



Pracoviště: Regionální inovační centrum elektrotechniky

Výzkumná zpráva č.: 22160 – 008 - 2013

Dvoukvadrantový pulzní měnič s MOSFETovými tranzistory v pouzdře DirectFET

Druh úkolu: Vědecko-výzkumný

Řešitelé: Ing. Jan Štěpánek

Vedoucí úkolu: Ing. Luboš Streit

Počet stran: 17

Datum vydání: Listopad 2013

Revize: 1

Práce vznikla s podporou projektu SGS – 2012 - 071

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá návrhem výkonového měniče pro elektrickou motokáru „FeLis“. Dovoukvantrantový pulzní měnič je optimalizován mechanickou konstrukcí a volbou spínacích součástí tak aby byli co možná nejvíce omezeny parazitní indukčnosti a tím vznikající spínací přepětí. Velký důraz byl kladen na rozměry, váhu a samozřejmě na spolehlivost. Navržený měnič nahradí stávající výkonový měnič provozovaný v elektrické motokáře „FeLis“.

Obsah

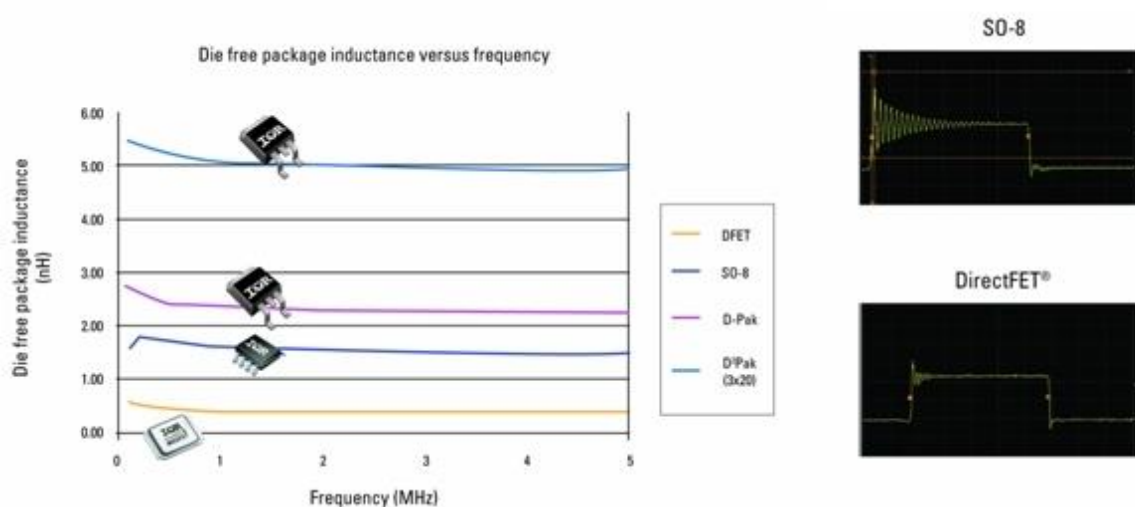
1	ÚVOD	3
2	TRANZISTORY IRF7769L2TRPBF V POUZDŘE DIRECTFET	3
	2.1.2 MOSFETový tranzistor IRFP4568PbF	5
	2.1.3 Parametry tranzistoru IRF7769L2TRPbF	6
3	MĚNIČ	7
	3.1 Funkční prototyp měniče s tranzistory IRFP4568PbF	8
	3.2 Měnič s tranzistory IRF7769L2PbF v pouzdře DirectFET	9
	3.3 DirectFETový měnič DPS	10
	3.3.2 Thermal-Clad a IMS	11
	3.3.3 Varianta I DPS vyrobená z Thermal-Cladu	12
	3.3.4 Varianta II s použitím tří vrstvé DPS	13
4	ZÁVĚR	14

Úvod

Tato výzkumná zpráva se zabývá návrhem výkonového měniče s MOSFET tranzistorem v pouzdře DirectFET a návrhem silového obvodu pro tyto tranzistory. Porovnáním již funkčního měniče s MOSFET tranzistorem v pouzdře TO-247AC a tranzistorů v pouzdře DirectFET.

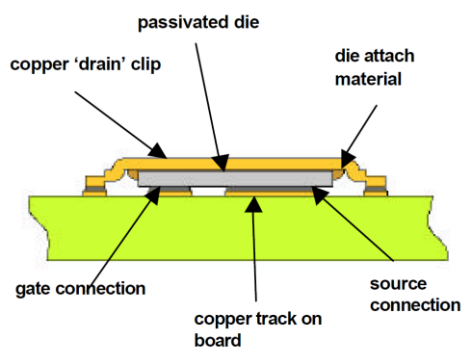
1 Tranzistory IRF7769L2TRPbF v pouzdře DirectFET

Jsou nové výkonové tranzistory od výrobce IRF v pouzdře DirectFET patří do kategorie PowerMOSFET. Tranzistor je konstruovaný tak, aby byli omezeny maximálně parazitní indukčnosti vznikající přímo na čipu a v pouzdře tranzistoru. Omezení parazitních indukčností vznikajících v pouzdře tranzistoru je velmi dobře patrné z Obr.1.1., kde jsou k porovnání i další SMD pouzdra používaná pro výkonové tranzistory. Dále jsou na obrázku vidět oscilogramy pro pouzdro SO-8 a DirectFET. Zde jsou znázorněny spínací přepětí vznikající přímo na vývodních pinech jednotlivých tranzistorů.

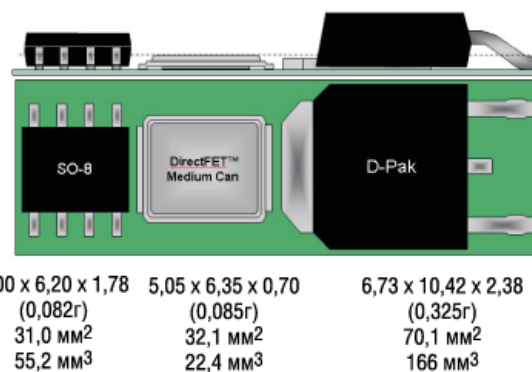


Obr.1.1 Přepětí vznikají při spínání na čipu a vývodech tranzistoru

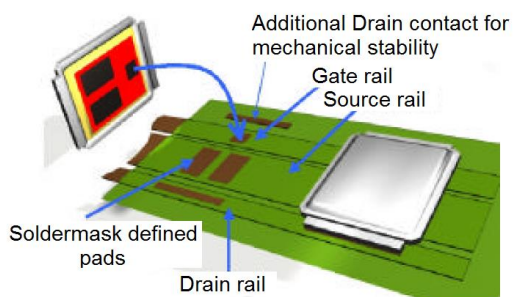
Vývody tranzistoru viz. Obr.1.2 (Gate, Source, Drain) jsou také optimalizovány pro co možná nejúčinnější vyvedení výkonu se zachováním velmi nízkých parazitních indukčností. Pouzdro DirectFET je navrženo pro možnost přímého paralelního spojení jak je znázorněno na Obr.1.4. Tranzistory v pouzdře DirectFET (DFET) mají velmi zajímavé parametry v porovnání s dalšími pouzdry například SO-8, D-Pak, D2Pak, QFN.



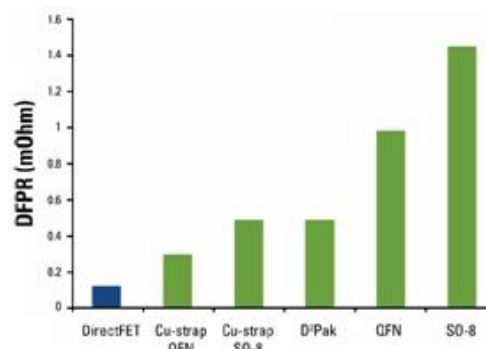
Obr.1.2 Vývody tranzistoru



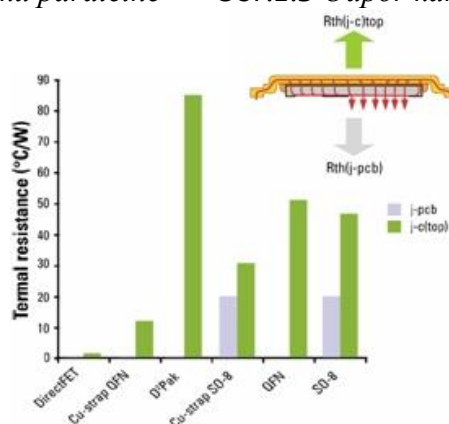
Obr.1.3 Rozměry pouzdra



Obr.1.4 Možné spojení více prvků paralelně



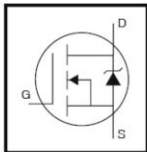
Obr.1.5 Odpor kanálu D-S v sepnutém stavu

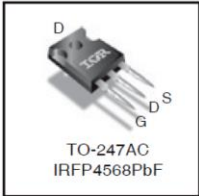


Obr.1.6 Tepelný odpor pouzdra

Oproti těmto pouzdrům dosahují tranzistory velmi nízkého odporu kanálu D-S v sepnutém stavu viz. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Díky nízkému odporu kanálu D-S v sepnutém stavu dosahují DirectFETy nízkých vodivostních ztrát. Pouzdro DirectFET tranzistoru se vyznačuje nízkým tepelným odporem viz. Obr.1.6. Konstrukce tranzistoru na Obr.1.2 Samotné pouzdro je velmi malé viz. Obr.1.3 v porovnání s běžně používanými pouzdry to přináší velmi velkou úsporu místa na výsledné desce plošného spoje.

1.1.2 MOSFETový tranzistor IRFP4568PbF

	V_{DSS}	150V
	$R_{DS(on)}$ typ.	4.8m Ω
	max.	5.9m Ω
	I_D (Silicon Limited)	171

		
TO-247AC IRFP4568PbF		

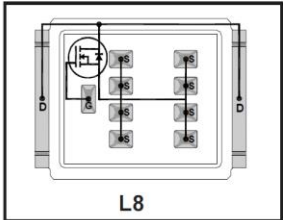
G	D	S
Gate	Drain	Source

Obr.1.7 Tranzistor IRFP4568PbF

Tabulka 1: Základní parametry MOSFETového tranzistoru IRFP4568PbF		
Parametr	Hodnota	Popis
Pouzdro	TO-247AC	
V_{BRDS}	150 V	Průrazné napětí na kanále D – S
V_{GSmax}	30 V	Napětí na G - S
$R_{DS(on)}$	5,9 m Ω	Odpor kanálu D – S v sepnutém stavu
$I_D(25^{\circ}C)$	171 A	Proud tranzistorem při 25°C na čipu
$I_D(100^{\circ}C)$	121 A	Proud tranzistorem při 100°C na čipu
Q_G	227 nC	Celkový náboj hradla
C_{iss}	10470 pF	Kapacita hradla
$t_{d(on)}$	27 ns	Čas potřebný k sepnutí tranzistoru
t_r	119 ns	Čas potřebný pro úplné otevření tranzistoru
$t_{d(off)}$	47 ns	Čas potřebný k vypnutí tranzistoru
t_f	84 ns	Čas potřebný pro úplné vypnutí tranzistoru

1.1.3 Parametry tranzistoru IRF7769L2TRPbF

V_{DSS}	V_{GS}	$R_{DS(on)}$
100V min	$\pm 20V$ max	$2.8m\Omega @ 10V$
Q_g tot	Q_{gd}	$V_{gs(th)}$
200nC	110nC	2.7V




Obr.1.8 Tranzistor IRF7769L2PbF

Tabulka 2: Základní parametry MOSFETového tranzistoru IRF7769L2TRPbF		
Parametr	Hodnota	Popis
Pouzdro	L8	DirectFET ISOMETRIC
V_{BRDS}	100 V	Průrazné napětí na kanále D – S
V_{GSmax}	± 20 V	Napětí na G - S
$R_{DS(on)}$	2,8 m Ω	Odpor kanálu D – S v sepnutém stavu
$I_D(25^\circ C)$	124 A	Proud tranzistorem při 25°C na čipu
$I_D(100^\circ C)$	88 A	Proud tranzistorem při 100°C na čipu
Q_G	200 nC	Celkový náboj hradla
C_{iss}	11560 pF	Kapacita hradla
$t_{d(on)}$	44 ns	Čas potřebný k sepnutí tranzistoru
t_r	32 ns	Čas potřebný pro úplné otevření tranzistoru
$t_{d(off)}$	92 ns	Čas potřebný k vypnutí tranzistoru
t_f	41 ns	Čas potřebný pro úplné vypnutí tranzistoru

2 Měnič

Dvoukvadrantový pulzní měnič navrhovaný pro použití v elektrické motokáře bude provozován jako snižovací měnič pro režim pohon, a jako zvyšovací měnič pro možnost rekuperace brzděné energie. Měnič musí splňovat požadavky uvedené v *Tabulce 3*, jsou to mezní parametry baterií a motoru. Mezi nejdůležitější parametry patří napětí na baterii a spínací frekvence měniče 16 kHz je minimální frekvence při, které je možné motor provozovat.

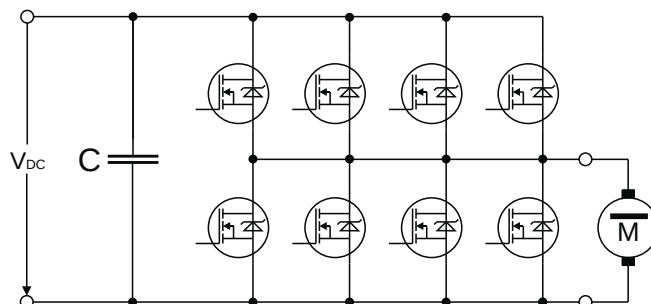
Tabulka 3: Požadavky na měnič	
$U_d = 0 - 48 \text{ V}$	Napětí na motoru
$U_{in} = 40 - 68 \text{ V}$	Napětí baterie
$I_d = 100 \text{ A}$	Jmenovitý proud motorem
$I_{dmax} = 300 \text{ A}$	Maximální proud motorem
$F_{sw \min} = 16 \text{ kHz}$	Spínací frekvence měniče
$T_a = 25 - 45 \text{ °C}$	Teplota okolí

MOSFETové tranzistory mají implementované zpětné diody přímo v pouzdře. Ty se používají jen pro překrytí mrtvých časů nutných při spínání tranzistorů jinak, jsou překlenuty sepnutím příslušného tranzistoru. Této výhody lze využít z důvodu obousměrné vodivosti MOSFETů. Významně se tím sníží ztráty a také se zvedne maximální možná spínací frekvence.

Pro pohon elektrické motokáry je použit stejnosměrný komutátorový motor s permanentními magnety o výkonu 5 kW s možností přetížení na 15 kW. Vzhledem k nízké indukčnosti ($L = 38 \text{ } \mu\text{H}$) motoru je nutná relativně vysoká spínací frekvence minimálně 16 kHz a vhodný řídicí algoritmus.

2.1 Funkční prototyp měniče s tranzistory IRFP4568PbF

Funkční prototypový měnič je na Obr.2.9, tento měnič je postaven ze 4 paralelně řazených tranzistorů v horní a dolní skupině. Měnič dosahuje požadovaných parametrů v Tabulka 3 jen bohužel jeho spínací frekvence je omezena budícími obvody a řídicím mikrokontrolérem na minimální spínací frekvenci a to 16 kHz. Další podrobnosti o návrhu měniče jsou v diplomové práci Stavba pulzního měniče s MOSFET tranzistory.

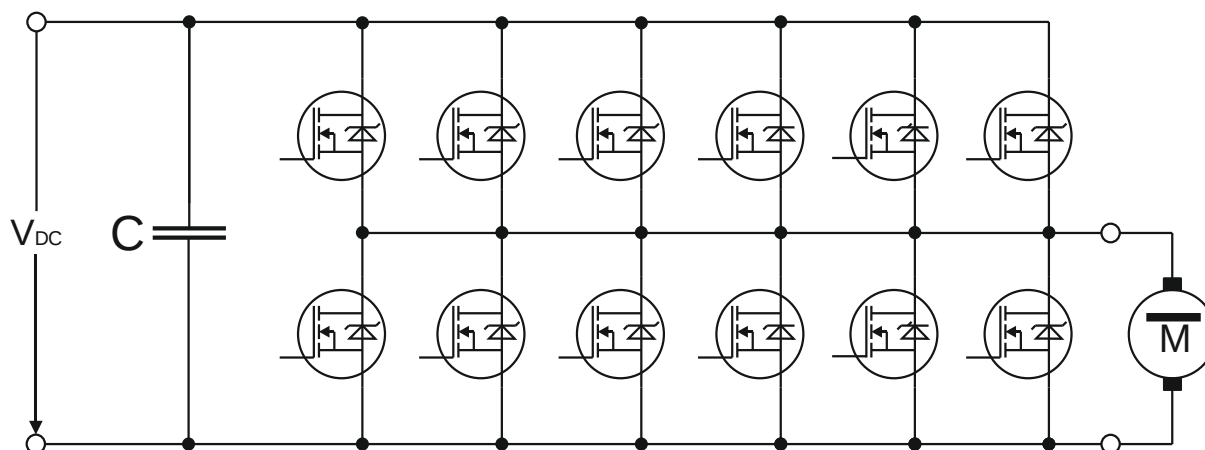


Obr.2.9 MOSFETový měnič s tranzistory IRFP4568PbF

Tabulka 4: Základní parametry měniče s tranzistory IRFP4568PbF		
Parametr	Hodnota	Popis
I_N	100 A	Jmenovitý proud měniče
I_{MAX}	300 A	Maximální proud měniče
U_{MAX}	100 V	Maximální dovolené napětí na vstupu měniče
F_{swMAX}	16 kHz	Maximální možná spínací frekvence
P_{ved}	76 W	Ztrátový tepelný výkon vzniklý na tranzistoru
P_{sw}	7 W	Ztrátový tepelný výkon vzniklý spínáním na tranzistoru
P_{tot}	332 W	Celkový ztrátový výkon měniče
R_{TH}	0,1 K/W	Potřebný tepelný odpor chladiče pro měnič

2.2 Měnič s tranzistory IRF7769L2PbF v pouzdře DirectFET

Prototyp měniče na Obr.2.10 je postaven z 6 paralelně řazených DirectFETových tranzistorů v horní a dolní skupině. Měnič dosahuje požadovaných parametrů v Tabulka 3. Oproti předešlému měniči dosahuje spínací frekvence 50 kHz. Na této frekvenci je možné měnič provozovat díky novým budícím obvodům a velmi dobrým vlastnostem DirectFETových tranzistorů.

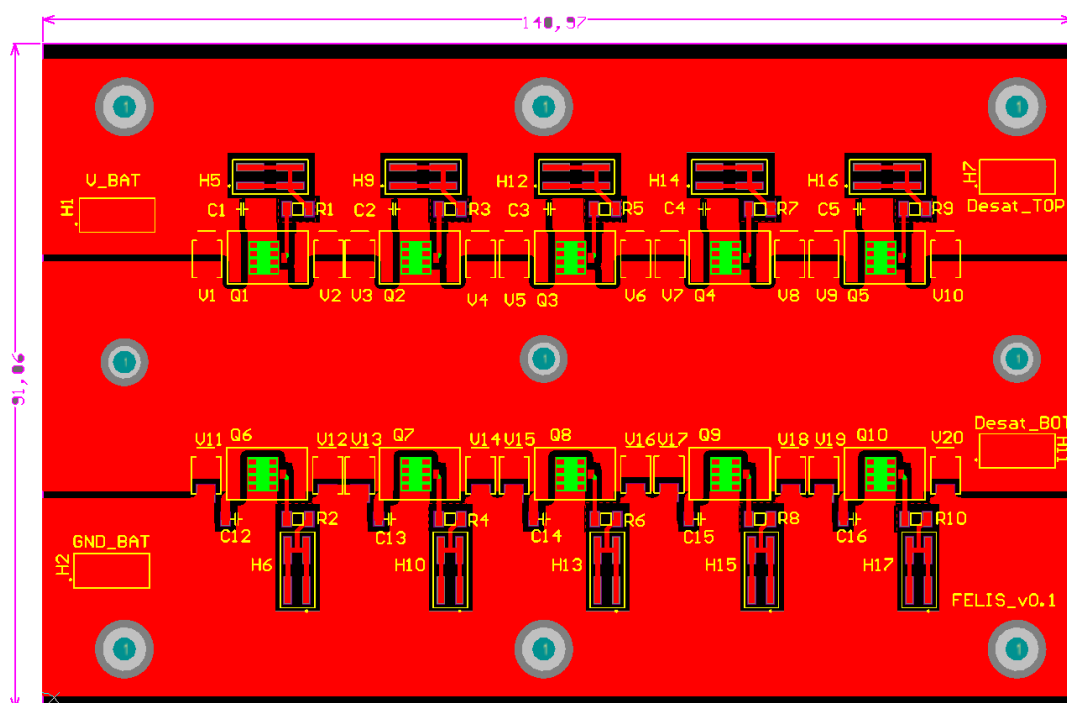


Obr.2.10 MOSFETový měnič s tranzistory IRF7769L2PbF

Tabulka 4: Základní parametry měniče s tranzistory IRF7769L2PbF		
Parametr	Hodnota	Popis
I_N	100 A	Jmenovitý proud měniče
I_{MAX}	500 A	Maximální proud měniče
U_{MAX}	75 V	Maximální dovolené napětí na vstupu měniče
F_{swMAX}	50 kHz	Maximální možná spínací frekvence
P_{ved}	32 W	Ztrátový tepelný výkon vzniklý na tranzistoru
P_{sw}	8 W	Ztrátový tepelný výkon vzniklý spínáním na tranzistoru
P_{tot}	160 W	Celkový ztrátový výkon měniče
R_{TH}	0,23 K/W	Potřebný tepelný odpor chladiče pro měnič

2.3 DirectFETový měnič DPS

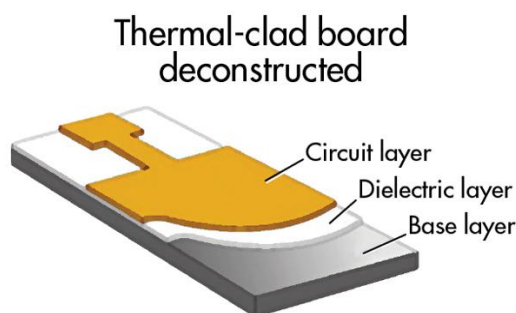
Návrh desky plošného spoje s výkonovým obvodem bylo složité. Mezi hlavní problémy vznikající při návrhu patří přivedení napájení a vyvedení výkonu. Velkým problémem a stále plně nedořešeným je materiál ze, kterého je vhodné desku plošného spoje vyrobit. Deska plošného spoje bude osazena DirectFETovými tranzistory motiv je na Obr.2.11. Plošný spoj musí být schopen po omezenou dobu přenést proud 500 A dle specifikace viz. Tabulka 3. Proud tekoucí přes desku plošného spoje bude po většinu času řádově nižší zhruba 100 A.



Obr.2.11 Deska plošného spoje pro měnič s DirectFET tranzistory

Motiv desky plošného spoje je na Obr.2.11 je velice jednoduchý. DirectFETové tranzistory jsou upraveny tak, že se dají velice jednoduše řadit paralelně díky této vlastnosti je možné navrhout desku plošného spoje pouze v jedné vrstvě bez nutnosti použití drátových propojek či klem. Měnič vznikl ve dvou variantách a to dle použitého materiálu pro výrobu desky plošného spoje. První varianta je navržena pro materiál Thermal-Clad nebo IMS použití těchto materiálů je vhodné oba materiály se velice dobře chladí.

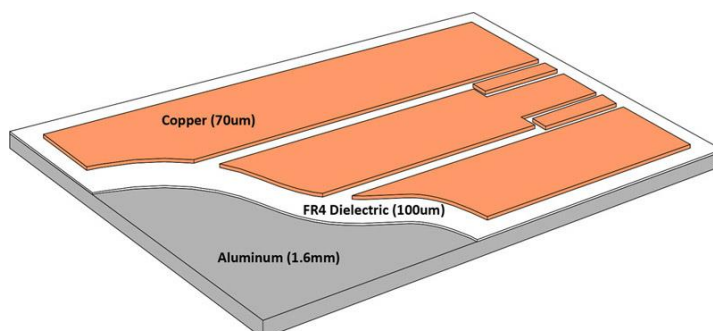
2.3.2 Thermal-Clad a IMS



Obr.2.12 Thermal_Clad

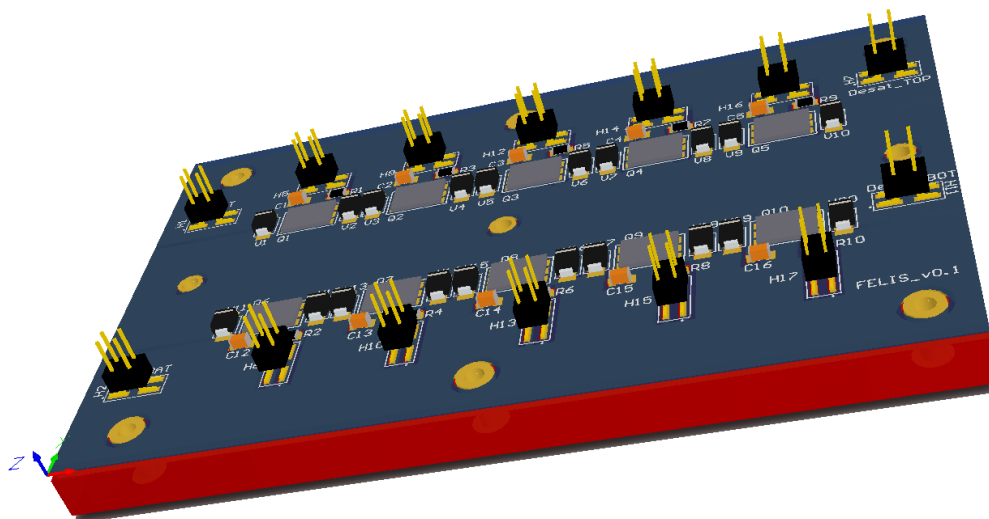
Materiály Thermal-Clad viz. Obr.2.12 a IMS viz. Obr.2.13 jsou navrženy tak aby co nejvíce odváděly teplo ze samotného plošného spoje. Z tohoto důvodu jsou materiály složeny ze tří vrstev, první vrstva (circuit layer) je vodivá měď, druhá vrstva (dielectric layer) je izolační z materiálu prepreg nebo FR4 a třetí vrstva (base layer) je z hliníku nebo mědi v tloušťce 1mm až 6mm. Base layer se stává chladičem plošného spoje, díky malému tepelnému odporu izolačního materiálu prepreg je odvod tepelného výkonu velmi zajímavý. Pro varianty s izolační vrstvou z dielektrického materiálu FR4 je odvod tepelného výkonu omezen tloušťkou dielektrického substrátu.

Thermal-clad se zdá být ideálním materiálem pro výrobu plošného spoje výkonového měniče. Díky jeho tepelným vlastnostem a možnosti naplátování silné vrstvy elektrické mědi (200 μ m - 300 μ m) při této tloušťce mědi není nutné plošný spoj dodatečně posilovat v místě přívodu napájení a výstupu měniče. Plošný spoj je schopný přenést ztrátový výkon vzniklý na DPS protékajícím proudem a ztrátový výkon vznikající na samotných tranzistorech do bez potenciálového chladiče.

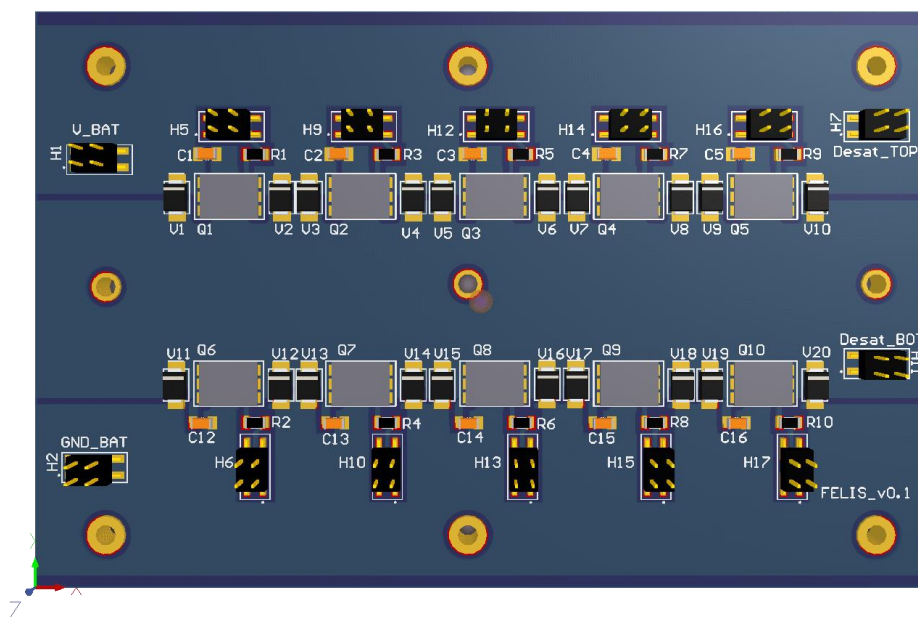


Obr.2.13 IMS

2.3.3 Varianta I DPS vyrobená z Thermal-Cladu



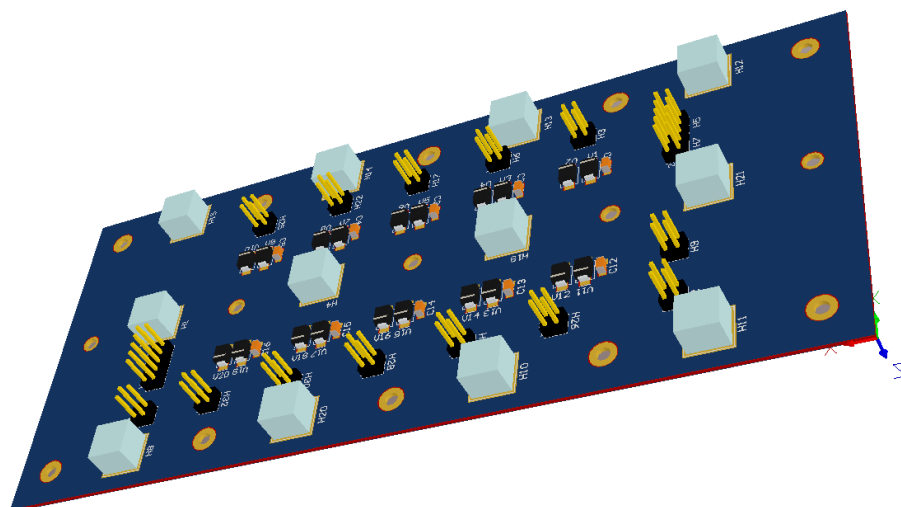
Obr.2.14 DirectFETový měnič na DPS z Thermal-Cladu



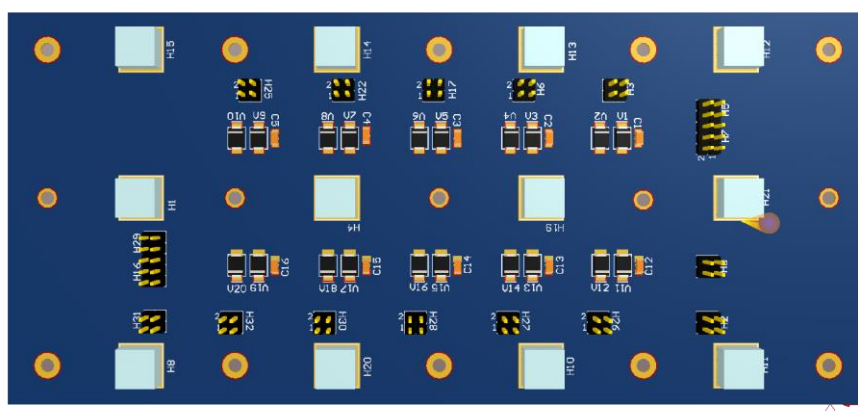
Obr.2.15 DirectFETový měnič na DPS z Thermal-Cladu

Výkonový měnič postavený na materiálu Thermal-clad je velice jednoduchý a robustní. Pro přivedení vstupního napájení a vyvedení výstupního výkonu je použita měděná pásovina o tloušťce 1mm, ta je na třech bodech přišroubována přes izolační podložky do chladiče.

2.3.4 Varianta II s použitím tří vrstvé DPS



Obr.2.16 Měnič postavený na tří vrstvé DPS



Obr.2.17 Měnič postavený na tří vrstvé DPS

Navržený plošný spoj má tři vodivé vrstvy. Tato varianta přináší velké potíže vzniklé protékajícím proudem, který DPS značně ohřívá. Nejvíce se ohřívá střední vrstva, které slouží jako výstup měniče vrchní a spodní vrstva jsou použity jako vstupní napájení. Na DPS jsou použity lisovací svorky (presfit) a to pro přivedení napájení měniče a vyvedení výstupního výkonu z měniče. Nalisované a zaletované presfity slouží také jako odvod tepla z DPS do měděných hranolů, kterými je posílený plošný spoj. Celá osazená DPS je připevněna na bez potenciálový chladič jako tepelná izolace je použita dielektrická a teplovodivá pěna (sarkon).

3 Závěr

Navržené a postavené výkonové měniče pro elektrickou motokáru splňují zadané parametry bez výjimky. Mezi hlavní přínos těchto měničů patří možnost zvýšení spínací frekvence a tím dosažení vyhlazeného výstupního proudu měniče. Díky tomuto zlepšení je možné stejnosměrný elektromotor sloužící jako pohon motokáry více přetěžovat a tím získat podstatně lepší jízdní vlastnosti. Velkým přínosem je také finální ucelené provedení měniče a budících obvodů kdy je vše zavřeno v jedné chladící krabici. To přineslo kompaktnost, úsporu celkové hmotnosti, zvýšení IP krytí a velmi se zlepšil celkový design elektrické motokáry.

Seznam obrázků

Obr.2.1 Přepětí vznikají při spínání na čipu a vývodech tranzistoru	3
Obr.2.2 Vývody tranzistoru	4
Obr.2.3 Rozměry pouzdra	4
Obr.2.4 Možné spojení více prvků paralelně	4
Obr.2.5 Odpor kanálu D-S v sepnutém stavu	4
Obr.2.6 Tepelný odpor pouzdra	4
Obr.2.7 Tranzistor IRFP4568PbF	5
Obr.2.8 Tranzistor IRF7769L2PbF	6
Obr.3.9 MOSFETový měnič s tranzistorem IRFP4568PbF	8
Obr.3.10 MOSFETový měnič s tranzistorem IRF7769L2PbF	9
Obr.3.11 Deska plošného spoje pro měnič s DirectFET tranzistorem	10
Obr.3.12 Thermal_Clad	11
Obr.3.13 IMS	11
Obr.3.14 DirectFETový měnič na DPS z Thermal-Cladu	12
Obr.3.15 DirectFETový měnič na DPS z Thermal-Cladu	12
Obr.3.16 Měnič postavený na třívrstvé DPS	13
Obr.3.17 Měnič postavený na třívrstvé DPS	13

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum Jméno / Odd.