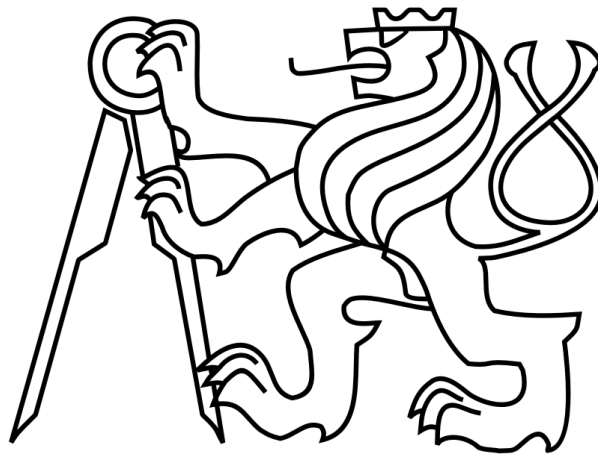


**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra mikroelektroniky**



**Diplomová práce**

**Modul pro testování bezpečnostní elektroniky**

**železničního přejezdu**

**Autor:** Bc. Josef Kaňák

**Vedoucí práce:** Ing. Vít Záhlava CSc.

**2020**



České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

**Student:** Bc. Josef Kaňák  
**Studijní program:** Elektronika a komunikace  
**Obor:** Elektronika  
**Název tématu:** Modul pro testování bezpečnostní elektroniky železničního přejezdu

### Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku železniční automatizace a princip funkce železničního přejezdu. Prostudujte železniční přejezd Wayguard DLX.
2. Navrhněte detailní obvodové elektrické schéma zapojení modulu pro testování bezpečnostní elektroniky Wayguard DLX.
3. Navrhněte desku plošného spoje a realizujte modul.
4. Proveďte oživení modulu a ověřte, že všechny jeho části (napájecí zdroje, komunikace mezi PC a modulem apod.) fungují správně.
5. Ověřte kompatibilitu s elektronikou přejezdu.

### Seznam odborné literatury:

- [1] G. Theeg, S. Vlasenko: Railway Signalling & Interlocking: International Compendium, 2nd Edition 2018, PMC Media House, ISBN-13: 978-3962451561
- [2] Jörn Pacht: Railway operation and control, Vtd Rail Pub 2002, ISBN-13: 978-0971991514
- [3] Záhlava, V. : Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN, Praha 2011
- [4] Katalogové a aplikační listy příslušných elektronických součástí

**Vedoucí práce:** Ing. Vít Záhlava CSc., katedra mikroelektroniky FEL

**Platnost zadání:** do 30.09.2021

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.  
vedoucí katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D..  
děkan



# Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci „Modul pro testování bezpečnostní elektroniky železničního přejezdu“ zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce.

V Praze dne 22. 5. 2020

podpis



# Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Vítu Záhlovovi, CSc. za podporu a rady při tvorbě této práce. Dále pak Ing. Václavu Vancovi za konzultace týkající se upřesnění zadání této práce, za vytvoření grafického uživatelského rozhraní pro ovládání motoru a za SW asistenci při testování realizovaného modulu.

V neposlední řadě děkuji také společnosti Siemens Mobility s.r.o. za financování tohoto projektu, poskytnutí licencovaného SW, laboratorních prostor a vybavení.





# Anotace

V předložené diplomové práci je popsán navržený a fyzicky realizovaný modul pro testování bezpečnostní elektroniky železničního přejezdu Wayguard DLX firmy Siemens Mobility s.r.o. Protože je celý projekt Wayguard DLX ještě ve vývoji, důležitým parametrem testovacího modulu je jeho univerzálnost, aby se v případě drobných změn v projektu nemusel navrhovat znovu a případně se mohl využít i na jiných projektech. Přípravek může být připojen k základní desce přejezdu pomocí „board to board“ konektorů, přes které jí poskytuje napájecí napětí a zároveň přes ně probíhá komunikace prostřednictvím sběrnice UART. Se samotným modulem lze také komunikovat pomocí počítače s využitím převodníku USB-UART. Vzhledem k tomu, že tento přípravek je používán pouze ve firemních laboratořích a kancelářských prostorech (nikoliv na přejezdu venku), není nutné, aby splňoval bezpečnostní normy a další testy, které musí splňovat testovaná zařízení. Výsledkem práce je funkční přípravek pro testování řídicí elektroniky přejezdu, který je kompatibilní se základní deskou systému Wayguard DLX.

## Klíčová slova

Testovací modul, železnice, železniční přejezd, bezpečnostní elektronika, UART, layout DPS

## Abstract

In the presented diploma thesis is described my design and practical implementation of the Module for Testing of Wayguard DLX Rail Crossing Safety Electronics from the company Siemens Mobility s.r.o. Because the whole project Wayguard DLX is still being developed and some changes may occur, there is very important requirement for universality of the module. This testing device can be connected to the baseboard of Wayguard DLX using „board to board“ connectors. Power supply and communication via UART are provided by them too. It is also possible to communicate with the testing module using computer and USB-UART converter. The result of this project is the testing device which has to be compatible with baseboard of the Wayguard DLX system.

## Keywords

Testing module, Railway, Rail crossing, Safety Electronics, UART, PCB layout



---

# Obsah

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	3
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	13
1. Úvod .....	15
2. Teoretická část .....	16
2.1. Železniční automatizace.....	16
2.2. Železniční přejezd.....	17
2.2.1. Pasivní železniční přejezd.....	18
2.2.2. Aktivní železniční přejezd.....	20
2.3. Železniční přejezd Wayguard DLX.....	21
2.4. Desky plošných spojů .....	22
2.4.1. Výroba .....	22
2.4.2. Technologie montáže součástek.....	23
2.4.3. Pájení.....	23
2.4.3.1 Pájení vlnou.....	24
2.4.3.2 Pájení přetavením .....	24
2.4.4. Vodivé lepení.....	25
3. Návrhová a experimentální část .....	27
3.1. Požadavky na testovací modul.....	27
3.2. Návrh jednotlivých bloků testovacího modulu .....	28
3.2.1. Napájecí zdroje.....	28
3.2.1.1 Napájecí větev +5 V.....	29
3.2.1.2 Napájecí větev +3,3 V.....	32
3.2.2. Procesory a převodník USB-UART .....	34
3.2.3. Multiplexory .....	35
3.2.4. Konektory.....	35
3.3. Detailní obvodové schéma zapojení .....	36

---

3.4. Návrh DPS.....	39
3.5. Ověření funkčnosti .....	41
4. Závěr.....	46
Použitá literatura.....	47
Seznam obrázků .....	48
Seznam tabulek.....	49
Přílohy.....	50
A. Seznam součástí (BOM).....	50
B. Realizovaný testovací modul.....	51

## Seznam použitých zkratek a symbolů

AC	Alternating current
BB	Baseboard
BGA	Ball grid array
DC	Direct current
DPS	Deska plošných spojů
EMC	Electromagnetic compatibility
ERA	European rail agency
ESR	Equivalent series resistance
GUI	Graphical user interface
HW	Hardware
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor
MTBF	Mean time between failures
PB	Processboard
PWM	Pulse width modulation
RMS	Root mean square
SMD	Surface mount device
SMT	Surface mount technology
SW	Software
THT	Through hole technology
UPB	Universal processboard
UPB_A	Universal processboard připojený ke kanálu A
UPB_B	Universal processboard připojený ke kanálu B
WDLX	Wayguard DLX

$C$	(F)	Kapacita
$f$	(Hz)	Frekvence
$I$	(A)	Elektrický proud
$L$	(H)	Indukčnost
$l$	(m)	Vzdálenost
$P$	(W)	Elektrický výkon
$R$	( $\Omega$ )	Elektrický odpor
$t$	(s)	Čas
$U$	(V)	Elektrické napětí
$v$	( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Rychlost

## 1. Úvod

První veřejná železnice vznikla již počátkem 19. století v Anglii a poprvé v historii byla využita nejen pro přepravu uhlí či jiného zboží, ale také osob. V průběhu 19. století došlo po zprovoznění parní lokomotivy k masivnímu rozvoji železniční dopravy, a to především ze strategických důvodů během válečných období. Během několika desítek let vytvořila železnice hustou dopravní síť a výrazně urychlila cestování hlavně po Evropě a Severní Americe.

Zároveň koncem 19. století byly uvedeny do provozu první osobní a následně i nákladní automobily se spalovacím motorem, a tak začala železniční doprava silně konkurovat silniční dopravě. S velmi dynamickým vývojem automobilů ve 20. století bylo nutné stavět a rozšiřovat i silniční síť. V důsledku toho docházelo stále častěji ke křížení silnice a železnice a vznikaly tzv. železniční přejezdy.

Zpočátku byly železniční přejezdy nehlídané a ničím neřízené a spoléhalo se pouze na pozornost řidičů. S přibývajícím množstvím automobilů na silnicích byli na větších přejezdech nasazeni lidé, kteří řídili provoz automobilů. S nástupem výpočetní techniky se začala vyvíjet bezpečnostní řídicí elektronika, díky které je přejezd bezpečnější a z dlouhodobého hlediska také levnější než pracující člověk. I přesto v některých zemích můžeme stále vidět, že tato pracovní pozice zaměstnance správy železnic nebyla automatizovaným přejezdem zcela vytlačena.

Mezi společnostmi, které se zabývají vývojem bezpečnostní řídicí elektroniky a jejího software pro plně automatizovaný železniční přejezd, patří např. firma Siemens Mobility s.r.o. Bezpečnostní elektronika přejezdu Wayguard DLX, vyvíjeného touto společností, se skládá z několika elementů, respektive řídicích jednotek, kde selhání kterékoliv z nich (či pouze nějaké její části) by mohlo mít na svědomí řádově až stovky životů (např. při vykolejení vlaku po srážce se silničním vozidlem apod.). Proto je nutné po návrhu a vyrobení každé části provést důkladné testování jak z hlediska hardware, tak i software.

První vyvinutou částí elektroniky, která bude použita téměř ve všech řídicích jednotkách, je základní deska (tzv. Baseboard – v roli master), ke které se bude připojovat několik dalších desek vyvinutých pro konkrétní aplikaci (tzv. Processboards – v roli slave) a případně další potřebná zařízení. Vzhledem k tomu, že vývoj těchto desek trvá řádově měsíce až roky, dostal jsem za úkol navrhnout tento testovací modul, aby bylo možné testovat Baseboard či jiné části elektroniky přejezdu už nyní. Podrobnější popis celého systému Wayguard DLX bude uveden v kapitolách 2. části této práce. Bližší informace o předpokládaných parametrech a vlastnostech mého návrhu budou uvedeny v kapitolách 3. části, tedy v *Návrhové a experimentální části*.

## 2. Teoretická část

### 2.1. Železniční automatizace

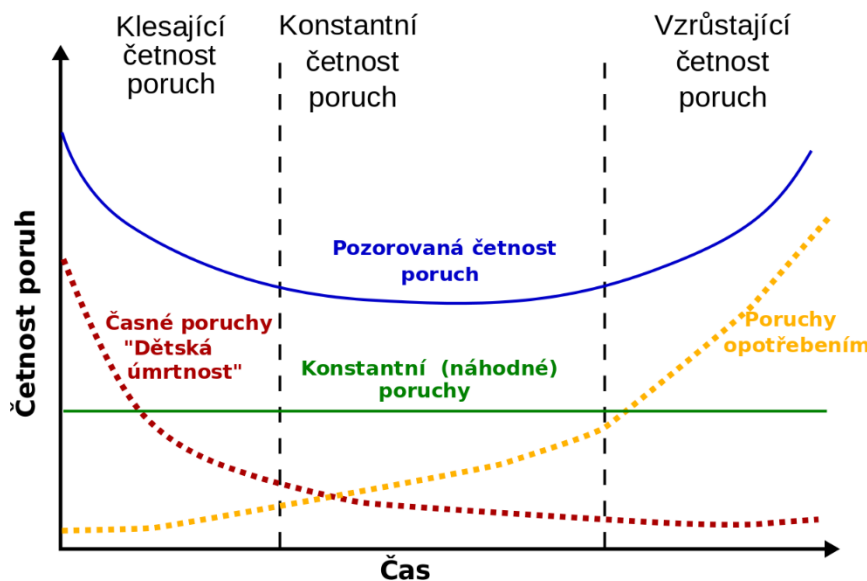
Elektronika železniční automatizace se z hlediska HW návrhu řadí do kategorie bezpečnostní elektroniky. Ta se od spotřební elektroniky velmi liší, jelikož její porucha může mít na svědomí mnoho lidských životů či velké finanční ztráty. Jedná se zejména o odvětví automobilové, železniční, letecké a vesmírné dopravy, jaderné elektroenergetiky, lékařské a nemocniční techniky či kritické průmyslové automatizace (slévárny, těžební zařízení apod.). Nejvýraznější rozdíly jsou především v životnosti zařízení, ve složitosti jeho návrhu a nepochybně v jeho ceně.

Zatímco spotřební elektronika se zpravidla navrhuje s životností 2 roky, bezpečnostní elektronika (na železnici) se navrhuje na 25 let. Klíčovými prvky návrhu jsou především kvalitní elektronické a mechanické součástky od spolehlivých výrobců, jejichž datasheet obsahuje výsledky (ideálně certifikovaných) testů a analýzy jejich chování v nejrůznějších okolních situacích a podmínkách jako například extrémní teploty, vlhkost, proudová a napěťová zatížitelnost, elektrická pevnost, mechanické namáhání apod. V těchto podmínkách výrobce garantuje jejich definovanou funkčnost a na základě těchto údajů vývojoví inženýři bezpečnostní elektroniky zvažují jejich použití a počítají předpokládanou poruchovost. Pro výpočet poruchovosti se používají zejména parametry MTBF a Lifetime (životnost).

MTBF (Mean time between failures) je statistická časová hodnota vyjadřující průměrnou dobu mezi dvěma poruchami výrobku. Vypočítá se jako podíl počtu provozních hodin a počtu poruch. Každá součástka v návrhu bezpečnostní elektroniky by měla mít MTBF stanovené výrobcem ve své dokumentaci. Výsledným MTBF celého zařízení je součet MTBF jednotlivých komponent. Čím je tento parametr vyšší, tím je zařízení spolehlivější. V některých případech je také důležitá hodnota MTTR (Mean time to restore), která udává průměrnou dobu od poruchy do obnovení činnosti zařízení. Posledním zmiňovaným parametrem je Lifetime (životnost), který je u kvalitních součástek udáván jejich výrobcem. Jedná se opět o časový údaj, který popisuje dobu trvání konstantní poruchovosti na vanové křivce, jak je vidět na obrázku 2.1. Lifetime celého navrženého zařízení udává součástka s nejkratší životností. Některé součástky tak nelze pro životnost zařízení 25 let použít. Jsou to například žárovky, elektrolytické kondenzátory (především ve vyšších teplotách), kritické elektromechanické součástky apod.

Dalším důležitým prvkem v návrhu bezpečnostní elektroniky je tzv. redundance, což znamená, že stejnou funkci zajišťuje více totožných zařízení (či jejich částí). V praxi jsou to často 2 zařízení na jednu funkci a pracují v rolích hlavního a záložního zařízení, kdy v bezporuchovém stavu plní danou funkci hlavní zařízení a v případě jeho poruchy ji dále plní záložní zařízení. Tím se získá potřebný čas na opravu nebo výměnu a eliminuje se doba výpadku.





Obrázek 2.1: Vanová křivka [převzato z 2]

I přesto, že návrh bezpečnostní elektroniky zahrnuje výše uvedené principy, musí být konečně zařízení podrobena mnoha certifikovaným testům, než bude reálně nasazeno v praxi. Jedná se například o klimatické testy, kde se zařízení testuje na celém požadovaném rozsahu teplot a provádí se i test vlhkosti přes rosný bod, jelikož orosení některých součástí (např. v BGA pouzdrech) může způsobovat problémy. Dále se jedná o mechanické testy na vibrace a otřesy, kde je důležité, aby těžké součástky, respektive jejich těžiště, byly co nejdříve DPS a zároveň, aby samotná DPS byla v okolí těchto součástí dodatečně upevněna. Nakonec se provádí EMC testy, tedy testy elektromagnetické kompatibility, kde je zařízení testováno na záření a na přepětí vzniklé zvenčí. Záření se testuje oběma směry, tedy jak maximální povolené vyzařování ze zařízení, tak i odolnost vůči vnějšímu vysokofrekvenčnímu rušení. Přepětí může být ve formě elektrostatického výboje (pak se jedná o ESD testy) anebo ve formě indukovaného napětí do vnějších kabelů (pak jsou to Burst a Surge testy). Všechny výše uvedené zkoušky mají dle norem stanovené limity, do kterých se výsledky měření musí vejít. Teprve po splnění těchto limitů, které se liší podle země, pro kterou je zařízení navrhováno a po úspěšném projití schvalovacím procesem dostane zařízení oprávnění k nasazení do provozu.

Informace pro tuto kapitolu jsem čerpal z [1].

## 2.2. Železniční přejezd

Železniční přejezd je místo, kde se kříží dva druhy dopravy, a to železniční a silniční, což způsobuje bezpečnostní problémy z důvodu velké kinetické energie vlaku a s tím spojenou nemožností okamžitého zastavení ve chvíli, kdy strojvedoucí uvidí překážku, k čemuž se zpravidla přidá malá bezpečnostní disciplinovanost řidičů silničních vozidel. Charakteristiky obou druhů dopravy jsou popsány v tabulce 2.1. Úmrtnost u nehod na železničních přejezdech tvoří přibližně třetinu všech zemřelých osob v důsledku nehod na železnici obecně. V drtivé většině případů je nehoda způsobena nevhodným chováním účastníků silničního provozu. Avšak ve vztahu k celkovému počtu nehod na silnicích tvoří nehody na přejezdech méně než 1 %. Pravdou však je, že vlivem již zmíněné vysoké kinetické energie vlak obvykle u těchto nehod

způsobí mnohem větší finanční škody a zraní se či zemře mnohem více lidí než u běžných silničních nehod (zranění a úmrtí také vlivem většího počtu přepravovaných osob).

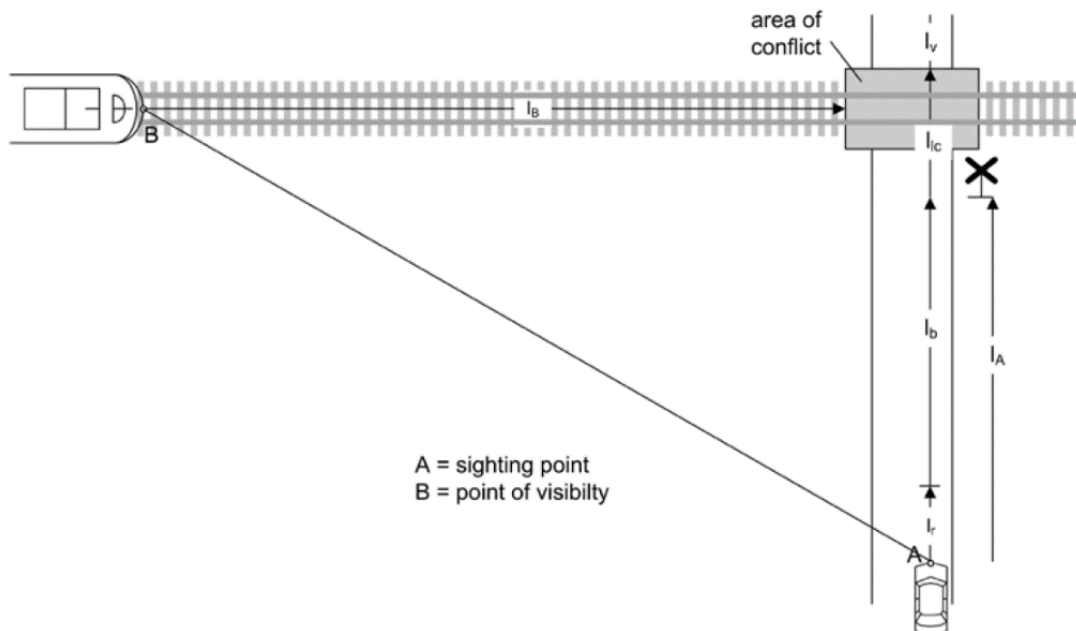
Kritérium	Železnice	Silnice
váha vozidel	velká	relativně malá
akcelerace a brždění	nízká	relativně vysoká
brzdná dráha	dlouhá	krátká
odstupy vozidel	dle signalizace	na dohled
styl řízení vozidla	kontrolovaný	individuální

**Tabulka 2.1: Charakteristiky železniční a silniční dopravy [převzato z 3]**

V důsledku porovnání brzdných drah železničních a silničních vozidel bylo rozhodnuto, že na přejezdech budou upřednostněna železniční vozidla, která budou za normálních podmínek přejíždět přejezd bez nutnosti zastavení. Proto je nutné včas varovat řidiče silničního vozidla, že se k přejezdu blíží vlak a řidič tedy musí zastavit. Pokud je zastavení silničního vozidla před přejezdem nemožné, protože je například k přejezdu blíže, než je délka jeho brzdné dráhy nebo je dokonce už na přejezdu, musí mít možnost bez problému opustit přejezd. Varování může být provedeno buď přímým optickým či akustickým vjemem vlaku nebo pomocí speciálních signalizací nainstalovaných na přejezdu, které musí pracovat bezpečně (tzv. fail-safe). V neposlední řadě by silniční doprava neměla být na přejezdu přerušována déle, než je nezbytně nutné, jelikož by to vedlo ke snížení disciplinovanosti řidičů.

Evropská železniční agentura (ERA – European Rail Agency) rozlišuje dva základní typy železničních přejezdů, a to pasivní a aktivní.

### 2.2.1. Pasivní železniční přejezd



**Obrázek 2.2: Trojúhelník výhledu řidiče [převzato z 3]**

Pasivní železniční přejezd umožňuje silničním vozidlům kdykoliv vjet na přejezd bez ohledu na to, jestli se k němu blíží vlak či nikoliv. Řidič se proto musí rozhlédnout a sám vyhodnotit situaci. Nejdůležitější věcí k tomu, aby řidič zaregistroval vlak přibližující se k přejezdu, je udržovat trojúhelník výhledu (přijíždějícího řidiče k přejezdu) bez překážek, jak je vidět na obrázku 2.2. Bod A představuje tzv. pozorovací bod, který je nejzazším místem pro rozhodnutí řidiče, jestli před přejezdem zastaví nebo přes něj přejeде. Vzdálenost tohoto bodu od přejezdu je samozřejmě závislá na mnoha parametrech jako např. na brzdě dráze, která se odvíjí od počáteční rychlosti vozidla, dále reakční době řidiče a vozidla apod. Bod B pak představuje bod viditelnosti.

Nezbytná pozorovací vzdálenost řidiče  $l_A$  (tj. od bodu A do místa zastavení před přejezdem) je definována rovnicí 2.1.

$$l_A = t_r \cdot v_v + l_b \quad (2.1)$$

A celková vzdálenost  $l_C$  potřebná k přejetí přejezdu (tj. od bodu A za přejezd) je definována rovnicí 2.2.

$$l_C = t_r \cdot v_v + l_b + l_{l_C} + l_v \quad (2.2)$$

Kde:

- $l_b$  - brzdě dráha silničního vozidla (závislá na jeho rychlosti)
- $l_{l_C}$  - vzdálenost od místa zastavení před přejezdem do místa opuštění přejezdu
- $l_v$  - délka silničního vozidla
- $t_r$  - reakční doba řidiče a silničního vozidla
- $v_v$  - rychlost silničního vozidla

Obdobně lze vypočítat čas  $t_C$  potřebný k přejetí přejezdu (tj. od bodu A za přejezd) podle rovnice 2.3.

$$t_C = t_r + \frac{l_b + l_{l_C} + l_v}{v_v} \quad (2.3)$$

Minimální bezpečná doba pro přejetí přejezdu je určena rovnicí 2.4, kde  $S$  symbolizuje bezpečnostní časovou rezervu.

$$t_a = t_C + S \quad (2.4)$$

A nakonec vzdálenost  $l_B$  (tj. potřebná vzdálenost vlaku od přejezdu) je dána rovnicí 2.5, kde  $v_t$  je rychlost vlaku a předpokládá se okolo  $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

$$l_B = v_t \cdot t_a = v_t \cdot \left( t_r + \frac{l_b + l_{l_C} + l_v}{v_v} + S \right) \quad (2.5)$$

Typické rozsahy hodnot výše uvedených proměnných jsou shrnuty v tabulce 2.2.

Proměnná	Typický rozsah hodnot
$l_b$	5 m až 100 m (závisí na rychlosti silničního vozidla)
$l_{lc}$	5 m až 20 m (závisí na počtu kolejí na přejezdu)
$l_v$	až 25 m (závisí na horním limitu pro délku vozidla v dané zemi)
$t_r$	1 s až 3 s
$v_v$	$1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (závisí na rychlostních omezeních v dané zemi)
$S$	2 s až 5 s

Tabulka 2.2: Typické rozsahy hodnot použitých proměnných [převzato z 3]

### 2.2.2. Aktivní železniční přejezd

Na rozdíl od pasivního přejezdu aktivní železniční přejezd signalizuje účastníku silničního provozu, zda je oprávněn vjet na přejezd či nikoliv, a musí se touto signalizací řídit. Mezi nejčastější signalizační zařízení patří například semafor, reproduktor, závora apod. Příklad aktivního železničního přejezdu je vidět na obrázku 2.3. Většina signalizací může být také prováděna pouze člověkem bez elektronických signalizačních zařízení, a pak se také jedná o aktivní železniční přejezd. V některých zemích se využívá kombinace obou způsobů.



Obrázek 2.3: Příklad aktivního železničního přejezdu (Německo) [převzato z 3]

Signalizační zařízení se napříč zeměmi velmi liší, což může způsobovat problémy především zahraničním řidičům. Například semafor (světelná signalizace) může příkaz pro zastavení silničního vozidla signalizovat trvale svítící červenou barvou, blikající červenou, dvěma střídavě blikajícími červenými aj. V některých zemích semafor obsahuje také bílou či žlutou barvu.

Mechanické uzavření silnice se také provádí různými způsoby. Buď se použijí dvě poloviční závory, kdy v každém směru silničního provozu blokuje jedna závora pouze svůj jízdní pruh, nebo se použijí dva páry polovičních závor (celkem tedy 4 poloviční závory), které dohromady blokují celou silnici v obou směrech, nebo je dále možné použít pouze dvě plné závory či vzájemné kombinace všech výše uvedených. V některých zemích se používají i jiné mechanické překážky než závory, a to například silniční zátarasy, které jsou zapuštěné v silnici.

Některé země k uvedené signalizaci přidávají ještě akustickou signalizaci, která může být zajištěna buď samotným příjezdějším vlakem (houkání) nebo železničním přejezdem. V případě železničního přejezdu může akustická signalizace trvat buď pouze po dobu zavírání závor, nebo do příjezdu vlaku na železniční přejezd, a nebo po celou dobu, dokud vlak neopustí prostor přejezdu.

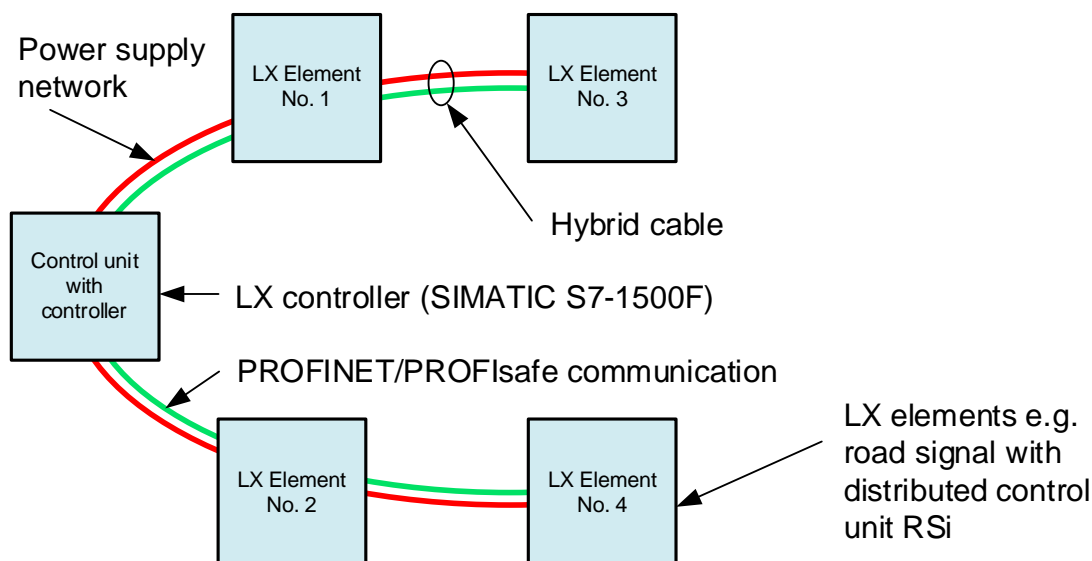
Podrobnější informace k této problematice jsou popsány v [3], odkud jsem čerpal informace pro celou kapitolu 2.2.

### **2.3. Železniční přejezd Wayguard DLX**

Železniční přejezd Wayguard DLX je elektronický řídicí systém, jenž je vyvíjen společností Siemens Mobility s.r.o. v Praze. Je navrhován dle evropských bezpečnostních předpisů a norem, tudíž je možné jeho nasazení v kterémkoliv členském státu EU.

Wayguard DLX se skládá z několika elementů, mezi které patří například: světelná a zvuková silniční signalizace, závora, napájecí systém včetně záložních baterií apod. Každý element má svou řídicí jednotku, která je umístěna uvnitř jeho krytu (např.: řídicí jednotka pro světelnou signalizaci je umístěna uvnitř světla atd.). Tímto se opouští dříve používaná hvězdicová topologie, kde všechny řídicí jednotky byly umístěny v jedné budově a veškeré kabely z jednotlivých elementů byly taženy do ní. Topologie přejezdu WDLX umožňuje absenci této budovy a řídicí jednotky jednotlivých elementů se přesouvají do nich samotných. Díky tomu se snižují vysoké náklady na výkopové práce a ušetří značná část kabelů a dalšího materiálu.

Všechny elementy, resp. jejich řídicí jednotky jsou vzájemně propojeny pomocí hybridního kabelu skládajícího se z metalických vodičů pro napájení a z optických vláken pro přenos dat, jak je znázorněno na obrázku 2.4. Datová komunikace probíhá v reálném čase s využitím protokolu PROFINET/PROFIsafe.



Obrázek 2.4: Struktura WDLX [převzato z 4]

Základem většiny řídicích jednotek je tzv. Baseboard, neboli základní deska v roli master, která slouží především ke zprostředkování komunikace mezi jednotlivými elementy přejezdu. K ní se pomocí board-to-board konektorů připojí další deska (tzv. Processboard) v roli slave, která je již navržena pro specifickou funkci do každé řídicí jednotky zvlášť. Mezi tyto funkce patří například: řízení světelné signalizace, řízení zvukové signalizace, ovládání závory, řízení nabíjení záložních baterií apod. Každý Processboard také poskytuje napájecí napětí +5 V svému Baseboard.

## 2.4. Desky plošných spojů

### 2.4.1. Výroba

Základem desky plošných spojů je nosný materiál. Pro pevné (neohebné) DPS je nejčastěji využíván kompozit s označením FR4. Základem kompozitu je skleněná tkanina, která prochází nádrží s epoxidovou pryskyřicí a tou se impregnuje. Z takto naimpregnované tkaniny jsou následně vysekávány listy, které jsou poté předsušeny tak, aby nelepily. Tyto listy jsou často označovány jako Pre Preg. Následně jsou k sobě skládány 2 listy Pre Pregu a shora a zdola (pro dvouvrstvou desku) je přiložena tenká měděná fólie s tloušťkou nejčastěji 5 – 105  $\mu\text{m}$ , která se v dalších technologických postupech využije k vytvoření spojů. Vše je za tepla slisováno.

Následuje takzvaná fotolitografie, to znamená, že měděné fólie z obou stran desky se očistí, pokryjí fotorezistem, což je světlocitlivý polymer, který po osvětlení zesítuje a stane se nerozpustným ve vývojce (bez osvětlení je v ní rozpustný). Dále se fotorezist exponuje přes masku, která je tvořena navrženým motivem tzv. layoutem. Po expozici se deska ponoří do vývojky, která smyje neosvětlené části fotorezistu. Poté se ponoří do selektivního leptadla na měď, a to odleptá části mědi, které nezůstaly pokryty fotorezistem. Nakonec se sundá fotorezist například sprchováním horkou vodou s 1 % ethanolu. V následujícím kroku se layout DPS testuje.

Samozřejmě, že podle složitosti navrženého elektrického obvodu a podle požadovaných parametrů z hlediska EMC, může být před lisováním měděná vrstva nanesena pouze na jednu nebo na obě strany nosného materiálu. Pak mluvíme o jednovrstvé nebo dvouvrstvé DPS. Vícevrstvé desky se vyrábějí tak, že například pro čtyřvrstvou DPS je základem dvouvrstvá, která je vyrobena podle postupu popsaného výše a na ni je shora a zdola přiloženo po dvou listech Pre Prego a po jednom listu měděné fólie. Pak je vše za tepla slisováno a pokračuje se fotolitografií a následným testováním. Výroba šesti vrstvé DPS se provádí analogicky s tím, že základem je čtyřvrstvá atd. Celková tloušťka DPS se většinou pohybuje od 0,5 mm do 3,2 mm.

Někdy je layout navržen tak, že je nutné propojit jednotlivé spoje z různých vrstev. K tomu slouží prokovy tzv. vias, kdy se do kompozitu FR4 v místě průsečíku spojů z různých vrstev (při pohledu shora) vyvrtá díra a následně se prokovicí. Tím je zajištěno vodivé spojení mezi jednotlivými vrstvami. V případě součástek s pouzdrem pro montážní technologii THT (popsáno v následující kapitole) lze k propojení jednotlivých vrstev využít prokovených děr pro piny součástek.

Na otestovanou a očištěnou desku se pak nanese světlocitlivá nepájivá maska, která se osvítil přes její motiv. Ze zakrytých neosvícených míst je nepájivá maska následně smyta a výsledný požadovaný vzor tepelně vytvrzen. Dále může být deska ještě opatřena servisním potiskem, což jsou popisky pro usnadnění osazování nebo případných oprav osazené desky. Typicky se provádí sítotiskem v bílé barvě. Výroba je zakončena úpravou DPS na výsledný požadovaný rozměr, a to například: ostřížením na padacích nůžkách, frézováním či drážkováním. Případně, pokud budou na desku kladeny speciální požadavky, lze měděné plošky například pozlatit.

### 2.4.2. Technologie montáže součástek

Starší technologií montáže součástek na DPS je THT (Through hole technology), která umožňuje montáž součástek s drátovými vývody, které se z jedné strany desky (typicky shora) vsunují do vyvrtaných a často prokovených děr a z druhé strany (typicky spodní vrstva) se připájejí k pájecím ploškám.

Novější technologií montáže součástek je SMT (Surface mount technology), která umožňuje osazení součástkami s pouzdry SMD (Surface mount devices), které nemají drátové vývody, tudíž nepotřebují vyvrtané díry a je možné je osazovat z obou stran desky přesně nad sebe. Tato technologie s povrchovou montáží přináší řadu výhod oproti THT, a to například: výrazné zmenšení rozměrů a hmotnosti celé součástky, lepší vysokofrekvenční vlastnosti, snazší automatizované osazování DPS, vyšší spolehlivost a nižší cena osazené desky. Nevýhodou SMD pouzder oproti pouzdrům s drátovými vývody je např. horší odvod tepla a nehodí se tedy pro výkonové součástky.

### 2.4.3. Pájení

Pájení je v současnosti nejrozšířenější technologií vodivého upevnování součástek k pájecím ploškám na DPS. Od 1. 7. 2006, kdy bylo směrnicí RoHS z pozice EU zakázáno používání olova v elektrotechnice, se používá bezolovnatá pájka. Původní nejpoužívanější olovnatá pájka 63 % Sn – 37 % Pb s teplotou tavení již při 183 °C byla nahrazena spoustou náhražek olovnaté pájky, ovšem žádná nedosahuje tak dobrých vlastností pro pájení jako již zmíněná olovnatá.

Z bezolovnatých se nejvíce, díky svým vlastnostem, uchytila slitina 95,5 % Sn – 3,8 % Ag - 0,7% Cu. Její nevýhodou je však vysoká tavící teplota.

Mezi nejčastější metody pájení se v současnosti řadí pájení vlnou, pájení přetavením a případně ruční pájení.

### 2.4.3.1 Pájení vlnou

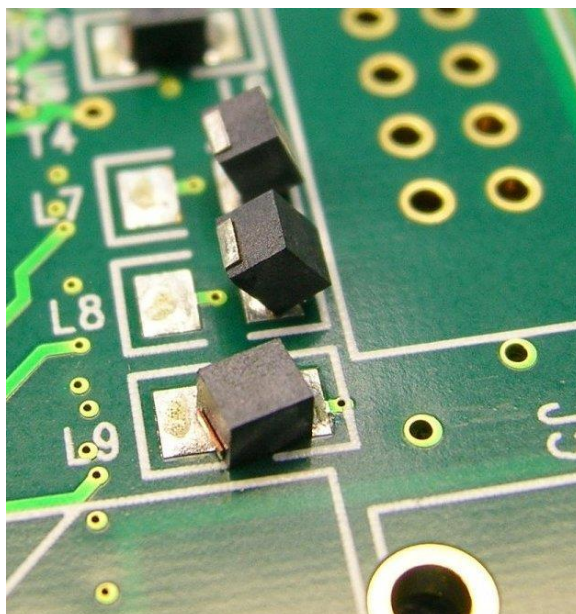
Při pájení vlnou se roztavená pájka nachází v kontejneru, ve kterém jsou z ní vytvořeny vlny. DPS s osazenými součástkami se pohybuje nad vlnou tak, že vlna roztavené pájky (typicky jsou dvě vlny) omývá spodní stranu desky a tím se připájí místa k tomu určená. Místa, která sice jsou pájitelná, ale nechceme je pájet, se obvykle pokryjí ochrannou nepájivou vrstvou. Nakonec deska prochází pod tzv. „horkým nožem“, což je proud horkého vzduchu o teplotě okolo 380 °C, který odřízne případné „krápníky“, které se při pájení vytvořily na pájených spojích ve směru pohybu desky.

Tento typ pájení se nehodí pro všechny typy součástek, především proto, že součástky se při tomto procesu nachází několik sekund v roztavené pájce, a tedy například: u polovodičů, součástek v plastových pouzdrech, či elektrolytických kondenzátorů, by došlo k jejich poškození vlivem vysoké teploty. Tyto součástky se po ukončení pájení vlnou musí připájet například ručním pájením. Dále je nutné SMD součástky umístěné na straně DPS, kterou bude vlna omývat, před pájením přilepit pomocí lepidel. Tato lepidla nesmí být elektricky vodivá, nesmí být toxická, nesmí se tavit při teplotě tavení pájky, nesmí chemicky ovlivňovat desku ani součástku a musí k nim mít dobrou adhezi. Na pájecí vlně se dále vyskytuje tavidlo, které slouží ke zkvalitnění spoje tím, že odstraní z povrchů spojovaných součástí sloučeniny vzniklé především reakcí s ovzduším. Tavidla jsou typicky organické sloučeniny, které je nutné po zapájení smýt, aby nezpůsobovaly korozi.

### 2.4.3.2 Pájení přetavením

Tato technologie řeší nevýhody pájení vlnou, a to jak nemožnost pájení některých součástek (polovodiče, součástky s plastovým pouzdrům, elektrolytické kondenzátory apod.), tak i tvorbu můstků mezi jednotlivými pájenými místy, které u pájení vlnou mohly vzniknout například u integrovaných obvodů, které měly piny velice blízko sebe. Stačí menší plošky než u pájení vlnou. Nevýhodou je riziko *Swimming&Manhattan efektu*, což je tzv. sklouznutí pinu z pájecí plošky či samovolné postavení součástky vertikálně vlivem špatně navrženého layoutu (nesymetrické tuhnutí pájecí pasty – na jedné straně součástky větší odvod tepla apod.). Oba nežádoucí jevy jsou zobrazeny na obrázku 2.5 (na nejbližší součástce - tedy dole na obrázku *swimming efekt* a na vzdálenějších dvou *Manhattan efekt*).





**Obrázek 2.5: Swimming&Manhattan efekt [převzato z 5]**

Před pájením se musí nanést pájecí pasta na pájecí plošky (sítotiskem, šablonovým tiskem nebo dispenserem), na kterých se bude pájet a poté se deska osadí požadovanými součástkami pomocí osazovacího automatu. Následně je potřeba nechat pájecí pastu vysušit při teplotě typicky okolo 120 °C, aby se odpařily kapalné složky a aktivovalo tavidlo obsažené v pastě. Takto je deska s vysušenou pastou a osazenými součástkami předežívána pod bodem tavení pasty. K přetavení pasty a tím i k připájení součástky dojde při zvýšení teploty, které může být zajištěno například: infračervenými zářiči, laserem, horkým plynem, ohřevem kondenzací par apod.

#### 2.4.4. Vodivé lepení

Alternativní bezolovnatou technologií vodivého upevňování součástek na DPS je vodivé lepení. Vodivá lepidla byla vynalezena okolo roku 1965 na univerzitě poblíž New Yorku. Skládají se ze dvou složek, a to z vazební a vodivé. Vazební složka je typicky tvořena epoxidovou, silikonovou nebo polyimidovou pryskyřicí (termosety, reaktoplasty, jednosložková či dvousložková pryskyřice). Vodivá složka je typicky tvořena kuličkami o průměru 6 – 8 μm ze stříbra, mědi s vrstvou stříbra, či plastu s vrstvou stříbra nebo šupinkami různých velikostí ze stejných materiálů jako kuličky. Lepidla se dělí na izotropní a anizotropní. Izotropní mají koncentraci vodivých částic (šupinek) až do 80 % a mají tedy ve všech směrech stejnou vodivost. Anizotropní mají nižší koncentraci vodivých částí (kuliček) – do 30 %. Jejich vodivost je různá v různých směrech a jsou vodivá především v ose „z“, proto jsou někdy nazývána Z – lepidla.

Nanášení lepidel se provádí buď sítotiskem, šablonovým tiskem, dispenserem nebo jehličkovým nanášením. Spoje s vodivými lepidly byly testovány na řadu parametrů jako například: elektrický odpor spojů, nelinearita VA charakteristiky spojů a jejich šum, dále na mechanickou pevnost v tahu a tlaku, odolnost vůči klimatickému namáhání, odolnost vůči stejnosměrnému proudu a proudovým pulzům a také na vliv kvality a materiálu spojovaných kontaktů na kvalitu spojů. Z testování vyšlo najevo, že v drtivé většině parametrů jsou lepené vodivé spoje horší, než pájené a ještě navíc dražší. Ovšem přesto se stále využívají

ve speciálních aplikacích, kde je využito pár jejich lepších vlastností oproti bezolovnatým pájkám, a to nízké vytvrzovací teploty – typicky 100 – 120 °C a případně větší pružnosti. Využívají se např.: při výrobě LCD displejů, ve 3D strukturách apod.

Podrobnější informace k této problematice jsou popsány v [6] a v [7], odkud jsem také čerpal informace. Kapitola 2.4 *Desky plošných spojů* převzata z [8].

### 3. Návrhová a experimentální část

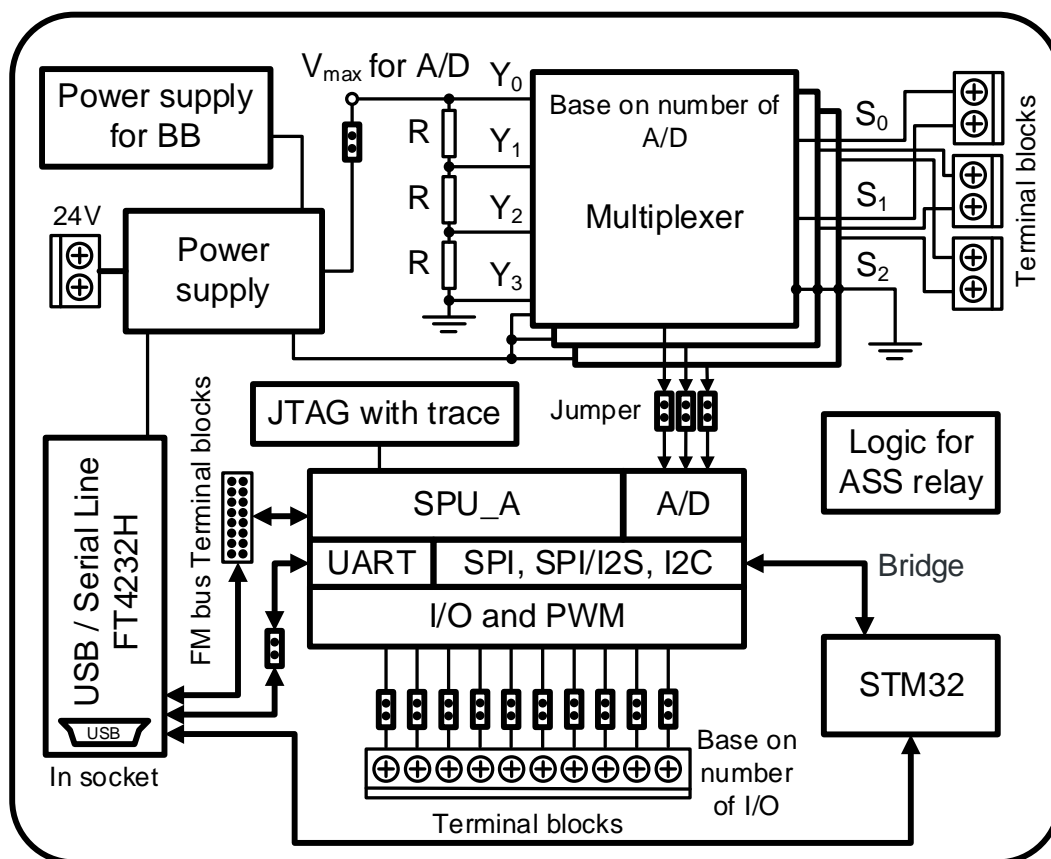
#### 3.1. Požadavky na testovací modul

Jak již bylo okrajově naznačeno v úvodu a následně v kapitole 2.3 této práce, první vyvinutou částí, společnou pro většinu řídicích jednotek, je Baseboard (BB), jehož procesory pracují vždy v roli master. K této základní desce budou připojovány další desky (Processboards – PB) specificky navržené pro řízení funkce jednotlivých elementů Wayguard DLX. Processboards mají procesory pracující v roli slave a komunikují s master procesory pomocí sběrnice FM-Bus. Navrhovaný testovací modul bude v podstatě univerzální Processboard (UPB), který bude obsahovat veškeré periférie jednotlivých, v budoucnu vyvinutých, Processboards. Tím bude umožněno otestovat Baseboard či jiná zařízení už nyní.

Požadavky na testovací modul stanovené vývojovými inženýry Siemens Mobility s.r.o. tedy jsou:

- Navrhnout potřebné napěťové větve z napájecího napětí +24 V
- Nutnost kompatibility s deskou Baseboard (napájení pro BB, pozice konektorů, implementace logiky ASS relé, ...)
- Pomocí propojek možnost volit kanál BB, ke kterému bude testovací modul připojen
- Možnost připojení dvou modulů (UPB) k jednomu BB najednou, a to jak v konfiguraci BB + UPB\_A + UPB\_B (tedy jeden UPB připojený ke kanálu A a druhý UPB ke kanálu B), tak v konfiguraci BB + UPB\_A + UPB\_A (dva UPB připojené ke stejnému kanálu)
- Fyzická adresa modulu (FM-Bus address) nastavitelná pomocí propojek
- Všechny piny Slave procesoru vyvedeny na wire-to-board konektory pro alternativní funkce
- Možnost řízení testovacího modulu z počítače pomocí čtyřkanalového převodníku USB-UART. První UART kanál pro Slave procesor, druhý pro Bridge procesor, třetí pro FM-Bus a čtvrtý jako rezerva pro případ potřeby.
  
- Periférie Slave procesoru k testování:
  - 2x SPI (jedno SPI v módu I2S (pouze master))
  - 1x I2C (pouze master)
  - 1x UART
  - 12x Analogový vstup (vstup A/D převodníku)
  - Rozhraní JTAG+TRACE pro naprogramování a ladění
  
- Periférie pomocného procesoru (tzv. Bridge):
  - 2x SPI (jedno SPI v módu I2S (pouze slave))
  - 1x I2C (pouze slave)
  - 1x UART
  - Indikační LED (zelená, žlutá, červená)
  - Rozhraní JTAG+TRACE pro naprogramování a ladění

Pro snazší porozumění a rychlejší orientaci v zadání je k dispozici blokové schéma testovacího modulu na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Blokové schéma testovacího modulu

### 3.2. Návrh jednotlivých bloků testovacího modulu

Siemens Mobility s.r.o. používá pro návrh elektrických schémat a desek plošných spojů programový balík Zuken. Databáze schematických značek a jejich příslušných pouzder je již vytvořena a je řízena centrálně z Německa pro všechny evropské dceřiné společnosti Siemens AG, které se zabývají návrhem elektroniky. Přidání nové součástky do databáze je velice zdlouhavé a nákladné, jelikož každá nová součástka musí projít schvalovacím procesem německých kolegů a zároveň je automaticky ve velkém množství nakoupena do skladu německé továrny, protože se předpokládá její použití v sériových výrobcích. Vzhledem k tomu, že počet vyrobených testovacích modulů bude přibližně 10 kusů, přidávání nových součástek nepřipadá v úvahu, a tak jsem byl nucen vybírat součástky pouze z databáze Siemens.

#### 3.2.1. Napájecí zdroje

Řídící jednotky železničního přejezdu Wayguard DLX jsou architektonicky navrženy tak, že napájecí konektor je umístěn pouze na desce Processboard (PB). Zde dochází ke zpracování přivedeného napájecího napětí a k jeho snížení na úroveň +5 V. Pomocí této napájecí větve je přes board-to-board konektor napájena deska Baseboard (BB). Na BB dochází opět ke snížení napětí a vytvoření napájecí větve +3,3 V. Toto napětí slouží pro napájení obvodů jak na BB, tak na PB, kam je distribuováno pomocí druhého board-to-board konektoru.

Z výše uvedeného plyne, že pro desky PB je dostačující, když provedou pouze konverzi přivedeného napájecího napětí na úroveň +5 V a poskytnou ji desce BB, která vyrobí úroveň +3,3 V a poskytne ji zpět PB. Z důvodu větší univerzálnosti testovacího modulu jsem se však rozhodl, že modul bude vyrábět obě napěťové úrovně, aby jej bylo možné použít i samostatně bez BB. Uživatel si tedy sám zvolí, jestli bude chtít využívat větev +3,3 V poskytovanou z BB nebo vyrobenou na testovacím modulu.

### 3.2.1.1 Napájecí větev +5 V

Vývojovými inženýry Siemens Mobility s.r.o. bylo stanoveno, že externí napájecí napětí testovacího modulu bude +24 V z laboratorního zdroje. Požadovaná proudová zatížitelnost napájecí větve +5 V na deskách PB je nominálně stanovena na 2 A. Z důvodu velkého rozdílu vstupního a výstupního napětí je nutné volit snižující spínaný DC/DC měnič (tzv. Buck), jelikož při použití lineárního regulátoru by docházelo k obrovským tepelným ztrátám. Ze Siemens databáze jsem tedy volil spínaný zdroj LM2576 od společnosti Texas Instruments, který disponuje nízkým počtem potřebných součástek a splňuje parametry zadání, které jsou  $U_{in} = +24 \text{ V}$ ,  $U_{out} = +5 \text{ V}$  a  $I_{out} = 2 \text{ A}$ . Dle dokumentace k tomuto integrovanému obvodu je dále nutné vybrat klíčové součástky podle následujících požadavků:

- Vstupní kondenzátor:

$C_{in} \geq 100 \mu\text{F}$ , elektrolytický

$U \geq 40 \text{ V}$

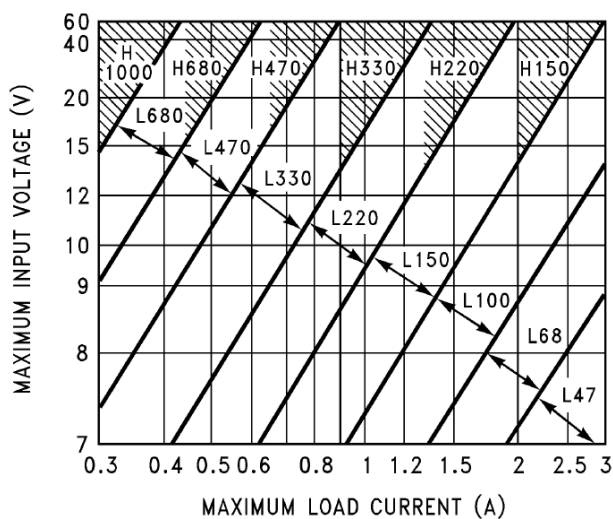
$Zvlňňň RMS hodnoty proudu \geq 1,2 \cdot \frac{U_{out}}{U_{in}} \cdot I_{out}$ , tedy  $\geq 0,5 \text{ A}$

pro maximální provozní životnost kondenzátoru.

- Cívka:

$L = 150 \mu\text{H}$  (dle obrázku 3.2)

$I_L \geq 1,15 \cdot I_{out} \geq 2,3 \text{ A}$



Obrázek 3.2: Výrobce doporučené cívky pro LM2576(HV)-5.0 [převzato z 9]

- Výstupní kondenzátor:

$C_{out} \geq 1000 \mu\text{F}$ , elektrolytický s nízkým ESR

$$U \geq 1,5 \cdot U_{out} \geq 7,5 \text{ V}$$

Zvlnění RMS hodnoty proudu  $\geq 1,5 \cdot \Delta I_{ind\ p-p}$ , tedy  $\geq 0,9 \text{ A}$

pro maximální provozní životnost kondenzátoru, kde  $\Delta I_{ind\ p-p}$  je zvlnění proudu cívkou špička-špička, které se dle výrobce rovná přibližně 20 % z maximálního DC proudu cívky.

- Usměrňovací dioda:

Ideálně Schottky dioda pro její nízký úbytek napětí v propustném směru a rychlost spínání nebo případně dioda s rychlým zotavením.

$$U_R \geq 1,25 \cdot U_{in} \geq 30 \text{ V}$$

$$I_F \geq 1,2 \cdot I_{out} \geq 2,4 \text{ A}$$

- Chladič:

Celkový vyzářený výkon integrovaného obvodu LM2576 je

$$P_D = U_{in} \cdot I_Q + \frac{U_{out}}{U_{in}} \cdot I_{out} \cdot U_{sat} = 0,716 \text{ W}, \text{ kde } I_Q \text{ je klidový proud obvodu LM2576 } (I_Q = 9 \text{ mA}) \text{ a } U_{sat} \text{ je saturační napětí } (U_{sat} = 1,2 \text{ V}).$$

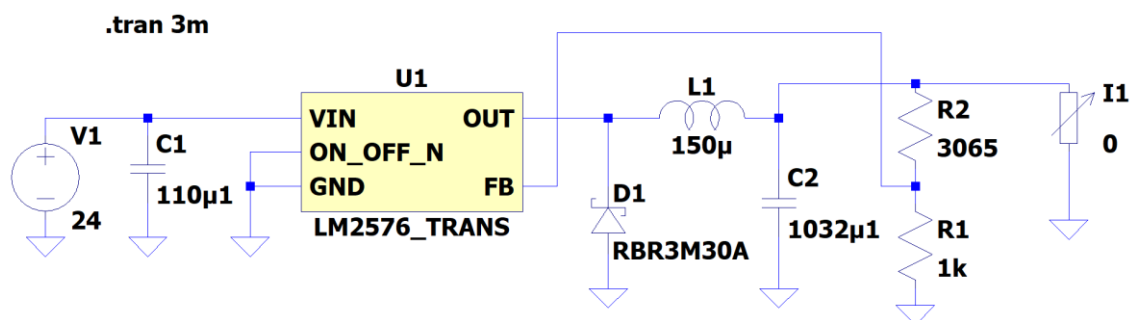
Růst teploty přechodu  $\Delta T_J = P_D \cdot R_{\theta JA} = 23,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , kde  $R_{\theta JA}$  je teplotní odpor „přechod-prostředí“ (tzv. junction-to-ambient thermal resistance). Pro LM2576 v pouzdru TO-220 je

$$R_{\theta JA} = 32,4 \text{ }^\circ\text{C/W}.$$

Aktuální provozní teplota přechodu (tzv. actual operating junction temperature) je pak  $T_J = \Delta T_J + T_A = 48,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , kde  $T_A$  je teplota okolí ( $T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Výrobce spínaného regulátoru LM2576 uvádí, že chladič je nutný, pokud aktuální provozní teplota přechodu je  $\geq 110 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pro tuto aplikaci tedy chladič nezbytně nutný není, ale vzhledem k tomu, že v databázi součástek jsou díry pro chladič již zakresleny a zároveň byl chladič součástí objednávky regulátoru, rozhodl jsem se, že jej osadím a přišroubuji k regulátoru.

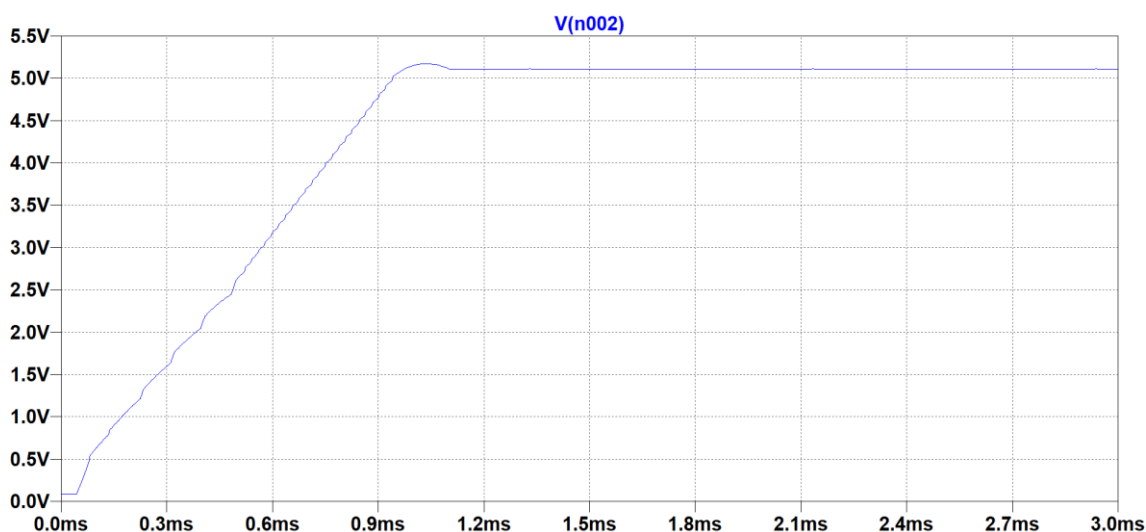
Na základě těchto požadavků jsem z databáze v programu Zuken volil vstupní kondenzátor EEVFK2A101M od firmy Panasonic, cívku PE53115NL od Pulse Electronics, výstupní kondenzátor EEEFK1E102AQ od Panasonic, Schottky diodu MBRD330G od ON Semiconductor a chladič LS220 od firmy ABL Heatsinks.

K simulaci této napěťové konverze jsem využil simulační software LTSpice, do kterého jsem přenesl vlastnosti výše zvolených součástek a vytvořil schéma zapojení – viz obrázek 3.3.



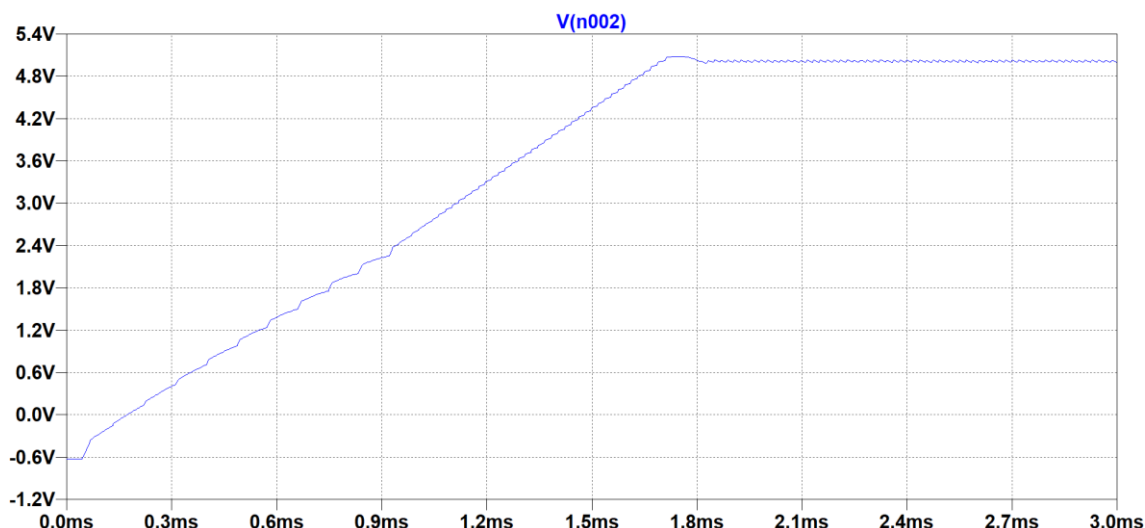
Obrázek 3.3: Schéma 5V zdroje napětí v LTSpice

Z důvodu přítomnosti spínaných součástek v obvodu je nutné použít tranzientní (časovou) analýzu. Simulovaný průběh výstupního napětí naprázdno je zobrazen na obrázku 3.4, kde výstupní napětí po ustálení je přibližně 5,108 V. Náběh zdroje do jeho ustálení trval 1,107 ms. Zvlnění výstupního napětí, které je primárně funkcí amplitudy zvlnění proudu cívkou a ekvivalentního sériového odporu výstupního kondenzátoru ( $Zvlnění\ výstupního\ napětí = \Delta I_{ind} \cdot ESR_{C_{out}}$ ), je 3,504 mV špička-špička.



Obrázek 3.4: Simulovaný průběh výstupního napětí 5V zdroje naprázdno

Na obrázku 3.5 je simulovaný průběh výstupního napětí 5V zdroje zatíženého proudem 2 A. Hodnota výstupního napětí po ustálení je 5,011 V. Náběh zdroje do jeho ustálení trval 1,831 ms. Zvlnění výstupního napětí je v tomto případě 25,686 mV špička-špička.



Obrázek 3.5: Simulovaný průběh výstupního napětí 5V zdroje zatíženého proudem 2 A

Informace pro tuto podkapitolu jsem čerpal z [9].

### 3.2.1.2 Napájecí větev +3,3 V

Napájecí napětí +3,3 V na testovacím modulu na rozdíl od větve +5 V není dále poskytováno žádné jiné desce, takže by pro proudovou zatížitelnost jeho zdroje stačilo sečíst maximální proudové odběry všech součástek na modulu připojených k této větvi (což je asi 350 mA). Avšak pro podporu univerzálnosti modulu by bylo dobré, kdyby z něj mohlo být napájeno i menší externí zařízení. V důsledku toho jsem navrhl maximální proudovou zatížitelnost této větve na 750 mA. Ze Siemens databáze součástek v programu Zuken jsem tedy opět volil snižující spínaný DC/DC měnič LTC3621-2 od společnosti Linear Technology splňující parametry zadání, které jsou  $U_{in} = +5 \text{ V}$ ,  $U_{out} = +3,3 \text{ V}$  a  $I_{out} = 750 \text{ mA}$ . Dle dokumentace k tomuto integrovanému obvodu je dále nutné vybrat klíčové součástky podle následujících požadavků:

- Vstupní kondenzátor:

$C_{in} \geq 10 \text{ } \mu\text{F}$ , nízký ESR, keramický X5R/X7R

$U \geq 7,5 \text{ V}$

Zvlnění RMS hodnoty proudu  $\geq I_{out} \cdot \frac{U_{out}}{U_{in}} \cdot \sqrt{\frac{U_{in}}{U_{out}} - 1}$ ,

tedy  $\geq 0,355 \text{ A}$ .

- Výstupní kondenzátor:

$C_{out} \geq 22 \text{ } \mu\text{F}$ , nízký ESR, keramický X5R/X7R

$U \geq 1,5 \cdot U_{out} \geq 5 \text{ V}$

- Cívka:

$L = \frac{U_{out}}{f \cdot \Delta I_L} \cdot \left(1 - \frac{U_{out}}{U_{in}}\right) = 1,662 \text{ } \mu\text{H}$ , kde  $\Delta I_L$  je zvlnění proudu

cívkou, které se dle výrobce rovná přibližně 40 % z maximální hodnoty výstupního proudu, tedy  $\Delta I_L = 0,3 \text{ A}$



- Chladič:

Odpor spínání výkonového MOSFET je vypočítán jako

$$R_{sw} = R_{DS(ON)TOP} \cdot \frac{U_{out}}{U_{in}} + R_{DS(ON)BOT} \cdot \left(1 - \frac{U_{out}}{U_{in}}\right) = 295,2 \text{ m}\Omega$$

Celkový vyzářený výkon integrovaného obvodu LTC3621-2 je

$$P_D = I_{out}^2 \cdot R_{sw} + U_{in} \cdot I_{in(Q)} = 191,05 \text{ mW}$$

Teplota přechodu je následně dána vztahem

$$T_J = P_D \cdot R_{\theta JA} + T_A = 32,64 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ kde}$$

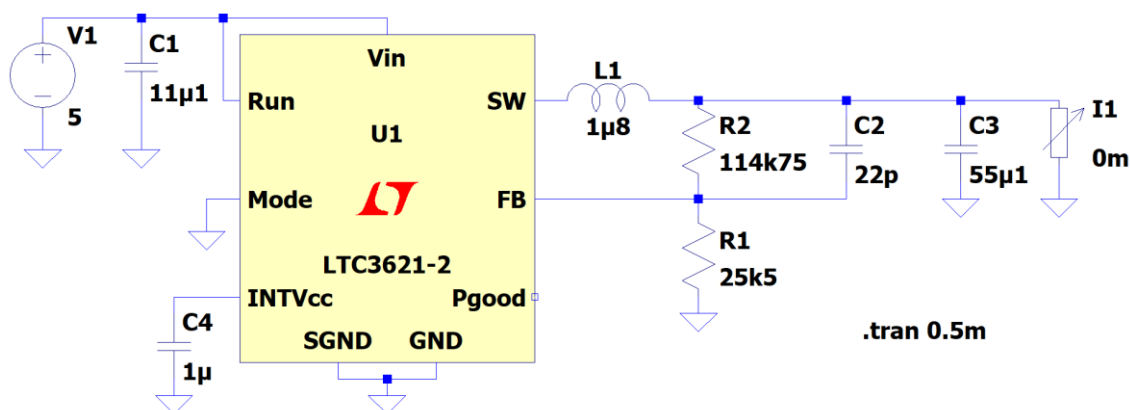
$R_{\theta JA}$  je teplotní odpor „přechod-prostředí“ (tzv. junction-to-ambient thermal resistance). Pro LTC3621-2 v pouzdru MSOP je  $R_{\theta JA} = 40 \text{ }^\circ\text{C/W}$

a  $T_A$  je teplota okolí (prostředí)  $T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Teplota přechodu je výrazně nižší než maximální povolená hodnota udávaná výrobcem  $T_{Jmax} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ , a tudíž chladič není potřeba. LTC3621-2 v pouzdru MSOP má také tzv. exposed pad, který slouží k odvodu tepla z regulátoru do vrstvy rozlité mědi v DPS.

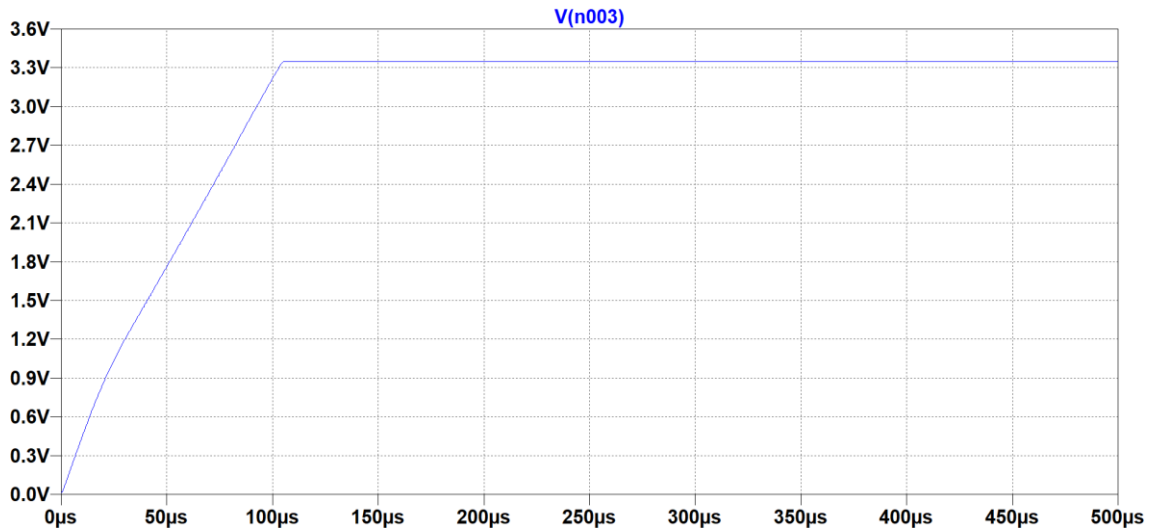
V souladu s těmito parametry jsem z databáze součástek v programu Zuken vybral vstupní kondenzátor GRM31CR61H106KA12L od společnosti Murata, cívku 7440430018 od Würth elektronik a výstupní kondenzátor GRM21BR61E226ME44L opět od firmy Murata.

Simulace této napěťové konverze proběhla opět v programu LTSpice, kam jsem přenesl vlastnosti výše zvolených součástek a vytvořil schéma zapojení – viz obrázek 3.6.



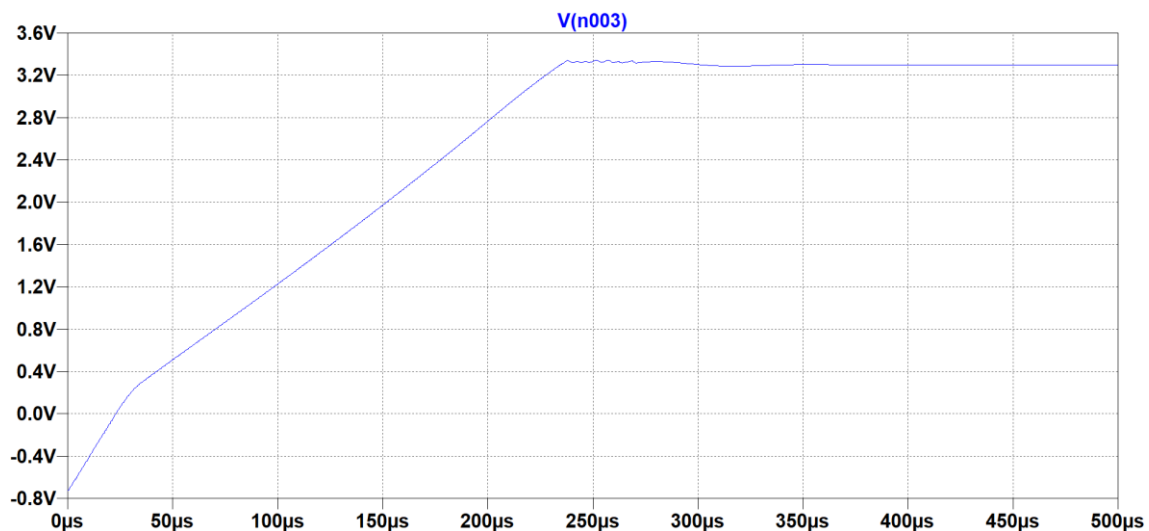
Obrázek 3.6: Schéma 3,3V zdroje napětí v LTSpice

Stejně jako u předchozího spínaného regulátoru i zde jsem použil tranzientní analýzu. Simulovaný průběh výstupního napětí naprázdno je zobrazen na obrázku 3.7, kde výstupní napětí po ustálení je přibližně 3,343 V. Náběh zdroje do jeho ustálení trval 105  $\mu\text{s}$ . Zvlnění výstupního napětí je 0 mV špička-špička.



**Obrázek 3.7: Simulovaný průběh výstupního napětí 3,3V zdroje naprázdno**

Na obrázku 3.8 je simulovaný průběh výstupního napětí 3,3V zdroje zatíženého proudem 750 mA. Hodnota výstupního napětí po ustálení je 3,299 V. Náběh zdroje do jeho ustálení trval 362  $\mu\text{s}$ . Zvlnění výstupního napětí je v tomto případě 515  $\mu\text{V}$  špička-špička.



**Obrázek 3.8: Simulovaný průběh výstupního napětí 3,3V zdroje zatíženého proudem 750 mA**

Informace pro tuto podkapitolu jsem čerpal z [10].

### 3.2.2. Procesory a převodník USB-UART

Aby mohl být na testovacím modulu s jistotou testován software napsaný pro řídicí jednotku přejezdu Wayguard DLX, použil jsem stejný procesor, který bude použit ve všech řídicích jednotkách, tedy STM32F417ZGT6 od firmy ST Microelectronics.

Jako převodník USB-UART jsem volil FT4232H, který je čtyřkanálovou verzí jednokanálového převodníku FT232H, se kterým již vývojoví inženýři Siemens Mobility s.r.o. mají zkušenosti a znají jeho ovládací software. Tento převodník jsem zapojil do konfigurace, kdy je napájen +5 V ze sběrnice USB z počítače a následně si sám pro sebe vytvoří další potřebné napájecí úrovně. Umí také komunikovat přes všechna požadovaná rozhraní (SPI, I2C, UART apod.). Nevýhodou však je, že například přes rozhraní I2C umí komunikovat pouze v roli master, což se neshoduje se zadáním, které říká, že v roli master má být procesor testovacího modulu a v roli slave převodník FT4232H. Z tohoto důvodu bylo nutné mezi tyto dva prvky přidat další procesor STM32F417ZGT6, který funguje na sběrnici jako prostředník (tzv. Bridge) v roli slave a díky tomu může být hlavní procesor testovacího modulu i převodník USB-UART v roli master.

Dále je také dle zadání první UART kanál převodníku FT4232H připojen k hlavnímu procesoru, druhý UART kanál k Bridge, třetí ke sběrnici FM-Bus a čtvrtý je nezapojen.

### 3.2.3. Multiplexory

Další potřebný blok na testovacím modulu je tvořen 12 analogovými multiplexory 74HC4051 od firmy Nexperia, k jejichž vstupům je přiveden analogový signál tvořený buď napájecím napětím +3,3 V nebo jiným externím signálem, jehož DC hodnota napětí však nesmí přesáhnout +3,3 V. Přivedený analogový signál je následně rozdělen pomocí tří rezistorů na čtyři různé úrovně. Tyto jednotlivé úrovně jsou přivedeny k jednotlivým vstupům každého multiplexoru, jak je vidět na blokovém schématu v kapitole 3.1 *Požadavky na testovací modul*. Každý multiplexor má pouze jeden výstup, který je vždy selektivně propojen pouze s jedním vstupem. Selektce vstupu se provádí pomocí binárního kódu přivedeného na adresní piny. Výstup každého multiplexoru je pak přes jednoduchý RC filtr typu dolní propust přiveden na jeden z kanálů jednoho ze tří A/D převodníků v procesoru STM32F417ZGT6.

### 3.2.4. Konektory

Na testovacím modulu jsou použity 2 typy konektorů. Prvním z nich jsou board-to-board konektory, které slouží k propojení modulu a základní desky (Baseboard). Přes tyto konektory, konkrétně HLE-110-02-L-DV-TR od společnosti Samtec, si desky oboustranně poskytují napájecí napětí a zároveň přes ně probíhá vzájemná komunikace po sběrnici UART (FM-Bus).

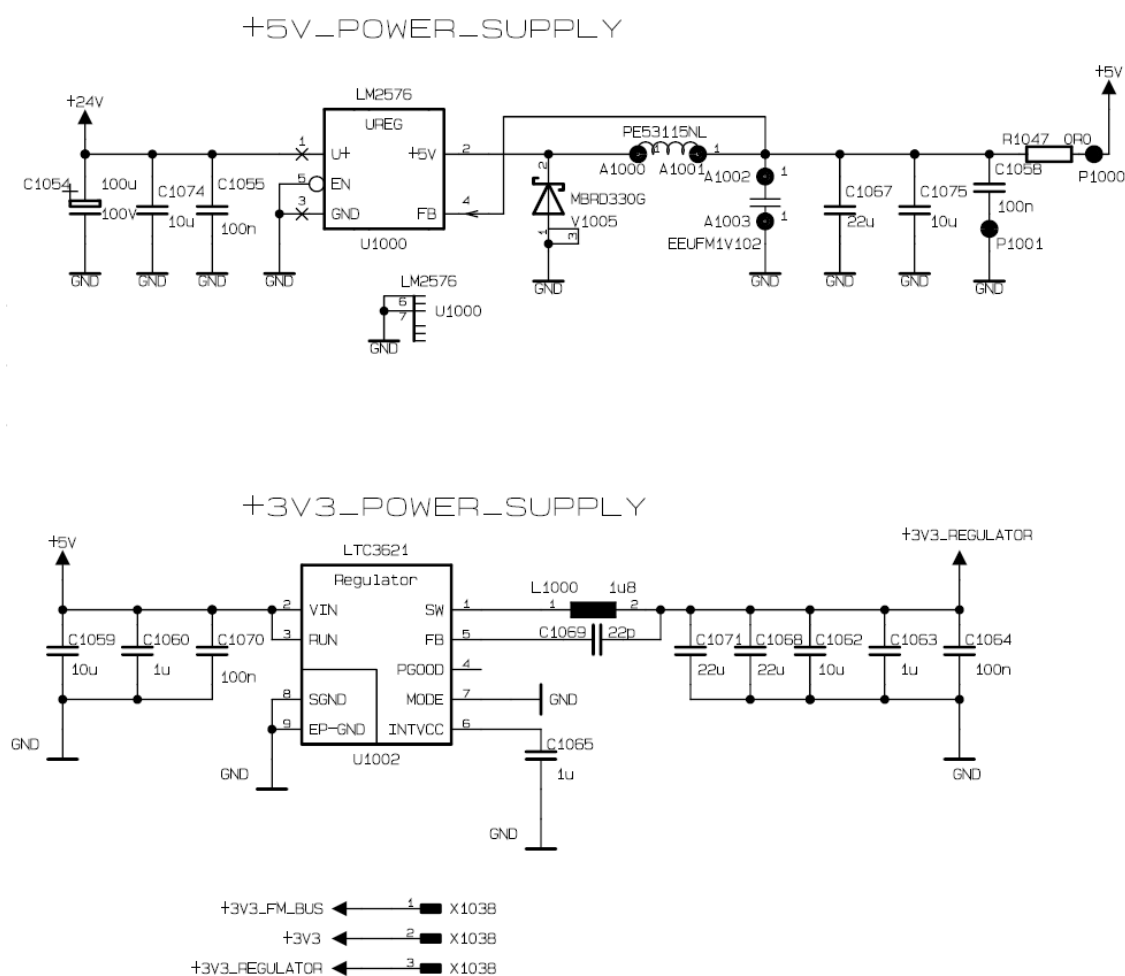
Druhým typem jsou wire-to-board konektory, a to především 736-316 od společnosti WAGO, na které jsou vyvedeny všechny potřebné adresní piny jednotlivých multiplexorů a dále také pro maximální univerzálnost téměř všechny piny hlavního procesoru testovacího modulu. V neposlední řadě slouží tyto konektory také jako svorky pro napájecí napětí.

Dále by se do kategorie wire-to-board daly zařadit konektory JTAG+TRACE (FTSH-110-01-L-DV-K-TR rovněž od společnosti Samtec), pomocí kterých lze k procesorům připojit programátory J-Link a ST-Link a procesory naprogramovat.

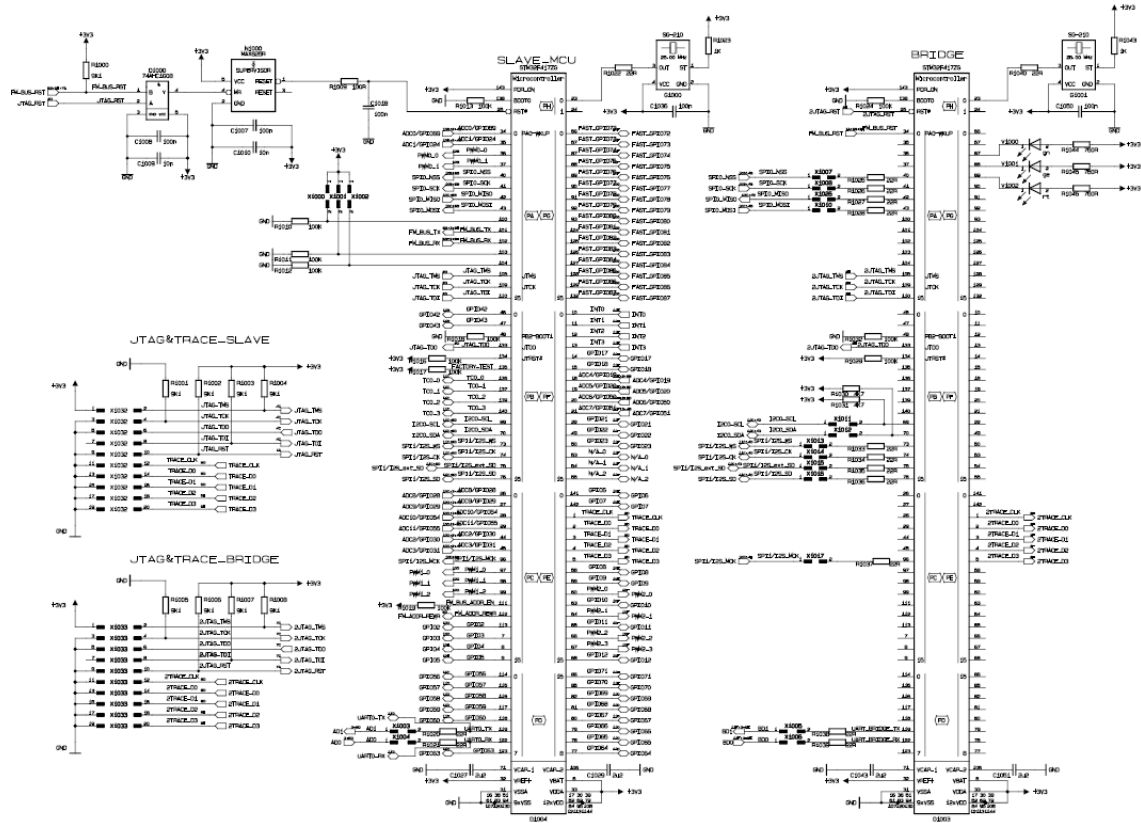
### 3.3. Detailní obvodové schéma zapojení

Obvodové schéma zapojení jsem navrhl v programovém balíku Zuken od japonské společnosti Zuken Incorporation, jelikož je to hlavní software, který se v Siemens Mobility s.r.o. pro tyto účely používá. Konkrétní aplikace z celého programového balíku určená pro návrh schématu se nazývá Design Editor. Tato aplikace dále umožňuje kromě návrhu i kontrolu schématu dle základních elektrických pravidel a zákonů. V neposlední řadě umí také vygenerovat tzv. netlist nezbytný pro následný návrh DPS.

Celé obvodové schéma zapojení je navrženo na čtyřech listech formátu A2 a z toho důvodu zde vložím pouze nejdůležitější bloky, které jsou na obrázcích 3.9 až 3.13.

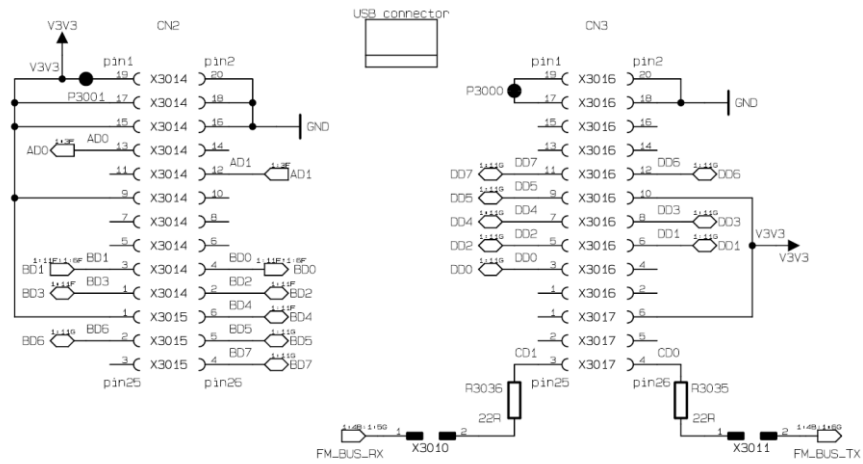


Obrázek 3.9: Napájecí zdroje

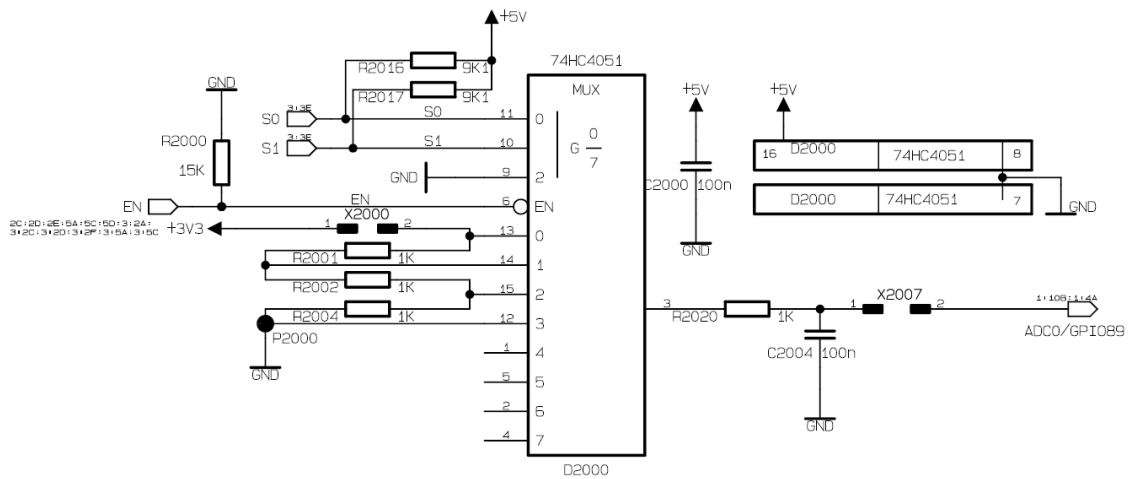


Obrázek 3.10: Procesory

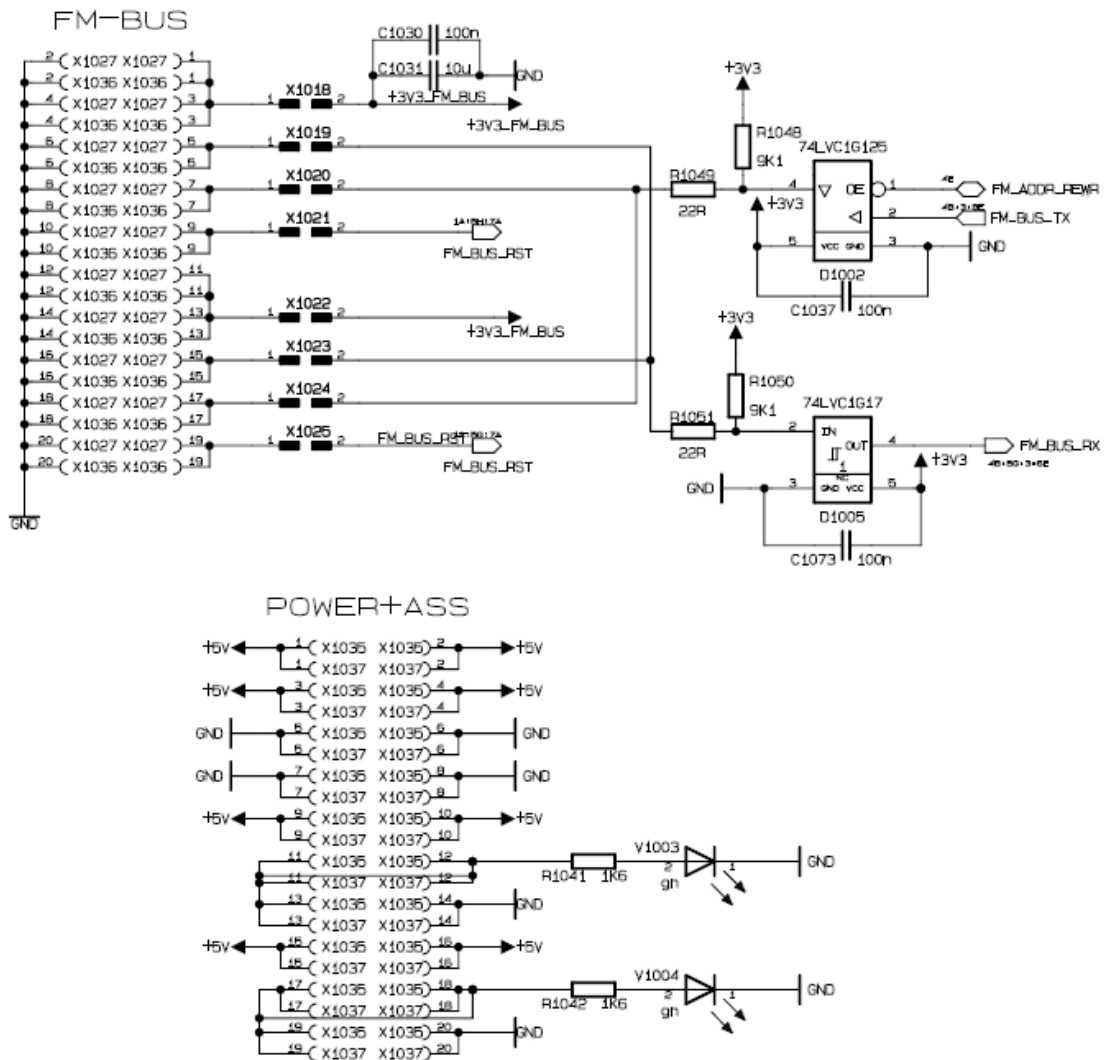
USB-->UART (FT4232H-mini-module)



Obrázek 3.11: Patice pro převodník USB-UART



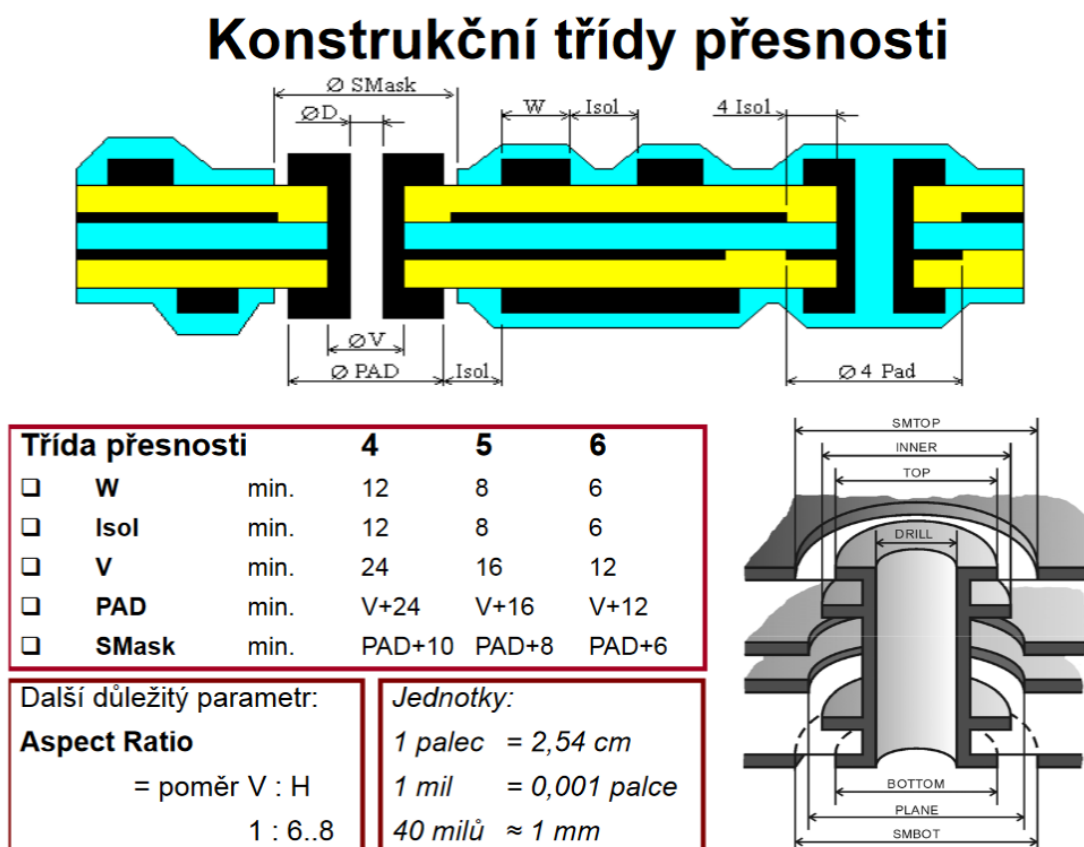
Obrázek 3.12: Multiplexor



Obrázek 3.13: Board-to-board konektory

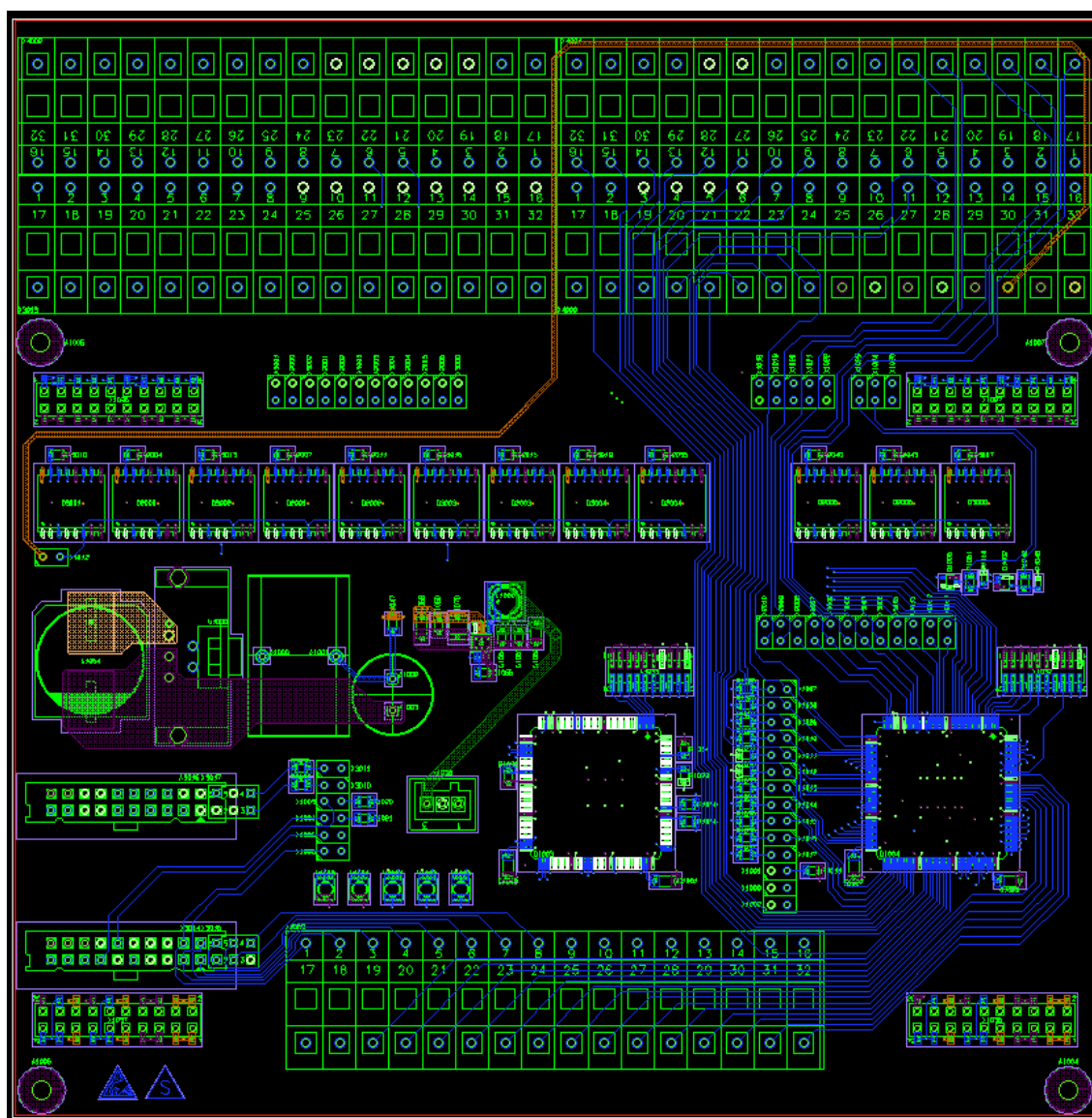
### 3.4. Návrh DPS

Součástí programového balíku Zuken je i aplikace Board Designer, která slouží k návrhu DPS podle předem navrženého schématu v aplikaci Design Editor. Desku plošných spojů jsem z důvodu několikanásobného křížení vodičů volil šestivrstvou. Konstrukční třídu přesnosti, která definuje návrhové parametry DPS, jsem volil číslo 6, jelikož výrobce DPS nepožaduje žádné příplatky za tuto třídu oproti jejich standardu. Podrobný popis nejčastějších tříd přesnosti je ukázán na obrázku 3.14.



Obrázek 3.14: Přehled nejčastějších konstrukčních tříd návrhu DPS [převzato z 6]

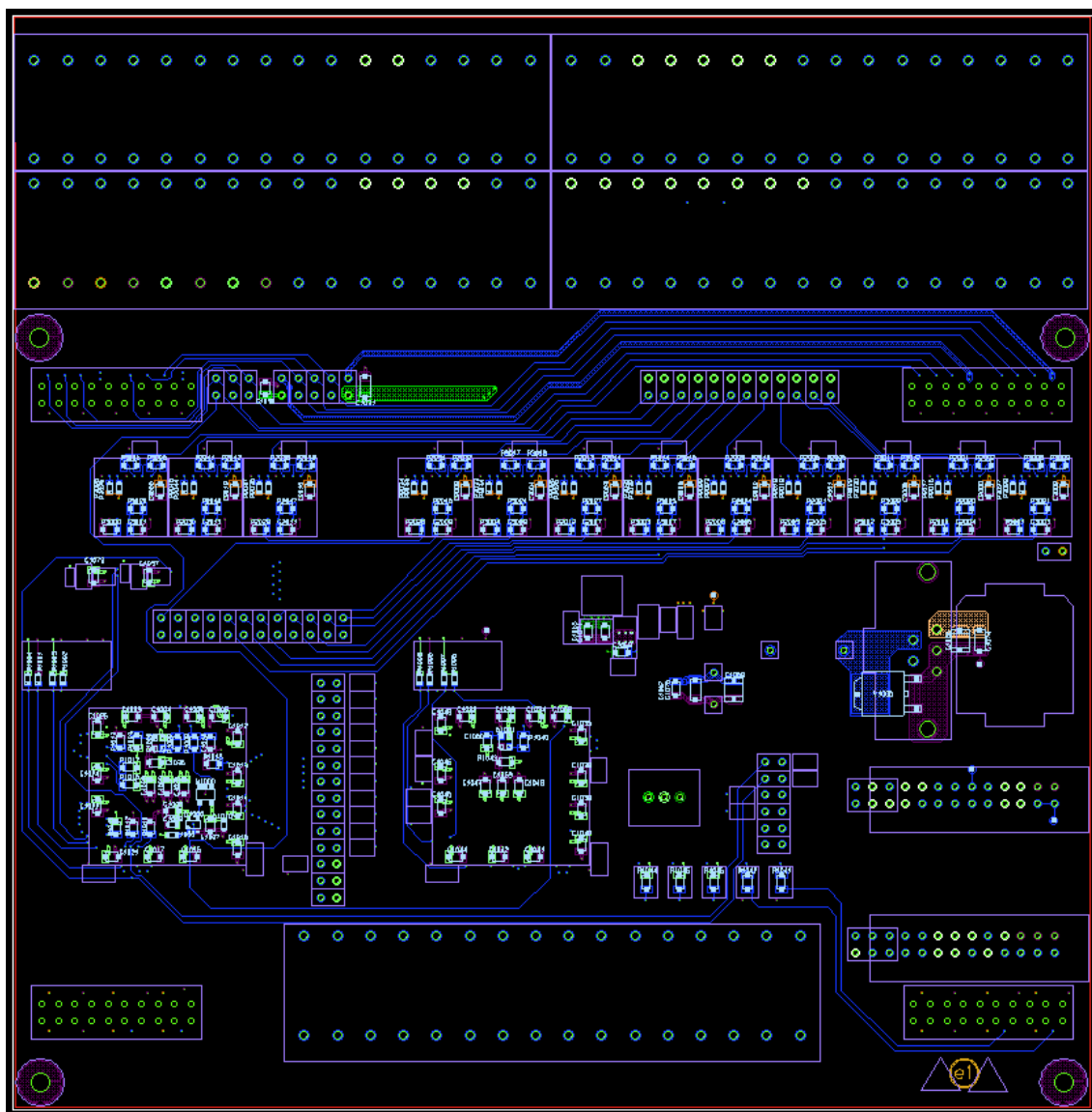
Návrh vrstvy TOP je uveden na obrázku 3.15.



Obrázek 3.15: Návrh vrstvy TOP



Návrh vrstvy BOTTOM je uveden na obrázku 3.16.



Obrázek 3.16: Návrh vrstvy BOTTOM

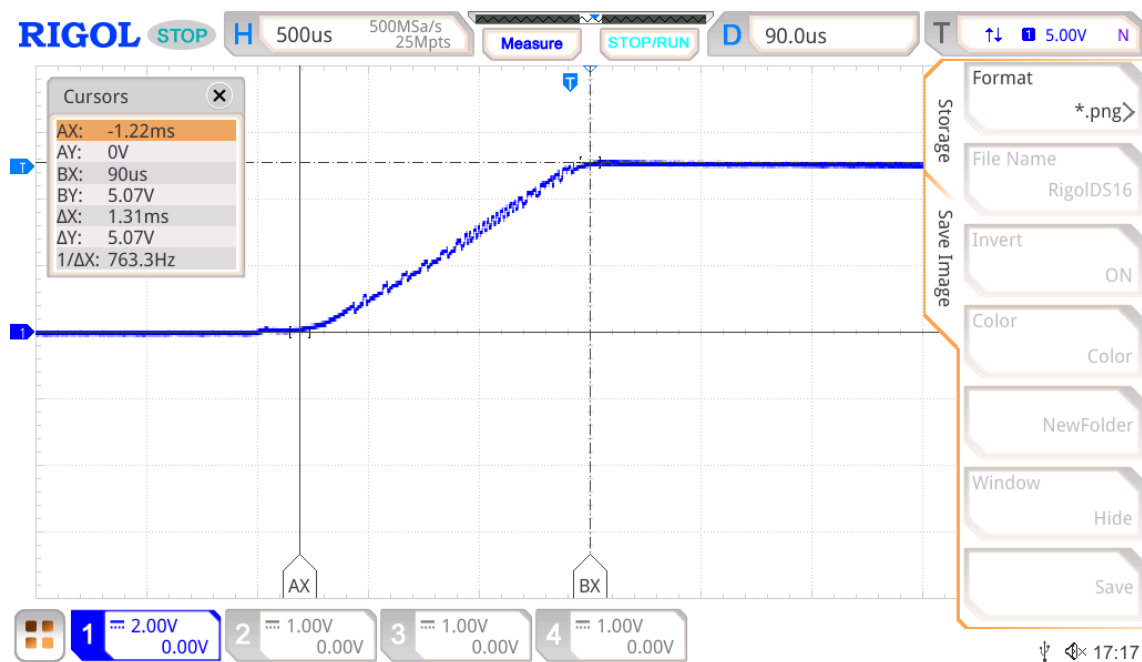
### 3.5. *Ověření funkčnosti*

Po vyrobení DPS následovalo její ruční osazení výše uvedenými součástkami. Před předáním testovacího modulu SW kolegům k naprogramování, bylo provedeno tzv. oživení desky, tedy kontrola korektní funkce klíčových bloků, které ke své funkci nepotřebují nahrát software – jedná se především o napájecí zdroje.

Nejdříve došlo k testování 5V napájecího zdroje, který má pro tyto účely za výstupním kondenzátorem rezistor o odporu  $0 \Omega$  a pomocí něj tedy lze výstup tohoto zdroje odpojit od zbytku elektroniky testovacího modulu. Zdroj tak jednak bude možné změřit naprázdno a jednak se eliminují případné škody, pokud by byl špatně navržen a například by vytvářel vyšší úroveň napětí, než se při návrhu předpokládalo.

Na obrázku 3.17 je zaznamenán reálný průběh výstupního napětí 5V zdroje naprázdno, jehož změřená úroveň po ustálení je 5,07 V. Doba ustálení trvala 1,31 ms. Dále bylo naměřeno zvlnění výstupního napětí přibližně 79 mV špička-špička.

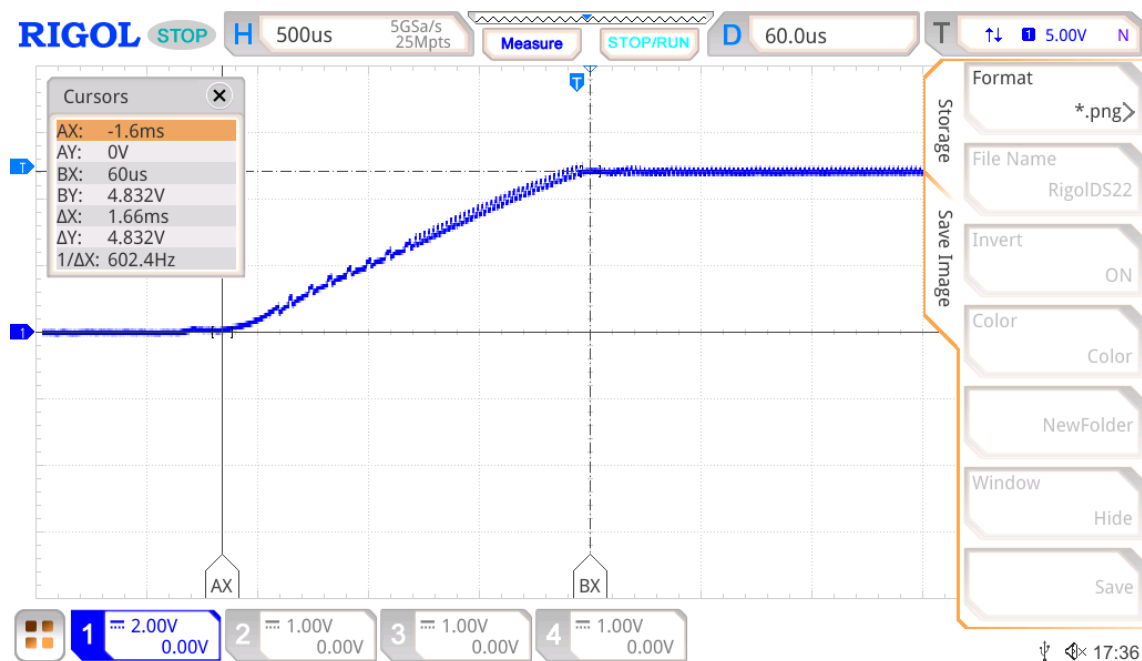
DS7024 Mon May 11 17:17:15 2020



Obrázek 3.17: Naměřený průběh výstupního napětí 5V zdroje naprázdno

Na obrázku 3.18 je zaznamenán reálný průběh výstupního napětí 5V zdroje při zatížení výstupu proudem 2 A. V tomto případě bylo naměřeno napětí po ustálení 4,83 V, doba ustálení 1,66 ms a zvlnění výstupního napětí přibližně 79 mV špička-špička.

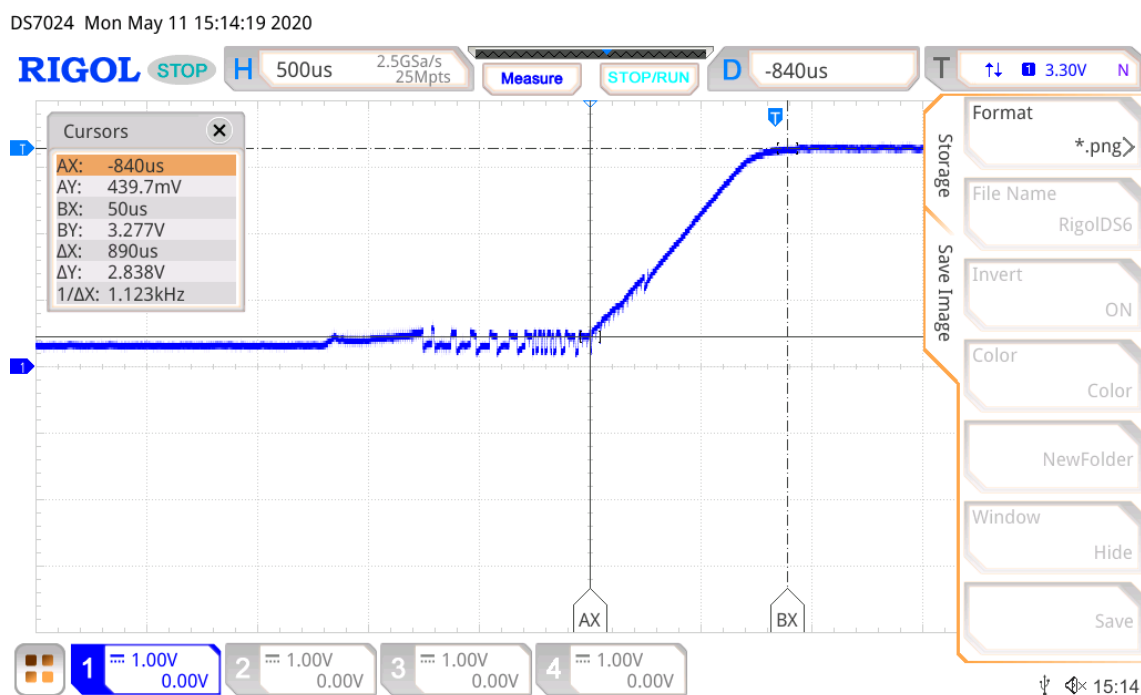
DS7024 Mon May 11 17:36:11 2020



Obrázek 3.18: Naměřený průběh výstupního napětí 5V zdroje při zatížení proudem 2 A

Následovalo měření 3,3V zdroje, které probíhalo stejným způsobem, tedy nejdříve naprázdno a poté při maximálním zatěžovacím proudu – zde 750 mA. Provedení tohoto měření bylo jednodušší, jelikož výstup zdroje je přiveden na jednořadou 3-pinovou lištu (X1038 - viz obrázek 3.9) a nebylo nutné odpájet a poté připájet rezistor. Tato pinová lišta slouží jako ochrana proti současnému přivedení výstupního napětí 3,3 V ze zdroje na testovacím modulu a ze zdroje na desce Baseboard.

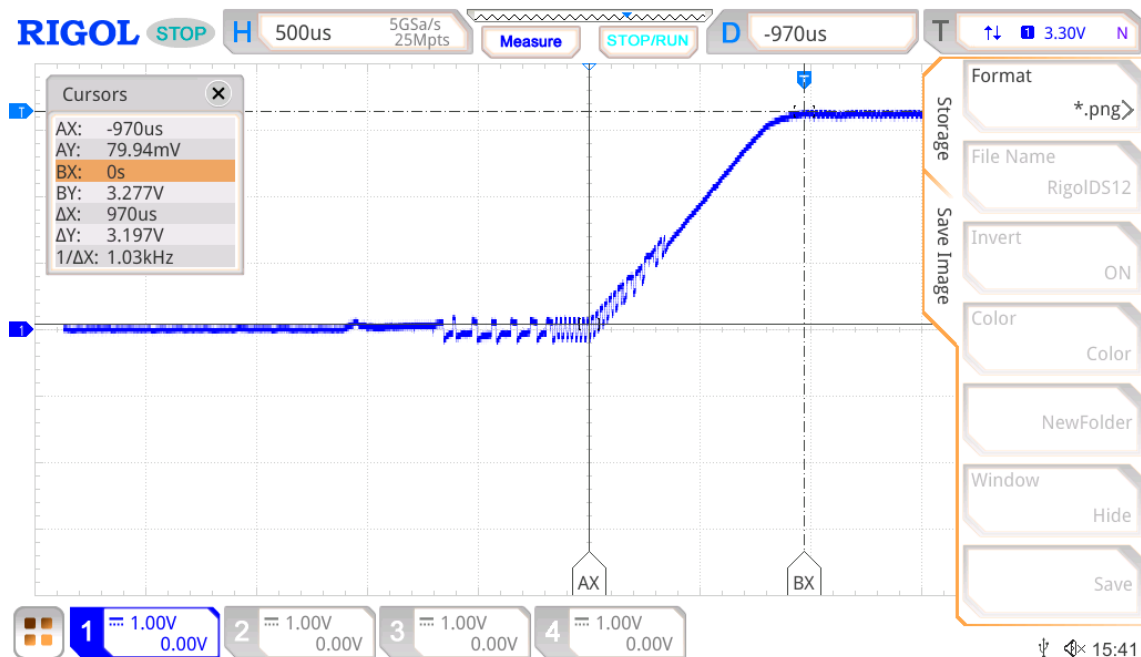
Na obrázku 3.19 je zobrazen reálný průběh výstupního napětí 3,3V zdroje naprázdno. Z průběhu lze odečíst, že naměřená hodnota výstupního napětí po ustálení je 3,28 V, doba potřebná k ustálení zdroje trvá 890  $\mu$ s a zvlnění výstupního napětí je 80 mV špička-špička.



**Obrázek 3.19: Naměřený průběh výstupního napětí 3,3V zdroje naprázdno**

Obrázek 3.20 zobrazuje reálný průběh výstupního napětí 3,3V zdroje zatíženého proudem 750 mA. Na průběhu lze vidět, že hodnota výstupního napětí po ustálení dosahuje 3,28 V, doba pro ustálení zdroje je dlouhá 970  $\mu$ s a zvlnění výstupního napětí bylo naměřeno 80 mV špička-špička.

DS7024 Mon May 11 15:41:37 2020



**Obrázek 3.20: Naměřený průběh výstupního napětí 3,3V zdroje zatíženého proudem 750 mA**

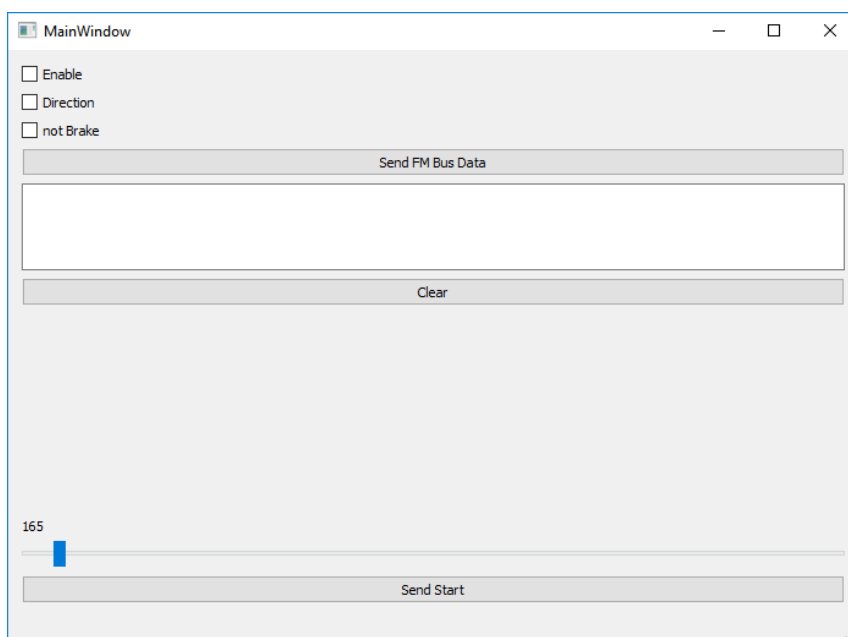
Po kontrole obou napájecích zdrojů byly zkontrolovány pozice jednotlivých pinů board-to-board konektorů a následně byl pomocí nich testovací modul připojen k desce Baseboard. Ukázalo se, že napěťová větev +5 V je dostatečně dimenzovaná pro práci s BB a ten je schopen konvertovat tuto úroveň napětí na požadovaných +3,3 V a napájet jimi obvody jak na testovacím modulu, tak na BB. Následně byl testovací modul předán SW kolegům, kteří naprogramovali jeho procesory pomocí JTAG konektorů a ověřili, že komunikace mezi deskami BB a UPB přes sběrnici FM-Bus funguje správně. Experimentálně tedy byla ověřena kompatibilita se základní deskou WDLX.

Dále bylo ověřeno, že adresní piny multiplexorů jsou vyvedeny na správné pozice wire-to-board konektorů (WAGO) a že propojování výstupu multiplexorů s požadovaným vstupem (na základě binární kombinace přivedené na adresní piny) také funguje korektně. Ve spolupráci se SW kolegy byla zároveň ověřena správnost čtení výstupní hodnoty napětí z multiplexorů pomocí A/D převodníků, funkčnost LED a komunikace přes sběrnici I2C.

Posledním prvkem k ověření je převodník USB-UART, který umožňuje řídit procesor testovacího modulu pomocí počítače. Jeho funkčnost lze demonstrovat na následujícím praktickém příkladu, kde cílem je řízení motoru závory z počítače.

Komunikace mezi počítačem a motorem začíná tak, že řídicí data jsou z počítače odeslána na sběrnici USB, z ní jsou převodníkem přečtena a přeposlána po sběrnici UART (FM-Bus) do procesoru. Procesor je prostřednictvím svého portu E připojen k vývojovému kitu DRV8350H-EVM firmy Texas Instruments, jehož součástí je mimo jiné driver DRV8350 a můstek výkonových tranzistorových spínačů, které ovládají jednotlivé fáze motoru. Procesor tedy přes Port E generuje PWM signál a další řídicí signály (např. Enable, Direction apod.) a driver DRV8350 je zpracovává a na jejich základě spíná výstupní tranzistory a řídí jednotlivé fáze motoru.

Výrobce FTDI na svých stránkách nabízí software k obsluze převodníku FT4232H. Pro rychlejší práci v rámci této aplikace vytvořili naši SW inženýři grafické uživatelské rozhraní s několika tlačítky, které po stisknutí vygenerují požadované řídicí příkazy. Screen shot tohoto GUI je na obrázku 3.21, kde v dolní části se nachází tlačítko „Send Start“, které slouží k inicializaci komunikace přes převodník USB-UART, nad tímto tlačítkem se nachází posuvník pro nastavení PWM signálu (resp. otáček motoru za jednotku času), v horní části volíme logické úrovně třech řídicích signálů pro driver DRV8350 a pod těmito třemi signály se nachází tlačítko „Send FM Bus Data“, které slouží k odeslání nastavených parametrů do procesoru po sběrnici FM-Bus.



**Obrázek 3.21: Grafické uživatelské rozhraní pro nastavení řídicích příkazů**

Pro názornou ukázkou funkčnosti výše popsaného praktického příkladu s využitím převodníku FT4232H, resp. testovacího modulu, bylo natočeno video 3.1. Závora se na videu pohybuje velmi pomalu, protože se jednalo pouze o test a nebyly zapojeny senzory koncových poloh.



**Video 3.1: Příklad využití testovacího modulu**

## 4. Závěr

V rámci své diplomové práce jsem teoreticky prostudoval problematiku železniční automatizace a železničních přejezdů. Dále jsem se poměrně do hloubky seznámil s projektem Wayguard DLX firmy Siemens Mobility s.r.o., což je železniční přejezd vyvíjený touto firmou, v rámci kterého jsem navrhoval a vyráběl tento testovací modul. Toto má pro mě z teoretického hlediska největší přínos, jelikož bych se projektu WDLX rád věnoval i po skončení studia.

Z praktického hlediska byla pro mne největším přínosem práce na návrhu schématu a DPS, jelikož jsem se seznámil s návrhovým programovým balíkem Zuken a naučil se v něm pracovat.

Schéma modulu a jeho DPS jsem tedy na základě předem nastudovaných znalostí navrhl, modul úspěšně realizoval, z HW hlediska otestoval a předal společnosti Siemens Mobility s.r.o., kde vývojoví inženýři napsali software a pomocí něj otestovali všechny funkce modulu.

Ověřil jsem také, že je modul kompatibilní se základní deskou systému Wayguard DLX a že napěťové zdroje, které napájí základní desku, jsou správně dimenzované.

V současné době je testovací modul používán vývojovými inženýry Siemens Mobility s.r.o. na denní bázi a usnadňuje jim testování nově vyvinutých prototypů základní desky.

## Použitá literatura

- [1] Siemens Mobility s.r.o.: *Rail Automation HW Handbook*, Praha 2017
- [2] Wyatts derivative work: *McSush-Bathtub\_curve.jpg* [online]. 2005 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z WWW: < [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/Bathtub\\_curve\\_cs.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/Bathtub_curve_cs.svg) >.
- [3] G. Theeg, S. Vlasenko: *Railway Signalling & Interlocking: International Compendium*, 2nd Edition 2018, PMC Media House, ISBN-13: 978-3962451561
- [4] L. Novák: *WDLX\_Projekt\_Manual*, Praha 2017
- [5] Steve's Picturepalooza: *Ferrite Tombstone* [online]. 2002 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z WWW: < [http://stevezeva.homestead.com/files/Ferrite\\_Tombstone.jpg](http://stevezeva.homestead.com/files/Ferrite_Tombstone.jpg) >.
- [6] V. Záhlava: *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*, BEN, Praha 2011, ISBN 978-80-7300-309-8.
- [7] J. LIPTÁK, J. SEDLÁČEK: *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2005. ISBN 80-01-03191-8.
- [8] J. Kaňák: *Návrh měřicího modulu systému PAPAGO*, Praha 2017
- [9] Texas Instruments: Datasheet LM2576 [online]. 2016 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z WWW: < <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2576.pdf?ts=1590167789416> >.
- [10] Linear Technology: Datasheet LTC3621 [online]. 2013 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z WWW: < <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3621fc.pdf> >.

## Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Vanová křivka [převzato z 2] .....	17
Obrázek 2.2: Trojúhelník výhledu řidiče [převzato z 3] .....	18
Obrázek 2.3: Příklad aktivního železničního přejezdu (Německo) [převzato z 3] .....	20
Obrázek 2.4: Struktura WDLX [převzato z 4] .....	22
Obrázek 2.5: Swimming&Manhattan efekt [převzato z 5] .....	25
Obrázek 3.1: Blokové schéma testovacího modulu .....	28
Obrázek 3.2: Výrobce doporučené cívky pro LM2576(HV)-5.0 [převzato z 9] .....	29
Obrázek 3.3: Schéma 5V zdroje napětí v LTSpice .....	31
Obrázek 3.4: Simulovaný průběh výstupního napětí 5V zdroje naprázdno .....	31
Obrázek 3.5: Simulovaný průběh výstupního napětí 5V zdroje zatíženého proudem 2 A .....	32
Obrázek 3.6: Schéma 3,3V zdroje napětí v LTSpice .....	33
Obrázek 3.7: Simulovaný průběh výstupního napětí 3,3V zdroje naprázdno .....	34
Obrázek 3.8: Simulovaný průběh výstupního napětí 3,3V zdroje zatíženého proudem 750 mA .....	34
Obrázek 3.9: Napájecí zdroje .....	36
Obrázek 3.10: Procesory .....	37
Obrázek 3.11: Patice pro převodník USB-UART .....	37
Obrázek 3.12: Multiplexor .....	38
Obrázek 3.13: Board-to-board konektory .....	38
Obrázek 3.14: Přehled nejčastějších konstrukčních tříd návrhu DPS [převzato z 6] .....	39
Obrázek 3.15: Návrh vrstvy TOP .....	40
Obrázek 3.16: Návrh vrstvy BOTTOM .....	41
Obrázek 3.17: Naměřený průběh výstupního napětí 5V zdroje naprázdno .....	42
Obrázek 3.18: Naměřený průběh výstupního napětí 5V zdroje při zatížení proudem 2 A .....	42
Obrázek 3.19: Naměřený průběh výstupního napětí 3,3V zdroje naprázdno .....	43
Obrázek 3.20: Naměřený průběh výstupního napětí 3,3V zdroje zatíženého proudem 750 mA .....	44
Obrázek 3.21: Grafické uživatelské rozhraní pro nastavení řídicích příkazů .....	45
Obrázek B.1: Realizovaný testovací modul .....	51



## Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Charakteristiky železniční a silniční dopravy [převzato z 3] .....	18
Tabulka 2.2: Typické rozsahy hodnot použitých proměnných [převzato z 3].....	20
Tabulka A.1: Seznam součástek (BOM).....	51

## Přílohy

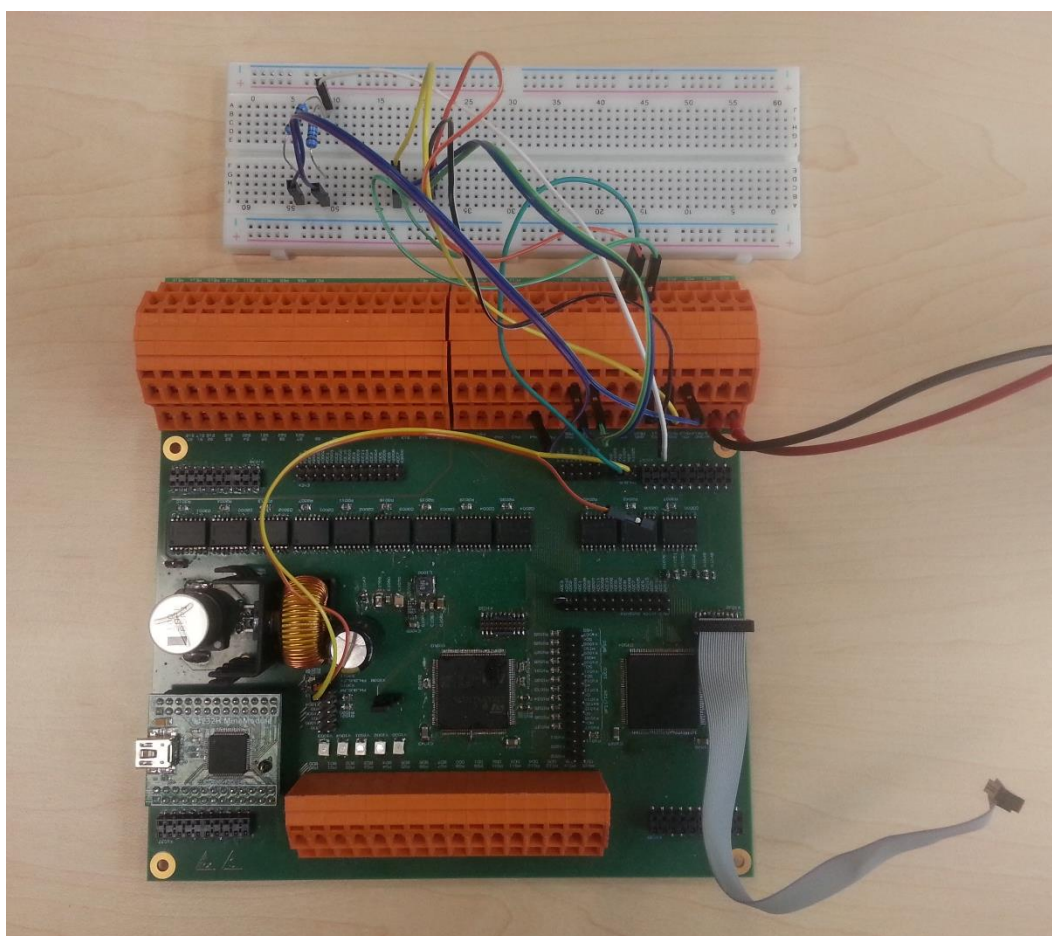
## A. Seznam součástek (BOM)

component	type	value	quantity	package
smd_MCU	STM32F417ZGT6	-	2	LQFP144
smd_supervisor	MAX825R	-	1	SOT23-5
thd_SPI->USB convertor	FT4232H MINI MODULE	-	1	-
thd_socket_FT4232H	HLE-113-02-L-DV-TE	-	2	-
thd_header_12pins	MC34733	-	6	-
thd_header_2pins	2211S-02G	-	17	-
Jumper	SNT-100-BK-T	-	54	-
smd_mux	74HC4051	-	12	SO16L
smd_2inputs_AND	74AHC1G08SE-7	-	1	SOT-353-5
smd_stabilizator_+3V3_smps	LTC3621HMS8E-23.3#PBF	+3,3V	1	MSOP8
smd_inductor	7440430018	1,8μH/2,7A	1	4.8x4.8x2.8
thd_inductor	PE53115NL, toroid, ± 20%	150μH/3A	1	KM-4.0
smd_stabilizator_+5V_smps	LM2576T-5.0/LF03	+5V	1	TO-220-5
heatsink_LM2576	LS220	-	1	-
smd_schottky_diode	MBRD330G	Vr = 30V, If = 3A	1	DDPAK
smd_capacitor_Cin	electrolytic, Aluminum, ± 20%	100 μF/100V	1	-
smd_capacitor_Cin	ceramic, X5R, ± 10%	10μF/50V	5	1206
thd_capacitor_Cout	electrolytic, Aluminum, ± 20%	1000μF/35V	1	radial
smd_capacitor_Cout	ceramic, X5R, ± 20%	22μF/25V	3	0805
smd_capacitor	ceramic, X7R, ± 10%	100nF/25V	61	0805
smd_capacitor	ceramic, X7R, ± 10%	100nF/100V	3	1210
smd_capacitor	ceramic, X7R, ± 10%	1uF/25V	7	0805
smd_capacitor	ceramic, X5R, ± 10%	4,7uF/10V	2	0805
smd_capacitor	ceramic, C0G/NP0, ± 5%	22pF/16V	1	0805
smd_capacitor	ceramic, X7R, ± 10%	2,2uF/16V	4	1206
smd_capacitor	ceramic, X7R, ± 10%	10nF/10V	2	0603
smd_resistor	ERJ6RBD1000V, 100mW, ± 0.5%	100Ω	1	0805
smd_resistor	ERJ6ENF7500V, 125mW, ± 1%	750Ω	3	0805
smd_resistor	MCWR08X22R0FTL, 125mW, ± 1%	22Ω	19	0805
smd_resistor	ERJ3EKF9101V, 100mW, ± 1%	9,1KΩ	35	0603
smd_resistor	MCWR08X1003FTL, 125mW, ± 1%	100KΩ	11	0805
smd_resistor	ERJ6RBD1601V	1,6KΩ	2	0805
smd_resistor	MCWR08X1001FTL	1KΩ	50	0805
smd_resistor	MCMR08X472 JTL	4,7KΩ	2	0805
smd_resistor	MC01W08050R	0Ω	1	0805
smd_LED_green	LGT67K-H2K1-24-Z	-	3	plcc2
smd_LED_yellow	LYT67K-K2M1-26-Z	-	1	plcc2
smd_LED_red	LS-T67K-J1K2-1	-	1	plcc2
smd_3-state_buffer	74LVC1G125	-	1	sot353

smd_Schmitt_trigger	74LVC1G17	-	1	sot353
smd_oscilator	SG-210	25MHz	2	lcc4_2.5x2.0
thd_connector	WAGO 736-316	-	5	-
smd_Debug_connector	FTSH-110-01-L-DV-K-TR	-	2	-
smd_connector_"hrebinek"	HLE-110-02-L-DV-TR	-	4	-
cable_for_HLE_"hrebinek"	HCMD-10-D-02.00-01-S	-	2	-

Tabulka A.1: Seznam součástek (BOM)

## B. Realizovaný testovací modul



Obrázek B.1: Realizovaný testovací modul