

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Trakční měnič pro tramvaj na bázi nové generace IGBT
modulů**

**vedoucí práce: doc. dr. Ing. Jiří Flajtingr
autor: Bc. Luboš Růžička**

2013

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

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

Jméno a příjmení: **Luboš RŮŽIČKA**
Osobní číslo: **E11N0177P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Trakční měnič pro tramvaj na bázi nové generace IGBT modulů**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Rozbor topologie trakčního měniče.
2. Dimenzování jednotlivých komponent měniče.
3. Výpočet ztrát a stanovení požadavků na chlazení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. **VONDRÁŠEK, Fr.:** Výkonová elektronika: Měníče s vlastní komutací a bez komutace, 2. vyd., ZČU Plzeň, 2003. ISBN 80-7082-980-X.
2. **VONDRÁŠEK, Fr.; LANGHAMMER, J.; PEROUTKA, A.; MĚSÍČEK, J.; MOLNÁR, J.:** Projektování výkonových polovodičových měničů - vybrané stati, 1. vyd., ZČU Plzeň, 2008. ISBN 978-80-7043-653-0.
3. **FLAJTINGR, J.; KULE, L.:** Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči, 2. upravené vydání, ZČU Plzeň, 2005. ISBN 80-7043-354-X.
4. Katalogové listy a aplikační manuály výrobců komponent měničů
5. Odborné články (Internet, periodika), související Škoda dokumentace a normy

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


Škoda Electric, Plzeň

Konzultant diplomové práce: **Ing. František Krůs**

Škoda Electric, s.r.o.

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


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


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



L.S.


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předmětem této diplomové práce je rozbor, výpočet ztrát, návrh dimenzování a chlazení trakčního měniče, vyvinutého firmou Škoda Electric a.s., pro tramvaj 26T společnosti Škoda Transportation a.s.

Klíčová slova

trakční měnič, napěťový střídač, IGBT modul, asynchronní motor, brzdový odporník, vstupní filtr, pulsně šířková modulace, galvanické oddělení, transformátor, tramvaj

Annotation

The subject of this thesis is an analysis, a calculation of losses, design and dimensioning of cooling traction converter, developed by Škoda Electric a.s. for 26T tram of Škoda Transportation a.s.

Key words

traction inverter, IGBT module, voltage inverter, asynchronous motor, braking resistor, input filter, pulse-width modulation, galvanic isolation, transformer, light rail vehicle

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou v závěru 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 15.7.2013

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému konzultantovi diplomové práce ze společnosti Škoda Electric a.s., panu Ing. Františku Krúsovi, za poskytnuté materiály a program pro simulaci, trpělivost a zodpovězení všech mých dotazů.

Obsah

ÚVOD.....	8
1. ROZBOR TOPOLOGIE TRAKČNÍHO MĚNIČE.....	9
1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY.....	9
1.1.1 Pohon s proudovým střídačem.....	10
1.1.2 Pohon s napěťovým střídačem.....	11
1.2 TOPOLOGIE OBECNÉHO TRAKČNÍHO MĚNIČE S NAPĚŤOVÝM STŘÍDAČEM.....	13
1.2.1 VSTUPNÍ OBVODY.....	13
1.2.2 Pulsní měnič.....	14
1.2.3 Stejnoseměrný meziobvod.....	14
1.2.4 3 fázový napěťový střídač.....	14
1.3 FUNKČNÍ POPIS TRAKČNÍ JEDNOTKY TJ6.1.....	17
1.3.1 Vstupní obvody.....	17
1.3.2 Měnič.....	18
1.3.3 Řízení.....	18
1.3.4 Brzdový odporník.....	18
1.3.5 Sestava zařízení pro chlazení trakčních motorů.....	19
1.3.6 Chlazení trakční jednotky.....	19
1.3.7 Popis funkce výkonového obvodu.....	19
1.3.8 Řídící a regulační obvody.....	20
1.3.9 Popis funkce řídicích a regulačních obvodů.....	20
2. SIMULACE TRAKČNÍ JEDNOTKY TJ6.1.....	21
2.1 SIMPLORER.....	21
2.1.1 Trakční motor.....	22
2.1.2 SkiiP modul.....	23
2.1.3 Řídící obvody.....	24
2.2 SEMISEL.....	27
2.2.1 Tachogramy pro 350m a 800m.....	27
2.2.2 Výpočet ztrát – Semisel.....	30
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	37
PŘÍLOHY.....	1

Úvod

V elektrické trakci bez ohledu na napěťovou hladinu, na které se pohybujeme, pohon daného vozidla představují dva základní prvky, které mají za úkol přeměnu elektrické energie, čerpanou z trolejového vedení, na energii mechanickou, kterou je dotován podvozek vozidla. Půjdeme-li směrem od sběrače, či pantografu, pak je to trakční měnič a trakční motor. Díky úrovni složitosti řízení trakčního měniče můžeme i tento blok považovat za samostatný prvek, ačkoliv dnešní podoba skříňového provedení trakčního měniče obsahuje nejenom něj, jak bude ukázáno v samotné práci. Tato práce je zaměřena na konkrétní trakční měnič, vyvíjený společností Škoda Electric a.s., který je součástí tramvaje s označením 26T, prvoplánově určenou pro maďarské město Miskolc (česky Miškovec).

Základními body zadání je rozbor trakčního měniče, jeho podoba a funkce, které souvisí s jeho činností. Dále jeho dimenzování, ztráty a možnosti chlazení. Protože spolu tyto skutečnosti v praktickém měřítku úzce souvisí (často se i prolínají), nelze ani v této práci k nim přistupovat odděleně.

První část je nejdříve zaměřena na popsání problematiky z obecného pohledu. Funkce pohonu s proudovým střídačem, s napěťovým střídačem a jejich odlišnosti. Obecný trakční měnič s napěťovým střídačem pak znamená úvod pro praktickou část – trakční jednotku. Zmíněny jsou jen základní principy z pohledu funkce trakčního měniče s ohledem na trendy dnešní doby. Úplným rozboru jsou věnována skripta [3]. Poté už je pozornost plně soustředěna na trakční jednotku s označením TJ6.1. Podrobné rozebrání jednotlivých prvků blokového schéma EY61019P, které je pro přehlednost součástí přílohy.

Další část je věnována simulaci trakční jednotky ve studentské verzi programu Simplorer od firmy Ansoft a v programu Semisel umístěném na stránkách výrobce IGBT modulů Semikron. Nejprve je nasimulován trakční měnič, respektive ta část, na které lze provádět měření vzhledem omezení studentské verze programu Simplorer. Následně je samotný střídač, obsahující specifické moduly, simulován ve výpočtovém programu Semisel a jsou vypočteny ztráty.

1. Rozbor topologie trakčního měniče

1.1 Úvod do problematiky

Pro optimální návrh a dimenzování pohonu pro určitou aplikaci je třeba několik základních informací. Je třeba stanovit úroveň složitosti řízení, které daná aplikace vyžaduje. Dále je třeba znát pracovní prostředí pohonu, možnosti napájení, ekonomické požadavky. Protože předmětem této práce je trakční měnič, je třeba zmínit, že vše předešlé musí splňovat velice přísné požadavky ať už za účelem bezpečnosti či spolehlivosti. Základem je též znalost výstupního bloku pohonu – motoru (typ, štitkové údaje atd.). V případě této práce jsou veškeré zmínky o motoru orientovány na asynchronní motor s kotvou nakrátko, protože tramvaj 26T (Obr. 1) využívá právě tento typ. V souvislosti s touto skutečností lze již zmínit měničovou část pohonu.



Obr. 1: Tramvaj 26T

Trakční měniče lze rozdělit do několika kategorií. Tyto kategorie se odvíjejí od historického vývoje ať už vozidel elektrické trakce samotných či jednotlivých komponent trakční motorové a strojařské výzbroje, dostupnosti materiálů pro vývoj, ekonomického zohlednění provozu, výroby a celkové ceny. Závisí tedy jednak na daném nasazení vozidla v praxi, jednak na druhu použitých součástek a v neposlední řadě na druhu veličiny, se kterou

měníč pracuje. V obecné rovině se dá trakční měnič rozdělit do tří bloků. Usměrňovač, stejnosměrný meziobvod a střídač. Podle druhu použitého střídače se odvíjejí zbylé dvě části, které mu předcházejí. Pokud uvažujeme stejnosměrnou lehkou trakci (trolejové napěťové sítě 600V ss a 750V ss), využívá se usměrňovače (řízeného jednofázového můstku) jako rekuperačního prostředku.

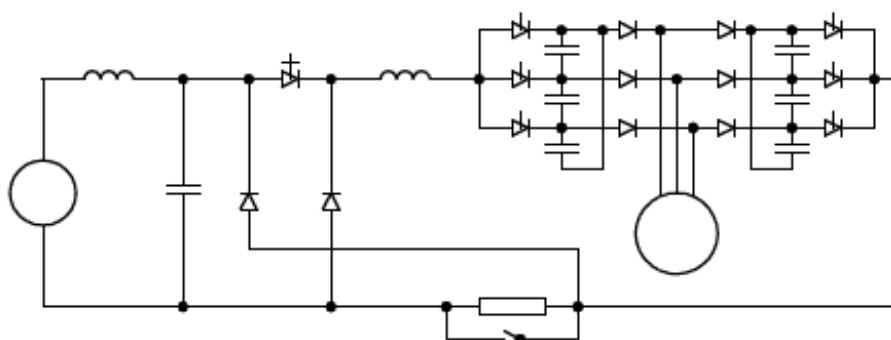
1.1.1 Pohon s proudovým střídačem

V dnešní době, co se týká elektrické trakce, jde o záležitost spíše historickou. Díky technologii IGBT jsou proudové střídače nahrazovány střídači napěťovými, které budou zmíněny později.

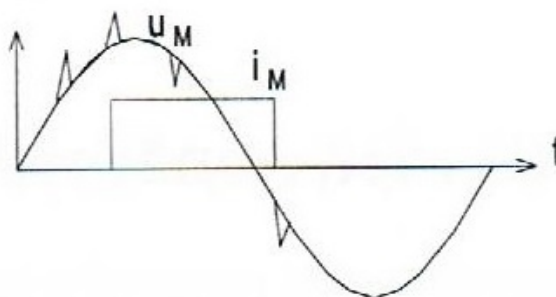
Ve stejnosměrném obvodu pohonu s proudovým střídačem je použita vyhlazovací tlumivka. Ta zde plní funkci zásobníku energie. Po dobu, která odpovídá několika taktům střídače a za předpokladu jmenovitého provozu, dokáže udržet hodnotu proudu blízkou konstantě.

Z hlediska použitých polovodičových součástek je proudový střídač vybaven diodami a tyristory (viz. Obr.2.). Jedná se o součástky v této aplikaci vypínatelné vnější komutací. Této komutaci, někdy též označované jako mezifázová, napomáhají kondenzátory zapojené mezi jednotlivými fázemi střídače. Fázový proud je pak vypínán. Mezifázová komutace je považována za jednu z hlavních předností proudového střídače, neboť lze použít obyčejných tyristorů, samozřejmě napěťově a proudově dimenzovaných. Ve výsledku jsou pak ekonomické náklady výrazně nižší. Další možnou výhodou je oddělená regulace proudu a kmitočtu, která vede na jednoduché řízení. Úhel řízení je u proudového střídače pevný, odpovídá 120° ($\pi = 2/3$). Napětí má sinusový průběh.

Za nevýhodu lze považovat tu skutečnost, že je do motoru dodáván takřka obdélníkový proud. Následkem toho vznikají momentové rázy. Jako opatření proto byly zavedeny tzv. vložené komutace (viz. Obr.3) omezující tyto rázy. Negativně také vychází regulační rozsah z důvodu delší doby komutace.



Obr.2 : Vozidlo s proudovým střídačem [1]

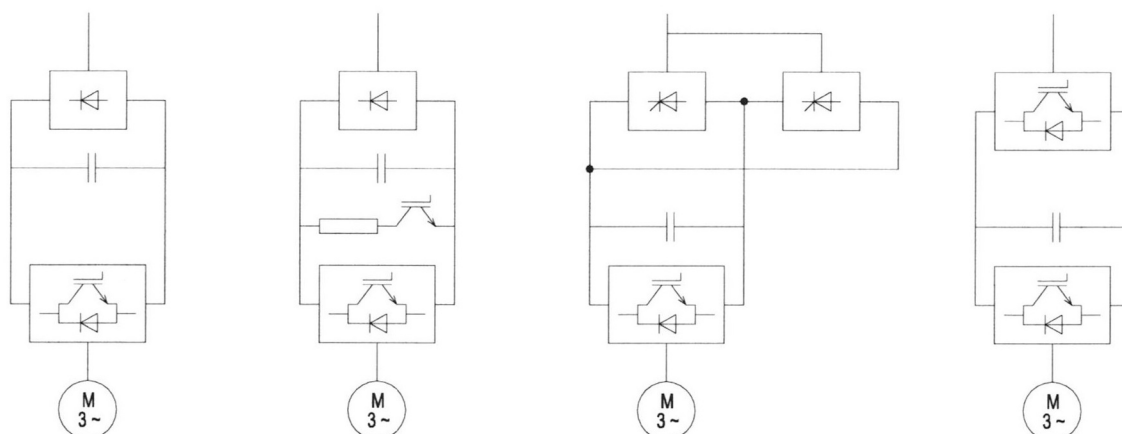


Obr.3: Průběh napětí a proudu na motoru napájeného z proudového střídače [2]

1.1.2 Pohon s napěťovým střídačem

Podoba pohonu s napěťovým střídačem může být rozdílná na základě následujících důvodů [2]:

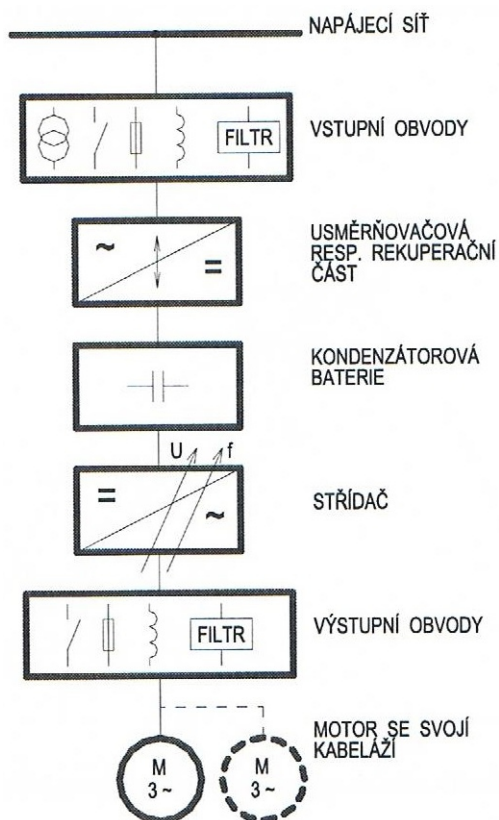
- minimalizace investičních nákladů při splnění požadovaných kritérií
- dodatečná eliminace zpětných vlivů na síť
- dosažení velkých výkonů s dostupnou součástkovou základnou
- požadavek na rekuperaci
- definice požadavků na tvar výstupního napětí



Obr.4: Příklady provedení pohonu s napěťovým střídačem [2]

Blokové schéma obecného uspořádání pohonu s napěťovým střídačem je uvedeno na Obr.4.. Napěťový střídač s IGBT prvky představuje současný trend řízení pohonu pro elektrickou trakci. V porovnání s proudovým střídačem se vyznačuje několika odlišnostmi:

- použité součástky. U napěťového střídače se jedná o součástky s vlastní komutací. Ty mají parametry výrazně lepší, než součástky s vnější komutací. V návaznosti na tyto zlepšené parametry (např. snížená doba komutace) je však třeba ošetřit řadu dalších skutečností (dead time, spínací a vypínací ztráty, teplota, diagnostika)
- na vstupu pohonu s napěťovým střídačem se může nacházet obyčejný pulsní měnič (diodový můstek) připojený k brzdovému odporníku v případě, že nepožadujeme rekuperaci. Dnes je však již prakticky standardem zapojení s jednofázovým napěťovým můstkem (tzv. „H můstek“). Naproti tomu, proudový střídač má na vstupu připojen řízený můstek, který zajišťuje rekuperaci vždy.
- ve stejnosměrném obvodu je jako potenciální zdroj energie umístěn kondenzátor
- při komutaci je fázový proud převáděn do paralelní větve obsahující diodu.
- Úhel řízení se pohybuje od 60° do 180°



Obr.5: Blokové schéma pohonu s napětovým střídačem [2]

1.2 Topologie obecného trakčního měniče s napětovým střídačem

Jak již bylo zmíněno, uvažujeme trakční měnič pro tramvaj, pohybujeme se tedy na stejnosměrném trolejovém vedení o napětí 600 či 750 V. Z hlediska topologie je pak trakční měnič vybaven následujícími částmi:

- vstupní obvody
- pulsní měnič (rekuperační jednotka)
- stejnosměrný meziobvod obsahující kondenzátor
- 3 fázový napětový střídač

1.2.1 Vstupní obvody

Do této kategorie lze zařadit bezpečnostní a jistící prvky jako jsou pojistky, stykače či odpojovače. Spadají sem i filtry (EMC, rádiové, vstupní LC filtr).

1.2.2 Pulsní měnič

Na stejnosměrné troleji za předpokladu, že by nebyla požadována rekuperace a energie vznikající při brzdění by se pouze mařila v brzdovém odporu, by mohl vstupní blok obsahující filtr a omezovač nabíjecího proudu kondenzátoru připojen přímo na stejnosměrný meziobvod. Veškeré prvky by ale musely být dimenzovány s ohledem na značné kolísání napětí v troleji

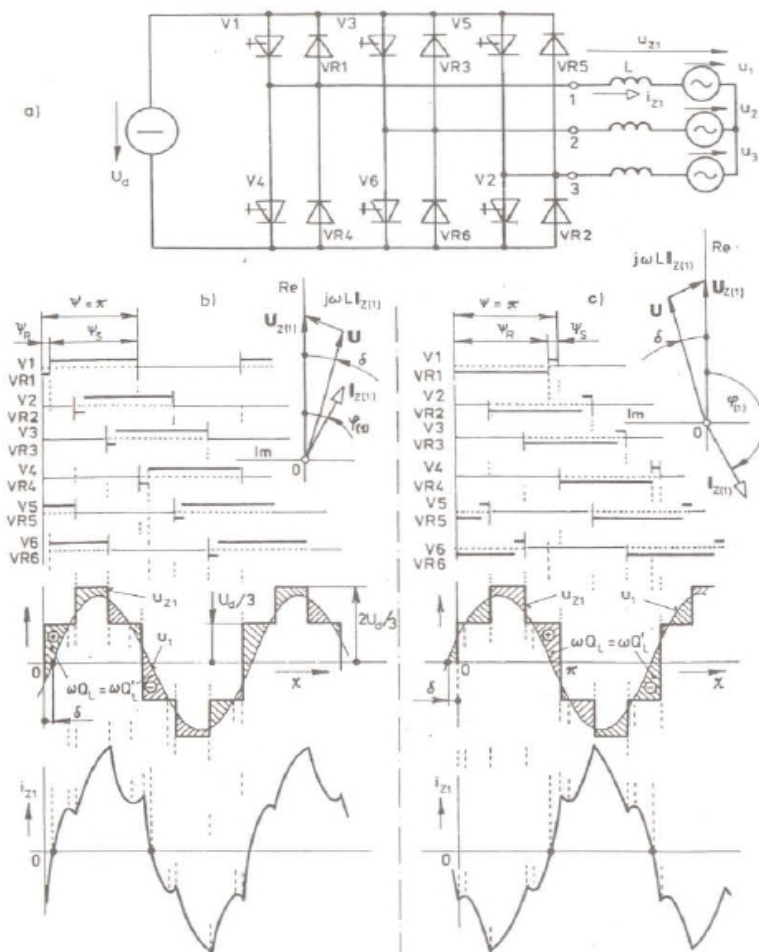
1.2.3 Stejnosměrný meziobvod

Jak již bylo zmíněno dříve, stejnosměrný obvod měniče s napěťovým střídačem je tvořen kondenzátorem. Tímto způsobem je střídač oddělen od napájecích obvodů a je snížen vliv odchylek napětí v síti, ať náhodných nebo trvalých. Díky spojení kondenzátoru s tranzistorem je též možné provozovat spínání a vypínání tranzistorů se strmou charakteristikou. Dochází k potlačení jevu parazitních indukčností, který vzniká v důsledku rychlé změny derivace proudu.

1.2.4 3 fázový napěťový střídač

Jelikož úplný rozbor funkce napěťového střídače je velmi obsáhlý a předmětem této práce je trakční měnič jako celek, zmíním jen základní principy práce napěťového střídače.

Střídač se může nacházet ve dvou stavech, či lépe řečeno v režimech, v závislosti na toku výkonu. Pokud je střídač připojen na motor a ten výkon spotřebovává, mluvíme o střídačovém (motorickém) režimu. V případě, že motor výkon dodává (brzda), jedná se o režim usměrňovačový (generátorický).



Obr.6 : a) 3f nap. střídač napájející motor, b) střídačový režim, c) usměřňovačový režim [3]

Zátěž připojená na 3f střídač na Obr.6 představuje indukční motor v ustáleném stavu. Průběhy pro oba režimy (střídačový chod (Obr.6b); usměřňovačový chod (Obr.6c)) jsou pro $\pi = \psi$. Fázor 1. harmonické průběhu fázového napětí z Obr.5 je označen $U_{z(1)}$. Fázor 1. harmonické proudu $I_{z(1)}$ je při motorickém chodu motoru zpožděn za $U_{z(1)}$ o úhel $0 < \varphi(1) < \pi/2$ a při generátorickém chodu motoru o úhel $\pi/2 < \varphi(1) < \pi$. To odpovídá nezbytnému odběru jalového výkonu motorem jak v motorickém, tak v generátorickém chodu. Při respektování úbytku napětí na reaktanci ωL pak vychází fázor vnitřního indukovaného napětí U při motorickém chodu zpožděn za fázorem $U_{z(1)}$ a při generátorickém chodu v předstihu před $U_{z(1)}$. Tento výsledek je respektován v průbězích u_{z1} a u_1 fáze 1 naznačených pro motorický i generátorický chod pod spínacími diagramy. Při motorickém chodu je u_1 zpožděno o úhel δ za napětím u_{z1} a při generátorickém chodu je u_1 v předstihu o úhel δ před u_{z1} . [3]

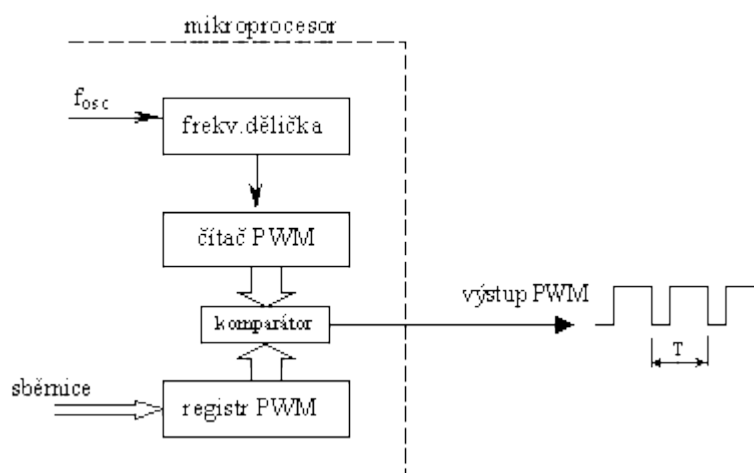
Pokud tedy uvažujeme případ provozu střídače pro napájení střídavého stroje,

nemůžeme opomenout důležitost řízení výstupního napětí střídače. V takovém případě totiž zajišťujeme stejný moment zvratu při nastavené frekvenci za pomoci udržení konstantního magnetického toku. Zajišťujeme tedy, aby poměr napětí a frekvence (U/f) byl konstantní. Toho lze docílit několika možnými způsoby:

- obdélníkovým řízením
- pulsně šířkovým řízením
- pulsně šířkovou modulací (PWM)

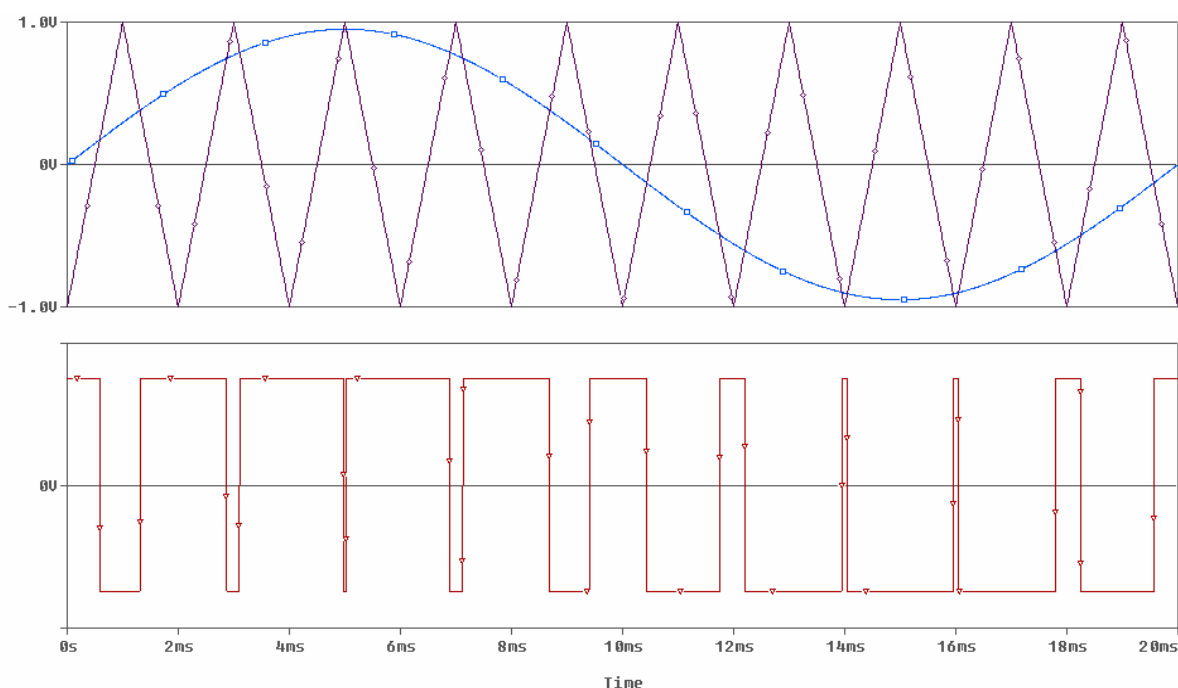
Pro následující popis se zaměřím jen na pulsně šířkovou modulaci. Obdélníkové řízení se zpravidla užívá u neřízených aplikací, avšak pokud je střídač při PWM modulaci již „plně otevřen“, (dosáhl nejvyššího výstupního napětí), tedy modulační signál již koinciduje s nosným signálem jen dvakrát za půlperiodu, nachází se právě v obdélníkovém režimu.

Ač existuje několik variant, digitální provedení Pulsně-šířkové modulace (PWM – **P**ulse-**W**idth **M**odulation) je v dnešní době nejrozšířenější způsob, jak plně řídit napěťový střídač. Možná podoba obvodu generujícího PWM v mikroprocesoru je na Obr.7.



Obr.7: Generování PWM [4]

Frekvenční dělička z obvodu na Obr. 6 má za úkol zpracování signálu f_{osc} . Jde o hodinový signál. Čítač PWM pak převádí signál z děličky do komparátoru, který jej porovnává s hodnotou z PWM registru. Ta je nastavena uživatelem. Výstup PWM pak pracuje pouze s hodnotami logická 0 či 1, na základě srovnání hodnot v komparátoru. Doba, po kterou je následně součástka sepnuta, odpovídá periodě nosného signálu. To tedy znamená, že modulovaný signál PWM modulací má konstantní periodu.



Obr. 8: Vznik pulsně šířkové modulace

1.3 Funkční popis trakční jednotky TJ6.1

Následující popis je vztažen k přehledovému schématu EY61019P. Rozměry trakční jednotky jsou patrné z dokumentu EC6480D, maximální hmotnost 450 kg. Oba dokumenty jsou součástí příloh.

1.3.1 Vstupní obvody

Pro připojení trakční jednotky k trolejovému napětí slouží stykač -K1. Pro přednabíjení kondenzátorů trakční jednotky slouží větev tvořená stykačem -K2 a nabíjecím odporem -R2. Za stykačovou část je zapojena vstupní tlumivka -L1, která společně s kondenzátory v jednotlivých výkonových blocích tvoří vstupní filtr trakční jednotky. Kondenzátor -C20 slouží pro vysokofrekvenční připojení záporného pólu stejnosměrné strany trakčního měniče ke skříni trakční jednotky.

1.3.2 Měnič

Výkonová jednotka -A25 slouží jako rekuperační jednotka, která umožňuje na základě povelů a stavu troleje vypnout nebo zapnout rekuperační brzdění. Jednotka -A24 plní funkci pulzního měniče pro odporové brzdění – její výstup je připojen na brzdový odporník. Každá z výkonových jednotek -A21 až -A23 tvoří vždy jednu z větví střídače pro napájení motorů. Všechny výkonové jednotky -A21 až -A25 jsou identické a vzájemně zaměnitelné. Jsou tvořeny inteligentním IGBT modulem a kondenzátorem. Výkonový modul v sobě zahrnuje i veškeré obvody pro spínání výkonových tranzistorů, dále pak čidla proudu, napětí a teploty.

1.3.3 Řízení

Řízení je zajištěno pomocí mikroprocesorové řídicí jednotky -A1, která řídí a diagnostikuje jednotlivá zařízení v trakční jednotce. Se zařízeními mimo kontejner trakční jednotky řídicí jednotka komunikuje prostřednictvím CAN komunikace případně s využitím přímých logických vstupů a výstupů. Pro diagnostické účely je uvažováno využití rozhraní ETHERNET.

1.3.4 Brzdový odporník

Součástí trakční jednotky je brzdový odporník –R1. Ten je umístěn na společném rámu trakční jednotky, nicméně je oddělen od prostoru, kde je umístěna výkonová a řídicí elektronika. Rám trakční jednotky je uzpůsoben tak, že je na něj možné instalovat různé výkonové varianty brzdových odporníků. Brzdový odporník je ve všech případech navržen jako přirozeně chlazený. V rámci trakční jednotky je zajištěno nepřímé měření teploty brzdových odporníků na základě měření elektrických veličin. Ve výjimečných případech, pokud by došlo k překročení mezní teploty brzdového odporníku, předejde řízení měniče poškození odporníku vypnutím EDB a vyslání signálu pro převzetí brzdy.

1.3.5 Sestava zařízení pro chlazení trakčních motorů

Základní provedení trakční jednotky uvažuje kapalinové chlazení trakčních motorů. V rámci trakční jednotky (opět na rámu mimo prostor elektroniky) je umístěno oběhové čerpadlo –E2, výměník, expanzní nádoba a další příslušenství pro chlazení trakčních motorů.

1.3.6 Chlazení trakční jednotky

Chlazení trakční jednotky je zajištěno jedním radiálním ventilátorem. Ten saje chladicí vzduch přes chladiče výkonových polovodičů. Tento vzduch dále chladí vstupní tlumivku a poté je naveden do výměníku pro chlazení trakčních motorů. Pro napájení ventilátoru a čerpadla v trakční jednotce slouží měnič -U11. Ten je přes pojistku -F11 připojen na meziobvod trakční jednotky s napětím 600 (750) V, na jeho výstupu pak je galvanicky oddělené třífázové napětí s proměnným napětím i frekvencí v rozsahu do 400 V, 50 Hz. Tato frekvence bude řízena podle požadavků na chlazení a s ohledem na minimalizaci hluku.

1.3.7 Popis funkce výkonového obvodu

Stejnosemné napětí z troleje je přes vstupní tlumivku a dále přes vstupní výkonovou jednotku A25 připojeno na kondenzátorovou baterii. Vstupní výkonová jednotka mimo jiné umožňuje volit způsob brzdění (rekuperací nebo do odporu).

Ze stejnosměrného napětí meziobvodu je vytvářeno pomocí IGBT (tranzistorů) střídavé napětí pro motory. Vhodnou distribucí spínacích impulsů pro tranzistory a při využití pulsně-šířkové modulace napětí je vytvořena trojfázová střídavá soustava s proměnnou velikostí první harmonické napětí a proměnnou frekvencí. Při vypnutí tranzistoru prochází proud udržovaný indukčností trakčního motoru antiparalelní nulovou diodou protilehlého tranzistoru. Tímto způsobem lze dosáhnout prakticky sinusového průběhu proudu v trakčním motoru.

Cíleným snížením výstupní frekvence střídače přechází pohon do generátorického režimu. Při generátorickém režimu (brzdění) se přednostně odvádí energie z kondenzátorové baterie zpět do stejnosměrné sítě přes tranzistor ve vstupní výkonové jednotce. Pokud stejnosměrná síť nemůže tuto energii přijmout a napětí na kondenzátorové baterii roste, případně vyskytnou-li se jiná okolnost bránící rekuperaci, dojde ke spínání pulsního spínače pro odporové brzdění.

Tím se proud uzavírá přes připojený brzdový odporník. Pulsní spínač je spínán tak, aby napětí ve stejnosměrném meziobvodu nevybočovalo ze stanovených mezí.

Pulsní spínač pro odporové brzdění slouží ve spojení s brzdovým odporníkem zároveň jako přepětíová ochrana. Přesáhne-li napětí ve stejnosměrném meziobvodu stanovenou mez, dojde okamžitě k sepnutí pulsních spínačů.

1.3.8 Řídicí a regulační obvody

Řízení trakční jednotky je zajištěno pomocí mikroprocesorové řídicí jednotky A1.

1.3.9 Popis funkce řídicích a regulačních obvodů

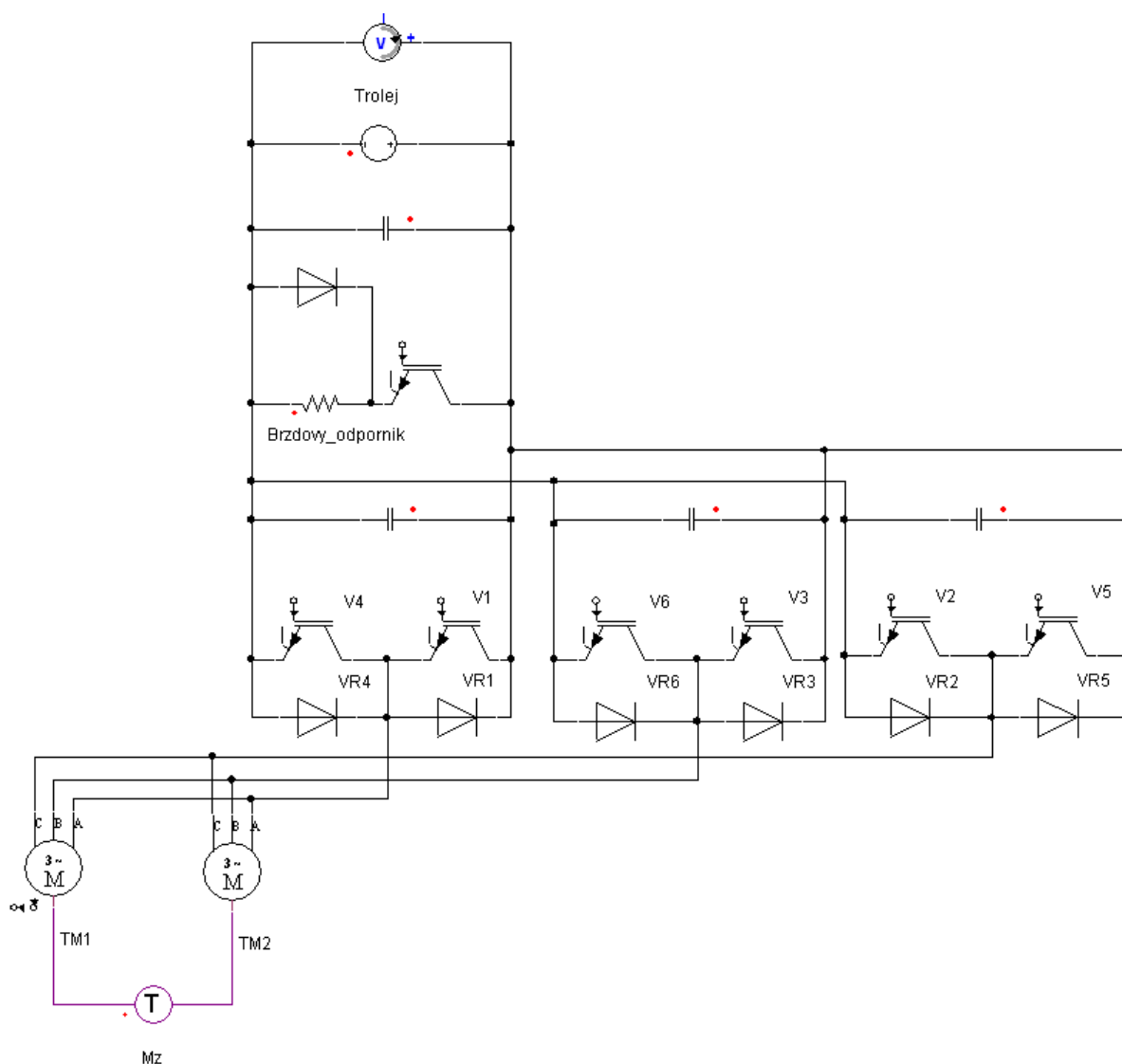
Řídicí a regulační algoritmy pohonu byly navrženy s ohledem na tyto základní požadavky:

- Dobré dynamické vlastnosti v celém regulačním rozsahu
- Uspokojivá činnost při značných změnách teploty trakčního motoru
- Optimální reakce na výpadky napětí troleje – trakční pohon přechází automaticky do generátorického chodu a tím je zajištěna možnost okamžitého přechodu do brzdného režimu
- Při zkratu na troleji přechází automaticky rekuperační brzdění na odporové
- Uspokojivá regulace momentu při značném kolísání a kmitech napětí na troleji
- Provoz v myčce, tj. provoz se sníženým napětím

2. Simulace trakční jednotky TJ6.1

2.1 Simplorer

Simulace byla vytvořena v programu Simplorer, respektive jeho studenské verzi, který je produktem firmy Ansoft. Studentská verze je omezena na 30 prvků v simulovaném schématu, z tohoto důvodu nebylo možné provést kompletní simulaci celé trakční jednotky. Sestaven byl tedy střídač, který se v reálném provedení skládá ze tří modulů Skiip 1814 GB17E4 (viz Obr.8) firmy Semikron. Dále byl nasimulován pulsní měnič (také v provedení Skiip) s brzdovým odporníkem. Pro sestavení simulace jsou klíčové parametry trakčního motoru, modulů Skiip a jízdní vlastnosti a charakteristiky.



Obr. 9: Schéma trakčního měniče - Simplorer

Parametry simulace byly neustále měněny ve snaze přiblížit se co nejvíce teoretickým předpokladům. Z tohoto důvodu zde nejsou uvedeny, ale jsou zmíněny u každého průběhu zvlášť.

2.1.1 Trakční motor

Jak je patrné z blokového schématu (viz. Příloha 1), tramvaj 26T využívá dva paralelně zapojené asynchronní motory, vodou chlazené a napájené z jednoho trakčního měniče. Tab.1 obsahuje hodnoty prvků z náhradního schématu, které byly pro sestavení modelu motoru nezbytné.

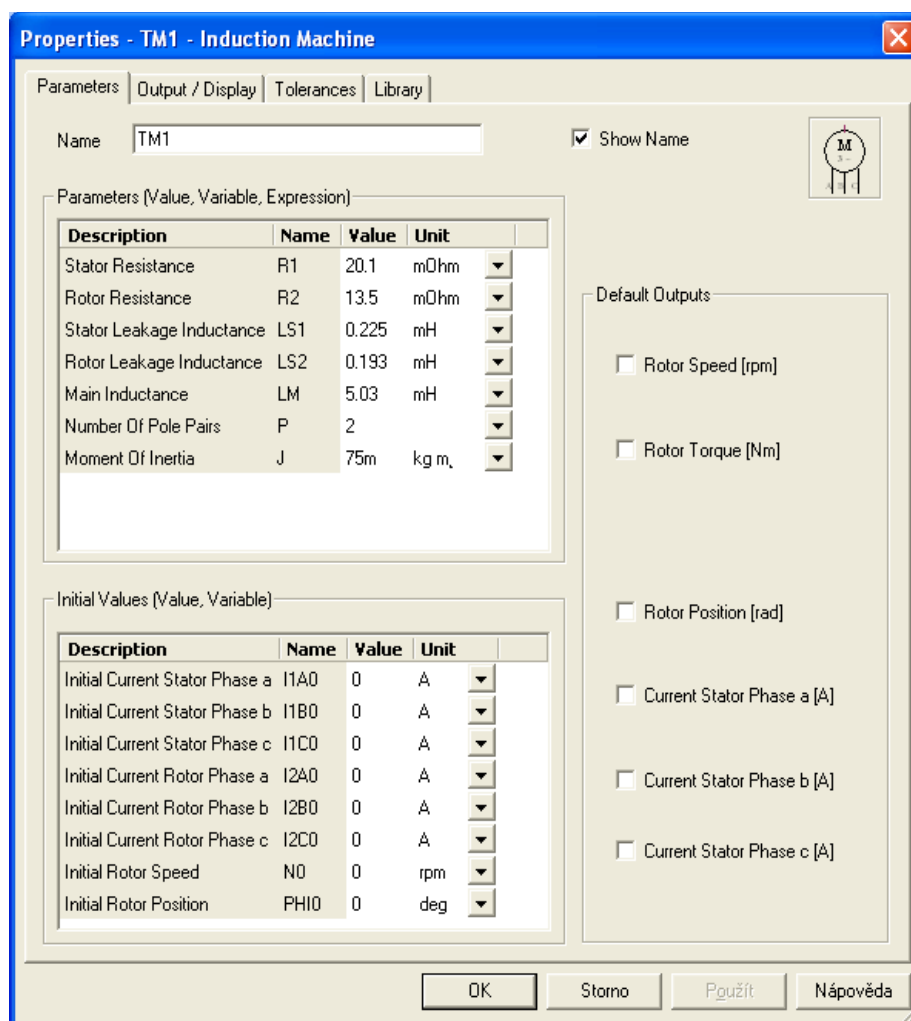
sdržené napětí	2xY	3x420 V
frekvence	f	72 Hz
odpor statoru	R_1	0,0201 Ω
odpor rotoru přepočtený na stator	R_{21}	0,0135 Ω
rozptylová indukčnost statoru	L_1	0,225 mH
rozptylová indukčnost rotoru přepočtená na stator	L_{21}	0,193 mH
hlavní indukčnost	L_h	5,03 mH

Tab. 1: Hodnoty pro náhradní schéma

Hodnoty v Tab.2 odpovídají zatěžovateli S1. Jedná se o trvalé zatížení, během něhož se teploty vinutí a izolace vinutí ustálí na konstantní hodnotě a s časem se již nemění. Jedná se o nejběžnější zatěžovací zkoušku při jmenovitých hodnotách výkonu a momentu.

proud	183 A
otáčky	2219 ot./min
množství chladicího média	20 l/min
účinnost	91,95%
účinník	0,818
moment jmenovitý / 85% momentu zvratu	430,4 / 1359,7 Nm

Tab. 2: Hodnoty pro 1. harmonickou nap. a teplotu TM
150°C



Obr. 10: Konfigurace trakčního motoru - Simplerer

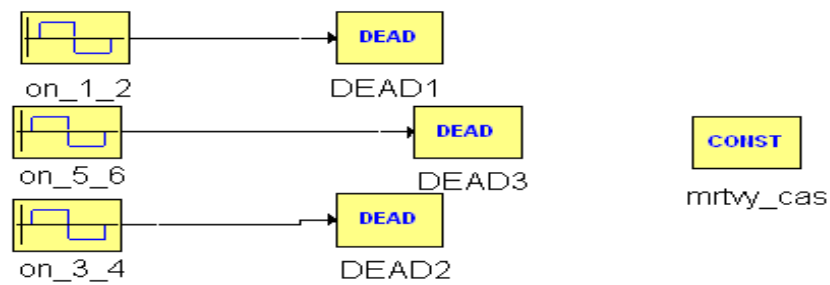
2.1.2 SkiiP modul

Moduly SkiiP jsou moduly nové generace označované jako Intelligent Power Module. Mají integrovanou veškerou diagnostiku potřebnou ke svému chodu jako např. teplotní sensory (maximální provozní teplota $T_{jmax} = 175^{\circ}\text{C}$ – viz. Datasheet (viz příloha)), měření proudu atd. Odpovídají normám RoHS (**R**estriction of **H**azardous **S**ubstances), což jsou normy týkající se minimalizace nebezpečných látek v zařízení.

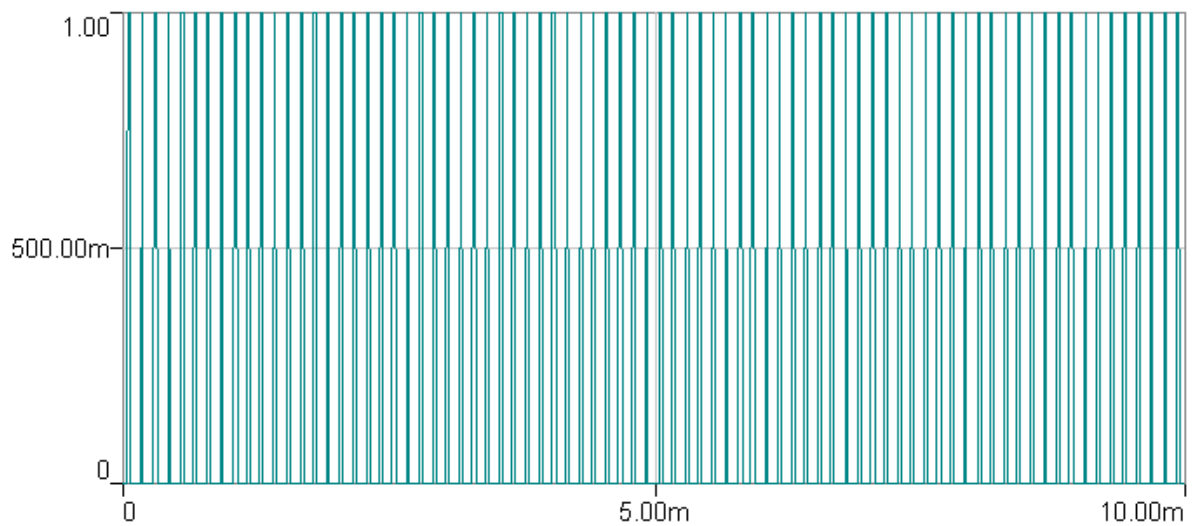


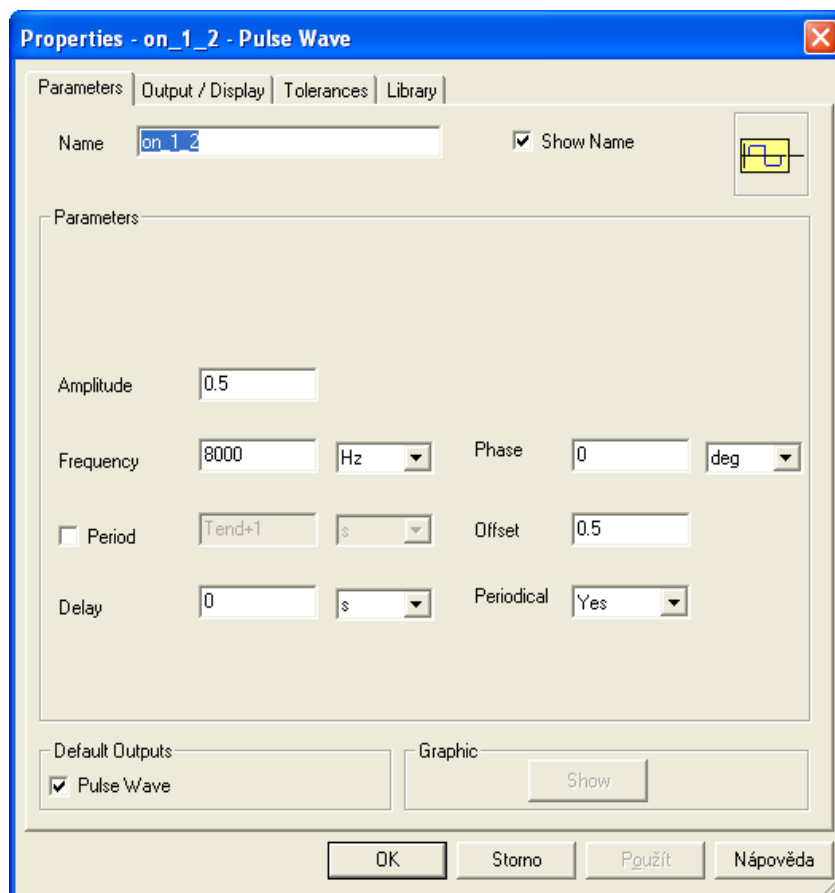
Obr.11: SkiiP modul s chladičem

2.1.3 Řídicí obvody

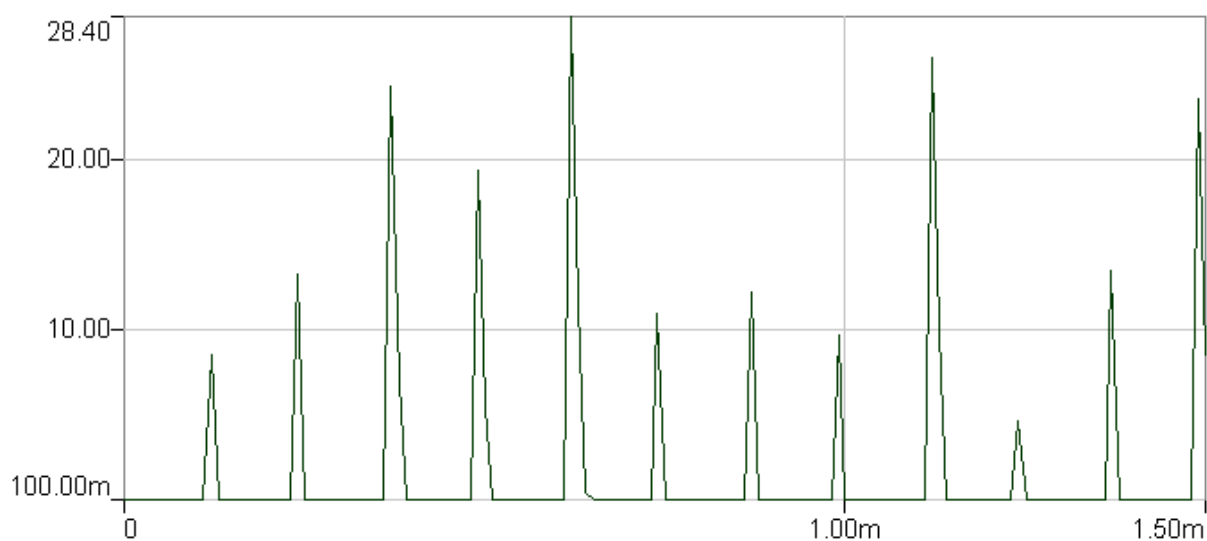


Obr. 12: Realizace řídicích obvodů - Simpler

Obr.13: Průběh řídicího signálu – PWM ($f_{sw} = 8\text{kHz}$)

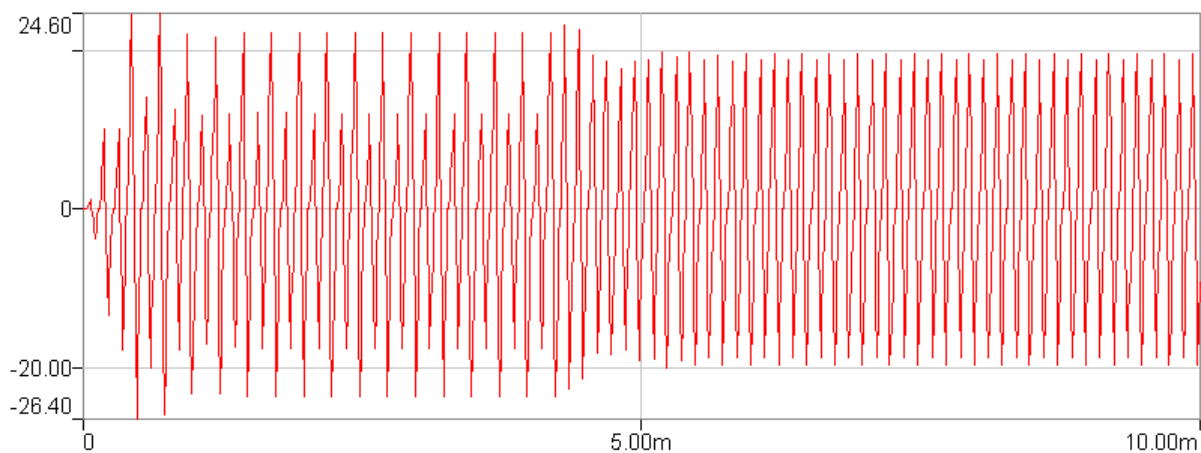


Obr. 14: Konfigurace PWM

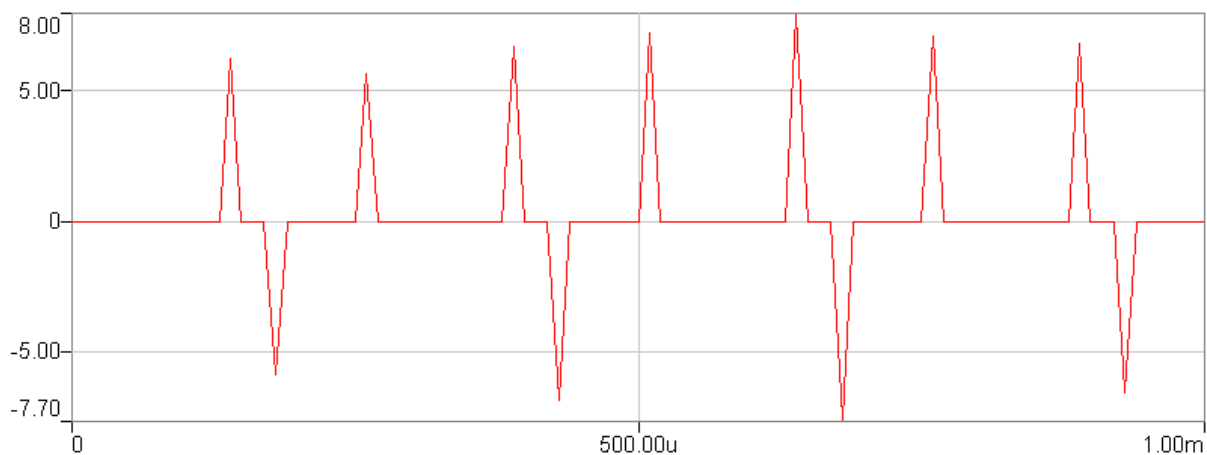


Obr. 15: Průběh proudu IGBT V1 (doba simulace - 1.5ms)

Průběhy proudu statorem motoru

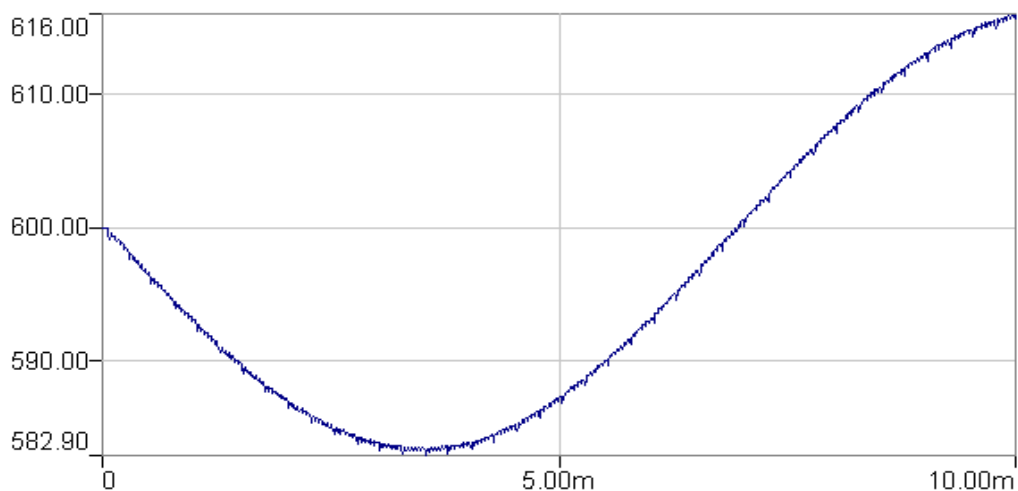


Obr. 16: Proud statorem motoru I_a (doba simulace – 10ms; dead time – 10 μ s)



Obr. 17: Proud statorem motoru I_a (doba simulace – 1ms; dead time – 60 μ s)

Průběh napětí na kondenzátoru vstupního filtru (C = 1mF)

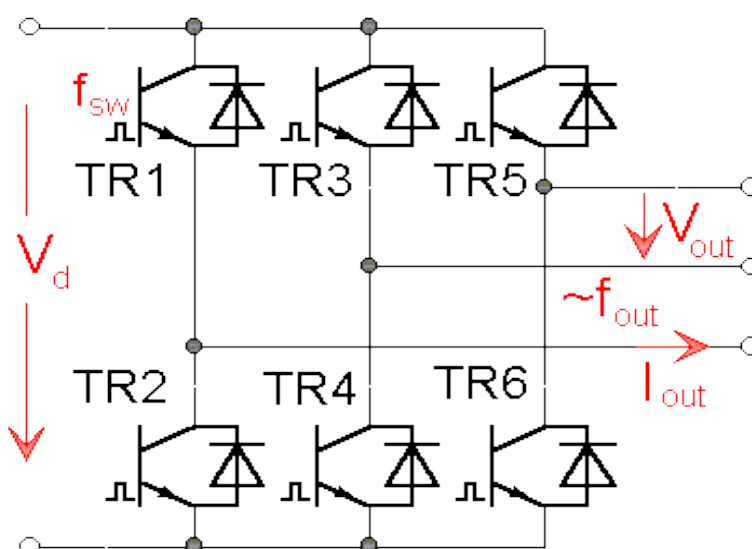


Obr. 18: Napětí na konden. vstup. filtru (doba simulace = 10ms)

2.2 Semisel

Program Semisel je volně dostupný na webových stránkách firmy Semikron [6]. Jeho výhoda spočívá v přesné znalosti vlastních IGBT modulů, rychlého přístupu a výpočtu ztrát a následného vyhodnocení možné či nemožné funkčnosti při zadaných parametrech. K výpočtu ztrát je potřeba projít několika kroky:

- výběr zapojení
- parametry obvodu
- výběr výrobku od firmy Semikron
- zvolení chlazení



Obr. 19: Zvolený obvod v programu Semisel

Parametry obvodu byly zadány vzhledem k hodnotám měření z dokumentace fy. Škoda Electric a.s.. Jedná se o tachogramy jízdy pro vzdálenosti 350 a 800 metrů. Měření jsou prováděna velmi podrobně s časovým krokem 0,1s. V této práci se omezím pouze na stav při režimu jízda, neboť při tomto jízdním stavu dochází k největšímu zatěžování (respektive přetěžování) celé trakční výzbroje vozidla.

2.2.1 Tachogramy pro 350m a 800m

Dle [7] se pohybují průměrné vzdálenosti mezi jednotlivými zastávkami městské hromadné dopravy v centrální oblasti mezi 300 – 400m. Hodnota 305m tedy odpovídá jízdě v centru města, zatímco tachogram pro 800m odpovídá spíše okrajům města či předměstí.

Napájecí systém se pohybuje ve dvou rozmezích:

- 600V/1200A pro trakci (rozjezd, tah)
- 900V/1250A pro brzdu

V režimu brzda je zvýšené napětí z důvodu zajištění lepších podmínek pro tento režim (např. zvýšení momentu motoru).

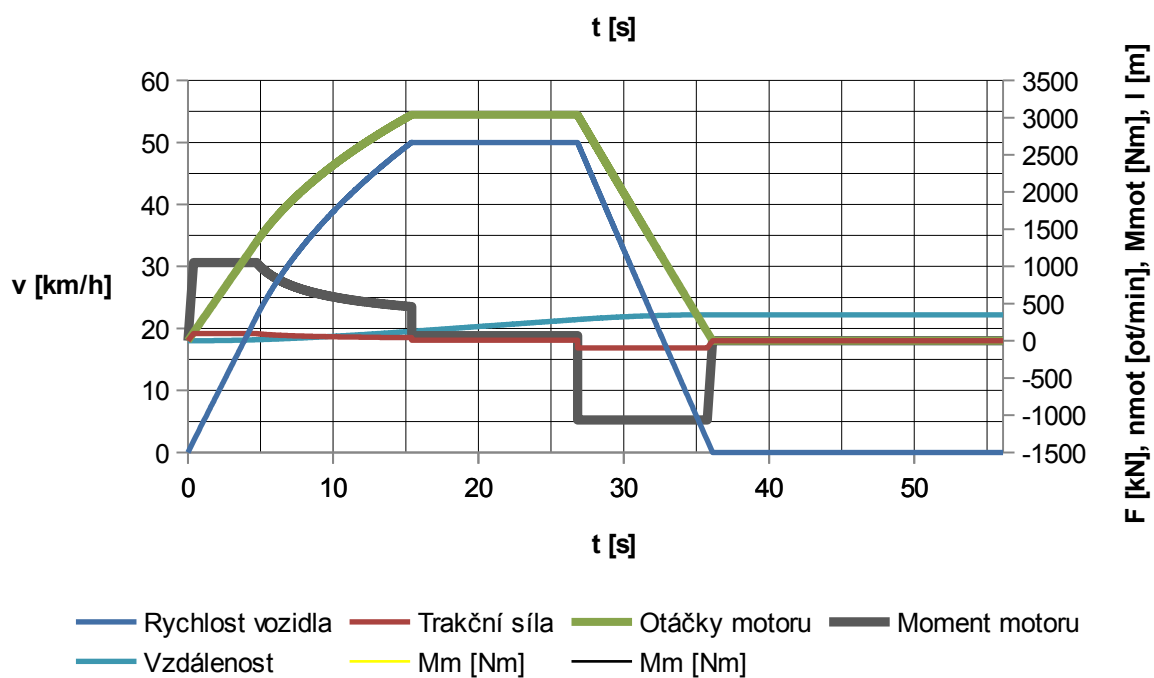
Parametry jak pro trakční měnič tak pro motor jsou pro oba dva případy stejné. Taktéž se přibližně neliší ani rozjezdová část. Rozdíly jsou patrné až při dosažení maximálních rychlostí pro dané úseky a pro režim brzda.

Režim Jízda

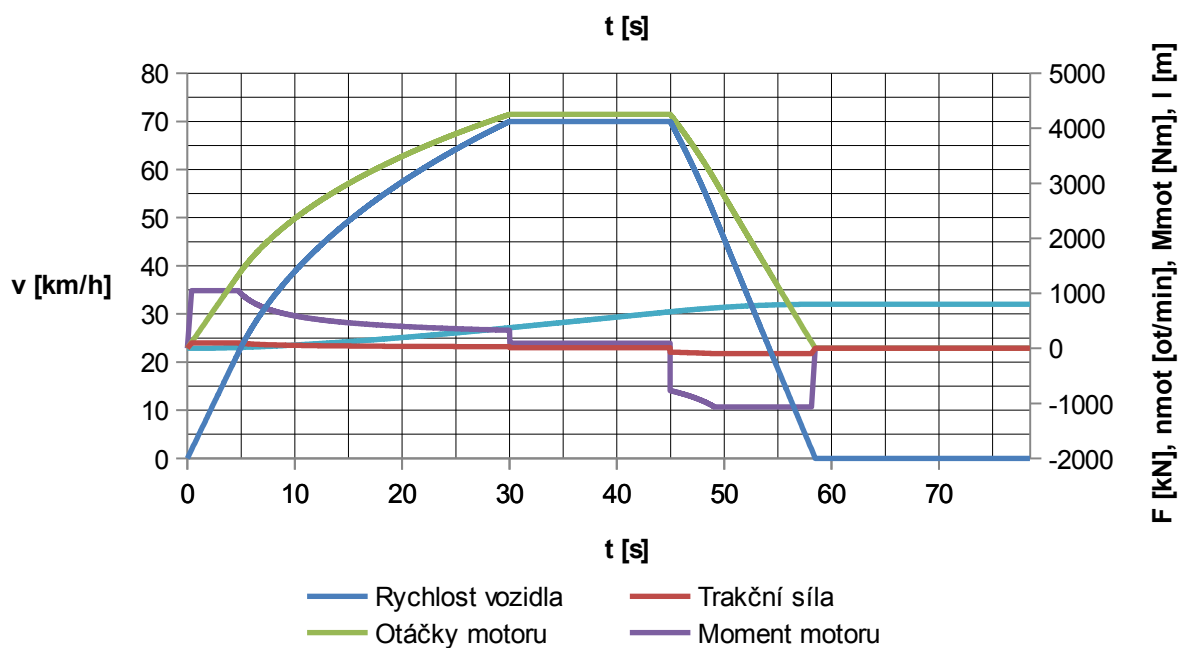
- Doba trvání – 36,11 s
- Energie spotřebovaná pro jízdu – 2,97 kWh
- Energie generovaná při brzdě – 1,4 kWh
- Maximální rychlost v úseku – 50 km/h
 - otáčky motoru – 3037,63 ot/min
 - moment motoru – 69,8 Nm
 - trakční síla – 6,4 kN
- Počátek brzdy
 - moment motoru – -1063,4 Nm
 - trakční síla – -97,42 kN

Jízda 0 – 800m

- Doba trvání – 58,48 s
- Energie spotřebovaná pro jízdu – 6,39 kWh
- Energie generovaná při brzdě – 2,7 kWh
- Maximální rychlost v úseku – 70 km/h
 - otáčky motoru – 4252,7 ot/min
 - moment motoru – 92,84 Nm
 - trakční síla – 8,5 kN
- Počátek brzdy
 - moment motoru – -768,5 Nm
 - trakční síla – -70 kN



Obr. 20: Jízdní diagram vozidla; vzdálenost 0 - 350m



Obr. 21: Jízdní diagram vozidla; vzdálenost 0 - 800m

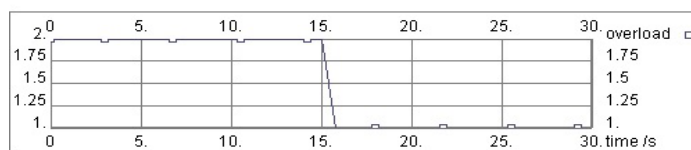
2.2.2 Výpočet ztrát – Semisel

Parametry do obvodu (viz. Tab.3), jak již bylo zmíněno, byly zadány na základě tachogramů. Půjde tedy nejdříve od dva stavy. Samotnou jízdu a brzdu.

Jízda

vstupní napětí	$V_{(D)}$	600 V
výstupní napětí	V_{out}	420 V
účinnost	$\cos\varphi$	0,818
výkon	P_{out}	100 kW
výstupní proud	I_{out}	168 A
spínací frekvence	f_{sw}	8 kHz
výstupní frekvence	f_{out}	75 Hz
doba přetížení	T_{ov}	15 s

Tab. 3: Parametry obvodu pro režim Jízda



Obr. 22: Charakteristika přetížení

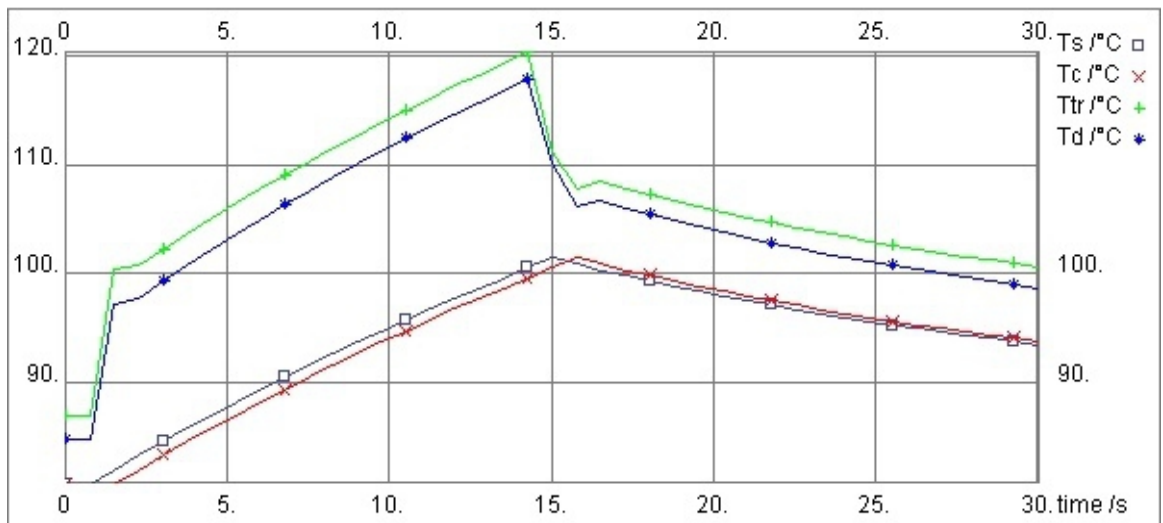
Pro nastavení parametrů chlazení byly zvoleny hodnoty v Tab.4. Je zřejmé, že největším problémem pro chlazení vzduchem je rozjezd, respektive dozjezd. Proudové zatížení je na své špičce, zatímco průchod a cirkulace vzduchu ještě není dostatečná. Program Semisel tuto skutečnost zohledňuje pomocí charakteristiky přetížení (viz Obr.12). Celková doba rozjezdu pro úsek 0 – 350m odpovídá dle jízdího diagramu 15 vteřinám. Z tohoto důvodu bylo nastaveno po tuto dobu dvojnásobné přetížení obvodu.

okolní teplota	T_a	20 °C
způsob chlazení		chlazení vzduchem
průtok vzduchu		457,5 m ³ /h

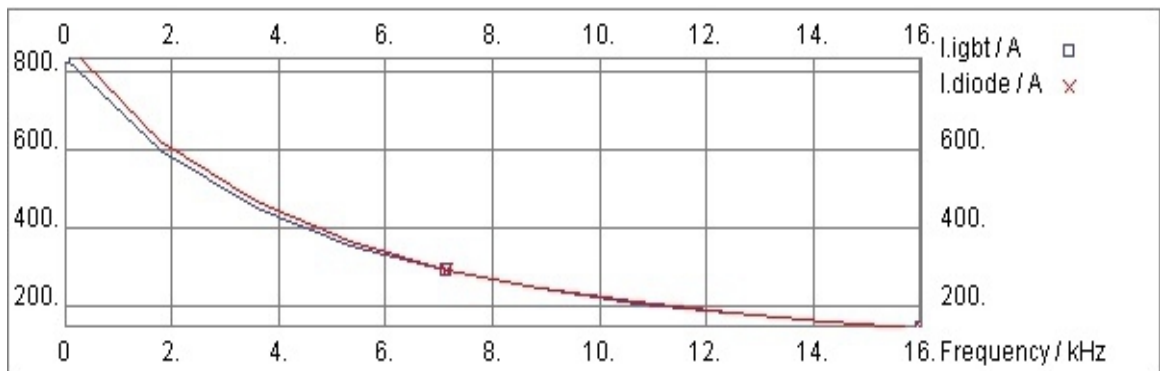
Tab. 4: Parametry chlazení

	Rated current	Overload	f_{min} and Overload
$P_{cond tr}$	85 W	191 W	119 W
$P_{sw tr}$	210 W	468 W	464 W
P_{tr}	295 W	659 W	583 W
$P_{cond d}$	14 W	29 W	102 W
$P_{sw d}$	81 W	159 W	162 W
P_d	94 W	188 W	265 W
P_{tot}	2337 W	5082 W	5088 W
	Average Values	Average Values	Maximum Values
T_s	81 °C	102 °C	102 °C
T_c	81 °C	102 °C	102 °C
T_{tr}	86 °C	112 °C	120 °C
T_d	84 °C	107 °C	118 °C

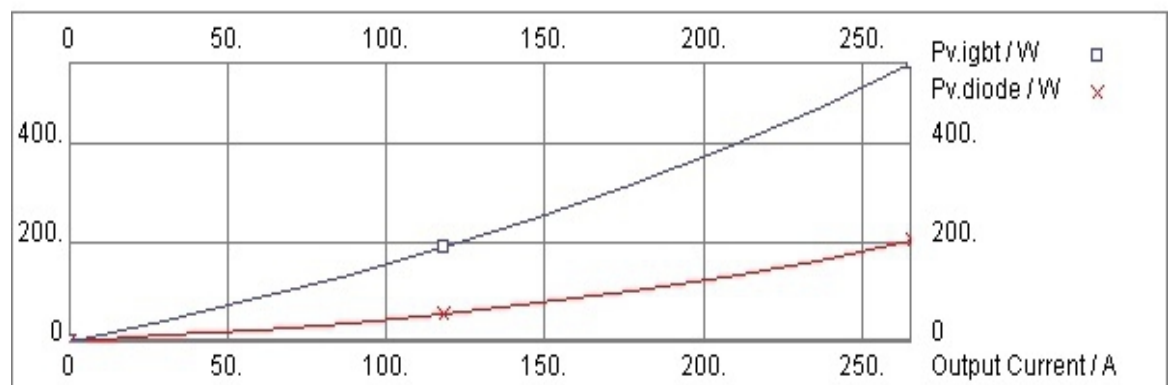
Tab. 5: Vypočtené ztráty pro režim Jízda - Semisel



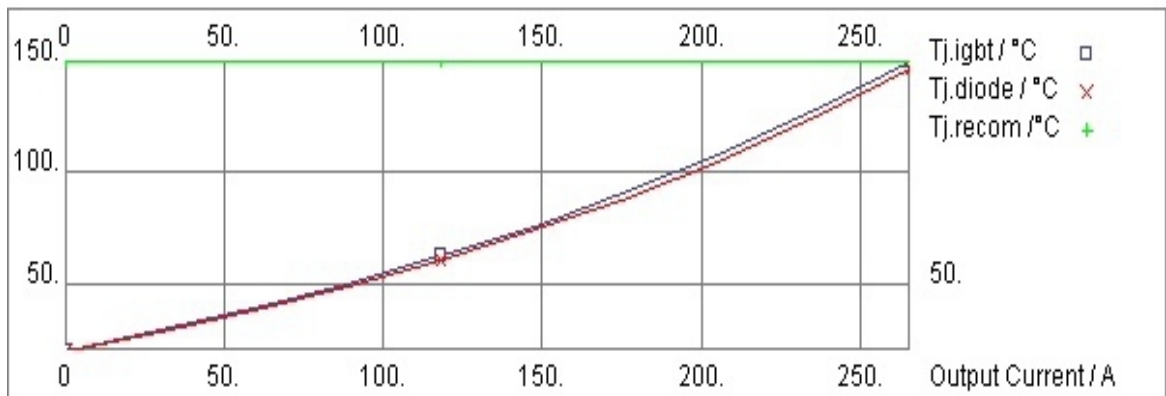
Obr. 23: Teplotní charakteristika pro režim jízda - Semisel



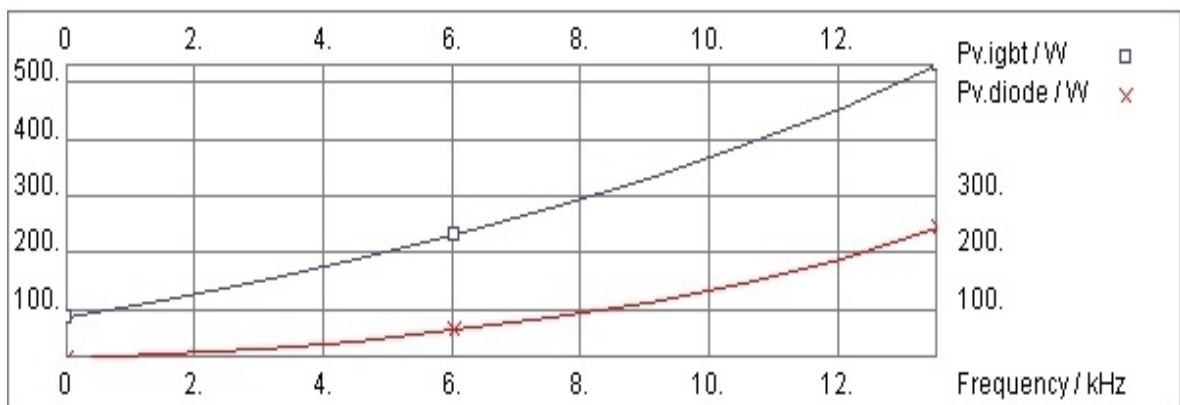
Obr. 24: Závislost proudu na spínací frekvenci



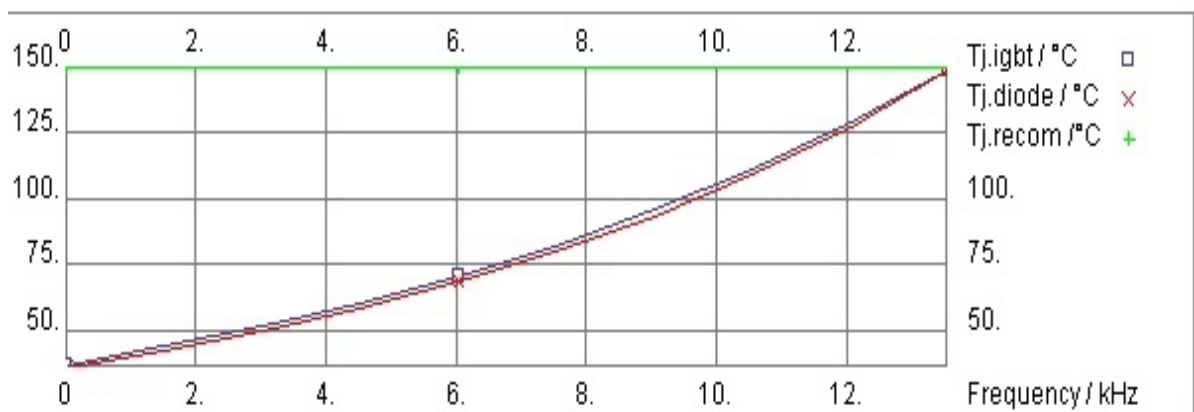
Obr. 25: Závislost ztrát na výstupním proudu



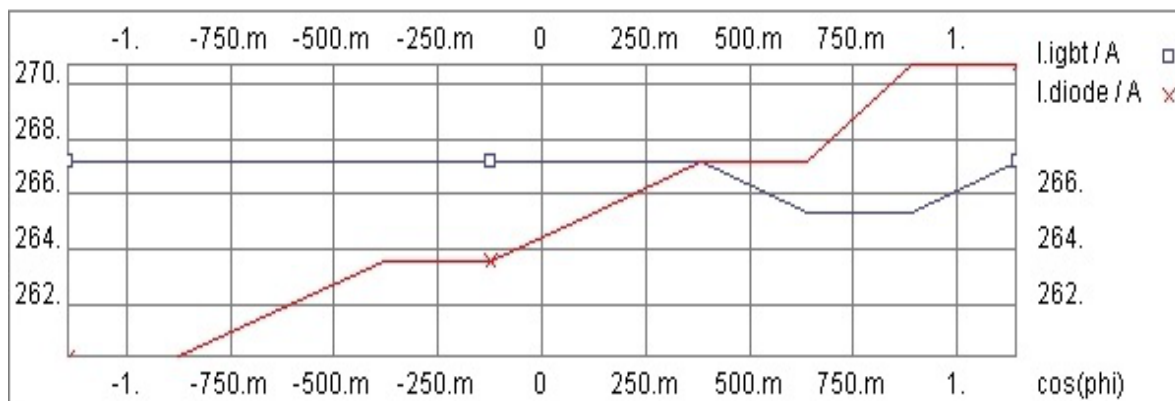
Obr. 26: Závislost teploty přechodu na výstupním proudu



Obr. 27: Závislost ztrát na spínací frekvenci



Obr. 28: Závislost teploty na spínací frekvenci



Obr. 29: Závislost výstupního proudu na účinníku

V Tab. 6 se nacházejí hodnoty ztrát pro spínací frekvenci 13 kHz. Teploty pro toto nastavení už se nacházejí mimo rozmezí vytyčené výrobcem. Charakteristiky mají takřka totožné průběhy s výjimkou skutečnosti, že se dostávají za maximální povolené hodnoty obsažené v datasheetu výrobce. Z tohoto důvodu zde nejsou uvedeny.

	Rated current	Overload	f_{min} and Overload
$P_{cond tr}$	84 W	193 W	120 W
$P_{sw tr}$	429 W	1006 W	996 W
P_{tr}	513 W	1199 W	1116 W
$P_{cond d}$	13 W	27 W	96 W
$P_{sw d}$	220 W	455 W	457 W
P_d	233 W	481 W	553 W
P_{tot}	4473 W	10079 W	10015 W
	Average Values	Average Values	Maximum Values
T_s	136 °C	178 °C	176 °C
T_c	136 °C	178 °C	176 °C
T_{tr}	145 °C	195 °C	211 °C
T_d	144 °C	191 °C	209 °C

Tab. 7: Vypočtené ztráty pro spínací frekvenci 13 kHz

Maximální hodnota spínací frekvence pro obvod s parametry uvedenými výše se nachází na 11,2 kHz. Vypočtené teploty jsou v požadované toleranci (viz. Tab.8). Výrobce však

doporučuje, aby zařízení typu Skiip 1814 GB17E4 nebylo trvale provozováno při teplotách přesahujících 150 °C.

	Rated current	Overload	f_{\min} and Overload
$P_{\text{cond tr}}$	85 W	192 W	120 W
$P_{\text{sw tr}}$	337 W	775 W	768 W
P_{tr}	422 W	967 W	888 W
$P_{\text{cond d}}$	13 W	28 W	99 W
$P_{\text{sw d}}$	156 W	318 W	321 W
P_{d}	169 W	346 W	420 W
P_{tot}	3545 W	7876 W	7846 W
	Average Values	Average Values	Maximum Values
T_{s}	112 °C	145 °C	144 °C
T_{c}	112 °C	145 °C	144 °C
T_{tr}	120 °C	159 °C	172 °C
T_{d}	118 °C	155 °C	169 °C

Tab. 8: Vypočtené ztráty pro spínací frekvenci 11,2 kHz

Závěr

Předmětem této práce byl trakční měnič určený pro moderní tramvaj s typovým označením 26T, vyvinutý společností Škoda Electric a.s.. Hlavními prvky práce jsou jednak podrobný rozbor reálné podoby zmíněné trakční jednotky a jednak její simulace za účelem změření veličin, následné možnosti dimenzování a výpočtu ztrát.

Co se týče simulace v programu Simplorer, vzhledem k omezeným možnostem simulace studentské verze jsem se snažil co nejvíce přiblížit reálným podmínkám běhu střídače a sledovat vliv rozměru jednotlivých komponentů na výsledné průběhy. Dle teoretického předpokladu má velký vliv na průběh proudu v motoru kondenzátor na vstupu střídače (řídící signál a úhel řízení je samozřejmostí). Nebyly však uvažovány všechny možnosti, které mohou v reálném životě nastat, např. vliv parazitních induktivností vznikající vlivem dlouhého vedení.

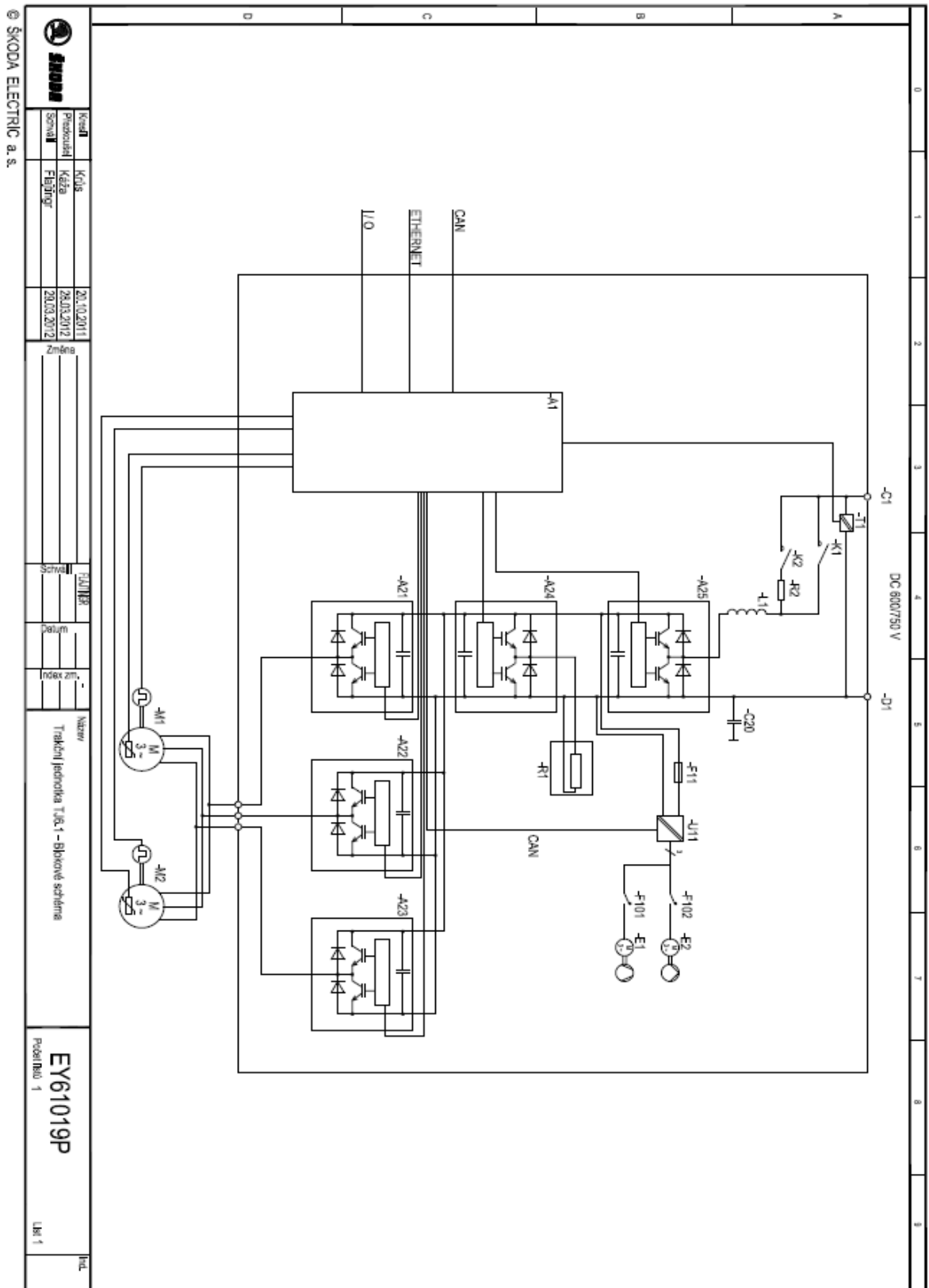
V další části pak byl použit program Semisel (Semikron) pro výpočet ztrát. Jedná se o velmi přehledný program. I zde, na základě poskytnutých podkladů firmou Škoda Electric a.s., byly nejdříve simulovány reálné podmínky funkce trakční jednotky. Veškeré hodnoty vyšly v toleranci a shodě s hodnotami datasheetu daného prvku. Poté byly provedeny pokusy na přetěžování střídače, či lépe řečeno pokus o to, aby se výstupní průběhy co nejvíce přibližovali ideálním. Zde se ovšem hodnoty dostaly již mimo vymezenou výseč. Pokud se simulace pohybovala na hraně, hodnoty odpovídaly mezním hodnotám datasheetu, ale na doporučení výrobce by se v takovémto stavu měly testované moduly vyskytovat co nejméně a co nejkratší dobu, nejlépe však vůbec.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Danzer, J.: *Elektrická trakce 4. - Vozidla s asynchronním pohonem (2. vydání)*, Plzeň 2010
- [2] Flajtingr, J.; Kule, L.: *Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči*, 2. upravené vydání, Západočeská Univerzita, Plzeň 2005
- [3] Vondrášek, F.: *Výkonová elektronika – svazek III*, Vydavatelství Západočeské Univerzity, Plzeň 1998
- [4] <http://dhservis.cz/psm.htm>
- [5] <http://fei1.vsb.cz/kat430/old/studium/materialy/vs/kap5.pdf>
- [6] <http://semisel.semikron.com>
- [7] <http://homen.vsb.cz/~s1i95/mhd/znakymhd2.htm>


Přílohy

Příloha 1.: Blokové schéma trakční jednotky



Příloha 2.: Výběr z datasheetu - SKiIP 1814 GB17E4 - 3DUL

SKiIP 1814 GB17E4-3DUL



SKiIP® 4

2-pack-integrated intelligent Power System

SKiIP 1814 GB17E4-3DUL

Features

- Intelligent Power Module
- Integrated current and temperature measurement
- Integrated DC-link measurement
- Solder free power section
- IGBT4 and CAL4F technology
- $T_{jmax} = 175^{\circ}\text{C}$
- Safety isolated switching and sensor signals
- Digital signal transmission
- 100% tested IPM
- RoHS compliant
- UL recognition in progress, file no. E242581

Typical Applications*

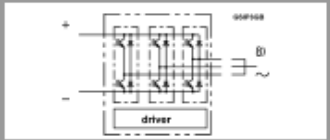
- Renewable energies
- Traction
- Elevators
- Industrial drives

Remarks

For further information please refer to SKiIP®4 Technical Explanation

Absolute Maximum Ratings			
Symbol	Conditions	Values	Unit
System			
V_{OC}	Operating DC link voltage	1300	V
V_{isol}	DC, $t = 1$ s, each polarity	5600	V
$I_{l(RMS)}$	per AC terminal, rms, sinusoidal current	500	A
$I_{max (peak)}$	Max. peak current of power section	2700	A
f_{out}	fundamental output frequency	1	kHz
T_{stg}	storage temperature	-40 ... 85	$^{\circ}\text{C}$
IGBT			
V_{CES}	$T_j = 25^{\circ}\text{C}$	1700	V
I_C	$T_j = 175^{\circ}\text{C}$	2547	A
	$T_a = 70^{\circ}\text{C}$	2049	A
I_{Cnom}		1800	A
T_j	junction temperature	-40 ... 175	$^{\circ}\text{C}$
Diode			
V_{RRM}	$T_j = 25^{\circ}\text{C}$	1700	V
I_F	$T_j = 175^{\circ}\text{C}$	1771	A
	$T_a = 70^{\circ}\text{C}$	1401	A
I_{Fnom}		1800	A
T_j	junction temperature	-40 ... 175	$^{\circ}\text{C}$
Driver			
V_s	power supply	19.2 ... 28.8	V
V_{IH}	input signal voltage (high)	$V_s + 0.3$	V
dv/dt	secondary to primary side	75	$\text{kV}/\mu\text{s}$
f_{sw}	switching frequency	15	kHz

Characteristics					
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Unit
IGBT					
$V_{CE(sat)}$	$I_C = 1800$ A at terminal	$T_j = 25^{\circ}\text{C}$	2.12	2.49	V
		$T_j = 150^{\circ}\text{C}$	2.58	2.79	V
V_{CE0}		$T_j = 25^{\circ}\text{C}$	1.10	1.20	V
		$T_j = 150^{\circ}\text{C}$	1.00	1.10	V
r_{CE}	at terminal	$T_j = 25^{\circ}\text{C}$	0.57	0.71	$\text{m}\Omega$
		$T_j = 150^{\circ}\text{C}$	0.88	0.94	$\text{m}\Omega$
$E_{on} + E_{off}$	$I_C = 1800$ A $T_j = 150^{\circ}\text{C}$	$V_{CC} = 900$ V	1335		mJ
		$V_{CC} = 1300$ V	2130		mJ
$R_{th(j-a)}$	per IGBT switch			0.0183	K/W
$R_{th(j-r)}$	per IGBT switch			0.011	K/W



S34

© by SEMIKRON

Rev. 3 – 15.12.2011

1

SKiIP 1814 GB17E4-3DUL



SKiIP® 4

2-pack-integrated intelligent Power System

SKiIP 1814 GB17E4-3DUL

Features

- Intelligent Power Module
- Integrated current and temperature measurement
- Integrated DC-link measurement
- Solder free power section
- IGBT4 and CAL4F technology
- $T_{jmax} = 175^{\circ}\text{C}$
- Safety isolated switching and sensor signals
- Digital signal transmission
- 100% tested IPM
- RoHS compliant
- UL recognition in progress, file no. E242581

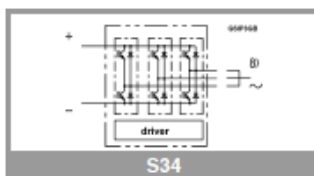
Typical Applications*

- Renewable energies
- Traction
- Elevators
- Industrial drives

Remarks

For further information please refer to SKiIP®4 Technical Explanation

Characteristics					
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Unit
System					
$t_{d(on)O}$	$V_{OC} = 1300\text{ V}$ $I_C = 1800\text{ A}$ $T_J = 25^{\circ}\text{C}$		turn on propagation delay time	2.8	μs
$t_{d(off)O}$	$V_{OC} = 1300\text{ V}$ $T_J = 25^{\circ}\text{C}$		turn off propagation delay time	2.6	μs
dV_{CE}/dt_{on}	$T_J = 25^{\circ}\text{C}$ $V_{OC} = 1300\text{ V}$		$I_C = 0\text{ A}$	9	$\text{kV}/\mu\text{s}$
			$I_C = 1800\text{ A}$	2	$\text{kV}/\mu\text{s}$
dV_{CE}/dt_{off}			$I_C = 1800\text{ A}$	9	$\text{kV}/\mu\text{s}$
$R_{th(s-a)}$	flow rate = $610\text{ m}^3/\text{h}$, $T_a = 25^{\circ}\text{C}$, 500m above sea level			0.026	K/W
R_{OC+EE}	terminals to chip, $T_a = 25^{\circ}\text{C}$			0.09	$\text{m}\Omega$
L_{CE}	commutation inductance			6	nH
C_{CHC}	coupling capacitance secondary to heat sink			4.8	nF
C_{ps}	coupling capacitance primary to secondary			0.067	nF
$I_{CES} + I_{RD}$	$V_{GE} = 0\text{ V}$, $V_{CE} = 1700\text{ V}$, $T_J = 25^{\circ}\text{C}$			0.211	mA
M_{ds}	DC terminals	6		8	Nm
M_{ac}	AC terminals	13		15	Nm
w	SKiIP System w/o heat sink			2.48	kg
w_h	heat sink			5.9	kg



S34

SKiP 1814 GB17E4-3DUL

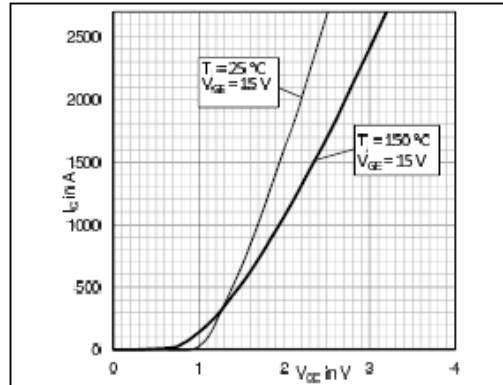


Fig. 1: Typical IGBT output characteristics

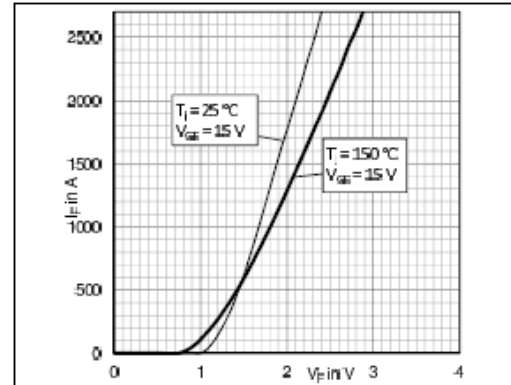


Fig. 2: Typical diode output characteristics

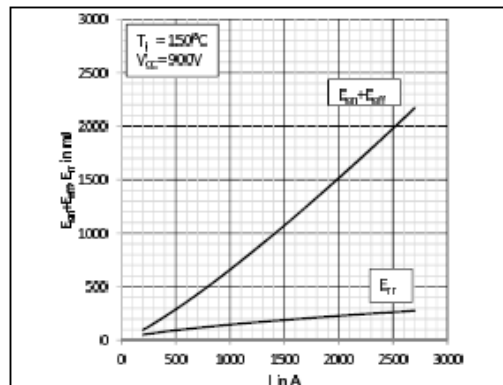


Fig. 3: Typical energy losses $E = f(I_C, V_{CE}, T_J)$

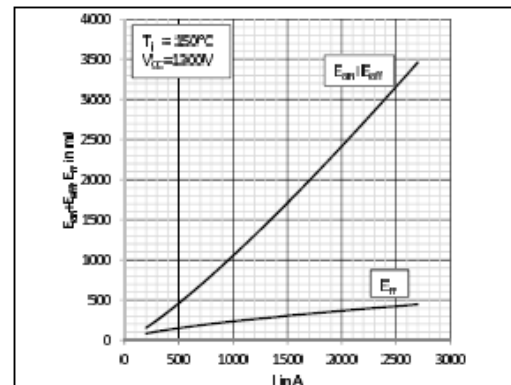


Fig. 4: Typical energy losses $E = f(I_C, V_{CE}, T_J)$

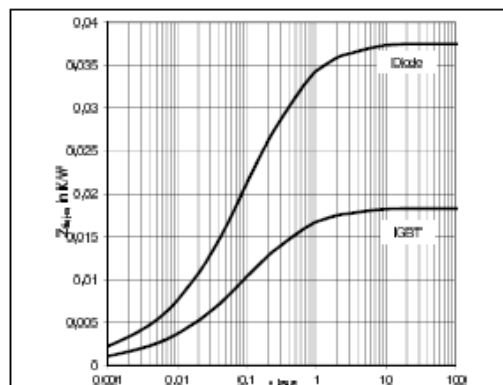


Fig. 5: Transient thermal impedance $Z_{th}(j-s)$

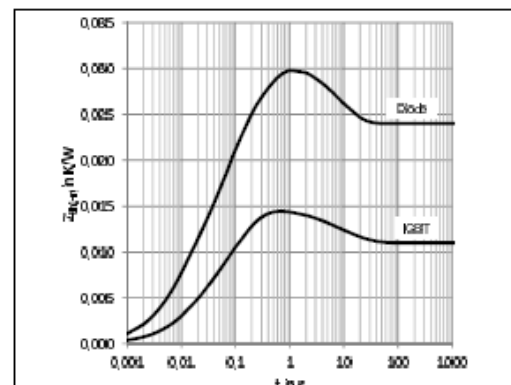


Fig. 6: Transient thermal impedance $Z_{th}(j-r)$