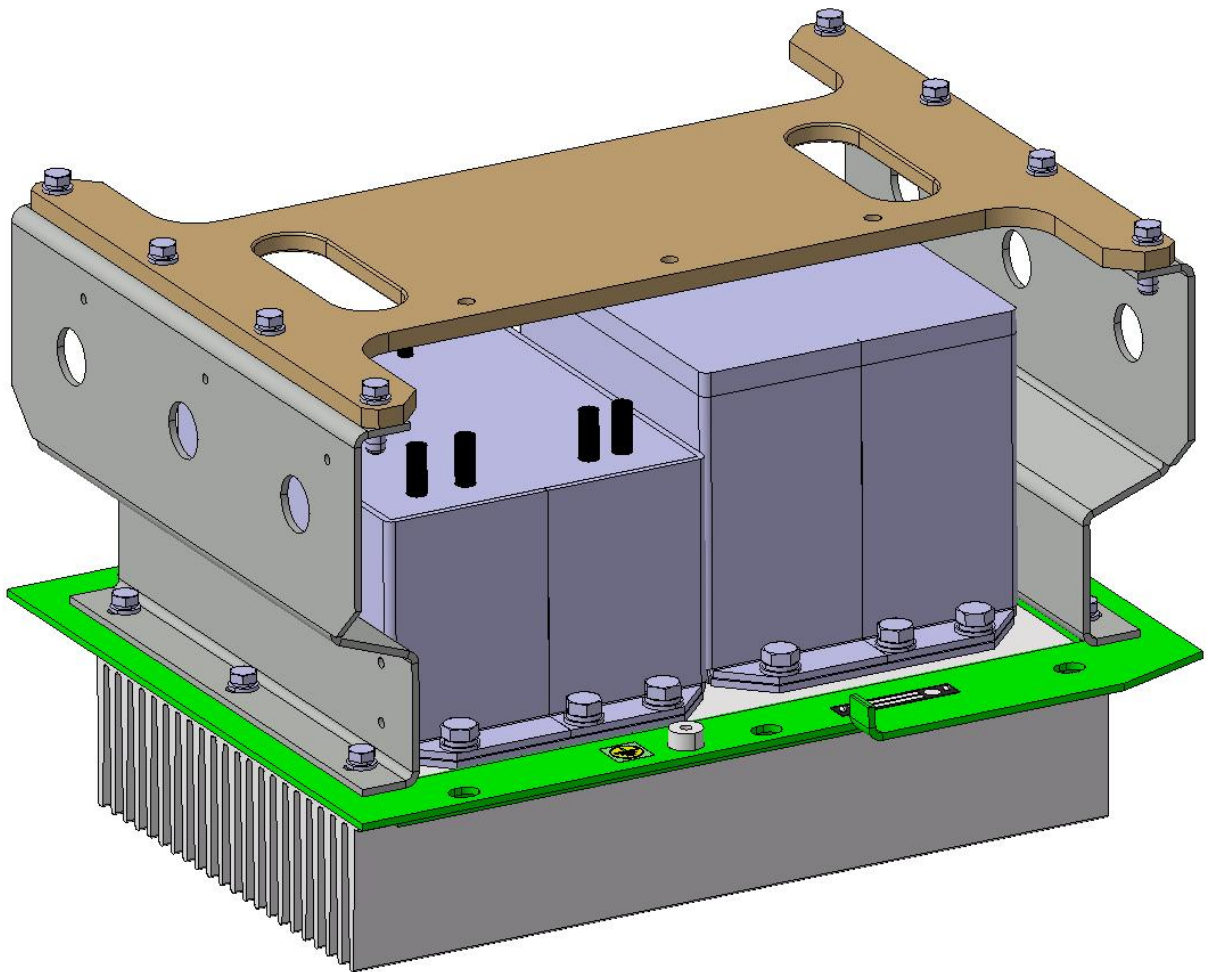
Obr. 3.5 Vstupní měnič (-A1) [7]

3.4 Transformátor a tlumivka (-A3)

Transformátor a tlumivka jsou přišroubovány na chladič KE 215 o délce 334 mm. Konstrukce vinutých dílů je navržena tak, aby byly schopny odvádět ztrátové teplo skrz dolní kontaktní plochu.

K chladiči je upevněn ocelový rám, který tvoří styčnou plochu s chladicím kanálem. Rám je podlepen těsněním. Na dvě hliníkové bočnice je připevněna deska z izolantu UPM, která slouží jako madlo pro uchopení bloku a také jako nosič kabelové trasy.

Primárním důvodem umístění transformátoru a tlumivky na chladič je odvedení ztrátového tepla z vnitřního prostoru nabíječe. Vnitřní prostor pro elektrovýzbroj má krytí IP44, a proto je zde každý zdroj tepla nežádoucí.



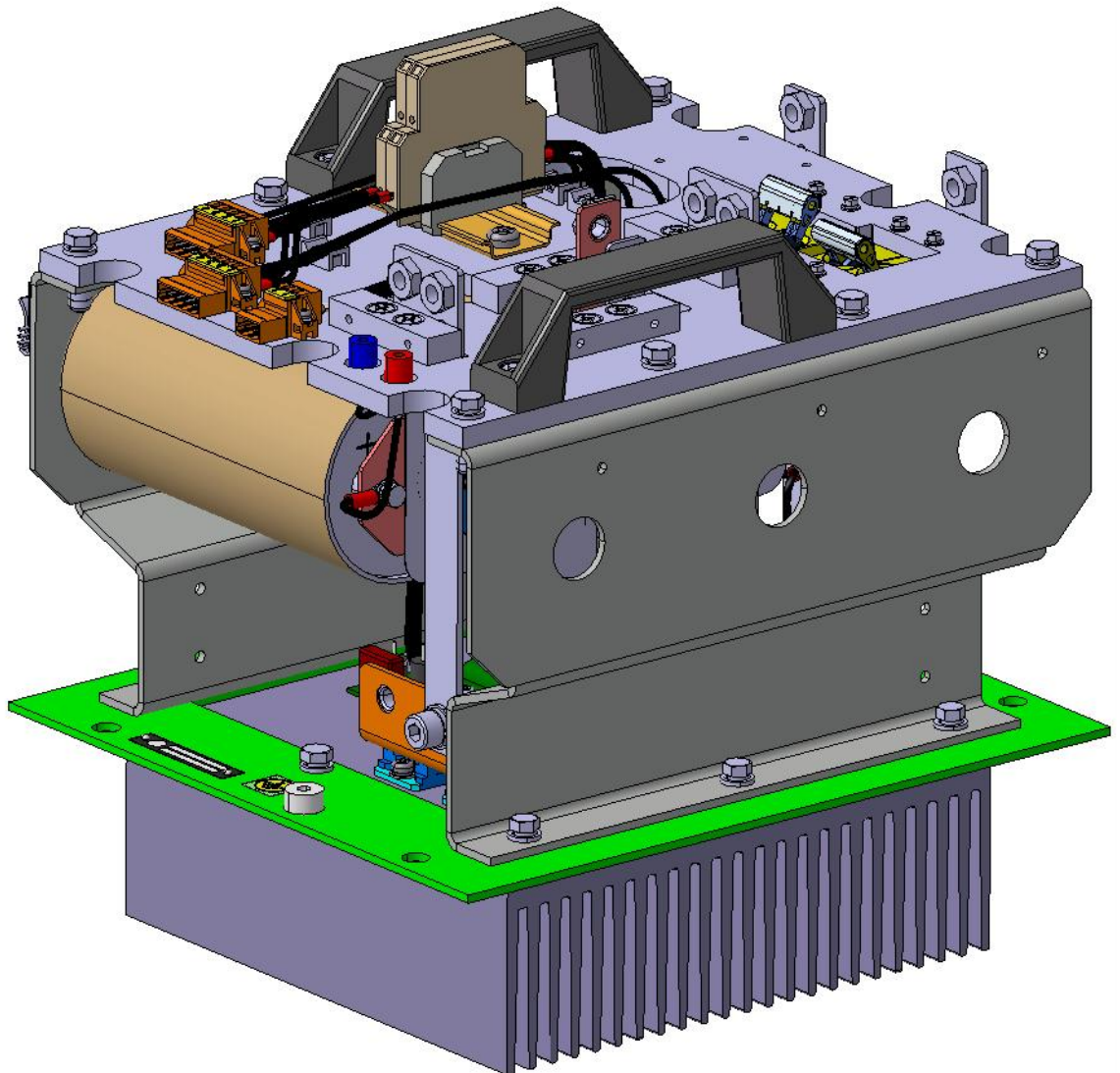
Obr. 3.6 Transformátor (-T101) a tlumivka (-L101) – blok (-A3) [7]

3.5 Výstupní usměrňovač (-A2)

Základna Výstupního usměrňovače je tvořena chladičem KE 215 o délce 213 mm. Na něj jsou umístěny usměrňovací diody a součástky, které je třeba chladit. K chladiči je přišroubován ocelový rám, který dosedá na otvor v chladicím kanálu určený pro tento blok. Rám je z důvodu utěsnění styčné plochy s chladicím kanálem podlepen těsněním.

Hliníkové bočnice slouží jako nosič horní desky a také pro upevnění válcových elektrolytických kondenzátorů. Horní deska z izolačního materiálu UPM je určena pro umístění vstupních a výstupních připojovacích bodů, konektorů, jističů a měřících svorek.

Elektrotechnické komponenty jsou pospojovány měděnými pasy, vodiči a kabely odpovídajícího průřezu.

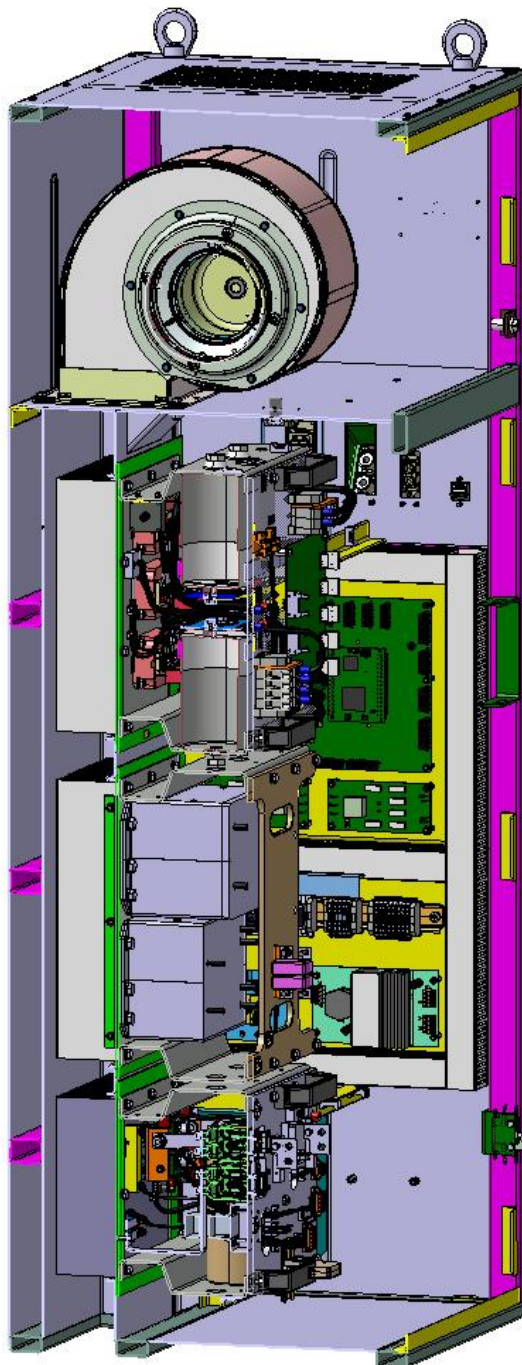


Obr. 3.7 Výstupní usměrňovač (-A2) [7]

4 Chladicí systém měniče

4.1 Konstrukční řešení

Pro chlazení měniče je navržen systém AF (air-forced), tedy vzduchové chlazení s nucenou ventilací. Radiální ventilátor (-E203) nasává vzduch skrz mřížku umístěnou ve stropě skříně přímo z vnitřního prostoru strojovny trakčního vozidla.



Obr. 4.1 Řez chladicím kanálem (axonometrický pohled) [7]

Vzduch proudí chladicím kanálem obdélníkového průřezu, kde obtéká žebra chladičů jednotlivých bloků a odvádí z nich teplo výstupním otvorem v podlaze měniče. Jednotlivé bloky a jejich hliníkové chladiče jsou umístěny v sérii, takzvaně v zákrytu.

Vnitřní čistý prostor skříně je navržen v krytí IP44. Pro rovnoměrné rozložení teploty a cirkulaci vzduchu v tomto prostoru byl umístěn v dolní části skříně malý axiální ventilátor (-E205). Ten zároveň zajišťuje přenos tepla prouděním z povrchu válcových elektrolytických kondenzátorů, které jsou součástí Výstupního usměrňovače (-A2).

4.2 Analýza proudění a sdílení tepla

Pro analýzu proudění včetně sdílení tepla jsem použil software SolidWorks Flow Simulation. Jedná se o nástroj pro výpočet proudění tekutin (CFD - computational fluid dynamics) numerickou metodou (metoda konečných objemů), který umožňuje rychle a jednoduše simulovat proudění kapalin a plynů, včetně sdílení tepla a analyzovat rozložení rychlosti, tlaku i další jevy. [13]

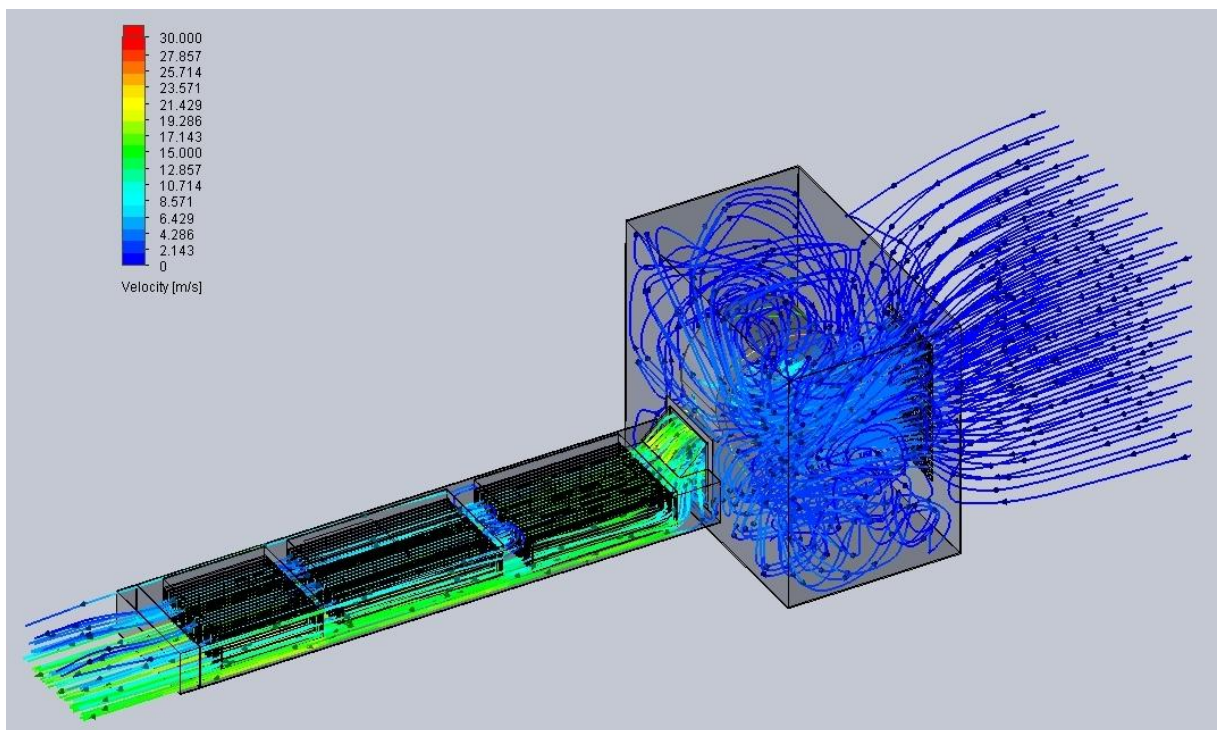
Postup při definování úlohy pro výpočet je následující:

- Vytvoření (příp. načtení) 3D modelu objektu, který bude analyzován - tedy modelu chladicího kanálu a prostoru ventilátoru včetně ventilátoru. Rozmístění chladičů do kanálu, umístění jednotlivých zdrojů tepla (VPS součástek a vinutých dílů) na chladiče.
- Nastavení podmínek simulace - interní analýza, sdílení tepla vedením, prouděním a sáláním. Vliv gravitace, vzduch jako chladicí médium. Materiál chladičů je hliník, materiál kanálu ocel. Drsnost materiálů 20 μm .
- Počáteční podmínky – atmosférický tlak 101,325 kPa, teplota 30° C. Definování ztrátových výkonů jednotlivých prvků na chladičích.
- Návrh ventilátoru – radiální ventilátor, interní (vnitřní analýza), směr rotace, otáčky 2400 ot/min, plocha nasávání, plocha výfuku vzduchu. Definice závislosti tlakové ztráty P_{fa} [Pa] na objemovém průtoku V [m^3/s] – viz katalogový list ventilátoru v příloze.
- Nastavení výpočtu – počáteční nastavení sítě (velikost výpočtových bodů, počet bodů, možnost zjemnění sítě), počet iterací v závislosti na konvergenci s konkrétní přesností
- Cíle výpočtu (ustálené hodnoty) – teplota chladičů (minimální, maximální, průměrná) a objemový průtok

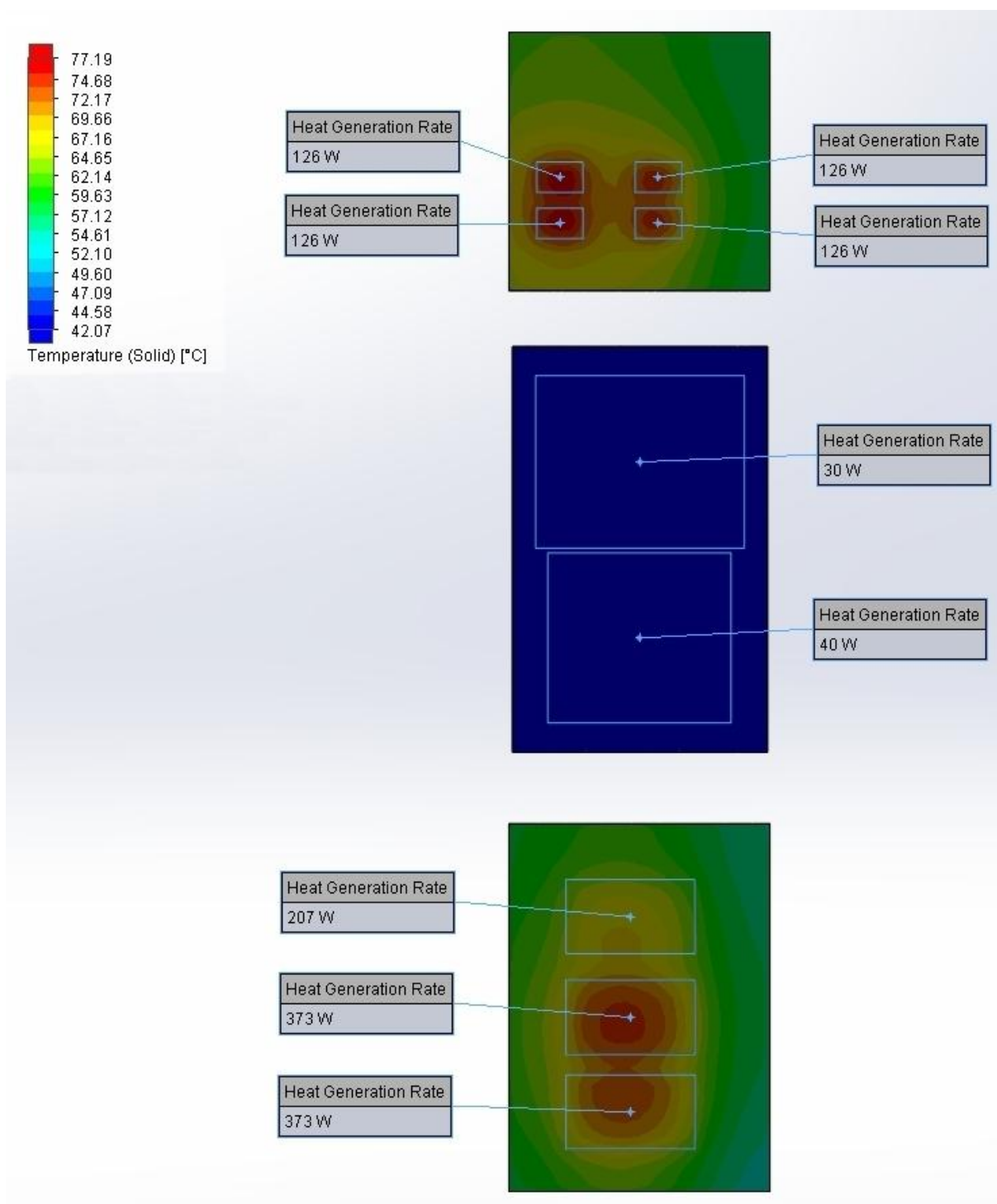
Výsledky simulace jsou zobrazeny v následující tabulce **Tab. 4.1** a na obrázcích **Obr. 4.2** až **Obr. 4.6**.

Tab. 4.1 Výsledky analýzy proudění a sdílení tepla [7]

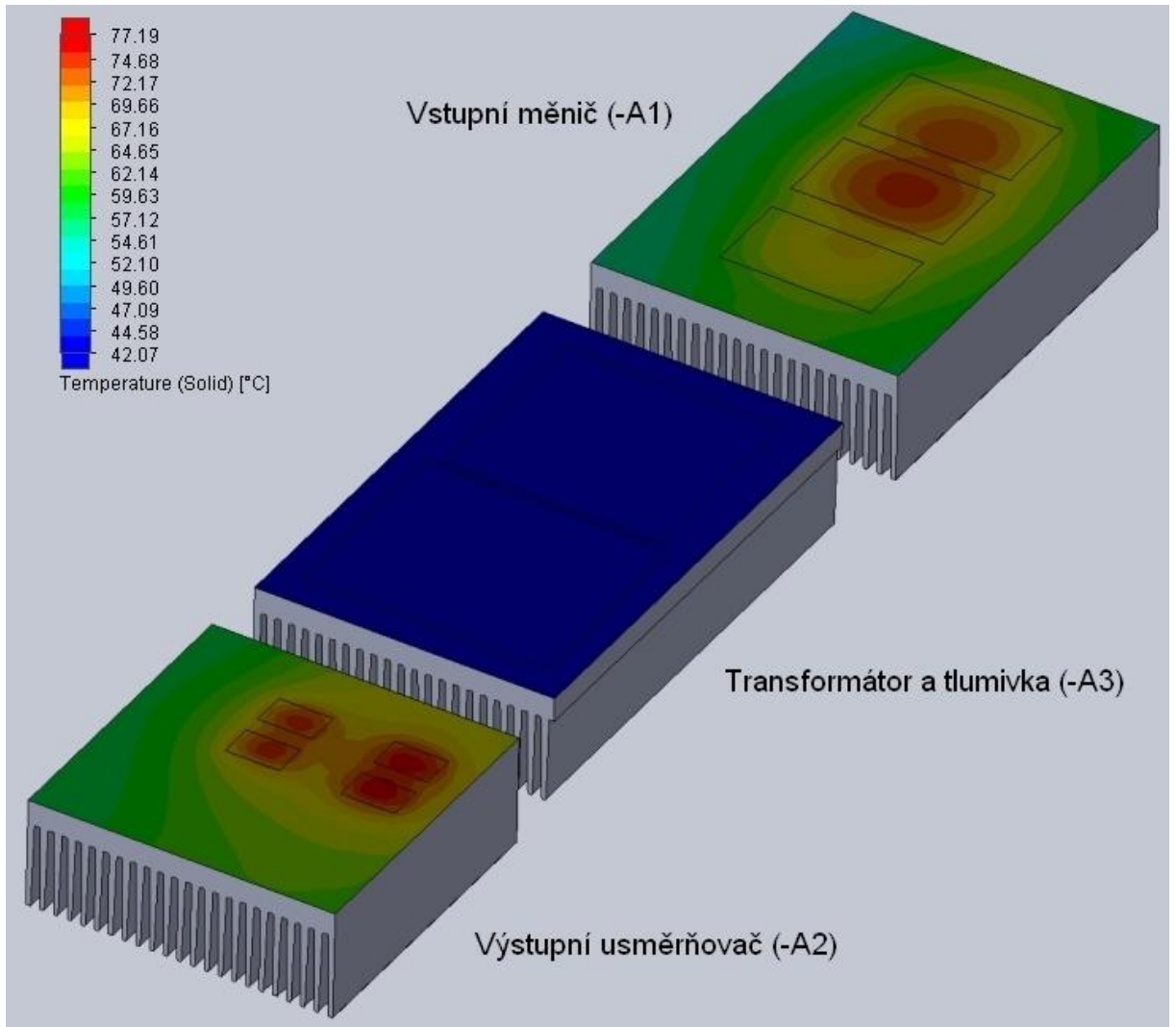
Sledovaná veličina		Hodnota	Jednotka
Chladič Vstupní měnič (-A1)	Minimální teplota	53,4	[°C]
	Průměrná teplota	63,4	[°C]
	Maximální teplota	74,4	[°C]
Chladič Transformátor a tlumivka (-A3)	Minimální teplota	42,2	[°C]
	Průměrná teplota	43,0	[°C]
	Maximální teplota	43,5	[°C]
Chladič Výstupní usměrňovač (-A2)	Minimální teplota	57,0	[°C]
	Průměrná teplota	64,7	[°C]
	Maximální teplota	77,2	[°C]
Objemový průtok		0,13	[m ³ /s]



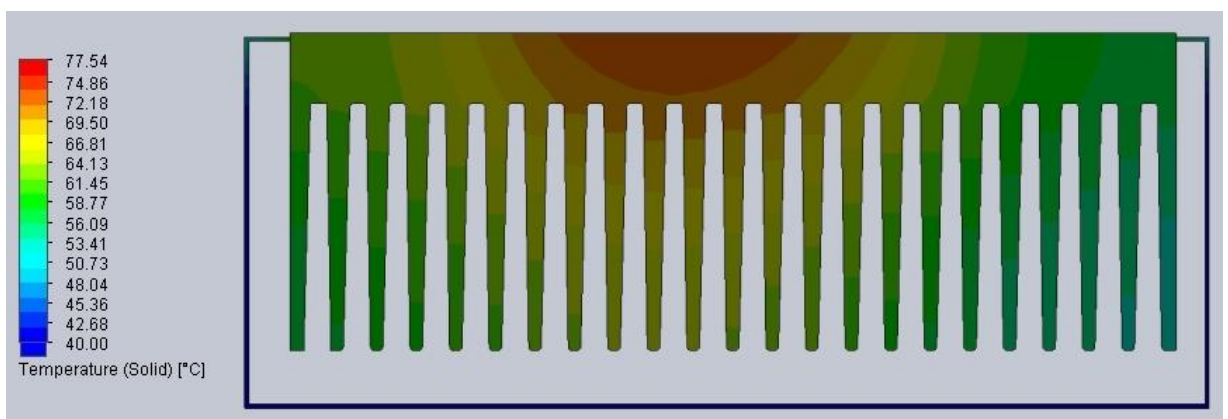
Obr. 4.2 Vizualizace rychlosti proudění vzduchu (axonometrický pohled) [7]



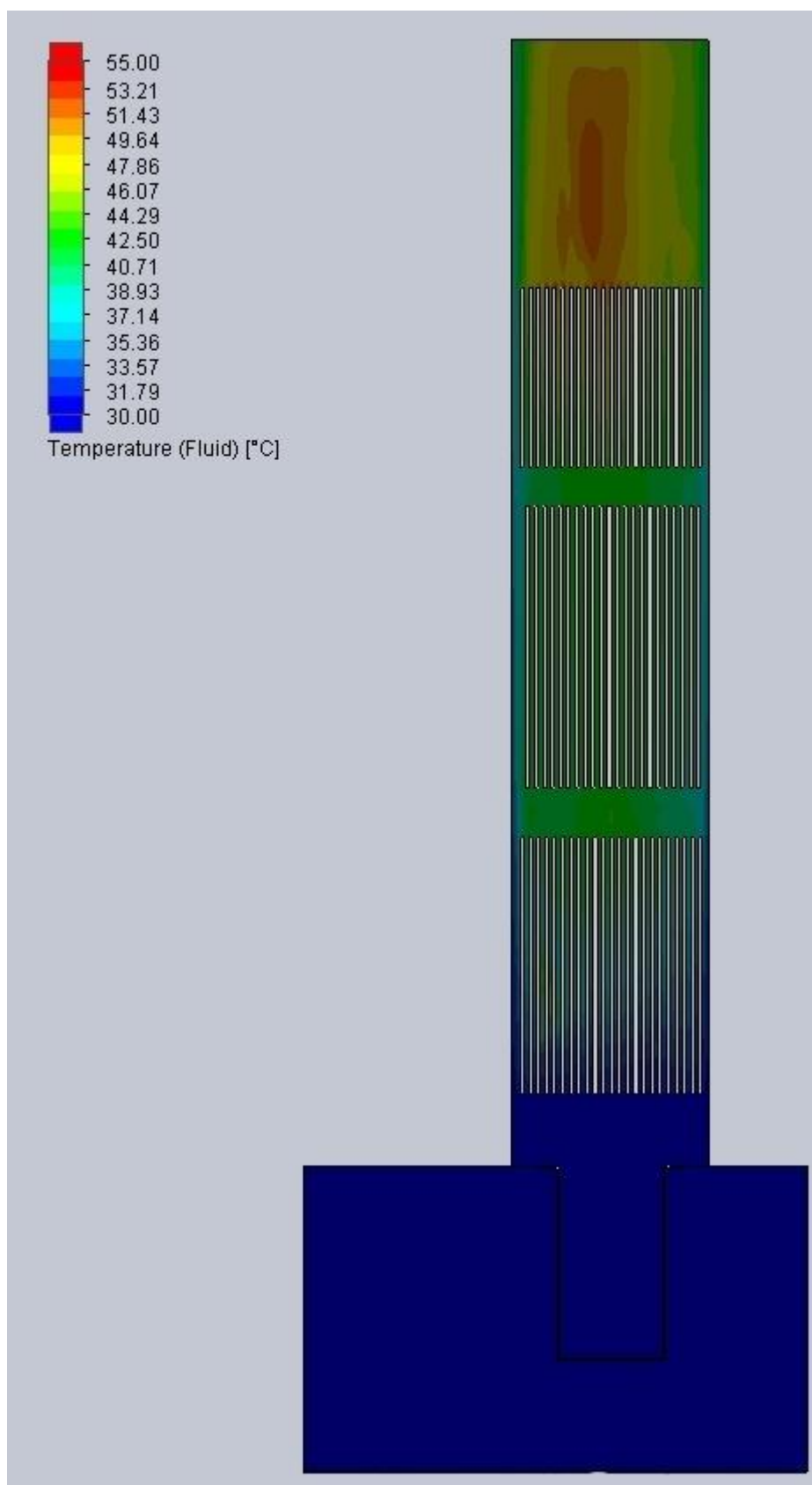
Obr. 4.3 Vizualizace rozložení teploty na chladičích v závislosti na umístění prvků a velikosti ztrátového výkonu (pohled zředu) [7]



Obr. 4.4 Vizualizace rozložení teploty na chladičích jednotlivých konstrukčních bloků (axonometrický pohled) [7]



Obr. 4.5 Řez kanálem a chladičem Vstupního měniče (-A1) – rozložení teploty v objemu tělesa [7]



*Obr. 4.6 Teplota vzduchu v prostoru ventilátoru a chladicího kanálu
(řez při pohledu zpředu) [7]*

4.3 Zjednodušené tepelné náhradní schéma

Cesta, kterou postupuje tepelný ztrátový výkon z polovodičového čipu až do chladicího média, je charakterizována tepelnými odpory a tepelnými kapacitami jednotlivých jejích částí. S tepelnými odpory a tepelnými kapacitami je možno formálně pracovat podobně jako s elektrickými odpory a elektrickými kapacitami. Ekvivalentem elektrického napětí je teplota, ekvivalentem elektrického proudu je tok celkového ztrátového výkonu, ekvivalentem elektrické kapacity je tepelná kapacita a ekvivalentem elektrického odporu je tepelný odpor.

Tepelný odpor R_{th} (resp. tepelná vodivost G_{th}) jsou závislé na druhu látky, která tepelný tok vede a na délce l a průřezu S příslušné cesty

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda_{th}} \cdot \frac{l}{S} = \rho_{th} \cdot \frac{l}{S} \text{ [K/W]}$$

$$G_{th} = \frac{1}{R_{th}} \text{ [W/K]}$$

Druh příslušné látky je zohledněn konstantami:

λ_{th} [W/m.K] ... měrná tepelná vodivost

ρ_{th} [m.K/W] ... měrná tepelná vodivost

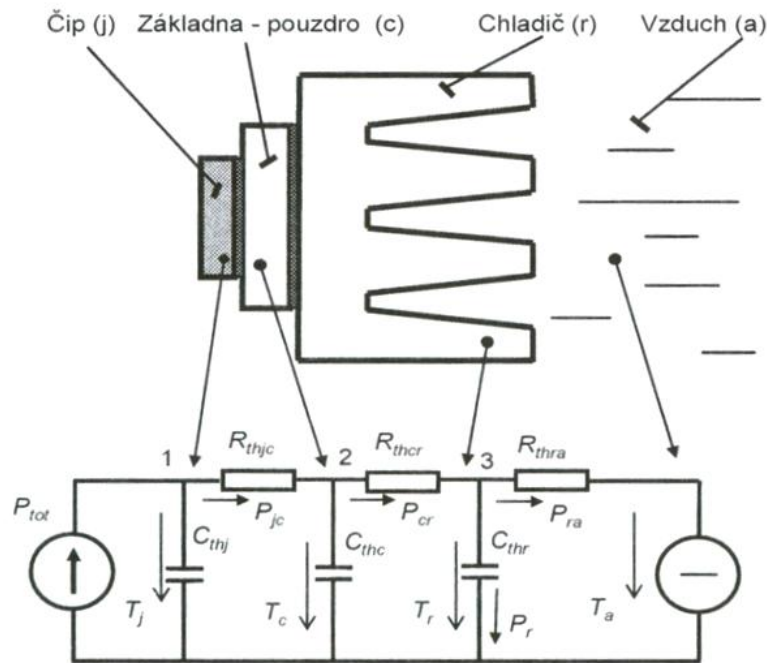
U reálného systému je uvažováno vedení tepla v jednom směru. Z místa vyšší teploty odkud se šíří celkový tepelný tok směrem k teplotě nižší.

Tepelný odpor je pak definován jako podíl rozdílu těchto teplot a celkového ztrátového výkonu

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{tot}} \quad \left(\text{ekv. } R = \frac{U}{I} \right)$$

Cestu ztrátového výkonu je tedy možno znázornit ekvivalentním elektrickým obvodem. Ten je běžně nazýván tepelným náhradním schématem.

Náhradní schéma respektující podrobně cestu ztrátového výkonu je poměrně složité. Hlavní tepelné odpory a kapacity v sobě zahrnuje zjednodušené tepelné náhradní schéma (**Obr. 4.7**). Obsahuje podstatné tepelné odpory a kapacity.



Obr. 4.7 Zjednodušené náhradní tepelné schéma polovodičové součástky s jednostranným vzduchovým chlazením [3]

Z odporů jsou to:

R_{thJC} [K/W] ... tepelný odpor cesty přechod – pouzdro (junction – case)

R_{thCR} ... tepelný odpor cesty pouzdro – chladič (case – radiator)

R_{thRA} ... tepelný odpor cesty chladič – chladicí médium (radiator – ambient)

Z kapacit tyto:

C_{thJ} [W.s/K] ... tepelná kapacita polovodičového přechodu

C_{thC} ... tepelná kapacita pouzdra

C_{thR} ... tepelná kapacita chladiče

Při ustáleném plynulém chodu je možné vliv kapacit zanedbat, stejně tak i zvlnění při spínacích frekvencích nad 1 kHz.

Tepelná kapacita chladicího média je přijímána jako nekonečná s konstantní teplotou T_a .

Tepelné náhradní schéma odpovídá fyzikální představě tím, že ztrátový tepelný tok zprvu „nabíjí“ tepelnou kapacitu čipu a s nárůstem teploty čipu postupuje tepelný tok přes tepelné odpory na ostatní tepelné kapacity až do chladicího média - vzduchu. [3]

4.4 Výpočet maximální teploty přechodů polovodičových součástek

Pro správnou a spolehlivou funkci výkonových polovodičových součástek je třeba dodržet maximální teplotu polovodičového přechodu T_{jmax} . Pro IGBT modul Semikron SKM200GB12T4 i diodový modul IXYS DSEP 2x 101-04A je tato hodnota stanovena na $T_{jmax} = 150 \text{ °C}$ (viz katalogové listy). Reálně, s ohledem na případné dynamické provozní stavy, je doporučeno uvažovat určitou teplotní rezervu (cca 20 °C).

Díky analýze proudění jsou známy maximální teploty chladičů v kontaktních místech s pouzdry polovodičových součástek. Pro výpočet se dále zohlední katalogové hodnoty: tepelný odpor cesty čip – pouzdro R_{thJC} a tepelný odpor cesty pouzdro – chladič R_{thCR} (viz katalogové listy).

Výpočet zahrne i tepelný odpor R_{thHTC} teplovodivé pasty (heat transfer compound) Dow Corning DC340. Vrstva stykové pasty o tloušťce 0,1 mm vyplňuje kontaktní prostor mezi pouzdem součástky a chladičem a vytěsňuje vzduch. Její měrná tepelná vodivost je $\lambda_{thHTC} = 0,42 \text{ W/m.K}$.

Výpočet pro IGBT modul Semikron SKM200GB12T4

Maximální teplota chladiče $T_{Rmax} = 74,4 \text{ °C}$

Odpor teplovodivé pasty na povrchu IGBT modulu

$$R_{thHTC} = \frac{1}{\lambda_{th}} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{0,42} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-4}}{6,53 \cdot 10^{-3}} = 0,0036 \text{ K/W}$$

Maximální teplota polovodičového přechodu tranzistoru

$$T_{j/T} = [(P_{tot} \cdot (R_{thJCmax} + R_{thCRmax} + R_{thHTC}))] + T_R$$

$$T_{j/T} = [(184,27 \cdot (0,14 + 0,038 + 0,0036))] + 74,4$$

$$T_{j/T} = 33,5 + 74,4 = 107,9 \text{ °C}$$

Maximální teplota polovodičového přechodu diody

$$T_{j/D} = [P_{tot} \cdot (R_{thJCmax} + R_{thCRmax} + R_{thHTC})] + T_R$$

$$T_{j/D} = [66,89 \cdot (0,26 + 0,038 + 0,0036)] + 74,4$$

$$T_{j/D} = 20,2 + 74,4 = 94,6 \text{ °C}$$

Výpočet pro diodový modul IXYS DSEP 2x 101-04A

Maximální teplota chladiče $T_{Rmax} = 77,2 \text{ °C}$

Odpor teplovodivé pasty na povrchu diodového modulu

$$R_{thHTC} = \frac{1}{\lambda_{th}} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{0,42} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-3}} = 0,0238 \text{ K/W}$$

Maximální teplota polovodičového přechodu diody

$$T_{j/D} = [P_{tot} \cdot (R_{thJC} + R_{thCR} + R_{thHTC})] + T_R$$
$$T_{j/D} = \left[126 \cdot \left(\frac{0,6 \cdot 0,6}{0,6 + 0,6} + 0,1 + 0,0234 \right) \right] + 77,2$$
$$T_{j/D} = 53,3 + 77,2 = 130,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výpočty teplot polovodičových přechodů v místech nejvyššího zatížení, na chladičích Vstupního měniče (-A1) a Výstupního usměrňovače (-A2) dokazují, že je zařízení dimenzováno dostatečně, s teplotní rezervou cca 20 °C.

5 Zhodnocení výsledků

Diplomová práce popisuje postup při vývoji nového výrobku v oboru výkonové elektroniky pro trakci - nabíječe vozové baterie trakčního vozidla.

Práce řeší obecný návrh topologie měniče, který vychází z požadavků na elektrické parametry měniče a jeho vazby na vnější zařízení.

Pro úplnost je v práci zařazena problematika nabíjení lithiových baterií, které dnes nacházejí široké uplatnění v průmyslových aplikacích a dopravním strojírenství.

Jádrum diplomové práce je návrh výkonových polovodičových součástí a dalších komponent pro jednotlivé subsystémy – pro pulzní měnič snižování napětí, jednofázový napěťový střídač, tlumivku, oddělovací transformátor a můstkový usměrňovač.

Po teoretickém úvodu je v práci proveden konkrétní výpočet výkonových ztrát jednotlivých prvků měniče. Po součtu výkonových ztrát jednotlivých komponent (polovodičových prvků a vinutých dílů) vychází hodnota celkového ztrátového výkonu 1526,2 W. Tato hodnota odpovídá účinnosti 86,7 %. Výpočet nezohledňuje ztráty v rezistorech, ve výstupní diodě a vlastní spotřebu, zejména chod ventilátoru. V úvodu práce byl stanoven cíl dosáhnout účinnosti 82 %, který se s ohledem na rezervu 4,7 % podařilo splnit.

Další samostatně vypracovanou částí diplomové práce je konstrukční řešení nabíječe vozové baterie trakčního vozidla s ohledem na elektrické i mechanické parametry, včetně respektování specifických požadavků zákazníka.

V poslední části je řešen návrh chlazení měniče z konstrukčního hlediska i z pohledu analýzy proudění a sdílení tepla v prostoru ventilátoru, chladicího kanálu a v tělesech hliníkových chladičů. Analýzy proudění a sdílení tepla mají velký přínos zejména při vývoji nového výrobku. Je možné simulovat během relativně krátkého času více variant konstrukčního uspořádání zařízení, upravovat jeho parametry a ve výsledku nalézt optimální řešení. Simulace byla prováděna pro střední hodnoty a ustálený chod měniče.

Výpočtem maximální teploty přechodů polovodičových součástí v oblastech nejvyššího zatížení jsem si ověřil správnost dimenzování zařízení. Výsledky výpočtů potvrzují schopnost nabíječe obstát při reálném provozu, včetně dostatečné rezervy.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Hammer, M., Kratochvíl, P.: *Měniče elektrické energie (interaktivní studijní text)*; Vysoké učení technické v Brně, 2004
- [2] Nicolai, U., Reimann, T., Petzoldt, J., Lutz, J.: *Application Manual Power Modules*; Semikron International, Verlag ISLE, 2010
- [3] Vondrášek, F., Langhammer, J., Peroutka, A. Měsíček, J., Molnár, J.: *Výkonová elektronika, Svazek 6 - Projektování výkonových polovodičových měničů - vybrané stati*; Západočeská univerzita v Plzni, 2008
- [4] Vondrášek, F.: *Výkonová elektronika, Svazek 1 - Přehled výkonových polovodičových součástek*; Západočeská univerzita v Plzni, 1994
- [5] Vondrášek, F.: *Výkonová elektronika, Svazek 2 - Měniče s vnější komutací*; Západočeská univerzita v Plzni, 1994
- [6] Vondrášek, F.: *Výkonová elektronika, Svazek 3 - Měniče s vlastní komutací a bez komutace*; Západočeská univerzita v Plzni, 1998
- [7] Firemní dokumentace Škoda Electric a.s.
- [8] www.battex.info
- [9] www.europeanbatteries.com
- [10] www.powerelectronics.com
- [11] www.semikron.com
- [12] www.valence.com
- [13] www.3epraha.cz

Technical Specification: EBattery 45 Ah Lithium-Ion Cell Version 1.4

If not otherwise informed, the charging method is constant current / constant voltage: using C/2 (22.5 A) current with 3.55 V voltage limit and end-condition current 0.03C (1.35 A). Discharge cut-off voltage is 2.5 V.

No	ITEM	VALUE	REMARK
1	Rated capacity	45 Ah	Discharge at C/3 (15A) At 25 ± 2°C
2	Energy density	145 Wh/kg	At C/3 (15 A) discharge at 25 ± 2°C
3	Nominal voltage	3.20 V	At C/3 (15 A) discharge at 25 ± 2°C
	Recommended discharge voltage limit	2.50 V	Cell can be discharged to 2.0 V without permanent decrease of performance.
	Recommended charge voltage limit	3.55 V	When applying > C/2 charge currents 3.50 V voltage limit is recommended.
4	Recommended maximum continuous charge current	45 A	Temperature > 23°C and 3.50 V upper voltage limit. For requirement for higher charging current contact European Batteries.
5	Maximum continuous discharge current	180 A	For requirement for higher discharge currents contact European Batteries.
6	Operating temperature	Charge: 0 - 60°C	High current charging should be avoided in low temperatures. Optimal operating temperature is 20 - 35°C.
		Discharge: -25 - 60°C	The cell performance is decreased in low temperatures. Optimal operating temperature is 20 - 35°C.
7	Storage temperature	-30 - 45°C: 3 years	Optimal storage temperature is 10 - 30°C. Storing the cell in elevated temperatures will decrease the performance permanently.
		45 - 55°C: 1 year	
		55 - 60°C: 3 months	
8	Weight	1 000 ± 10 g	
9	Dimensions	Width 170 ± 1 mm	Without terminals/tabs.
		Height 275 ± 1 mm	
		Thickness 13.5 ± 1 mm	
10	Internal Impedance	< 2.0 mΩ	Measured by 10 A AC current (1000 Hz) at 25 ± 2°C
11	Electrochemical system	Positive: Lithium Iron Phosphate (LiFePO ₄), negative: graphite	



Figure 1. EB 45Ah LFP cell.

SKM200GB12T4



SEMITRANS[®]3

Fast IGBT4 Modules

SKM200GB12T4

Features

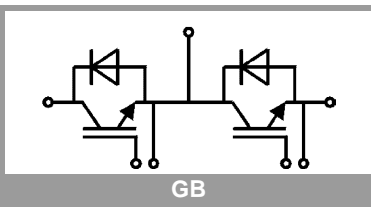
- IGBT4 = 4. Generation (Trench)IGBT
- VCEsat with positive temperature coefficient
- High short circuit capability, self limiting to $6 \times I_{CNOM}$
- Soft switching 4. Generation CAL diode (CAL4)

Typical Applications

- AC inverter drives
- UPS
- Electronic welders at fsw up to 20 kHz

Remarks

- Case temperature limited to $T_c = 125^\circ\text{C}$ max, recomm. $T_{op} = -40 \dots +150^\circ\text{C}$, product rel. results valid for $T_j = 150^\circ$



Absolute Maximum Ratings				
Symbol	Conditions		Values	Unit
IGBT				
V_{CES}			1200	V
I_C	$T_j = 175^\circ\text{C}$	$T_c = 25^\circ\text{C}$	314	A
		$T_c = 80^\circ\text{C}$	242	A
I_{CNom}			200	A
I_{CRM}	$I_{CRM} = 3I_{CNom}$		600	A
V_{GES}			-20 ... 20	V
t_{psc}	$V_{CC} = 800\text{ V}$ $V_{GE} \leq 15\text{ V}$ $V_{CES} \leq 1200\text{ V}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$	10	μs
T_j			-40 ... 175	$^\circ\text{C}$
Inverse diode				
I_F	$T_j = 175^\circ\text{C}$	$T_c = 25^\circ\text{C}$	229	A
		$T_c = 80^\circ\text{C}$	172	A
I_{Fnom}			200	A
I_{FRM}	$I_{FRM} = 3I_{Fnom}$		600	A
I_{FSM}	$t_p = 10\text{ ms}$, $\sin 180^\circ$, $T_j = 25^\circ\text{C}$		990	A
T_j			-40 ... 175	$^\circ\text{C}$
Module				
$I_{l(RMS)}$			500	A
T_{stg}			-40 ... 125	$^\circ\text{C}$
V_{isol}	AC sinus 50Hz, $t = 1\text{ min}$		4000	V

Characteristics						
Symbol	Conditions		min.	typ.	max.	Unit
IGBT						
$V_{CE(sat)}$	$I_C = 200\text{ A}$ $V_{GE} = 15\text{ V}$ chiplevel	$T_j = 25^\circ\text{C}$		1.8	2.05	V
		$T_j = 150^\circ\text{C}$		2.2	2.4	V
V_{CE0}		$T_j = 25^\circ\text{C}$		0.8	0.9	V
		$T_j = 150^\circ\text{C}$		0.7	0.8	V
r_{CE}	$V_{GE} = 15\text{ V}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$		5.0	5.8	$\text{m}\Omega$
		$T_j = 150^\circ\text{C}$		7.5	8.0	$\text{m}\Omega$
$V_{GE(th)}$	$V_{GE} = V_{CE}$, $I_C = 7.6\text{ mA}$		5	5.8	6.5	V
I_{CES}	$V_{GE} = 0\text{ V}$ $V_{CE} = 1200\text{ V}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$		0.1	0.3	mA
		$T_j = 150^\circ\text{C}$				mA
C_{ies}	$V_{CE} = 25\text{ V}$ $V_{GE} = 0\text{ V}$	$f = 1\text{ MHz}$		12.3		nF
C_{oes}		$f = 1\text{ MHz}$		0.81		nF
C_{res}		$f = 1\text{ MHz}$		0.69		nF
Q_G	$V_{GE} = -8\text{ V} \dots +15\text{ V}$			1130		nC
R_{Gint}	$T_j = 25^\circ\text{C}$			3.8		Ω
$t_{d(on)}$	$V_{CC} = 600\text{ V}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$		185		ns
t_f	$I_C = 200\text{ A}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$		40		ns
E_{on}	$V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{G on} = 1\ \Omega$	$T_j = 150^\circ\text{C}$		21		mJ
		$T_j = 150^\circ\text{C}$		425		ns
$t_{d(off)}$	$R_{G off} = 1\ \Omega$	$T_j = 150^\circ\text{C}$		82		ns
t_f	$di/dt_{on} = 5500\text{ A}/\mu\text{s}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$		20		mJ
E_{off}	$di/dt_{off} = 2300\text{ A}/\mu\text{s}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$				mJ
$R_{th(j-c)}$	per IGBT				0.14	K/W

SKM200GB12T4



SEMITRANS[®]3

Fast IGBT4 Modules

SKM200GB12T4

Features

- IGBT4 = 4. Generation (Trench)IGBT
- VCEsat with positive temperature coefficient
- High short circuit capability, self limiting to $6 \times I_{CNOM}$
- Soft switching 4. Generation CAL diode (CAL4)

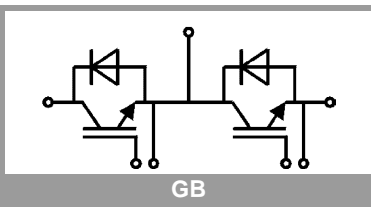
Typical Applications

- AC inverter drives
- UPS
- Electronic welders at fsw up to 20 kHz

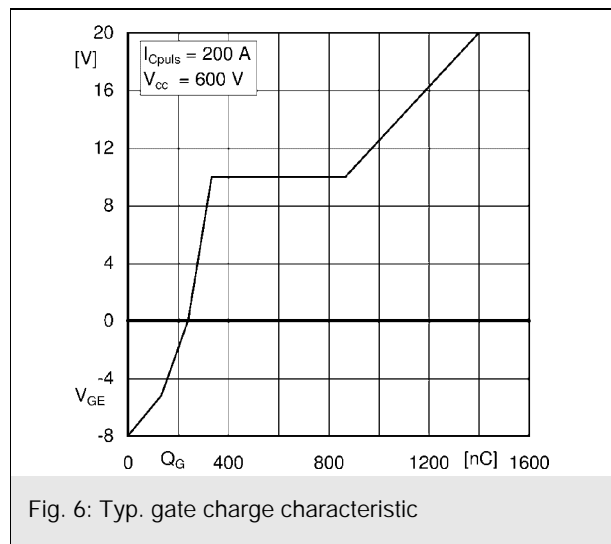
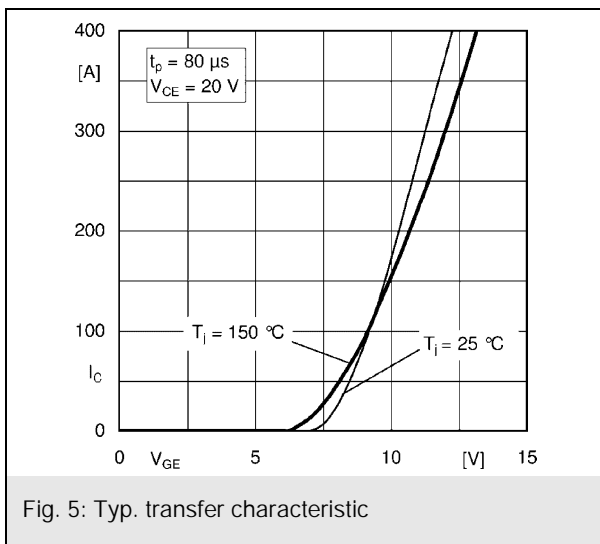
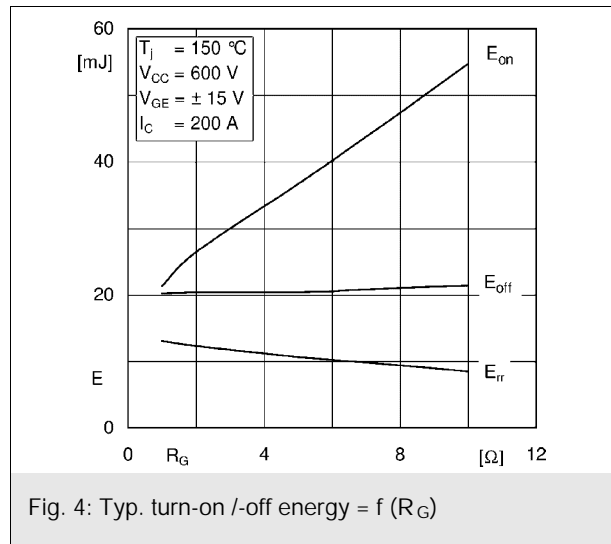
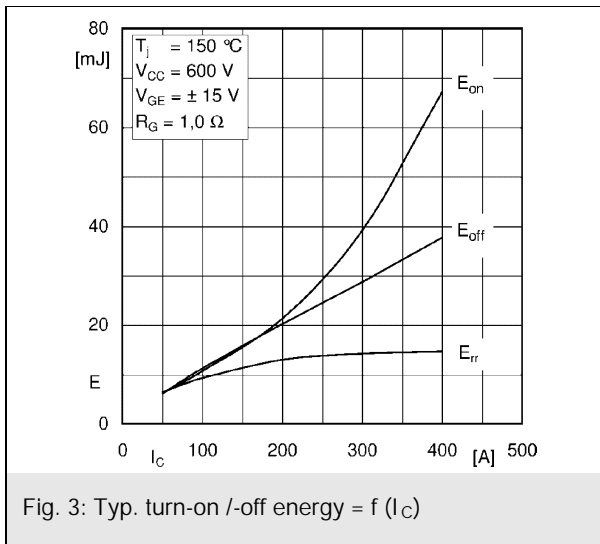
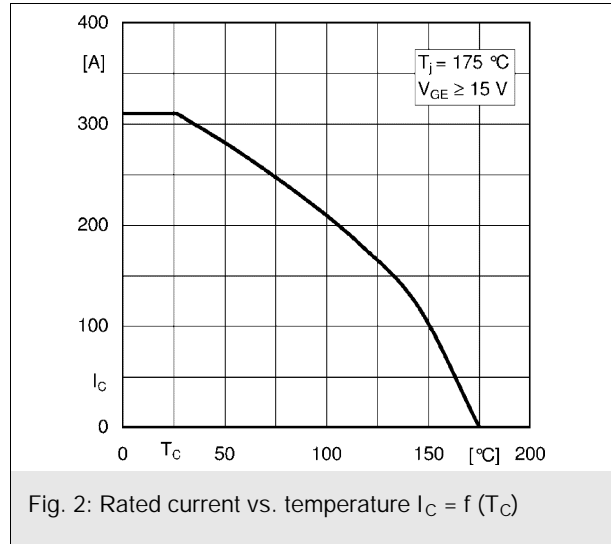
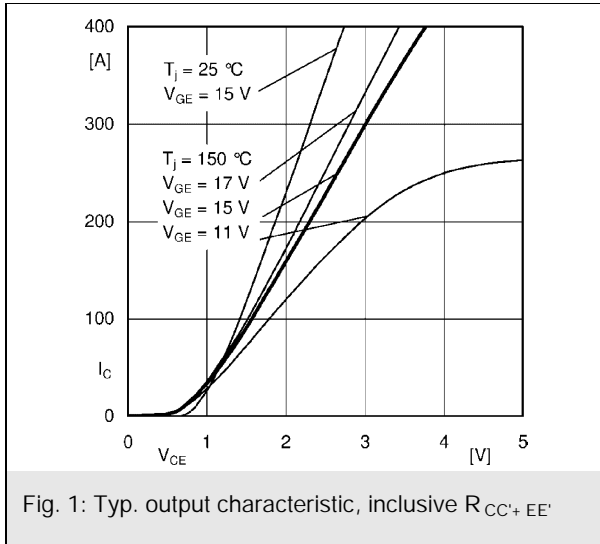
Remarks

- Case temperature limited to $T_c = 125^\circ\text{C}$ max, recomm.
Top = $-40 \dots +150^\circ\text{C}$, product rel. results valid for $T_j = 150^\circ$

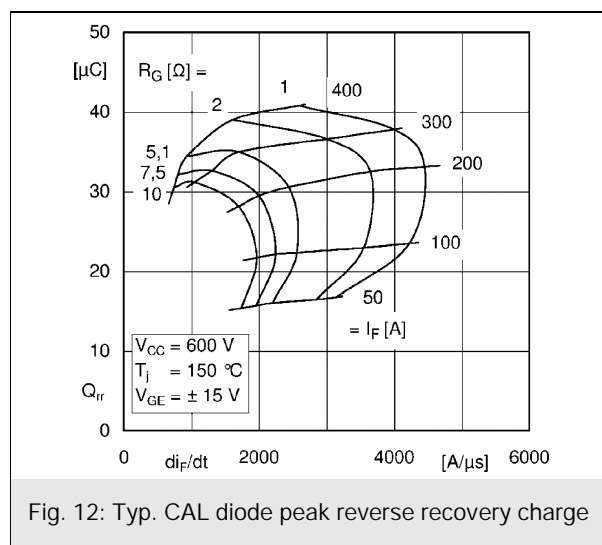
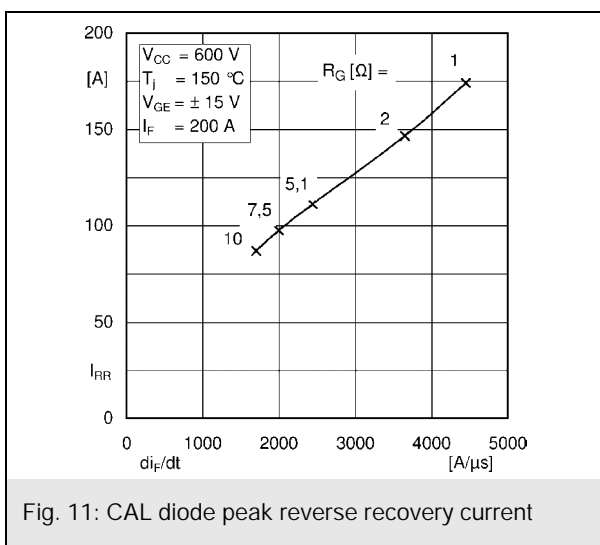
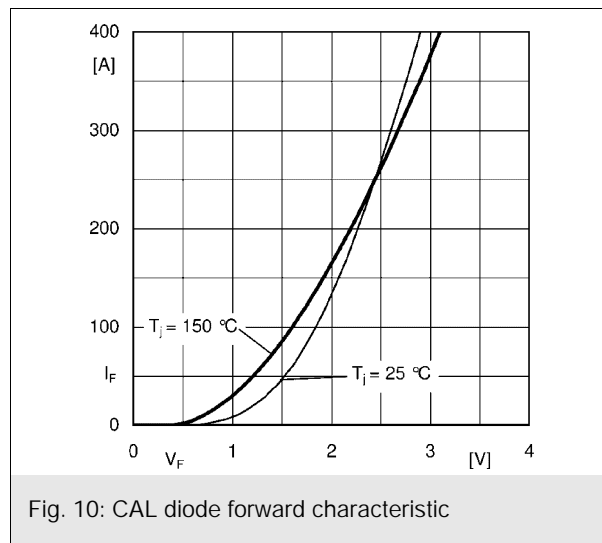
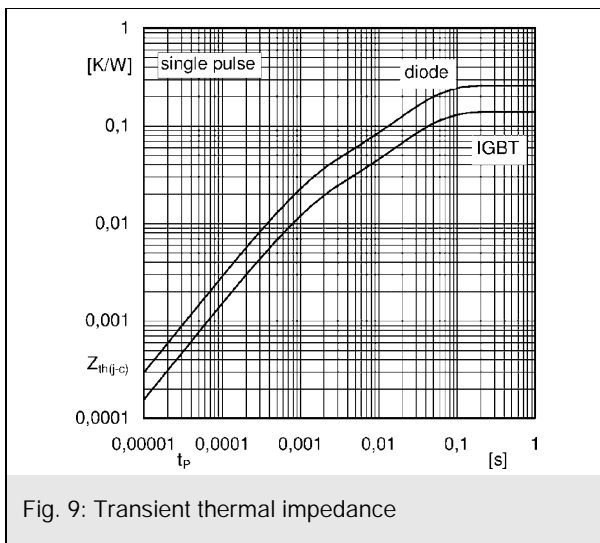
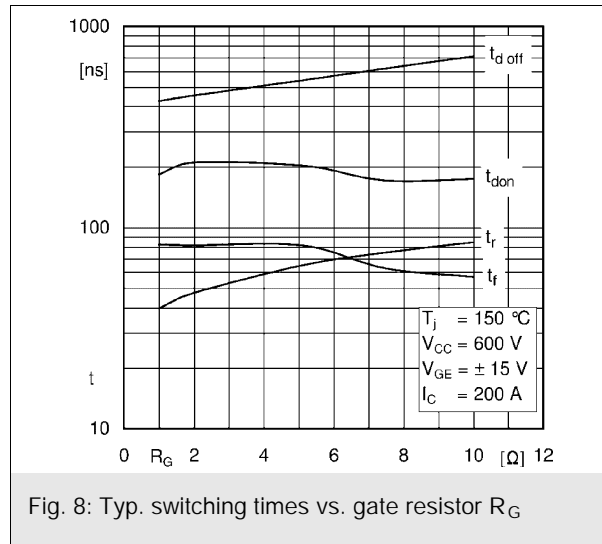
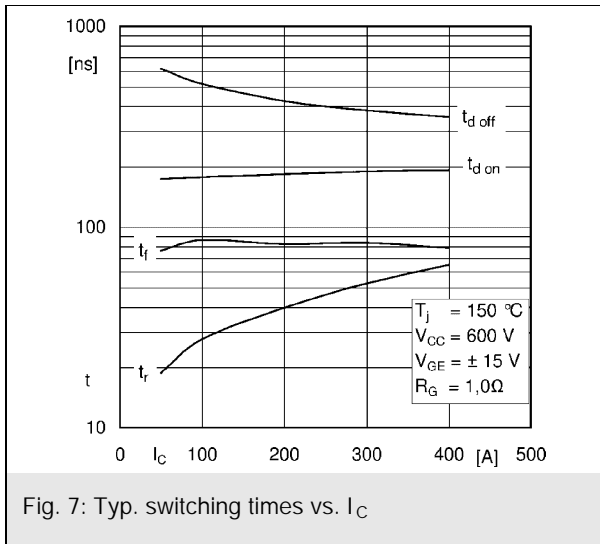
Characteristics						
Symbol	Conditions		min.	typ.	max.	Unit
Inverse diode						
$V_F = V_{EC}$	$I_F = 200 \text{ A}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$		2.2	2.52	V
	$V_{GE} = 0 \text{ V}$ chip	$T_j = 150^\circ\text{C}$		2.15	2.47	V
V_{F0}		$T_j = 25^\circ\text{C}$		1.3	1.5	V
		$T_j = 150^\circ\text{C}$		0.9	1.1	V
r_F		$T_j = 25^\circ\text{C}$		4.5	5.1	m Ω
		$T_j = 150^\circ\text{C}$		6.3	6.8	m Ω
I_{RRM}	$I_F = 200 \text{ A}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$		174		A
Q_{rr}	$di/dt_{off} = 4450 \text{ A}/\mu\text{s}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$		33		μC
E_{rr}	$V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$ $V_{CC} = 600 \text{ V}$	$T_j = 150^\circ\text{C}$		13		mJ
$R_{th(j-c)}$	per diode				0.26	K/W
Module						
L_{CE}				15	20	nH
R_{CC+EE}	terminal-chip	$T_c = 25^\circ\text{C}$		0.25		m Ω
		$T_c = 125^\circ\text{C}$		0.5		m Ω
$R_{th(c-s)}$	per module			0.02	0.038	K/W
M_s	to heat sink M6			3	5	Nm
M_t		to terminals M6		2.5	5	Nm
						Nm
w					325	g



SKM200GB12T4

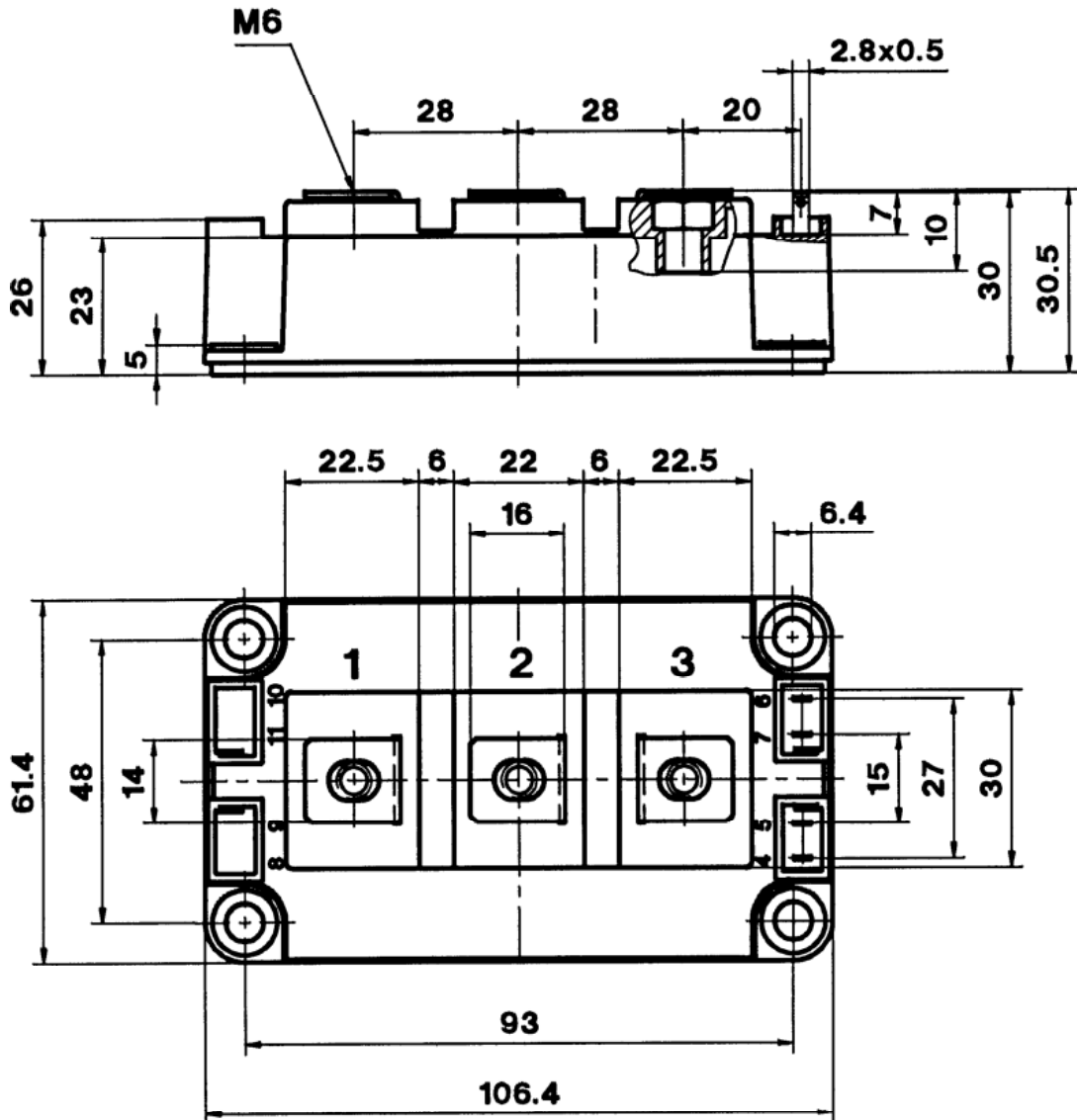


SKM200GB12T4

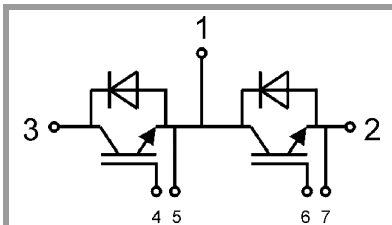


SKM200GB12T4

CASED56



Semitrans 3



GB

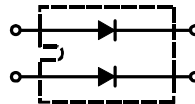
This is an electrostatic discharge sensitive device (ESDS), international standard IEC 60747-1, Chapter IX.

This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.

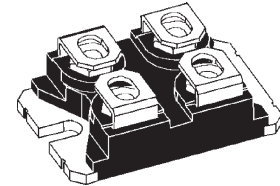
HiPerFRED™ Epitaxial Diode with soft recovery

$I_{FAV} = 2x 100 A$
 $V_{RRM} = 400 V$
 $t_{rr} = 30 ns$

V_{RSM} V	V_{RRM} V	Type
400	400	DSEP 2x 101-04A



miniBLOC, SOT-227 B



Symbol	Conditions	Maximum Ratings	
I_{FRMS} I_{FAVM}	$T_C = 60^\circ C$; rectangular, $d = 0.5$	100	A
I_{FSM}	$T_{VJ} = 45^\circ C$; $t_p = 10 ms$ (50 Hz), sine	1000	A
E_{AS}	$T_{VJ} = 25^\circ C$; non-repetitive $I_{AS} = 4 A$; $L = 180 \mu H$	2	mJ
I_{AR}	$V_A = 1.5 \cdot V_R$ typ.; $f = 10 kHz$; repetitive	0.4	A
T_{VJ} T_{VJM} T_{stg}		-40...+150 150 -40...+150	$^\circ C$ $^\circ C$ $^\circ C$
P_{tot}	$T_C = 25^\circ C$	200	W
V_{ISOL}	50/60 Hz, RMS $I_{ISOL} \leq 1 mA$	2500	V~
M_d	mounting torque (M4) terminal connection torque (M4)	1.1-1.5/9-13 1.1-1.5/9-13	Nm/lb.in. Nm/lb.in.
Weight	typical	30	g

Features

- International standard package miniBLOC
- Isolation voltage 2500 V~
- UL registered E 72873
- 2 independent FRED in 1 package
- Planar passivated chips
- Very short recovery time
- Extremely low switching losses
- Low I_{RM} -values
- Soft recovery behaviour

Applications

- Antiparallel diode for high frequency switching devices
- Antisaturation diode
- Snubber diode
- Free wheeling diode in converters and motor control circuits
- Rectifiers in switch mode power supplies (SMPS)
- Inductive heating
- Uninterruptible power supplies (UPS)
- Ultrasonic cleaners and welders

Advantages

- Avalanche voltage rated for reliable operation
- Soft reverse recovery for low EMI/RFI
- Low I_{RM} reduces:
 - Power dissipation within the diode
 - Turn-on loss in the commutating switch

Symbol	Conditions	Characteristic Values	
		typ.	max.
I_R ①	$V_R = V_{RRM}$; $T_{VJ} = 25^\circ C$ $T_{VJ} = 150^\circ C$	1 4	mA mA
V_F ②	$I_F = 100 A$; $T_{VJ} = 125^\circ C$ $T_{VJ} = 25^\circ C$	1.24 1.54	V V
R_{thJC} R_{thCH}	with heatsink compound	0.1	0.6 K/W K/W
t_{rr}	$I_F = 1 A$; $-di/dt = 400 A/\mu s$; $V_R = 30 V$; $T_{VJ} = 25^\circ C$	30	ns
I_{RM}	$V_R = 100 V$; $I_F = 200 A$; $-di_F/dt = 100 A/\mu s$ $T_{VJ} = 100^\circ C$	5.5	6.8 A

Pulse test: ① Pulse Width = 5 ms, Duty Cycle < 2.0 %
 ② Pulse Width = 300 μs , Duty Cycle < 2.0 %

Data according to IEC 60747 and per diode unless otherwise specified

IXYS reserves the right to change limits, test conditions and dimensions.

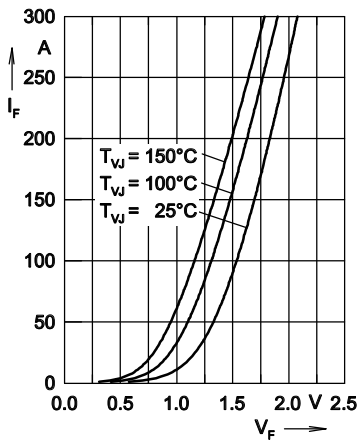


Fig. 1 Forward current I_F versus V_F

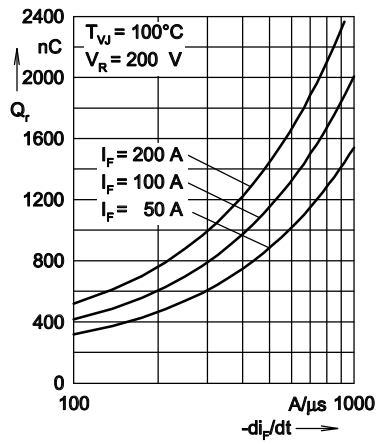


Fig. 2 Typ. reverse recovery charge Q_r versus $-di_F/dt$

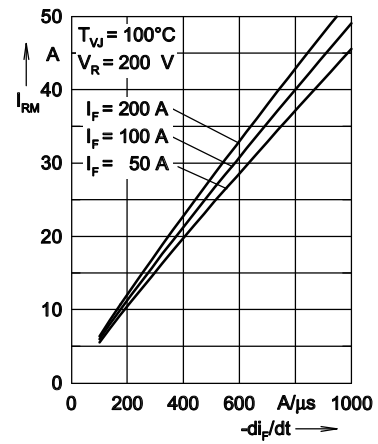


Fig. 3 Typ. peak reverse current I_{RM} versus $-di_F/dt$

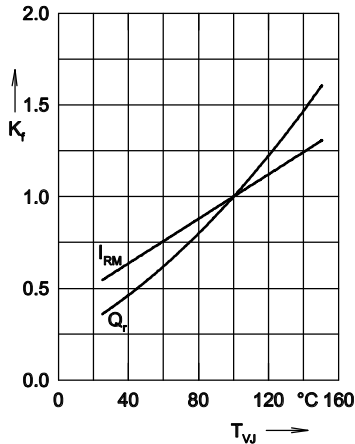


Fig. 4 Typ. dynamic parameters Q_r, I_{RM} versus T_{VJ}

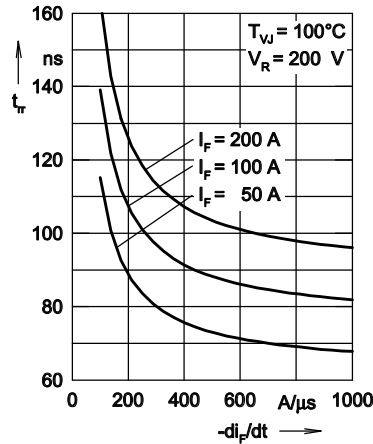


Fig. 5 Typ. recovery time t_{tr} versus $-di_F/dt$

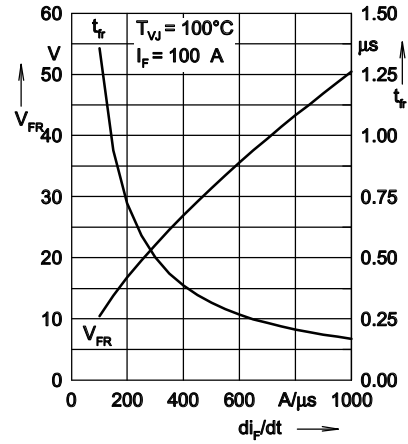


Fig. 6 Peak forward voltage V_{FR} and t_{tr} versus di_F/dt

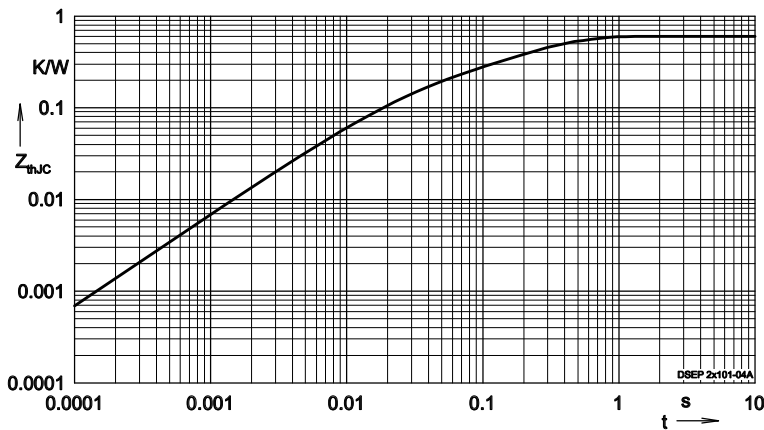


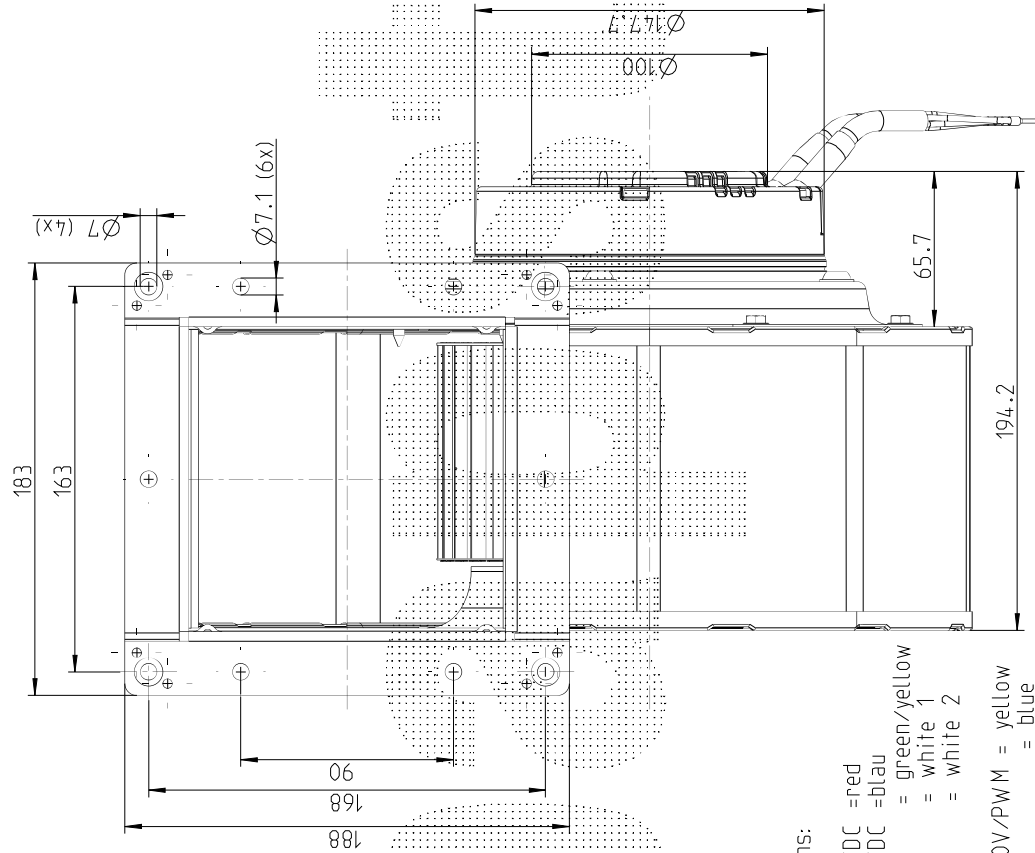
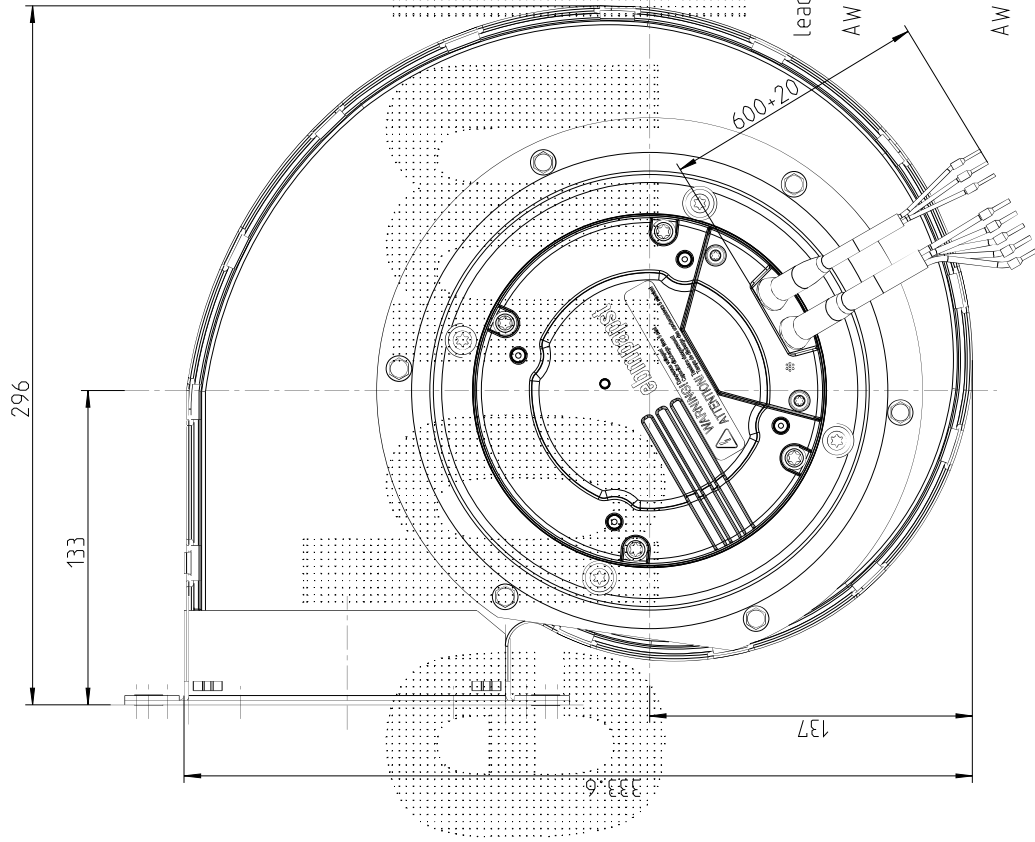
Fig. 7 Transient thermal resistance junction to case

Constants for Z_{thJC} calculation:

i	R_{thi} (KW)	t_i (s)
1	0.212	0.0055
2	0.248	0.0092
3	0.063	0.0007
4	0.077	0.0391

Dimensional Drawing

Typ: G3G180-BD23-XB



lead connections:

- AW G18:
- +110VDC = red
 - 110VDC = blau
 - PE = green/yellow
 - NC = white 1
 - COM = white 2
- AW G22:
- 0-10V/PWM = yellow
 - GND = blue
 - +10V = red

for information use only

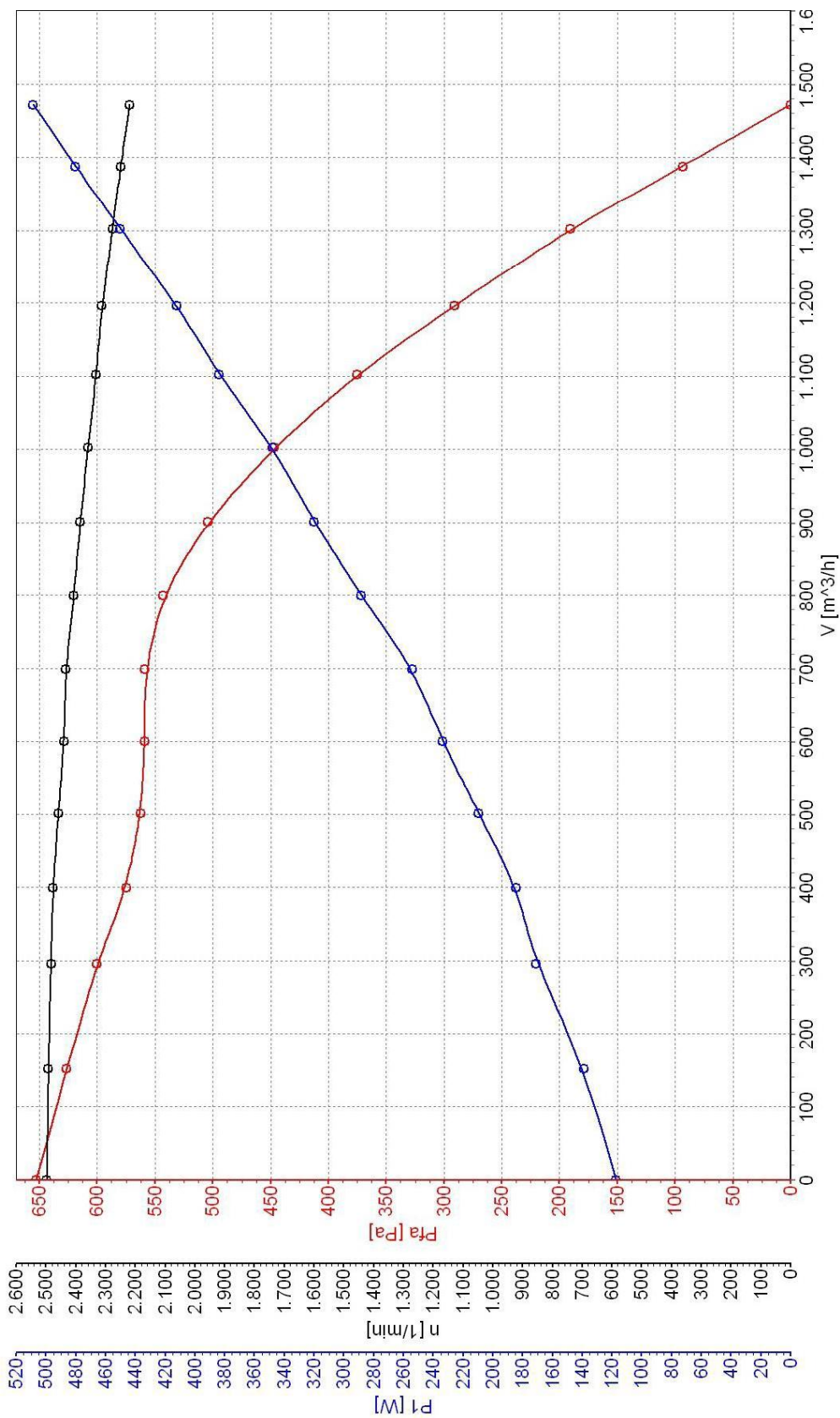
Date: 24.04.09 | Designed: GN

Any unauthorized use of this drawing, copying or passing on to third parties requires the explicit approval of ebm-papst Müllingen GmbH & Co. KG. Any violations of this shall be prosecuted in Civil and Penal Court.

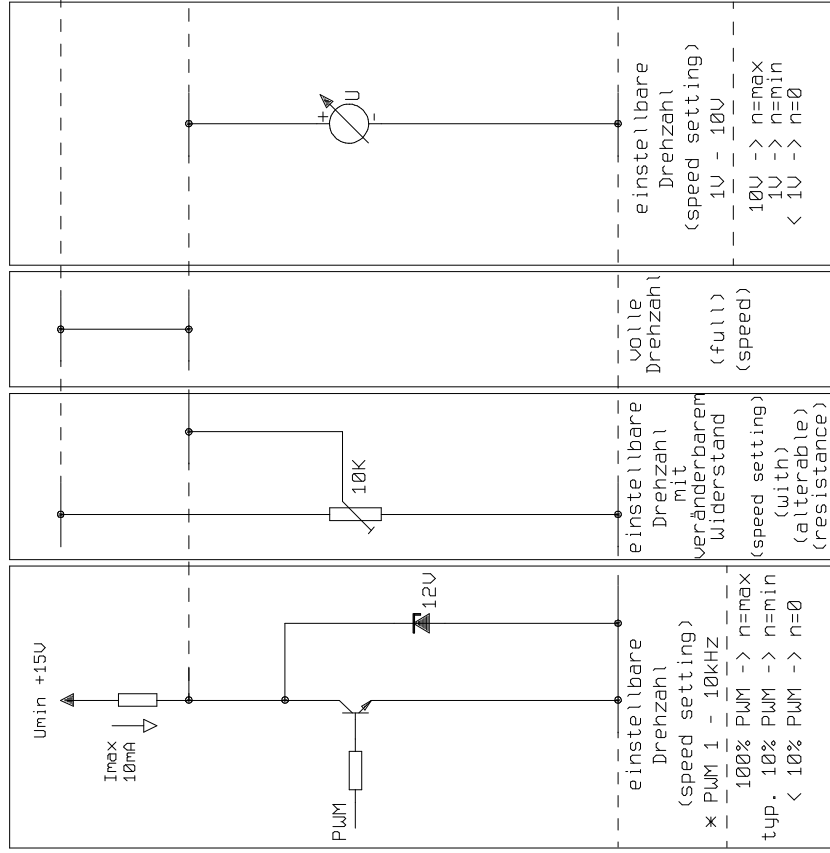
Performance testing of fans
 Installationskategorie A nach ISO 5801, DIN 24163, DIN EN ISO 5167-1

Type M-No. U[V] F[Hz] C[μF] SampleLevel Linetype Remark

G3G180BD12XC-02A 15835 110

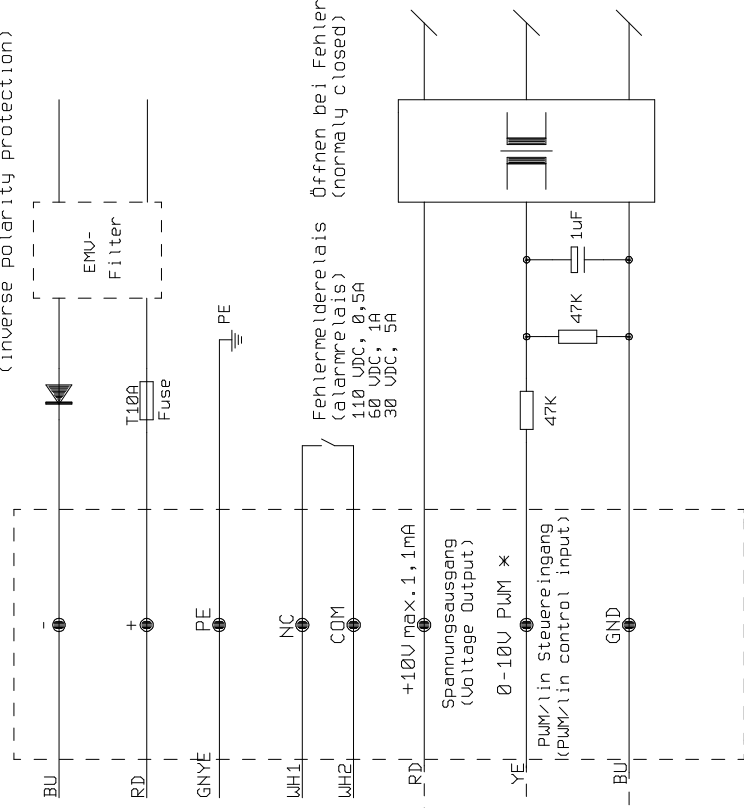


Applikationshinweise für verschiedene Steuermöglichkeiten
(Application of various control possibilities)



Kundenseite
(customer circuit)

Polerschutz
(inverse polarity protection)



Schnittstelle
(interface) ebm-Seite
(ebm circuit)

<p>ebmpapst ebm-papst MulFingen GmbH & Co. KG</p>		wiring diagram (Anschlußbild)									
		60413-5-9770									
Baugröße: B4		Tag: 2007		Name: LPU.		Änd. Kfz-Nr.		Tag		Name	
A4 Blatt von		Gepr. von		Bearb. 02.02.		Ind.		Tag		Name	
Optional:		integrierte Bahnelektronik M3G084		passiv PFC		0-10V-Eingang galv. getrennt		10V/1mA Spannungsausgang galv. getrennt			

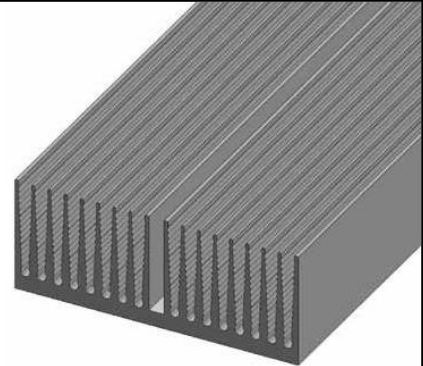
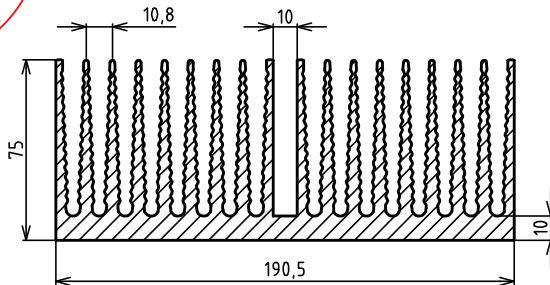
KE 190

hmotnosť / weight: **16,50 kg/m**

obvod / perimeter: **2 887 mm**

Rth (pre/for 150 mm): **0,36 °C/W**

Dopredaj
Bargain Sale

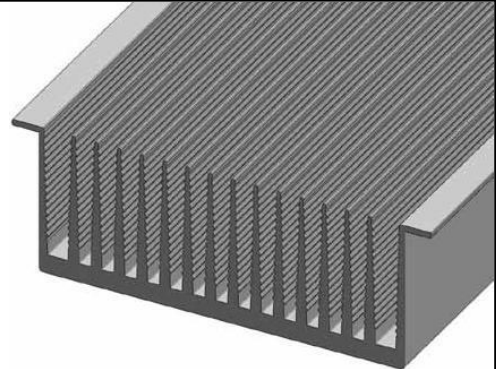
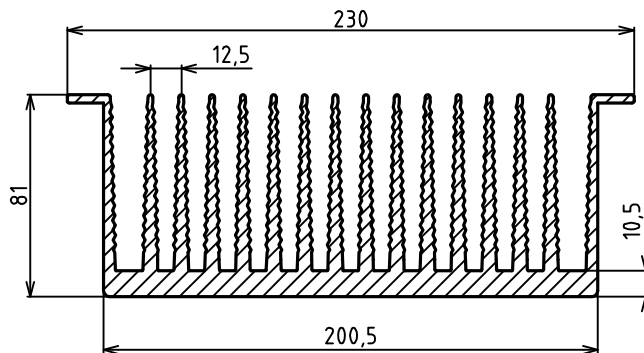


K 230

hmotnosť / weight: **17,50 kg/m**

obvod / perimeter: **2 895 mm**

Rth (pre/for 150 mm): **0,3 °C/W**



KE 215

hmotnosť / weight: **20,90 kg/m**

obvod / perimeter: **3 125 mm**

Rth (pre/for 150 mm): **0,36 °C/W**

