

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh trakčního měniče pro 6m bateriový bus

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Richard TITZ**
Osobní číslo: **E11N0040K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh trakčního měniče pro 6m bateriový bus**
Zadávací 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. Popište funkci a specifika trakčního měniče pro 6m bateriový vůz.
2. Dimenzujte vybrané části měniče, vypočtete (simulace) výkonové ztráty a teploty.
3. Navrhněte vhodné řešení trakčního měniče s konkrétními výkonovými polovodičovými moduly a jejich technicko - ekonomické srovnání.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Vondrášek, F.: Měniče s vlastní komutací a bez komutace, Výkonová elektronika, ZČU v Plzni, 2003, ISBN 80-7082-980-X
2. Vondrášek, F., Langhammer, J., Peroutka, A., Měsíček, J., Molnár, J.: Projektování výkonových polovodičových měničů - vybrané stati, ZČU v Plzni 2008, ISBN 978-80-7043-653-0
3. Flajtingr, J.; Kule, L.: Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči, 2. upravené vyd., ZČU v Plzni 2005, ISBN 80-7043-354-X
4. Katalogové listy a aplikační manuály výrobců komponent měničů
5. Odborné články (internet, periodika)


Vedoucí diplomové práce: **Doc. Dr. Ing. Jiří Flajtingr**
Škoda Electric, Plzeň

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 vhodného návrhu trakčního měniče pro 6m bateriový bus včetně výpočtů (simulací) výkonových ztrát (teplot) a technicko – ekonomického srovnání.

Klíčová slova

Trakční měnič, bateriový bus, 6m, simulace, výkonová elektronika, výkonové ztráty, teploty, technika, ekonomika, IGBT, modul, Simplorer, Iposim, Semisel, simulace, chladič, oteplení, vodní chlazení, hybridpack, econodual, SKiM, tepelné schéma, bateriový pohon, baterie, SOR, Urbino electric, Zeus, Gaia, ThunderSky, Valence, SAFT, simulace, Iposim, Semisel.

Abstract

This master thesis is focused on solution suitable for the design of the traction converter for the battery bus 6m including calculations (also simulations) of power losses (and temperature losses) and technical – economic comparison.

Key words

Traction converter, battery bus, 6m, simulation, power electronics, power loss, temperature, technical, economics, IGBT, module, Simplorer, Iposim, Semisel, simulation, cooler, heat, water cooling, hybridpack, econodual, SKiM, heat scheme, battery powered drive, battery, SOR., Urbino electric, Zeus, Gaia, ThunderSky, Valence, SAFT, simulation, Iposim, Semisel.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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 3.5.2013

Jméno, příjmení, podpis

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Jiřímu Flajtingrovi a školiteli Ing. Jindřichovi Kážovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

1. ÚVOD	10
1.1 SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
2 BATERIOVÉ BUSY	15
2.1 PROBLEMATIKA BATERIOVÉHO POHONU.....	15
2.1.1 Trakční baterie.....	15
2.1.2 Požadavky baterií po vlastní spotřebu.....	16
2.2 SOUČASNÝ STAV NA TRHU BATERIOVÝCH BUSŮ.....	17
2.2.1 SOR.....	17
2.2.1.1 SOR EBN 10,5.....	17
2.2.1.2 SOR EBN 8.....	19
2.2.2 Solaris Urbino electric.....	20
2.2.3 Zeus M200E.....	21
2.3 POROVNÁNÍ VYBRANÝCH BATERIOVÝCH BUSŮ.....	22
3 TRAKČNÍ MĚNIČ PRO BATERIOVÝ POHON	23
3.1 TŘÍFÁZOVÝ NAPĚŤOVÝ STRÍDAČ S IGBT TRANZISTORY VŠEOBECNĚ.....	23
3.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA TŘÍFÁZOVÉHO NAPĚŤOVÉHO STRÍDAČE S IGBT TRANZISTORY.....	23
3.3 VÝPOČET ZTRÁTOVÉHO VÝKONU MĚNIČE S VLASTNÍ KOMUTACÍ.....	25
3.3.1.1 Ztráty propustným proudem.....	27
3.3.1.2 Ztráty spínacím proudem.....	29
4 VÝBĚR A DIMENZOVÁNÍ TRAKČNÍHO MĚNIČE PRO POHON 6M BATERIOVÉHO BUSU	32
4.1 POŽADOVANÉ PARAMETRY.....	32
4.2 MODUL 1 – HYBRIDPACK2 (INFINEON).....	34
4.2.1 Teoretický výpočet ztrát.....	35
4.2.1.1 Výpočty ostatních hodnot vyplývajících ze zadání.....	35
4.2.1.2 Výpočet ztrát spínacím proudem.....	38
4.2.1.3 Výpočet ztrát propustným proudem.....	38
4.2.1.4 Výpočet celkových ztrát.....	42
4.2.2 Výpočet oteplení pomocí redukovaného tepelného schéma.....	42
4.2.3 Tepelná simulace v aplikaci Simporer (V9).....	46
4.3 MODUL 2 – ECONODUAL 3 – FF450R07ME4 (INFINEON).....	52
4.3.1 Parametry.....	53
4.3.2 Simulace v aplikaci Iposim.....	54
4.4 MODUL 3 – SKiM63 (SEMIKRON).....	56
4.4.1 Parametry okruhu.....	57
4.4.2 Výpočet oteplení a ztrát třífázového napětového měniče pomocí aplikace SEMISEL.....	58
4.5 VÝBĚR VHODNÉHO CHLADIČE.....	61
4.5.1 Chladič pro Hybridpack2 (Infineon).....	61
4.5.2 MQT1914 pro Econodual3.....	61
4.5.3 WK40/180 pro SKiM406GD066HD.....	61
5 ZÁVĚR	62

6	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	65
7	PŘÍLOHY	66
7.1	PARAMETRY JEDNOTLIVÝCH IGBT MODULŮ	66
7.1.1	IGBT Module Hybridpack 2 (Infineon) - FS600R07A2E3	66
7.1.2	IGBT Module EconoDual 3 (Infineon) – FF450R07ME4	76
7.1.3	IGBT Module Skim 63 (Semikron) - SKiM406GD066HD	83
7.2	PARAMETRY CHLADIČŮ	88
7.2.1	ATV-PD-3040 pro Hybridpack2	88
7.2.2	MQT1914 pro EconoDual3	90
7.2.3	WK40/180 pro SKiM406GD066HD	92
7.3	PARAMETRY BATERÍ	93
7.3.1	GAIA 42 Ah HE – 602040 LFP	93
7.3.2	ThunderSky TS-LFP200AHA	94
7.3.3	Valence U-Charge XP (U1-12XP, U24-12XP, U27-12XP, UEV-18XP, U27-36)	96
7.3.4	SAFT VLE 22-42, VLE 11-84	98
7.4	PARAMETRY BUSŮ	100
7.4.1	SOR EBN 10,5 (2 a 3 dveřový), SOR EBN 8	100
7.4.2	Technický nákres SOR EBN 10,5 – Dvoudveřový	101
7.4.3	Technický nákres SOR EBN – Třídveřový	102
7.4.4	Technický nákres SOR EBN 8	103
7.5	POSTUPY V SIMULAČNÍCH PROGRAMECH	104
7.5.1	Tepelná simulace v aplikaci IPOSIM (pro modul Econodual TM 3 vztažený na zadání diplomové práce)	104
7.5.2	Tepelná simulace v aplikaci SEMISEL (pro modul SKiM406GD066HD vztažený na zadání diplomové práce)	106
7.6	SEZNAM OBRÁZKŮ A ROVNIC	109
7.6.1	Seznam použitých obrázků	109
7.6.2	Seznam použitých rovnic	110
7.6.3	Seznam použitých tabulek	112

1. Úvod

Tlak na snižování emisí vede k nasazování diesellových busů s přísnějšími emisními limity a díky zlepšujícím se parametrům baterií také k vývoji čistě bateriových busů. Je třeba zdůraznit, že bateriový bus není čistě „bezemisní“ pohon, ale přesouvá emise do místa výroby elektrické energie (uvažujeme-li využití fosilních paliv). Výhoda bateriového pohonu je zejména tam, kde je výskyt i menších emisí problematický např. tunely, turistické oblasti, letiště, městská centra, okolí škol a podobně.

Dalším důvodem pro pořízení autobusů s tímto druhem pohonu jsou velmi nízké provozní náklady. V současné době jsou sice pořizovací náklady vyšší, než u ostatních typů busů, ale čas tento rozdíl pomalu srovnává a finanční návratnost bateriových busů začíná být únosná, především pak pro městské použití. To je výhoda i proti trolejbusům, které jsou také bez emisí, ale náklady na výstavbu a údržbu infrastruktury jsou velmi vysoké. Dálkové využití není zatím pro bateriový bus uvažováno, díky úměře hmotnost baterií versus ujetá vzdálenost.

Nezanedbatelnou výhodou bateriového busu oproti diesellovému je podstatné snížení hlukosti. To je žádoucí především při provozu v hustě osídlených částech měst.

Bateriové busy jsou slibnou technologií budoucnosti. Dodnes jejich masové nasazení bylo omežováno technologií a velkými počátečními investicemi. Přesto se však jejich vývoj nezastavil.

V současné době však již i tato propast začíná mizet a bateriové busy se jako prostředek ekologický, nehlučný a levný na provoz, jeví jako slibný kandidát nejenom pro městské provozy. Spolu s klesající dobou návratnosti investice do této technologie stoupá i potencionální zájem o tento druh pohonu.

Předkládaná diplomová práce je dle zadání rozdělena do tří bodů. V první části je rozebrána teorie bateriového pohonu busů všeobecně. Dále jsou v ní stručně popsány jednotlivé druhy, v současnosti provozovaných, bateriových busů.

Druhá část je zcela zaměřena na trakční měnič pro bateriový pohon, který je všeobecně popsán a dále je zde teoreticky popsán výpočet ztrát pro danou aplikaci.

V poslední části je samotný konkrétní návrh vhodného řešení trakčního měniče s konkrétními výkonovými polovodičovými moduly a v závěru jejich technicko – ekonomické srovnání. Jsou zde provedeny simulace pro jednotlivé moduly s použitím různých způsobů výpočtů a tepelných simulací.

1.1 Seznam symbolů a zkratk

T	Doba jedné periody
T_1	Celková doba sepnutého stavu (s náběhem)
T_{1N}	Doba plného sepnutí součástky (bez náběhů)
t_{on} ...	Doba náběhu sepnutí součástky
t_{off} ...	Doba náběhu vypnutí součástky
T_a ...	Teplota okolí
E_{fw}	Energetické ztráty propustným proudem
E_{sw}	Energetické ztráty spínacím proudem
E_{on} ...	Spínací energetické ztráty tranzistoru
E_{off} ...	Vypínací energetické ztráty tranzistoru
E_{rr} ...	Energetické ztráty zpětné diody
$R_{th\ iV}$...	Celková rezistivita tranzistoru
$R_{th\ iVR}$...	Celková rezistivita diody
$R_{th\ i}$...	Rezistivita chladicího systému
$T_{i(AV)V}$...	Skutečná teplota na tranzistoru pro daný bod cyklu
$T_{i(AV)VR}$...	Skutečná teplota na zpětné diodě pro daný bod cyklu
PWM_{zisk} ...	Zisk z použití PWM modulace s přidanou 3. harmonickou
U_{TOV}	Prahové napětí tranzistoru
U_{TOVR}	Prahové napětí diody
R_V	Diferenciální odpor tranzistoru
R_{VR}	Diferenciální odpor diody
P_{FWV}	Ztráty propustným proudem tranzistoru
P_{FWVR}	Ztráty propustným proudem diody
P_{SWV} ...	Spínací ztráty tranzistoru
P_{SWVR} ...	Spínací ztráty zpětné diody
P_{tot}	Celkové (totální) ztráty
$P_{tot(AV)V}$...	Celkové (totální) ztráty tranzistoru
$P_{tot(AV)VR}$...	Celkové (totální) ztráty diody
$U_v = U_d$	Jmenovité napětí baterie
$U_{VN} = U_{CE}$	Maximální napětí baterie
U_{Vmin} ...	Minimální napětí baterie
I_{zn} ...	Maximální velikost proudu do zátěže

U_{10f} ...	První harmonická výstupu fázového napětí střídače
U_{DC}	Napětí SS strany střídače
$I_{V(AV)}$...	Střední hodnota proudu tranzistoru
$I_{VR(AV)}$...	Střední hodnota proudu zpětné diody
I_{Vef} ...	Efektivní hodnota proudu tranzistoru
I_{VRef} ...	Efektivní hodnota proudu diody
M ...	Modulační poměr
U_{cc} ...	Dané napětí (v čase)
P_n ...	Jmenovitý výkon
P_{max} ...	Maximální výkon
f ...	Frekvence
f_{ATM}	Výstupní frekvence
f_{sw} ...	Spínací frekvence
U_{ATM}	Výstupní napětí
$U_{ATM(pom)}$	Výstupní napětí (poměrná hodnota)
U_{TO} ...	Prahové napětí
U_{TOV} ...	Prahové napětí tranzistoru
U_{TOVR} ...	Prahové napětí zpětné diody
U_{CE} ...	Napětí „kolektor-emitor“
I_c ...	Proud kolektorem
$\cos \varphi$...	Účinník (silový faktor)
$\cos \varphi_{ATM}$...	Účinník v daném čase cyklu
P_{on} ...	Spínací ztráty tranzistoru
P_{off} ...	Vypínací ztráty tranzistoru
L_{par} ...	Parazitní indukčnost
P_v ...	Jmenovitá hodnota výkonu
I_v ...	Jmenovitá hodnota proudu
I_{ATM}	Výstupní proud
$I_{ATM(pom)}$	Výstupní proud (poměrná hodnota)
U_v ...	Jmenovitá hodnota napětí
P_{tot} ...	Totální ztrátový výkon
W_h ...	Hustota energie
k ...	Koeficient
V_x ...	Označení IGBT tranzistoru

- V_{R_x}** ... Označení zpětné diody
- a** ... Poměr amplitudy třetí harm. a základní harmonické referenčního napětí
- t** ... Čas
- U_{mref}** ... Amplituda referenčního napětí

2 Bateriové busy

2.1 Problematika bateriového pohonu

Byl zadán požadavek na návrh trakčního měniče pro 6M bateriový bus, k tomuto byly předloženy parametry a vznikl dle dané dráhy cyklus, pro který musí být tento měnič dimenzován.

Bateriový pohon je jednodušší než hybridní pohon, ale má svá specifika, na které je třeba brát zřetel. Některé tyto aspekty se logicky shodují s problematikou hybridního pohonu, ale ani tak se nesmí zanedbat.

U bateriového pohonu je samozřejmě největší zřetel brán na samotnou baterii, u které při dimenzování musíme vzít v potaz mimo technických parametrů i samotnou velikost a hmotnost baterie, jelikož v současnosti jsou tyto parametry kritické pro plánovaný dojezd a obsaditelnost vozu.

2.1.1 Trakční baterie

Určujícími parametry baterií jsou kapacita, objem, hmotnost a cena.

Pro vozidla lehké trakce je možné pro pohon použít pouze baterie nebo baterie kombinované se superkapacitory, ale při jejich použití je třeba počítat s větší cenou, jelikož jejich hustota energie je řádově menší než u baterií. Hustota energie superkapacitoru je dána rov. 1, což je až čtyřicetkrát menší, než u baterií.

$$\frac{W_h}{kg} = 2.53 \quad (1)$$

Samotná velikost baterií významným způsobem zasahuje do obsaditelnosti busu, její váha a kapacita zase významně ovlivňují dojezd zařízení. Při dimenzování baterie je tedy třeba brát ohledy na všechny tyto aspekty. Velkým problémem vzhledem k velikosti baterií je situace, kdy bychom chtěli dimenzovat bus na delší dojezd. Pro návrh tohoto lze jen velmi hrubě použít vzorec 2.

$$\text{Hmotnost baterií} = k * \text{hmotnost vozu} * \text{požadovaný dojezd} \quad (2)$$

Kde koeficient "k" se pohybuje v rozmezí 0.001 až 0.002. Pro zpřesnění tohoto vzorce je žádoucí zohlednit i profil tratě.

Životnost baterií je v současnosti v průměru 3000 až 15000 nabíjecích (nebo vybíjecích) cyklů. U superkapacitorů je to více než 1000000 cyklů.

2.1.2 Požadavky baterií po vlastní spotřebu

Vlastní potřebu plně pokrývá standardně 24V akumulátor, který není součástí trakčního systému, ale nabíjí se během rekuperace při brzdění vozidla (samozřejmě i při standardním nabíjení).

Před vyjetím vozidla se standardně nechává 15-ti minutový interval, během kterého by se vozidlo mělo „připravit“ pro plný provoz v tzv. pohotovostním režimu. Při příjezdu na výchozí stanici je standardem, že vozidlo je v tomto okamžiku již vytopeno na 15 °C a maximální teplota uvnitř vozidla by nikdy neměla překročit 25 °C.

V České republice není klimatizace standardní součástí vozidla a ve většině případů se do vozidla instaluje klimatizační jednotka pouze do kabiny řidiče a interiér vozidla (tzv. salón pro cestující) je pouze ventilovaný. Poslední dobou se objevují klimatizace v linkových autobusech, ovšem není to stále pravidlem. Ani v tomto řešení pro oblastní provoz nebude tedy uvažována.

2.2 Současný stav na trhu bateriových busů

2.2.1 SOR

2.2.1.1 SOR EBN 10,5



Obrázek 1 - SOR EBN 10.5¹

Jedná se o městský nízkopodlažní elektro-bus. Vyrábí se ve variantách se třemi nebo se dvěma dveřmi. Je určen pro městský provoz, kde není zapotřebí jízda na delší vzdálenosti. Kapacitně je pro 72 osob, z toho 28 míst je určených k sezení u dvoudveřové varianty a 85 osob s 19-ti místy k sezení pro třídveřovou variantu.

Pohon elektro-busu obstarává šesti-pólový elektromotor TAM 1049 Pragoimex, který má jmenovitý výkon 120 kW. Motor má vodní chlazení. Vzniklé odpadní teplo je u tohoto typu elektro-busu využito v zimních obdobích pro vytápění interiéru – zefektivnění užití emisních teplot vzniklých při zahřívání měniče. Jako zdroj stlačeného vzduchu je zde užit rotační lamelový kompresor, jehož součástí je i sušič vzduchu a odlučovač oleje.

¹ DOMINIK736. Fotografie dopravních prostředků. [online]. 2012 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://forum.omsi.cz/viewtopic.php?f=6&t=667&start=70>.

Trakční 300 Ah baterie se skládá ze 180 článků, které mají každý samostatně svůj vlastní systém sledování přebíjení, podbíjení a teploty. Pro kompenzování teploty celého zařízení je nainstalován i systém celkového chlazení zařízení.

Baterie je temperována na nejnižší teplotu okolo 0 stupňů celsia a kvůli tomu musí být vozidlo po odstavení v zimním období připojeno na zdroj elektrické energie (tj. napájecí stojan pro elektro-bus) a využívat funkce ohřevu samotného bateriového boxu.

Dojezd celého vozidla je v ideálním stavu cca 110 – 160 km na jedno nabití. Co se týče vybíjení baterie, tak výrobce doporučuje nevybíjet na více než 80 % kapacity baterie (tj. pod 20 % celkové kapacity). Doba nabíjení busu se pohybuje okolo 8 hodin pro plně nabitý stav při „pomalém“ nabíjení 32 A. Je možné ještě nabíjet baterii 250 A. V tomto případě je vozidlo „nabito“ během jedné hodiny, ale klesá životnost baterie.

Během nabíjení je ještě možné nastavit ve vozidle funkci, která použije část energie pro vytápění busu během nabíjení a tak po ukončení nabíjecího cyklu je vozidlo vyhřáté a okamžitě připravené pro provoz.

Funkci vyhřívání na konci nabíjecího cyklu v praxi můžeme využít během nočního nabíjení, kdy chceme mít vozidlo připravené na provoz ihned po odpojení z nabíjecího zařízení (tj. například pro ranní linky).

2.2.1.2 SOR EBN 8



Obrázek 2 - SOR EBN 8²

Jedná se o menší autobus než SOR EBN 10,5. SOR EBN 8 je určený pro městský provoz na kratší vzdálenosti. Jedná se o dvounápravový elektrobus. Maximální obsaditelnost je 51 osob, z toho míst pro sezení je 16.

Jádro stroje tvoří také, jako u SOR EBN 10,5, elektromotor TAM 1049 Pragoimex a chlazení je také jako v předchozím případě provedeno použitím vodního chlazení.

² WIKIMEDIA. Czech Raildays 2012. [online]. 2012 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/18/Czech_Raildays_2012%2C_SOR_EBN_8_%2801%29.jpg

2.2.2 Solaris Urbino electric



Obrázek 3 - Solaris Urbino Electric³

Uvnitř autobusu se nachází čtyřpólový asynchronní trakční motor Vossloh Kiepe s maximálním výkonem 120 kW.

Dále Urbino Electric disponuje dvěma velkokapacitními bateriemi se jmenovitým napětím 600 V a bateriovou kapacitou 120 kWh. Každá z nich má váhu cca 700 kg a jsou chlazeny kapalinou.

Maximální dojezd vozidla je cca 100 km na jedno nabití a maximální rychlost je 50 kilometrů za hodinu.

Vlastní spotřeba autobusu je odebírána z trakčních akumulátorů. Dojezd se bude snižovat například v zimě, kdy z baterií bude navíc odebírána energie pro vytápění zařízení a interiéru.

³ SAMOCHODYELEKTRYCZNE.ORG. Solaris_urbino_12_electric. [online]. 2012 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: http://www.samochodyelektryczne.org/img/solaris_urbino_12_electric/zoom/solaris_urbino_12_electric_1.jpg

Nabíjení autobusu se provádí pomocí konektoru vyrobeného firmou Walter a na plné nabití z nulového stavu na terminálu 3*400 V 63 A stačí cca 4 hodiny.

Vozidlo je odlehčeno, aby byla vykompenzována vysoká váha baterií. Kvůli tomu jsou boční panely autobusu nahrazeny panely z uhlíkových vláken, které jsou velmi lehké a odolností se vyrovnají klasickým. Změnou prošla též okna (použili se tenčí skla), podlaha, překližky, ráfky a především eliminace veškerého paliva. Autobus je ale i přes to s vloženými bateriemi o něco těžší, než stejné vozidlo se spalovacím motorem.

Vnitřní i vnější světla užívají technologii vysoce svítivých LED diod a v kabině řidiče slouží k ovládání dotyková palubní deska.

2.2.3 Zeus M200E



Obrázek 4 - Zeus M200-E⁴

Dalším z aktuálně používaných bateriových busů je Zeus M-200 E. V současnosti je například užíván v Praze.

⁴ CARNERO. Elektrobuses v Praze. [online]. 2012 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://blog.galerie-autobusu.cz/z-provozu/elektrobuses-v-praze/>

Tento téměř šestimetrový (5,89 m) bus se parametry a nasazením asi nejvíce blíží námi navrhovanému elektrickému busu 6M.

Motor o maximálním výkonu 60 kW byl zkonstruován firmou Ansaldo Electric a jako měnič pro tento motor využívá práce třífázový napěťový měnič shodného typu jako bateriový bus 6M.

Baterii tvoří 78 lithium-polymerových článků, každý o kapacitě 200 Ah. Jmenovité napětí stejnosměrné části zapojení je 288 V.

Autobus disponuje nabíjecím zařízením (20A), které je součástí vozidla a vozí jej s sebou na trase.

2.3 Porovnání vybraných bateriových busů

	SOR EBN 10,5 - 1- 3	Urbino Electric	ZEUS M200E
Rozměry	10370x2525x2920	12000x2550x3250	5890x2070x2595
Váha	15,7 tun	18 tun	6,5 tun
Obsaditelnost	85 + 1	29 + 1	26 + 1
Elektromotor	Asynchronní, šestipólový (120 kW; max 180 kW)	Asynchronní, čtyřpólový (120 kW; max 180 kW)	Ansaldo Electric (30 kW; max 60 kW)
Akumulátor	Lithium-iontové (LiFeYP04)	Lithium-iontové (LiFeYP04)	Lithium- polymerové články
Dojezd	150 km	100 km	80 km
Konstrukční rychlost	80 km/hod.	50 km/hod.	50 km/hod.

Tabulka 1 – Porovnání vyráběných bateriových busů

Dvoudveřová varianta SOR EBN 10.5 a SOR EBN 8 v tomto porovnání (tabulka 1) není uvažována.

Při porovnání v současnosti neužívanějších bateriových busů zjistíme, že se v možnostech použití takřka neliší - všechny výše uvedené typy se jsou dimenzovány pro použití do městských aglomerací a je počítáno s kratšími vzdálenostmi mezi jednotlivými nabíjenými, tj. nejsou dimenzované pro delší dojezd.

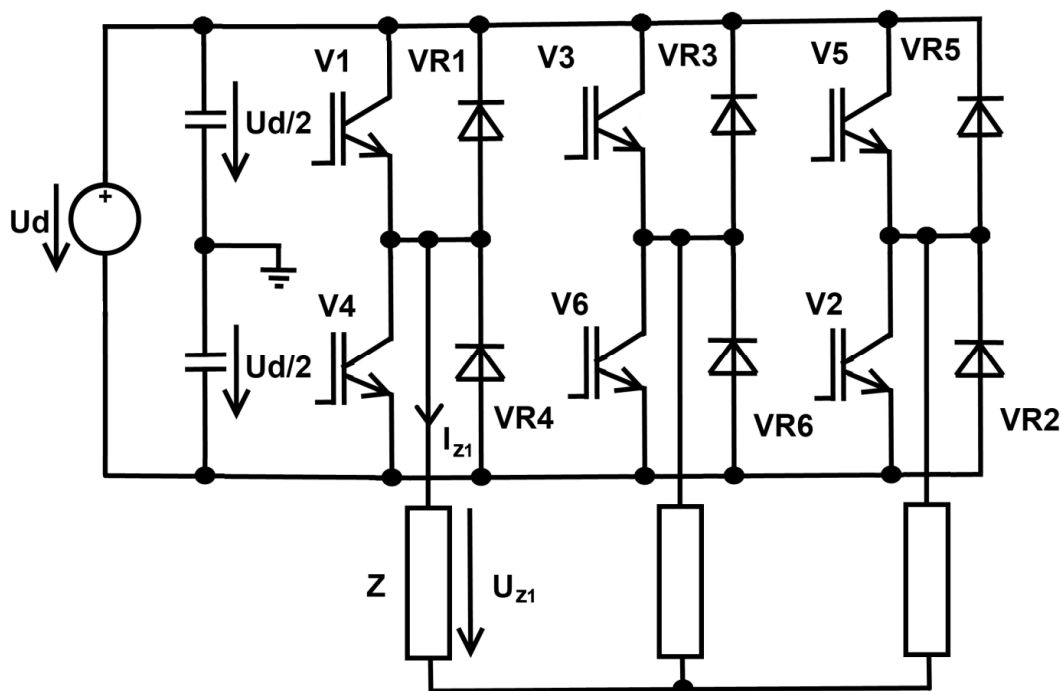
Při posouzení s ostatními výrobci bateriových busů (BYD, AMZ, atd.) zjistíme, že na současném trhu se tyto také ve způsobu použití většinou neliší a jedná se především o používání v městských částech, letištích a jiných podobných transportů na kratší vzdálenosti.

3 Trakční měnič pro bateriový pohon

3.1 Třífázový napěťový střídač s IGBT tranzistory všeobecně

Pokud chceme řídit motor, je uvažován třífázový střídač v můstkovém zapojení, který většina výrobců nabízí ve formě inteligentních výkonových modulů. Tyto moduly obsahují IGBT tranzistory, především kvůli jejich velice vhodným vlastnostem pro výkonová použití.

3.2 Náhradní schéma třífázového napěťového střídače s IGBT tranzistory



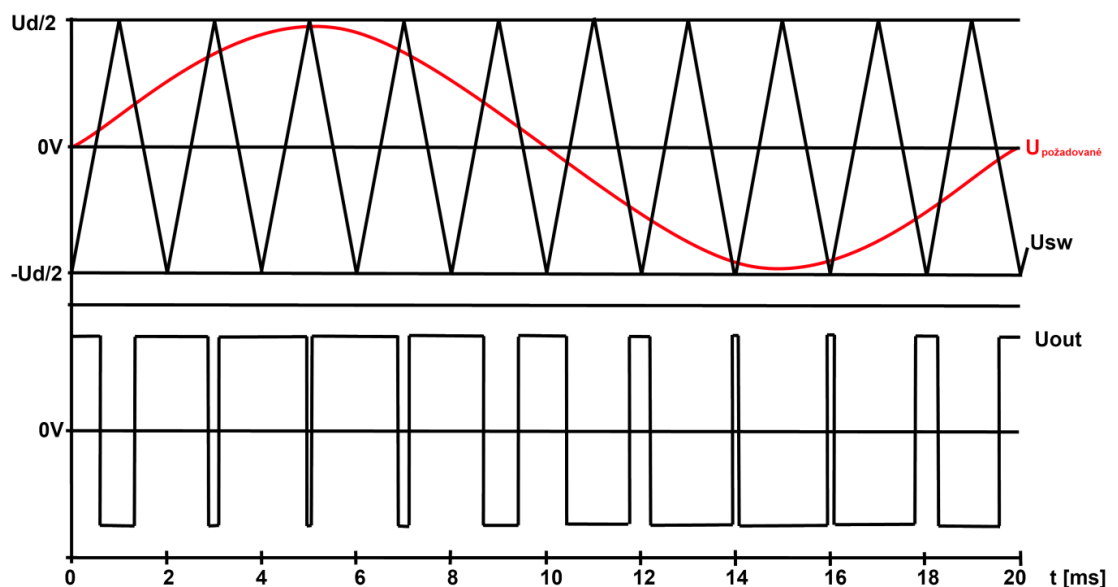
Obrázek 5 - Schéma 3f napěťového střídače

Pro naše použití je nejvhodnější užití trojfázového napěťového střídače, jehož základní schéma můžeme vidět na obr. 5.

Impedance na zátěži v tomto náhradním schématu představuje sériovou kombinaci odporu a indukčnosti jednotlivých fází motoru.

Pro námi dimenzovaný střídač bude nejvhodnější použít IGBT tranzistory, které ve schématu označujeme Vx. Pro zpětné diody je použito označení VRx.

Nejvhodnější způsob řízení výstupního napětí pro naši aplikaci je použití pulzně šířkové modulace (PWM – z anglického „pulse width modulation“).



Obrázek 6 - Pulzně-šířková modulace

Při tomto způsobu řízení výstupního napětí každý IGBT tranzistor spína a vypíná během časového intervalu, který je dán spínací frekvencí. Během tohoto časového úseku se mění doba sepnutí součástky (t_{1N} na obr. 7) tak, aby ve výsledku střední hodnota napětí v čase měla sinusový průběh.

„Pro lepší využití napětí stejnosměrného meziobvodu se vytváří referenční signál součtem základní harmonické s frekvencí f_{ref} a třetí harmonické s frekvencí $3f_{ref}$. Referenční napětí pak má velikost dle rovnice 3.

$$\mathbf{u}(t)_{ref\ a,b,c} = U_{Mref}[\sin(\omega_{ref} * t - 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ) + a * \sin(3 * \omega_{ref} * t)] \quad (3)$$

Kde a je poměr amplitudy třetí harmonické a základní harmonické referenčního napětí.“⁵

⁵ FLAJTINGR, Jiří a Lumír KULE. ZČU. Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči. 15. str. 2. upravené vyd. Plzeň: ZČU, 2005. ISBN 80-7043-354-X.

3.3 Výpočet ztrátového výkonu měniče s vlastní komutací

Při dimenzování výkonových polovodičových napěťových měničů je třeba počítat se ztrátami vznikajícími na výkonových součástkách. Ty negativně ovlivňují celý obvod a mají za následek oteplování součástek, které může v krajním případě součástku zničit.

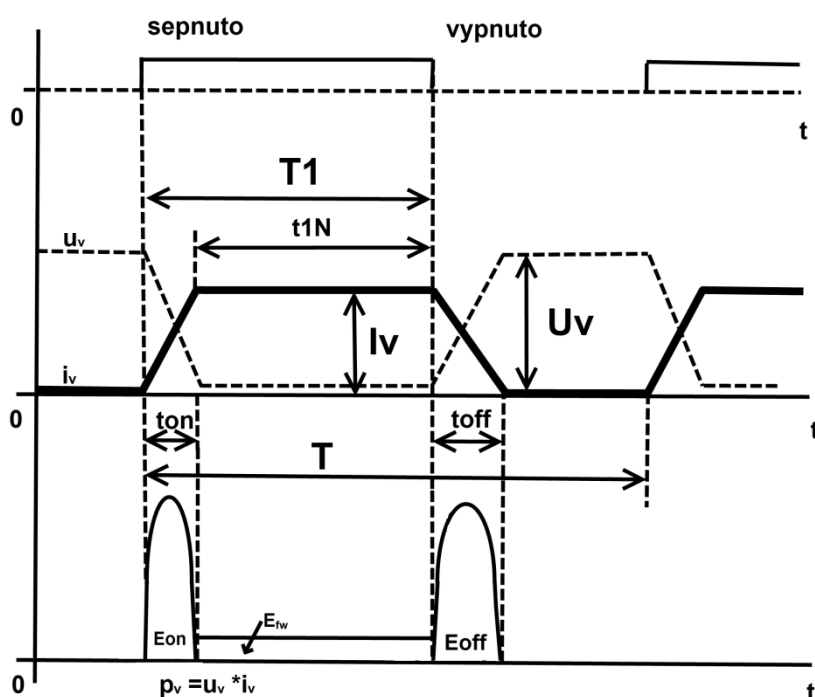
Pokud tyto stavy součástku přímo nezničí, tak mohou mít výrazný vliv na životnost dané součástky. Měli bychom tedy s těmito ztrátami a otepleními počítat a dimenzovat daný měnič pro provoz bez tepelně nezvládnutelných stavů (tj. neuchladitelných).

Výkonové ztráty na polovodičovém IGBT prvku lze rozdělit z hlediska průchodu elektrického proudu na:

- Ztráty propustným proudem
- Ztráty spínacím proudem
- Ztráty blokovacím proudem
- Ztráty závěrným proudem
- Ztráty řídicím (hradlovým) proudem

Obecné určení ztrátového výkonu všeobecně určíme ze vztahu 4.

$$p_v = u_v \cdot i_v \text{ [W]} \quad (4)$$



Obrázek 7 - Průběh ztrátového výkonu - spínací ztráty (polovodičové součástky)

Na obr. 7 stavy „sepnuto“ a „vypnuto“ značí současný stav sepnutí součástky. E_{on} a E_{off} jsou ztráty během spínání (za dobu T_{on} a T_{off}) a z obrázku je patrné, že hodnota těchto ztrát je dána přechodem z nuly na hodnotu I_v pro proud (napětí U_v) a naopak. V ideálním případě bychom tyto ztráty mohli také zanedbat (průběh skoku proudu a napětí by byl pravouhlý).

„T“ značí dobu jedné celé periody a v tato obsahuje dobu od sepnutí do vypnutí součástky (T_1), kde „ t_{1N} “ značí dobu plného sepnutí součástky bez náběhového stavu, během kterého vznikají spínací ztráty.

Během těchto přechodových stavů vznikají po celou dobu ztráty propustným proudem (E_{fw}), které jsou patrné z obrázku během doby t_{1N} .

Je patrné, že zbývající dvě složky, ztráty blokovací a ztráty závěrným proudem, můžeme považovat pro naše použití za zanedbatelné. V součtu spolu s řídicími ztrátami jsou pouze nepatrnou složkou z celkových ztrát.

Pro měniče s vlastní komutací musíme kvůli jejich vysokým spínacím kmitočtům (v našem případě 4 kHz) respektovat kromě ztrát propustným proudem i ztráty spínací. U takto vysokých frekvencí již spínací ztráty čítají až polovinu celkových ztrát. Se stoupající spínací frekvencí tento poměr narůstá.

Z výše zmíněných důvodů se tedy nebudeme zabývat ztrátami blokovacím, závěrným a řídicím proudem. Jejich velikosti budou pro danou aplikaci (trojfázový napěťový střídač) zanedbatelné.

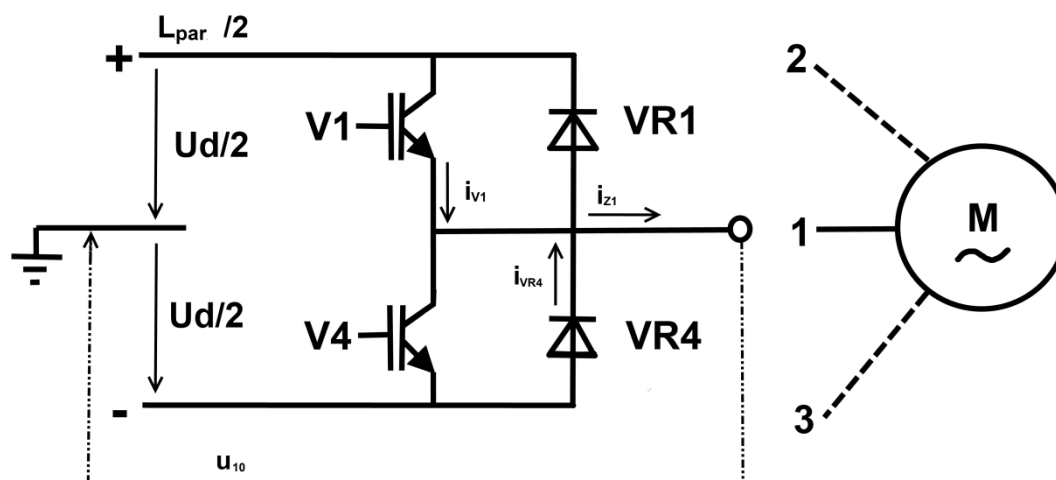
Součet všech respektovaných ztrát (v našem případě ztráty propustným proudem a ztráty spínacím proudem) se nazývá „totální ztrátový výkon,“ značí se P_{tot} a určuje součet všech ztrátových výkonů, kterými je součástka zahřívána (viz. rov. 5). Pro tento totální výkon je třeba dimenzovat součástku, aby teplota čipu nikdy nepřesáhla limitní teplotu.

$$P_{tot} = P_{FW} + P_{SW} [W] \quad (5)$$

V rov. 5 značí P_{FW} ztráty propustným proudem (forward losses) a P_{SW} ztráty proudem spínacím (switching losses).

3.3.1.1 Ztráty propustným proudem

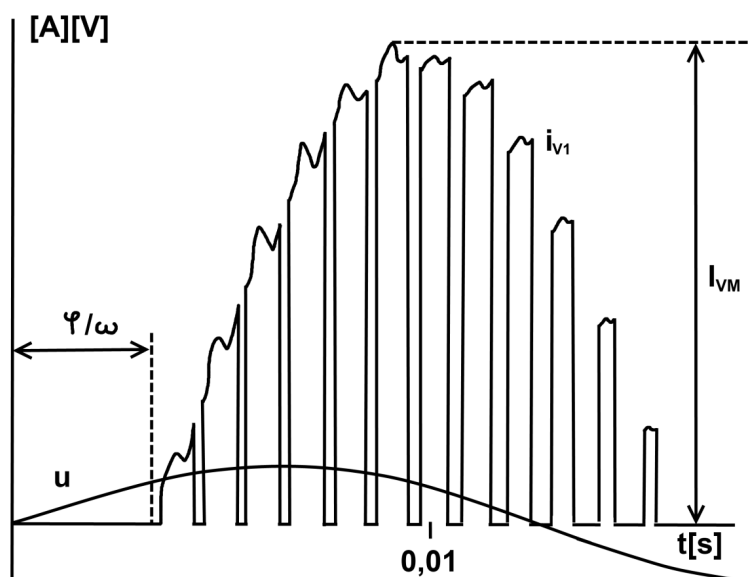
Pro ukázkou výpočtu ztrát propustným proudem (P_{FW}) zjednodušíme základní schéma zapojení třífázového napěťového střídače na schéma zapojení půlmůstku vycházejícího z obr. 5.



Obrázek 8 - Trojfázový napěťový půlmůstek pro jednu fázi

Na obr. 8 je tzv. půlmůstkové zapojení jednofázového napěťového střídače (pro trojfázové vedení uijeme jednoduše třikrát tento půlmůstek – pro každou fázi zvlášť, viz. obr. 5).

Pro výpočet střední hodnoty propustných ztrát musíme znát střední a efektivní hodnoty příslušného propustného proudu.



Obrázek 9 - Proud procházející tranzistorem při PWM

Tvar průběhu proudu, jaký můžeme vidět na obr. 9, znázorňuje (orientačně) průběh

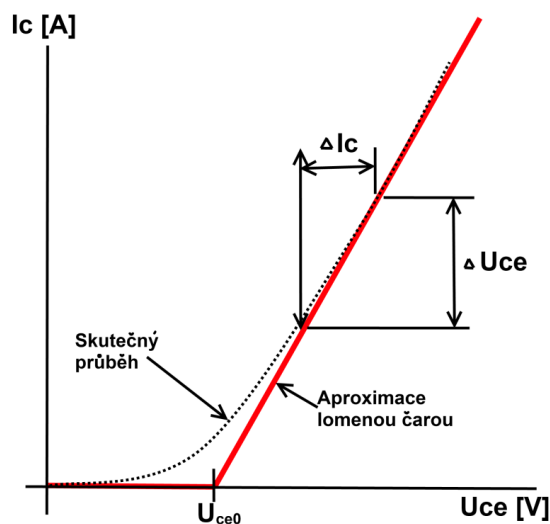
proudu skrz tranzistor V1 na obr. 8.

Střední hodnotu ztrátového výkonu daného propustným proudem lze vypočítat pomocí vztahu 6, kde $I_{V(AV)}$ je střední hodnota průběhu proudu součástkou, I_{Vef} efektivní hodnota průběhu proudu součástkou, U_{TO} je prahové napětí a R_V je diferenciální odpor.

$$P_{fw(AV)} = U_{TO} \cdot I_{V(AV)} + R_V \cdot I_{Vef}^2 \quad (6)$$

Z výše uvedeného vzorce vyplývá, že pro další výpočty musíme znát mimo jiné hodnotu diferenciálního odporu (R_V). Toho dosáhneme pomocí aproximace skutečného průběhu a použitím vzorce 7.

$$R_V = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} \quad (7)$$



Obrázek 10 - Aproximace propustné charakteristiky pro výpočet ztrát

Na obr. 10 značí U_{CE} napětí „kolektor-emitor“ na součástce a I_C je proud procházející kolektorem. Výsledná aproximace odečtených hodnot se provede dle rov. 7.

Pro výpočet střední hodnoty proudu tranzistoru uijeme vztah 8, kde i_z je proud do zátěže, M je modulační index a $\cos\varphi$ je silový faktor (účinník).

$$I_{V(AV)} = i_z \left(\frac{1}{\pi\sqrt{2}} + \frac{M}{4\sqrt{2}} \cdot \cos\varphi \right) \quad (8)$$

Pro výpočet střední hodnoty proudu zpětné diody uijeme vztah 9.

$$I_{VR(AV)} = i_z \left(\frac{1}{\pi\sqrt{2}} - \frac{M}{4\sqrt{2}} \cdot \cos\varphi \right) \quad (9)$$

Dle rov. 10 vypočteme efektivní hodnoty proudu tranzistoru.

$$I_{Vef} = I_z \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2M}{3\pi} \cos\varphi} \quad (10)$$

Podobnou rovnicí (11) vypočteme efektivní hodnoty proudu zpětné diody.

$$I_{VRef} = I_z \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{2M}{3\pi} \cos\varphi} \quad (11)$$

Tím získáme hodnoty pro výpočet střední hodnoty ztrátového výkonu daného propustným proudem dle vztahu 6.

3.3.1.2 Ztráty spínacím proudem

Spínací ztráty stoupají úměrně se zvyšující se spínací frekvencí. Při každém sepnutí součástky vzniknou zapínací ztráty P_{on} . Během doby t_{on} dochází k nárůstu proudu I_C na jmenovitou hodnotu a současněmu poklesu napětí U_{CE} na minimální hodnotu. Během této doby vzniká ztrátová energie, která se pro každá tato sepnutí během opakování samozřejmě sčítá a výsledek během času může mít velice negativní vliv (viz. obr. 7 a 11).

Pro výpočet ztrátové energie E_{on} při zapnutí a vypnutí E_{off} uijeme rovnice 12 a 13, kde i_v je jmenovitý proud a u_v je jmenovité napětí součástky. Integrál je počítán od nuly do času zapnutí či vypnutí (t_{on} , t_{off}).

$$E_{on} = \int_0^{t_{on}} i_v \cdot u_v dt \quad (12)$$

$$E_{off} = \int_0^{t_{off}} i_v \cdot u_v dt \quad (13)$$

Po získání hodnot z rovnic 12 a 13 můžeme psát rovnici pro střední spínací ztrátový výkon při spínání (rov. 14), kde f je spínací frekvence, I_C je proud kolektorem součástky, t_{on} doba náběhu sepnutí a U_{CE} je napětí mezi kolektorem a emitorem součástky.

$$P_{on(AV)} = \frac{1}{T} E_{on} = f \cdot E_{on} = 0,5 \cdot U_{CE} \cdot I_C \cdot f \cdot t_{on} \quad (14)$$

Z rozpadu vzorce 14 můžeme vidět závislost těchto ztrát na frekvenci. Jednoduše se vynásobí ztrátová energie pro jedno sepnutí danou frekvencí a tím získáme sumář těchto ztrát za jednu periodu.

Při každém vypnutí součástky vznikají vypínací ztráty P_{off} . Během doby t_{off} proud klesá k nule a napětí roste na jmenovitou hodnotu. Odvodíme tedy rovnici pro střední vypínací ztrátový výkon (rov. 15).

$$P_{\text{off(AV)}} = \frac{1}{T} E_{\text{off}} = f \cdot E_{\text{off}} = 0,5 \cdot U_{\text{CE}} \cdot I_{\text{C}} \cdot f \cdot t_{\text{off}} \quad (15)$$

Výrobci výkonových polovodičových spínacích součástek udávají závislost prvků na ztrátových energiích E_{on} , E_{off} pro tranzistor a E_{rr} pro zpětnou diodu v závislosti na velikosti proudu procházejícího součástkou I_{C} . Tyto závislosti jsou měřeny při napětí U_{CC} . Pro výpočet spínacích ztrát pro libovolné napětí U_{CE} je nutné provést přepočty s použitím vzorců 16, 17 a 18.

$$P_{\text{SW(AV)on}} = \left(\frac{U_{\text{CE}}}{U_{\text{CC}}} \right) * f * E_{\text{on}} * (\text{Pro dané } I_{\text{C}}) \quad (16)$$

$$P_{\text{SW(AV)off}} = \left(\frac{U_{\text{CE}}}{U_{\text{CC}}} \right) * f * E_{\text{off}} * (I_{\text{C}}) \quad (17)$$

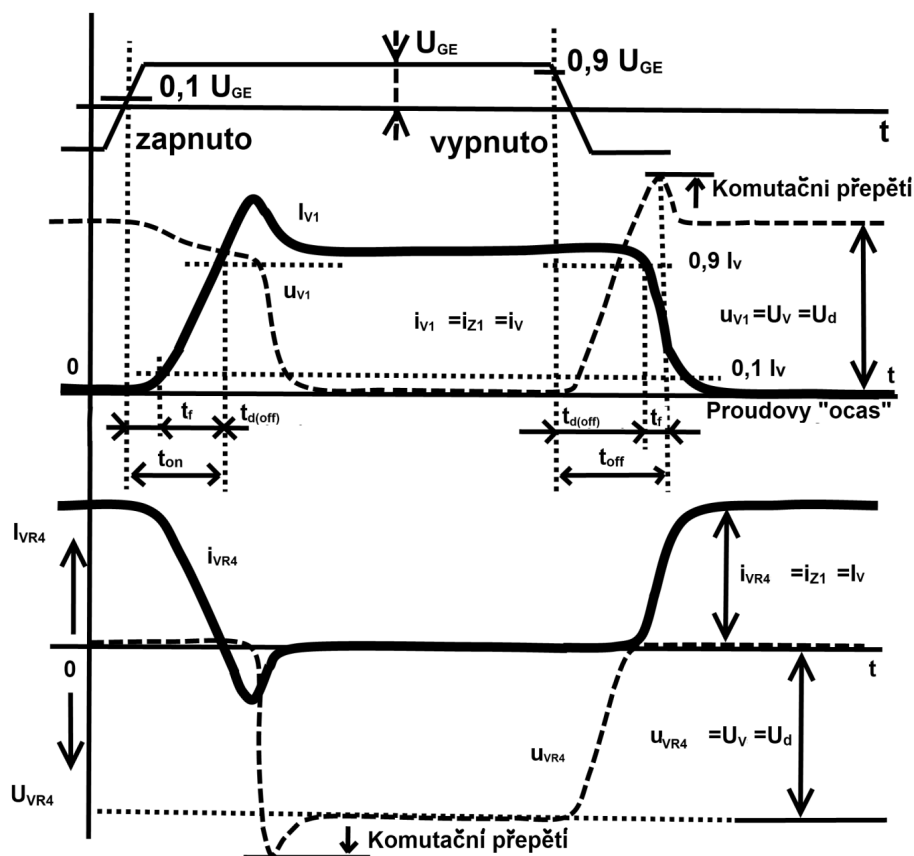
$$P_{\text{SW(AV)VR}} = \left(\frac{U_{\text{CE}}}{U_{\text{CC}}} \right) * f * E_{\text{rr}} * (I_{\text{C}}) \quad (18)$$

Pro naši aplikaci uvažujeme trojfázový napěťový střídač s použitím IGBT tranzistorů. Předpokládá se, že ze společného uzlu je odebíraný neproměnný proud zátěže i_z a komutující obvod neobsahuje žádnou indukčnost. Parazitní indukčnost L_{par} (viz. obr. 8) je omezena na minimum. V tomto případě proud na tranzistoru V_1 má průběhy při zapínání i vypínání v podstatě shodné s průběhy zobrazenými na obr. 11.

Je třeba ovšem mít na paměti, že v tomto případě je při zapínání i vypínání napětí na tranzistoru ovlivněno právě parazitní indukčností L_{par} - při zapínání je toto napětí zmenšeno oproti u_d a při vypínání naopak překmitne přes velikost u_d .

Tento rozdíl nezýváme tzv. komutační přepětí a jeho velikost je patrná z obr. 11. Kromě toho při zapínání proud tranzistoru přerůstá přes I_V vlivem zotavovacího proudu zpětné diody.

Zapínací a vypínací doba IGBT tranzistorů je v katalogích dána podle definice na obrázku 11 (je zde patrný rozdíl mezi reálnými a idealizovanými poměry).



Obrázek 11 - Průběh napětí a proudu - komutující tranzistor se zpětnou diodou

V katalogu jsou zpravidla od výrobců uvedeny hodnoty E_{on} , E_{off} a E_{rr} jako funkce spínaného proudu, doplněné údajem o napětí, pro které daná funkce platí.

Výrobci výkonových modulů zpravidla uvádějí ve svých katalogích hodnotu ztrátové energie (E_{on} , E_{off} , E_{rr} pro zpětnou diodu), ale tyto hodnoty by se nám pro vztahy 19 a 20 nehodily a musíme tedy aproximovat z průběhu $E[\text{mJ}]/I_c[\text{A}]$, který je vždy uvedený v příslušném datovém listě pro daný modul (viz. příloha 7.2.1; 7.2.2 a 7.2.3). Tím získáme hodnoty K_{on} , K_{off} a K_{rr} pro zpětnou diodu.

Pro výpočet střední hodnoty spínacích ztrát na IGBT tranzistoru střídače můžeme použít vztah 19.

$$P_{SW(AV)V} = \frac{U_V \cdot I_z \cdot f \cdot (K_{on} + K_{off})}{\pi \cdot U_{VN}} \quad (19)$$

Dále můžeme odvodit vztah pro výpočet střední hodnoty spínacích ztrát na zpětné diodě pomocí rovnice 20.

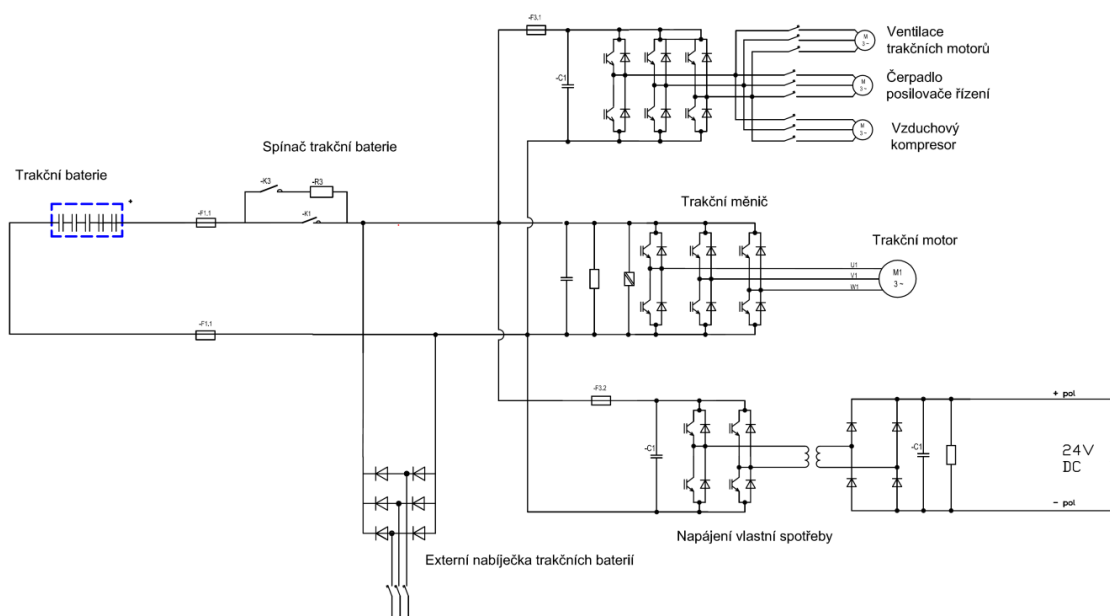
$$P_{SW(AV)VR} = \frac{U_V \cdot I_z \cdot f \cdot K_{rr}}{\pi \cdot U_{VN}} \quad (20)$$

4 Výběr a dimenzování trakčního měniče pro pohon 6M bateriového busu

4.1 Požadované parametry

Na obrázku 12 je zjednodušené schéma zapojení pro bateriový bus 6M. Trakční baterie je spínána k měniči spínačem trakční baterie. Stejnoseměrný zdroj (24V) slouží k napájení vlastní spotřeby vozidla (detailní zapojení VS není součástí zjednodušeného schéma na obr. 12).

Externí nabíječka trakčních baterií bude realizována pomocí plně automatizovaného hydraulického ramena s pevným připojením k napájecí síti.



Obrázek 12 - Schéma zapojení

Máme zadané požadované hodnoty vyplývající z cyklu.

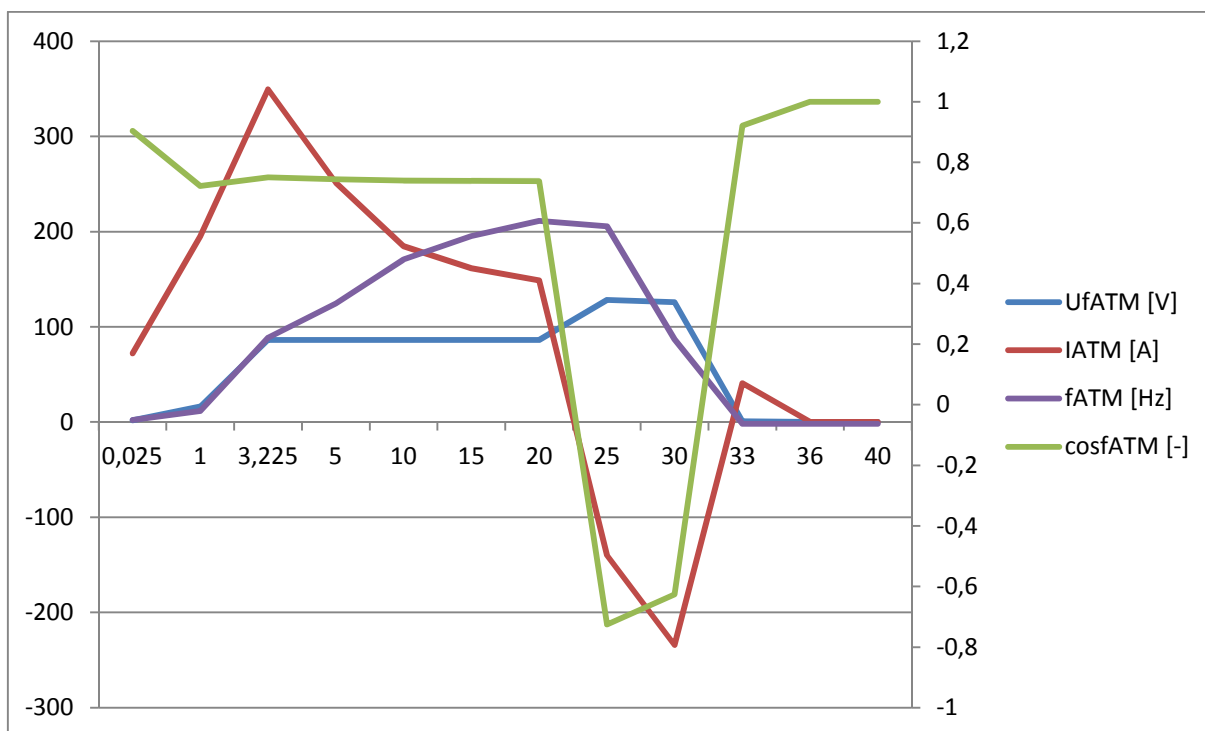
Hodnoty $U_{ATM(pom)}$ a $I_{ATM(pom)}$ uvedené v tabulce 2 jsou poměrné a byly přepočítány pomocí vydělení cyklem daných hodnot U_{ATM} a I_{ATM} hodnotami jmenovitými.

V původně zadaných hodnotách cyklu se s hodnotami $U_{ATM(pom)}$ a $I_{ATM(pom)}$ nepočítá. Jejich velikosti byly dopočteny pouze pro potřeby aplikace SEMISEL pro modul SKiM63 (viz. kap. 4.4).

t [s]	U_{ATM} [V]	$U_{ATM (pom)}$ [V]	I_{ATM} [A]	$I_{ATM (pom)}$ [A]	$\cos\phi_{ATM}$ [-]	U_{DC} [V]	f_{ATM} [Hz]
0,03	1,723045	0,00783202	72,05658	0,423862	0,903578	220	2,042589
1	16,36936	0,07440618	194,816	1,145976	0,721752	220	11,63218
3,23	86,3716	0,39259818	349,4742	2,05573	0,75006	220	88,61548
5	86,3716	0,39259818	251,1358	1,477269	0,743703	220	124,5896
10	86,3716	0,39259818	184,7272	1,086631	0,739468	220	170,5842
15	86,3716	0,39259818	161,5768	0,950452	0,738395	220	195,11
20	86,3716	0,39259818	148,8091	0,875347	0,738317	220	211,3032
25	128,37961	0,58354366	140,125	-0,824265	-0,72578	327	205,6742
30	125,95572	0,572526	234,0102	-1,376531	-0,62583	327	86,94102
33	0,896034	0,00407288	40,76138	0,239773	0,92093	220	-1,70781
36	0	0	0	0	1	220	-1,70781
40	0	0	0	0	1	220	-1,70781

Tabulka 2 - Zadaný cyklus

Z cyklu zadaného v tabulce 2 vyplývá graf č. 1.



Graf 1 - Zadaný cyklus

Dané parametry měniče jsou uvedeny v tabulkách 3,4 a 5.

Zadané hodnoty pro motor:	
Jmenovitý výkon	$P_n = 30000$ [W]
Maximální výkon	$P_{max} = 60000$ [W]
Účinník	$\cos \phi = 0,87$ []
Modulace	PWM s 3. harmonickou

Tabulka 3 - Parametry motoru

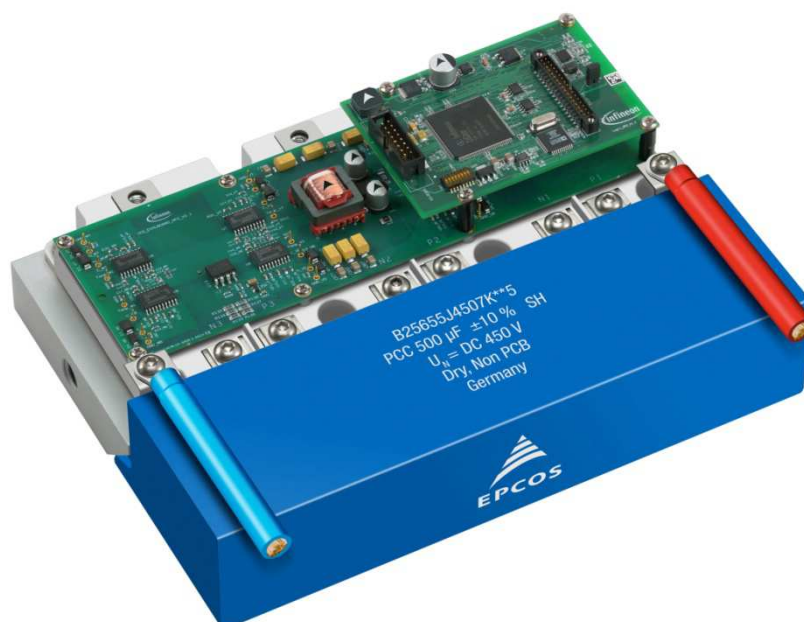
Zadané hodnoty pro měnič:	
Spínací frekvence	fsw = 4000 [Hz]

Tabulka 4 - Parametry měniče

Zadané hodnoty trakční baterie:	
Jmenovité napětí baterie	UV = Ud = 220 [V]
Maximální napětí baterie	Uvn = UCE = Vce = 300 [V]
Minimální napětí baterie	Uvmin = 257 [V]
Proud do motoru	Iz = 349,4742
	Izn = 494,23 A

Tabulka 5 - Parametry trakční baterie

4.2 Modul 1 – Hybridpack2 (Infineon)

Obrázek 13 - Hybridkit pro Hybridpack2⁶

Modulová série Hybridpack2 je dimenzovaná pro použití u hybridních a plně elektrických vozidel s výkonem do 100 kW (ne amplituda, ale jmenovitý trvalý výkon).

Součástky v modulu jsou dimenzovány pro použití do 150 °C provozní teploty (maximální hodnota je 175 °C). Maximální provozní hodnoty pro modul jsou 800 A a 650 V.

Výrobce uvádí, že díky technologii „Trench-Field-Stop,“ použité u IGBT tranzistorů, tato

⁶ EPCOS.COM. PressReleases2010. [online]. 2012 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: http://www.epcos.com/web/generator/Web/Sections/Press/TradePress/PressReleases2010/Images/PCC_Hybridpack_Produktbild,property=Data_en.jpg;PCC_Hybridpack_Produktbild.jpg

zajišťuje co možná nejnižší spínací ztráty.

Součástí této sestavy je i chladič a ovládací prvky (tato součást se nazývá Hybridkit). Chladič je sám o sobě uvažován pro použití s vodním chlazením, jehož parametry korespondují se zadáním pro naši aplikaci (viz. příloha 7.2.1).

Tento modul nebyl firmou Infineon bohužel do současnosti přidán do simulačního programu Iposim a tak v něm nemůže být pro tento modul provedena simulace. Provedeme tedy předběžný výpočet výkonových ztrát a následně tepelná simulace proběhne v aplikaci Simplorer V9.

4.2.1 Teoretický výpočet ztrát

4.2.1.1 Výpočty ostatních hodnot vyplývajících ze zadání

Pro naši aplikaci si proud do zátěže (I_z – viz. rov. 21) vezmeme ze zadaného cyklu v tabulce 2 (pro nejhorší variantu, tj. největší hodnotu proudu).

$$I_z = 349,4742 \text{ A} \quad (21)$$

Ze zadání cyklů známe 1. harmonickou výstupního fázového napětí střídače pro nejhorší možnou variantu (tj. pro výstupní proud daný rov. 21).

$$U_{10f} = 86,3716 \text{ V} \quad (22)$$

Z ní vypočteme amplitudu 1. harmonické fázového napětí střídače (rov. 23), která nám poslouží pro další výpočty.

$$U_{10m} = U_{10f} * \sqrt{2} = 86,3716 * \sqrt{2} = 122,149 \text{ [V]} \quad (23)$$

Dále si vypočteme hloubku modulace z hodnot daných zadáním a cyklem (rov. 24).

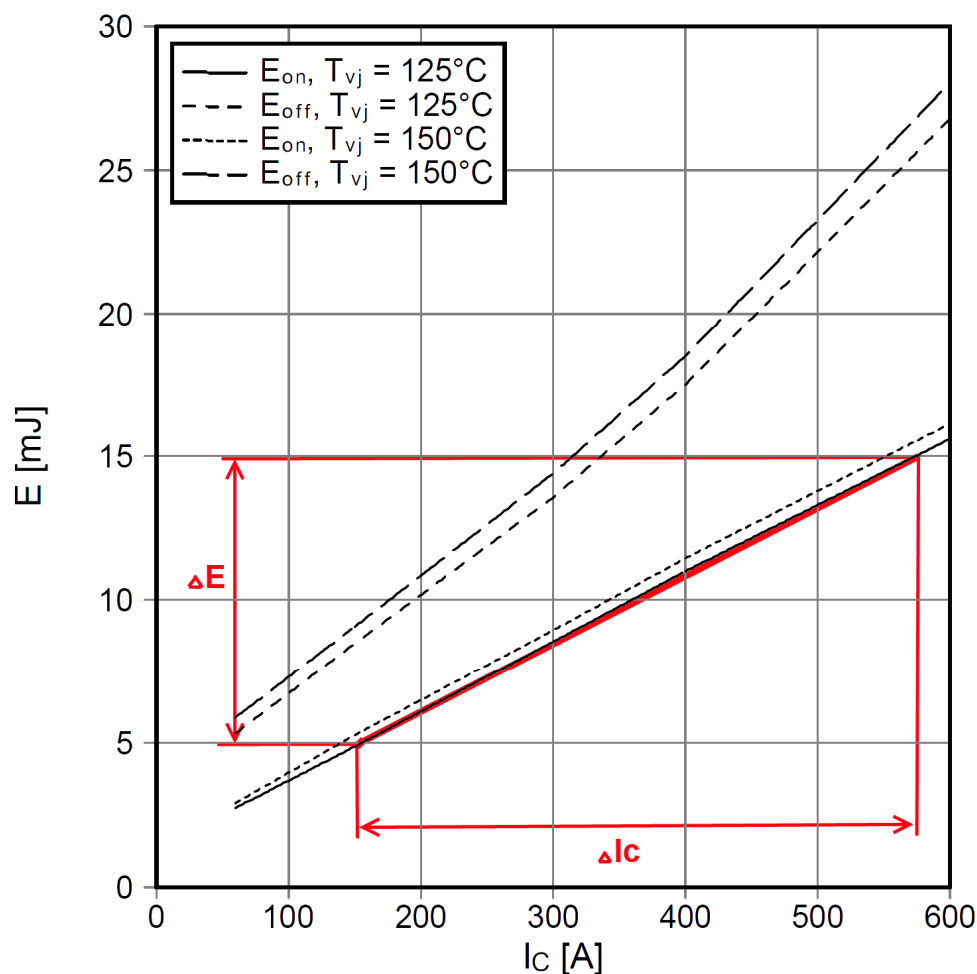
$$M = \frac{U_{10m}}{U_D * 0,577} = \frac{122,149}{220 * 0,577} = 0,9622 \quad (24)$$

Hodnota 0,577 obsažená ve vzorci 24 se přímo vztahuje k zadanému typu modulace PWM. Musíme ji uvažovat při „umělém“ přidání třetí harmonické do signálu.

*„Referenční napětí obsahuje asi 17 procent přidané třetí harmonické do původního signálu. Tato metoda umožňuje realizovat amplitudu základní harmonické napětí $U_{(1)} = 0,577 * U_D$*

při hloubce modulace $m = 1$, tzn. Asi o 15 procent lepší napěťové využití meziobvodu než při komparační sinusové PWM.⁷

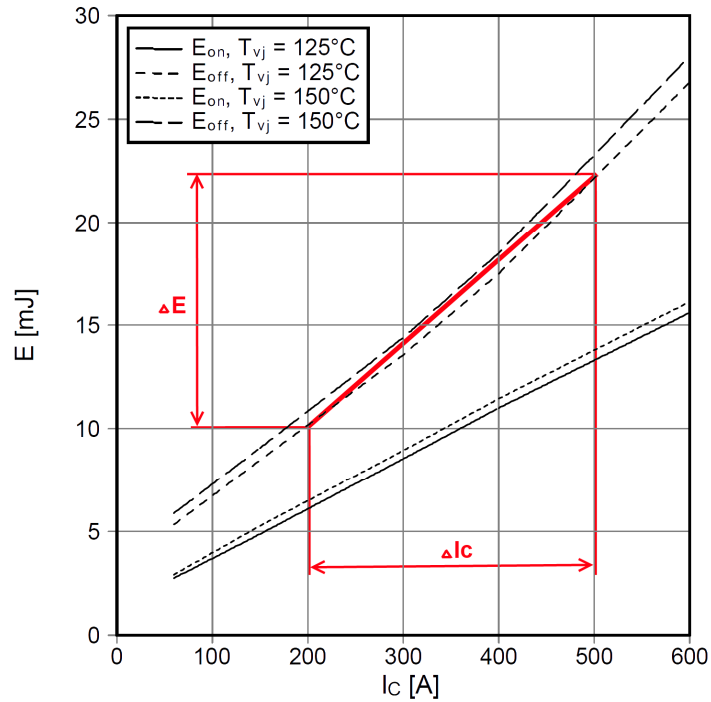
Pro výpočet budeme muset aproximovat ztrátové energie (vezmeme v úvahu průběhy pro 125 °C), ze kterých budeme postupně odečítat hodnoty energií a proudů kolektorem na grafech 3,4,5 a vypočítávat pomocí vzorců 25, 26 a 27.



Graf 2 – Aproximace ztrátové energie pro K_{on}

$$K_{on} = \frac{\Delta E}{\Delta I_c} = \frac{0,01}{425} = 0,0000235 \quad (25)$$

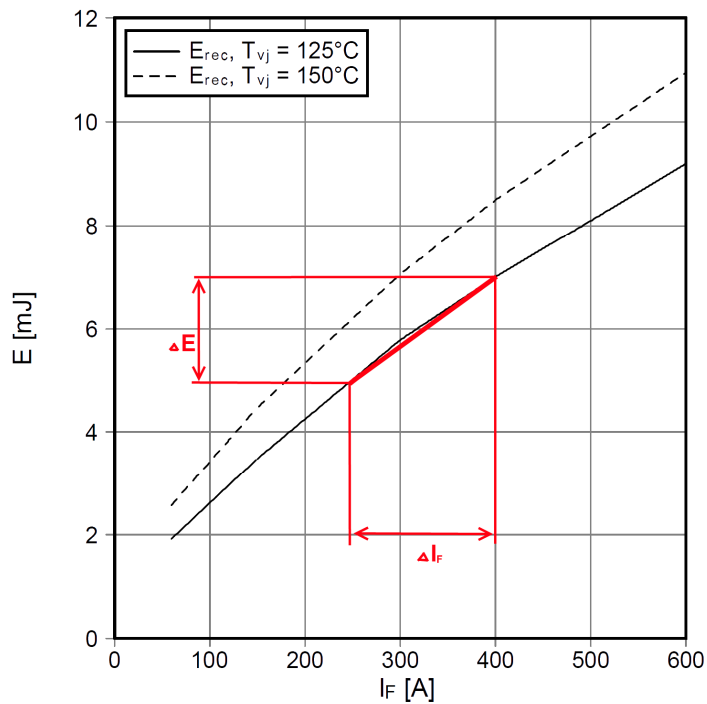
⁷ FLAJTINGR, Jiří a Lumír KULE. ZČU. Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči. 15. str. 2. upravené vyd. Plzeň: ZČU, 2005. ISBN 80-7043-354-X.



Graf 3 - Aproximace ztrátové energie pro K_{off}

$$K_{off} = \frac{\Delta E}{\Delta I_c} = \frac{12,5 \cdot 10^{-3}}{300} = 0,0000417 \quad (26)$$

Podobnou aproximaci musíme provést i pro zpětnou diodu (postup je analogický jako v případě aproximace ztrátové energie spínací a odpínací pro tranzistory, jediný rozdíl je, že v tomto případě budeme aproximovat průběh v tabulce závislosti $E[\text{mJ}]/I_F[\text{A}]$ – viz. graf 4).



Graf 4 - Aproximace ztrátové energie diody pro K_{rr}

$$K_{rr} = \frac{\Delta E}{\Delta I_F} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{160} = 0,0000125 \quad (27)$$

4.2.1.2 Výpočet ztrát spínacím proudem

Nyní známe všechny hodnoty potřebné pro dopočítání ztrát spínacím proudem na tranzistoru dle rov. 28.

$$P_{SW(AV)V} = \frac{U_V}{U_{VN}} * f_{sw} * \sqrt{2} * \frac{I_z * (K_{on} + K_{off})}{\pi} =$$

$$\frac{220}{300} * 4000 * \sqrt{2} * \frac{349,4742 * (0,0000235 + 0,0000417)}{3,14} = 4148,359783 * 7,256598 * 10^{-3} =$$

$$30,1 \text{ W} \quad (28)$$

Analogicky provedeme podobný výpočet pro zpětnou diodu dle rov. 29. Tím získáme hodnoty ztrát pro tranzistor i diodu (pouze na jedné součástce).

$$P_{SW(AV)VR} = \frac{U_V}{U_{VN}} * f_{sw} * \sqrt{2} * \frac{I_z * K_{rr}}{\pi} = \frac{220}{300} * 4000 * \sqrt{2} * \frac{349,4742 * 0,0000125}{3,14} =$$

$$4148,359783 * 1,391218949 * 10^{-3} = 5,77 \text{ W} \quad (29)$$

4.2.1.3 Výpočet ztrát propustným proudem

Pro výpočet ztrát propustným proudem budeme potřebovat provést několik vedlejších výpočtů pro doplnění finálních vzorců pro výpočet ztrát propustným proudem (tj. získání potřebných hodnot pro tento výpočet).

Účinník má v daném bodu cyklu (odečteno pro nejhorší variantu proudu) hodnotu dle rov. 30.

$$\cos \varphi = 0,75006 \quad (30)$$

V první řadě musíme provést výpočet střední hodnoty proudu tranzistorem (viz. rov. 31).

$$I_{V(AV)} = I_z * \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{M * \cos \varphi}{\sqrt{2}} \right) = 349,4742 * \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{0,9622 * \cos 0,75006}{\sqrt{2}} \right) = 349,4742 *$$

$$(0,22519 + 0,17) = 138,14 \text{ A} \quad (31)$$

Pro střední hodnotu proudu diodou uijeme rov. 32.

$$I_{VR(AV)} = I_z * \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{M * \cos \varphi}{\sqrt{2}} \right) = 349,4742 * \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{0,9622 * \cos 0,75006}{\sqrt{2}} \right) = 349,4742 *$$

$$(0,22519 - 0,17) = 19,29 \text{ A} \quad (32)$$

Dále vypočteme efektivní hodnoty proudu tranzistorem pomocí rov. 33.

$$I_{Vef} = I_z * \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2*M}{\pi*\cos\varphi}} = 349,4742 * \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1,9244}{3,14*\cos 0,75006}} =$$

$$349,4742 * \sqrt{\frac{1}{4} + 0,2043} = 235,55 \text{ A} \quad (33)$$

A v neposlední řadě vypočítáme efektivní hodnoty proudu diodou pomocí rov. 34.

$$I_{VRef} = I_z * \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{2*M}{\pi*\cos\varphi}} = 349,4742 * \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1,9244}{3,14*\cos 0,75006}} = 349,4742 * \sqrt{\frac{1}{4} - 0,2043} = 74,7 \text{ A} \quad (34)$$

Když máme hodnoty z rovnic 30 až 33, tak pro výpočet amplitudy první harmonické napětí musíme určit zisk, který získáme díky použití pulzně šířkové modulace (tento je daný – viz. rov. 35).

$$\text{PWM}_{\text{zisk}(\%)} = 15 \text{ [%]} \quad (35)$$

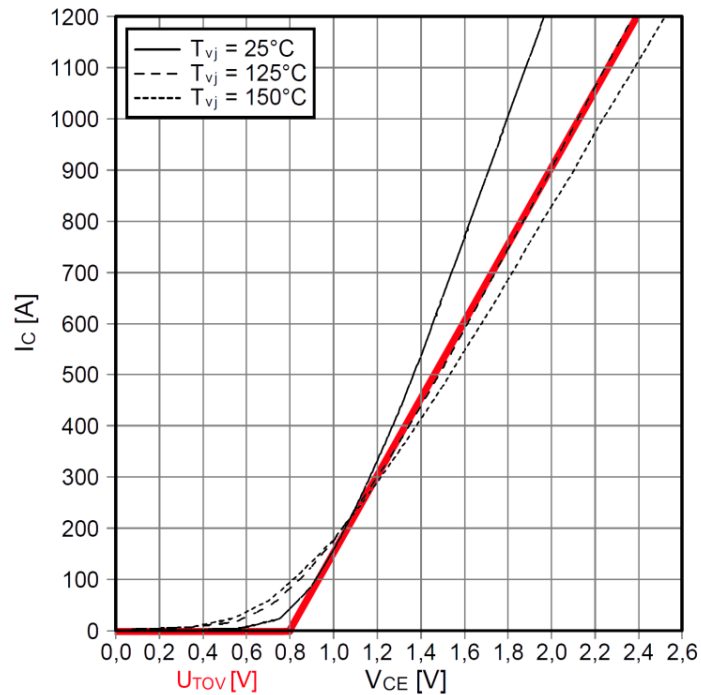
Výpočet amplitudy první harmonické napětí provedeme pomocí vztahu 36.

$$U_{10m} = M * 0,577 * U_D = 0,9622 * 0,577 * 220 = 122,14 \text{ V} \quad (36)$$

Pro výpočet ztrát propustným proudem musíme ještě znát hodnoty prahových napětí na součástce. Tyto odečteme z příslušných grafů v příloze 7.2.1.

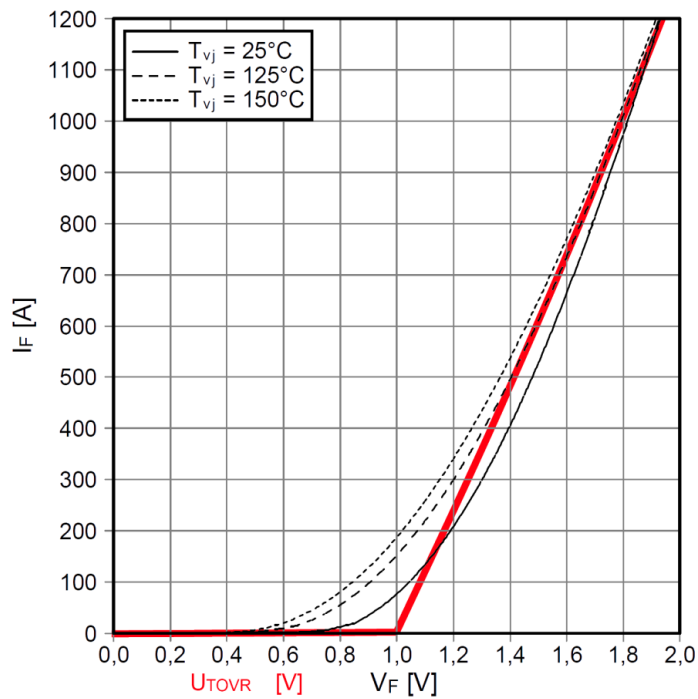
Pro získání těchto hodnot se z průběhů daných technickými parametry od výrobce (závislost I_c na V_{ce}) musíme udělat tečnu daného průběhu napětí a v místě protnutí s osou V_{ce} získáme požadovanou hodnotu prahového napětí součástky (pro tranzistor viz. graf 5, pro zpětnou diodu viz. graf 6).

Hodnoty prahových napětí součástky získané po odečtu jsou uvedeny v rovnicích 37 (pro tranzistor) a 38 (pro diodu).



Graf 5 - Odečet prahového napětí U_{TOV}

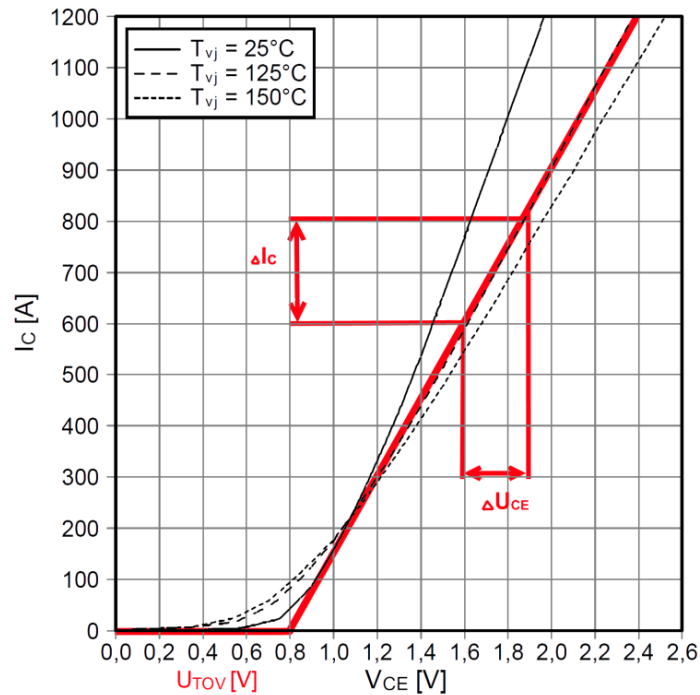
$$U_{toV} = |125^\circ\text{C}| = 0,8\text{ V} \quad (37)$$



Graf 6 - Odečet prahového napětí U_{TOVR} pro diodu

$$U_{toVR} = |125^\circ\text{C}| = 1\text{ V} \quad (38)$$

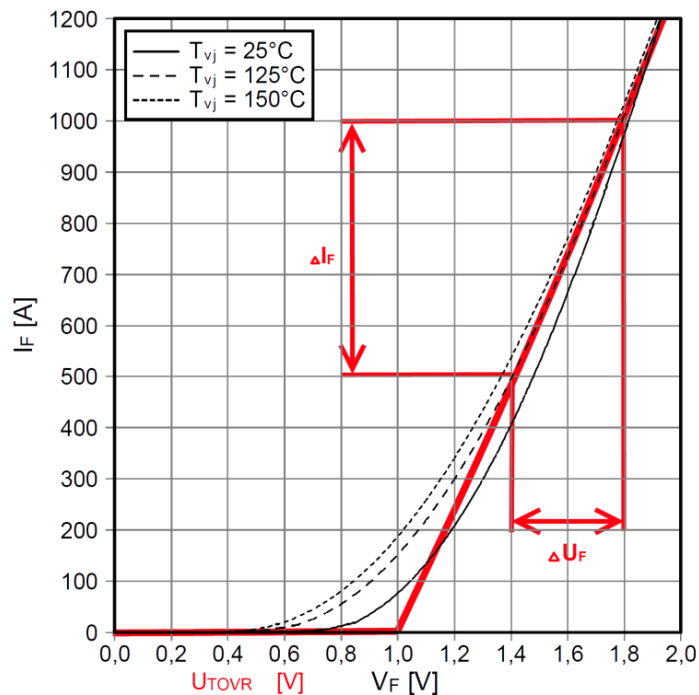
Dále budeme muset zjistit hodnoty přechodových odporů pro tranzistor. Toho docílíme aproximací přímkou grafu závislosti proudu kolektoru (I_C) na napětí kolektor-emitor (V_{CE}).



Graf 7 - Aproximace grafu I_C/V_{CE} pro získání diferenciálního odporu

$$R_V = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{0,3}{200} = 0,0015 \Omega \quad (39)$$

A analogicky s grafem 7 tuto aproximaci provedeme i pro zpětnou diodu a vypočítáme hodnotu diferenciálního odporu pomocí rovnice 40.



Graf 8 - Aproximace grafu závislosti I_f/V_f pro získání diferenciálního odporu diody

$$R_{VR} = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} = \frac{0,4}{500} = 0,0008 \quad (40)$$

Výpočet ztrát propustným proudem tranzistoru provedeme za použití rovnice 41.

$$P_{f_{wV}} = U_{toV} * I_{V(AV)} + R_V * I_{Vef}^2 = 0,8 * 138,14 + 0,0015 * 235,55^2 = 193,74 \text{ W} \quad (41)$$

Také výpočet ztrát propustným proudem diody provedeme obdobným výpočtem jako pro tranzistor pomocí rovnice 42..

$$P_{f_{wVR}} = U_{toVR} * I_{VR(AV)} + R_{VR} * I_{VRef}^2 = 1 * 19,29 + 0,0008 * 74,7^2 = 23,75 \text{ W} \quad (42)$$

4.2.1.4 Výpočet celkových ztrát

Totální ztráty vypočteme součtem ztrát spínacích a propustných proudem diody i tranzistoru (viz. rov. 43). Jelikož v našem provedení měniče máme v součtu 6 těchto součástí, tak musí být tato suma ztrát násobena šesti.

$$P_{tot} = 6 * (P_{SW} + P_{FW}) = 6 * (30,1 + 5,77 + 193,74 + 23,75) \\ P_{tot} = 1,5201 \text{ kW} \quad (43)$$

4.2.2 Výpočet oteplení pomocí redukováného tepelného schéma

V předchozí kapitole jsme vypočítali celkové ztráty a tyto nyní musíme tepelně ověřit.

Po teoretickém výpočtu ztrát v kapitole 4.2.1 známe hodnoty středních a efektivních hodnot proudů, které byly určeny pro quazistacionární stav, kde jsme uvažovali nejhorší možnou variantu, tj. maximální amplitudu proudu do zátěže (I_{zm}) a pomocí ní dopočítanou maximální hloubku modulace (M).

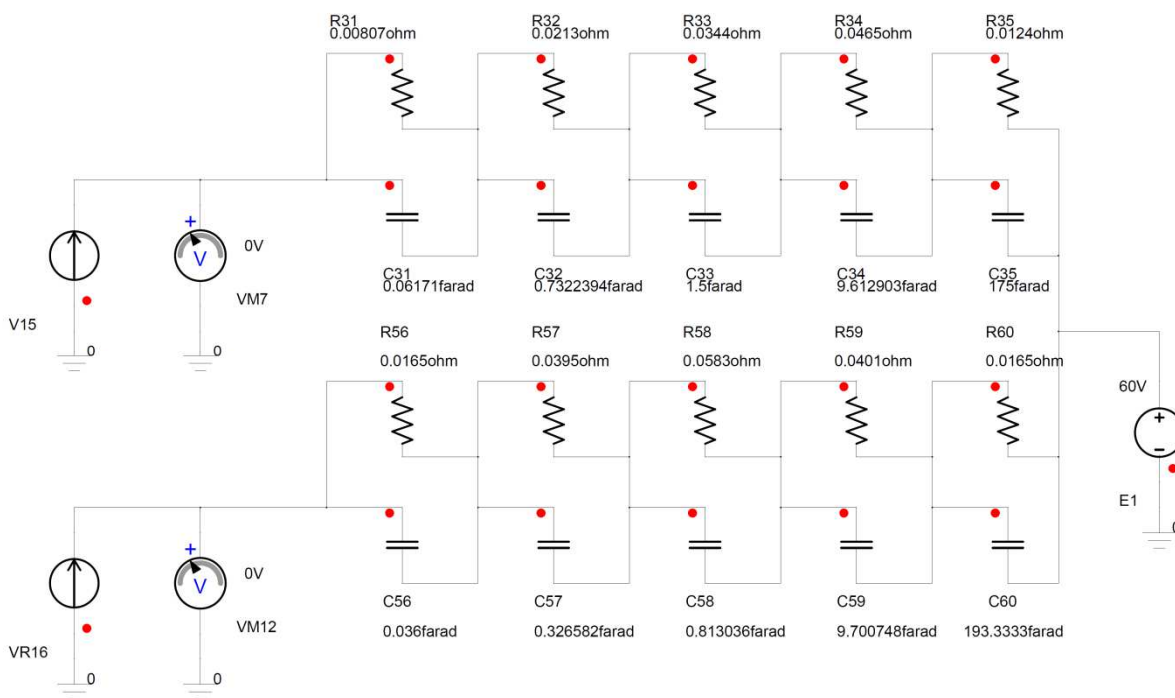
Tyto hodnoty nám poslouží pouze pro první, velmi hrubou, volbu součástky. Pokud budeme chtít tyto údaje zpřesnit, budeme nuceni dopočítat střední hodnoty teploty tranzistorového a diodového čipu.

Vychází se z náhradního schématu pro napěťový střídač, který se dá zapsat jako sérioparalelní kombinace tepelných odporů a tepelných kapacit. Pro teplotní simulaci v aplikaci Simplorer budeme hodnoty ztrátových výkonů zadávat jako proud a počáteční teplotu prostředí (v

náhradním schématu uvažována jako napěťový zdroj) zvolíme dle zadání 60 stupňů (což je teplota okolí, která by se nám měla v zařízení držet i bez rozběhu zařízení). Jedná se samozřejmě o nejhorší teplotní údaj, jaký se nám samovolně v daném zařízení může vyskytnout.

Za jiných okolností a parametrů by bylo schéma složitější (na pravé straně) a obsahovalo by mimo jiné ještě odpory a kapacity pro chlazení. Tyto by se pak musely také v simulaci uvažovat a dopočítávat pro ně maximální teploty podobným způsobem, jako provedeme v této kapitole.

V tomto případě (modul HybridPack2 od firmy Infineon dodávaný spolu s ostatními částmi sestavy Hybrid-kit) je součástí dodávky i chladič dimenzovaný pro vodní chlazení a s jeho parametry je automaticky počítáno v technických specifikách (Z_{thJF} – viz. příloha 7.1.1) a tak můžeme tuto stranu vypustit a počítat pouze se zadanou teplotou 60 °C (pro účely simulace zadána ve voltech).



Obrázek 14 - Náhradní tepelné schéma pro napěťový střídač

Pro tento výpočet ovšem budeme uvažovat zapojené schéma v quazistacionárním stavu, což bude mít za následek, že se z něj kompletně vypustí tepelné kapacity a na místa totálních výkonů ($P_{tot(av)V}$ a $P_{tot(av)VR}$) se zavedou střední totální ztrátové výkony ($P_{tot(AV)V}$ a $P_{tot(AV)VR}$)

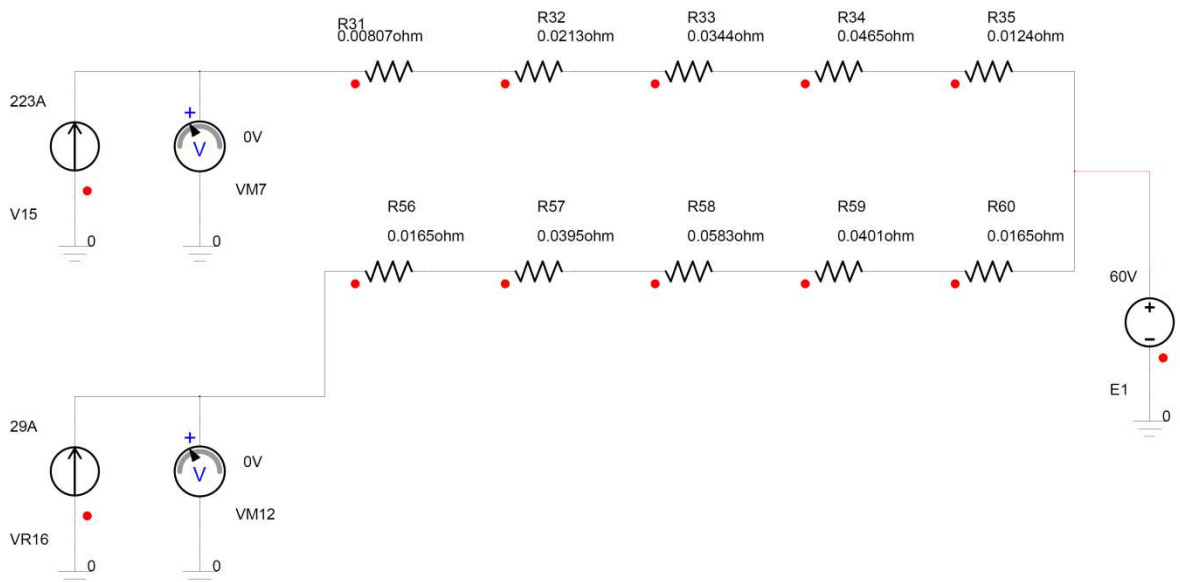
Pro tento krok si vyjádříme hodnoty ztrátových výkonů na IGBT a na diodě (viz. kapitola 4.2.1.4).

$$P_{\text{tot(AV)V}} = P_{\text{swV}} + P_{\text{fwV}} = 30,1 + 193,74 = 223,84 \text{ W} \quad (44)$$

$$P_{\text{tot(AV)VR}} = P_{\text{swVR}} + P_{\text{fwVR}} = 5,77 + 23,75 = 29,52 \text{ W} \quad (45)$$

Když nyní máme vyjádřené hodnoty ztrátových výkonů na IGBT tranzistorech a diodách (rov. 44 a 45), tak upravíme náhradní tepelné schéma pro napěťový střídač.

Jak již bylo výše zmíněno, odpadnou nám pro náš výpočet hodnoty tepelných kapacit a budeme muset upravit náhradní tepelné schéma, aby korespondovalo s uvažovaným quazistacionárním stavem.



Obrázek 15- Quazistacionární stav

Nyní vypočítáme celkové rezistivity pro každou větev z obr. 15 pomocí rovnic 46 a 47.

Z obrázku 15 je patrné, že se bude jednat pouze o sériovou kombinaci odporů, která se dle sério-paralelní logiky řazení rezistorů pouze sečte pro získání výsledné hodnoty, jak můžeme vidět v rovnicích 46 a 47.

$$R_{\text{th i V}} = R31 + R32 + R33 + R34 + R35 = 0,00807 + 0,0213 + 0,0344 + 0,0465 + 0,0124 = 0,12267 \Omega \quad (46)$$

$$R_{\text{th i VR}} = R56 + R57 + R58 + R59 + R60 = 0,0165 + 0,0395 + 0,0583 + 0,0401 + 0,0165 = 0,1709 \Omega \quad (47)$$

R_{thi} není dáno a je zahrnuto ve výrobcem dané tepelné impedanci (viz. technické parametry – obsaženo v transientní tepelné impedanci). Jak již bylo výše zmíněno, tak toto je důvod, proč neuvažujeme v našem výpočtu tepelné kapacity.

Teplota okolního prostředí byla zadáním dána dle rov. 48.

$$\mathbf{T_a = 60\text{ °C}} \quad (48)$$

Nyní známe všechny potřebné hodnoty a vypočítáme skutečnou teplotu na IGBT tranzistoru v nejhroším bodě cyklu (rov. 49).

$$\mathbf{T_{j(AV)V} = T_a + (P_{tot(AV)V} + P_{tot(AV)VR}) \sum_{i=1}^{i=v} R_{thi} + P_{tot(AV)V} \sum_{i=1}^{i=n} R_{thiV} = 60 + (223,84 + 29,52) * 0 + 223,84 * 0,12267 = 87,46\text{ °C}} \quad (49)$$

Je vhodné dosadit k této vypočtené hodnotě teplotní rezervu, kterou volíme 20 °C⁸.

$$\mathbf{T_{jm(AV)V} = 87,46 + 20 = 107,46\text{ °C}} \quad (50)$$

Dále skutečnou teplotu dopočteme také pro diodu pomocí rov. 46.

$$\mathbf{T_{j(AV)VR} = T_a + (P_{tot(AV)V} + P_{tot(AV)VR}) \sum_{i=1}^{i=v} R_{thi} + P_{tot(AV)VR} \sum_{i=1}^{i=n} R_{thiVR} = 60 + 223,84 + 29,52 * 0 + 29,52 * 0,1709 = 65,06\text{ °C}} \quad (51)$$

A přidáme rezervu, jako v případě rovnice 50.

$$\mathbf{T_{jm(AV)VR} = 65,06 + 25 = 90,06\text{ °C}} \quad (52)$$

Nyní můžeme vypočtené hodnoty porovnat s limitními teplotami na čipu a zpětných diodách zadanými od výrobce. V našem případě vidíme, že teploty i s uvažováním rezervy jsou v rámci pracovních teplot daných výrobcem IGBT modulu.

Höchstzulässige Sperrschichttemperatur Maximum junction temperature	Wechselrichter, Brems-Chopper / Inverter, Brake-Chopper	$T_{vj\ max}$			175	°C
Temperatur im Schaltbetrieb Temperature under switching conditions	Wechselrichter, Brems-Chopper / Inverter, Brake-Chopper	$T_{vj\ op}$	-40		150	°C

Obrázek 16 - Limitní teploty⁹

⁸ VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika*. 1. vyd. V Plzni: ZČU, 2008, s. 75. ISBN 978-80-7043-653-0.

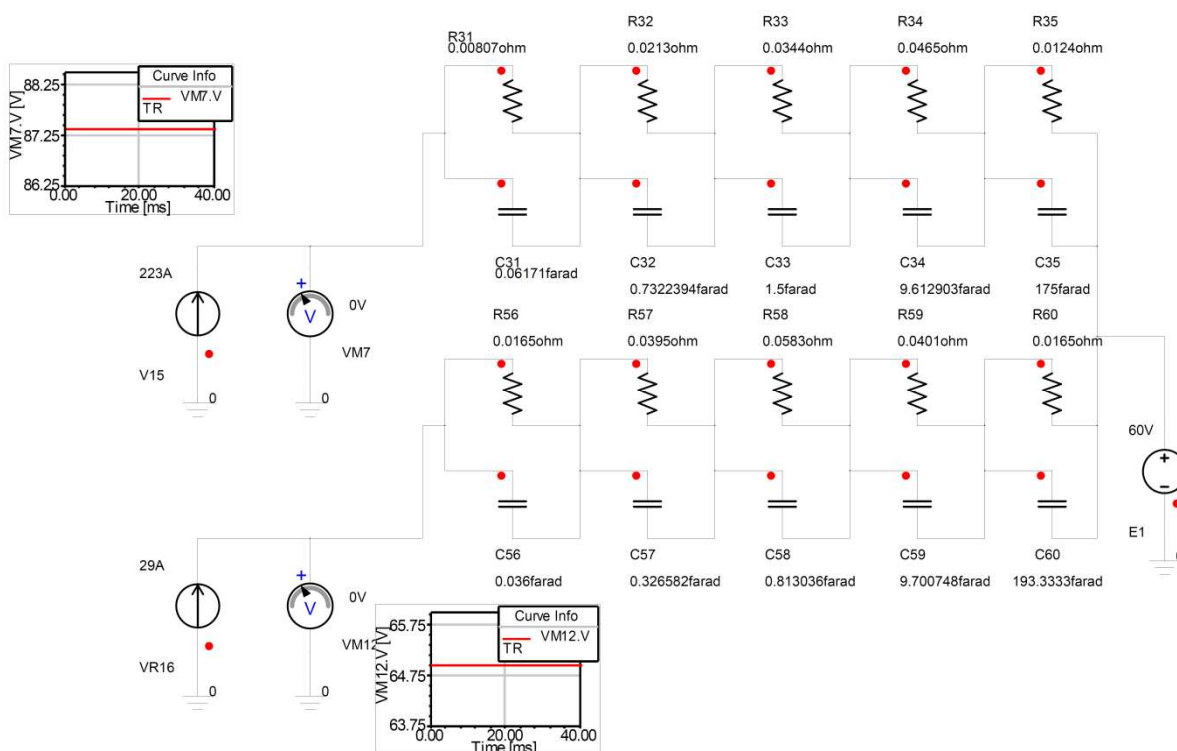
⁹ Viz. příloha 7.1.1 IGBT Module Hybridpack 2 (Infineon) – FS600R07A2E3

4.2.3 Tepelná simulace v aplikaci Simploter (V9)

Dále pro kontrolu dosadíme výkony ve formě proudů do aplikace Simploter a provedeme tepelnou simulaci pro tuto nejhorší variantu.

V tomto případě již nebudeme zanedbávat tepelné kapacity jednotlivých větví, na proudové zdroje dáme vypočtené hodnoty ztrátových výkonů (pro toto náhradní tepelné schéma jsou tyto uvažovány ve velikostech proudu náhradního obvodu).

Pro získání výstupních dat budeme odečítat hodnoty a průběhy získané na voltmetrech připojených k náhradnímu schématu (pro náš účel pouze na místech největších možných nárůstů teplot).



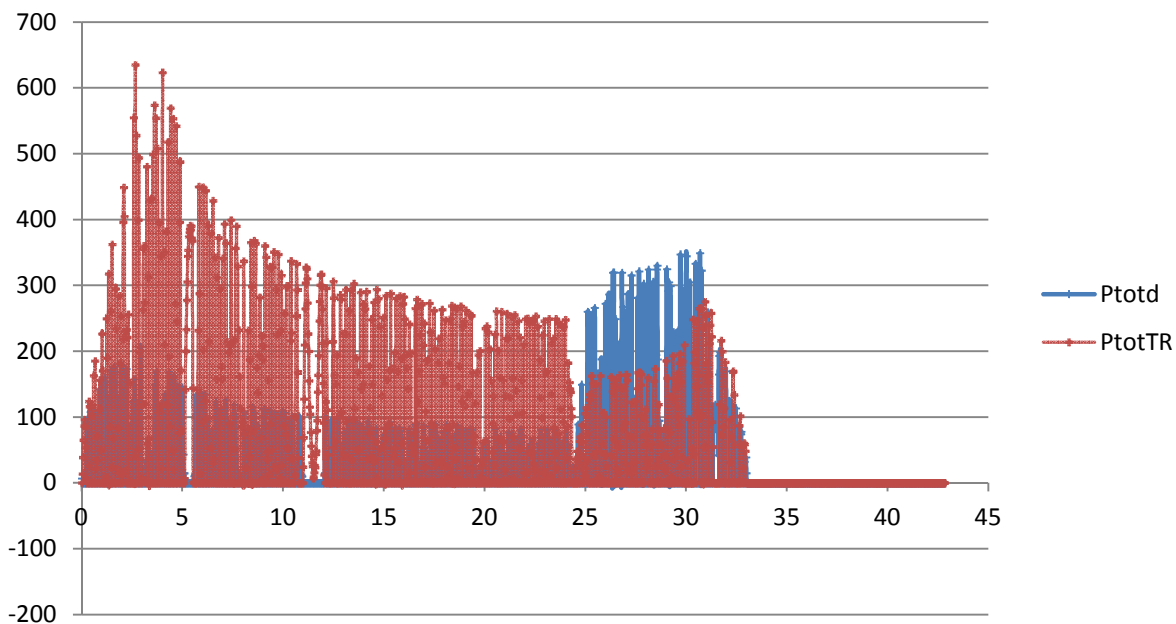
Obrázek 17 - Náhradní schéma napěťového měniče pro výpočet maximálních teplot na součástkách

Z grafů sond u V-metrů odečteme hodnoty napětí (tj. teploty) na tranzistoru a diodě.

$$T_{j(AV)V} = 87,45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (53)$$

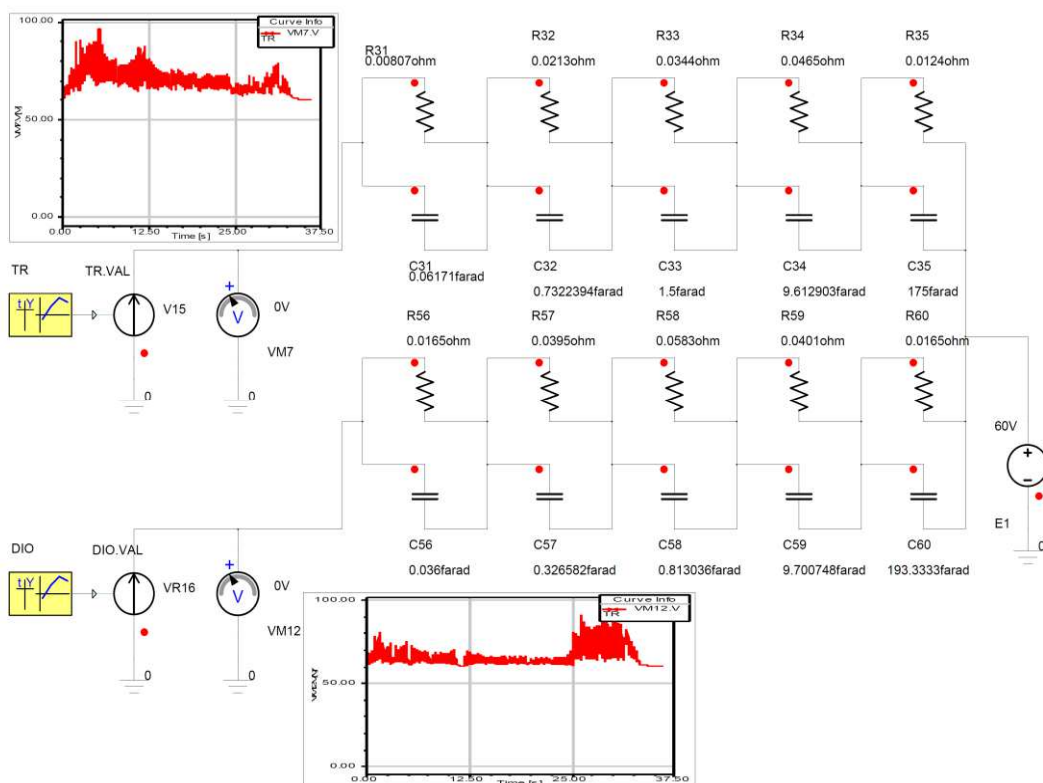
$$T_{j(AV)VR} = 65 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (54)$$

Po posouzení rov. 48 a 49 s vypočtenými výsledky (87,46 °C a 65,06 °C) vidíme, že tyto korespondují. V dalším kroku realizujeme simulaci pro průběh v čase dle zadaného cyklu.



Graf 9 - Totální ztráty diody a tranzistoru

Toho docílíme dosazením přepočítaných totálních ztrát pro každý prvek v každém čase daném cyklem (pro výpočty použijeme MS Excel, nelze kvůli množství dat dopočítat ručně).



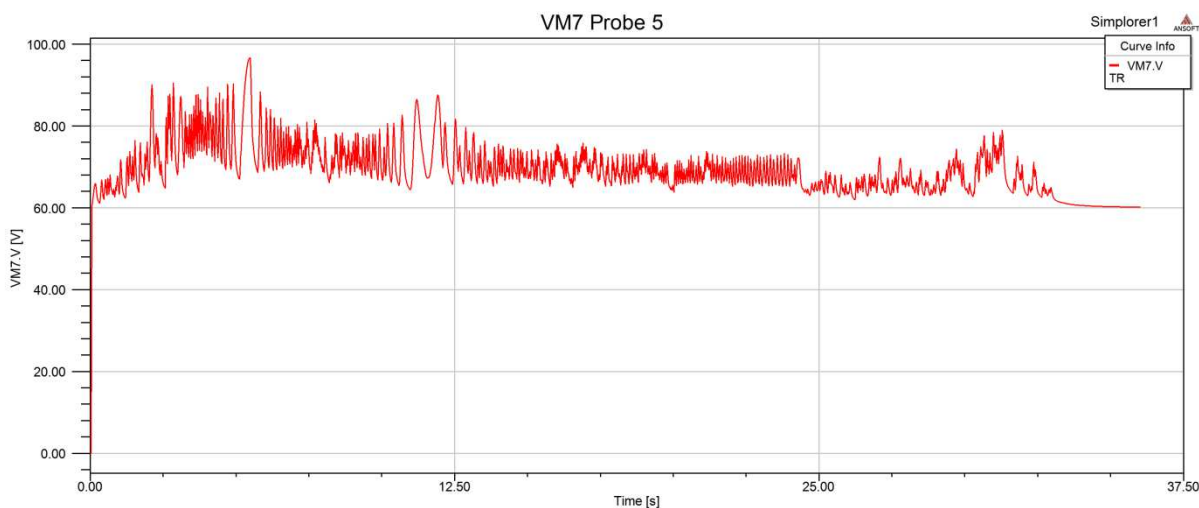
Obrázek 18 - Náhradní schéma napěťového střídače pro výpočet tepelných ztrát

Prvky „DIO“ a „TR“ jsou pomocné a používají tzv. dvouhodnotový 2D převod.

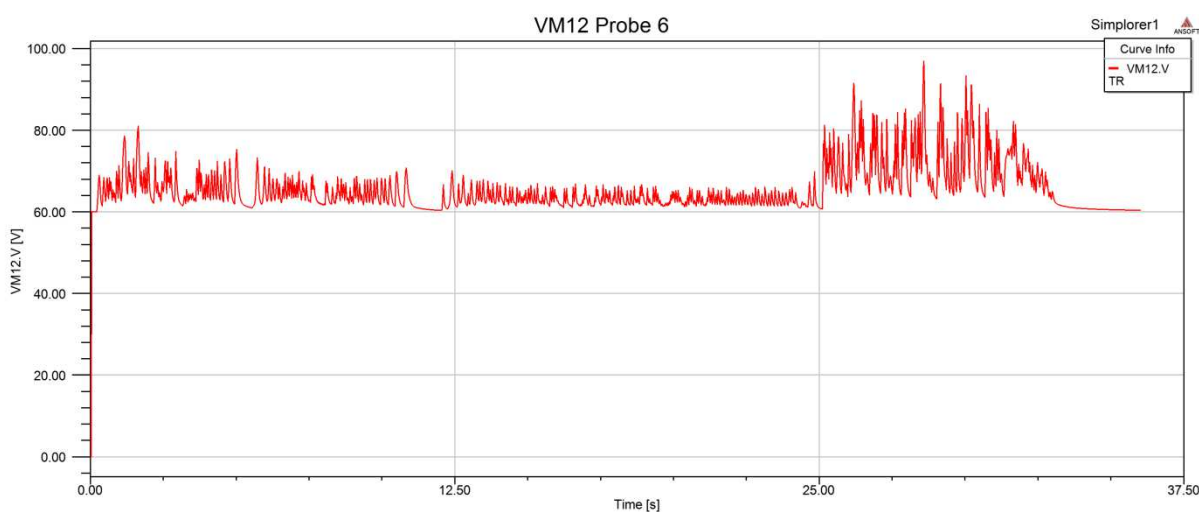
Pro účely této simulace musíme vytvořit ve starší verzi MS Excelu (pro Simplorer V9 se bohužel stále musí ukládat ve verzi kompatibilní s verzemi sady MS Office do roku 2003) tabulky obsahující hodnoty absolutních výkonů pro tranzistor i diodu v každém daném čase cyklu.

Pro tyto dva prvky byly tedy vytvořeny dvě tabulky, kde první sloupec je časová informace a druhý P_{tot} (pro tuto aplikaci se jedná o proud, ovlivňující napětí, které je v tomto náhradním schéma ekvivalentem teploty).

Na obrázcích 19 a 20 můžeme vidět výstupy simulačního programu Simplorer po provedení simulace se zadanými (a částečně dopočtenými) hodnotami.



Obrázek 19 - Oteplení na tranzistoru



Obrázek 20 - Oteplení na diodě

Na průběhu oteplení diody (obr. 20) je patrný nárůst v okamžiku brzdového režimu, kdy přes tyto součástky teče největší proud.

Nyní si na základě těchto průběhů odečteme dvě nejhorší varianty (v našem případě největší Iz a frekvenci v největším kladném výkyvu totálních ztrát v čase) a spočítáme stav v každém bodu průběhu cyklu.

Pro náš případ se tedy jedná o body uvedené v tabulce 6 a 7.

t [s]	M _{1mot} [Nm]	n [min ⁻¹]	U _{fATM} [V]	I _{ATM} [A]	cosφ _{ATM} [-]	f _{ATM} [Hz]	U _{DC LINK} [V]
<u>3,225</u>	225,16006	2441,054	86,3716	349,474	0,75006	88,6155	220

Tabulka 6 - Hodnoty bodu č.1

t [s]	M _{1mot} [Nm]	n [min ⁻¹]	U _{fATM} [V]	I _{ATM} [A]	cosφ _{ATM} [-]	f _{ATM} [Hz]	U _{DC LINK} [V]
<u>0,925</u>	136,81606	246,3094	14,14904	188,204	0,731644	10,2469	220

Tabulka 7 - Hodnoty bodu č.2

Vypočteme pro ně ztráty v každém čase (tj. provedeme simulaci pro každý daný čas za použití hodnot pokaždé pouze z jednoho případu z tabulek 6 a 7).

Pro tento účel jsme také pomocí aplikace MS Excel vypočítali hodnoty totálních ztrátových výkonů pro každý bod cyklu za použití vztahů uvedených v této práci (pro nejhorší varianty). Jedná se o velké množství hodnot a ruční dopočet by v tomto případě nebyl žádoucí (časově).

Posledním krokem pro získání vstupních hodnot je zavést podmínku (viz. rov. 55) pro každou hodnotu totálního ztrátového výkonu v čase.

$$P_{tot(av)V} = 0 \dots je - li \dots i_{z1}(x) = I_{zm} \sin(x - \varphi) \leq 0 \quad (55)$$

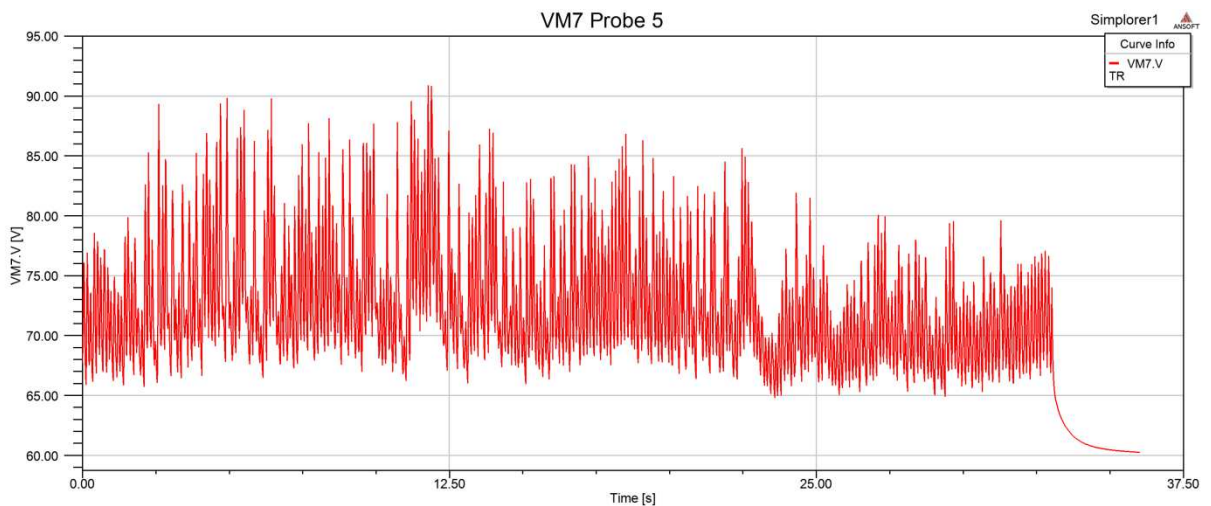
Pro vyjádření x můžeme užít rovnici 56, kde jsou nám všechny hodnoty známe.

$$x = \omega * T = \omega * 2 * \pi * f * T \quad (56)$$

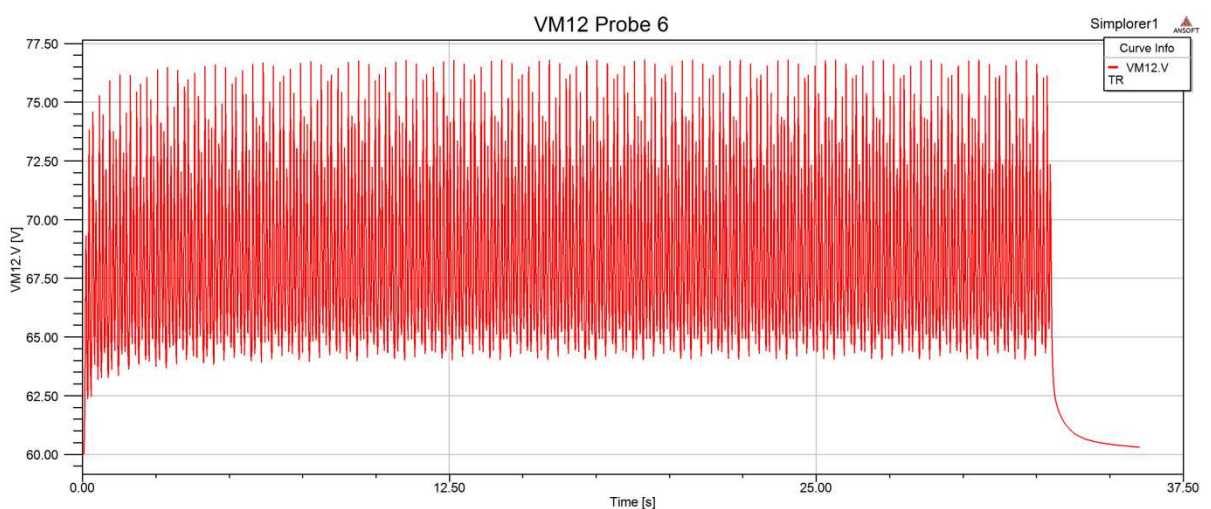
Podmínku uvedenou v rov. 55 musíme aplikovat na všechny vypočtené hodnoty totálních ztrát pro tranzistor. Množství hodnot díky tomu získá nulové hodnoty pro případ, že proud teče přes zpětné diody, pro které také následně musíme aplikovat podmínku pomocí rovnice 57.

$$P_{tot(av)V} = 0 \dots \text{je} - \text{li} \dots i_{z1}(x) = I_{zm} \sin(x - \varphi) \leq 0 \quad (57)$$

Po přepočítání všech hodnot (mění se nám v čase ω) dosadíme tyto výstupy do Simploreru (ve dvou variantách – bod č. 1 a č. 2). V aplikaci poté tyto hodnoty zadáme příslušným proudovým zdrojům a provedeme simulaci. Výsledné hodnoty teplot po provedení simulace pro bod č.1 (pro stejné tepelné náhradní schéma) můžeme vidět na obr. 20 a 21.

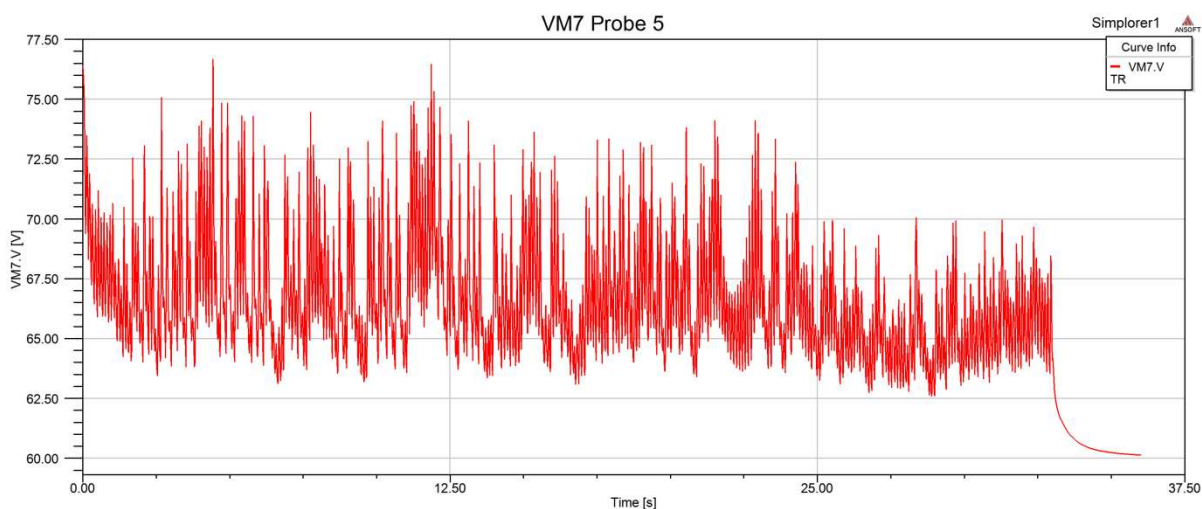


Obrázek 21 - Oteplení tranzistorů pro bod č.1

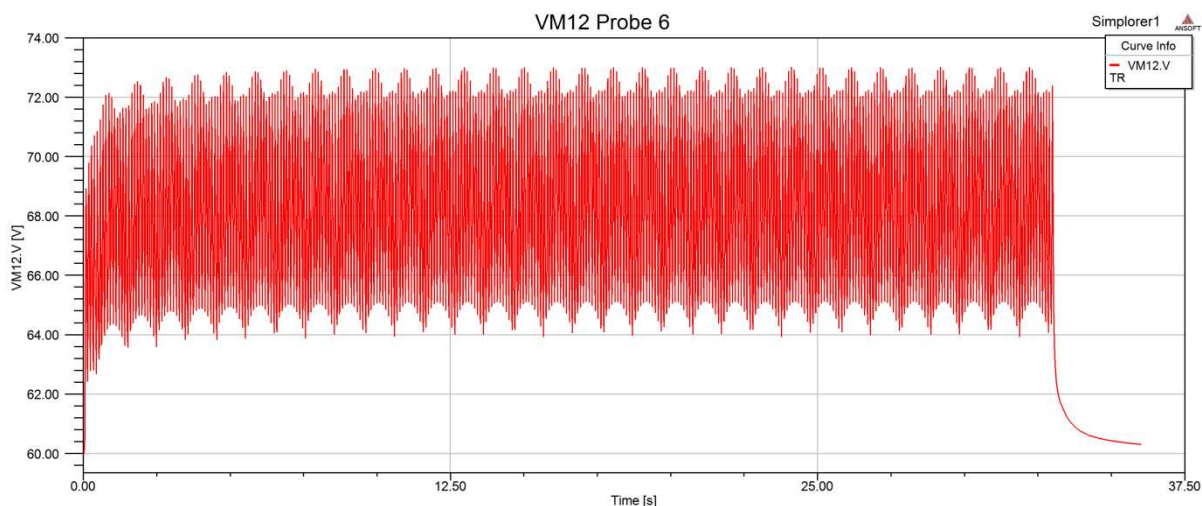


Obrázek 22 - Oteplení zpětných diod pro bod č.1

Výstupy tepelné simulace pro bod č. 2 můžeme vidět na obr. 22 a 23.



Obrázek 23 - Oteplení tranzistorů pro bod č.2



Obrázek 24 - Oteplení zpětných diod pro bod č.2

Z výsledků na obr. 21, 22, 23 a 24 vidíme, že ani během uvažování špičkových odběrů nebo největších proudových skoků (v čase) nám oteplení na součástce nevzroste během celého cyklu na kritickou hodnotu. Modul je tedy schopen naši aplikaci zvládnout bez kritického stavu. Zbývá tedy provést ekonomické srovnání (cena) s ostatními moduly (viz. kap. 5) a vztáhnout získané údaje i na možnosti použití a aspekty životnosti součástek při daných teplotách.

4.3 Modul 2 – Econodual 3 – FF450R07ME4 (Infineon)



Obrázek 25 - Econodual 3¹⁰

Jedná se o velice kompaktní modul s výškou pouhých 1,7 cm. Pro montáž je možno použít „rychloupínací systém“ bez nutnosti cokoliv pájet a ovládací prvky se dají zpravidla umístit přímo na samotný modul.

Samotné tranzistory jsou dimenzovány pro práci až do oteplení na 150 °C. Toto by se ovšem mělo uvažovat pouze jako špičková hodnota a dlouhodobější oteplení na tuto hodnotu může vést k nežádoucímu snížení životnosti.

Simulační program ale umí všechny výše zmíněné teplotní aspekty vzít v úvahu a výstup samotného simulačního programu můžeme brát pro naši aplikaci za směrodatný pro rozhodování o zvolení daného typu IGBT modulu.

Sám výrobce jako možnou aplikaci doporučuje výkonové střídače, díky čemuž je tento modul částečně pro námi požadované použití uvažován.

Výpočet oteplení na výkonových součástkách tohoto modulu můžeme provést pomocí

¹⁰ EFO-POWER.RU. *Новости* [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://www.efo-power.ru/news/?id=89>

programu Iposim nacházející se na stránkách výrobce.

Nemusíme tedy pro tento modul provádět výpočty ztrát a následně tepelně simulovat, jako tomu bylo v prvním případě u IGBT modulu Hybridpack 2 (viz. kap. 4.2).

4.3.1 Parametry

Většina parametrů byla zadána (viz. kapitola 4.1, zadané hodnoty a zadané hodnoty cyklu – tyto budeme zadávat přímo do simulačního programu).

Pro provedení simulace použijeme „Sine-triangle“ jako kontrolní algoritmus a okruh dle našeho zadání je plně tříúrovňový. Postup simulace krok po kroku pro naši aplikaci můžeme nalézt v kapitole 7.5.1.

Pro tento modul nemusíme žádné hodnoty přepočítávat a ze zadaných hodnot spolu s vložením přesného cyklu nám aplikace sama vypočítá požadovaný výstup (viz. kapitola 4.3.2).

4.3.2 Simulace v aplikaci Iposim



SiteMap | Home

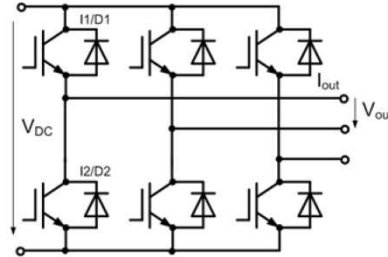
About Infineon >>

Created For: DC/AC | Three Phase - 2 Level | Sine-Triangle
 Created By: Richard Titz
 Created On: 4/19/2013 12:54:55 AM

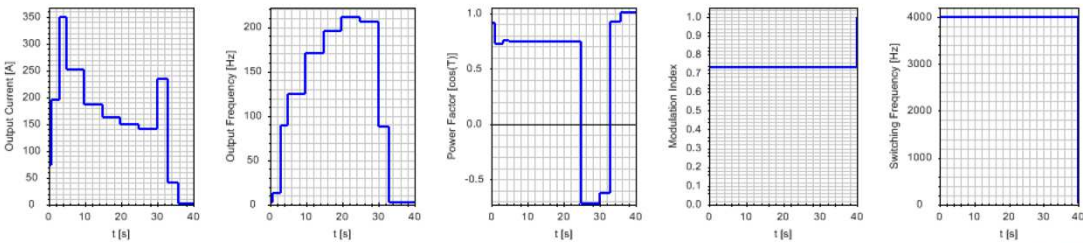
IPOSIM
 Infineon Power Module Selector and Simulator

Input Requirements

Control Algorithm	Sine-Triangle
DC Link Voltage	300 V
Blocking Voltage	650 V
Output Frequency	50 Hz
Output Current RMS	349 A
Modulation Index	0.73
Power Factor cos(φ)	0.87
Switching Frequency	4000 Hz



Load Cycle



Modules

PORTUNUS
 SIMULATION BY

FF450R07ME4_B11

Igibt Parameters

$V_{CEsat,25^{\circ}C}$	1.55 V
$E_{on}+E_{off,125^{\circ}C}$	33.20 mWs
$R_{G,on}$	1.800 Ω
$R_{G,off}$	1.800 Ω
R_{thJC}	0.102 K/W
R_{thCH}	0.039 K/W

Diode Parameters

$V_F,25^{\circ}C$	1.55 V
$E_{rec,125^{\circ}C}$	8.90 mWs
R_{thJC}	0.165 K/W
R_{thCH}	0.040 K/W

Application Data

$R_{G,on}$	1.800 Ω
$R_{G,off}$	1.800 Ω

Thermal Conditions

Fixed Heat Sink

Heat sink Temperature	60 $^{\circ}C$
-----------------------	----------------

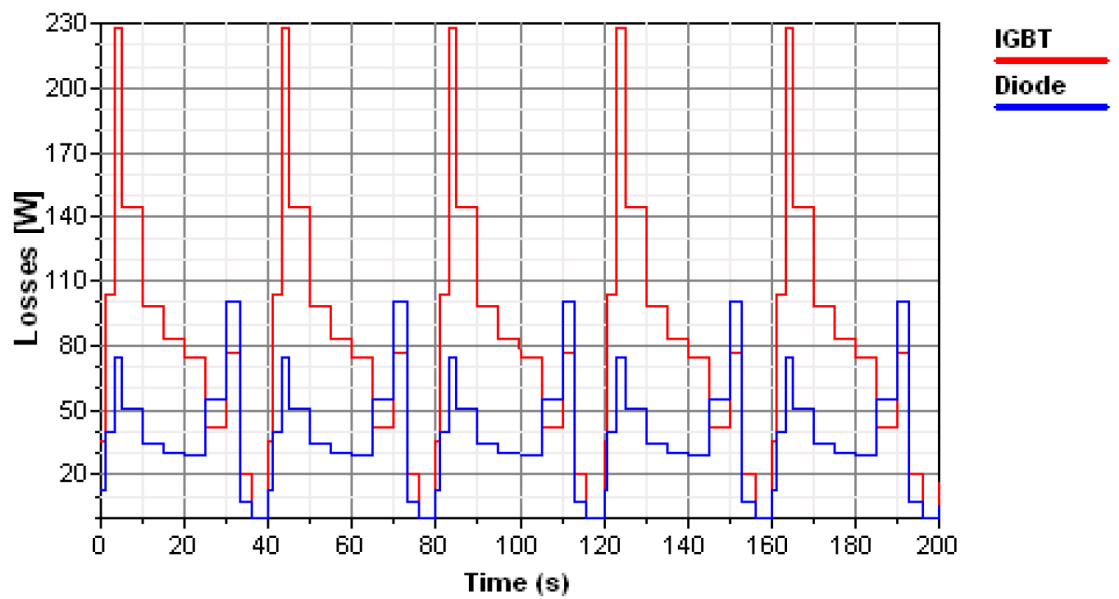
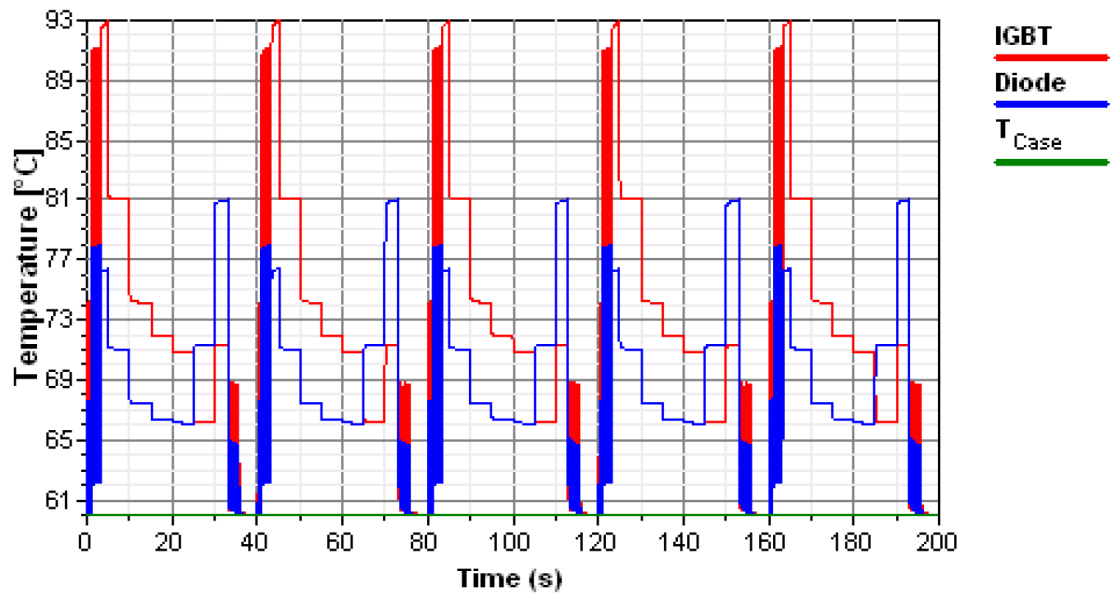
Junction Temperatures

IGBT	93.0 $^{\circ}C$
Diode	81.0 $^{\circ}C$

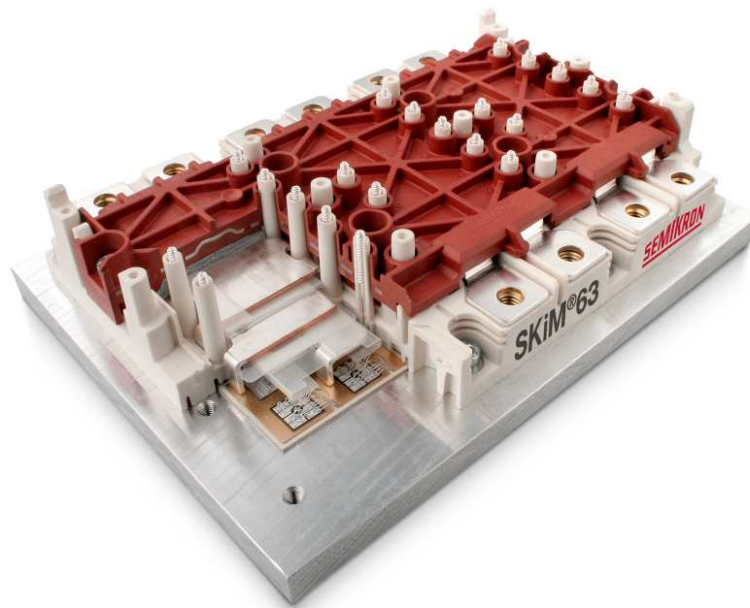
- ✓ Calculated junction temperature is within range.
- ✗ Calculated junction temperature is greater than maximum junction temperature.

Simulation Graphics

FF450R07ME4_B11



4.4 Modul 3 – SKiM63 (Semikron)



Obrázek 26 - SKiM 63¹¹

Mezi největší výhodu modulu SKiM (typ 63), od firmy Semikron, se počítá zvýšená odolnost proti vibracím a schopnost se efektivněji chladit.

S aplikací samotného modulu je přímo od výrobce počítáno pro použití ve výkonových měničích pro trakční motory. Rámec použití tohoto modulu je široký a pro naši aplikaci splňuje potřebné predispozice.

Tento modul (SKiM 63) se liší především konstrukcí. Jednoduše řečeno se v podstatě jedná o tři menší půlmůstkové měniče, které jsou umístěny na vhodném chladičím prostředku.

Tepelnou simulaci pro tento modul provedeme přímo v aplikaci SEMISEL od výrobce, umístěné na stránkách společnosti Semikron.

¹¹ [HTTP://MM.ASIA-INFO.NET/](http://mm.asia-info.net/). SEMIKRON發表IGBT模組—SKiM® [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: http://mm.asia-info.net/news_detail.aspx?id=4907#.UXQRhbWSJZ

4.4.1 Parametry okruhu

Jsou zadány v kapitole 4.1 – požadované parametry (hodnoty jednotlivých veličin pro motor, měnič a baterii – tabulka 3,4 a 5). Zadaný cyklus zůstává pro všechny simulace shodný.

Velikost výstupního proudu I_{out} nemusíme v simulačním programu vyplňovat, jelikož se nám automaticky dopočítá po vyplnění ostatních požadovaných a uvažovaných parametrů (nebo je možné si nechat dopočítat ostatní parametry obvodu se zadáním ostatních hodnot kromě výstupního proudu).

Přetěžovací parametry, které po nás SEMISEL vyžaduje, nemusíme v našem zadání uvažovat, jelikož po zadání cyklů si tyto program automaticky vybere z dat cyklu.

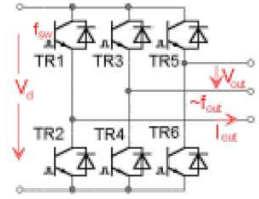
Pro správný průběh simulace musíme ještě přepočítat hodnoty napětí a proudu uvedené v cyklu na poměrné hodnoty. Jinými slovy tyto jednoduše vydělíme jmenovitými hodnotami, jak již bylo provedeno kapitole 4.1, tabulce 2. Tyto přepočtené hodnoty poté do samotné aplikace zadáme jako hodnoty výstupních napětí a proudů.

Samotný postup zadávání do aplikace „krok po kroku“ je uveden v příloze 7.6.2 – Tepelná simulace v aplikaci SEMISEL.

V kapitole 4.4.2 je uveden finální výstup aplikace SEMISEL pro tento typ modulu s uvažováním zadaných parametrů měniče. Zajímají nás především simulačním programem vypočtené ztráty a maximální teploty na součástkách pro danou aplikaci.

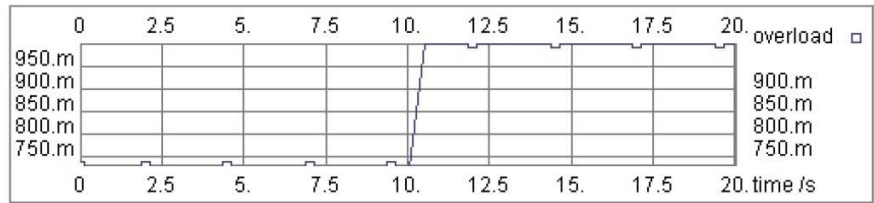
4.4.2 Výpočet oteplení a ztrát třífázového napětového měniče pomocí aplikace SEMISEL

Project: DC/AC
 Topology: Inverter 3 Phases
 Circuit:



Circuit:

V_d 300 V
 V_{out} 220 V
 I_{out} 181 A
 P_{out} 60 kW
 f_{out} 50 Hz
 $\cos(\phi)$ 0.87
 f_{sw} 4 kHz
 $V_{min out}$ 220 V
 $f_{min out}$ 50 Hz
 Overload factor 0.73
 Overload duration 10 sec



Device :

Product line SKIM
 Device SKIM406GD066HD
 Use maximum values Yes
 Max. junction temperature 175°C

Transistor

$E_{tr} = 33 \text{ mJ (@300V)}$
 $V_{CE0.150} = 0.9 \text{ V}$
 $r_{c.150} = 3 \text{ mOhm}$
 $V_{CE.sat} = 2.10 \text{ V}$
 $I_c = 400.00 \text{ A}$
 $R_{th(j-c)} = 0.135 \text{ K/W}$
 $R_{th(c-s)} = 0 \text{ K/W}$
 Data set from 2010/06/30

Diode

$E_d = 12 \text{ mJ}$
 $V_{T0.150} = 0.95 \text{ V}$
 $r_{T.150} = 2.167 \text{ mOhm}$
 $V_f = 1.82 \text{ V}$
 $I_f = 400.00 \text{ A}$
 $R_{th(j-c)} = 0.243 \text{ K/W}$

Cooling:

Ambient temperature 60°C
 Number of switches per heat sink 6
 Number of parallel devices on the same heat sink 1
 Additional power source at this heat sink 0 W
 Predefined SK-Heat Sink WK40_180
 Correction factor 1
 Water cooling, flow rate: 10 l/min
 $R_{th(s-a)}$ 0.015 K/W

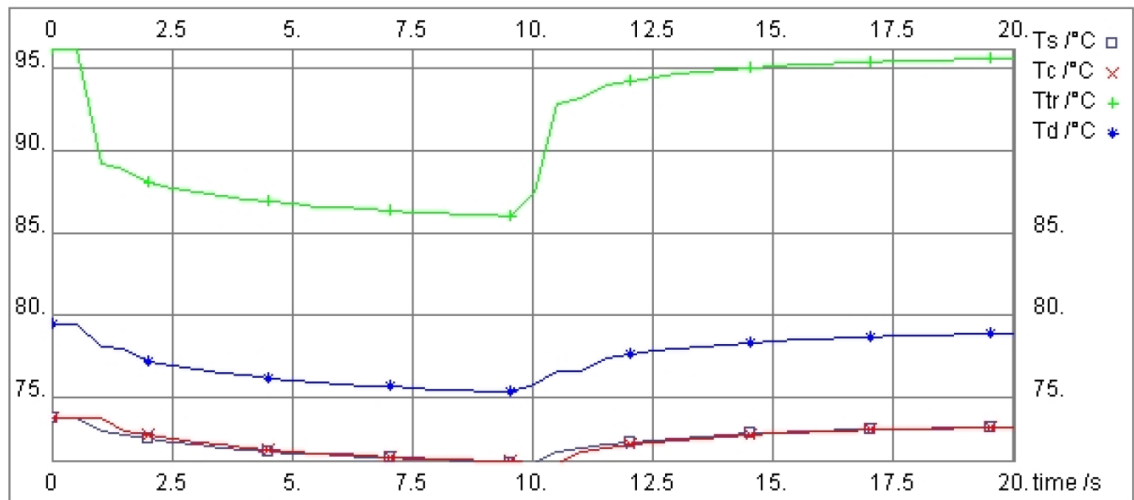
Data base value for $R_{th(s-a)}$ valid for 50% water & 50% Glycol

Calculated losses and temperatures with rated current, at overload and at $f_{min out}$:

	Rated current	Overload	f_{min} and Overload
$P_{cond tr}$	110 W	72 W	73 W
$P_{sw tr}$	22 W	16 W	16 W
P_{tr}	132 W	89 W	89 W
$P_{cond d}$	9.45 W	6.55 W	6.55 W

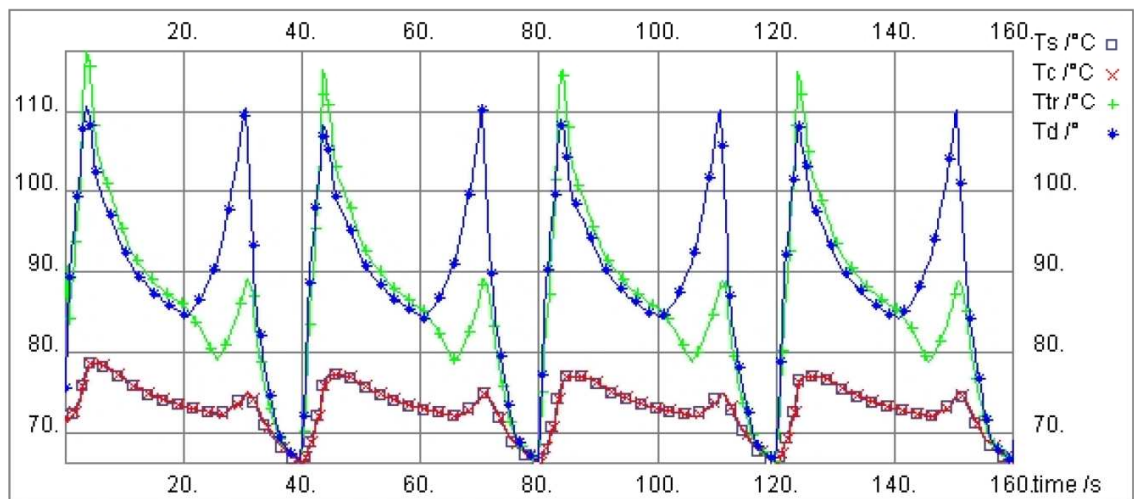
Obrázek 27 - Výstup aplikace SEMISEL

P_{swd}	7.12 W	5.86 W	5.90 W
P_d	17 W	12 W	12 W
P_{tot}	893 W	606 W	607 W
	Average Values	Average Values	Maximum Values
T_s	74 °C	73 °C	74 °C
T_c	74 °C	74 °C	74 °C
T_{tr}	92 °C	91 °C	96 °C
T_d	78 °C	77 °C	79 °C



Calculated losses and temperatures with User defined load cycle:

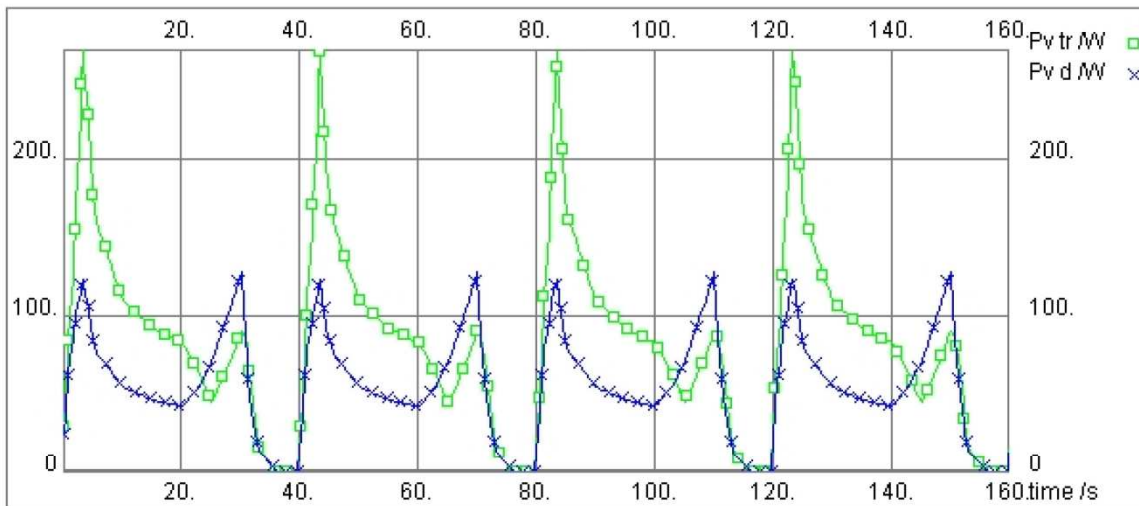
Temperatures			
T_s max	79 °C	T_s min	66 °C
T_c max	79 °C	T_c min	66 °C
T_{tr} max	118 °C	T_{tr} min	67 °C
T_d max	111 °C	T_d min	67 °C



Power losses

$P_{tr av}$	83 W	$P_d av$	56 W
$P_{VTr max}$	270 W	$P_{VTr min}$	0.00 W
$P_{VD max}$	129 W	$P_{VD min}$	0.00 W

Obrázek 28 - Výstup aplikace SEMISEL



Power losses user load characteristic

Evaluation:

This configuration works fine.

Device driver suggestion

Name	I _{out(av)} / mA	I _{out} / A	V _{isol} / kV	V _{ce max} / V	R _{gmin} / Ohm	Channels
3x SKHI23/12 R	50	8	2.5	1200	2.7	2
3x SKHI24 R	80	15	4.0	1200	1.5	2
3x SKYPER 32 R or SKYPER 32PRO R ⁽¹⁾	50	15	4.0	1200	1.5	2

Additional Characteristics at given nominal operation conditions with one free parameter - X:

None selected

User Load Data:

Number	time / s	output current* / mA	output voltage* / V	power factor	output frequency / Hz	f _{sw, overload} / kHz
1	0.03	0.423862	0.00783202	0.903578	2.042589	4
2	1	1.145976	0.07440618	0.721752	11.63218	4
3	3.23	2.05573	0.39259818	0.75006	88.61548	4
4	5	1.477269	0.39259818	0.743703	124.5896	4
5	10	1.086631	0.39259818	0.739468	170.5842	4
6	15	0.950452	0.39259818	0.738395	195.11	4
7	20	0.875347	0.39259818	0.738317	211.3032	4
8	25	0.824265	0.58354366	-0.72578	205.6742	4
9	30	1.376531	0.572526	-0.62583	86.94102	4
10	33	0.239773	0.00407288	0.92093	1.70781	4
11	36	0	0	1	1.70781	4
12	40	0	0	1	1.70781	4

* Values are rated to the given base value.

Note

1) SKYPER 32 R with external boost capacitors

Obrázek 29 - Výstup aplikace SEMISEL

4.5 Výběr vhodného chladiče

4.5.1 Chladič pro Hybridpack2 (Infineon)

Chladič pro tento modul je standardně součástí tzv. „Hybridkitu.“ Jedná se o kompletní sestavu modulu Hybridpack2 spolu s ovládacími prvky a chladičem.

Tento chladič je dimenzován pro vodní chlazení s průtokem 10 litrů za minutu, což je pro naši aplikaci vyhovující.

Parametry viz. příloha 7.3.1 – ATV-PD-3040 pro Hybridpack2.

4.5.2 MQT1914 pro Econodual3

Tento chladič se svými parametry a možnostmi užití nejvíce přiblížil k zadaným potřebám a proto byl pro tento chladič zvolen.

Parametry tohoto chladiče jsou v příloze č. 7.3.2 – MQT1914 pro Econodual3.

4.5.3 WK40/180 pro SKiM406GD066HD

Tento chladič je vhodný pro naši aplikaci, jelikož splňuje podmínku možného průtoku 10 litrů vody za minutu a zároveň s ním bylo uvažováno v tepelné simulaci, kde dokázal, že je schopen modul SKiM406GD066HD uchládit (při teplotě okolí 60 °C).

Parametry tohoto chladiče jsou v příloze č. 7.3.3 – WK40/180 pro SKiM406GD066.

5 Závěr

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh trakčního měniče pro bateriový bus.

Tabulka 8 porovnává tepelné výsledky na čípech a zpětných diodách pomocí:

- Výpočtu (výpočet teploty pro nejhorší variantu I_z)
- Aplikací Simplorer
- Aplikací Iposim
- Aplikací SEMISEL

		Teplota čipu tranzistoru T_{j_IGBT}	Teplota čipu diody T_{j_D}
Modul č.1	Aplikace Simplorer	87,45	65
	Výpočet	87,46	65,06
Modul č.2	Iposim	93	81
Modul č. 3	SEMISEL	118	111

Tabulka 8 - Porovnání teplot na čipu a zpětných diodách

Aplikace SEMISEL a Iposim jsou firemní software firem Semikron a Infineon pro výpočty oteplení a ztrát výkonových modulů. Přístupny jsou na stránkách uvedených v příloze 6. Postupy zadávání hodnot do simulačních aplikací o výrobců jsou součástí příloh 7.5.1 a 7.5.2.

První modul (Hybridpack 2) nelze simulovat v aplikaci Iposim, jelikož se jedná o poměrně nový modul a tento nebyl ještě do simulačního programu vložen.

Bylo zapotřebí pro modul Hybridpack 2 dopočítat požadované hodnoty. Byl řešen ekvivalentní elektrický obvod pro výpočet tepelných ztrát (viz. obr. 17). Byly ověřeny maximální teploty čipů při nejhorší možné variantě proudu I_z a také toto bylo prověřeno pro hodnotu velkého proudového skoku při výstupní frekvenci cca 10 Hz, při které je také výrazný proudový skok, který má za následek oteplení výkonových součástek.

Po porovnání hodnot vidíme, že měnič Hybridpack2 vyhovuje dané aplikaci z hlediska chlazení a teploty součástek nepřekročí dodavatelem dovolené meze pro zaručení spolehlivosti a životnosti zařízení.

Pro samotnou realizaci byl po posouzení výsledků tedy zvolen modul č. 1 (Hybridpack 2) od firmy Infineon. Při objednávce ve variantě Hybrid-kit se jedná o kompletní řešení pro naši aplikaci (dodávka obsahuje jak zvolený modul, tak i chladič, čidla proudu i napětí a ovládací prvky).

Teplotně modul „Hybridpack 2“ vychází nejlépe a díky simulaci v aplikaci Simplorer a následným posouzení výsledků s výpočty (viz. tabulka 8), vidíme, že se ve svých hodnotách takřka neliší. Díky tomu se na validitu těchto údajů můžeme spolehnout.

Jelikož výpočty i následná Simulace byly provedeny pro nejhorší variantu, tak po posouzení výsledků s limitní teplotami na čipech zadaných v datasheetu modulu (viz. příloha 7.1.1), můžeme vidět, že tento modul je vhodný pro naši aplikaci. Od výrobce je limitní teplota pro tuto aplikaci uvažována 125 °C (175 °C nejvyšší limitní teplota) na tranzistorech a k takovéto se ani v nejhorší variantě nepřiblížíme.

Můžeme se tedy spolehnout, že nám modul tepelně vydrží, ale zároveň kvůli uvažování nejhorší proudové varianty, musíme počítat, že tento modul bude lehce předdimenzovaný, tj. bylo by možné volit ekonomičtější variantu pro tuto aplikaci, ovšem jen těžko bychom získali takovou spolehlivost, jako u námi zvoleného modulu, což je v tomto případě rozhodující.

Pokud bychom chtěli uvažovat teplotní rezervu 20 °C (viz. kapitola 4.2.1.3), tak se projevuje třetí modul jako nevyhovující z hlediska oteplení na tranzistorech.

Modul Hybridpack 2 od firmy Infineon můžeme označit jako dostatečně dimenzovaný i při uvažování tepelné rezervy 20 °C. Je velice žádoucí, že ani s touto rezervou teplota součástek nestoupne nad limitní a díky tomu můžeme mimo jiné garantovat životnost součástek. Od 125°C jsou součástky sice schopné zajistit funkci, ale výrobce poté již negarantuje plnou životnost a tato by úměrně s rizikovými teplotami klesala, což by pro naši aplikaci bylo velice nežádoucí.

Typ IGBT modulu	Cena (ks/Kč)	Min. počet (ks)
HybridPACK: FS600R07A2E3	7924,84	100
EconoDUAL: FF450R07ME4_B11	1440,88	200
SKiM63: SKiM406GD066HD	10181,1037	10

Tabulka 9 - Ceny jednotlivých modulů¹²

Pro ekonomické porovnání byla dodavatelům pro český trh zadána žádost o kalkulaci ceny pro technicko-ekonomické porovnání. Těto bylo vyhověno pro různá odběrná množství daná příslušným dodavatelem.

Ceny nebyly porovnávány pro jednotlivé kusy, jelikož cena menších balení je pro dodavatele nerepresentativní a odráží mnoho dalších aspektů výroby (pro větší množství kusů je toto zanedbatelné). Doporučeno bylo uvažovat stávající ceny pro 100 ks modulu typu HybridPACK, 200 ks pro modul EconoDUAL a 10 ks pro modul SKiM63. Při zachování těchto počtů by se výsledná cena pro 1 ks neměla dále výrazněji lišit (pouze mírně a pro uvažování 1 ks zanedbatelně).

Modul EconoDUAL se jeví jako nejlevnější, ovšem dodavatel v tomto případě určuje cenu pouze pro samotný modul, který neobsahuje ceny napěťového a proudového čidla, chladiče a driverů. Po dokoupení potřebných komponent (odhad pro 200ks) vychází v porovnání s HybridPACKem draž, ovšem se jedná o orientační ceny přepočtené vzhledem k odběru většího množství kusů, pro jednorázovou (například prototypovou) aplikaci by tento vyšel znatelně draž.

Vzhledem k nejlepším teplotním hodnotám modulu Hybridpack 2, záruce životnosti i pro nejhorší průběhy proudů můžeme tento označit jako vyhovující z hlediska technického. Dalším pozitivem je, že tyto hodnoty jsou uvažovány i pro dané chlazení a při koupi setu Hybrid-kit můžeme tedy při stanovené ceně garantovat všechny požadované parametry a hodnoty během provozu daného zařízení. Zároveň můžeme vykalkulovanou cenu považovat za finální a po ekonomické stránce se tedy jeví jako nejvýhodnější.

Ve výsledku technicko-ekonomického porovnání zvolíme pro danou aplikaci modul HybridPACK2 FS600R07A2E3.

¹² Kurz použitý pro přepočet eura na české koruny ze dne 30.4.2013



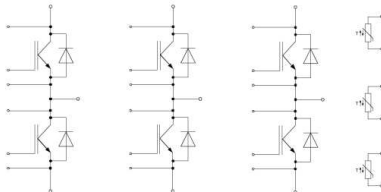


6 Seznam literatury a informačních zdrojů


- [1] VONDRÁŠEK, František. ZČU. Výkonová elektronika: Měniče s vlastní komutací a bez komutace. 2. Vyd. Plzeň: ZČU, 2003. ISBN 80-7082-980-X.
- [2] VONDRÁŠEK, František, Jan LANGHAMMER, Aleš PEROUTKA, Jan MĚSÍČEK a Jan MOLNÁR. ZČU. Projektování výkonových polovodičových měničů – vybrané stati. 1. Vyd. Plzeň: ZČU, 2008. ISBN 978-80-7043-653-0.
- [3] FLAJTINGR, Jiří a Lumír KULE. ZČU. Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči. 2. upravené vyd. Plzeň: ZČU, 2005. ISBN 80-7043-354-X.
- [4] Katalogové listy a aplikační manuály výrobců komponent měničů.
- [5] Odborné články (Internet, periodika)
- [6] Související Škoda dokumenty a normy
- [7] Internetové stránky:
 - [a] www.sor.cz
 - [b] www.solaris.pl
 - [c] www.semikron.com


7 Přílohy


7.1 Parametry jednotlivých IGBT modulů

7.1.1 IGBT Module Hybridpack 2 (Infineon) - FS600R07A2E3

<p>Technische Information / technical information</p> <p>IGBT-Module IGBT-modules</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em;">FS600R07A2E3</p>													
<p>HybridPACK™2 Modul mit Trench/Feldstopp IGBT3 und Emitter Controlled 3 Diode und NTC HybridPACK™2 module with Trench/Fieldstop IGBT3 and Emitter Controlled 3 diode and NTC</p>													
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">  </div> <p>V_{CES} = 650V I_{C nom} = 600A / I_{CRM} = 1200A</p>												
<p>Typische Anwendungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anwendungen im Automobil • Hybrid-Elektrofahrzeuge (H)EV • Hybrid-Nutzfahrzeuge • Motorantriebe 	<p>Typical Applications</p> <ul style="list-style-type: none"> • Automotive Applications • Hybrid Electrical Vehicles (H)EV • Commercial Agriculture Vehicles • Motor Drives 												
<p>Elektrische Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erhöhte Sperrspannungsfestigkeit auf 650V • Hohe Stromdichte • Niederinduktives Design • Niedrige Schaltverluste • Trench IGBT 3 • T_{vj op} = 150°C • V_{CEsat} mit positivem Temperaturkoeffizienten 	<p>Electrical Features</p> <ul style="list-style-type: none"> • Increased blocking voltage capability to 650V • High Current Density • Low inductive design • Low Switching Losses • Trench IGBT 3 • T_{vj op} = 150°C • V_{CEsat} with positive Temperature Coefficient 												
<p>Mechanische Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2,5 kV AC 1min Isolationsfestigkeit • Direkt gekühlte Bodenplatte • Hohe Leistungsdichte • Integrierter NTC Temperatur Sensor • Isolierte Bodenplatte • Kupferbodenplatte • RoHS konform 	<p>Mechanical Features</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2.5 kV AC 1min Insulation • Direct Cooled Base Plate • High Power Density • Integrated NTC temperature sensor • Isolated Base Plate • Copper Base Plate • RoHS compliant 												
<p>Module Label Code</p>													
<p>Barcode Code 128</p>  <p>0000012345600000000000</p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Content of the Code</th> <th>Digit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Module Serial Number</td> <td>1 - 5</td> </tr> <tr> <td>Module Material Number</td> <td>6 - 11</td> </tr> <tr> <td>Production Order Number</td> <td>12 - 19</td> </tr> <tr> <td>Datecode (Production Year)</td> <td>20 - 21</td> </tr> <tr> <td>Datecode (Production Week)</td> <td>22 - 23</td> </tr> </tbody> </table>	Content of the Code	Digit	Module Serial Number	1 - 5	Module Material Number	6 - 11	Production Order Number	12 - 19	Datecode (Production Year)	20 - 21	Datecode (Production Week)	22 - 23
Content of the Code	Digit												
Module Serial Number	1 - 5												
Module Material Number	6 - 11												
Production Order Number	12 - 19												
Datecode (Production Year)	20 - 21												
Datecode (Production Week)	22 - 23												
<p>DMX - Code</p> 													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">prepared by: WJ</td> <td style="width: 33%;">date of publication: 2012-03-05</td> <td style="width: 33%;">material no: 31771</td> </tr> <tr> <td>approved by: MM</td> <td>revision: 3.0</td> <td></td> </tr> </table>	prepared by: WJ	date of publication: 2012-03-05	material no: 31771	approved by: MM	revision: 3.0								
prepared by: WJ	date of publication: 2012-03-05	material no: 31771											
approved by: MM	revision: 3.0												

Technische Information / technical information IGBT-Module IGBT-modules		 FS600R07A2E3			
IGBT-Wechselrichter / IGBT-inverter Höchstzulässige Werte / Maximum Rated Values					
Kollektor-Emitter-Sperrspannung Collector-emitter voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{CES}	650	V	
Implementierter Kollektor-Strom Implemented collector current		I_{CN}	600	A	
Kollektor-Dauergleichstrom Continuous DC collector current	$T_F = 75^{\circ}\text{C}, T_{vj} = 175^{\circ}\text{C}$ $T_F = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj} = 175^{\circ}\text{C}$	$I_{C\ nom}$ I_C	400 530	A A	
Periodischer Kollektor-Spitzenstrom Repetitive peak collector current	$t_P = 1\ \text{ms}$	I_{CRM}	1200	A	
Gesamt-Verlustleistung Total power dissipation	$T_F = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj} = 175^{\circ}\text{C}$	P_{tot}	1250	W	
Gate-Emitter-Spitzenspannung Gate-emitter peak voltage		V_{GES}	+/-20	V	
Charakteristische Werte / Characteristic Values					
			min.	typ.	max.
Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung Collector-emitter saturation voltage	$I_C = 400\ \text{A}, V_{GE} = 15\ \text{V}$ $I_C = 400\ \text{A}, V_{GE} = 15\ \text{V}$ $I_C = 400\ \text{A}, V_{GE} = 15\ \text{V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	$V_{CE\ sat}$	1,30 1,35 1,40	1,60 V V V
Gate-Schwellenspannung Gate threshold voltage	$I_C = 9,60\ \text{mA}, V_{CE} = V_{GE}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		V_{GEth}	4,9	5,8 6,5 V
Gateladung Gate charge	$V_{GE} = -15\ \text{V} \dots +15\ \text{V}$		Q_G	6,50	μC
Interner Gatewiderstand Internal gate resistor	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		R_{Gint}	0,5	Ω
Eingangskapazität Input capacitance	$f = 1\ \text{MHz}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 25\ \text{V}, V_{GE} = 0\ \text{V}$		C_{ies}	39,0	nF
Rückwirkungskapazität Reverse transfer capacitance	$f = 1\ \text{MHz}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 25\ \text{V}, V_{GE} = 0\ \text{V}$		C_{res}	1,15	nF
Kollektor-Emitter-Reststrom Collector-emitter cut-off current	$V_{CE} = 650\ \text{V}, V_{GE} = 0\ \text{V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		I_{CES}		5,0 mA
Gate-Emitter-Reststrom Gate-emitter leakage current	$V_{CE} = 0\ \text{V}, V_{GE} = 20\ \text{V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		I_{GES}		400 nA
Einschaltverzögerungszeit, induktive Last Turn-on delay time, inductive load	$I_C = 400\ \text{A}, V_{CE} = 300\ \text{V}$ $V_{GE} = \pm 15\ \text{V}$ $R_{Gon} = 2,2\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	$t_{d\ on}$	0,09 0,10 0,10	μs μs μs
Anstiegszeit, induktive Last Rise time, inductive load	$I_C = 400\ \text{A}, V_{CE} = 300\ \text{V}$ $V_{GE} = \pm 15\ \text{V}$ $R_{Gon} = 2,2\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	t_r	0,08 0,09 0,09	μs μs μs
Abschaltverzögerungszeit, induktive Last Turn-off delay time, inductive load	$I_C = 400\ \text{A}, V_{CE} = 300\ \text{V}$ $V_{GE} = \pm 15\ \text{V}$ $R_{Goff} = 1,0\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	$t_{d\ off}$	0,44 0,47 0,48	μs μs μs
Fallzeit, induktive Last Fall time, inductive load	$I_C = 400\ \text{A}, V_{CE} = 300\ \text{V}$ $V_{GE} = \pm 15\ \text{V}$ $R_{Goff} = 1,0\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	t_f	0,03 0,05 0,06	μs μs μs
Einschaltverlustenergie pro Puls Turn-on energy loss per pulse	$I_C = 400\ \text{A}, V_{CE} = 300\ \text{V}, L_S = 20\ \text{nH}$ $V_{GE} = \pm 15\ \text{V}, di/dt = 4600\ \text{A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $R_{Gon} = 2,2\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	E_{on}	9,00 11,0 11,5	mJ mJ mJ
Abschaltverlustenergie pro Puls Turn-off energy loss per pulse	$I_C = 400\ \text{A}, V_{CE} = 300\ \text{V}, L_S = 20\ \text{nH}$ $V_{GE} = \pm 15\ \text{V}, du/dt = 2900\ \text{V}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $R_{Goff} = 1,0\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	E_{off}	14,0 17,5 18,5	mJ mJ mJ
Kurzschlußverhalten SC data	$V_{GE} \leq 15\ \text{V}, V_{CC} = 360\ \text{V}$ $V_{CEmax} = V_{CES} - L_{SCE} \cdot di/dt$	$t_P \leq 8\ \mu\text{s}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $t_P \leq 6\ \mu\text{s}, T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	I_{SC}	4200 3000	A A
Wärmewiderstand, Chip bis Gehäuse Thermal resistance, junction to case	pro IGBT / per IGBT cooling fluid = 50% water/50% ethylenglycol; $\Delta V/\Delta t = 10,0\ \text{dm}^3/\text{min}$		R_{thJF}		0,12 K/W
prepared by: WJ	date of publication: 2012-03-05				
approved by: MM	revision: 3.0				

Technische Information / technical information IGBT-Module IGBT-modules					
FS600R07A2E3					
Diode-Wechselrichter / Diode-inverter Höchstzulässige Werte / Maximum Rated Values					
Periodische Spitzensperrspannung Repetitive peak reverse voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{RRM}	650	V	
Implementierter Durchlassstrom Implemented forward current		I_{FN}	600	A	
Dauergleichstrom Continuous DC forward current		I_F	400	A	
Periodischer Spitzenstrom Repetitive peak forward current	$t_P = 1\text{ ms}$	I_{FRM}	1200	A	
Grenzlastintegral I^2t - value	$V_R = 0\text{ V}, t_P = 10\text{ ms}, T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $V_R = 0\text{ V}, t_P = 10\text{ ms}, T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	I^2t	12000 11500	A^2s A^2s	
Charakteristische Werte / Characteristic Values					
			min.	typ.	max.
Durchlassspannung Forward voltage	$I_F = 400\text{ A}, V_{GE} = 0\text{ V}$ $I_F = 400\text{ A}, V_{GE} = 0\text{ V}$ $I_F = 400\text{ A}, V_{GE} = 0\text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	V_F	1,40 1,35 1,30	1,75 V V V
Rückstromspitze Peak reverse recovery current	$I_F = 400\text{ A}, -di_F/dt = 4600\text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $V_R = 300\text{ V}$ $V_{GE} = -15\text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	I_{RM}	190 290 320	A A A
Sperrverzögerungsladung Recovered charge	$I_F = 400\text{ A}, -di_F/dt = 4600\text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $V_R = 300\text{ V}$ $V_{GE} = -15\text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	Q_r	14,0 31,0 36,0	μC μC μC
Abschaltenergie pro Puls Reverse recovery energy	$I_F = 400\text{ A}, -di_F/dt = 4600\text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $V_R = 300\text{ V}$ $V_{GE} = -15\text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	E_{rec}	3,50 7,00 8,50	mJ mJ mJ
Wärmewiderstand, Chip bis Gehäuse Thermal resistance, junction to cooling fluid	pro Diode / per diode cooling fluid = 50% water/50% ethylenglycol; $\Delta V/\Delta t = 10,0\text{ dm}^3/\text{min}$		R_{thJF}		0,17 K/W
NTC-Widerstand / NTC-thermistor Charakteristische Werte / Characteristic Values					
			min.	typ.	max.
Nennwiderstand Rated resistance	$T_C = 25^{\circ}\text{C}$	R_{25}		5,00	k Ω
Abweichung von R100 Deviation of R100	$T_C = 100^{\circ}\text{C}, R_{100} = 493\ \Omega$	$\Delta R/R$	-5		5 %
Verlustleistung Power dissipation	$T_C = 25^{\circ}\text{C}$	P_{25}			20,0 mW
B-Wert B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25/50}(1/T_2 - 1/(298,15\text{ K}))]$	$B_{25/50}$		3375	K
B-Wert B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25/80}(1/T_2 - 1/(298,15\text{ K}))]$	$B_{25/80}$		3411	K
B-Wert B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25/100}(1/T_2 - 1/(298,15\text{ K}))]$	$B_{25/100}$		3433	K
Angaben gemäß gültiger Application Note. Specification according to the valid application note.					
prepared by: WJ	date of publication: 2012-03-05				
approved by: MM	revision: 3.0				

Technische Information / technical information IGBT-Module IGBT-modules					
FS600R07A2E3					
Modul / Module					
Isolations-Prüfspannung Isolation test voltage	RMS, f = 50 Hz, t = 1 min.	V _{ISOL}	2,5		kV
Material Modulgrundplatte Material of module baseplate			Cu		
Innere Isolation Internal isolation			Al ₂ O ₃		
Kriechstrecke Creepage distance	Kontakt - Kühlkörper / terminal to heatsink Kontakt - Kontakt / terminal to terminal		7,0 5,5		mm
Luftstrecke Clearance	Kontakt - Kühlkörper / terminal to heatsink Kontakt - Kontakt / terminal to terminal		7,0 5,0		mm
Vergleichszahl der Kriechwegbildung Comperative tracking index		CTI	> 200		
			min. typ. max.		
Druckabfall im Kühlkreislauf* Pressure drop in cooling circuit*	$\Delta V/\Delta t = 10,0 \text{ dm}^3/\text{min}$; T _F = 25°C cooling fluid = 50% water/50% ethylenglycol	Δp		100	mbar
Höchstzulässiger Druck im Kühlkreislauf Maximum pressure in cooling circuit		p		2,5	bar
Modulstreueinduktivität Stray inductance module		L _{sCE}	14		nH
Modulleitungswiderstand, Anschlüsse - Chip Module lead resistance, terminals - chip	T _F = 25°C, pro Schalter / per switch	R _{CC+EE'}	0,80		mΩ
Höchstzulässige Sperrschichttemperatur Maximum junction temperature	Wechselrichter, Brems-Chopper / Inverter, Brake-Chopper	T _{vj max}		175	°C
Temperatur im Schaltbetrieb Temperature under switching conditions	Wechselrichter, Brems-Chopper / Inverter, Brake-Chopper	T _{vj op}	-40	150	°C
Lagertemperatur Storage temperature		T _{stg}	-40	125	°C
Anzugsdrehmoment f. Modulmontage Mounting torque for modul mounting	Schraube M6 - Montage gem. gültiger Applikation Note screw M6 - mounting according to valid application note	M	3,00	-	6,00 Nm
Anzugsdrehmoment f. elektr. Anschlüsse Terminal connection torque	Schraube M6 - Montage gem. gültiger Applikation Note screw M6 - mounting according to valid application note	M	2,5	-	5,0 Nm
Gewicht Weight		G	1250		g
* Kühleraufbau gemäß gültiger Application Note. * Cooler setup according to the valid application note.					
prepared by: WJ	date of publication: 2012-03-05				
approved by: MM	revision: 3.0				

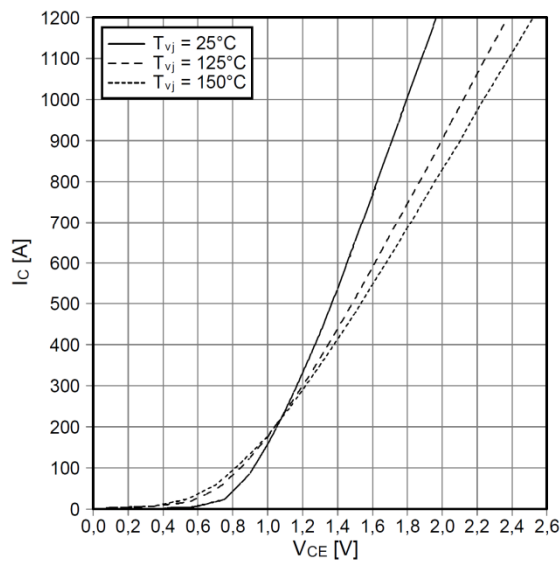
Technische Information / technical information

IGBT-Module
IGBT-modules

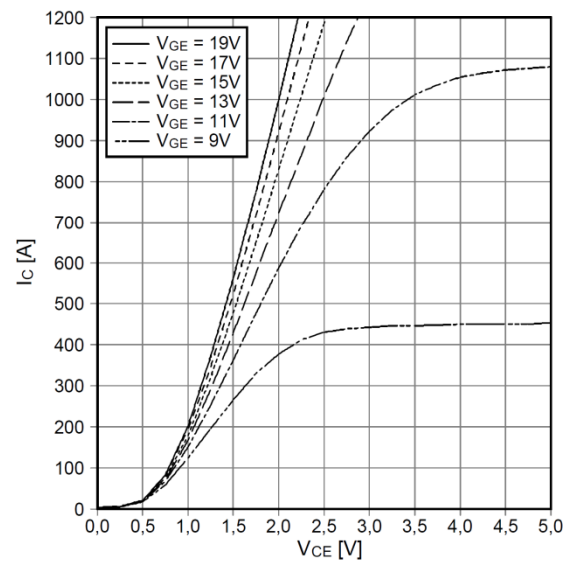
FS600R07A2E3



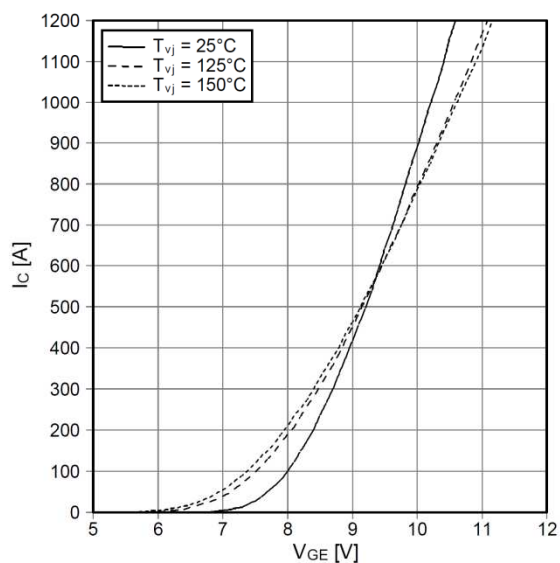
Ausgangskennlinie IGBT-Wechselr. (typisch)
output characteristic IGBT-inverter (typical)
 $I_c = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = 15\text{ V}$



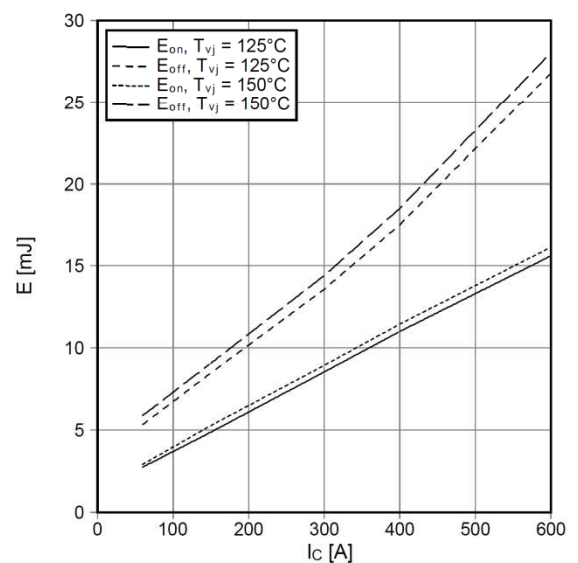
Ausgangskennlinienfeld IGBT-Wechselr. (typisch)
output characteristic IGBT-inverter (typical)
 $I_c = f(V_{CE})$
 $T_{vj} = 150^\circ\text{C}$



Übertragungscharakteristik IGBT-Wechselr. (typisch)
transfer characteristic IGBT-inverter (typical)
 $I_c = f(V_{GE})$
 $V_{CE} = 20\text{ V}$



Schaltverluste IGBT-Wechselr. (typisch)
switching losses IGBT-inverter (typical)
 $E_{on} = f(I_c)$, $E_{off} = f(I_c)$
 $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_{Gon} = 2.2\ \Omega$, $R_{Goff} = 1\ \Omega$, $V_{CE} = 300\text{ V}$



prepared by: WJ	date of publication: 2012-03-05
approved by: MM	revision: 3.0

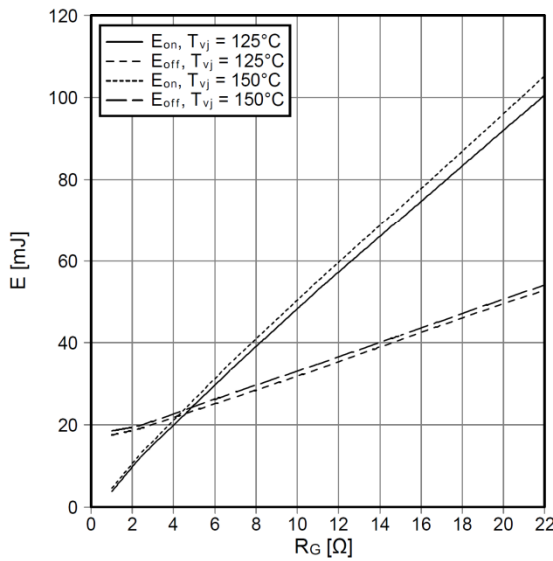
Technische Information / technical information

IGBT-Module
IGBT-modules

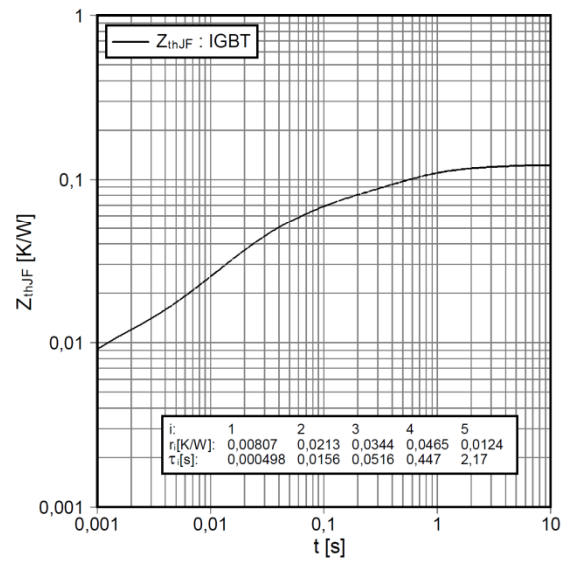
FS600R07A2E3



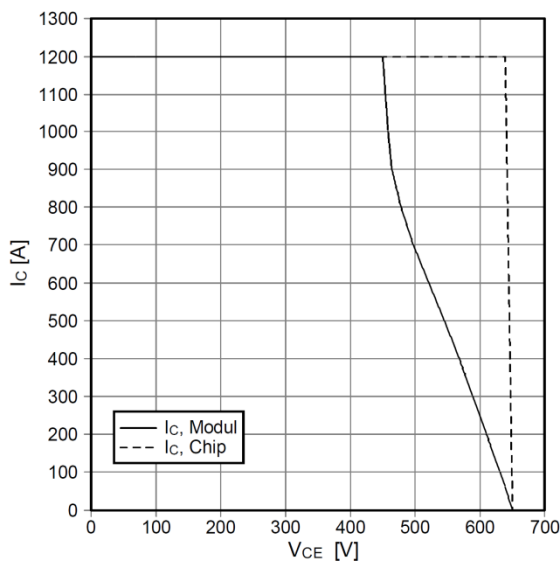
Schaltverluste IGBT-Wechselr. (typisch)
switching losses IGBT-Inverter (typical)
 $E_{on} = f(R_G)$, $E_{off} = f(R_G)$
 $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $I_C = 400\text{ A}$, $V_{CE} = 300\text{ V}$



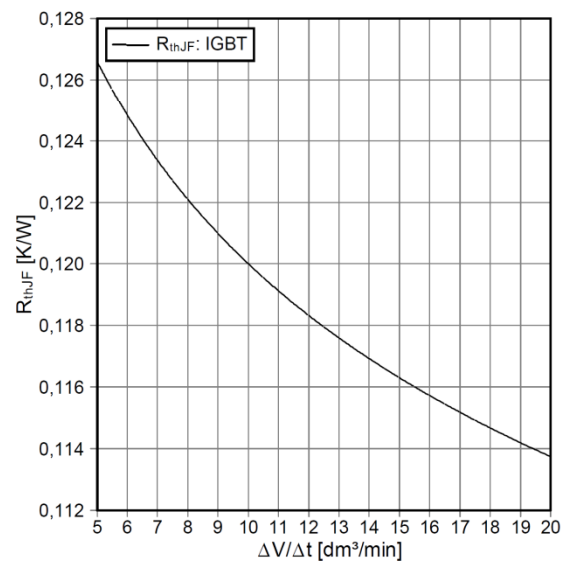
Transienter Wärmewiderstand IGBT-Wechselr.
transient thermal impedance IGBT-inverter
 $Z_{thJF} = f(t)$ ($\Delta V/\Delta t = 10\text{ dm}^3/\text{min}$)



Sicherer Rückwärts-Arbeitsbereich IGBT-Wr. (RBSOA)
reverse bias safe operating area IGBT-inv. (RBSOA)
 $I_C = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_{Goff} = 1\ \Omega$, $T_{vj} = 150^\circ\text{C}$



Wärmewiderstand IGBT-Wechselr.
thermal impedance IGBT-inverter
 $R_{thJF} = f(\Delta V/\Delta t)$
cooling fluid = 50% water/50% ethylenglycol



prepared by: WJ	date of publication: 2012-03-05
approved by: MM	revision: 3.0

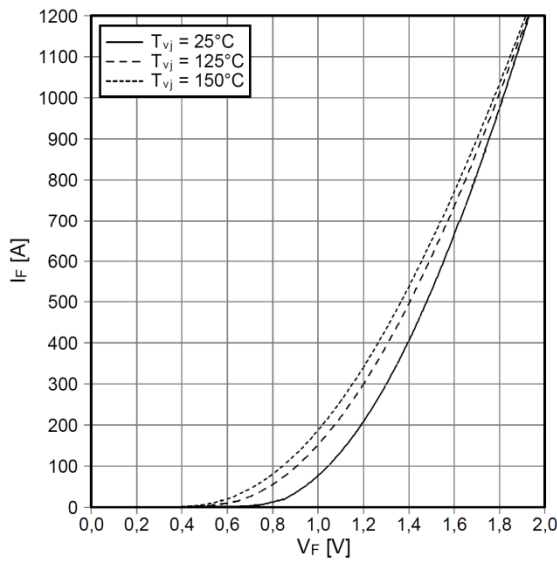
Technische Information / technical information

IGBT-Module
IGBT-modules

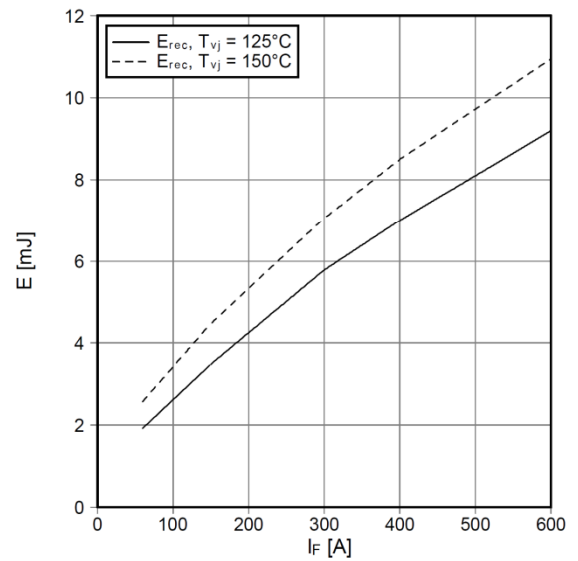
FS600R07A2E3



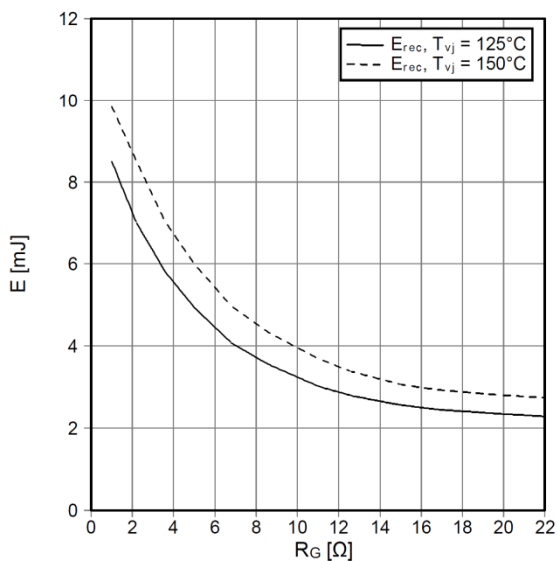
Durchlasskennlinie der Diode-Wechselr. (typisch)
forward characteristic of diode-inverter (typical)
 $I_F = f(V_F)$



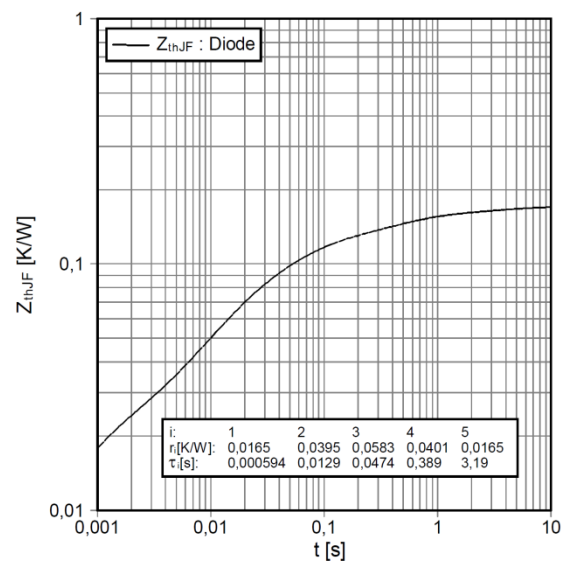
Schaltverluste Diode-Wechselr. (typisch)
switching losses diode-inverter (typical)
 $E_{rec} = f(I_F)$
 $R_{Gon} = 2.2 \Omega, V_{CE} = 300 \text{ V}$



Schaltverluste Diode-Wechselr. (typisch)
switching losses diode-inverter (typical)
 $E_{rec} = f(R_G)$
 $I_F = 400 \text{ A}, V_{CE} = 300 \text{ V}$



Transienter Wärmewiderstand Diode-Wechselr.
transient thermal impedance diode-inverter
 $Z_{thJF} = f(t) (\Delta V/\Delta t = 10 \text{ dm}^3/\text{min})$



prepared by: WJ	date of publication: 2012-03-05
approved by: MM	revision: 3.0

Technische Information / technical information

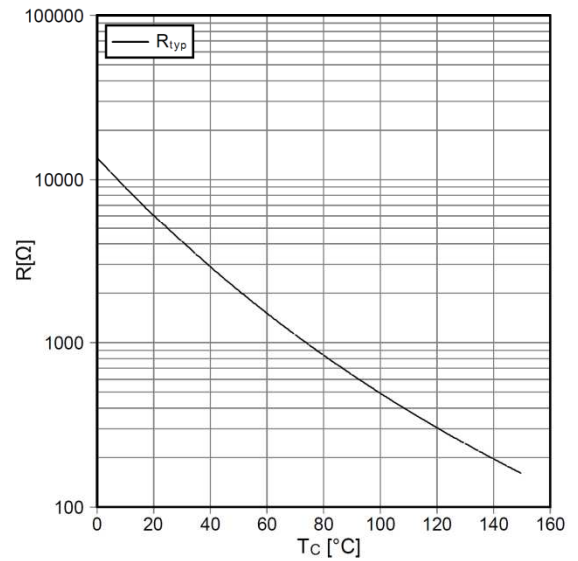
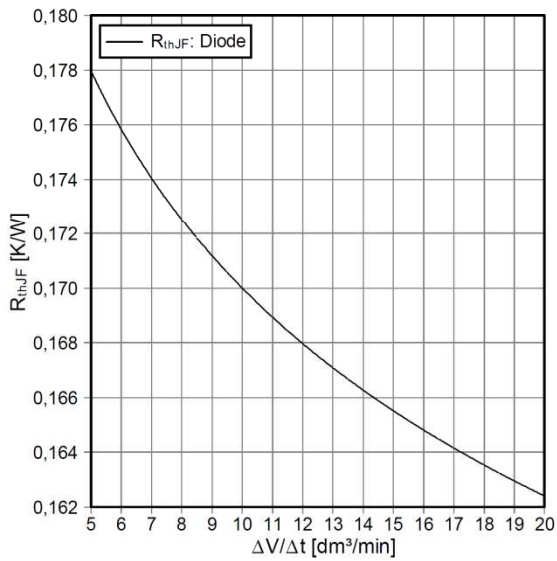
IGBT-Module
IGBT-modules

FS600R07A2E3

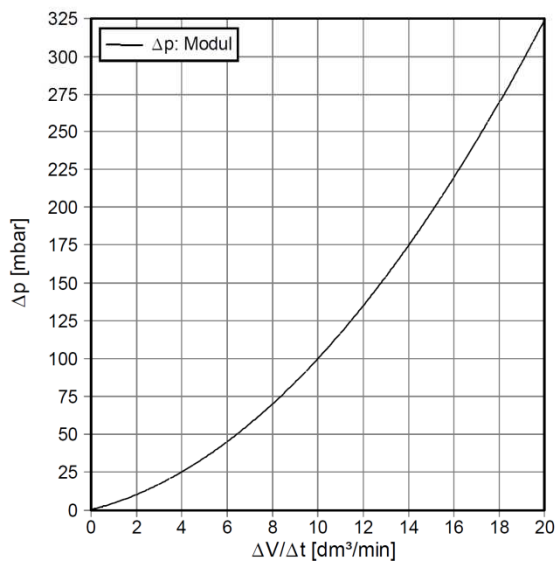


Wärmewiderstand Diode-Wechselr.
thermal impedance diode-inverter
 $R_{thJF} = f(\Delta V/\Delta t)$
cooling fluid = 50% water/50% ethylenglycol

NTC-Temperaturkennlinie (typisch)
NTC-temperature characteristic (typical)
 $R = f(T)$



Druckabfall im Kühlkreislauf*
pressure drop in cooling circuit*
 $\Delta p = f(\Delta V/\Delta t)$
cooling fluid = 50% water/50% ethylenglycol, T_F = 25°C



prepared by: WJ	date of publication: 2012-03-05
approved by: MM	revision: 3.0

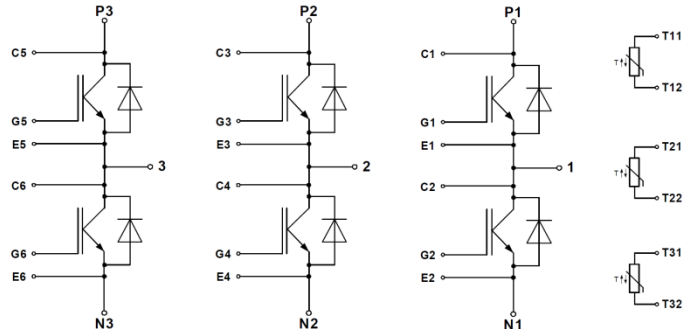
Technische Information / technical information

IGBT-Module
IGBT-modules

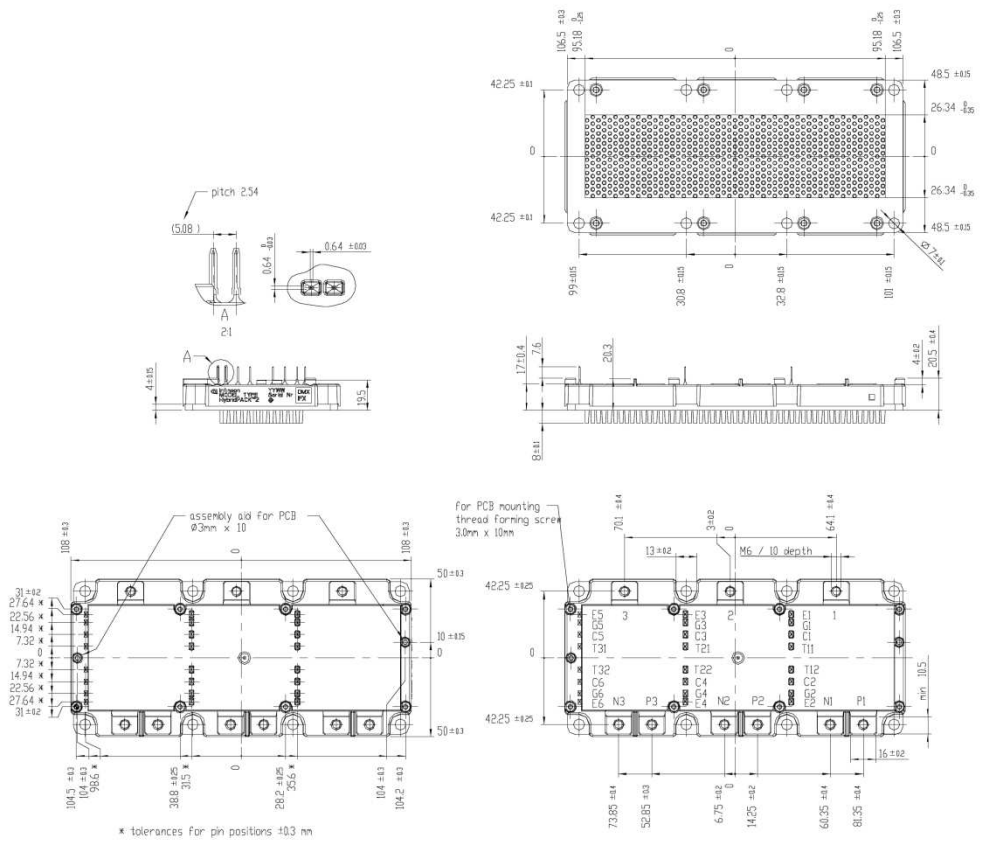
FS600R07A2E3




Schaltplan / circuit diagram




Gehäuseabmessungen / package outlines





prepared by: WJ	date of publication: 2012-03-05
approved by: MM	revision: 3.0

<p>Technische Information / technical information</p> <p>IGBT-Module IGBT-modules</p> <p style="text-align: center;">FS600R07A2E3</p>					
<p>Nutzungsbedingungen</p> <p>Die in diesem Produktdatenblatt enthaltenen Daten sind ausschließlich für technisch geschultes Fachpersonal bestimmt. Die Beurteilung der Eignung dieses Produktes für Ihre Anwendung sowie die Beurteilung der Vollständigkeit der bereitgestellten Produktdaten für diese Anwendung obliegt Ihnen bzw. Ihren technischen Abteilungen.</p> <p>In diesem Produktdatenblatt werden diejenigen Merkmale beschrieben, für die wir eine liefervertragliche Gewährleistung übernehmen. Eine solche Gewährleistung richtet sich ausschließlich nach Maßgabe der im jeweiligen Liefervertrag enthaltenen Bestimmungen. Garantien jeglicher Art werden für das Produkt und dessen Eigenschaften keinesfalls übernommen.</p> <p>Sollten Sie von uns Produktinformationen benötigen, die über den Inhalt dieses Produktdatenblatts hinausgehen und insbesondere eine spezifische Verwendung und den Einsatz dieses Produktes betreffen, setzen Sie sich bitte mit dem für Sie zuständigen Vertriebsbüro in Verbindung (siehe www.infineon.com, Vertrieb&Kontakt). Für Interessenten halten wir Application Notes bereit.</p> <p>Aufgrund der technischen Anforderungen könnte unser Produkt gesundheitsgefährdende Substanzen enthalten. Bei Rückfragen zu den in diesem Produkt jeweils enthaltenen Substanzen setzen Sie sich bitte ebenfalls mit dem für Sie zuständigen Vertriebsbüro in Verbindung.</p> <p>Sollten Sie beabsichtigen, das Produkt in Anwendungen der Luftfahrt, in gesundheits- oder lebensgefährdenden oder lebenserhaltenden Anwendungsbereichen einzusetzen, bitten wir um Mitteilung. Wir weisen darauf hin, dass wir für diese Fälle</p> <ul style="list-style-type: none"> - die gemeinsame Durchführung eines Risiko- und Qualitätsassessments; - den Abschluss von speziellen Qualitätssicherungsvereinbarungen; - die gemeinsame Einführung von Maßnahmen zu einer laufenden Produktbeobachtung dringend empfehlen und gegebenenfalls die Belieferung von der Umsetzung solcher Maßnahmen abhängig machen. <p>Soweit erforderlich, bitten wir Sie, entsprechende Hinweise an Ihre Kunden zu geben.</p> <p>Inhaltliche Änderungen dieses Produktdatenblatts bleiben vorbehalten.</p> <p>Terms & Conditions of usage</p> <p>The data contained in this product data sheet is exclusively intended for technically trained staff. You and your technical departments will have to evaluate the suitability of the product for the intended application and the completeness of the product data with respect to such application.</p> <p>This product data sheet is describing the characteristics of this product for which a warranty is granted. Any such warranty is granted exclusively pursuant the terms and conditions of the supply agreement. There will be no guarantee of any kind for the product and its characteristics.</p> <p>Should you require product information in excess of the data given in this product data sheet or which concerns the specific application of our product, please contact the sales office, which is responsible for you (see www.infineon.com, sales&contact). For those that are specifically interested we may provide application notes.</p> <p>Due to technical requirements our product may contain dangerous substances. For information on the types in question please contact the sales office, which is responsible for you.</p> <p>Should you intend to use the Product in aviation applications, in health or live endangering or life support applications, please notify. Please note, that for any such applications we urgently recommend</p> <ul style="list-style-type: none"> - to perform joint Risk and Quality Assessments; - the conclusion of Quality Agreements; - to establish joint measures of an ongoing product survey, and that we may make delivery depended on the realization of any such measures. <p>If and to the extent necessary, please forward equivalent notices to your customers.</p> <p>Changes of this product data sheet are reserved.</p>					
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">prepared by: WJ</td> <td style="width: 50%;">date of publication: 2012-03-05</td> </tr> <tr> <td>approved by: MM</td> <td>revision: 3.0</td> </tr> </table>		prepared by: WJ	date of publication: 2012-03-05	approved by: MM	revision: 3.0
prepared by: WJ	date of publication: 2012-03-05				
approved by: MM	revision: 3.0				

7.1.2 IGBT Module EconoDual 3 (Infineon) – FF450R07ME4

Technische Information / technical information IGBT-Module IGBT-modules <div style="text-align: center; font-size: 24pt; font-weight: bold;">FF450R07ME4</div>					
EconoDUAL™ Modul mit Trench/Feldstop IGBT4 und Emitter Controlled Diode 3 EconoDUAL™ module with trench/fieldstop IGBT4 and Emitter Controlled Diode 3					
IGBT-Wechselrichter / IGBT-inverter		Zieldaten / target data			
Höchstzulässige Werte / maximum rated values					
Kollektor-Emitter-Sperrspannung collector-emitter voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{CES}	650	V	
Kollektor-Dauerstrom DC-collector current	$T_C = 50^{\circ}\text{C}, T_{vj} = 175^{\circ}\text{C}$ $T_C = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj} = 175^{\circ}\text{C}$	$I_{C\text{ nom}}$ I_C	450 550	A A	
Periodischer Kollektor Spitzenstrom repetitive peak collector current	$t_P = 1\text{ ms}$	I_{CRM}	900	A	
Gesamt-Verlustleistung total power dissipation	$T_C = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj} = 175^{\circ}\text{C}$	P_{tot}	1250	W	
Gate-Emitter-Spitzenspannung gate-emitter peak voltage		V_{GES}	+/-20	V	
Charakteristische Werte / characteristic values					
			min.	typ.	max.
Kollektor-Emitter Sättigungsspannung collector-emitter saturation voltage	$I_C = 450\text{ A}, V_{GE} = 15\text{ V}$ $I_C = 450\text{ A}, V_{GE} = 15\text{ V}$ $I_C = 450\text{ A}, V_{GE} = 15\text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	$V_{CE\text{ sat}}$	1,55 1,70 1,75	1,95 V V V
Gate-Schwellenspannung gate threshold voltage	$I_C = 7,20\text{ mA}, V_{CE} = V_{GE}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		V_{GEth}	5,1 5,8 6,5	V V V
Gateladung gate charge	$V_{GE} = -15\text{ V} \dots +15\text{ V}$		Q_G	t.b.d.	μC
Interner Gatewiderstand internal gate resistor	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		R_{Gint}	0,67	Ω
Eingangskapazität input capacitance	$f = 1\text{ MHz}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}$		C_{ies}	t.b.d.	nF
Rückwirkungskapazität reverse transfer capacitance	$f = 1\text{ MHz}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}$		C_{res}		nF
Kollektor-Emitter Reststrom collector-emitter cut-off current	$V_{CE} = 650\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		I_{CES}		5,0 mA
Gate-Emitter Reststrom gate-emitter leakage current	$V_{CE} = 0\text{ V}, V_{GE} = 20\text{ V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		I_{GES}		400 nA
Einschaltverzögerungszeit (ind. Last) turn-on delay time (inductive load)	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 300\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{Gon} = \text{t.b.d. } \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	$t_{d\text{ on}}$	t.b.d. t.b.d.	μs μs
Anstiegszeit (induktive Last) rise time (inductive load)	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 300\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{Gon} = \text{t.b.d. } \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	t_r	t.b.d. t.b.d.	μs μs
Abschaltverzögerungszeit (ind. Last) turn-off delay time (inductive load)	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 300\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{Goff} = \text{t.b.d. } \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	$t_{d\text{ off}}$	t.b.d. t.b.d.	μs μs
Fallzeit (induktive Last) fall time (inductive load)	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 300\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{Goff} = \text{t.b.d. } \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	t_f	t.b.d. t.b.d.	μs μs
Einschaltverlustenergie pro Puls turn-on energy loss per pulse	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 300\text{ V}, L_S = 30\text{ nH}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}, di/dt = 5900\text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $R_{Gon} = \text{t.b.d. } \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	E_{on}	4,95 6,30 6,90	mJ mJ mJ
Abschaltverlustenergie pro Puls turn-off energy loss per pulse	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 300\text{ V}, L_S = 30\text{ nH}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}, du/dt = 2400\text{ V}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $R_{Goff} = \text{t.b.d. } \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	E_{off}	22,0 27,5 28,5	mJ mJ mJ
Kurzschlussverhalten SC data	$V_{GE} \leq 15\text{ V}, V_{CC} = 360\text{ V}$ $V_{CE\text{ max}} = V_{CES} - L_{SC} \cdot di/dt$ $t_P \leq 10\text{ } \mu\text{s}, T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$		I_{SC}	1900	A
Innerer Wärmewiderstand thermal resistance, junction to case	pro IGBT / per IGBT		R_{thJC}		0,12 K/W
Übergangs-Wärmewiderstand thermal resistance, case to heatsink	pro IGBT / per IGBT $\lambda_{\text{Paste}} = 1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ / $\lambda_{\text{grease}} = 1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$		R_{thCH}	0,03	K/W
prepared by: MB	date of publication: 2010-09-15				
approved by: MK	revision: 1.0				

Technische Information / technical information IGBT-Module IGBT-modules					
<h1>FF450R07ME4</h1>		Zieldaten target data			
Diode-Wechselrichter / diode-inverter Höchstzulässige Werte / maximum rated values					
Periodische Spitzensperrspannung repetitive peak reverse voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{RRM}	650	V	
Dauergleichstrom DC forward current		I_F	450	A	
Periodischer Spitzenstrom repetitive peak forward current	$t_P = 1 \text{ ms}$	I_{FRM}	900	A	
Grenzlastintegral I^2t - value	$V_R = 0 \text{ V}, t_P = 10 \text{ ms}, T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $V_R = 0 \text{ V}, t_P = 10 \text{ ms}, T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	I^2t	13000 12500	A ² s A ² s	
Charakteristische Werte / characteristic values					
			min.	typ.	max.
Durchlassspannung forward voltage	$I_F = 450 \text{ A}, V_{GE} = 0 \text{ V}$ $I_F = 450 \text{ A}, V_{GE} = 0 \text{ V}$ $I_F = 450 \text{ A}, V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	V_F	1,55 1,50 1,45	1,95 V V V
Rückstromspitze peak reverse recovery current	$I_F = 450 \text{ A}, -di_F/dt = 5900 \text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $V_R = 300 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	I_{RM}	230 290 310	A A A
Sperrverzögerungsladung recovered charge	$I_F = 450 \text{ A}, -di_F/dt = 5900 \text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $V_R = 300 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	Q_r	16,5 30,0 35,0	μC μC μC
Abschaltenergie pro Puls reverse recovery energy	$I_F = 450 \text{ A}, -di_F/dt = 5900 \text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $V_R = 300 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	E_{rec}	3,75 7,50 9,00	mJ mJ mJ
Innerer Wärmewiderstand thermal resistance, junction to case	pro Diode / per diode		R_{thJC}		0,22 K/W
Übergangs-Wärmewiderstand thermal resistance, case to heatsink	pro Diode / per diode $\lambda_{Paste} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) / \lambda_{grease} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$		R_{thCH}	0,06	K/W
NTC-Widerstand / NTC-thermistor Charakteristische Werte / characteristic values					
			min.	typ.	max.
Nennwiderstand rated resistance	$T_C = 25^{\circ}\text{C}$		R_{25}	5,00	k Ω
Abweichung von R_{100} deviation of R_{100}	$T_C = 100^{\circ}\text{C}, R_{100} = 493 \Omega$		$\Delta R/R$	-5	5 %
Verlustleistung power dissipation	$T_C = 25^{\circ}\text{C}$		P_{25}		20,0 mW
B-Wert B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25/50}(1/T_2 - 1/(298,15 \text{ K}))]$		$B_{25/50}$	3375	K
B-Wert B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25/80}(1/T_2 - 1/(298,15 \text{ K}))]$		$B_{25/80}$	3411	K
B-Wert B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25/100}(1/T_2 - 1/(298,15 \text{ K}))]$		$B_{25/100}$	3433	K
Angaben gemäß gültiger Application Note. Specification according to the valid application note.					
prepared by: MB	date of publication: 2010-09-15				
approved by: MK	revision: 1.0				

Technische Information / technical information IGBT-Module IGBT-modules					
<h1>FF450R07ME4</h1>					
		Zieldaten target data			
Modul / module					
Isolations-Prüfspannung insulation test voltage	RMS, f = 50 Hz, t = 1 min.	V _{ISOL}	2,5		kV
Material Modulgrundplatte material of module baseplate			Cu		
Material für innere Isolation material for internal insulation			Al ₂ O ₃		
Kriechstrecke creepage distance	Kontakt - Kühlkörper / terminal to heatsink Kontakt - Kontakt / terminal to terminal		14,5 13,0		mm
Luftstrecke clearance distance	Kontakt - Kühlkörper / terminal to heatsink Kontakt - Kontakt / terminal to terminal		12,5 10,0		mm
Vergleichszahl der Kriechwegbildung comparative tracking index		CTI	> 200		
			min. typ. max.		
Übergangs-Wärmewiderstand thermal resistance, case to heatsink	pro Modul / per module $\lambda_{\text{Paste}} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) / \lambda_{\text{grease}} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	R _{thCH}	0,009		K/W
Modulinduktivität stray inductance module		L _{sCE}	20		nH
Modulleitungswiderstand, Anschlüsse - Chip module lead resistance, terminals - chip	T _c = 25°C, pro Schalter / per switch	R _{CC+EE'}	1,10		mΩ
Höchstzulässige Sperrschichttemperatur maximum junction temperature	Wechselrichter, Brems-Chopper / Inverter, Brake-Chopper	T _{vj max}		175	°C
Temperatur im Schaltbetrieb temperature under switching conditions	Wechselrichter, Brems-Chopper / Inverter, Brake-Chopper	T _{vj op}	-40	150	°C
Lagertemperatur storage temperature		T _{stg}	-40	125	°C
Anzugsdrehmoment f. mech. Befestigung mounting torque	Schraube M5 - Montage gem. gültiger Applikation Note screw M5 - mounting according to valid application note	M	3,00	-	6,00 Nm
Anzugsdrehmoment f. elektr. Anschlüsse terminal connection torque	Schraube M6 - Montage gem. gültiger Applikation Note screw M6 - mounting according to valid application note	M	3,0	-	6,0 Nm
Gewicht weight		G	345		g
prepared by: MB		date of publication: 2010-09-15			
approved by: MK		revision: 1.0			

Technische Information / technical information

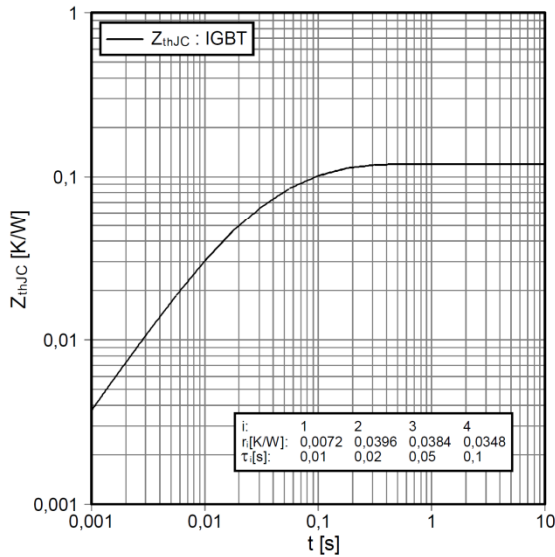
IGBT-Module
IGBT-modules

FF450R07ME4

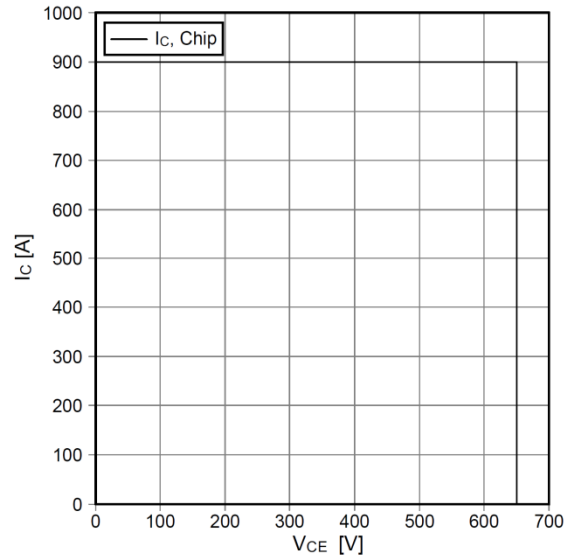


Zieldaten
target data

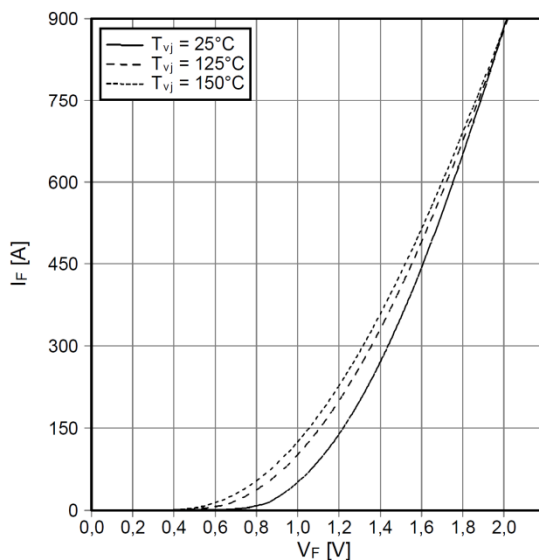
Transienter Wärmewiderstand IGBT-Wechselr.
transient thermal impedance IGBT-inverter
 $Z_{thJC} = f(t)$



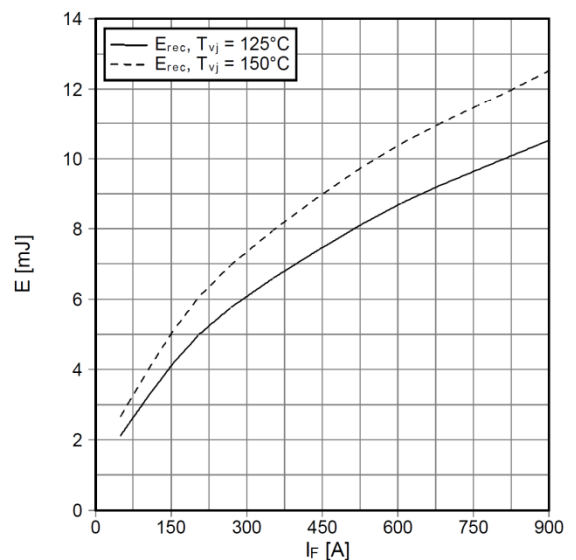
Sicherer Rückwärts-Arbeitsbereich IGBT-Wr. (RBSOA)
reverse bias safe operating area IGBT-inv. (RBSOA),
ohne di/dt Regulierung, without di/dt control
 $I_C = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = \pm 15 V, R_{Goff} = \Omega, T_{vj} = 150^\circ C$



Durchlasskennlinie der Diode-Wechselr. (typisch)
forward characteristic of diode-inverter (typical)
 $I_F = f(V_F)$



Schaltverluste Diode-Wechselr. (typisch)
switching losses diode-inverter (typical)
 $E_{rec} = f(I_F)$
 $R_{Gon} = \Omega, V_{CE} = 300 V$



prepared by: MB	date of publication: 2010-09-15
approved by: MK	revision: 1.0

Technische Information / technical information

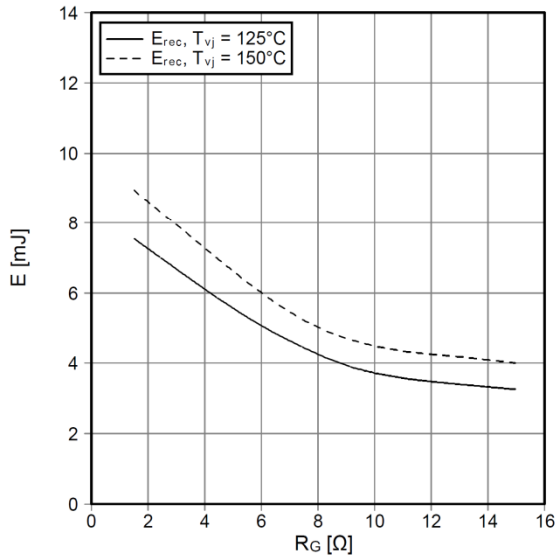
IGBT-Module
IGBT-modules

FF450R07ME4

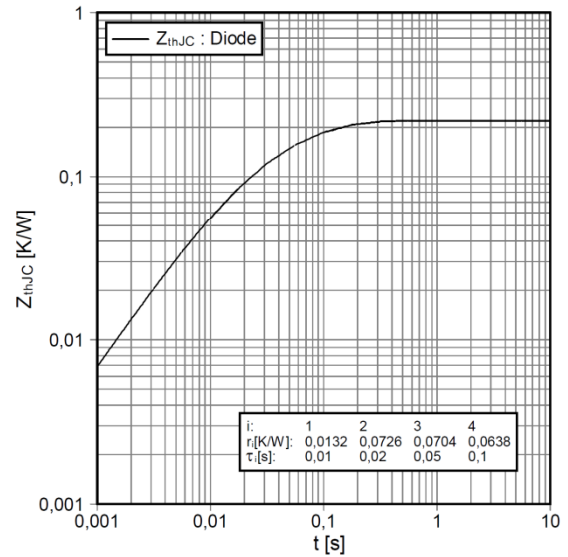


Zieldaten
target data

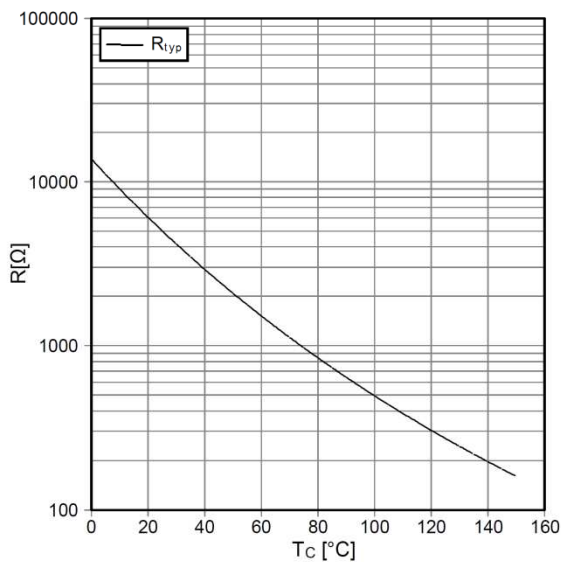
Schaltverluste Diode-Wechselr. (typisch)
switching losses diode-inverter (typical)
 $E_{rec} = f(R_G)$
 $I_F = 450\text{ A}, V_{CE} = 300\text{ V}$



Transienter Wärmewiderstand Diode-Wechselr.
transient thermal impedance diode-inverter
 $Z_{thJC} = f(t)$



NTC-Temperaturkennlinie (typisch)
NTC-temperature characteristic (typical)
 $R = f(T)$



prepared by: MB	date of publication: 2010-09-15
approved by: MK	revision: 1.0

Technische Information / technical information

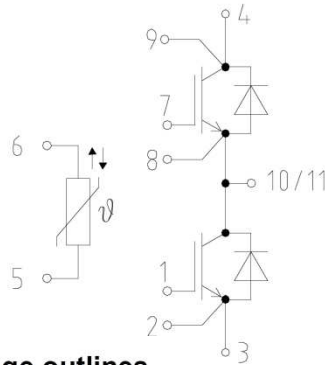
IGBT-Module
IGBT-modules

FF450R07ME4

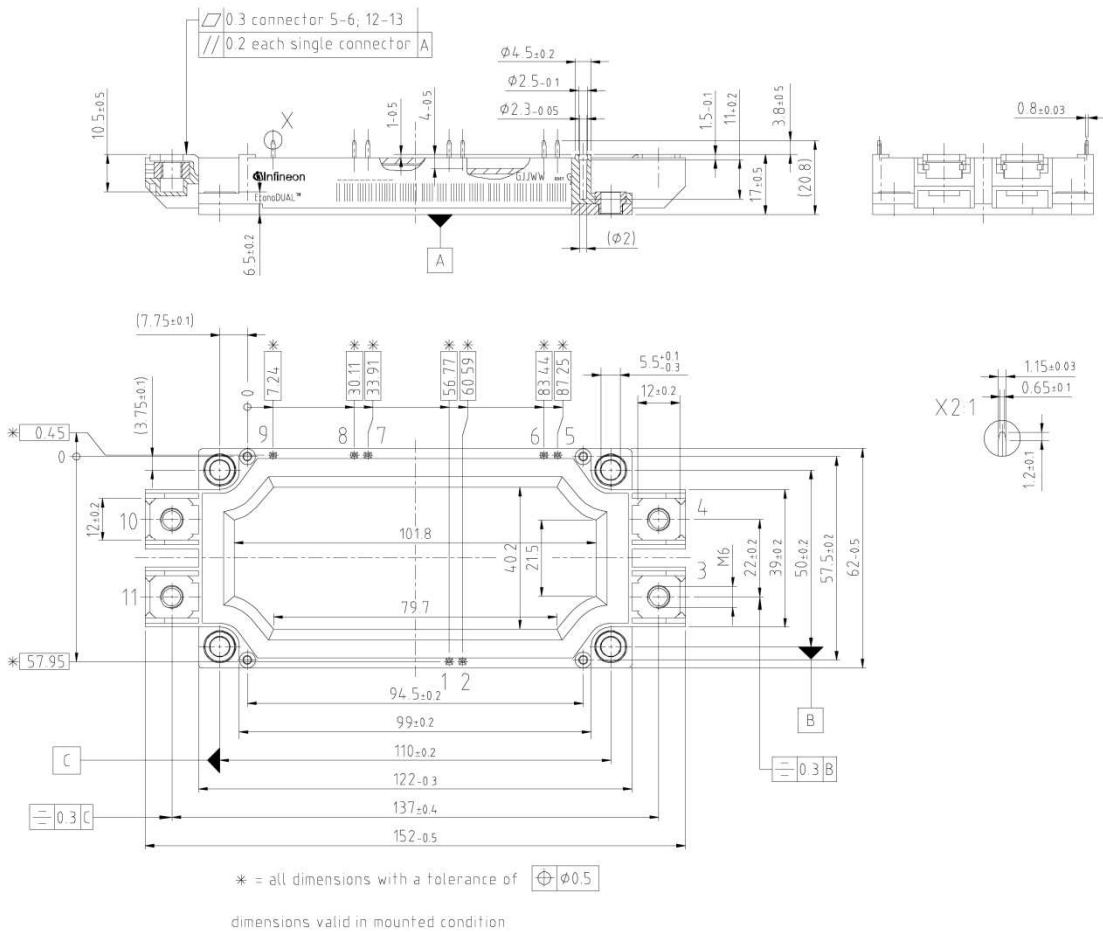


Zieldaten
target data


Schaltplan / circuit diagram



Gehäuseabmessungen / package outlines



prepared by: MB	date of publication: 2010-09-15
approved by: MK	revision: 1.0

<p>Technische Information / technical information</p> <p>IGBT-Module IGBT-modules</p> <p style="text-align: center;">FF450R07ME4</p>					
<p style="text-align: right;">Zieldaten target data</p> <p>Nutzungsbedingungen</p> <p>Die in diesem Produktdatenblatt enthaltenen Daten sind ausschließlich für technisch geschultes Fachpersonal bestimmt. Die Beurteilung der Eignung dieses Produktes für Ihre Anwendung sowie die Beurteilung der Vollständigkeit der bereitgestellten Produktdaten für diese Anwendung obliegt Ihnen bzw. Ihren technischen Abteilungen.</p> <p>In diesem Produktdatenblatt werden diejenigen Merkmale beschrieben, für die wir eine liefervertragliche Gewährleistung übernehmen. Eine solche Gewährleistung richtet sich ausschließlich nach Maßgabe der im jeweiligen Liefervertrag enthaltenen Bestimmungen. Garantien jeglicher Art werden für das Produkt und dessen Eigenschaften keinesfalls übernommen.</p> <p>Sollten Sie von uns Produktinformationen benötigen, die über den Inhalt dieses Produktdatenblatts hinausgehen und insbesondere eine spezifische Verwendung und den Einsatz dieses Produktes betreffen, setzen Sie sich bitte mit dem für Sie zuständigen Vertriebsbüro in Verbindung (siehe www.infineon.com, Vertrieb&Kontakt). Für Interessenten halten wir Application Notes bereit.</p> <p>Aufgrund der technischen Anforderungen könnte unser Produkt gesundheitsgefährdende Substanzen enthalten. Bei Rückfragen zu den in diesem Produkt jeweils enthaltenen Substanzen setzen Sie sich bitte ebenfalls mit dem für Sie zuständigen Vertriebsbüro in Verbindung.</p> <p>Sollten Sie beabsichtigen, das Produkt in Anwendungen der Luftfahrt, in gesundheits- oder lebensgefährdenden oder lebenserhaltenden Anwendungsbereichen einzusetzen, bitten wir um Mitteilung. Wir weisen darauf hin, dass wir für diese Fälle</p> <ul style="list-style-type: none"> - die gemeinsame Durchführung eines Risiko- und Qualitätsassessments; - den Abschluss von speziellen Qualitätssicherungsvereinbarungen; - die gemeinsame Einführung von Maßnahmen zu einer laufenden Produktbeobachtung dringend empfehlen und gegebenenfalls die Belieferung von der Umsetzung solcher Maßnahmen abhängig machen. <p>Soweit erforderlich, bitten wir Sie, entsprechende Hinweise an Ihre Kunden zu geben.</p> <p>Inhaltliche Änderungen dieses Produktdatenblatts bleiben vorbehalten.</p> <p>Terms & Conditions of usage</p> <p>The data contained in this product data sheet is exclusively intended for technically trained staff. You and your technical departments will have to evaluate the suitability of the product for the intended application and the completeness of the product data with respect to such application.</p> <p>This product data sheet is describing the characteristics of this product for which a warranty is granted. Any such warranty is granted exclusively pursuant the terms and conditions of the supply agreement. There will be no guarantee of any kind for the product and its characteristics.</p> <p>Should you require product information in excess of the data given in this product data sheet or which concerns the specific application of our product, please contact the sales office, which is responsible for you (see www.infineon.com, sales&contact). For those that are specifically interested we may provide application notes.</p> <p>Due to technical requirements our product may contain dangerous substances. For information on the types in question please contact the sales office, which is responsible for you.</p> <p>Should you intend to use the Product in aviation applications, in health or live endangering or life support applications, please notify. Please note, that for any such applications we urgently recommend</p> <ul style="list-style-type: none"> - to perform joint Risk and Quality Assessments; - the conclusion of Quality Agreements; - to establish joint measures of an ongoing product survey, and that we may make delivery depended on the realization of any such measures. <p>If and to the extent necessary, please forward equivalent notices to your customers.</p> <p>Changes of this product data sheet are reserved.</p> <table border="1" data-bbox="304 1877 1029 1935"> <tr> <td>prepared by: MB</td> <td>date of publication: 2010-09-15</td> </tr> <tr> <td>approved by: MK</td> <td>revision: 1.0</td> </tr> </table>		prepared by: MB	date of publication: 2010-09-15	approved by: MK	revision: 1.0
prepared by: MB	date of publication: 2010-09-15				
approved by: MK	revision: 1.0				

7.1.3 IGBT Module Skim 63 (Semikron) - SKiM406GD066HD

SKiM406GD066HD



SKiM® 63

Trench IGBT Modules

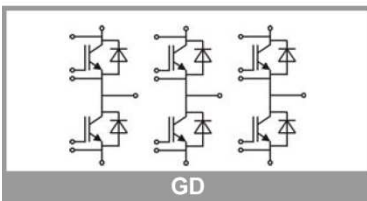
SKiM406GD066HD

Features

- IGBT 3 Trench Gate Technology
- Solderless sinter technology
- $V_{CE(sat)}$ with positive temperature coefficient
- Low inductance case
- Isolated by Al_2O_3 DCB (Direct Copper Bonded) ceramic substrate
- Pressure contact technology for thermal contacts and electrical contacts
- High short circuit capability, self limiting to $6 \times I_C$
- Integrated temperature sensor

Typical Applications

- Automotive inverter
- High reliability AC inverter wind
- High reliability AC inverter drives



Absolute Maximum Ratings				
Symbol	Conditions	Values	Unit	
IGBT				
V_{CES}		600	V	
I_C	$T_j = 175\text{ °C}$	$T_s = 25\text{ °C}$	383	A
		$T_s = 70\text{ °C}$	304	A
I_{Cnom}		400	A	
I_{CRM}	$I_{CRM} = 2 \times I_{Cnom}$	800	A	
V_{GES}		-20 ... 20	V	
t_{psc}	$T_j = 150\text{ °C}$	$V_{CC} = 360\text{ V}$	6	μs
		$V_{GE} \leq 15\text{ V}$ $V_{CES} \leq 600\text{ V}$		
T_j		-40 ... 175	$^{\circ}\text{C}$	
Inverse diode				
I_F	$T_j = 175\text{ °C}$	$T_s = 25\text{ °C}$	320	A
		$T_s = 70\text{ °C}$	249	A
I_{Fnom}		300	A	
I_{FRM}	$I_{FRM} = 2 \times I_{Fnom}$	600	A	
I_{FSM}	$t_p = 10\text{ ms}, \sin 180^{\circ}, T_j = 25\text{ °C}$	2340	A	
T_j		-40 ... 175	$^{\circ}\text{C}$	
Module				
$I_{t(RMS)}$		700	A	
T_{stg}		-40 ... 125	$^{\circ}\text{C}$	
V_{isol}	AC sinus 50 Hz, $t = 1\text{ min}$	2500	V	

Characteristics					
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Unit
IGBT					
$V_{CE(sat)}$	$I_C = 400\text{ A}$ $V_{GE} = 15\text{ V}$ chiplevel	$T_j = 25\text{ °C}$	1.45	1.85	V
		$T_j = 150\text{ °C}$	1.70	2.10	V
V_{CE0}		$T_j = 25\text{ °C}$	0.9	1	V
		$T_j = 150\text{ °C}$	0.85	0.9	V
r_{CE}	$V_{GE} = 15\text{ V}$	$T_j = 25\text{ °C}$	1.4	2.1	$\text{m}\Omega$
		$T_j = 150\text{ °C}$	2.1	3.0	$\text{m}\Omega$
$V_{GE(th)}$	$V_{GE} = V_{CE}, I_C = 6.4\text{ mA}$	5	5.8	6.5	V
I_{CES}	$V_{GE} = 0\text{ V}$ $V_{CE} = 600\text{ V}$	$T_j = 25\text{ °C}$	0.1	0.3	mA
		$T_j = 150\text{ °C}$			mA
C_{ies}	$V_{CE} = 25\text{ V}$ $V_{GE} = 0\text{ V}$	$f = 1\text{ MHz}$	24.64		nF
C_{oes}		$f = 1\text{ MHz}$	1.54		nF
C_{res}		$f = 1\text{ MHz}$	0.73		nF
Q_G	$V_{GE} = -8\text{ V} \dots +15\text{ V}$		3200		nC
R_{Gint}	$T_j = 25\text{ °C}$		0.5		Ω
$t_{d(on)}$	$V_{CC} = 300\text{ V}$ $I_C = 400\text{ A}$	$T_j = 150\text{ °C}$	180		ns
t_r		$T_j = 150\text{ °C}$	80		ns
E_{on}	$R_{G on} = 3\text{ }\Omega$	$T_j = 150\text{ °C}$	8		mJ
$t_{d(off)}$	$R_{G off} = 5\text{ }\Omega$	$T_j = 150\text{ °C}$	950		ns
t_f	$di/dt_{on} = 5900\text{ A}/\mu\text{s}$ $di/dt_{off} = 6000\text{ A}/\mu\text{s}$	$T_j = 150\text{ °C}$	50		ns
		$T_j = 150\text{ °C}$	25		mJ
$R_{th(j-s)}$	per IGBT		0.186		K/W

SKiM406GD066HD



SKiM® 63

Trench IGBT Modules

SKiM406GD066HD

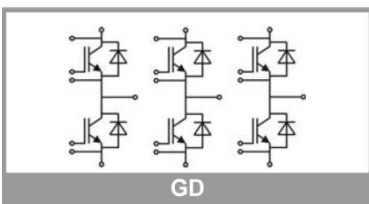
Features

- IGBT 3 Trench Gate Technology
- Solderless sinter technology
- $V_{CE(sat)}$ with positive temperature coefficient
- Low inductance case
- Isolated by Al_2O_3 DCB (Direct Copper Bonded) ceramic substrate
- Pressure contact technology for thermal contacts and electrical contacts
- High short circuit capability, self limiting to $6 \times I_C$
- Integrated temperature sensor

Typical Applications

- Automotive inverter
- High reliability AC inverter wind
- High reliability AC inverter drives

Characteristics						
Symbol	Conditions		min.	typ.	max.	Unit
Inverse diode						
$V_F = V_{EC}$	$I_F = 400\text{ A}$ $V_{GE} = 0\text{ V}$ chip	$T_j = 25\text{ °C}$		1.5	1.8	V
		$T_j = 150\text{ °C}$		1.6	1.8	V
V_{F0}		$T_j = 25\text{ °C}$		1	1.1	V
		$T_j = 150\text{ °C}$		0.85	0.95	V
r_F		$T_j = 25\text{ °C}$		1.3	1.7	mΩ
		$T_j = 150\text{ °C}$		1.8	2.2	mΩ
I_{RRM}	$I_F = 400\text{ A}$	$T_j = 150\text{ °C}$		350		A
Q_{rr}	$di/dt_{off} = 5900\text{ A/}\mu\text{s}$	$T_j = 150\text{ °C}$		49		μC
E_{rr}	$V_{GE} = -15\text{ V}$ $V_{CC} = 300\text{ V}$	$T_j = 150\text{ °C}$		12		mJ
$R_{th(j-s)}$	per diode				0.288	K/W
Module						
L_{CE}				9	13	nH
R_{CC+EE}	terminal-chip	$T_s = 25\text{ °C}$		0.3		mΩ
		$T_s = 125\text{ °C}$		0.5		mΩ
M_s	to heat sink (M4)		2.5		4	Nm
M_t		to terminals (M6)	3		5	Nm
						Nm
w					750	g
Temperature sensor						
R_{100}	$T_{Sensor} = 100\text{ °C}$ ($R_{25} = 5\text{ k}\Omega$)			339		Ω
$B_{100/125}$	$R_{(T)} = R_{100} \exp[B_{100/125}(1/T - 1/373)]$; $T[K]$;			4096		K



SKiM406GD066HD

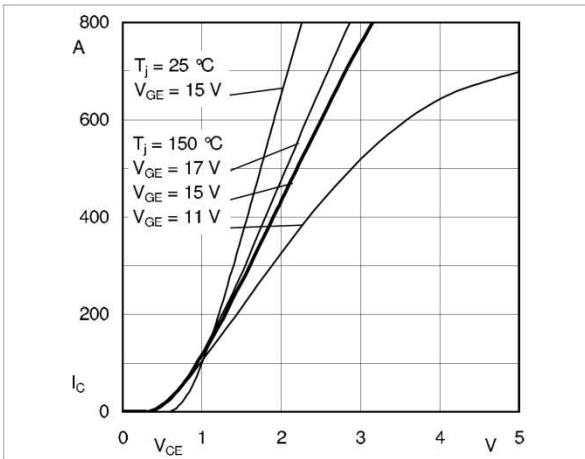


Fig. 1: Typ. output characteristic, inclusive R_{CC+EE}

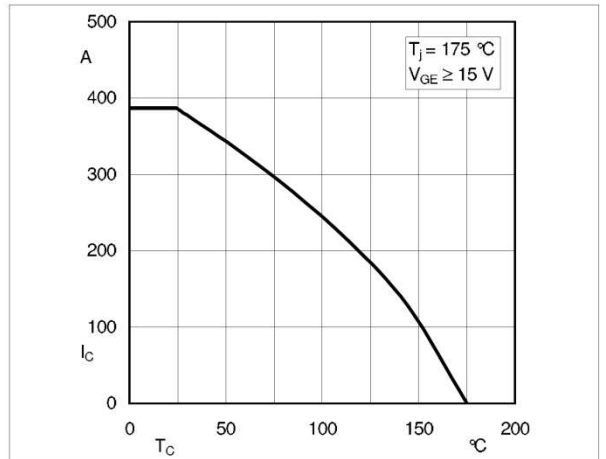


Fig. 2: Rated current vs. temperature $I_C = f(T_C)$

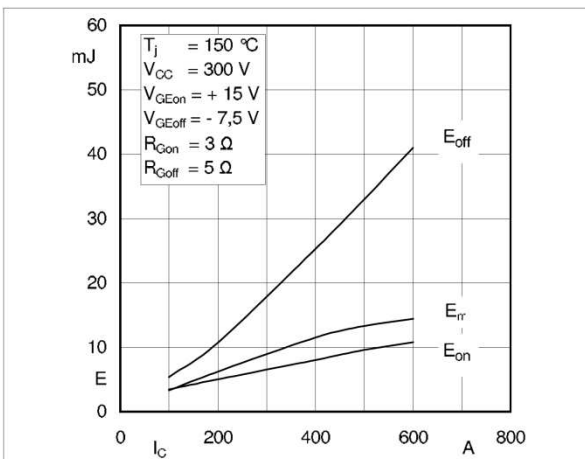


Fig. 3: Typ. turn-on /-off energy = $f(I_C)$

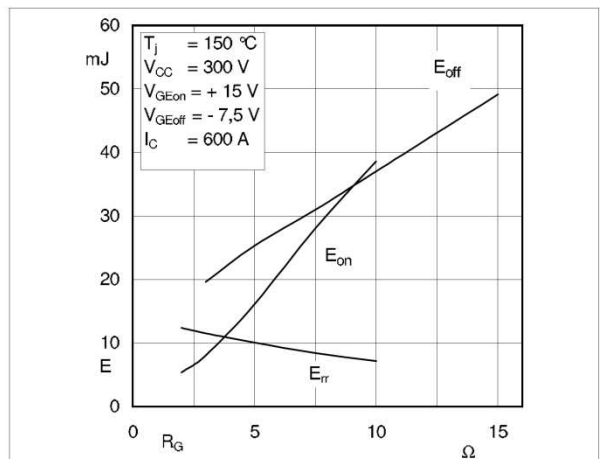


Fig. 4: Typ. turn-on /-off energy = $f(R_G)$

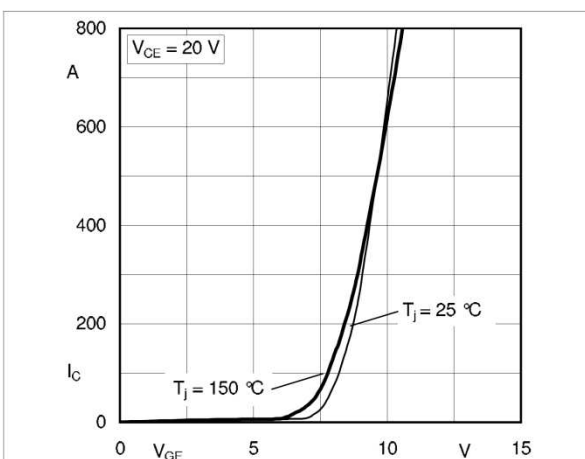


Fig. 5: Typ. transfer characteristic

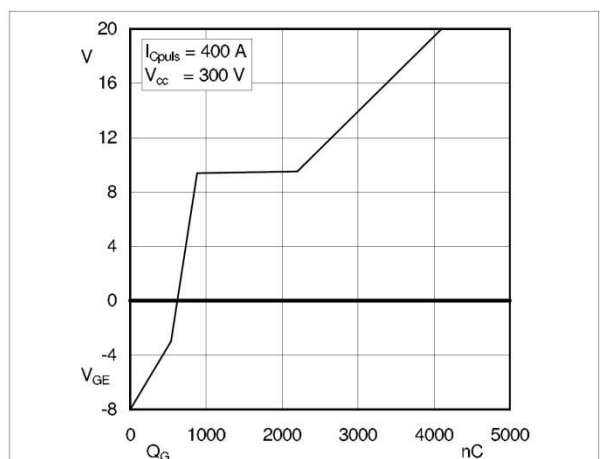


Fig. 6: Typ. gate charge characteristic

SKiM406GD066HD

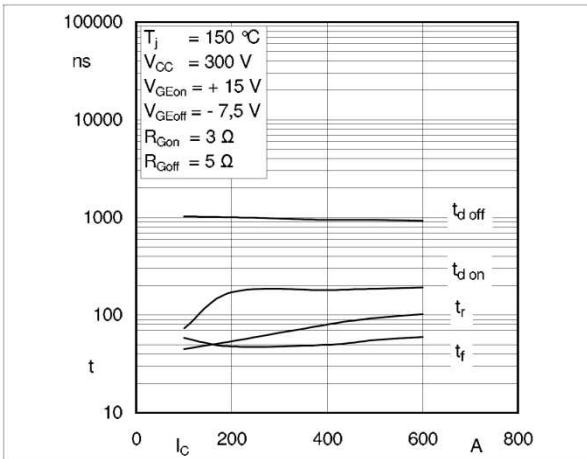


Fig. 7: Typ. switching times vs. I_C

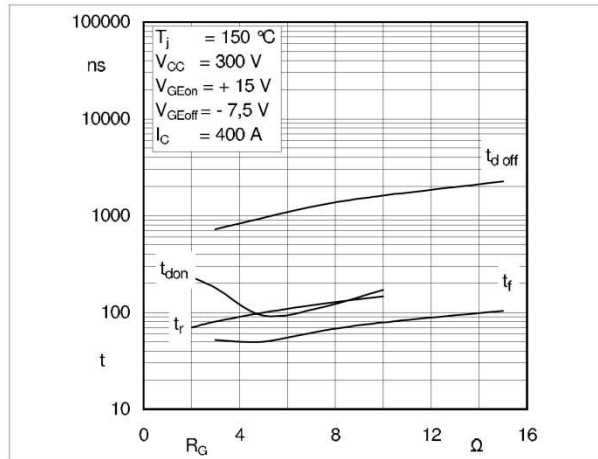


Fig. 8: Typ. switching times vs. gate resistor R_G

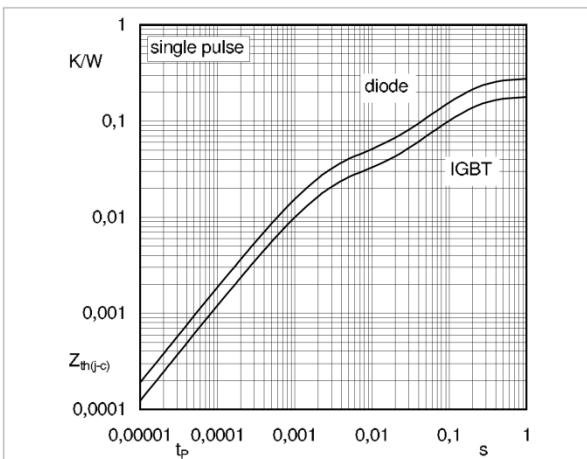


Fig. 9: Typ. transient thermal impedance

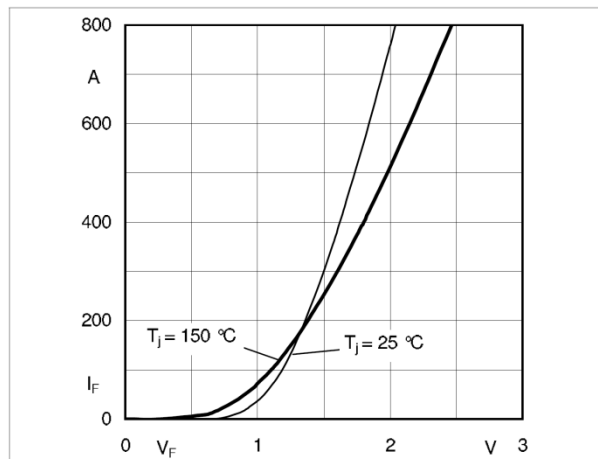


Fig. 10: Typ. CAL diode forward charact., incl. R_{CC+EE}

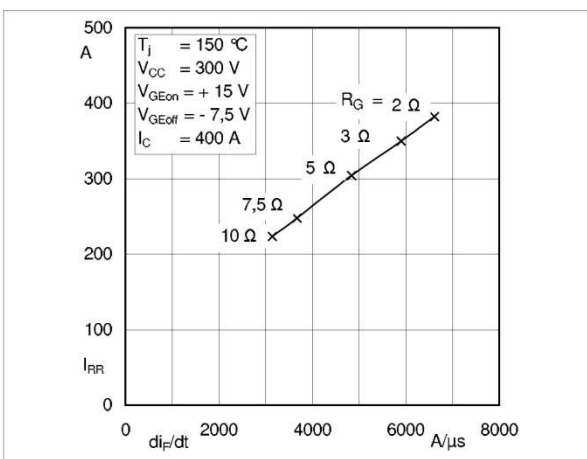


Fig. 11: Typ. CAL diode peak reverse recovery current

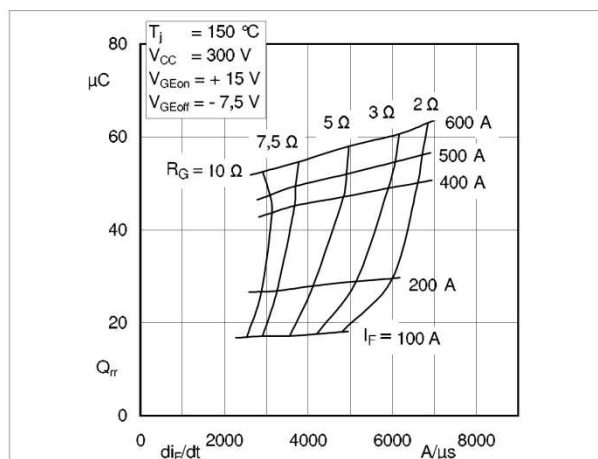
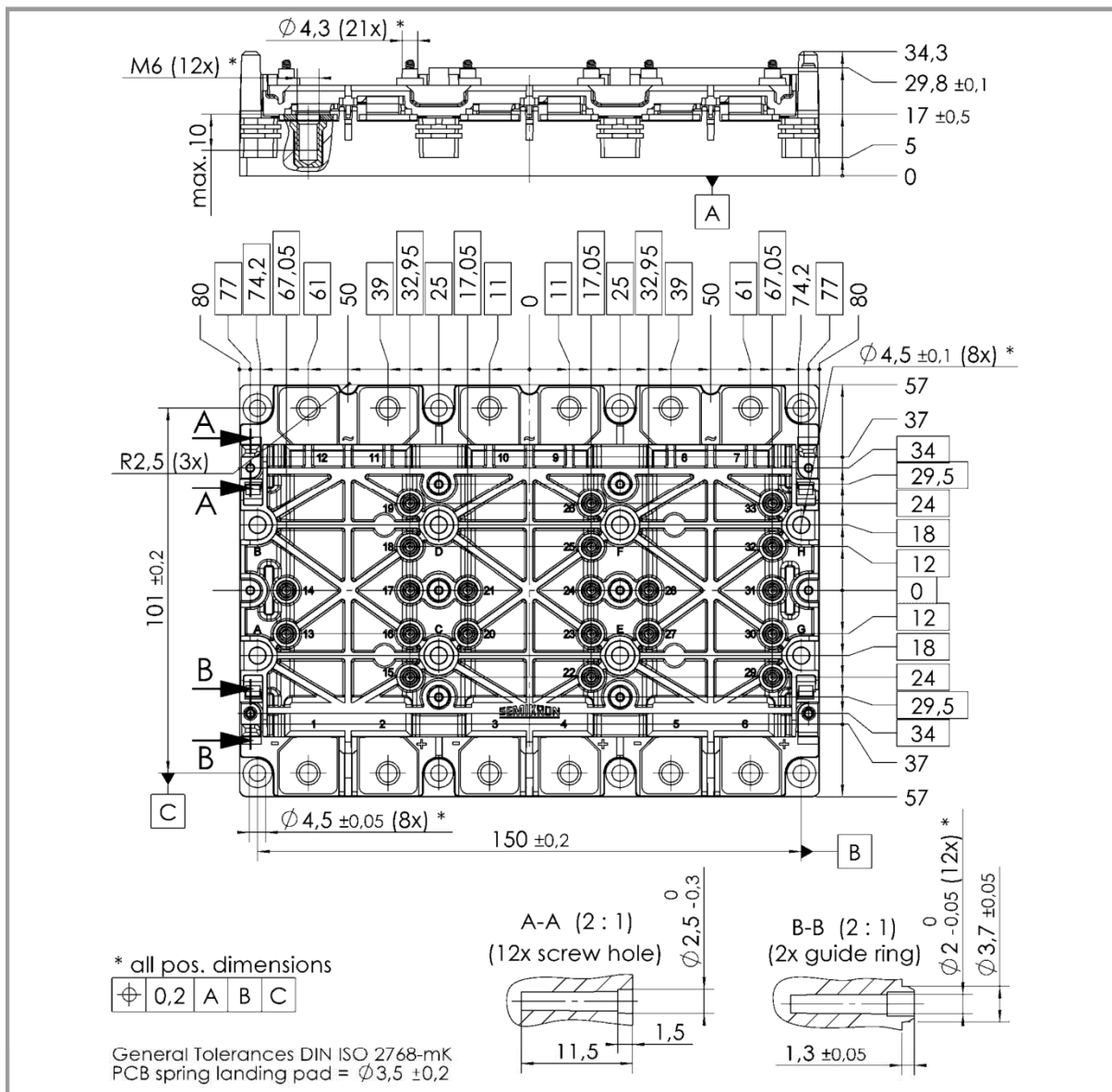
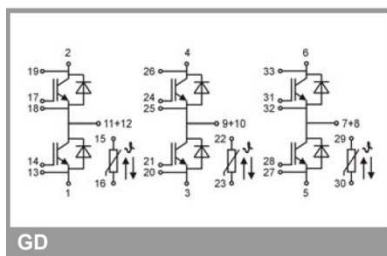


Fig. 12: Typ. CAL diode recovery charge

SKiM406GD066HD



SKiM® 63

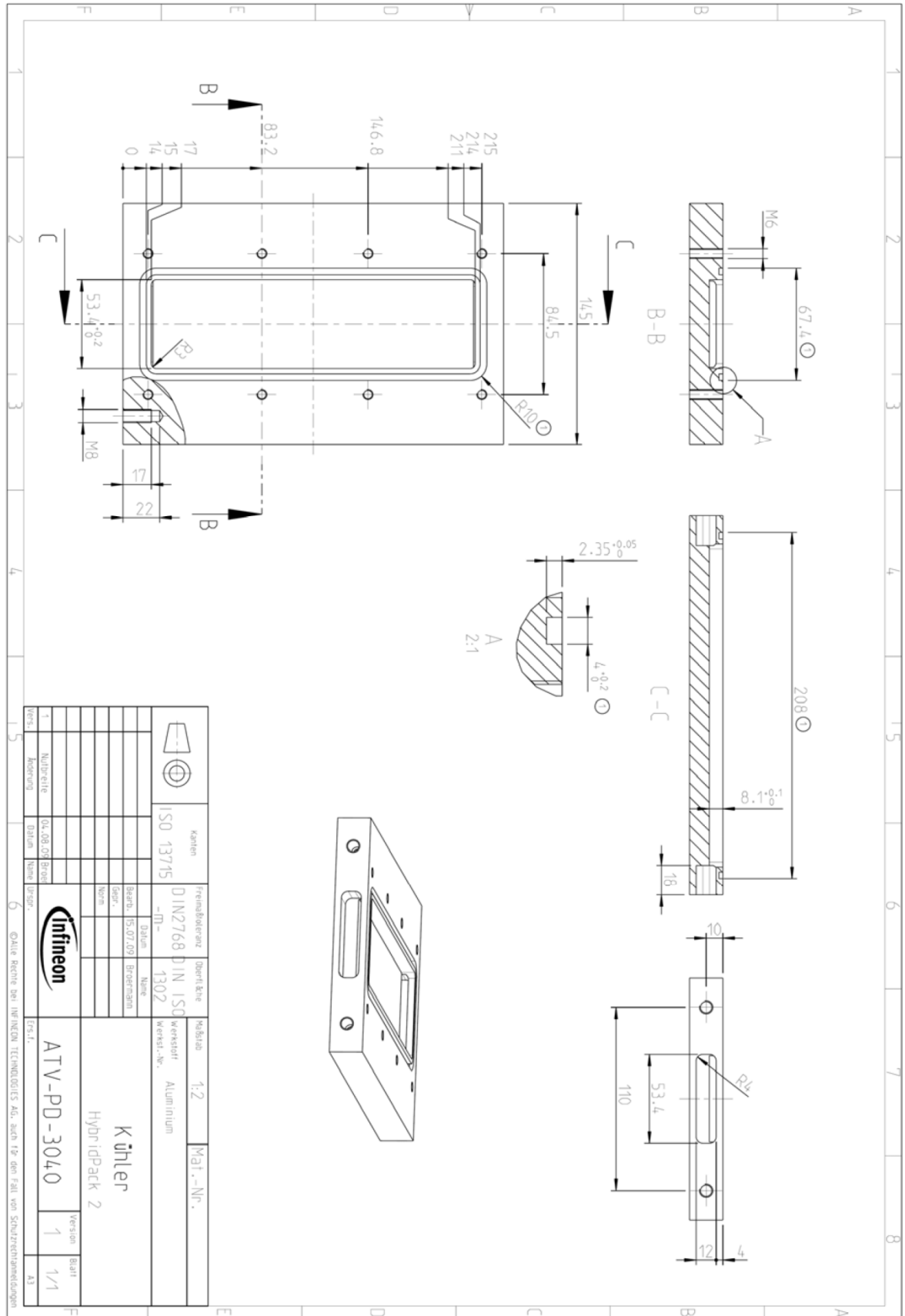


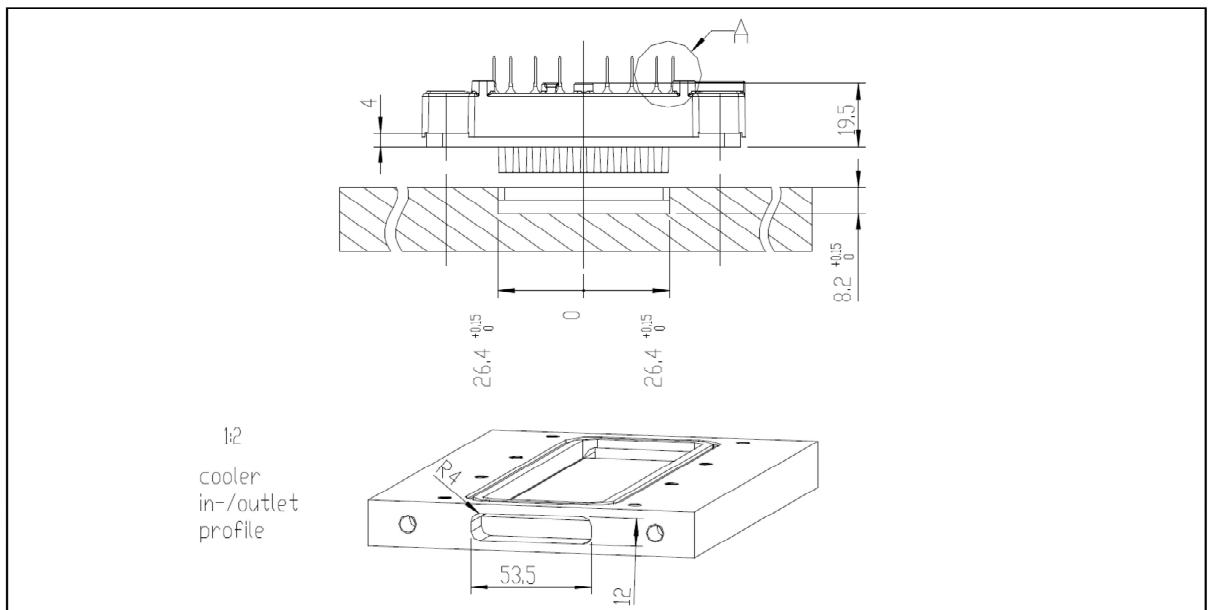
This is an electrostatic discharge sensitive device (ESDS), international standard IEC 60747-1, Chapter IX

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

7.2 Parametry chladičů

7.2.1 ATV-PD-3040 pro Hybridpack2





7.2.2 MQT1914 pro EconoDual3



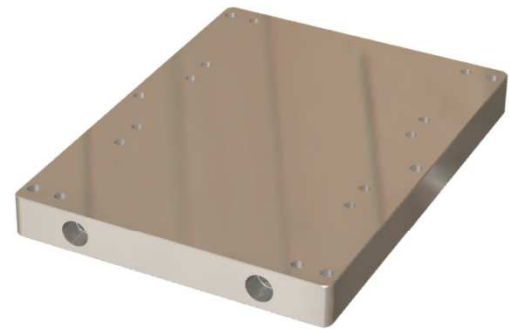
Liquid Cooled Cold Plate MQT1914

HIGH PERFORMANCE Thermal Management

Q-CHILL Internal Fin Technology

MQT1914 Liquid Cooled Cold Plate

The MQT1914 is a liquid cooled cold plate specifically designed for challenging power density applications requiring a compact and light-weight design. The advanced design of the MQT1914 allows for efficient heat transfer between the cold plate contact area and the power module base plate.



Applications

- Electric Vehicle Motor Drives
- Wind Turbines
- Solar Inverters
- Industrial Motor Controls
- Power Converters
- Induction Heaters
- Rail Traction Systems
- Auxilliary Vehicle Systems
- High Performance Motor Sport

Compatible Power Module Packages

This cold plate will cool any three of the following:

- SEMIKRON SEMiX® 3
- INFINEON EconoDUAL™ 3
- FUJI 122mm x 62mm Package
- POWEREX NX-M Package Modules



Features

- 3000 Watt heat rejection @ 8 LPM with a 24° C temperature rise from the fluid inlet to the maximum cold plate temperature
- Patent pending Q-CHILL internal fin technology provides for a more uniform top cold plate surface temperature
- Low pressure drop for reduced system cost (1.35 PSI @ 8 LPM)
- Low cost proven aluminum solution with performance comparable to copper based solutions
- Power Compact and light (1.35 kg)
- Compatible with industry accepted coolants
- Metallurgical seal for robustness and a high pressure rating

Corporate Headquarters
MaxQ Technology, LLC
8380 S. Kyrene Road, Suite 107
Tempe, AZ 85284
United States
(877) 804-0284

For Sales Information
sales@maxqtechnology.com
(877) 804-0284 Ext. 103

For Technical Support
tech@maxqtechnology.com
(877) 804-0284 Ext. 102

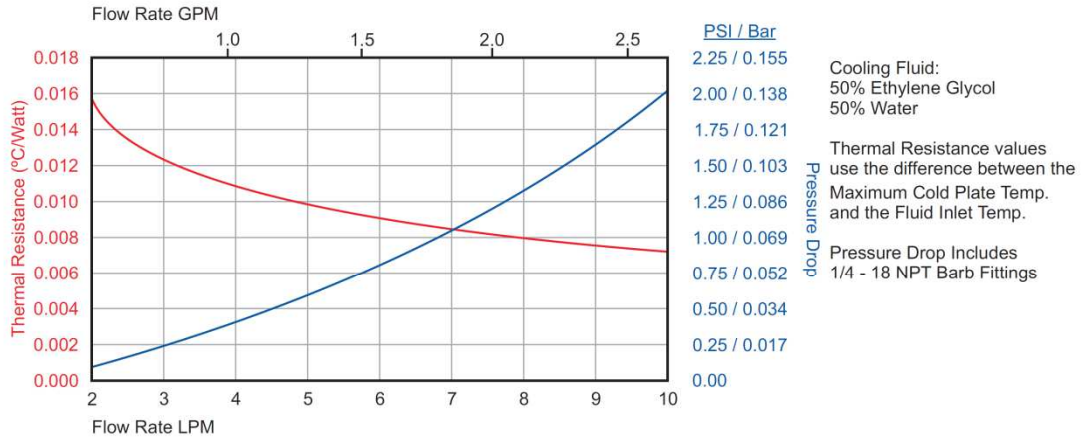
Please visit our website at www.maxqtechnology.com

Rev. 03/10

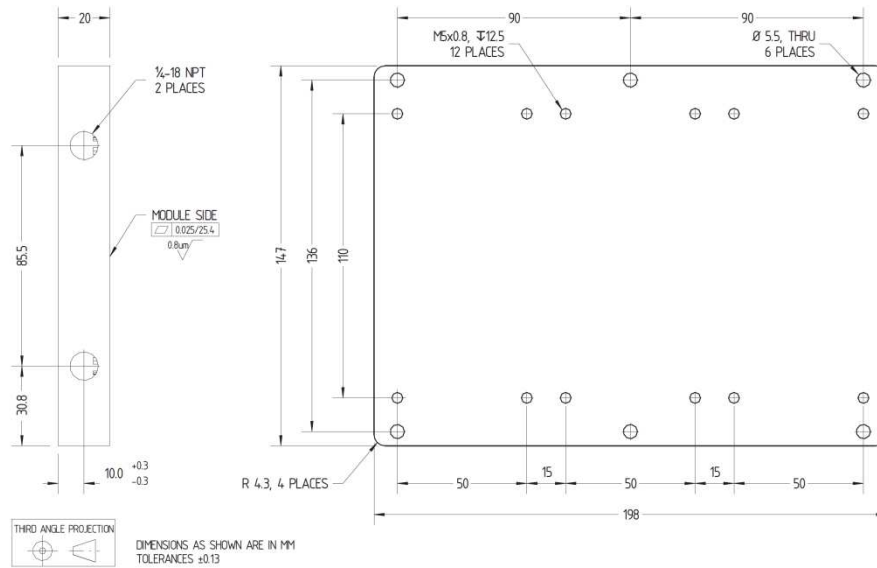


Liquid Cooled Cold Plate MQT1914

PERFORMANCE CURVES



MECHANICAL OUTLINE



Corporate Headquarters
 MaxQ Technology, LLC
 8380 S. Kyrene Road, Suite 107
 Tempe, AZ 85284
 United States
 (877) 804-0284

For Sales Information
 sales@maxqtechnology.com
 (877) 804-0284 Ext. 103

For Technical Support
 tech@maxqtechnology.com
 (877) 804-0284 Ext. 102

Please visit our website at www.maxqtechnology.com

Rev. 04/11

7.2.3 WK40/180 pro SKiM406GD066HD



For SKiiPPACK

Heatsinks for Water Cooling

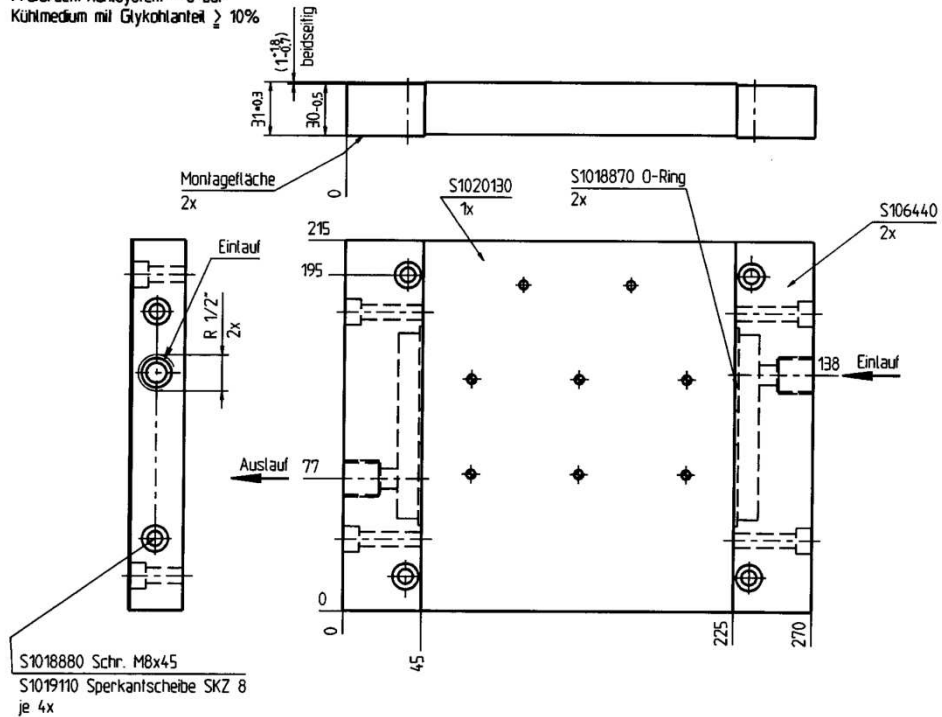
	For SKiiPPACK	R_{thjh} ²⁾	R_{thsw} ¹⁾	W ³⁾
• New Type		K/W	K/W	kg
• WK 40 / 180	2-fold	¹⁾	0,017	6,5
• WK 40 / 240	3-fold	¹⁾	0,016	8,3
• WK 40 / 300	4-fold	¹⁾	0,0115	10,2

WK 40 / 180
WK 40 / 240
WK 40 / 300

- ¹⁾ R_{thsw} = thermal resistance sensor-water at 8l / min H₂O
- ²⁾ Values R_i ; τ_i etc. and curves on request
- ³⁾ Weight with SKiiPPACK

WK 40 / 180 for SKiiPPACK 2-fold

Nenndruck/Kühlsystem = 3 bar
 Prüfdruck/Kühlsystem = 6 bar
 Kühlmedium mit Glykohlanteil $\geq 10\%$



Dimensions in mm

7.3 Parametry baterií

7.3.1 GAIA 42 Ah HE – 602040 LFP



Iron Phosphate - High Energy

PROTOTYPE Datasheet 42 Ah HE - 602040 LFP Lithium Ion Cell

IEC identification	IFR60/232
Physical and mechanical characteristics	
Diameter	60 ± 0.5 mm
Height	232 ± 1 mm (204 ± 1 mm without terminals)
Terminals	Positive terminal Al M12 L: 14 mm Negative terminal Cu M12 L: 14 mm
Weight	approx. 1450 g
Volume without terminals	0.58 l
Case material	Stainless Steel
Chemical characteristics	
Positive electrode	LiFePO ₄
Negative electrode	graphite
Electrical characteristics*	
Nominal voltage	3.2 V
Nominal capacity at 0.2 C	42 Ah
Minimum capacity	36 Ah
AC Impedance (1 kHz)	< 2 mΩ
Specific energy at 0.2 C	93 Wh/kg
Energy density at 0.2 C	233 Wh/l
Specific power (10 s pulse discharge @ 15 C/ 90% SOC)	1300 W/kg
Power density (10 s pulse discharge @ 15 C/ 90% SOC)	3270 W/l
Operating conditions*	
Recommended charge method	Constant current - constant voltage
Maximum charge voltage	3.8 V
Recommended charge current	21 A (0.5 C)
Maximum charge current	160 A (3.8 C)
Maximum pulse charge current (10 s)	250 A (6 C)
Recommended voltage limit for discharge	2.5 V
Lower voltage limit for discharge	2 V
Lower voltage limit for pulse discharge	1.5 V
Recommended discharge current	up to 21 A (0.5 C)
Maximum discharge current	160 A (3.8 C)
Maximum pulse discharge current (10 s)	630 A (15 C)
Operating temperature	- 30°C to + 60°C
Recommended charge temperature	0°C to + 40°C
Storage and transport temperature	- 40°C to + 60°C
Cycle life at 20°C and 100% DOD (0.5 C charge; 0.5 C discharge)	> 500 cycles to 80% nominal capacity > 2000 cycles to 60% nominal capacity

* Reference temperature 20°C

Doc 602040 LFP - 2008-08

Data in this document are subject to change without notice and become contractual only after written confirmation by GAIA



GAIA Akkumulatorenwerke GmbH
Montaniastr. 17
99734 Nordhausen, Germany
www.gaia-akku.com



Lithium Technology Corporation
5115 Campus Drive
Plymouth Meeting, PA 19462
www.lithiumtech.com

7.3.2 ThunderSky TS-LFP200AHA

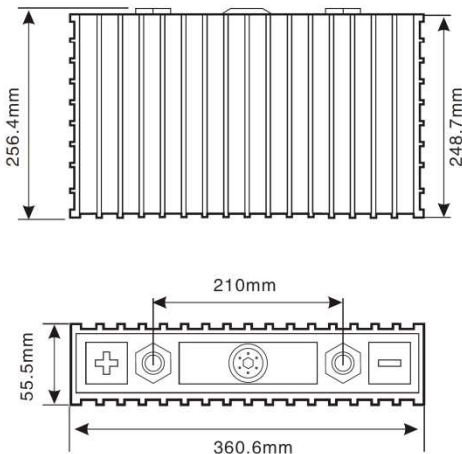


雷天牌鋰離子動力電池技術說明 THUNDER SKY LITHIUM-ION POWER BATTERY SPECIFICATIONS

單體電池尺寸 DIMENSIONS



型號(MODEL): TS-LFP200AHA

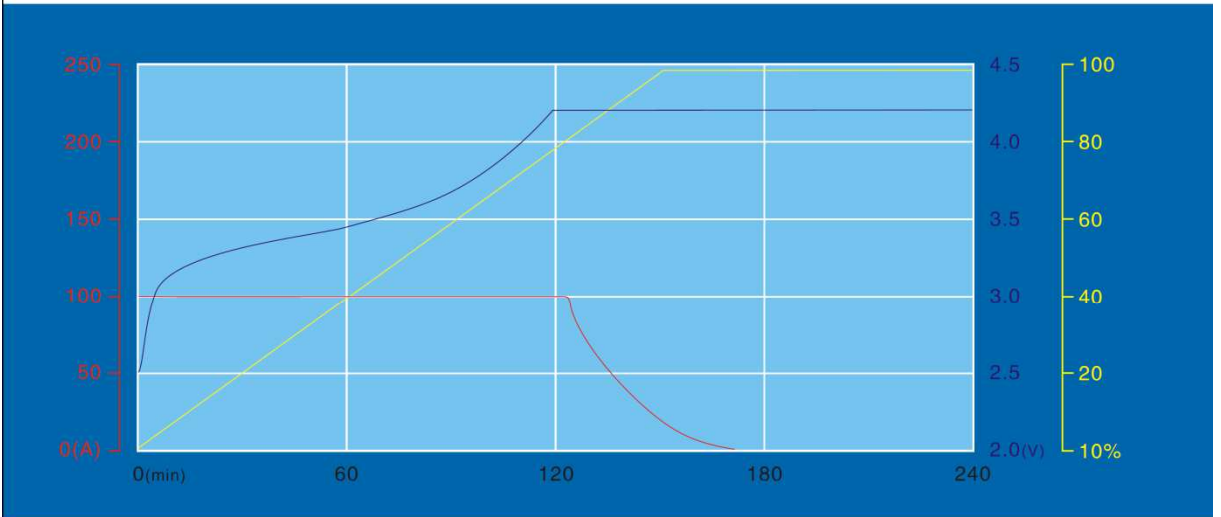


技術參數 SPECIFICATIONS

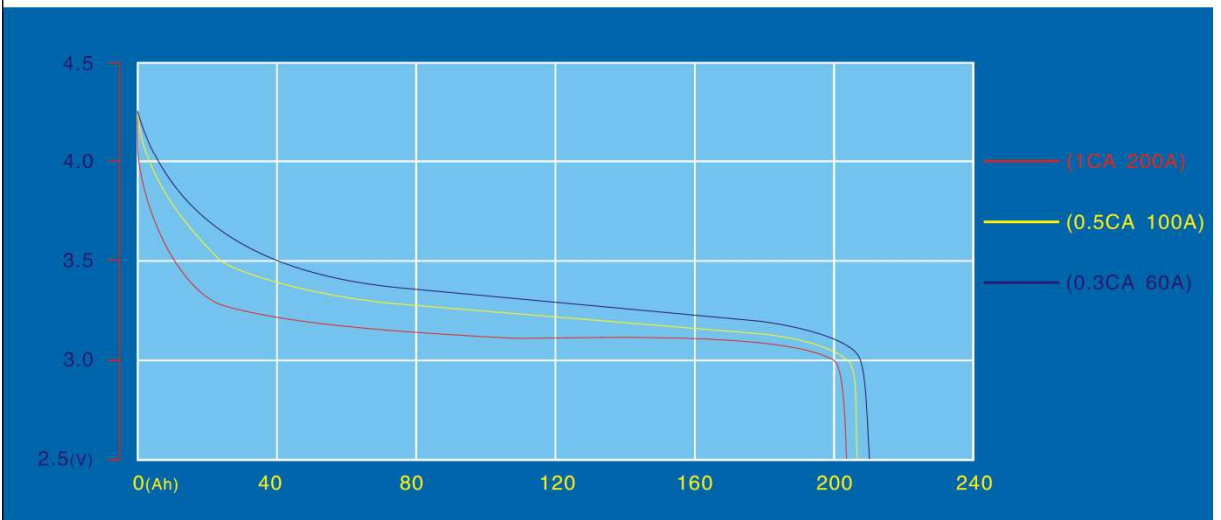
型號(MODEL): TS-LFP200AHA

標稱容量 Nominal Capacity	200Ah	
工作電壓 Operation Voltage	充電 (Charge)	4.25V
	放電 (Discharge)	2.5V
最大充電電流 Max Charge Current	≤2CA	
最大放電電流 Max Discharge Current	恒電流 (Constant Current)	≤ 2CA
	脈衝式 (Impulse Current)	≤10CA
標準充放電電流 Standard Charge/Discharge Current	0.5CA	
循環壽命 Cycle Life	(80DOD%)	≥3000Times
	(70DOD%)	≥4000Times
殼體耐溫性 Temperature Durability Of Case	≤200°C	
適應環境 Operating Temperature	充電 (Charge)	-25°C~75°C
	放電 (Discharge)	-25°C~75°C
自放電率(月) Self-discharge Rate	≤3% (Monthly)	
單體電池重量 Weight	8kg ± 100g	

TS-LFP200AHA型電池的充放電特性
TS-LFP200AHA CHARGE & DISCHARGE CHART



TS-LFP200AHA在25°C環境下的充電特性
TS-LFP200AHA CHARGE AT TEMPERATURE OF 25°C



TS-LFP200AHA在25°C環境下的放電特性
TS-LFP200AHA DISCHARGE AT TEMPERATURE OF 25°C

7.3.3 Valence U-Charge XP (U1-12XP, U24-12XP, U27-12XP, UEV-18XP, U27-36)



U-Charge® XP Battery Modules

U-Charge® XP is a range of 12, 18 & 36 volt Lithium Iron Magnesium Phosphate battery modules, offering intrinsic safety with twice the run-time and less than half the weight of similar sized lead-acid battery modules.

Overview

U-Charge® XP modules are ideal when Advanced Energy Systems are required. Excellent float and cycle life with zero maintenance offers end-users significant cost of ownership savings and complete peace of mind, through safety inherent in Valence Lithium Phosphate chemistry. Tens of thousand U-Charge® systems have been deployed in a range of equipment since 2002.

The U-Charge® XP Battery Management System is also designed to offer excellent command and control functionality (including remote monitoring) when coupled with U-Charge® XP Battery Modules.

Valence monitoring and diagnostic kits are also available enabling system data recording and detailed performance status indicators.



Features

- + 2800 cycles at 100% DOD
- + Exceptional voltage stability
- + Standard voltage range from 12V - 700V
- + Maintenance free
- + Inter module balancing
- + Can be charged using most standard lead-acid chargers
- + Communication of monitored data via Battery Management System (BMS)
- + Rugged mechanical design
- + Flame retardant plastics
- + LED battery status indicator
- + Carrying Straps (U24, U27, UEV)
- + Manufactured in standard BCI sizes

Specifications	U1-12XP	U24-12XP	U27-12XP	UEV-18XP	U27-36 XP	
Nominal Module Voltage	12.8 V	12.8 V	12.8 V	19.2 V	38.4 V	
Nominal Capacity (C/5, 23°C)	40 Ah	110 Ah	138 Ah	69 Ah	45Ah	
Weight (approximate) kg	6.5 kg	15.8 kg	19.5 kg	14.9 kg	19.6 kg	
Weight (approximate) lbs	14.3 lbs	34.8 lbs	42.9 lbs	32.8 lbs	43.1 lbs	
Dimension incl. Terminals LxWxH (mm)	197 x 131 x 182	260 x 172 x 225	306 x 172 x 225	269 x 148 x 245	306 x 172 x 225	
Dimension incl. Terminals LxWxH (inches)	7.76 x 5.12 x 7.17	10.2 x 6.77 x 8.86	12.0 x 6.77 x 8.86	10.6 x 5.83 x 9.65	12.0 x 6.77 x 8.86	
BCI Group Number	U1R	Group 24	Group 27	N/A	Group 27	
Terminals, Female-Threaded	M6 x 1.0	M8 x 1.25	M8 x 1.25	M8 x 1.25	M8 x 1.25	
Specific Energy	79 Wh/kg	89 Wh/kg	91 Wh/kg	89 Wh/kg	91 Wh/kg	
Energy Density	110 Wh/l	139 Wh/l	148 Wh/l	124 Wh/l	148 Wh/l	
Standard Discharging @ 25°C	Max. Continuous Load Current	80 A	150 A	150 A	120 A	90 A
	Peak Load Current (30 sec).	120 A	300 A	300 A	200 A	135 A
	Cut-off Voltage	10 V	10 V	10 V	15 V	30 V
Standard Charging	Max. Charge Voltage	14.6 V	14.6 V	14.6 V	21.9 V	43.8 V
	Float Voltage	13.8 V	13.8 V	13.8 V	20.7 V	41.4 V
	Recommended Current C/2	20A	55A	70A	35A	23A
Charge Time C/2 *	2.5 hrs	2.5 hrs	2.5 hrs	2.5 hrs	2.5 hrs	
DC internal resistance (max)	15 mΩ	6 mΩ	5 mΩ	10 mΩ	25 mΩ	
Equivalent Lithium Content Per Module (g)	48.6	127.98	160.38	121.5	160.38	
Part Number	1004434	1004425	1004428	1004431	1005199	

www.valence.com

* Charging under recommended conditions



Common specifications	
Discharge temperature	-10°C to 50°C
Charge temperature	0°C to 45°C
Storage temperature	-40°C to 50°C
Operating humidity	5% to 95%, non-condensing
Water/dust resistance	IP56
Shock and vibration	IEC62133, DIN VG96 924
Certifications	FCC Class B, CE, IEC 62133, UL1642 (cells only)
Shipping Classification	UN 3480, Class 9

Accessories

The Battery Management System maintains battery to battery balance control, direct control capability for up to four contactors, and monitoring and control of data systems.

- + U-BMS-LV operates at 10V - 150V
- + U-BMS-HV operates at 100V - 450V
- + U-BMS-SHV operates at 350V - 700V

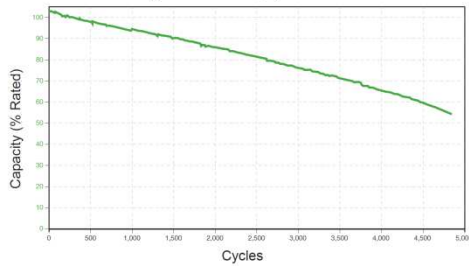


For further information:

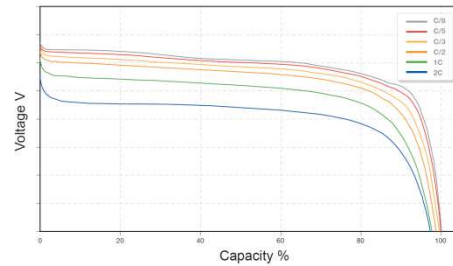
Please refer to separate datasheet on U-BMS products or visit www.valence.com

U-Charge XP® Battery Module data

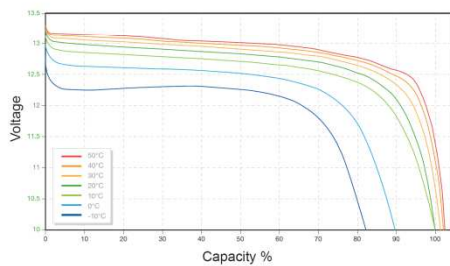
U-Charge® Discharge Capacity Performance at 23°C
Charged CC 20A to 14.6V, CV @14.6 to 1A
Discharged 20A to 10.5V; Cycled 42 Months



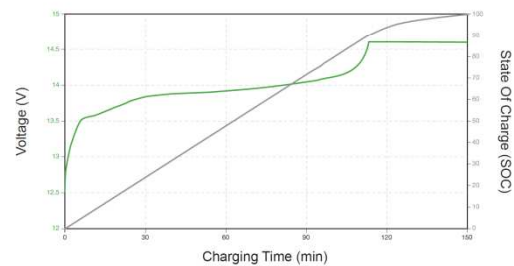
U-Charge® Voltage Profiles at Various Rates
23°C Ambient Temperature



U-Charge® Discharge Voltage Profiles at C/2 Discharge Rate
Various Ambient Temperatures



Typical U-Charge® C/2 Charging Voltage and SOC Profiles
23°C Ambient Temperature



**Corporate Headquarters
North America Sales**

12303 Technology Blvd.
Suite 950
Austin, Texas 78727
USA

Tel (888) VALENCE or +1 (512) 527-2900
Fax +1 (512) 527-2910
Email sales@valence.com

**EMEA
Sales**

Unit 63 Mallusk Enterprise Park
Mallusk Co.Antrim
Northern Ireland
BT36 4GN

Tel +44(0) 28 9084 5400
Fax +44(0) 28 9083 8912
Email sales@valence.com

Performance may vary depending on, but not limited to cell usage and application. If cell is used outside specifications, performance will diminish. All specifications are subject to change without notice. All information provided herein is believed, but not guaranteed, to be current and accurate. Copyright © 2005-2012 Valence Technology, Inc.

Tell us about your application at: www.valence.com

Aug 2012
XP Datasheet

7.3.4 SAFT VLE 22-42, VLE 11-84

High energy lithium-ion module VLE Module

Saft VL modules include the latest improvements regarding cells, housing, connections and electronic devices for safety, cycle and calendar life, reliability and cost. VL modules are available in high energy VLE, medium power VLM and high power VLP versions.

Saft VLE technology is suited to any very high energy demanding application that requires a storage system with drastically reduced weight and volume. VLE module is made up of six high energy VL45E cells that can be connected in two different configurations: six cells in series or three sets in series of two cells in parallel.

Features

- Very high specific energy
- Light and compact
- Maintenance free
- Excellent cycle and calendar life
- Integrated liquid cooling
- Easy integration into customized battery systems

Applications

- Electric and hybrid vehicles
- Telecommunication networks
- Stationary
- Space and defence

Technology

- Nickel oxide-based cathode
- Graphite based anode
- Plastic housing
- Bus-bar connection technology
- Integrated electronic circuits for cells management and protection to be monitored by external Battery Management System

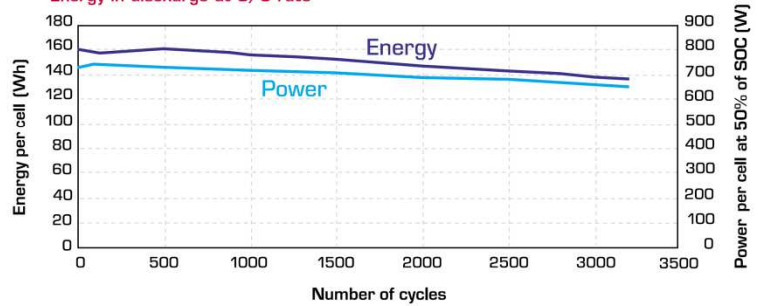


	VLE 22-42	VLE 11-84
Electrical characteristics		
Nominal voltage (V)	21.6	10.8
Minimum capacity at c/3 after charge to 4.0 V/cell (Ah)	42	84
Specific energy (Wh/kg)	110	111
Energy density (Wh/dm ³)	158	158
Specific power (30s peak/50% DOD) (W/kg)	533	533
Power density (30s peak/50% DOD) (W/dm ³)	753	753
Mechanical characteristics		
Height (mm)	242	242
Width (mm)	190	190
Length (mm)	123	124
Typical weight (kg)	8	8
Volume (dm ³)	5.66	5.66
Voltage limits		
Charge (V)	4.0 (4.1 for peak)/cell	
Discharge (V)	2.7 (2.3 for peak)/cell	
Current limits		
Max continuous current (A)	100	200
Max 30s peak current (A)	250	500

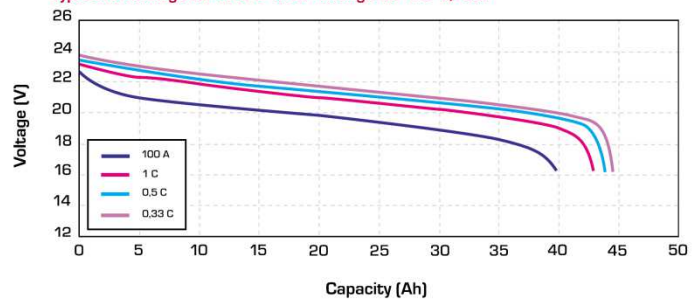


High energy Li-ion VLE module

Cycling life in DST profil at 80% of DOD at +20°C.
Energy in discharge at C/3 rate



Typical discharge at +20°C after change to 4.0 V/cell



Saft
Communication Department
 12, rue Sadi Carnot
 93170 Bagnolet - France
 Phone: +33 (0)1 49 93 19 18
 Fax: +33 (0)1 49 93 19 68

www.saftbatteries.com

DOC N° 54039-2-0305

Edition: March 2005

Data in this document are subject to change without notice and become contractual only after written confirmation by Saft.

Photo credit: Studioland

Société anonyme au capital de 31 944 000 €

RCS Bobigny B 383 703 873

Prepared by PACIFIC & co.

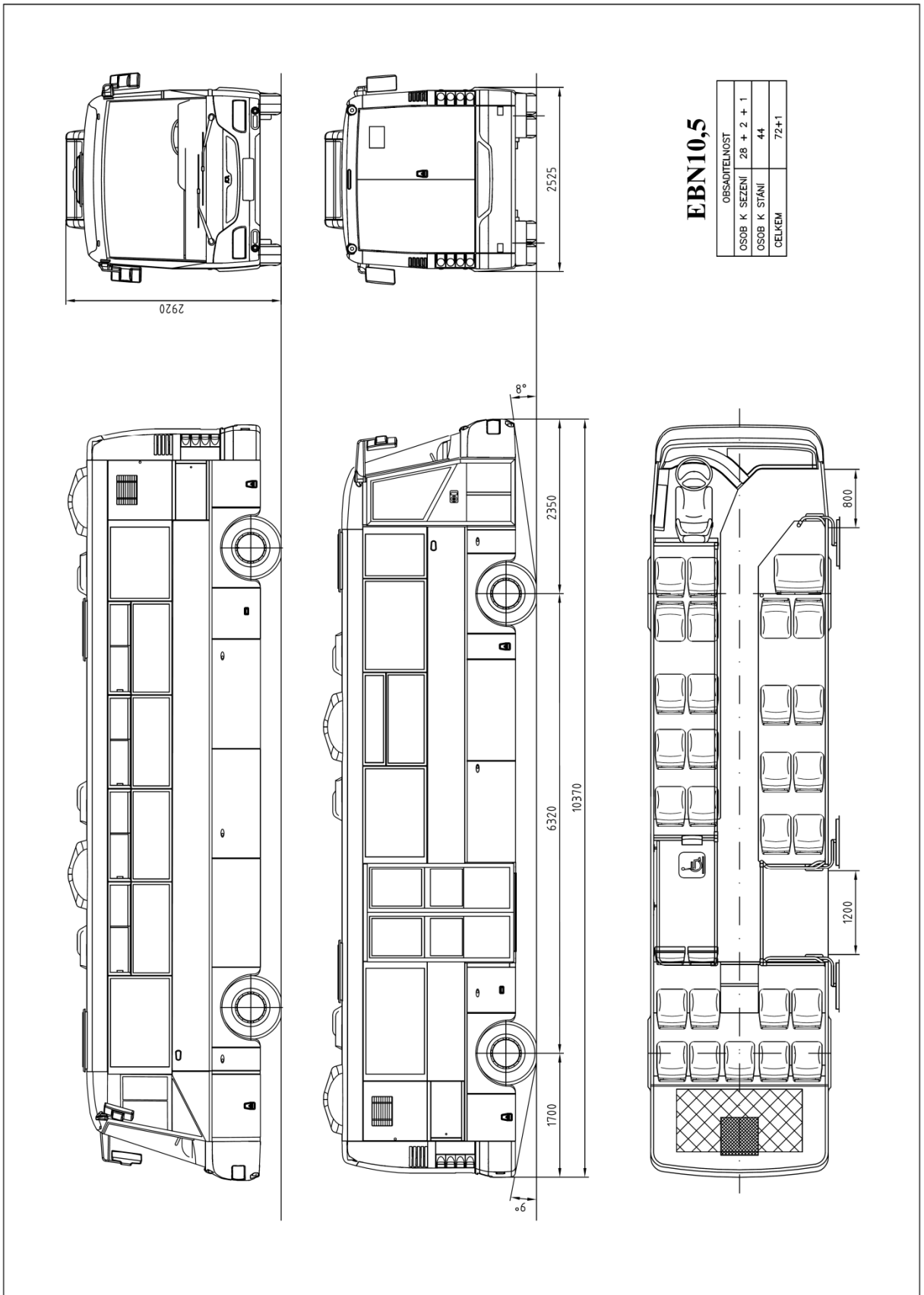


7.4 Parametry busů

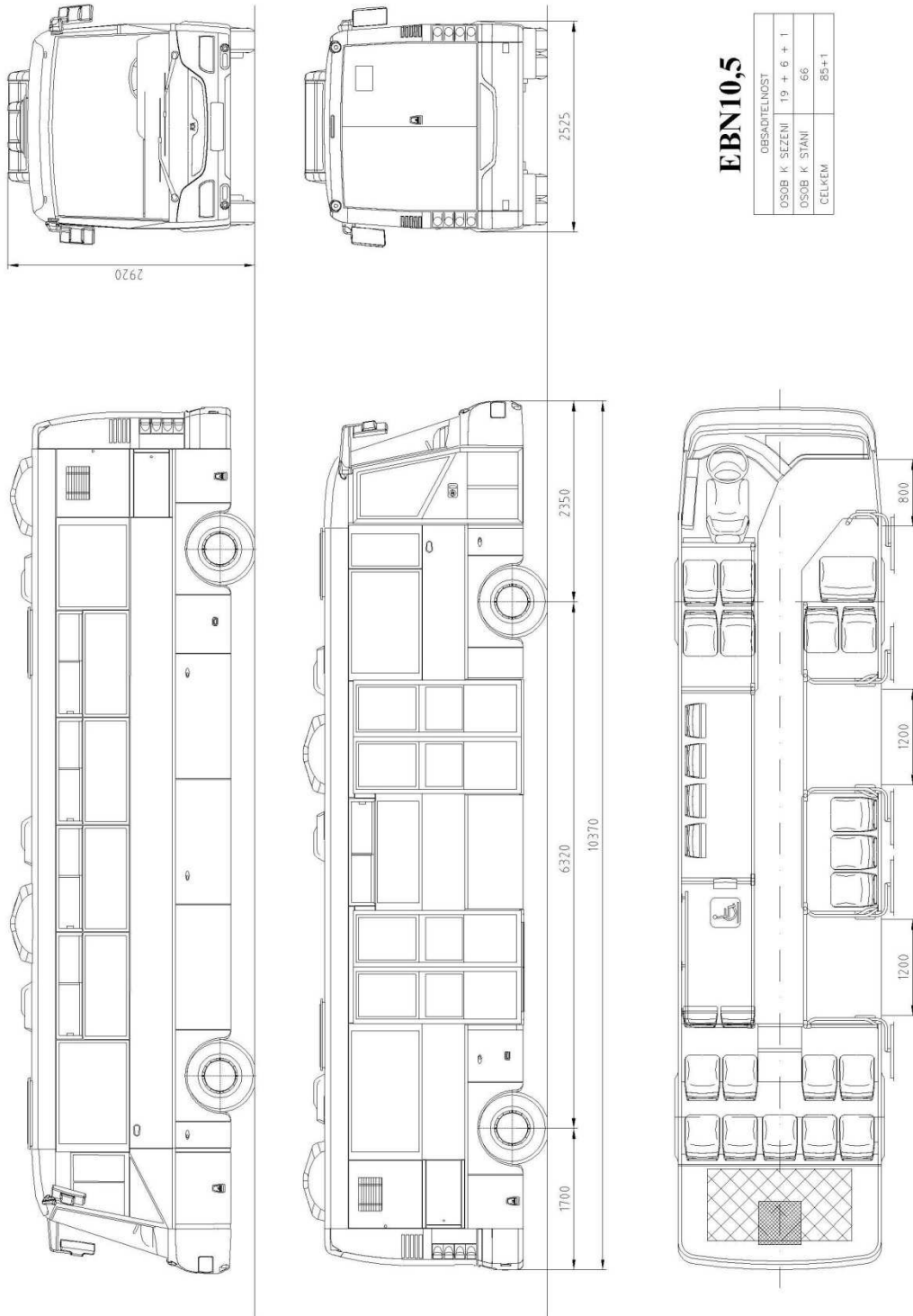
7.4.1 SOR EBN 10,5 (2 a 3 dveřový), SOR EBN 8

typ	městský elektrobus		EBN 10,5 třídveřové 1 - 2 - 2	EBN 10,5 dvoudveřové 1 - 2	EBN 8 dvoudveřové 1 - 2
rozměry	délka	mm	10 370	10 370	8 000
	šířka	mm	2 525	2 525	2 525
	výška	mm	2 920	2 920	2 920
	rozvor náprav	mm	6 320	6 320	3 950
	přední převis	mm	2 350	2 350	2 350
	zadní převis	mm	1700	1700	1700
	karoserie	počet dveří		3	2
šířka předních dveří		mm	800	800	800
šířka středních dveří		mm	1200	-	-
šířka zadních dveří		mm	1200	1200	1200
nástupní výška		mm	320	320	320
výška podlahy vpředu		mm	360	360	360
výška podlahy vzadu		mm	800	800	800
hmotnost	provozní	kg	9 800	10 000	9 100
	celková	kg	15 700	15 000	12 700
	maximální techn. přípustná	kg	16 500	16 500	16 500
obsaditelnost	k sezení		19 (+6) +1	28 (+2) +1	16 (+2) +1
	k stání		66	44	35
	celkem		85 + 1	72 + 1	51 + 1
vlastnosti	konstr. rychlost	km/h	80	80	80
	spotřeba	kWh/km	0,8 ÷ 1,0	0,8 ÷ 1,0	0,7 ÷ 0,9
	dojezd (2÷3 zastávky na km)	km	130 ÷ 150	130 ÷ 150	150 ÷ 180
	dojezd prázdného vozu	km	250	290	300
	vnější obrysový poloměr	mm	12 000	12 000	9 000
	nájezdový úhel vpředu	°	9	9	9
nájezdový úhel vzadu	°	12	12	12	
elektromotor	asynchronní, šestipolový		špičkový výkon 180 kW/400 V AC, trvalý výkon 120 kW/400 V AC		
retardér			elektrická brzda s rekuperací energie		
trakční akumulátory	Litium - iontové (LiFeYPO4)		2,5÷4,25 V/300Ah - 180 ks, Winston Battery		
trakční systém	Cegelec				
přední náprava	SOR BN 004		nezávislé zavěšení		
zadní náprava	DANA		tuhá, jednostupňová, hypoidní, i=6,5		
pérování	pneumatické ovládání		vlnovcové pružiny, vpředu 2 / vzadu 4		
	ovládání		elektronické, Wabco ECAS		
tlumiče	Brano		kapalinové, vpředu 2 / vzadu 4		
kola	pneumatiky		285 / 70- R19,5		
	disk		19,5x7,5"		
brzdy	Knorr SN 6xxx		kotoučové, vzduchem ovládané		
EBS	Wabco		systém 4S/4M		
řízení	RBL C 500V		hydraulické monoblokové		
nezávislé topení	Eberspaecher Hydronic 24		naftové, výkon 24 kW		
elektroinstalace	standardní		elektrická výbava vozu		
	CAN-bus SAE 1939		komunikace elektronických systémů vozu		
akumulátory	Varta		24V / 170 Ah		
výbava na přání	- klimatizace řidiče - informační a odbavovací systém dle specifikace zákazníka				

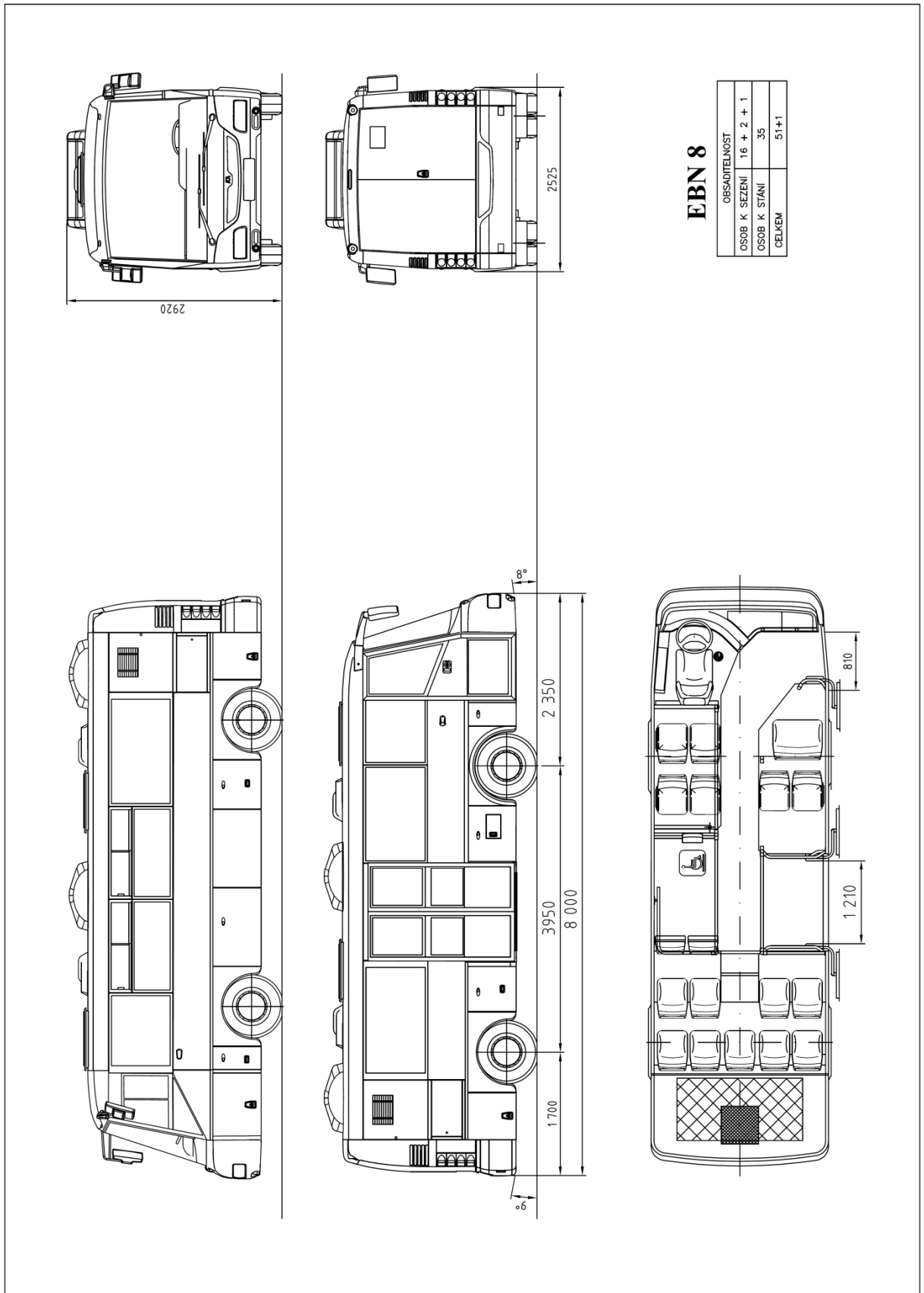
7.4.2 Technický náčrt SOR EBN 10,5 – Dvoudveřový



7.4.3 Technický nákres SOR EBN – Třídveřový



7.4.4 Technický nákres SOR EBN 8



7.5 Postupy v simulačních programech

7.5.1 Tepelná simulace v aplikaci IPOSIM (pro modul Econodual™3 vztažený na zadání diplomové práce)

Napřed vybereme druh měniče.

The screenshot shows the IPOSIM software interface. At the top, there is a navigation bar with tabs: Topology, Inputs, Device Selection, Application Data, Results, and Save Designs. Below the navigation bar, the user is logged in as 'Hello: Richard Titz' with links for Logout, Feedback, and Help/Support. The main area displays the 'IPOSIM Infineon Power Module Selector and Simulator' logo. Underneath, there are several application categories with expandable options:

- AC/DC Applications**
 - Single phase
 - B2U - Two-pulse bridge uncontrolled
 - B2C - Two pulse bridge fully controlled
 - Three phase
 - B6U - Six-pulse bridge uncontrolled
 - B6C - Six-pulse bridge fully controlled
 - M3.2U - Double three-pulse star uncontrolled
 - M3.2C - Double three-pulse star fully controlled
 - M6U Six-pulse star uncontrolled
 - M6C Six-pulse star fully controlled
- AC/AC Applications**
 - Single Phase
 - W1C phase control
 - Three Phase
 - W3C phase control
- DC/DC Applications**
 - Boost
 - Buck
- DC/AC Applications**
 - Single Phase
 - Three Phase - 2 Level (highlighted with a red box)
 - Three Phase - 2 Level (Stack solution)
 - Three Phase - 3 Level

Poté zadáme parametry měniče.

The screenshot shows the 'DC/AC - Three Phase - 2 Level > Circuit & Control Parameters' configuration screen. The 'Control Algorithm' is set to 'Sine-Triangle'. The parameters are as follows:

DC Link Voltage	300	V
Blocking Voltage	600	V
Output Current RMS	220	A
Output Frequency	50	Hz
Switching Frequency	4000	Hz
Modulation Index	0.73	
Power Factor cos(φ)	0.87	
Do you want to define a Load Cycle?	<input checked="" type="checkbox"/>	

At the bottom of the parameter list is a 'Next' button. To the right of the parameter list is a circuit diagram of a three-phase, two-level voltage source inverter. The diagram shows three legs, each with an IGBT (labeled I1/D1, I2/D2, and I3/D3) and an anti-parallel diode. The DC link voltage is labeled V_{DC} , and the output current and voltage are labeled I_{out} and V_{out} respectively.

Poté zvolíme z nabídky vhodný modul.

Topology Inputs **Device Selection** Application Data Results Save Designs

DC/AC - Three Phase - 2 Level > Module Selection Hello: Richard Titz | [Logout](#) | [Feedback](#) | [Help/Support](#)

Cooling Method:
 Cooling Conditions:
 Ambient Temperature: °C

DC/AC - Three Phase - 2 Level > Module Selection Hello: Richard Titz | [Logout](#) | [Feedback](#) | [Help/Support](#)

Cooling Method:
 Cooling Conditions:
 Ambient Temperature: °C

Select Up To Five Modules

	Device Name	Package	MODULE PARAMETERS			IGBT PARAMETERS			DIODE PARAMETERS			Data Sheet
			V _{CEsat} [V]	I _{cnom} [A]	T _{vjmax} [°C]	V _{CEsat,25°C} [V]	E _{on} +E _{off,125°C} [mWs]	R _{thJH} [K/W]	V _{F,25°C} [V]	E _{rec,125°C} [mWs]	R _{thJH} [K/W]	
<input type="checkbox"/>	FF300R07ME4_B11	EconoDUAL3	650	300	150	1.55	21	0.179	1.55	6	0.258	
<input type="checkbox"/>	FF400R07KE4	62mm	650	400	150	1.55	24	0.150	1.55	9	0.280	
<input checked="" type="checkbox"/>	FF450R07ME4_B11	EconoDUAL3	650	450	150	1.55	33	0.141	1.55	9	0.205	
<input type="checkbox"/>	FF600R07ME4_B11	EconoDUAL3	650	600	150	1.55	49	0.123	1.55	9	0.185	
<input type="checkbox"/>	FS600R07A2E3	HybridPACK2	650	400	150	1.30	29	0.120	1.40	7	0.170	

Následně zvolíme teplotní podmínky.

DC/AC - Three Phase - 2 Level > Module Selection

? Need help defining heatsinks?

FF450R07ME4_B11

Gate Resistance:

R_{G,on} Ω
 [1.8 - 18]

R_{G,off} Ω
 [1.8 - 18]

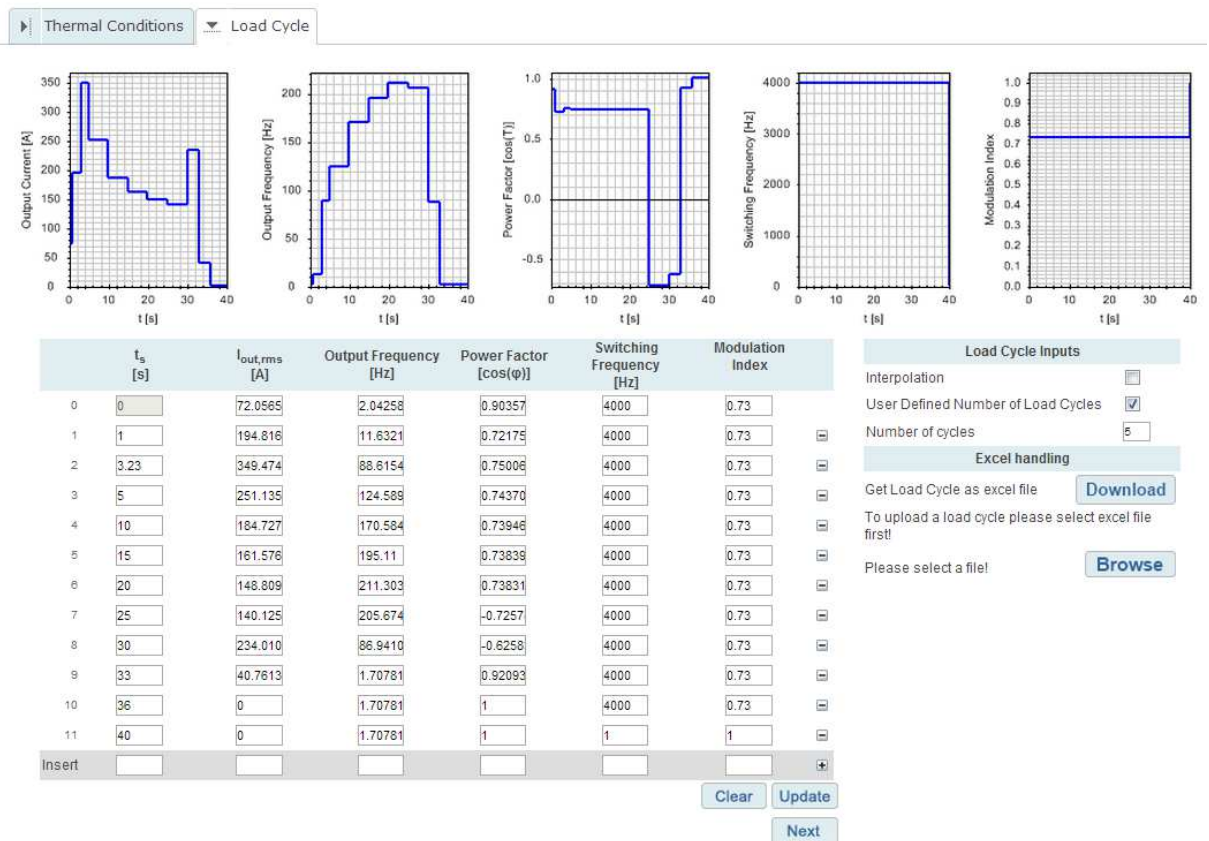
Fixed Heatsink Temperature

T_{heatsink} °C

User Defined Heatsink

Predefined Heatsink

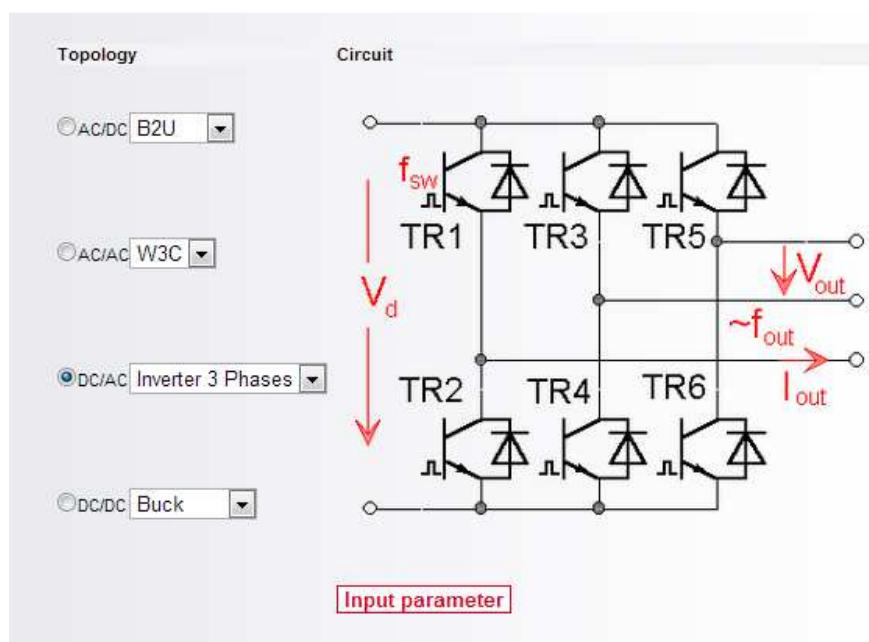
A nakonec zadáme hodnoty zatěžovacího cyklu.



Výsledky simulačního programu viz. kap. 4.3.2

7.5.2 Tepelná simulace v aplikaci SEMISEL (pro modul SKiM406GD066HD vztažený na zadání diplomové práce)

V prvním kroku zvolíme vhodný požadovaný obvod modulu.



Následně zadáme parametry měniče.

DC/AC Inverter

Circuit parameter			
Input voltage	$V_{(d)}$	<input type="text" value="300"/>	V
Output voltage	V_{out}	<input type="text" value="220"/>	V
$\cos(\phi)$	$\cos(\phi)$	<input type="text" value="0.87"/>	
Output power	P_{out}	<input type="text" value="60"/>	kW
Output current	I_{out}	<input type="text" value="181"/>	A
Switching frequency	f_{sw}	<input type="text" value="4"/>	kHz
Output frequency	f_{out}	<input type="text" value="50"/>	Hz
Overload parameter			
factor		<input type="text" value="0,73"/>	
duration		<input type="text" value="10"/>	s
User defined load cycle <input checked="" type="checkbox"/>			
min. output frequency	$f_{min\ out}$	<input type="text" value="50"/>	Hz
min. output voltage	$V_{min\ out}$	<input type="text" value="220"/>	V

Back
Next

Poté zadáme hodnoty zatěžovacího cyklu.

User defined load cycle

Number of periodes to be calculated:

Number	time / s	output current ^a	output voltage ^b	power factor	output frequency /Hz	$f_{sw,overload}$ /kHz
1	0.03	0,423862	0,00783202	0,903578	2,042589	4
2	1	1,145976	0,07440618	0,721752	11,63218	4
3	3.23	2,05573	0,39259818	0,75006	88,61548	4
4	5	1,477269	0,39259818	0,743703	124,5896	4
5	10	1,086631	0,39259818	0,739468	170,5842	4
6	15	0,950452	0,39259818	0,738395	195,11	4
7	20	0,875347	0,39259818	0,738317	211,3032	4
8	25	0,824265	0,58354366	-0,72578	205,6742	4
9	30	1,376531	0,572526	-0,62583	86,94102	4
10	33	0,239773	0,00407288	0,92093	1,70781	4
11	36	0	0	1	1,70781	4
12	40	0	0	1	1,70781	4

Back
Sort by Time
Next

Dále zvolíme modul.

DC/AC Inverter

Voltage range: Recommended voltage V

Select your package and device Add former generation

SEMITRANS
SKM600GB066D

SKiiP
SKiiP3614GB12E4-6DUL

MiniSKiiP
SKiiP39AC066V4

SEMITOP
SK200GD066T

SKiM
SKiM406GD066HD

SEMIX
SEMIX603GB066HD

SEMIPOINT
Empty

Enter the calculation methode

Use typical values

Use maximum values

Enter the correction factor of the switching losses

Transistor

diode

Back
Next

V posledním kroku potřebném pro simulaci zadáme hodnoty okolního prostředí a zvolíme druh a parametry chlazení.

DC/AC - Cooling

Ambient and heat sink parameter

Ambient temperature T_a °C

elements mounted

number of switches per heat sink

number of parallel devices on the same heat sink

Additional power source at this heat sink W

Cooling:

predefined type

Cooling method

SK model

Correction factor

flow rate m³/h or l/min

$R_{th(s-a)}$ K/W

$R_{th(s-a)}$ * correction K/W

Self defined heat sink

	τ_{th}	R_{th}
1	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
2	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
3	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
4	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
5	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
6	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>

fixed heat sink temperature °C

Vlastní výstup aplikace viz. kap. 4.4.2.

7.6 Seznam obrázků a rovnic

7.6.1 Seznam použitých obrázků

OBRÁZEK 1 - SOR EBN 10.5	17
OBRÁZEK 2 - SOR EBN 8.....	19
OBRÁZEK 3 - SOLARIS URBINO ELECTRIC	20
OBRÁZEK 4 - ZEUS M200-E	21
OBRÁZEK 5 - SCHÉMA 3F NAPĚŤOVÉHO STRÍDAČE	23
OBRÁZEK 6 - PULZNĚ-ŠÍŘKOVÁ MODULACE	24
OBRÁZEK 7 - PRŮBĚH ZTRÁTOVÉHO VÝKONU - SPÍNACÍ ZTRÁTY (POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY).....	25
OBRÁZEK 8 - TROJFÁZOVÝ NAPĚŤOVÝ PŮLMŮSTEK PRO JEDNU FÁZI.....	27
OBRÁZEK 9 - PROUD PROCHÁZEJÍ TRANZISTOREM PŘI PWM.....	27
OBRÁZEK 10 - APROXIMACE PROPUSTNÉ CHARAKTERISTIKY PRO VÝPOČET ZTRÁT	28
OBRÁZEK 11 - PRŮBĚH NAPĚTÍ A PROUDU - KOMUTUJÍCÍ TRANZISTOR SE ZPĚTNOU DIODOU	31
OBRÁZEK 12 - SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	32
OBRÁZEK 13 - HYBRIDKIT PRO HYBRIDPACK2	34
OBRÁZEK 14 - NÁHRADNÍ TEPELNÉ SCHÉMA PRO NAPĚŤOVÝ STRÍDAČ.....	43
OBRÁZEK 15- QUAZISTACIONÁRNÍ STAV	44
OBRÁZEK 16 - LIMITNÍ TEPLoty	45
OBRÁZEK 17 - NÁHRADNÍ SCHÉMA NAPĚŤOVÉHO MĚNIČE PRO VÝPOČET MAXIMÁLNÍCH TEPLot NA SOUČÁSTKÁCH	46
OBRÁZEK 18 - NÁHRADNÍ SCHÉMA NAPĚŤOVÉHO STRÍDAČE PRO VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT	47
OBRÁZEK 19 - OTEPLENÍ NA TRANZISTORU	48
OBRÁZEK 20 - OTEPLENÍ NA DIODĚ	48
OBRÁZEK 21 - OTEPLENÍ TRANZISTORŮ PRO BOD Č.1	50
OBRÁZEK 22 - OTEPLENÍ ZPĚTNÝCH DIOD PRO BOD Č.1.....	50
OBRÁZEK 23 - OTEPLENÍ TRANZISTORŮ PRO BOD Č.2.....	51
OBRÁZEK 24 - OTEPLENÍ ZPĚTNÝCH DIOD PRO BOD Č.2.....	51
OBRÁZEK 25 - ECONODUAL 3.....	52
OBRÁZEK 26 - SKIM 63	56
OBRÁZEK 27 - VÝSTUP APLIKACE SEMISEL	58
OBRÁZEK 28 - VÝSTUP APLIKACE SEMISEL	59
OBRÁZEK 29 - VÝSTUP APLIKACE SEMISEL	60

7.6.2 Seznam použitých rovnic

(1) Hustota energie.....	15
(2) Dimenzování busu na delší dojezd.....	15
(3) Referenční napětí.....	24
(4) Obecné určení ztrátového výkonu.....	25
(5) Výpočet totálních ztrát.....	26
(6) Střední hodnota ztrátového výkonu daného propustným proudem.....	28
(7) Výpočet diferenciálního odporu.....	28
(8) Výpočet střední hodnoty proudu tranzistoru.....	28
(9) Výpočet střední hodnoty proudu zpětné diody.....	28
(10) Výpočet efektivní hodnoty proudu tranzistoru.....	29
(11) Výpočet efektivní hodnoty proudu zpětné diody.....	29
(12) Ztrátová energie při spínání.....	29
(13) Ztrátová energie při vypínání.....	29
(14) Výpočet střední hodnoty spínacího ztrátového výkonu.....	29
(15) Výpočet střední hodnoty vypínacího ztrátového výkonu.....	30
(16) Výpočet spínacích ztrát.....	30
(17) Výpočet odpínacích ztrát.....	30
(18) Výpočet ztrát zpětné diody.....	30
(19) Výpočet střední hodnoty spínacích ztrát na IGBT tranzistoru.....	31
(20) Výpočet střední hodnoty spínacích ztrát na zpětné diodě.....	31
(21) Proudů do zátěže (nejhorší varianta ze zadaného cyklu)	35
(22) První harmonická výstupního fázového napětí střídače.....	35
(23) Výpočet první harmonické napětí střídače.....	35
(24) Výpočet hloubky modulace.....	35
(25) Výpočet K_{on}	36
(26) Výpočet K_{off}	37
(27) Výpočet K_r	38
(28) Výpočet spínacích ztrát na tranzistoru.....	38
(29) Výpočet spínacích ztrát na diodě.....	38
(30) Účinník.....	38
(31) Výpočet střední hodnoty proudu tranzistoru.....	38
(32) Výpočet střední hodnoty proudu pro zpětnou diodu.....	38
(33) Výpočet efektivní hodnoty proudu tranzistoru.....	39
(34) Výpočet efektivní hodnoty proudu zpětné diody.....	39
(35) Zisk PWM.....	39
(36) Výpočet amplitudy první harmonické napětí.....	39
(37) Prahové napětí tranzistoru.....	40
(38) Prahové napětí zpětné diody.....	40
(39) Diferenciální odpor tranzistoru.....	41

(40)	Diferenciální odpor zpětné diody.....	42
(41)	Výpočet ztrát propustným proudem tranzistoru.....	42
(42)	Výpočet ztrát propustným proudem zpětné diody.....	42
(43)	Výpočet celkových ztrát.....	42
(44)	Výpočet celkových ztrát zvlášť na tranzistoru.....	44
(45)	Výpočet celkových ztrát zvlášť na zpětné diodě.....	44
(46)	Výpočet celkové rezistivity tranzistoru v náhradním schématu.....	44
(47)	Výpočet celkové rezistivity zpětné diody v náhradním schématu.....	44
(48)	Teplota okolního prostředí.....	45
(49)	Výpočet skutečné teploty na IGBT tranzistoru v nejhorším bodě cyklu.....	45
(50)	Doplnění teplotní rezervy pro tranzistor.....	45
(51)	Výpočet skutečné teploty na zpětné diodě v nejhorším bodě cyklu.....	45
(52)	Doplnění teplotní rezervy pro diodu.....	45
(53)	Oteplení na tranzistoru.....	46
(54)	Oteplení na zpětné diodě.....	46
(55)	Podmínka pro celkové ztráty tranzistoru.....	49
(56)	Vyjádření „x“	49
(57)	Podmínka pro celkové ztráty diody.....	49

7.6.3 Seznam použitých tabulek

TABULKA 1 – POROVNÁNÍ VYRÁBĚNÝCH BATERIOVÝCH BUSŮ	22
TABULKA 2 - ZADANÝ CYKLUS	33
TABULKA 3 - PARAMETRY MOTORU	33
TABULKA 4 - PARAMETRY MĚNIČE	34
TABULKA 5 - PARAMETRY TRAKČNÍ BATERIE	34
TABULKA 6 - HODNOTY BODU Č.1	49
TABULKA 7 - HODNOTY BODU Č.2	49
TABULKA 8 - POROVNÁNÍ TEPLŮ NA ČIPU A ZPĚTNÝCH DIODÁCH	62
TABULKA 9 - CENY JEDNOTLIVÝCH MODULŮ	64