

**České vysoké učení technické v Praze**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrických pohonů a trakce

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
ADIP25

**Návrh a realizace řídicí a silové sběrnice  
modulárního měniče**



2015

Bc. Tomáš Lněnička

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Tomáš Lněnička**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Název tématu: **Návrh a realizace řídicí a silové sběrnice modulárního měniče**

Pokyny pro vypracování:

- 1) V součinnosti s autorem diplomové práce [1] navrhnete koncept modulárního měniče
- 2) Zvolte vhodnou architekturu tak, aby bylo možno kombinovat moduly různého výkonu
- 3) Zvolte rozmístění signálů s ohledem na dodržení izolačních vzdáleností a impedančních poměrů
- 4) Navrhnete obvodové řešení desek backplane pro ovládací i silové signály 19" racku (viz ČSN EN 60297-n)
- 5) Pro návrh plošného spoje uvažujte výšku 6U
- 6) Připravte kompletní výrobní dokumentaci pro oba plošné spoje umožňující zhotovení jednotek u externích výrobců
- 7) Po celou dobu vývoje ukládejte podklady ve verzovacím systému Mercurial

Seznam odborné literatury:

- [1] KLINGER, Jakub. *Návrh základní desky zásuvného modulu tranzistorového půlmůstku pro univerzální měnič*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [2] ZÁHLAVA, Vít. *Metodika návrhu plošných spojů*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 2000, 81 s. ISBN 80-010-2193-9.
- [3] PAVELKA, Jiří, Zdeněk ČEŘOVSKÝ a Jiří LETTL. *Výkonová elektronika*. 3. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 2007, 227 s. ISBN 978-80-01-03626-6.

Vedoucí: Ing. Stanislav Flígl, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 1. 10. 2014

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne: 7. května 2015

Bc. Tomáš Lněnička

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Stanislavu Flíglovi, Ph.D. za užitečnou pomoc, trpělivost a cenné rady přímo z praxe při řešení technických problémů souvisejících s mojí diplomovou prací.

Rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Janu Bauerovi, Ph.D. za jeho příležitostné o to však neméně užitečné a cenné rady, které mi byly vždy k dispozici. Dále bych chtěl poděkovat mému kolegovi Bc. Jakobovi Klingerovi, s nímž jsem rád spolupracoval, za to, že jsme společně dokázali náš projekt dovést ke zdárnému konci.

## **Anotace – Abstract**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem propojovací karty (také známé pod názvem: „*Backplane*“) a spolu s diplomovou prací Bc. Jakuba Klingera tvoří návrh konceptu modulárního měniče. Námi vyvíjený měnič bude ve formátu 19“ subrack jednotky o výšce 6U obsahující až 14 zásuvných karet v souladu se standardem EN 60297. Hlavní funkce backplanu je umožňovat vzájemnou komunikaci jednotlivých zásuvných karet a řešit napájení, jak jednotlivých karet, tak i napájení silové pro funkci celého měniče. Z toho důvodu je backplane rozdělen na dvě poloviny, na signálovou, zajišťující komunikaci a napájení ovládacích obvodů zásuvných karet, a na silovou sběrnici, která zajišťuje přenos plného jmenovitého výkonu měniče mezi jednotlivými komponentami.

This diploma thesis deals with design of interconnecting board (also known as: “*Backplane*” which is a crucial part of “*Concept of modular inverter*” developed in cooperation with Bc. Jakub Klinger in the case of his diploma thesis. Suggested modular inverter is embedded into a 19” subrack unit of 6U height and can include up to 14 ECUs shaped in accordance with the EN 60297 standard. Main function of the backplane is to provide communication across all plug-in cards, to provide them with necessary supply for their control logic as well as for the power part. Due to these very diverse demands, the backplane is divided into two parts, the signal one for communication between the cards including power supply for control logic and the power part transferring up to the full nominal converter power among the particular components.

## **Klíčová slova – Key words**

Modulární měnič, koncept, backplane, 19“ rack, 6U, EN 60297, M-LVDS, vlnová impedance, návrh PCB, realizace, adresace karet, rozřezaná sčítačka

Modular inverter, concept, backplane, 19” subrack unit, 6U, EN 60297, M-LVDS, characteristic impedance, PCB design, realization, addressing of plug-in cards, cut adder

LNĚNIČKA, Tomáš. *Návrh a realizace řídicí a silové sběrnice modulárního měniče*. Praha, 2015. 50 s. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Stanislav Flígl, Ph.D.

# Obsah

<b>Obsah.....</b>	<b>6</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>8</b>
1.1 Zadání práce .....	8
1.2 Předmluva .....	8
<b>2 Popis konceptu .....</b>	<b>9</b>
2.1 Modularita .....	9
2.1.1 Flexibilita .....	9
2.1.2 Spolehlivost.....	10
2.1.3 Efektivita.....	10
<b>3 Návrh konceptu .....</b>	<b>10</b>
3.1 Budoucí vize konceptu .....	10
3.2 Technické požadavky .....	11
3.2.1 Výkon.....	11
3.2.2 Rozměry .....	13
3.2.3 Funkční typy karet .....	15
3.2.4 Komunikace a konektivita .....	15
3.2.5 M-LVDS .....	19
<b>4 Návrh backplanu .....</b>	<b>22</b>
4.1 Funkční požadavky .....	22
4.2 Signálová část.....	23
4.2.1 Rozměry .....	23

---

4.2.2	Složení jednotlivých vrstev desky.....	26
4.2.3	Výpočet vlnové impedance pro M-LVDS .....	27
4.2.4	Adresace karet.....	29
4.3	Silová napájecí část .....	33
4.3.1	Návrh.....	33
<b>5</b>	<b>Technická dokumentace .....</b>	<b>35</b>
5.1	Schéma zapojení – Backplane signálová část .....	36
5.2	Rozmístění součástek – Backplane signálová část TOP .....	38
5.3	Rozmístění součástek – Backplane signálová část BOT.....	39
5.4	Partlist – Backplane signálová část .....	40
5.5	Schéma zapojení – Backplane silová napájecí část.....	41
5.6	Rozmístění součástek – Backplane silová napájecí část TOP .....	42
5.7	Rozmístění součástek – Backplane silová napájecí část BOT .....	43
5.8	Partlist – Backplane silová napájecí část .....	44
5.9	Stack-up desky plošného spoje .....	45
5.9.1	Backplane signálová část .....	45
5.9.2	Backplane silová napájecí část.....	45
<b>6</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>47</b>
<b>9</b>	<b>Seznam rovnic .....</b>	<b>48</b>
<b>10</b>	<b>Seznam použitých zdrojů.....</b>	<b>48</b>
<b>11</b>	<b>Přílohy .....</b>	<b>50</b>
11.1	Vrstvy – Backplane signálová část.....	50
11.2	Vrstvy – Backplane silová napájecí část .....	50



# 1 Úvod

## 1.1 Zadání práce

Cílem této práce bylo ve spolupráci s Bc. Jakubem Klingerem a pod dohledem Ing. Stanislava Flíglu, Ph.D. navrhnout „*Koncept modulárního měniče*“.

Celý koncept je v maximální možné míře dané rozsahem diplomové práce navržen podle v praxi zavedených postupů, ať už se jedná o standardy, v souladu s nimiž je koncept vyvíjen (EN 60297), tak i celkové provedení návrhu a s tím související vypracování výrobní technické dokumentace. Pod pojmem koncept je myšleno navrhnout základní stavební jednotky měniče, kterými jsou: karta se spínacími prvky, řídicí jednotka a propojovací karta umožňující jejich propojení. To celé v modulárním provedení, které by umožňovalo snadné a rychlé přizpůsobení měniče pro danou aplikaci a snadnou opravu v případě poruchy. Modularita tohoto konceptu je řešena použitím standardní 19“ subrack jednotky o výšce 6U se zásuvnými kartami. Volbou typu a počtu zásuvných karet určité funkční řady je uživatel schopen rychle definovat konfiguraci střídače pro danou aplikaci, v případě poruchy vyměnit vadnou kartu za novou kartou stejné funkční řady a tím zajistit nepoměrně kratší dobu pro opětovné uvedení do provozu a vyšší univerzálnost oproti standardním nemonulárním řešením. Tento koncept je velmi užitečný hlavně v prostředí s velmi proměnlivými požadavky na konfiguraci pohonu, jako je například školní nebo zkušební pracoviště.

## 1.2 Předmluva

Rozsáhlost celého konceptu vedla na rozdělení práce do několika částí, přičemž já se budu na následujících stránkách téměř výhradně věnovat návrhu desky plošného spoje pro zadní propojovací kartu pro celou 19“ subrack jednotku (dále jen

„Backplane“). Můj kolega Bc. Jakub Kligner pak bude mít na starosti návrh zásuvné karty se spínacími prvky.

Na začátku této práce se budu věnovat návrhu a popisu konceptu jako celku. V dalších částech se pak zaměřím na návrh plošného spoje backplanu a na závěr se budu zabývat veškerou potřebnou technickou dokumentací potřebnou pro uživatele tohoto konceptu, popřípadě pro jeho další rozvoj.

## **2 Popis konceptu**

### **2.1 Modularita**

Modularita je tím hlavním důvodem, proč vůbec vzniknul tento koncept. Modularita je dnes směr, kterým se ubírá čím dál tím větší skupina výrobců zařízení pro průmysl. A stále více zákazníků modulární zařízení upřednostňuje z důvodu nepoměrně větší flexibility, spolehlivosti a z dlouhodobého hlediska i finanční výhodnosti. Jako příklad jmenujme měřící automatizované systémy PXI a VXI. Bez modulárního přístupu k návrhu by dnešní průmysl asi jen stěží mohl fungovat v takovém měřítku, v jakém ho známe.

#### **2.1.1 Flexibilita**

Díky modularitě dokáže uživatel i redukovat provozní náklady. Při změně požadavků na zařízení nebo jeho modernizaci nemusí uživatel pořizovat zcela nové nebo vlastnit větší počet zařízení, ale stávající zařízení pouze rekonfiguruje pomocí zásuvných karet nebo jej rozšíří o další jednotku. Tato vlastnost je velmi vhodná zvláště pro pracoviště s pravidelnou změnou požadavků, jako jsou zkušební a školní laboratoře. Obsluha takového pracoviště rovněž klade nižší nároky na kvalifikaci obsluhujících pracovníků.

Základním předpokladem pro vysokou úroveň flexibility je standardizace. Většina výrobců modulárních řešení vychází ze stejných standardů, což dává

zákazníkovi nepřebornou paletu možností díky obrovskému výběru karet a to co do jejich velikosti tak i jejich specializace pro určitou úlohu.

### **2.1.2 Spolehlivost**

Další nespornou výhodou je, že v případě poruchy zařízení není nutná dlouhá odstávka, při které majiteli uniká zisk a následně ani nákladný servis. V případě, že je příčina poruchy známa a je odstraněna, vymění obsluha vadnou část za novou a celé zařízení může být opět v provozu během okamžiku. Navíc tento způsob opravy zvládne i technik údržby s nižší kvalifikací.

### **2.1.3 Efektivita**

Pokud všechny výše zmíněné body shrneme dohromady, získáváme tím pracoviště s velmi vysokou efektivitou. Lze si představit dokonce situaci, kdy díky schopnosti jednotlivých jednotek spolu komunikovat a jejich vzájemnému propojení lze nadřazeným ovládacím stanovištěm řídit činnost více takových pracovišť pouze jedním pracovníkem, kterému se zobrazují všechny potřebné informace přehledně na jedné obrazovce. Díky modulárnímu řešení jsou možnosti téměř neomezené a lze s minimálními náklady disponovat víceúčelovým zařízením, které je maximálně odladěné pro danou činnost a přitom složené ze standardně dostupných součástí nikoli postavené jako jednoúčelové zařízení na zakázku.

## **3 Návrh konceptu**

### **3.1 Budoucí vize konceptu**

Vzhledem ke skutečnosti že koncept modulárního měniče, jenž je tématem této diplomové práce, byl vyvíjen pod záštitou katedry elektrických pohonů, bylo rozhodnuto o budoucím použití modulárního měniče, co by modernější víceúčelové verze stávajících jednoúčelových přípravků sloužících pro výuku v oblasti pohonů. Díky modulárnímu řešení měniče bude průběh výuky daleko pružnější a studenti se

budou moci blíže seznámit s v praxi běžně používanými postupy a s měniči složitějších uspořádání, než bylo doposud možné stávajícími postupy realizovat. Jedná se především o víceúrovňové střídače nebo o maticové měniče, které lze právě díky modulárnímu řešení velmi efektivně demonstrovat. Celkově se tím tak zvýší úroveň výuky, vědecké činnosti a i konkurence schopnosti fakulty v porovnání s jinými fakultami tuzemskými i zahraničními.

## 3.2 Technické požadavky

### 3.2.1 Výkon

První věcí, kterou je potřeba na začátku vývoje měniče určit, je bezpochyby jeho výkon. V našem případě se pro výchozí použití uvažuje napájení usměrňovačem ze síťového napětí **3x400V**, kde bychom měli být schopni získat v nezatíženém stejnosměrném obvodu hodnotu napětí **566 V** (viz Rovnice 1) pro diodový můstek a **650 V** pro pulzní usměrňovač AFE (Active Front End). Dalším omezením limitujícím hodnotu výkonu je efektivní hodnota proudu, která podléhá dvěma omezením. Tím prvním je maximální proudová zatížitelnost konektorů mezi tranzistorovou deskou a silovou napájecí částí backplanu, která, pro konektory DIN 41612 typ E, činí **5,5 A na pin**, celkem tedy **66 A**. Tím druhý je maximální proudová zatížitelnost vodivé cesty na desce plošného spoje napájecí části backplanu, která činí přibližně **36 A na jednu vrstvu** (plošný spoj je dvouvrstvý), celkem tedy **72 A** (viz Tabulka 1) <sup>[2]</sup>.

$$U_{DC0} = U_s \cdot \sqrt{2} = 400 \cdot \sqrt{2} = 566 \text{ V}$$

Rovnice 1 - Výpočet napětí ve stejnosměrném nezatíženém obvodu diodového usměrňovače  $U_{DC0}$   
( $U_s$ ...sružené síťové napětí)

<b>Výpočet proudové zatížitelnosti plošného spoje</b>	
podle IPC-2221A <sup>[7]</sup> (dříve IPC-D-275)	
<b>Šířka vodivé cesty</b>	180,2 mm = 716 mil
<b>Tloušťka vodivé cesty</b>	35 um = 1,4 mil
<b>Oteplení</b>	40 °C
<b>Proud</b>	<b>36 A</b>

Tabulka 1 - Výpočet proudové zatížitelnosti plošného spoje <sup>[2][7]</sup>

Pokud tedy známe maximální hodnoty proudu a napětí, lze již vypočítat přibližný maximální výkon jednoho třífázového měniče podle Rovnice 2, který činí **32,3 kVA**. Celkový výkon měniče je pak až několikanásobek této hodnoty díky možnosti spolupráce až 10 subrack jednotek.

$$P_{NHB} = \sqrt{3} \cdot \left( \frac{U_{DC}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot I_{NHB} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = \sqrt{3} \cdot \frac{U_{DC} \cdot I_{NHB}}{2} = \sqrt{3} \cdot \frac{566 \cdot 66}{2}$$

$$P_{NHB} = 32,3 \text{ kVA}$$

**Rovnice 2 –  $P_{NHB}$ ...maximální výkon měniče – omezení zásuvné karty,  $U_{DC}$ ...napětí stejnosměrného obvodu,  $I_{NHB}$ ...jmenovitý efektivní proud procházející půlmůstkem**

Výše uvedený výkon je omezen hlavně proudovými schopnostmi konektorů propojující zásuvnou kartu s půlmůstkem (tedy hodnotou  $I_{NHB}$ ). Je ovšem nutno mít na paměti i výkonové omezení způsobené proudovou zatížitelností desky plošného spoje v daném místě ovlivněné hodnotou  $I_{NPCB} = 72 \text{ A}$  (viz. Tabulka 1). Při uvažování této hodnoty nám vychází maximální výkon, který může přenést plošný spoj v jednom místě podle vztahu (Rovnice 3).

$$P_{NPCB} = U_{DC} \cdot I_{NPCB} = 566 \cdot 72$$

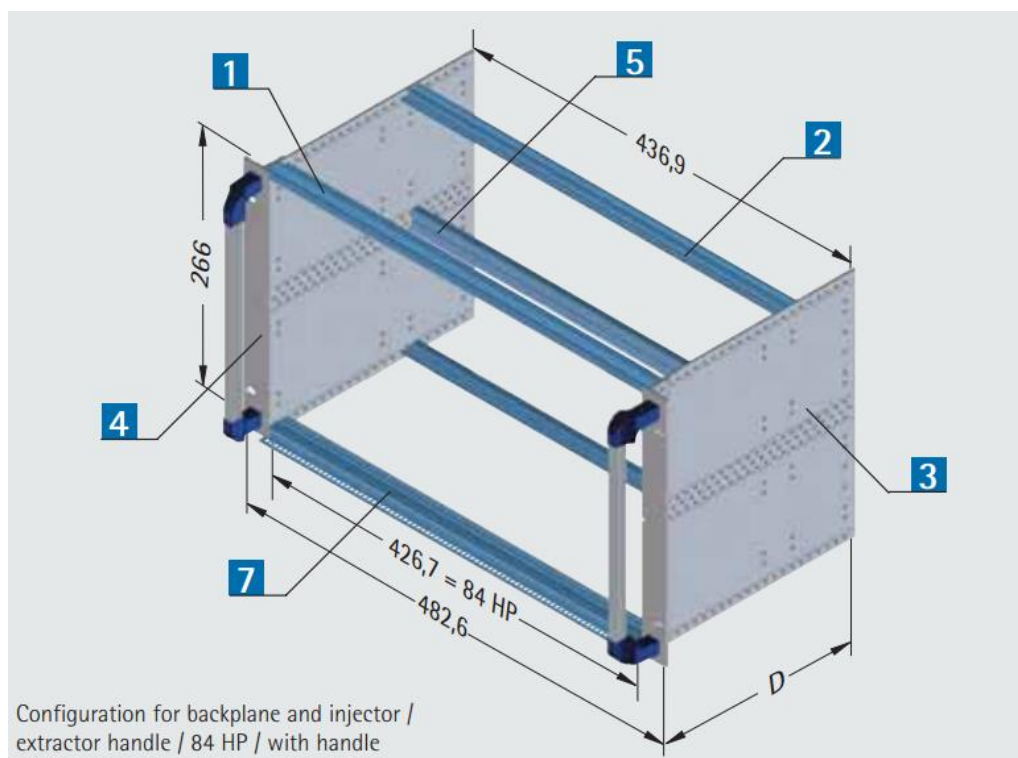
$$P_{NPCB} = 40,8 \text{ kVA}$$

**Rovnice 3 -  $P_{NPCB}$ ...maximální výkon měniče – omezení desky plošného spoje,  $U_{DC}$ ...napětí stejnosměrného obvodu,  $I_{NPCB}$ ...jmenovitý efektivní proud procházející deskou plošného spoje**

Při konfiguraci měniče pak musíme dbát na to, abychom konfigurací komponent nepřekročili ani jedno z výše uvedených výkonových omezení. Pokud bychom potřebovali navýšit výkon nad udávané limity, nabízí se několik možností: pro  $P_{NHB}$  - zdvojit šířku zásuvné karty s půlmůstkem; pro zvýšení  $P_{NPCB}$  by bylo nutno vyspecifikovat nový typ výkonové části backplane s tlustší měděnou vrstvou. Opět ovšem platí, že nesmí být překročeno ani jedno z výkonových omezení.

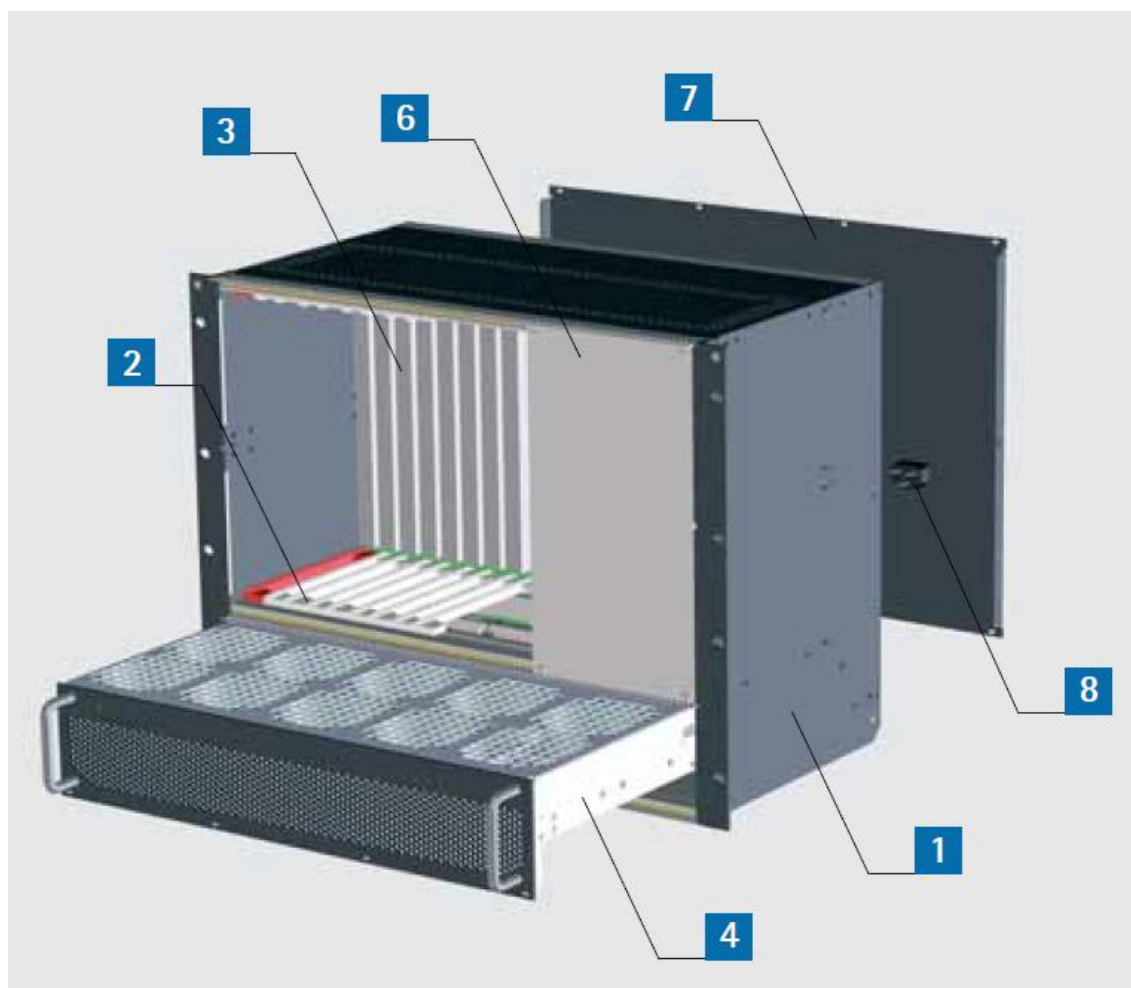
### 3.2.2 Rozměry

Dalším krokem je určení velikosti zařízení. V této práci bylo rozhodnuto o integraci měniče do jednotky 19“ subracku o výšce 6U podle standardu EN 60297, resp. IEEE 1101.10/1101.11 (viz Obrázek 1 <sup>[1]</sup>).



Obrázek 1 - 19" rack jednotka o výšce 6U (rozměry v mm, D = 236mm) <sup>[1]</sup>

Pokud budeme vycházet z (Obrázek 1 <sup>[1]</sup>), jsou pak rozměry naší subrack jednotky **482,6 x 236 x 266 mm**. V zájmu lepšího chlazení komponent subrack jednotky je možné jednotku dodatečně vybavit zásuvnou jednotkou s ventilátory pro aktivní ventilaci (viz Obrázek 2 <sup>[1]</sup>).



Obrázek 2 - Zásuvná jednotka s ventilátory (bod číslo 4) <sup>[1]</sup>

Výhodou těchto subrack jednotek je možnost jejich integrace do skříňových rack jednotek a vytvořit tak ucelené zařízení přímo na míru požadavkům dané aplikace. Dále je potřeba určit jaký rozměr (šířku) slotu budou mít zásuvné karty. Rozměr zásuvné jednotky se většinou uvádí v násobcích rastru uchycovacích otvorů (HP) v liště (pozice 7 – viz Obrázek 1 <sup>[1]</sup>). Z obrázku je rovněž vidět, že celkový počet těchto otvorů je **84**. Otvory v uchycovací liště jsou rozmístěny v rozestupu po 5,08mm (dále v této kapitole označován jako „ $n$ “). Šířka zásuvné karty je pak v násobcích  $n$ , přičemž minimální šířka je  $4n$ . Širší karty mohou mít v zásadě libovolnou šířku splňující kritérium minimální šířky, avšak je velmi vhodné, aby šířka karty, tedy  $x$  násobek  $n$  byl celočíselným dělitelem **84**, celkového počtu otvorů. V této práci bylo rozhodnuto o základní šířce karty  $6n$ . To umožňuje subrack jednotku osadit celkem až 14 kartami. Dále bylo rozhodnuto, že pokud kartu nebude možné z technických důvodů realizovat

v šířce  $6n$ , lze použít karty o násobných šířkách např.  $12n$ ,  $18n$ ,... Mezi širší karty můžeme už nyní řadit např. řídicí jednotku nebo spínací tranzistorové karty o vyšším výkonu.

### 3.2.3 Funkční typy karet

Pro aplikaci konceptu jako modulárního měniče se prozatím uvažuje použití následujících typů funkčních karet (viz Tabulka 2). Ovšem budoucí vývoj dalších typů funkčních karet není vyloučen. Do tabulky níže jsou zařazeny i části backplanu, přestože se nejedná o zásuvné karty, jsou zde uvedeny hlavně z důvodu celistvosti značení.

<b>Funkční typy karet</b>		
<b>Označení</b>	<b>Název</b>	<b>Popis funkce</b>
M*	Master card	řídící jednotka
T*	Transistor card	tranzistorová spínací karta s polomostem
E	End card	zakočovací karta
I	Interconnecting card	propojovací karta
S	Signal backplane	backplane - signálová část
P	Power backplane	backplane - silová napájecí část

Tabulka 2 - Funkční typy karet (karty označené \* si zabírají relativní adresy)

### 3.2.4 Komunikace a konektivita

Vzhledem k modulárnímu řešení konceptu je velmi důležitá komunikace jednotlivých zásuvných karet, mezi sebou a s řídicí jednotkou. Rovněž vzájemná komunikace mezi jednotlivými subrack jednotkami nebo jejich komunikace s nadřazeným ovládacím systémem. Každá ze zásuvných karet disponuje dvojicí konektorů, jejichž funkce bude popsána níže. K propojení jednotlivých zásuvných karet v subrack jednotce slouží signálová část backplanu. Jednotlivé karty jsou k signálové části backplanu připojeny prostřednictvím 96pinového 3řádeho konektoru DIN 41612 typ C, který je kompatibilní s normou IEC 60603-2 a nachází se v horní polovině zásuvné karty. Rozložení pinů horního konektoru a jejich funkce je znázorněna v (Tabulka 3).



## Upper connector – signal backplane terminal

pin #	row A P = pulses	pin #	row B V = voltage	pin #	row C C = current
A1		B1		C1	
1	P0	1	V0	1	C0
2	P0	2	V0	2	C0
3	P1	3	V1	3	C1
4	P1	4	V1	4	C1
5	P2	5	V2	5	C2
6	P2	6	V2	6	C2
7	P3	7	V3	7	C3
8	P3	8	V3	8	C3
9	P4	9	V4	9	C4
10	P4	10	V4	10	C4
11	P5	11	V5	11	C5
12	P5	12	V5	12	C5
13	P6	13	V6	13	C6
14	P6	14	V6	14	C6
15	P7	15	V7	15	C7
16	P7	16	V7	16	C7
17	P8	17	V8	17	C8
18	P8	18	V8	18	C8
19	P9	19	V9	19	C9
20	P9	20	V9	20	C9
21	P10	21	V10	21	C10
22	P10	22	V10	22	C10
23	P11	23	V11	23	C11
24	P11	24	V11	24	C11
25	F	25	E	25	D
26	F	26	E	26	D
27	ERR	27	L	27	Supply - 3,3V
28	R	28	GND	28	Supply - 24V
29	LE	29	GND	29	Supply - 24V
30	C	30	GND	30	Supply - 24V
31	LO	31	GND	31	Supply - 24V
32	LI/ITE	32	GND	32	Supply - 24V

Tabulka 3 - Rozložení a funkce jednotlivých pinů konektoru na signálové části backplanu

■ Takto označeny jsou rychlé diferenciální signály standardu M-LVDS (Multipoint Low Voltage Differential Signaling, TIA/EIA-899), které mají za úkol umožňovat rychlou komunikaci karty s řídicí jednotkou. Pro jednu zásuvnou kartu je k dispozici trojice diferenciálních signálů (celkem 6 pinů). Signál s označením  $Px$  je určen k přijímání řídicích pulsů pro tranzistory. Signál s označením  $Vx$  je určen pro odesílání hodnoty napětí na tranzistorech zpět do řídicí jednotky. Signál s označením  $Cx$

má pro proud analogické využití jako signál  $Vx$ . Celkově je k dispozici 12 takových trojic diferenciálních signálů.

■ Takto označeny jsou rovněž rychlé diferenciální signály standardu M-LVDS, které slouží jako podpurné signály umožňující fungování výše zmíněných 12 trojic  $Px$ ,  $Vx$ ,  $Cx$ . Signál  $F$  udává frekvenci sběrnice M-LVDS. Písmenem  $E$  je pak označen synchronizační signál dalšího cyklu sběrnice M-LVDS.

■ Takto jsou označeny piny určené pro sériovou komunikaci typu CAN (Controller Area Network, ISO 11898). CAN komunikace je zde hlavně kvůli kompatibilitě s jinými zařízení. Příkladem využití této sběrnice by mohla být například komunikace řídicí jednotky s nadřazeným řídicím systémem.

■ Takto jsou označeny logické signály napět'ové úrovně **24 V**. Signál **ERR** (General Error) signalizuje hlavní chybu, signál **R** (Reset) signalizuje hlavní reset a spolu se signálem **LE** (Load Enable) se oba signály podílí na adresaci zásuvných karet.

■ Takto jsou označeny logické signály napět'ové úrovně **3,3 V**. Signál **L** (Load) obsahuje informaci o adrese na konkrétní pozici. Signál **C** (Clock) je synchronizační signál pro adresaci zásuvných karet. Signál **LO** (Load Out) obsahuje informaci o obsazených adresách v celé subrack jednotce pro případ propojení více subrack jednotek dohromady. Signál **LI/ITE** (Load In/ Include This Electronic unit) obsahuje na krajních pozicích informaci o obsazených kartách v předchozí subrack jednotce v případě propojení více subrack jednotek dohromady. Na ostatních pozicích tímto signálem zásuvná karta hlásí systému adresace zásuvných karet svoji přítomnost.

■ Takto je označen pin určený k napájení logiky napět'ové úrovně 3,3 V.

■ Takto jsou označeny piny určené k napájení všech zařízení vyžadujících napět'ovou úroveň 24 V.

■ Takto jsou označeny piny určené pro GND.

Doposud jsme se v této kapitole zabývali pouze propojením zásuvných karet za účelem komunikace a ovládání. Nicméně pro funkci měniče je potřeba, aby zásuvné

karty měly přístup k silovému napájení. Tuto potřebu zajišťuje výkonová část backplanu. Jednotlivé karty jsou k silové napájecí části backplanu připojeny prostřednictvím 48-mi pinového třířadého konektoru DIN 41612 typ E, který je kompatibilní s normou IEC 60603-2 a nachází se v dolní polovině zásuvné karty. Rozložení pinů a jejich funkce je znázorněna níže (viz Tabulka 4).

### Lower connector - backplane terminal

pin #	row A	pin #	row C	pin #	row E
A2		C2		E2	
1	<b>Supply +</b>	1	<b>Supply +</b>	1	<b>Supply +</b>
2		2		2	
3		3		3	
4		4		4	
5	<b>Insulation</b>	5	<b>Insulation</b>	5	<b>Insulation</b>
6		6		6	
7	<b>Supply -</b>	7	<b>Supply -</b>	7	<b>Supply -</b>
8		8		8	
9		9		9	
10		10		10	
11	<b>Insulation</b>	11	<b>Insulation</b>	11	<b>Insulation</b>
12		12		12	
13	<b>Terminal</b>	13	<b>Terminal</b>	13	<b>Terminal</b>
14		14		14	
15		15		15	
16		16		16	

Tabulka 4 - Rozložení a funkce jednotlivých pinů konektoru na silové napájecí části backplanu

■ Takto označené piny jsou připojeny ke kladnému pólu stejnosměrné silové napájecí sběrnice.

■ Takto označené piny jsou připojeny k zápornému pólu stejnosměrné silové sběrnice.

■ Takto označené piny slouží jako jeden z vývodů měniče a jsou na silové napájecí části backplanu připojeny k silovým konektorům SV 7.62HP/02/180SF firmy Weidmüller.

■ Takto označené piny nejsou zapojeny a tvoří izolační vzdálenost mezi kladným a záporným pólem stejnosměrné napájecí sběrnice a vývodem měniče.

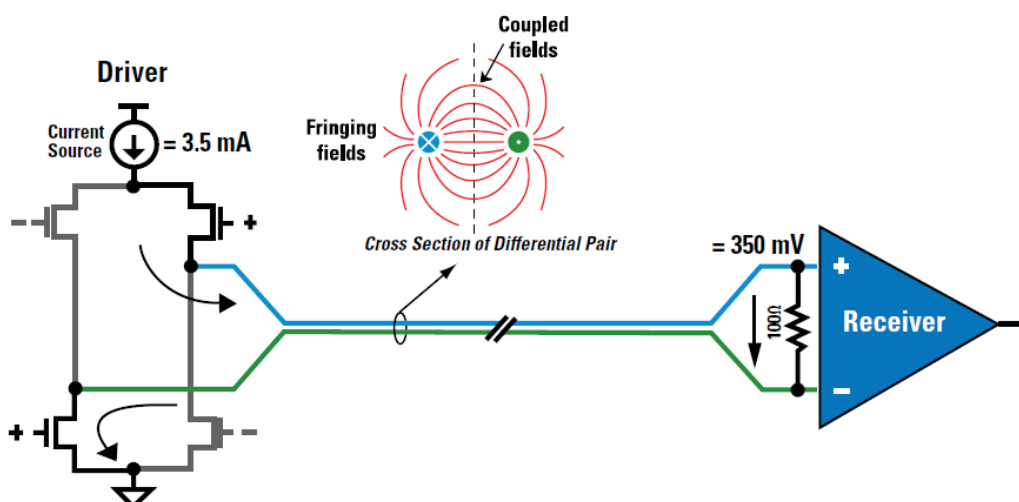
### 3.2.5 M-LVDS

Jak už bylo zmíněno dříve, pro komunikaci tohoto konceptu slouží standard LVDS respektive M-LVDS. Důvodem použití právě tohoto standardu jsou jeho nesporné výhody, mezi něž patří: vysoká imunita vůči rušení a rovněž nízké vyzařování rušení, vysoká datová propustnost a nízká energetická náročnost. Právě díky těmto výhodám je standard LVDS a jemu podobné stále více využíván pro komunikační účely v silové elektrotechnice, ale i spotřební elektronice (viz Obrázek 3 <sup>[3]</sup>).

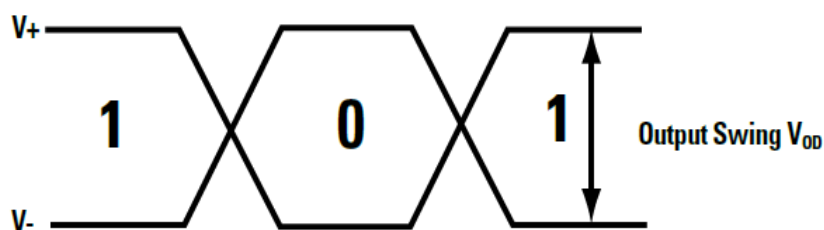
	Industry Standard	Maximum Data Rate	Output Swing ( $V_{OD}$ )	Power Consumption
LVDS	TIA/EIA-644	3.125 Gbps	$\pm 350$ mV	Low
LVPECL	N/A	10+ Gbps	$\pm 800$ mV	Medium to High
CML	N/A	10+ Gbps	$\pm 800$ mV	Medium
M-LVDS	TIA/EIA-899	250 Mbps	$\pm 550$ mV	Low
B-LVDS	N/A	800 Mbps	$\pm 550$ mV	Low

Obrázek 3 – Přehled průmyslových standardů různých druhů LVDS technologií <sup>[3]</sup>

Vysoká imunita komunikačního kanálu vůči okolnímu rušení je vzhledem k naší aplikaci velmi zásadním požadavkem. Standard LVDS toho docíluje velmi prostým řešením, a tím je diferenciální povaha signálu. Pokud se na signál nesoucí informaci superponuje rušení, superponuje se na oba vodiče stejně, takže jejich vzájemný diferenciální vztah je zachován a diferenciální přijímač, takové rušení nebere v potaz (viz Obrázek 4 <sup>[3]</sup>).

Obrázek 4 - LVDS vysílač a přijímač, principiální schéma <sup>[3]</sup>

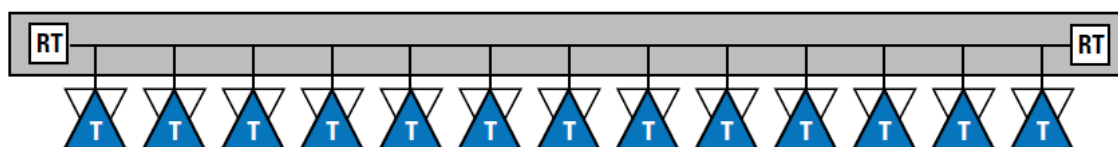
Vysílač, který se chová jako proudový zdroj, generuje proud  $3,5 \text{ mA}$  (platí pro LVDS pro M-LVDS je to  $5,5 \text{ mA}$ ) střídavě jedním nebo druhým směrem podle toho, jestli vysílá logickou „1“ nebo „0“. Tento proud protéká zakončovacím odporem  $100 \Omega$  a vytváří diferenciální napětí  $350 \text{ mV}$ , resp.  $550 \text{ mV}$  snímané přijímačem. V zájmu minimálního vyzařování rušení funguje vysílač na principu proudového zdroje (viz Obrázek 4 <sup>[3]</sup>), který plynule přepíná směr proudu jedním či druhým směrem (viz Obrázek 5 <sup>[3]</sup>), tím jsou omezeny napěťové špičky rychle spínaných tranzistorů v případě, že by se jednalo o zdroj napětí a tedy skokové změny proudu. Skutečnost, že se jedná o dva paralelní vodiče v těsné blízkosti, které jsou protékány stejným proudem v opačných směrech, minimalizuje úroveň vyzařování rušení.

Obrázek 5 - Diferenciální signalizace <sup>[3]</sup>

Dalším důležitým parametrem komunikace založené na principech LVDS je datová propustnost. Ta u standardu LVDS dosahuje maximální hodnoty až  $3,125 \text{ Gbps}$  u standardu M-LVDS až  $250 \text{ Mbps}$  (viz Obrázek 3 <sup>[3]</sup>). Kritickým parametrem, který

nejvíce ovlivňuje datovou propustnost je kontrolovaná impedance prostředí, ve kterém se signál šíří. Teoreticky to znamená jednoduchý předpoklad, že vlnová impedance prostředí (v našem případě plošný spoj signálové části backplanu), ve kterém se šíří signál, odpovídá hodnotě impedance zakončovacího odporu, tedy  $100 \Omega$ , aby se omezily odrazy signálu. V praxi je ovšem poměrně složité tento požadavek realizovat. Pokud budeme provozovat systém LVDS (viz Obrázek 4<sup>[3]</sup>), tedy jeden vysílač a jeden přijímač, dosáhneme těchto podmínek poměrně snadno.

Situace se ovšem dosti razantně komplikuje, budeme-li chtít provozovat systém M-LVDS (viz Obrázek 6<sup>[3]</sup>), tedy několik přijímačů/vysílačů na jedné sběrnici, což je i případ naší signálové části backplanu. V tomto případě bude velmi obtížné podmínku přesné impedance v prostředí dodržet, protože v prostředí se bude nacházet několik míst, kde se budou připojovat přijímače/vysílače. V případě plošného spoje to budou s největší pravděpodobností prokovené otvory tzv. „*Vias*“, konektory a krátké vodiče vedoucí od konektoru k přijímači/vysílači. Například na vícevrstvé desce plošného spoje vias s malým otvorem budou mít spíše kapacitní charakter. Oproti tomu vias s větším otvorem budou mít spíše induktivní charakter. Jedná se o velmi komplexní problém, který se v případě potřeby dosáhnout maximální možné datové propustnosti musí řešit 3D elektromagnetickými analýzami, kdy se pak podle výsledků analýzy upravuje konstrukce desky plošného spoje, např. použijí se pohřbené vias nebo se upravují individuálně velikosti padů v jednotlivých vrstvách. V této práci 3D analýzy elektromagnetického pole prováděny nebyly a ve specifikaci našeho systému je snížena datová propustnost na úroveň, kdy tyto parazitní vlivy nebudou mít zásadní vliv na funkci komunikace.



Obrázek 6 - M-LVDS (přijímače nesmí mít vnitřní zakončovací odpory, RT...zakončovací odpory)<sup>[3]</sup>

## 4 Návrh backplanu

### 4.1 Funkční požadavky

Jak už bylo zmíněno dříve, backplane slouží jako vzájemné propojení všech zásuvných karet napříč celou subrack jednotkou, ale i pro spojení s ostatními subrack jednotkami nebo nadřazeným řídicím systémem. Dále má za úkol napájet silovou část měniče.

Komunikace je provedena standardem M-LVDS, což vyžaduje minimálně šestivrstvou desku plošného spoje s řízenou vlnovou impedancí. Naproti tomu silové napájení vyžaduje co nejširší vodivé cesty s tlustou měděnou vrstvou kvůli velké proudové hustotě a postačuje zde pouze dvouvrstvá deska. Vyrobit desku, která by splňovala požadavky obou funkcí, je technologicky nemožné. Důvodem jsou právě velmi rozdílné požadavky na rozměry měděných vodivých cest. Mezitím co část backplanu s řízenou impedancí vyžaduje velmi tenké spoje (*6 – 10 mil*) backplane se silovým napájením vyžaduje velmi široké vodivé cesty (*v našem případě 720 mil*) a tlusté měděné plátování (*minimálně 35 $\mu$ m*). Nezkoušený návrhář desky plošného spoje by mohl navrhnout část s řízenou impedancí a se silovým napájením na jedné desce plošného spoje s měděnou fólií o tloušťce *35 $\mu$ m* a během návrhu by vše vypadalo naprosto v pořádku. Ovšem problém by nastal během výroby. Při výrobě plošných spojů je na začátku celá plocha desky pokryta mědí, která se posléze odleptá na místech, kde nejsou vodivé cesty. Během leptání jsou vodivé cesty kryty před leptací lázní fotorezistem, ale jen shora, takže dochází k podleptávání vodivých cest. Pro tenké vodivé cesty, které jsou vyrobeny na tlusté vrstvě mědi, může dokonce nastat stav, kdy se podleptají úplně a vodivá cesta zcela zmizí nebo se odlepe od nosného materiálu. To je nepřijatelné. Proto je nutné si uvědomit, že čím tenčí vodivé cesty tím tenčí musí být i měděná vrstva. Pro představu je níže uvedena tabulka od firmy Pragoboard s.r.o., která jasně dokazuje neproveditelnost desky jako jednoho celku (viz Tabulka 5 <sup>[4]</sup>). Z toho důvodu jsme backplane rozdělili na dvě fyzické části podle výše zmíněných funkcí. Návrhy jednotlivých částí se budeme zabývat v následujících kapitolách.

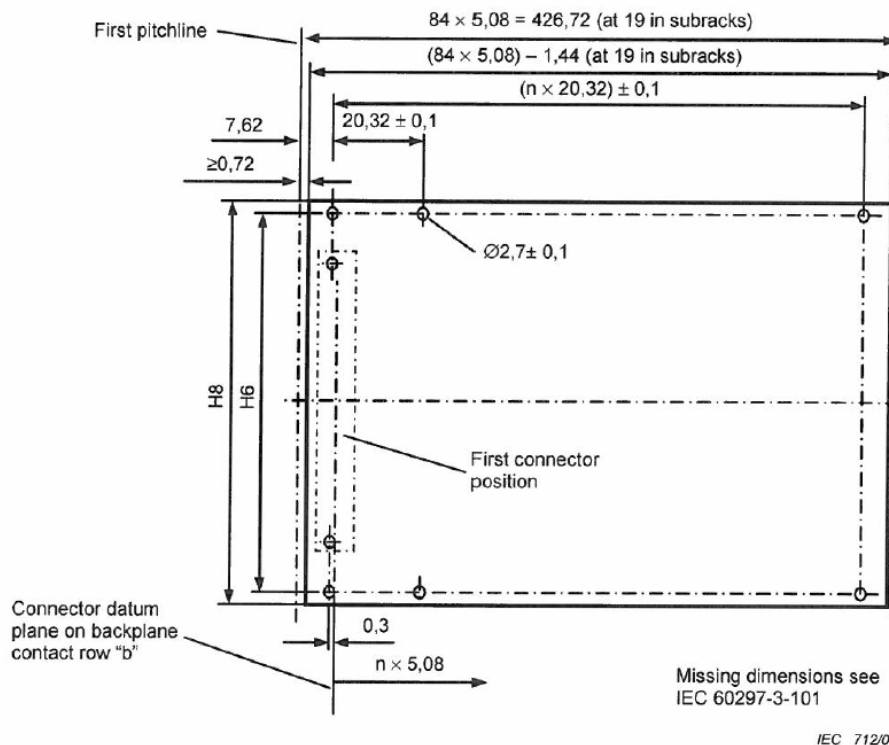
tloušťka základní Cu fólie	minimální šířka vodiče, mezikruží (vrták / pad)		minimální izolační mezera		podleptání	
	mm	mil	mm	mil	mm	mil
9 μm	0,10	3,9	0,10	3,9	20 μm	0,8
18 μm	0,12	4,7	0,12	4,7	30 μm	1,2
35 μm	0,20	7,9	0,15	5,9	40 μm	1,6
50 μm	0,25	9,8	0,20	7,9	50 μm	2,0
70 μm	0,30	11,8	0,20	7,9	70 μm	2,8
105 μm	0,35	13,8	0,20	7,9	105 μm	4,1

Tabulka 5 - Minimální šířka vodivé cesty plošného spoje <sup>[4]</sup>

## 4.2 Signálová část

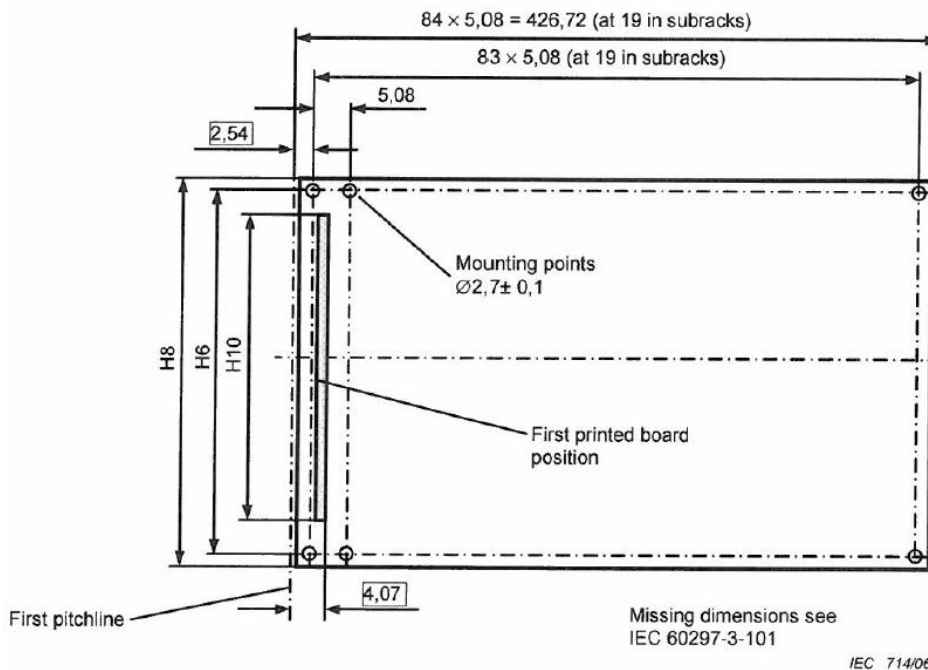
### 4.2.1 Rozměry

Na začátku návrhu signálové části backplanu bylo nutné zjistit v normách rozměry desky, pozice otvorů a pozice konektorů, aby byl backplane kompatibilní se standardem EN 60297. Norma, která popisuje rozměry backplanu má označení ČSN EN 60297-3-104, výňatek z této normy lze vidět na Obrázek 7 <sup>[5]</sup> a na Obrázek 8 <sup>[5]</sup>.



Obrázek 7 - Rozměry backplanu s konektory typu IEC 60603-2 podle ČSN EN 60297-3-104 (vše v mm) <sup>[5]</sup>





Obrázek 8 - Hlavní rozměry backplanu podle ČSN EN 60297-3-104 (vše v mm) <sup>[5]</sup>

Potřebné údaje **H6**, **H8**, **H10** pro různé výšky subrack jednotky jsou v Tabulka 6 <sup>[5]</sup>.

Height units	3U	6U	9U
$H6 \pm 0,2$	122,50	255,85	389,20
$H8 \pm 0,15$	128,55	261,90	395,25
$H10 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0,3 \end{smallmatrix}$	100,00	233,35	366,70
where			
H6 is the mounting centre distance for the backplanes;			
H8 is the height of the backplanes;			
H10 is the printed-board height.			
NOTE For missing dimensions and other height units see IEC 60297-3-101.			

Tabulka 6 - Rozměry H6, H8 a H10 podle normy ČSN EN 60297-3-104 (vše v mm) <sup>[5]</sup>

Jak už bylo řečeno v kapitole 0 Výše uvedený výkon je omezen hlavně proudovými schopnostmi konektorů propojující zásuvnou kartu s půlmůstkem (tedy hodnotou  $I_{NHB}$ ). Je ovšem nutno mít na paměti i výkonové omezení způsobené proudovou zatížitelností desky plošného spoje v daném místě ovlivněné hodnotou  $I_{NPCB}$

= 72 A (viz. Tabulka 1). Při uvažování této hodnoty nám vychází maximální výkon, který může přenést plošný spoj v jednom místě podle vztahu (Rovnice 3).

$$P_{NPCB} = U_{DC} \cdot I_{NPCB} = 566 \cdot 72$$

$$P_{NPCB} = \mathbf{40,8\ kVA}$$

**Rovnice 3 -  $P_{NPCB}$ ...maximální výkon měniče – omezení desky plošného spoje,  $U_{DC}$ ...napětí stejnosměrného obvodu,  $I_{NPCB}$ ...jmenovitý efektivní proud procházející deskou plošného spoje**

Při konfiguraci měniče pak musíme dbát na to, abychom konfigurací komponent nepřekročili ani jedno z výše uvedených výkonových omezení. Pokud bychom potřebovali navýšit výkon nad udávané limity, nabízí se několik možností: pro  $P_{NHB}$  - zdvojit šířku zásuvné karty s půlmůstkem; pro zvýšení  $P_{NPCB}$  by bylo nutno v specifikovat nový typ výkonové části backplane s tlustší měděnou vrstvou. Opět ovšem platí, že nesmí být překročeno ani jedno z výkonových omezení.

Rozměry šířka naší zásuvné karty není  $4n$ , ale  $6n$ , takže  $30,48 \text{ mm}$  místo  $20,32 \text{ mm}$ , což je jediná změna oproti údajům výše (viz Obrázek 7). Rovněž bylo řečeno v předchozí kapitole, že backplane bude kvůli technologické proveditelnosti rozdělen na



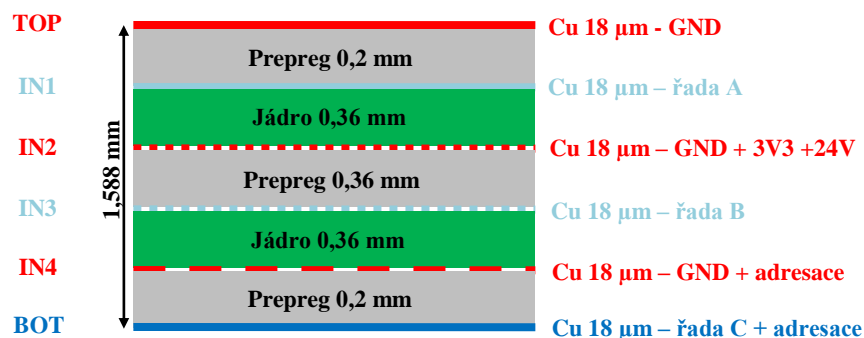
Obrázek 9 - Celkový pohled na návrh rozměrů backplanu (vše v mm)

dvě části, takže z původního jednoho backplanu o výšce  $6U$  se stanou dva backplany o výškách  $3U$ . Výsledný backplane signálové části v CAD softwaru EAGLE včetně důležitých rozměrových kót lze vidět na předchozím obrázku (viz Obrázek 9). Půdorys signálové části backplanu má rozměry  $426,4 \times 128,6 \text{ mm}$ .

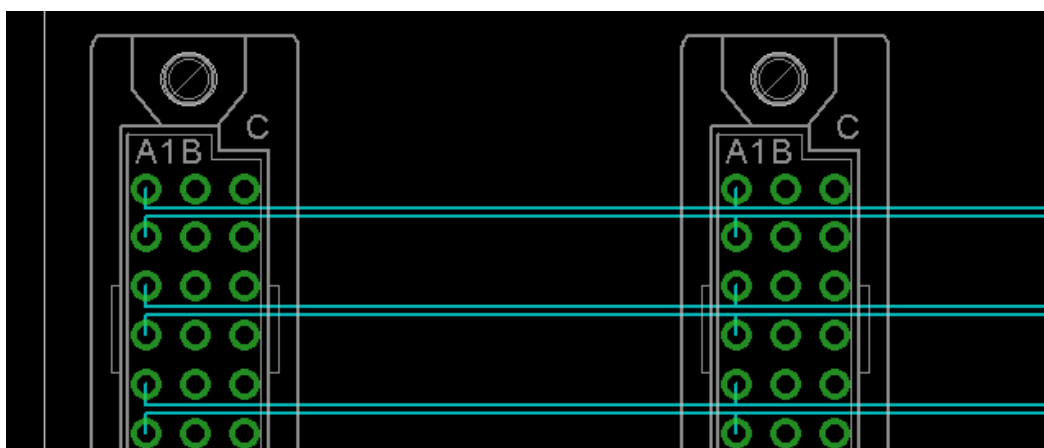
#### 4.2.2 Složení jednotlivých vrstev desky

Dalším krokem po navržení celkových rozměrů signálové části backplanu včetně umístění konektorů a montážních otvorů je návrh vodivých cest pro komunikaci M-LVDS s řízenou vlnovou impedancí. Jak už bylo zmíněno v kapitole 3.2.5 M-LVDS, jedná se o poměrně složitý a komplexní úkol. Proto zde využijeme k výpočtům doporučené vztahy od společnosti Texas Instruments Incorporated, které jsou k nalezení v dokumentu [3]. Abychom vybrali správný vztah, je potřeba si nejdříve uvědomit, jak budou vodivé cesty standardu M-LVDS situovány. Naše rozvržení vodivých cest (kvůli přehlednosti pouze pro řadu A, řady B a C jsou situovány analogicky) lze vidět na Obrázek 11. Každá řada pinů konektoru je vyvedena do jedné vrstvy a mezi každou takovou vrstvou musí být stínící vrstva na zemním potenciálu. Pro splnění těchto požadavků nám vychází deska plošného spoje s pěti vrstvami, takže vybíráme nejbližší vyšší standardně vyráběný počet vrstev a to je šest. Pro názornost vidíme na Obrázek 10 rozložení jednotlivých vrstev. Všimněme si, že obrázek již obsahuje údaje o tloušťkách izolačních vrstev a měděných vrstev. Správnou tloušťku izolační i měděné vrstvy

vybereme tak, aby nám vycházela vlnová impedance, kterou vypočteme podle vztahů níže v (4.2.3 Výpočet vlnové impedance pro M-LVDS) a zároveň, aby jednotlivé vrstvy uměl námi zvolený výrobce plošného spoje vyrobit skládáním prepregů a měděných



Obrázek 10 - Rozložení jednotlivých vrstev - řez deskou



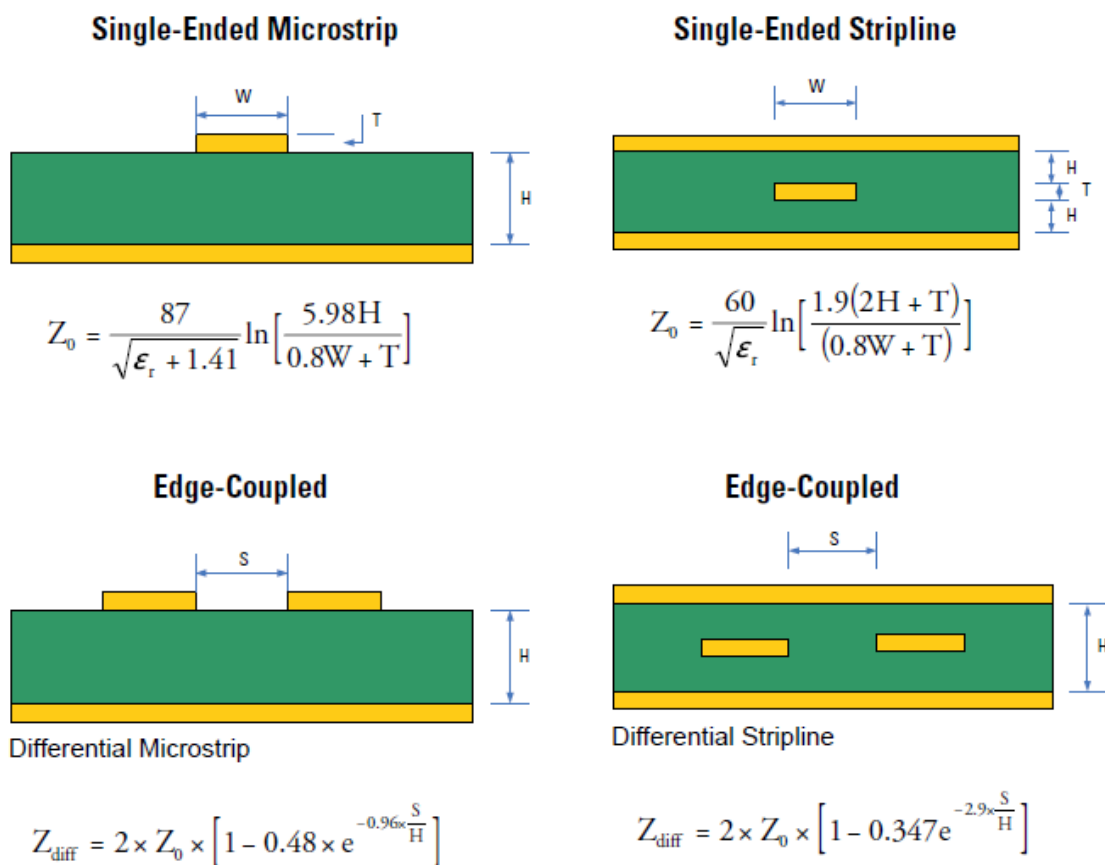
Obrázek 11 - Rozložení vodivých cest

vrstev, popřípadě, aby je měl skladem jako hotová jádra. Při výběru tloušťky mědi navíc musíme respektovat pravidla zmíněná v (4.1 Funkční požadavky). Známe-li všechny údaje (viz Obrázek 10), získáváme tím celkové složení desky neboli tzv. „*Stack-up*“, který před samotnou výrobou dodáme výrobcí společně s návrhem desky.

### 4.2.3 Výpočet vlnové impedance pro M-LVDS

Nyní, když už známe rozložení jednotlivých vrstev desky a přibližné rozvržení vodivých cest, můžeme jejich polohu a rozměry upřesnit podle odpovídajících vztahů (viz Obrázek 12 <sup>[3]</sup>) tak, aby byl splněn požadavek na vlnovou impedanci  $100 \Omega$ . Na naší desce jsou použity způsoby „*Edge-Coupled Differential Microstrip*“ pro řadu C

(spodní vrstva desky) a „*Edge-Coupled Differential Stripline*“ pro řadu A (první vnitřní vrstva) a pro řadu B (třetí vnitřní vrstva). Z výpočtů získáme údaje o šířce vodivé cesty ( $W$ ), o izolační mezeře mezi diferenciálním párem ( $S$ ). Tloušťku vodivé cesty ( $T$ ) a tloušťku izolačního materiálu ( $H$ ) už známe z Obrázek 10. Dále už pro výpočet potřebujeme jen znát relativní permitivitu izolačního materiálu desky. V našem případě je tímto materiálem ISOLA E-Cu quality 104, která odpovídá standardnímu materiálu typu FR4. Relativní permitivita tohoto materiálu je  $\epsilon_r = 4,7$ .



Obrázek 12 - Vztahy pro výpočet M-LVDS<sup>[3]</sup>

Při výpočtech si hodnoty  $W$  a  $S$  volíme, tak aby výsledná vlnová impedance byla pokud možno  $100 \Omega$ . Nesmíme ovšem opomenout skutečnost, že obě vodivé cesty se musí vejít mezi piny konektoru (DIN 41612 typ C), které jsou v rastru  $100 \text{ mil}$  a také nesmíme zapomenout na minimální šířku izolační mezery a vodivé cesty, která pro **třídu přesnosti 5** činí  $6 \text{ mil}$ . Tím získáváme využitelný prostor podle Rovnice 4.

$$100 - 2 \cdot rPAD = 100 - 2 \cdot 29,7 = 40,6 \text{ mil}$$

**Rovnice 4 - Prostor mezi piny konektoru DIN 41612 typ C (rPAD...poloměr padu, vše v mil)**

Dále musí platit, že do prostoru podle Rovnice 4 se musí vejít následující položky: dvě vodivé cesty se šířkou  $W$ , jedna izolační mezera s šířkou  $S$  a dvě izolační mezery po stranách vodivých cest  $X$ , nebo li  $2 \cdot W + S + 2 \cdot X = 40,6 \text{ mil}$ . To vše za podmínky:  $W > 6 \text{ mil}$ ,  $S > 6 \text{ mil}$ ,  $X > 6 \text{ mil}$ . Pokud již známe všechny rozměry, vodivé cesty umístíme tak, aby byl obrazec osově souměrný podle osy procházející vodorovně mezi piny. Naše hodnoty pro návrh prostředí s řízenou impedancí jsou v Tabulka 7. Spodní řádek je určen pro výpočet komunikačního kanálu podle standardu CAN, tedy s vlnovou impedancí  $120 \Omega$ . Pro výpočet hodnot byla použita kalkulačka vlnové impedance <sup>[6]</sup> (ověřeno podle <sup>[8]</sup>), která počítá podle vztahů od společnosti Texas Instruments Incorporated. <sup>[3]</sup>, ale navíc dokáže vypočítat nesymetrické uspořádání *Edge-Coupled Differential Stripline*, které je potřeba pro vodivé cesty v první vnitřní vrstvě (viz Obrázek 10).

Vrstva	Způsob	Standard	$\epsilon_r$ (-)	H (mil)	T (mil)	W (mil)	S (mil)	X (mil)	$\Sigma$ (mil)	$Z_{0\text{diff}}$ ( $\Omega$ )
IN1	Stripline	M-LVDS	4,7	22,4	0,7	6	9,6	9,5	40,6	98,3
IN3	Stripline	M-LVDS	4,7	28,4	0,7	8	10,8	6,9	40,6	100,2
BOT	Microstrip	M-LVDS	4,7	7,9	0,7	9	6,8	7,9	40,6	99,4
BOT	Microstrip	CAN	4,7	7,9	0,7	6	6,5	1	40,5	119,2

Tabulka 7 - Hodnoty vodivých cest s řízenou impedancí

#### 4.2.4 Adresace karet

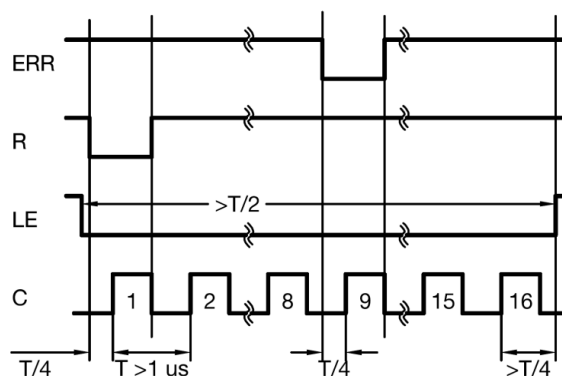
Další funkcí, kterou signálová část backplanu plní, kromě komunikace, je adresace zásuvných karet. Adresace zásuvných karet je nutná pro komunikaci karet a správnou činnost řídicí jednotky. Díky adresaci zásuvných karet mají karty přehled o tom, kolikáté jsou v pořadí a podle toho si zaberou jeden z dvanácti komunikačních kanálů M-LVDS v subrack jednotce. Řídicí jednotka má díky adresaci zásuvných karet rovněž informaci o aktuálním počtu zasunutých karet. Adresy jsou dvojího druhu. Absolutní adresy a relativní.

Absolutní adresa udává absolutní pozici vzhledem k celému řetězci subrack jednotek. Absolutní adresa je 8-mi bitové číslo. Absolutní adresa se přiděluje postupně

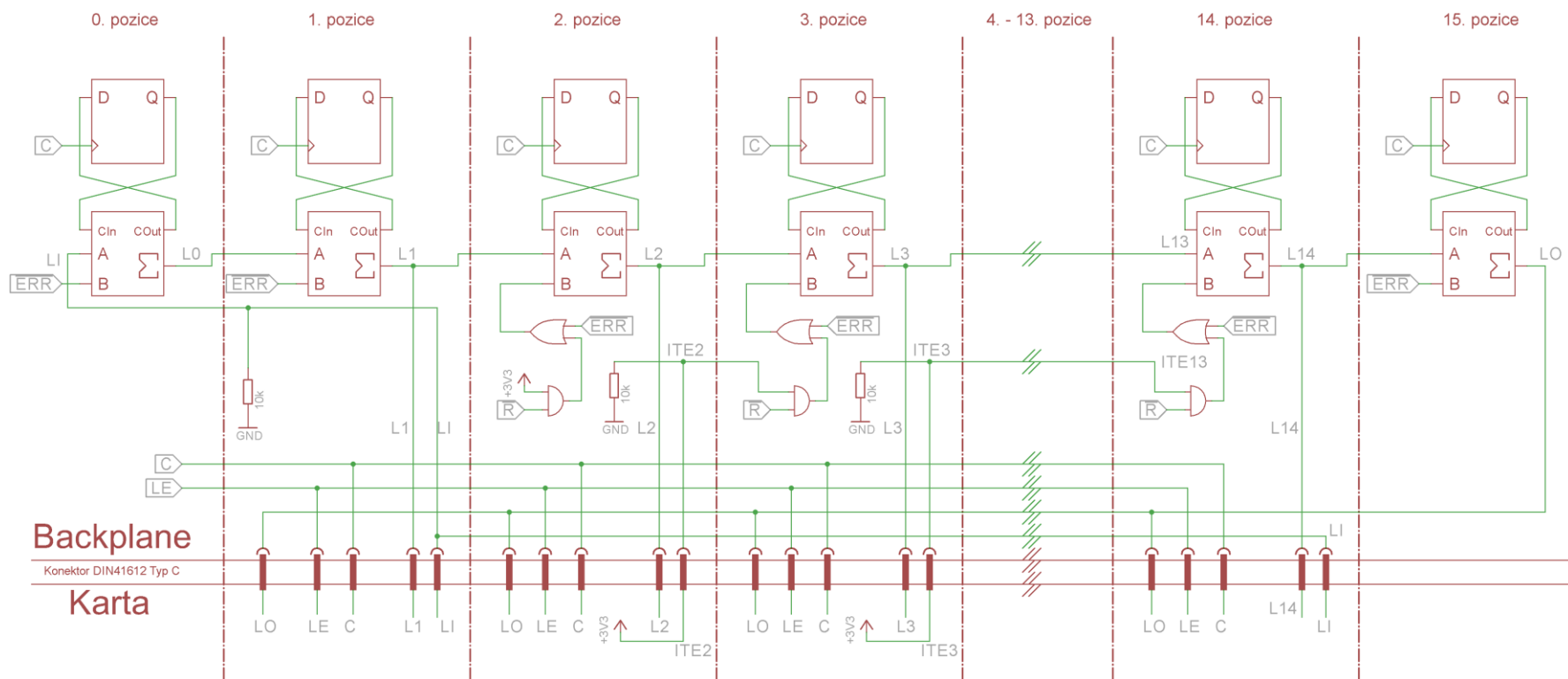
od **0**. Každá další adresovaná pozice dostane číslo o 1 větší než předešlá pozice. Absolutní adresu si zabírají následující pozice: začátek backplanu, první pozice (konektor) obsahující zakončovací nebo propojovací kartu, druhá až třináctá pozice (konektory) obsahující funkční zásuvné karty, čtrnáctá pozice (konektor) obsahující zakončovací nebo propojovací kartu a konec backplanu. Celkem tedy 16 čísel (**0 – 15**). Pokud by byl připojen další backplane, jeho čísla by začínala od 16 a rovněž by jich bylo 16 (**16 – 31**). Analogicky by obdržely čísla i následující backplany.

Relativní adresa je rovněž 8-mi bitové číslo a udává pozici (pořadí) funkční karty, která je oprávněna si zabrat relativní adresu (zatím se jedná o tranzistorovou kartu a o řídicí jednotku, viz Tabulka 2). Nezáleží tedy v kolikáté subrack jednotce se taková funkční karta nachází ani v jakém konektoru. Záleží pouze na tom kolik funkčních karet (oprávněných si zabrat relativní adresu) je v řetězci před ní. Pokud je funkční karta v řetězci první dostane **1**, následující funkční karta pak **2** a tak dále. Relativní adresy jsou nutné hlavně kvůli tomu, aby karty věděly, jaký si mají zabrat komunikační kanál, proto může relativní adresa nabýt maximálně hodnoty **12**. Z toho samého důvodu si relativní adresu nemůžou zabrat zakončovací nebo propojovací karty, protože jejich určení nevyžaduje komunikaci. Jak adresace karet funguje, si vysvětlíme v následujícím odstavci.

Probírat a popisovat do hloubky, jak a proč adresace funguje, by asi nebylo příliš přehledné, proto pro podrobnější studování funkce doporučuji využít simulaci. Simulační soubor z prostředí Matlab Simulink bude na přiloženém datovém nosiči. V tomto odstavci si spíše vysvětlíme princip fungování. Základním stavebním kamenem celého systému adresace karet je tzv. „**Rozřezaná sčítačka**“ (viz Obrázek 14) a správné řídicí impulsy z řídicí jednotky (viz Obrázek 13 <sup>[9]</sup>)



Obrázek 13 - Řídicí impulsy pro adresaci karet <sup>[9]</sup>



Obrázek 14 - Rozřezaná sčítačka

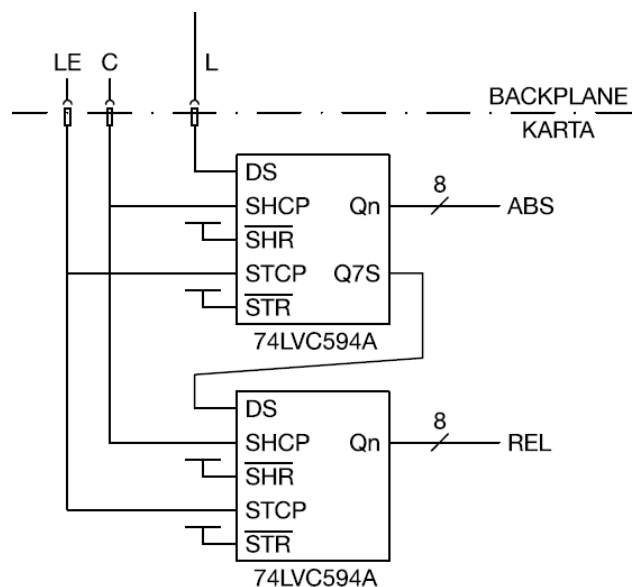


Jak už bylo řečeno výše, adresy jsou 8-mi bitová čísla, takže si povšimněme, že perioda opakování řídicích impulsů je 16 impulsů signálu *C* (synchronizační signál adresace karet, viz Obrázek 13 <sup>[9]</sup>). Prvních 8 impulsů je vyhrazeno pro načítání relativní adresy, druhých 8 impulsů pak pro načítání absolutní adresy. Při načítání relativní adresy můžeme z Obrázek 14 vidět, že nultá a první pozice (začátek backplanu a zakončovací či propojovací karta) dostanou obě *0*. Důvod jsme si již řekli a je jím skutečnost, že tyto části nemají oprávnění pro zabránění relativní adresy. Druhá pozice má pevnou relativní adresu *I* a mohou nastat dvě situace. První možností je, že na druhé pozici je připojena karta oprávněná zabrat si relativní adresu, takže si ji zabere a pro třetí pozici relativní adresu inkrementuje o *I*, přivedením signálu *ITE2*. Druhou možností je, že karta připojena není a tak se relativní adresa bez inkrementování přesune na třetí pozici a tak dále dokud není připojena karta s oprávněním si zabrat relativní adresu.

Načítání absolutní adresy funguje na velmi podobném principu, jako určování relativní adresy, akorát s tím rozdílem že adresu dostanou všechny pozice na backplanu (začátek backplanu, všech 14 pozic s konektory a konec backplanu). Přepínání mezi načítáním relativní a absolutní adresy určují řídicí impulsy (viz Obrázek 13 <sup>[9]</sup>). Signály *R* a *ERR* jsou logické signály napěťové úrovně *24 V*. Protože se využívají při adresaci karet, která logiku na napěťové úrovni *3,3 V*, je potřeba převodu napěťových úrovní, která je zajištěna pomocí napěťového děliče a Schmitova klopného invertujícího obvodu. Z Obrázek 13 <sup>[9]</sup> můžeme rovněž zjistit rychlostní omezení celého procesu z časových kót, které je dané zejména schopnostmi použitých součástek.

Nyní si probereme, jak je karta schopna z výše popsaného systému zjistit svoji relativní nebo absolutní adresu. Každá karta potřebující znát svoji adresu je vybavena dvojicí 8-bitových posuvných registrů. Posuvné registry jsou zapojeny do série (viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** <sup>[9]</sup>) a jsou připojeny na signál *L1, L2,...* podle příslušné pozice. Díky tomu, že každá sčítačka má vyveden CARRY OUT (*COut*) a CARRY IN (*CIn*) přes D klopný obvod (viz Obrázek 14) dochází k postupnému plnění posuvných registrů na příslušných pozicích právě příslušnými adresami. Vše lze jasně vidět při simulaci. Spodní posuvný registr po ukončení načítání adres obsahuje relativní

adresu příslušné pozice a horní posuvný registr pak obsahuje absolutní adresu. Náběžná hrana signálu **LE** (viz Obrázek 13 <sup>[9]</sup>) pak uvede načtené adresy v posuvných registrech v platnost a odešle je po paralelní sběrnici. Signály  $\overline{\text{SHR}}$  a  $\overline{\text{STR}}$  jsou trvale připojeny na logickou **1**.



Obrázek 15 - Posuvné registry <sup>[9]</sup>

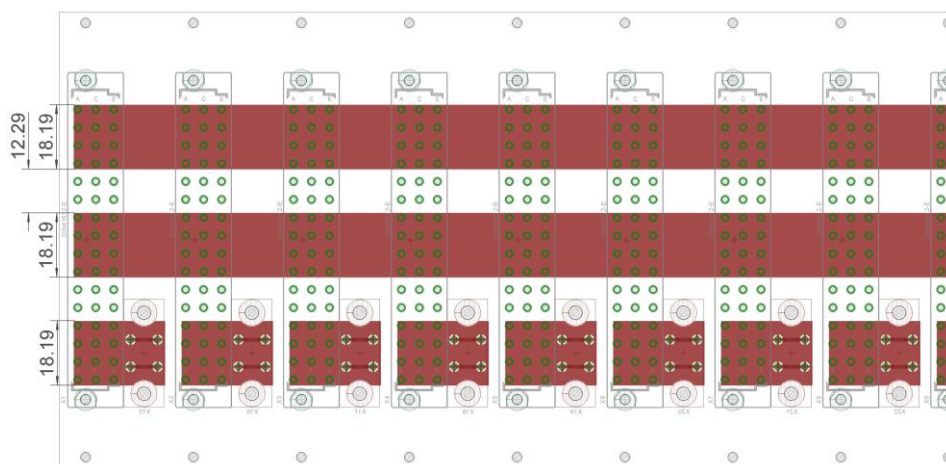
V případě propojení více subrack jednotek jsou na prvním a posledním konektoru vyvedeny signály **LI** (**Load In**...slouží pro vstup adresy z předchozí subrack jednotky) a **LO** (**Load Out**...slouží pro výstup adresy pro následující subrack jednotku). Signály jsou vyvedeny zároveň na prvním i posledním konektoru kvůli usnadnění řazení subrack jednotek nad sebe nebo vedle sebe. Pro propojení subrack jednotek je potřeba aby propojovací kabel správně propojoval příslušné signály. Bude proto nutné mít označeny konce kabelu **IN**, **OUT**.

## 4.3 Silová napájecí část

### 4.3.1 Návrh

Rozměry desky a pozice všech otvorů silové napájecí části backplanu jsou totožné jako u signálové části backplanu. Oproti signálové části se jedná o velmi jednoduchou desku plošného spoje. Deska je pouze dvouvrstvá s jednoduchým

motivem. Jediným požadavkem na desku je její ampacita neboli proudová zatížitelnost. Pro výpočet proudové zatížitelnosti potřebujeme znát tloušťku a šířku vodivých cest. Šířku nám určují konektory použité pro propojení napájecí části backplanu se zásuvnými kartami. Pro propojení jsou použity konektory DIN 41612 typ E. Vzhledem k velkým plochám souvislé mědi by bylo pájení konektorů za normálních podmínek kvůli odvodu tepla velmi obtížné, proto lze použít tzv. termální můstky (použity v případě konektorů od firmy Weidmüller, lze vidět na Obrázek 16). Ty ovšem spolu s tepelnou vodivostí snižují i proudovou vodivost. Proto jsou použity konektory DIN 41612 typ E v provedení **Pressfit**. Jedná se o mechanický lisovaný kontakt namísto pájeného. Tento způsob připojení konektoru k desce plošného spoje řeší problém odvodu tepla při pájení a rovněž se vyznačuje vyšší spolehlivostí než pájení. Další výhodou je rychlost montáže nebo případné demontáže takového konektoru na desku plošného spoje. Když zohledníme dříve uvedenou specifikaci sběrnice (viz Tabulka 4 - Rozložení a funkce jednotlivých pinů konektoru na silové napájecí části backplanu), zjistíme, že šířka vodivé cesty musí být přibližně čtyřnásobek rozteče pinů (ve skutečnosti o trochu méně kvůli izolační mezeře, viz Obrázek 16). Přesná šířka je **716 mil = 18,2 mm**.



Obrázek 16 - Backplane - silová napájecí část (vše v mm)

Tloušťku mědi jsme zvolili standardních **35 μm**. Podle standardu IPC – 2221A<sup>[7]</sup>, podle nějž počítá většina dostupných „kalkulaček“, je proudová zatížitelnost, pro oteplení vodivých cest o 40°C nad okolní teplotu a zadané parametry, **36 A** (viz

Tabulka 1). To je hodnota pro jednu vrstvu, naše deska je ovšem dvouvrstvá, takže celková proudová zatížitelnost činí **72 A**, což je vyhovující hodnota vzhledem k proudové zatížitelnosti konektorů, která je **66 A**. Na omezení bychom mohli narazit v případě, že bychom do jedné subrack jednotky zapojili např. dva paralelně pracující měniče nebo usměrňovače (odebíraný proud **2 x 66 A**), v tom případě by bylo nutné nechat vyrobit silový napájecí backplane s tlustší měděnou vrstvou, popřípadě více vrstev. Je ovšem nutno si uvědomit, že k delaminaci měděné vrstvy od nosného izolačního materiálu dochází při teplotách okolo **130°C**, takže pokud budeme uvažovat teplotu uvnitř subrack jednotky do **40°C** pak může být oteplení vodivé cesty teoreticky až **90°C** a to odpovídá zatížení proudem **51 A** na vrstvu. Vyvedení výkonu z jedné zásuvné karty (ze středu půlmůstku) je možné přímo z čelního panelu příslušné zasunovací karty, anebo pro stálou instalaci, i ze zadní strany subrack jednotky skrze backplane. V obou případech jsou použity silové konektory SV 7.62HP/02/180SF (pro přední panel zásuvné karty SV 7.62HP/02/90SF) od firmy Weidmüller. Jejich přednosti jsou především: velká proudová zatížitelnost (**81 A**), více možností zajištění připojení k protikusů, robustnost a ochrana před dotykem živých částí na obou protikusech.

## 5 Technická dokumentace

V této kapitole jsou umístěny veškeré grafické výrobní podklady. Výrobní podklady v elektronické podobě kterými jsou hlavně výstupní soubory z CAD softwaru pro NC výrobu, ale i všechny podklady uvedené v této kapitole, jsou umístěny na příloženém datovém nosiči.

## **5.1 Schéma zapojení – Backplane signálová část**



## **5.2 Rozmístění součástek – Backplane signálová část TOP**

### **5.3 Rozmístění součástek – Backplane signálová část BOT**





## **5.5 Schéma zapojení – Backplane silová napájecí část**

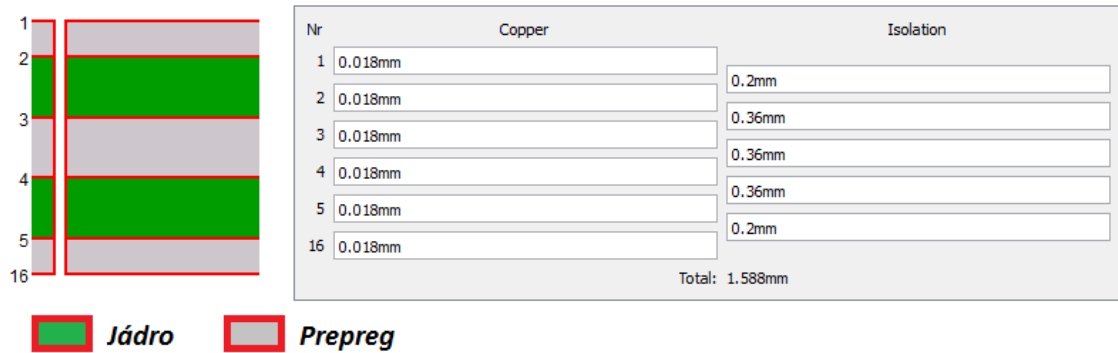
## **5.6 Rozmístění součástek – Backplane silová napájecí část TOP**

## **5.7 Rozmístění součástek – Backplane silová napájecí část BOT**



## 5.9 Stack-up desky plošného spoje

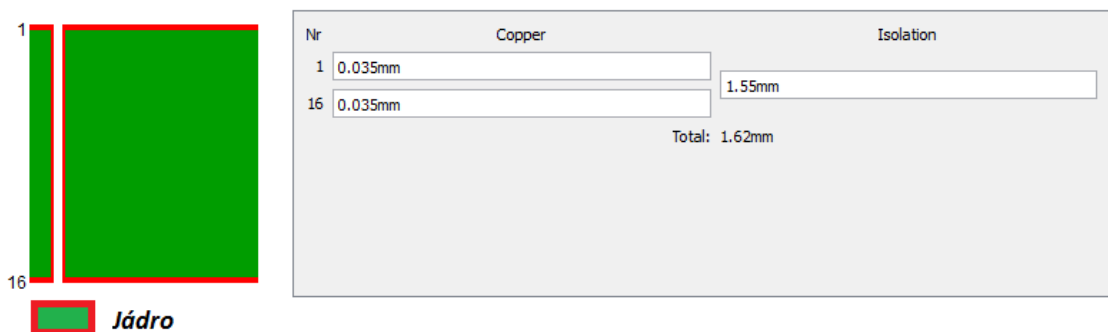
### 5.9.1 Backplane signálová část



Obrázek 17 - Stack-up desky plošného spoje - Backplane signálová část

Izolace ISOLA E-Cu quality 104

### 5.9.2 Backplane silová napájecí část



Obrázek 18 - Stack-up desky plošného spoje - Backplane silová napájecí část

Izolace ISOLA E-Cu quality 104

## 6 Závěr

Tato závěrečná diplomová práce pro mě byla velkým přínosem hlavně v tom ohledu, že jsem byl členem týmu, který se přímo podílel na vývoji nového zařízení od začátku až do konce. Během vývoje jsem spolu s týmem postupně prošel všechny tyto fáze:

- Základní návrh myšlenky konceptu
- Stanovení základních vlastností a funkcí (funkční a nefunkční požadavky)
- Určení vhodné platformy kompatibilní s průmyslovými standardy
- Teoretický návrh jednotlivých funkčních bloků s důrazem na dostupnost, vlastnosti a cenu materiálu
- Praktické ověření teoretických předpokladů pomocí simulací a testovacích přípravků
- Vlastní realizace navržených bloků
- Příprava technické dokumentace
- Příprava výrobních podkladů
- Komunikace s výrobcí a dodavateli

Po celou dobu vývoje jsme jako tým používali k ukládání a vzájemnému sdílení dat cloudové úložiště s funkcí verzovacího systému běžně používaného v průmyslu, díky kterému jsme se v případě potřeby mohli vracet k dřívějším verzím vývoje a zároveň spolupracovat na dálku.

Díky této závěrečné práci a její komplexní povaze jsem se přiučil postupům běžně používaným v praxi při vývoji nových elektronických zařízení. Každá z výše uvedených fází vývoje vyžadovala řešení různých druhů problémů a spolupráce s ostatními členy týmu, ale i s externími subjekty. Všechny nabyté zkušenosti považuji za velmi důležité a užitečné pro moji budoucí kariéru.

Všechny požadavky kladené na tuto práci zadáním byly zapracovány (viz především kapitola 3. Návrh konceptu a dále kapitola 4. Návrh backplanu). Výroba je realizována standardní formou u smluvního výrobce průmyslové elektroniky.

## 7 Seznam obrázků

Obrázek 1 - 19"rack jednotka o výšce 6U (rozměry v mm, D = 236mm) <sup>[1]</sup> .....	13
Obrázek 2 - Zásuvná jednotka s ventilátory (bod číslo 4) <sup>[1]</sup> .....	14
Obrázek 3 - Přehled průmyslových standardů různých druhů LVDS technologií <sup>[3]</sup> ....	19
Obrázek 4 - LVDS vysílač a přijímač, principiální schéma <sup>[3]</sup> .....	20
Obrázek 5 - Diferenciální signalizace <sup>[3]</sup> .....	20
Obrázek 6 - M-LVDS (přijímače nesmí mít vnitřní zakončovací odpory, RT...zakončovací odpory) <sup>[3]</sup> .....	21
Obrázek 7 - Rozměry backplanu s konektory typu IEC 60603-2 podle ČSN EN 60297- 3-104 (vše v mm) <sup>[5]</sup> .....	23
Obrázek 8 - Hlavní rozměry backplanu podle ČSN EN 60297-3-104 (vše v mm) <sup>[5]</sup> ....	24
Obrázek 9 - Celkový pohled na návrh rozměrů backplanu (vše v mm) .....	26
Obrázek 10 - Rozložení jednotlivých vrstev - řez deskou .....	27
Obrázek 11 - Rozložení vodivých cest .....	27
Obrázek 12 - Vztahy pro výpočet M-LVDS <sup>[3]</sup> .....	28
Obrázek 13 - Řídící impulsy pro adresaci karet <sup>[9]</sup> .....	30
Obrázek 14 - Rozřezaná sčítačka .....	31
Obrázek 15 - Posuvné registry <sup>[9]</sup> .....	33
Obrázek 16 - Backplane - silová napájecí část (vše v mm) .....	34
Obrázek 17 - Stack-up desky plošného spoje - Backplane signálová část .....	45
Obrázek 18 - Stack-up desky plošného spoje - Backplane silová napájecí část .....	45

## 8 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Výpočet proudové zatížitelnosti plošného spoje <sup>[2][7]</sup> .....	11
Tabulka 2 - Funkční typy karet (karty označené * si zabírají relativní adresy) .....	15
Tabulka 3 - Rozložení a funkce jednotlivých pinů konektoru na signálové části backplanu .....	16



Tabulka 4 - Rozložení a funkce jednotlivých pinů konektoru na silové napájecí části backplanu .....	18
Tabulka 5 - Minimální šířka vodivé cesty plošného spoje <sup>[4]</sup> .....	23
Tabulka 6 - Rozměry H6, H8 a H10 podle normy ČSN EN 60297-3-104 (vše v mm) <sup>[5]</sup> .....	24
Tabulka 7 - Hodnoty vodivých cest s řízenou impedancí.....	29
Tabulka 8 - Partlist - Backplane signálová část.....	40
Tabulka 9 - Partlist - Backplane silová napájecí část .....	44

## 9 Seznam rovnic

Rovnice 1 - Výpočet napětí ve stejnosměrném nezátíženém obvodu diodového usměrňovače $U_{DC0}$ ( $U_s$ ...sdrúžené síťové napětí) .....	11
Rovnice 2 – $P_{NHB}$ ...maximální výkon měniče – omezení zásuvné karty, $U_{DC}$ ...napětí stejnosměrného obvodu, $I_{NHB}$ ...jmenovitý efektivní proud procházející půlmůstkem.....	12
Rovnice 3 - $P_{NPCB}$ ...maximální výkon měniče – omezení desky plošného spoje, $U_{DC}$ ...napětí stejnosměrného obvodu, $I_{NPCB}$ ...jmenovitý efektivní proud procházející deskou plošného spoje.....	12
Rovnice 4 - Prostor mezi piny konektoru DIN 41612 typ C (rPAD...poloměr padu, vše v mil).....	29

## 10 Seznam použitých zdrojů

- [1] APRA-NORM ELEKTROMECHANIK GMBH. *19" Electronic packaging systems: 6 U subracks 245* [online]. 2015 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://www.apra-norm.de/nextshopcms/cmsspdf.asp?id=699>

- 
- [2] THE CIRCUITCALCULATOR.COM BLOG. *PCB Trace Width Calculator* [online]. 2006 [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://circuitcalculator.com/wordpress/2006/01/31/pcb-trace-width-calculator/>
- [3] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *LVDS Owner's Manual Design Guide: 4th Edition* [online]. 2008 [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ml/snla187/snla187.pdf>
- [4] PRAGOBOARD S.R.O. *Šíře vodiče / izolační mezera* [online]. 2012 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: [http://www.pragoboard.cz/vodic\\_mezera](http://www.pragoboard.cz/vodic_mezera)
- [5] ČSN EN 60297-3-104. *Mechanické konstrukce pro elektronická zařízení - Systém nosných konstrukcí řady 482,6 mm (19 palců) - Část 3-104: Konektory a souvisící rozhraní rozměrů koster a zásuvných jednotek*. Praha: Český normalizační institut, 2007, 36 s. Dostupné z: <https://csnonline.unmz.cz>
- [6] *PCB impedance calculator: Single ended / Differential pair* [online]. 2010 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.fedever.com/welldoneblog/wp-content/uploads/2011/08/Zcalc.zip>
- [7] IPC - 2221A. *Generic Standard on Printed Board Design*. Northbrook: Association Connecting Electronics Industries, 2003. Dostupné z: [http://sisko.colorado.edu/CRIA/FILES/REFS/Electronics/IPC\\_2221A.pdf](http://sisko.colorado.edu/CRIA/FILES/REFS/Electronics/IPC_2221A.pdf)
- [8] SATURN PCB DESIGN. *PCB Toolkit* [online]. 2014 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: [http://saturnpcb.com/pcb\\_toolkit.htm](http://saturnpcb.com/pcb_toolkit.htm)
- [9] KLINGER, Jakub. *Návrh základní desky zásuvného modulu tranzistorového pŕlmŕstku pro univerzální měnič*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.

## **11 Přílohy**

### **11.1 Vrstvy – Backplane signálová část**

### **11.2 Vrstvy – Backplane silová napájecí část**