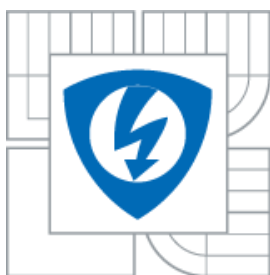




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

INTELIGENTNÍ ŘÍZENÍ MODELU VLAKOVÉHO KOLEJIŠTĚ

INTELLIGENT CONTROL OF TRAIN TRACK MODEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ PROKŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL PAVLÍK, Ph.D.

BRNO 2013

Abstrakt:

Tato práce se zabývá návrhem prvků řízeného modelu vlakového kolejiště. V první části je práce zaměřena na principy datové komunikace. Vysvětluje možnosti komunikace, modulaci a interferenci. Praktická část se zaměřuje na návrh komunikace, ve které je informace přenášena prostřednictvím infračerveného záření. Popisuje funkční částí systému a jejich návrh, mezi něž patří zejména: řídicí část, příjem a vysílání řídicího signálu, spínací prvky a h-můstek. Na konci práce je popis řídicího softwaru. Při návrhu jsou zohledněny parametry prvků určených pro modely železnic, které jsou dostupné na trhu. Na konci práce jsou shrnuty parametry výsledného návrhu, jeho použití, výhody a nevýhody.

Klíčová slova:

DCC, interference, modulace, h-můstek, PWM, fototranzistor, IR LED dioda, Atmega8

Abstract:

The aim of this thesis is design of elements intelligent control of train track model. The first part of the thesis is focused on principle of data communication. It explains principle data communication, modulation and interference. Practical part of the thesis is focused on design of communication. Data communication is realized by infrared radiation. Practical part describes the functional parts of system and their design, such as: control part, receiver and transmitter, switching elements and h-bridge. At the end of this thesis is described of control software. Properties of elements specialize for model of railway are considered in design. Summary of the design's parameters, use, advantages and disadvantages are described at the end of this thesis.

Keywords:

DCC, interference, modulation, h-bridge, PWM, phototransistor, IR LED diode, Atmega8

Bibliografická citace díla:

PROKŠ, J. *Intelligentní řízení modelu vlakového kolejiště*.

Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Pavlík, Ph.D..

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení.

V Brně dne

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Pavlíkovi, Ph.D., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Obsah

Úvod	6
1. Řízení kolejiště	7
1.1 Digitální řízení kolejiště	8
1.1.1 Kódování	10
1.1.2 Formát paketu	10
1.2 Komponenty kolejiště	11
1.2.1 Návěstidla	11
1.2.2 Výhybky	12
2. Možné způsoby komunikace	13
2.1 Přenosová média	13
2.2 Volba modulace	15
2.2.1 Volba obvodového řešení	16
3. Interference	18
4. Praktická část	21
4.1 Hardware	21
4.1.1 Napájení	23
4.1.2 Motor	23
4.1.3 Způsob napájení kolejiště	24
4.1.4 Komunikace	24
4.1.5 Integrovaný obvod LM567	25
4.1.6 Optoelektronické prvky	26
4.1.7 Komunikační kmitočet	31
4.1.8 H-můstek	32
4.1.9 Spínací tranzistory	35
4.1.10 Návrh desek plošných spojů	37
4.1.11 Řídící deska	40
4.2 Software	42
4.3 Přenos dat	42
4.3.1 Vyhodnocení a formát příchozích dat	44
4.3.2 Kódování rychlosti	44
5. Závěr	48
6. Seznam použitých zdrojů	49
7. Seznam obrázků, tabulek a příloh	51

Seznam obrázků:	51
Seznam tabulek	52
Seznam příloh.....	52
8. Seznam symbolů a zkratk	53

Úvod

Existuje řada výrobců dílů určených pro modely železnic. Při investování nemalých částek mohou vzniknout rozsáhlé modely, nebo přímo kopie reálných železničních stanic. Od jednoduchých modelů s několika návěstidly a výhybkami až po modely řízené počítačem. Pokud se začne někdo věnovat stavbě železničních modelů, bývá to koníček, mnoho práce a starostí na několik let, často až do konce života.

Tato práce se zabývá způsoby řízení železničních modelů a návrhem řídicího systému modelu železnice, který dokáže ovládat několik pohybujících se vlakových souprav po trati nezávisle na sobě. Pak je možný pohyb více souprav po stejné trati a každá se může pohybovat jinou rychlostí, například při průjezdu zatáčkou nebo úsekem trati se sníženou dovolenou rychlostí apod.

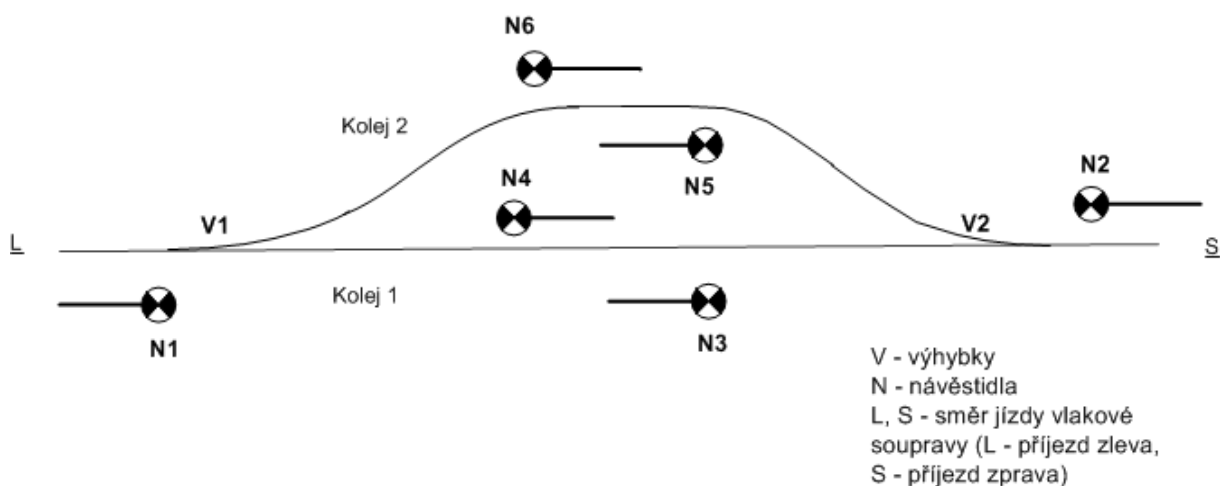
Na začátku celé práce jsou popsány dva používané systémy a ukázka návrhu jednoduchého kolejiště. V dalších kapitolách se práce zabývá vlastním návrhem systému řízení kolejiště jak po hardwarové tak softwarové stránce. Popisuje komponenty určené k řízení provozu na modelové železnici, jako jsou, návěstidla a výhybky, jejich ovládání a napájení modelového kolejiště. Popisuje způsob řízení rychlosti a směru jízdy modelu vlakové soupravy pomocí PWM modulace a H-můstku. Dále se zabývá přenosem řídicího signálu z řídicí jednotky kolejiště do přijímače umístěného v modelu vlakové soupravy. Popisuje způsob komunikace navrženého systému, možné způsoby přenosu řídicí informace, modulace, problémy, které při přenosu mohou nastat a ovládací software. Kódování rychlosti a směru jízdy modelu vlakové soupravy v přenášených datových paketech.

1. Řízení kolejiště

Před rozšířením digitální techniky a elektroniky obecně se řízení kolejiště provádělo pomocí odizolovaných úseků a jejich postupné připojování pomocí spínačů nebo tlačítek k napájecímu napětí. Hlavní nevýhodou celého systému je, že kolejiště je napájené konstantním napětím. Z toho plyne omezená možnost regulace rychlosti jízdy modelů vlakových souprav. Snížit rychlost modelu vlakové soupravy je možné na předem stanoveném odizolovaném úseku modelové trati za použití předřadného odporu, který sníží v tomto úseku provozní napětí.

Nejpoužívanějším prvkem k řízení provozu na modelovém kolejišti je tzv. bloksignál. Využívá se společně s návěstidlem, kdy připojuje a odpojuje izolovaný úsek před návěstidlem podle stavu signalizovaného návěstidlem.

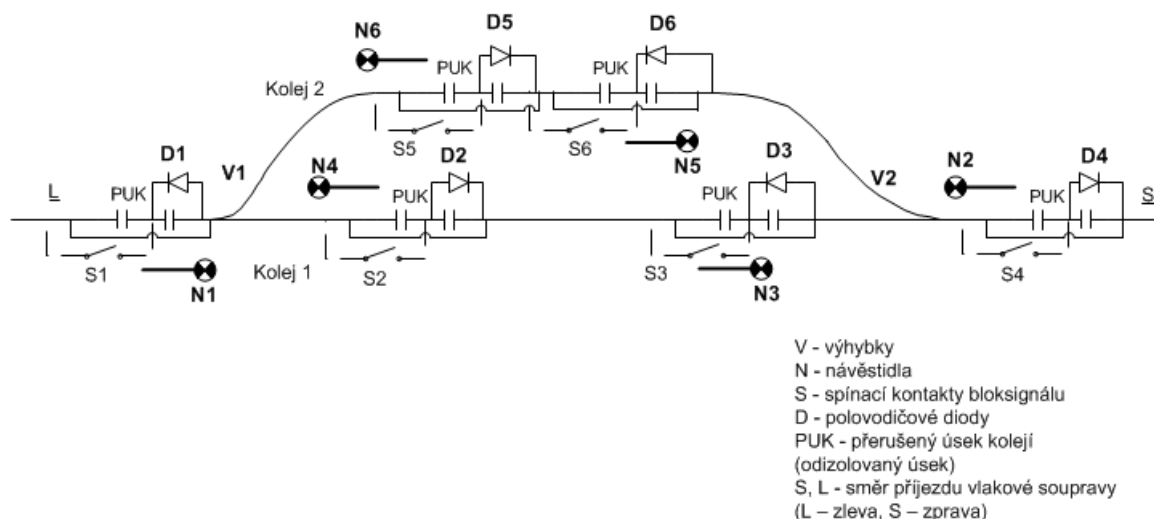
Na začátku každého návrhu modelové železnice se nejprve načrtne jednoduché



Obrázek 1: Náčrt jednoduchého kolejiště

schéma kolejiště jak znázorňuje obrázek 1. Tento ukázkový model kolejiště znázorňuje typické nástupiště s jednou hlavní a jednou vedlejší kolejí. Návěstidla N1 a N2 jsou vjezdová a N3, N4, N5 a N6 odjezdová. Model kolejiště rovněž obsahuje dvojici výhybek V1 a V2.

Obrázek 2 znázorňuje podrobný návod pro realizaci tohoto modelového kolejiště. Schéma kolejiště již obsahuje přerušené úseky kolejí PUK sloužící pro zastavení modelu vlakové soupravy při signalizaci červeného světla na návěstidlech, dále polovodičové diody D určené pro volný průjezd modelu vlakové soupravy v opačném směru a spínače S, které symbolizují spínací kontakty bloksignálu řízené návěstidlem.



Obrázek 2: Podrobný návrh modelového kolejiště

Signalizuje li návěstidlo signál volno, kontakty bloksignálu jsou sepnuté, signalizuje li návěstidlo signál stůj, kontakty bloksignálu jsou rozepnuty.

Obdobným způsobem je možné navrhnout i složitější modely železničních tratí. Model je možné rozdělit pomocí odizolovaných úseků do sekcí a ty napájet z různých napěťových zdrojů. Například je možné napájet zvlášť vlakovou stanici a zbytek modelového kolejiště. Tímto způsobem napájení modelové železnice dosáhneme snížení rychlosti v prostorech stanice.

Základními stavebními bloky modelové železnice jsou odizolované části kolejí a bloksignály. Tyto komponenty umožňují řízení provozu na modelové železnici. Návěstidla je možné ovládat pomocí bloksignálu ručně přes spínače nebo tlačítka nebo poloautomaticky pomocí náběhových kontaktů umístěných na kolejnici před odizolovaným úsekem. Při nájezdu modelu vlakové soupravy na nájezdový kontakt si souprava sama uvolní další cestu nastavením návěstidla do polohy volno. Je zřejmé, že musí být ošetřen vjezd dvou souprav na stejný úsek modelové železnice.

1.1 Digitální řízení kolejiště

Pro digitální řízení kolejiště se nejčastěji používá systém DCC (Digital Command Control), který byl přijat asociací NMRA za standart.

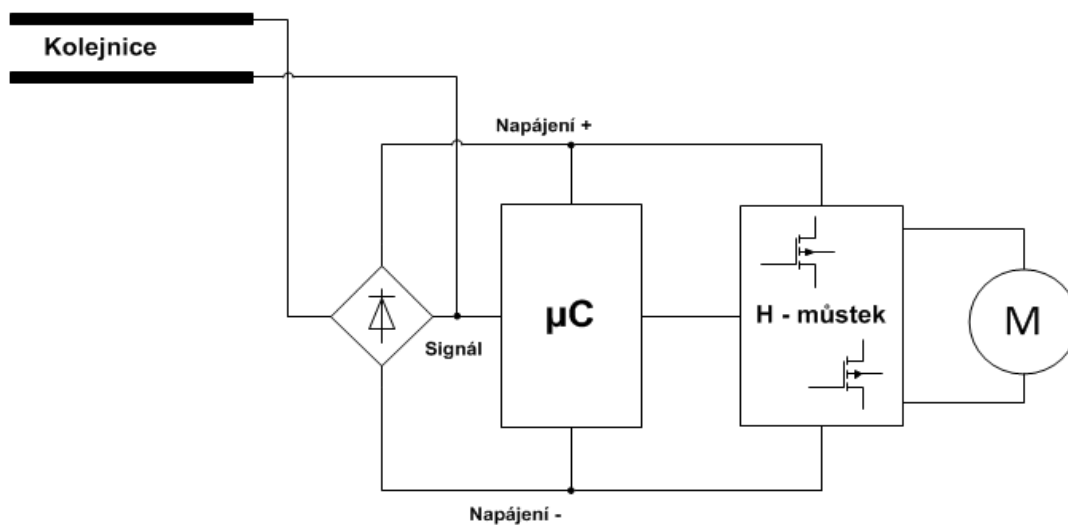
Topologie systému je jeden vysílač a několik přijímačů. Kolejiště je napájeno střídavým obdélníkovým napětím, které je rovněž nosičem informace. Amplituda napájecího napětí se pohybuje od 10 do 16 V, v závislosti na velikosti použitých modelů vlakových souprav. V modelu kolejiště neexistují odizolované úseky, které se používaly k řízení provozu na modelu kolejiště v předchozím případě. Střídavé obdélníkové napětí slouží nejen k přenosu informace, ale též k napájení modelové železnice. Modely vlakových souprav provozované na

modelové železnici využívající tento systém musí obsahovat dekodér. Tedy je zřejmé, že klasická lokomotiva není na modelovém kolejišti schopna provozu.

Dekodér se skládá z usměrňovače, mikroprocesoru a výkonové části řídící chod motorku modelu vlakové soupravy jak znázorňuje obrázek 3. Mikroprocesor přijímá informace zakódované v napájecím signálu z kolejí.

Tento systém umožňuje provoz několika modelů vlakových souprav po jedné koleji a zároveň napájení celého modelu kolejiště společným signálem. Zakódované informace jsou adresovány jen jednomu dekodéru, ostatní dekodéry na daný příkaz nereagují.

Standart DCC nezahrnuje přenos signálů z kolejiště zpět do řídicí jednotky, například z kolejových kontaktů nebo optosnímačů. To je příčinou nekompatibility některých řídicích systémů, jelikož konstrukci zpětné vazby z kolejiště navrhuje výrobce. [1]



Obrázek 3: Blokové schéma systému DCC

1.1.1 Kódování

Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, střídavý signál neslouží pouze k napájení kolejíště, ale také k přenosu informace v podobě digitálních dat. Logická jednička je v tomto systému reprezentována střídavým obdélníkovým signálem s periodou 116 ms a se střídou 0,5. Pro vysílací stanice je povolena tolerance časování 55-61ms, dekodéry (přijímače) musí považovat za platný bit interval 52-64ms [1].

Logická nula je rovněž kódována střídavým obdélníkovým signálem, ale v porovnání s reprezentací logické jedničky je střídá obdélníkového signálu v rozsahu od 0,1 do 0,9. Rovněž i perioda signálu nabývá jiných hodnot a to nominálně 200 ms při střídě 0,5. Pro vysílací stanice je vymezena tolerance délky jedné nebo druhé polarity 95- 9900ms, celá perioda nesmí přesáhnout 12000ms. Dekodéry (přijímače) musí za platný bit vyhodnotit signál, jehož obě polarity jsou v intervalu 90-10000ms. [1]

1.1.2 Formát paketu

Paket systému DCC se skládá ze záhlaví, což je deset bitů logické jedničky. Pak následuje start bit, datové bity a komunikace je ukončena stop bitem. Záhlaví je složeno z 10 bitů logické jedničky. Start bit je stejně jako u jiných komunikačních systému reprezentován logickou nulou, stop bit logickou jedničkou a datových bitů je osm. Při přenosu datových bitů se jako první přenáší MSB bit a jako poslední LSB bit.

Systém je založený na přidělení adres jednotlivým dekodérům. Adresa dekodéru je vysílána hned na začátku komunikace. Další vysílaný byte je datový, který určuje režim jízdy, reset nebo idle mód. Za datovým bytem následuje kontrolní byte, což je logická operace XOR datového a adresového byte.

Tabulka 1: Paket přenášených dat

Záhlaví	Adresový byte	Datový byte	Kontrolní byte
1111111111	0aaaaaaaa	01DUSSSS	XOR

A – adresové bity

D – směr jízdy, log. 0

U – ovládá přídatnou funkci

S – rychlost jízdy

Tabulka 2: Paket signalizující reset

Záhlaví	Adresový byte	Datový byte	Kontrolní byte
1111111111	00000000	00000000	00000000

Tabulka 3: Paket signalizující neaktivní paket IDLE

Záhlaví	Adresový byte	Datový byte	Kontrolní byte
1111111111	11111111	00000000	11111111

1.2 Komponenty kolejiště

Aby bylo docíleno realistické podoby, obsahuje model vlakového kolejiště řadu přídatných komponent. Některé se podílejí na řízení provozu jako jsou návěstidla a výhybky. Jiné pouze zkrášlují celý model, například rozsvícení světel na nástupišti, zabezpečení železničních přejezdů atd.

1.2.1 Návěstidla

Návěstidel existuje celá řada, tak jako v reálném provozu. Pro modely vláček se doporučuje napájení 12 V z důvodů vyšší spolehlivosti, maximální hodnota je 16 V. Návěstidlo obsahuje smd LED diody a předřadný odpor. Proud návěstidlem není blíže

specifikovaný, ale můžeme předpokládat proud 20 – 50 mA. Předpokládáme, že proud bude 20 mA, ale pro dostatečnou rezervu návrhu budeme počítat i s 50 mA.

Napájení je vedeno společným vodičem černé barvy. Zbylé vodiče (počet závisí na LED diodách) je připojený k zemi. Z toho vyplývá způsob ovládání. Zemní vodiče jsou připojeny ke spínacím tranzistorům, které je při sepnutí připojí k zemi.

Návěstidla je možné napájet přímo ze zdroje 12 V nebo z proměnného zdroje napětí, při využití stabilizátoru napětí. Pro druhou variantu musíme spočítat celkový proud protékající návěstidly. Deska disponuje deseti výstupy, které je možno použít k ovládání návěstidel nebo přestavníků. V úvahu vezmeme jednoduchá odjezdová a příjezdová návěstidla obsahující

pouze zelenou a červenou LED diodu. Celkový proud získáme vynásobením proudů jednotlivými návěstidly deseti. Dostaneme celkový proud v rozmezí od 200 do 500 mA. V praxi bude aktivována vždy jen červená nebo zelená LED dioda, tedy celkový proud bude poloviční.

1.2.2 Výhybky

Přestavníky existují mechanické nebo elektromechanické. Elektromechanické jsou ovládány elektromagnety (od nejlevnějších a nespolehlivých typů až po složité, spolehlivé a objemné přestavníky ukryté pod železnicí) nebo pomocí elektromotorku. Přestavníky ovládané elektromotorkem jsou dražší, ale mezi modeláři velice oblíbené, protože doba přestavení výhybky je shodná jako na reálné železnici. Další výhodou je jejich spolehlivost, nepřehřívají se a neodebírají velký proud jako elektromagnety, u kterých se vyskytuje vysoká hodnota špičkového proudu.

Řadu důležitých základních parametrů výrobci přestavníků neuvádí (minimální nutnou a maximální přípustnou délku ovládacího impulsu, minimální a maximální přípustnou teplotu okolí, maximální dovolený počet přestavení za hodinu při maximální teplotě okolí, střední počet přestavení do poruchy, životnost-celkový počet přestavení) a případně další pro korektní výběr a aplikaci výrobku. [10]

2. Možné způsoby komunikace

Přenos řídicího signálu mezi řídicím rozhraním a modelem vlakové soupravy, popřípadě návštěvidly může být přenášen vodivě, bezdrátově, IR zářením nebo ultrazvukem.

K vodivému přenosu řídicích informací je potřeba využít jako přenosového média kovových vodičů. V případě řízení modelového kolejiště se jako jediné možné vodivé spojení mezi vysílačem a přijímačem v modelu vlakové soupravy nabízí využití kolejnic. Nevýhodou je přenos řídicího signálu společně s napájecím napětím modelové železnice, což může způsobovat rušení. Dále možnost komunikace pouze v režimu simplex nebo half-duplex. Popsaný systém DCC v předchozí kapitole využívá režimu simplex pro komunikaci mezi řídicí jednotkou a modelem vlakové soupravy.

Využití bezdrátové technologie pro přenos řídicích informací jako je bluetooth, IR nebo ultrazvuk je přenosovým prostředím vzduch. Ve všech případech se ke komunikaci obou zařízení využívá vymezené kmitočtové pásmo. Komunikace může probíhat ve všech režimech (simplex, half-duplex, full-duplex). V režimu full-duplex bude šířka kmitočtového pásma větší. Nevýhodou bezdrátového přenosu je možnost vzniku zkrácení přenášeného signálu interferencí.

2.1 Přenosová média

Přenosová média se využívají k transportu signálu z jednoho zařízení do druhého. Přenosovým médiem může být vzduch, vakuum nebo jakýkoliv vodivý materiál (uvažujeme signál jako elektromagnetické vlnění). Zařízení mohou komunikovat dvěma způsoby, a to bezdrátově nebo pomocí kabeláže. V prvním případě neexistuje fyzické médium a signál se šíří ve formě elektromagnetického záření vzduchem.

Propojením fyzickými vodiči se přenáší signál ve formě elektrického proudu (napětí). Přenášený signál závisí na fyzikálních parametrech média. Používají se kroucené dvojlinky, koaxiální kabely a optické kabely. U optických kabelů je signál přenášen jako světlo. Výhodou optických kabelů je vysoká přenosová rychlost, nízký útlum a vysoká odolnost proti rušení. V následující tabulce je uveden přehled používaných kabelů a jejich šířka pásma.

Tabulka 4: Typy přenosových kabelů

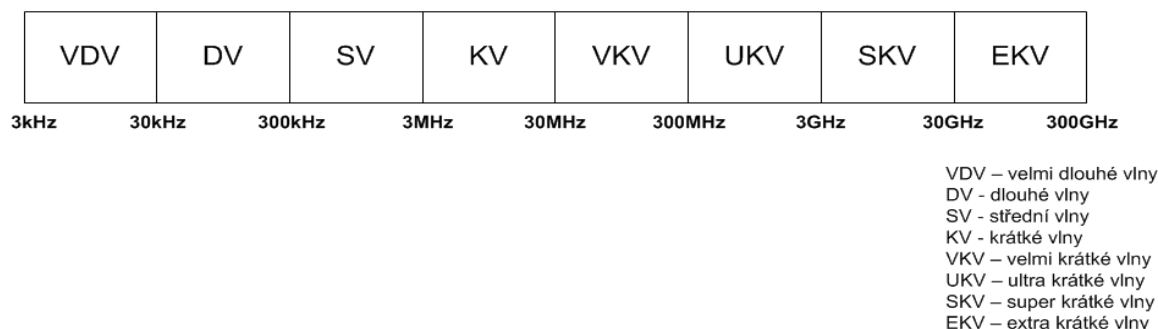
Typ	Šířka pásma
Nestíněná dvojlinka (UTP)	100Hz - 5 MHz
Stíněná dvojlinka (STP)	
Koaxiální kabel	100kHz – 500 MHz
Optický kabel	Šířka pásma není omezena přenosovým médiem, ale dostupnou technologií pro generování a přijímání signálu. Kmitočet se pohybuje v řádu stovek THz (1THz = 10^{12} Hz.

Tabulka 5: Příklady použití kmitočtových pásem

Zařízení	Šířka pásma
FM rádio	88 – 108 MHz
Bluetooth	2,4 GHz
WiFi	2,4 GHz

U bezdrátového spojení jsou jednotlivým zařízením normami přiřazena kmitočtová pásma, která mohou využívat ke komunikaci. Celková šířka pásma určená pro bezdrátovou komunikaci je od 3 kHz do 300 GHz a odtud jsou přiřazena kmitočtová pásma jednotlivým zařízením tak, aby se jednotlivá pásma nepřekrývala a nedocházelo k rušení. Na obrázku 11 je uvedeno dělení celého spektra na jednotlivé úseky a v tabulce 4 je uveden příklad kmitočtových pásem určených pro jednotlivé systémy.

Bluetooth i WiFi používají stejné kmitočtové pásmo rozdělené do několika kanálů po 1 MHz. Aby nedocházelo k vzájemnému rušení, používají obě technologie speciální metody.



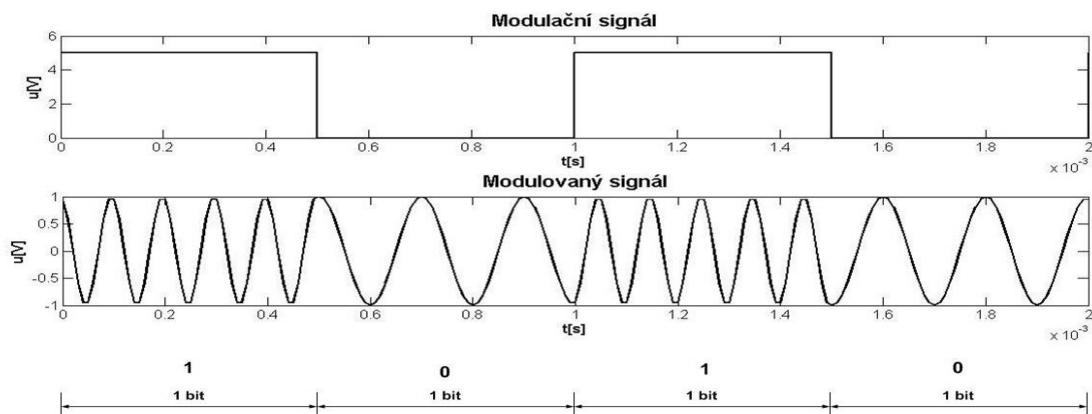
Obrázek 4: Kmitočtová pásma

2.2 Volba modulace

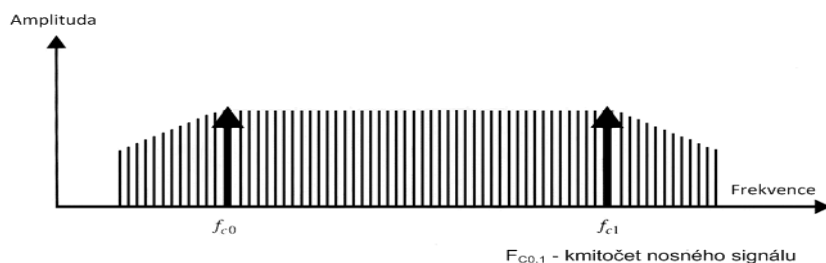
Modulací dochází ke změně charakteristických vlastností nosného signálu (amplituda, frekvence, fáze). Signál nesoucí informaci se nazývá modulační signál, signál vzniklý po modulaci se nazývá modulovaný. Modulací existuje celá řada, například analogově-analogová modulace, digitálně-analogová, analogově-digitální.

Ke komunikaci na modelové železnici byla zvolena frekvenční klíčová modulace FSK (Frequency Shift Keying), pro její jednoduchost a odolnost proti rušení.

Frekvenční klíčová modulace se vyznačuje změnou frekvence nosného signálu v závislosti na modulačním signálu, při nezměněné amplitudě a fázi. Logické 1 odpovídá kmitočtu f_1 a logické 0 kmitočtu f_0 . Na obrázku 15 je znázorněna šířka pásma modulovaného signálu.



Obrázek 6: FSK modulace

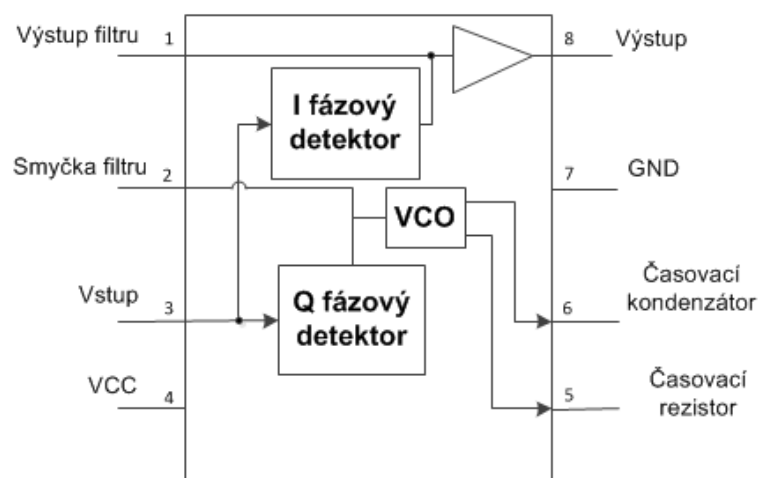


Obrázek 5: Šířka pásma [2]

2.2.1 Volba obvodového řešení

Jako modem byl použit integrovaný obvod LM567, který pracuje s FSK modulací. Obvod se skládá z I a Q detektoru fáze řízeného napěťovým oscilátorem, který určuje centrální frekvenci dekodéru. Je založený na saturaci výstupního tranzistoru, pokud je vstupní signál okolo šířky propustného pásma. Externí komponenty slouží k nastavení centrálního kmitočtu, šířky pásma a zpoždění.

Obvod je možné využít pro modulaci i demodulaci signálu. V zapojení jako modulátor pracuje s FSK modulací. Nulový kmitočet reprezentuje logickou nulu a kmitočet vnitřního oscilátoru logickou jedničku.



VCO - napětím řízený oscilátor

Obrázek 7: Blokové schéma IO LM567

3. Interference

Interference je hlavní důvod, proč se po jednom vedení mohou šířit bezpečně pouze signály různých kmitočtových pásem a jsou přiděleny bezdrátovým zařízením jejich vlastní normované kmitočty.

Interference je vzájemné zesilování a zeslabování vln o stejném kmitočtu [4]. V závislosti na fázi může dojít k destruktivní nebo konstruktivní interferenci. Destruktivní interference nastane tehdy, pokud dvě vlny o stejném kmitočtu a stejné amplitudě jsou vzájemně fázově posunuty o 180° . Pak dojde k jejich úplnému vyrušení.

Opačný případ je konstruktivní interference, kdy jsou dvě vlny o shodném kmitočtu a amplitudě ve fázi. Pak vznikne jedna vlna o dvojnásobné amplitudě.

Máme-li dvě vlny popsané rovnicemi:

$$y_1(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

$$y_2(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (2.2)$$

Obě vlny mají stejnou amplitudu y_m , úhlový kmitočet ω a stejný úhlový vlnočet k , tedy stejnou vlnovou délku, ale obě vlny jsou navzájem fázově posunuty o úhel ϕ . [4] Výsledná vlna bude mít výchylku danou vztahem 2.3 [4].

$$y'(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t) + y_m \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (2.3)$$

Využitím vztahu 2.4[4] pro součet goniometrických funkcí sinus dostaneme výsledný vztah 2.5 [4].

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2} \quad (2.4)$$

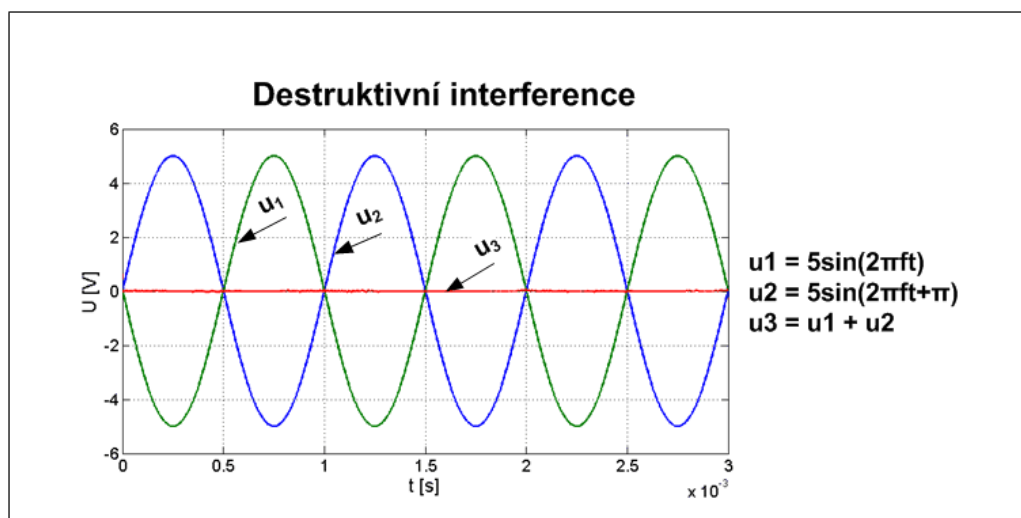
$$y'(x, t) = 2y_m \cos\left(\frac{1}{2}\phi\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{1}{2}\phi\right) \quad (2.5)$$

Interferencí dvou sinusových vln o stejné amplitudě a stejné vlnové délce, postupujících souhlasným směrem, vzniká opět vlna sinusová, postupující stejným směrem, jako obě výchozí vlny [4].

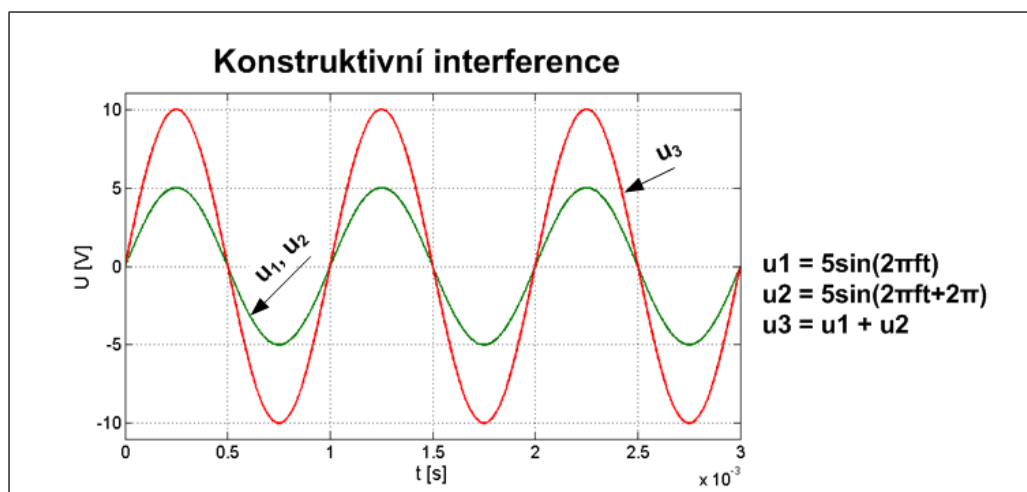
Tabulka 6: Druh interference odpovídající fázovému rozdílu

Fázový rozdíl [rad]	Amplituda výsledné vlny	Druh interference
0	$2y_m$	Úplně konstruktivní
$2\pi/3$	y_m	částečná
π	0	Úplně destruktivní
$4\pi/3$	y_m	částečná
2π	$2y_m$	Úplně konstruktivní

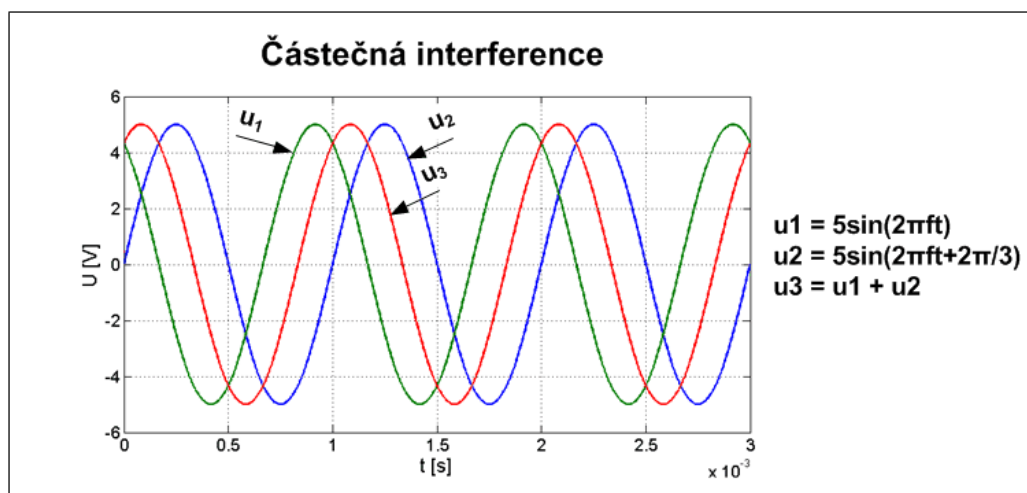
Je možno uvést příklad, co by se stalo, kdyby se po jednom vedení, ve stejný čas přenášeli dva obdélníkové signály stejného, nebo velice blízkého kmitočtu. Jak víme z předchozí kapitoly, obdélníkový signál je tvořen nekonečným množstvím sinusovek o různých kmitočtech a fázích. V tomto případě by došlo ke vzájemné interferenci sinusovek tvořících oba signály a k následnému zkreslení výsledného signálu na straně přijímače. Tedy dojde ke ztrátě informace.



Obrázek 8: Destruktivní interference



Obrázek 10: Konstruktivní interference



Obrázek 9: Částečná interference

4. Praktická část

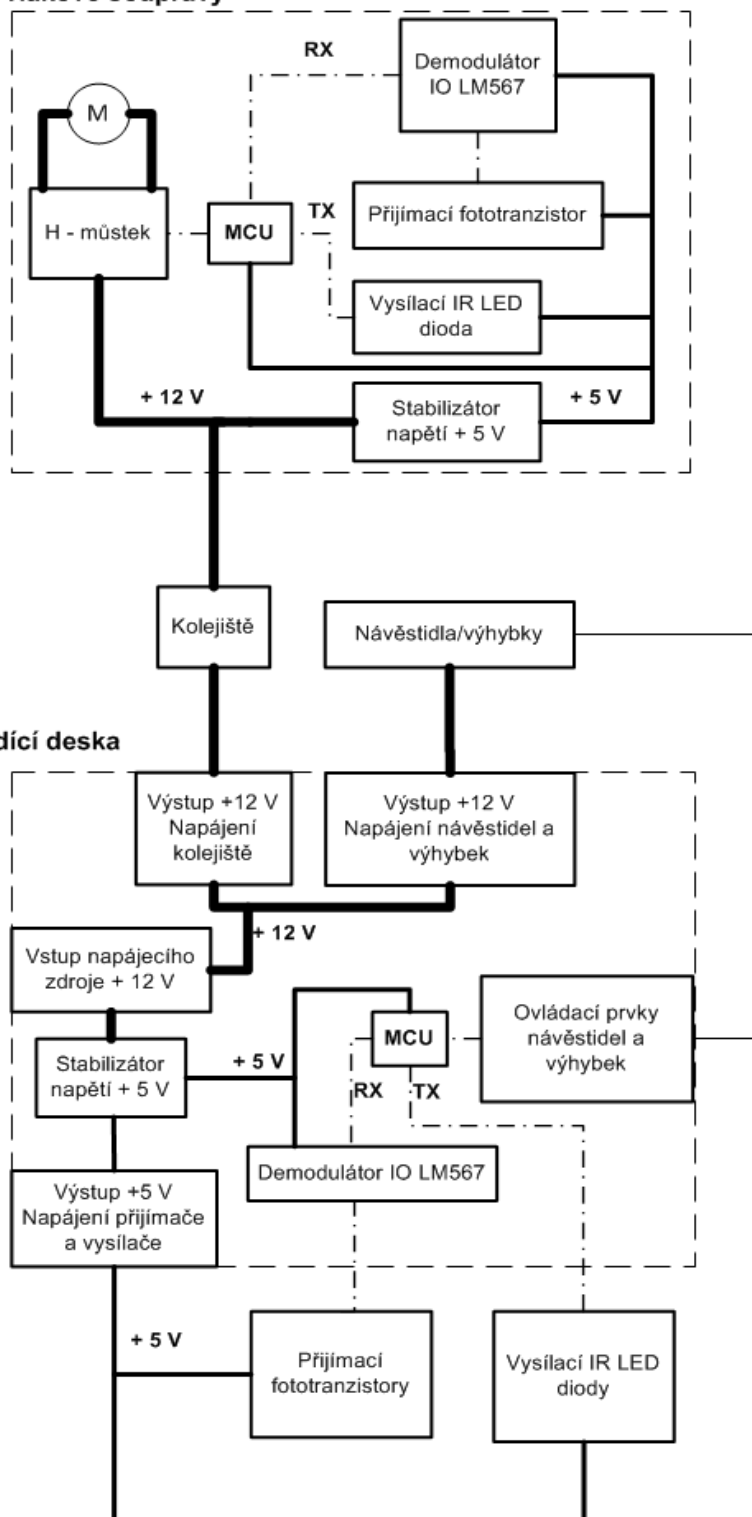
4.1 Hardware

V první fázi projektu byl navržen způsob komunikace mezi modely vlakových souprav a řídicí jednotkou. Od původně zamýšleného přenosu řídicí informace společně s napájecím napětím bylo upuštěno z důvodu vysokého útlumu přenášeného signálu. Poté byl vyvíjen způsob přenosu řídicích dat pomocí infračerveného záření.

Obrázek 11 znázorňuje blokové schéma navrženého systému na hardwarové úrovni. Celý systém je napájen napětím 12 V. Řídicí část systému je napájena napětím o hodnotě 5 V, které zajišťuje stabilizátor napětí umístěný v modelu vlakové soupravy, tak i na řídicí desce. K vysílání řídicích signálů je využita IR LED dioda a pro jejich příjem fototranzistoru. Integrovaný obvod LM567 zajišťuje demodulaci přijímaného signálu. Pro úsporu místa na DPS umístěné v modelu vlakové soupravy je k modulaci vysílaného signálu určen mikrokontroler namísto integrovaného obvodu LM567, který může rovněž fungovat jako modulátor. Chod motorku je řízený H-můstkem, který je řízen mikroprocesorem generovaným PWM signálem.

Řídicí deska obsahuje 12 V výstupy určené k napájení kolejiště a komponent zajišťujících řízení provozu na modelové železnici. Jedná se převážně o výhybky a návěstidla. Řídicí vodiče těchto prvků jsou připojeny k bloků s názvem Řídicí prvky návěstidel a výhybek. Jedná se o spínací tranzistory řízené mikrokontrolerem. Řídicí deska dále disponuje 5 V výstupem, který slouží k napájení externě umístěných vysílacích IR LED diod a přijímacích fototranzistorů.

Model vlakové soupravy



Obrázek 11: Blokové schéma navrženého systému

4.1.1 Napájení

Z kapitoly komponenty kolejiště v teoretické části vyplývá, že napájecí napětí návěstidel a výhybek je 12 V, ale návrh spínacích prvků výhybek nepatří mezi jednoduché záležitosti, což je zapříčiněno nedostatkem informací o konkrétním typu od výrobce. Pak je řešením výsledný návrh předimenzovat nebo provést měření výrobku.

Spínací tranzistory jsou naddimenzovány na proud větší, než 3 A. Předpokladem je, že takto velký proud přestavíkem, ovládaným elektromagnetem, nepoteče. Reálné hodnoty proudu, by se mohly pohybovat do 0,5 A. Výhodou je, že proud bude procházet pouze při přestavení výhybky a po projetí soupravy se vyhybka vrací do klidového stavu a proud na nulovou hodnotu. Tepelné namáhání bude závislé na délce sepnutí a tím na délce vlakové soupravy.

Uvažujme nejhorší případ, který by mohl nastat. Ke všem výstupům by byly připojeny přestavníky v aktivním stavu. Pak by celkový proud dosahoval hodnoty do 5 A, ale hodnoty špičkových proudů i desítek ampér. Možným řešením je připojit k výstupům kondenzátory které by pokryly proudový odběr v době sepnutí.

4.1.2 Motor

Největším spotřebičem proudu je motor. Jeho spotřeba závisí na jeho zatížení. Je reálné dosáhnout hodnoty odebíraného proudu okolo 0,5 A. Výrobci uvádějí spotřebu nezátíženého motoru, která se pohybuje okolo 0,1 A.

Napájecí napětí motoru je závislé především na parametrech h-můstku, viz dále. Jako první variantou se jevil h-můstek s napájecím napětím do 10 V. Zde se ovšem naplno projevil problém s napájením. Při použití 12 V napájecího zdroje by muselo být použito stabilizátoru napětí na 10 V umístěného na řídicí desce. Z blokového zapojení modelového kolejiště je patrné, že tento stabilizátor by napájel celou modelovou železnici, tedy několik vlakových souprav najednou. Zde jsme limitováni maximálním procházejícím proudem stabilizátorem napětí, který je ve většině případů 2 A. Z tohoto důvodu, by musel být omezený počet pohybujících se modelových souprav po železnici.

4.1.3 Způsob napájení kolejiště

Z výše uvedeného vyplývá, že je nemožné použít stabilizátorů napětí pro jednotlivé části kolejiště bez patřičných omezení.

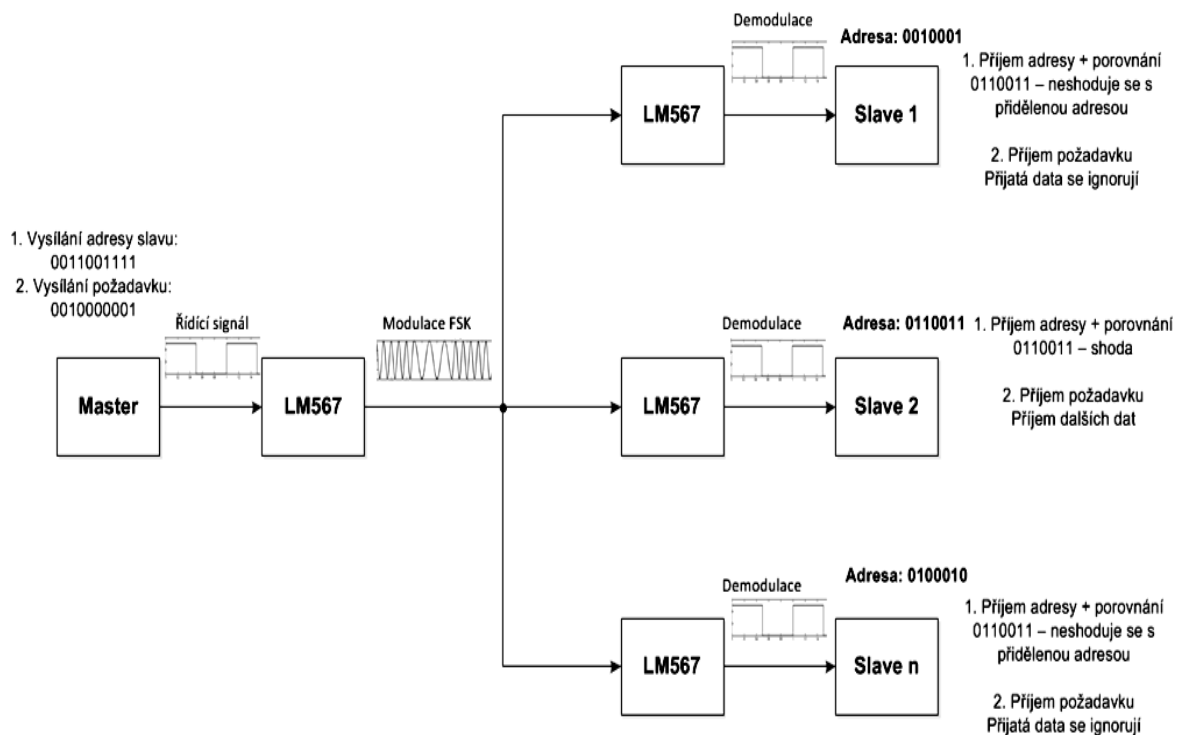
Celé kolejiště je napájeno ze stabilizovaného 12 V zdroje napětí. Pouze pro řídicí obvody je použito napájení 5 V. Proud řídicí elektronikou nepřesahuje hodnotu 100 mA na řídicí desce ani v modulu umístěném ve vlakové soupravě. Vývojové moduly určené ke komunikaci dosahují vlivem použití signalizačních LED diod spotřeby do 200 mA.

Je tedy zřejmé, že rozloha výsledného kolejiště v počtu použitých komponent je závislá pouze na zdroji napájecího napětí. K dvanácti voltovému zdroji bylo přistoupeno i z důvodu, že se jedná o standardní napájecí zdroje určené pro modely kolejišť, a také jednotlivá zařízení jsou navržena na toto napětí.

Z výsledné desky se tímto stává univerzální řídicí jednotka určená pro řízení jakéhokoliv modelu a je k ní možné připojit většinu dostupných součástí vyráběných pro modeláře vlakových kolejišť, například pro další rozšiřování funkce celého modelu.

4.1.4 Komunikace

Na obrázku 12 je znázorněný zvolený způsob komunikace. Jedná se o asynchronní, half-duplexní přenos. Jednotlivým přijímačům jsou přiděleny adresy. Master začíná komunikaci vysláním této adresy společně s logickou jedničkou v osmém bitu, která způsobí přerušení u všech podřízených jednotek. Pokud podřízené zařízení zjistí v devátém bitu logickou jedničku, začne porovnávat přijatá data s přidělenou adresou. Když dojde ke shodě, je připravený pro příjem dalšího řetězce dat. V opačném případě přichodí data ignoruje a je ve stavu vysoké impedance. Ještě dodejme, že přenos řetězce bitů začíná start bitem (logická 0) a končí stop bitem (logická 1)



Obrázek 12: Komunikace řídicí desky s modely vlakových souprav

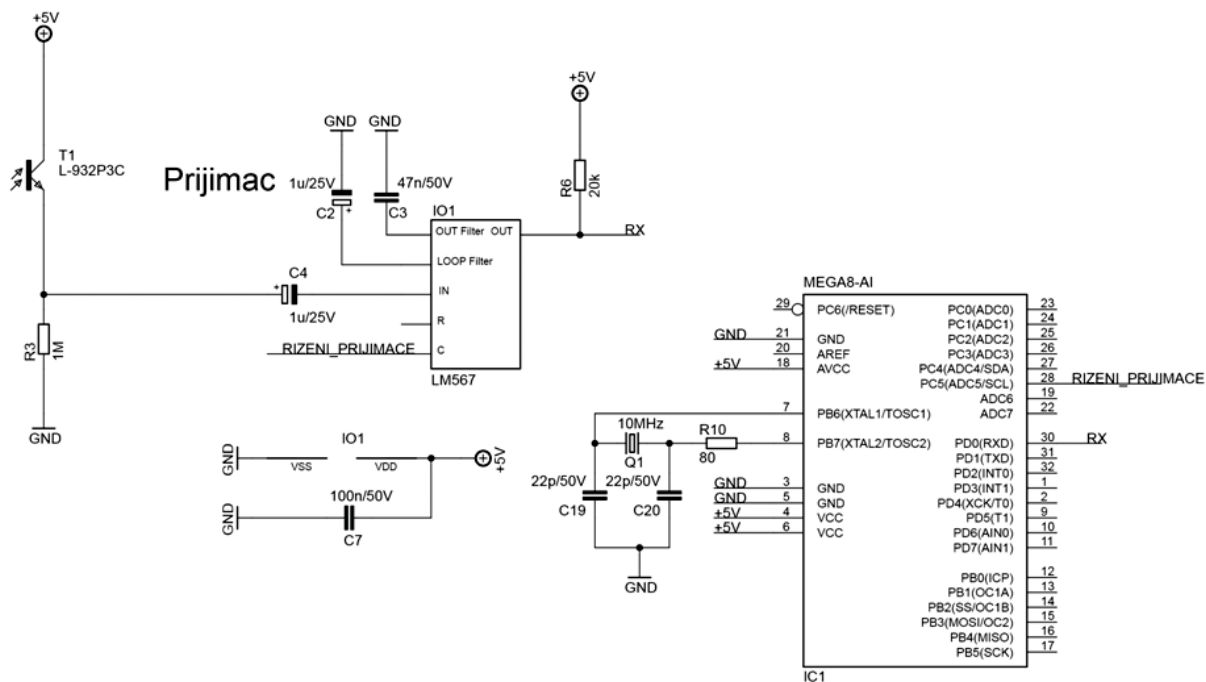
4.1.5 Integrovaný obvod LM567

V aplikaci je obvod využit k demodulaci, jelikož prostor v modelu vláčku je omezený. K modulaci slouží mikroprocesor. Stejné řešení je použito i u řídicí desky, jelikož se jedná o identická zapojení a stejné typy mikroprocesorů čímž se urychlí naprogramování obvodu a realizace nebude tak nákladná, což by byla nesporná výhoda při sériové výrobě.

Pro demodulaci musí být kmitočet interního oscilátoru shodný s frekvencí, která je použita ke komunikaci. Při testování bylo právě toto hlavním problémem, vlivem tolerancí součástek určujících požadovaný kmitočet. Pak musely kondenzátory určující šířku pásma nabývat nižších hodnot (větší šířka pásma). To přinášelo další problém v podobě přenosu modulovaného signálu na výstup, když byl kmitočet modulačního signálu a nosný kmitočet blízko u sebe. K eliminaci tohoto jevu je možné využít několika možností. První možností je oddělení nosného a modulovaného kmitočtu tak, aby mezi nimi byla větší kmitočtová mezera. Například využít 3 kHz a 20 kHz. Druhou možností je dostavovat kmitočet oscilátoru přijímače potenciometrem.

V aplikaci byl zvolen způsob řízení demodulátoru mikroprocesorem, který využívá externí krystalový oscilátor, vykazující minimální toleranci kmitočtu. Pomocí vestavěných předděliček a čítačů mikroprocesoru dosáhneme požadovaného kmitočtu. Z konstrukčních

důvodů je po přetečení vnitřního čítače programově ovládán jeden z výstupů mikroprocesoru, kterým je řízen demodulátor. Signál je přivedený na vstup C integrovaného obvodu LM567 s názvem ŘÍZENÍ_PŘIJÍMAČE.



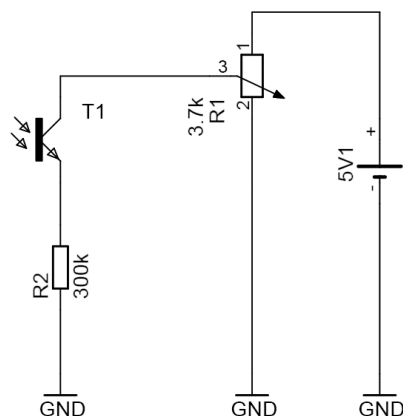
Obrázek 13: Schéma zapojení IO LM567 určeného k demodulaci přijímaného signálu fototranzistorem a následné vyhodnocení mikrokontrolerem

4.1.6 Optoelektronické prvky

K vysílání slouží infračervená LED dioda (dále jen IR LED) a pro příjem fototranzistor reagující na infračervené záření.

Nejprve bude popsán návrh fototranzistoru. Prvním krokem bylo zjištění voltampérové charakteristiky, jelikož ji nebylo možné vyčíst z katalogového listu. Schéma zapojení je na obrázku 13. Proud IR LED diodou byl nastaven na hodnotu 50 mA. V tabulce 7 jsou uvedeny naměřené hodnoty a na obrázku 14 je voltampérová charakteristika pro vzdálenost fototranzistoru od IR LED 0,6 m a 1,5 m. Změna vzdálenosti reprezentuje změnu intenzity infračerveného záření dopadajícího na fototranzistor. Aby bylo omezeno zkreslení výsledků působením okolního infračerveného záření, byl fototranzistor po všech stranách zastíněn. Při

měření byl použit zatěžovací odpor R_2 o hodnotě $300\text{ k}\Omega$. V praktickém návrhu vývojového modulu je použit odpor o hodnotě $1\text{ M}\Omega$ a pro zvýšení rozsahu bude v modelu vlakové



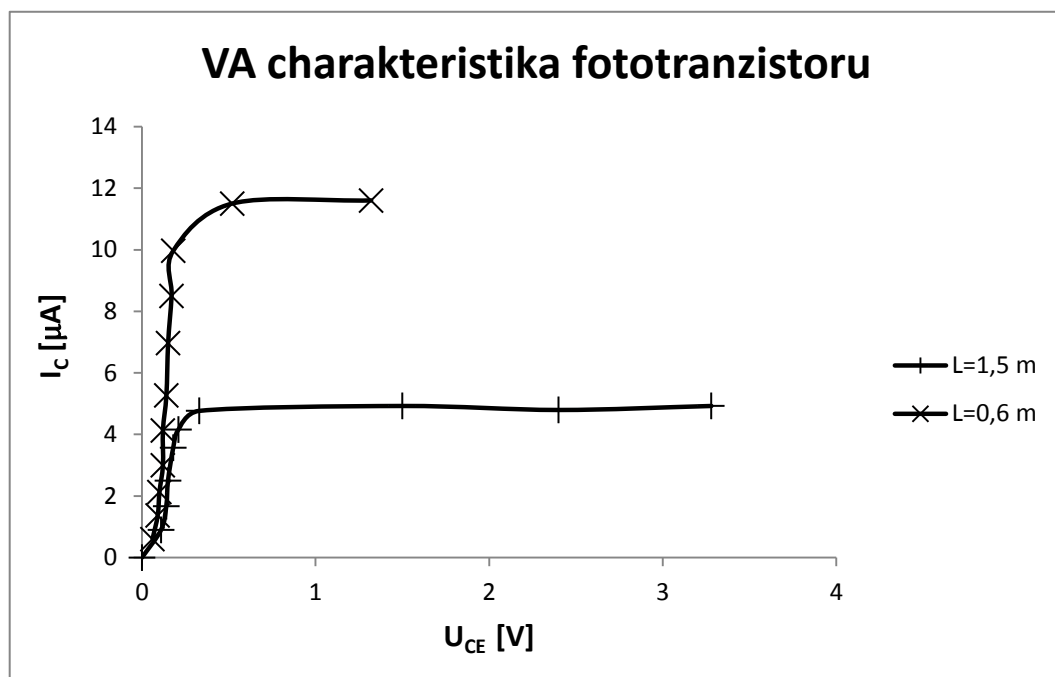
Obrázek 14: Schéma zapojení fototranzistoru pro zjištění jeho VA charakteristiky

soupravy hodnota odporu navýšena na konečných $10\text{ M}\Omega$. Řešení s vysokým zatěžovacím odporem zajišťuje konstantní odběr proudu a nízký úbytek napětí v širokém rozmezí intenzity záření dopadajícího na fototranzistor, který pracuje v lineární oblasti.

Přes kapacitní vazbu se přenáší signál ze zatěžovacího odporu na vstup integrovaného obvodu LM567, jak je možné vidět ve schématu zapojení na obrázku 13. Kondenzátor propouští pouze střídavou složku signálu, tím je minimalizováno ovlivnění demodulátoru okolním infračerveným zářením.

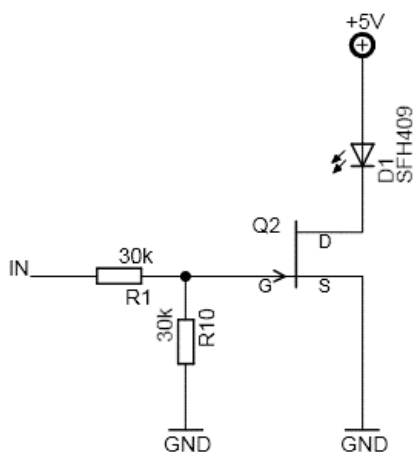
Tabulka 7: Naměřené hodnoty fototranzistoru při zjišťování VA charakteristiky

	L=1,5m		L=0,6m	
	Uce	Ic	Uce	Ic
1	3,28	4,93	1,32	11,6
2	2,4	4,8	0,52	11,5
3	1,5	4,93	0,18	9,97
4	0,33	4,77	0,17	8,5
5	0,21	4,16	0,15	6,97
6	0,18	3,57	0,14	5,27
7	0,15	2,5	0,12	4,13
8	0,14	1,67	0,12	3
9	0,11	0,9	0,1	2,13
10	0	0	0,09	1,37
11			0,06	0,6



Obrázek 15: VA charakteristika fototranzistoru pro vzdálenost od IR LED diody 0,6 m a 1,5 m

Zapojení s IR LED diodou je na obrázku 16. Zapojení využívá režimu saturace tranzistoru pro omezení napětí na diodě. Z důvodu nízkého zatížení odporů typu 0603 a nastavení proudu IR LED diodou na co nejvyšší hodnotu pro vysoký dosah záření a také při dodržení zásady snadné a levné vyrobitelnosti výsledné desky s plošnými spoji (použití stejných typů součástek). Nevýhodou tohoto řešení jsou vyšší tepelné ztráty na tranzistoru.



Obrázek 16: Zapojení IR LED diody

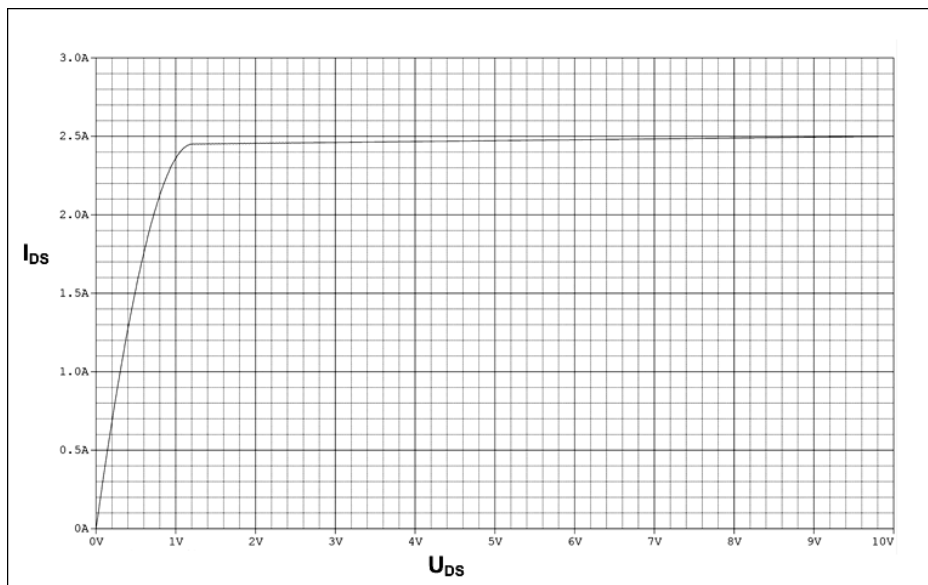
Jinou možností je použití odporu s jiným pouzdrum, např. 1206, které vykazují vyšší zatížení. S velkou pravděpodobností by se ale muselo jednat o vývodový rezistor, který má vyšší výkonové zatížení. Toto řešení se zdá výhodnější, kromě dodržení zásad pro levnou výrobitelnost, což by v praxi mohlo být jistým problémem.

Pro vývojový modul bylo použito první řešení, kde se projeví jeho výhody nebo nedostatky, především ohřev tranzistoru, který je v modelu vláčku nežádoucí, protože se jedná o uzavřený prostor a nachází se zde i další součástky, které budou vykazovat značné tepelné ztráty. Nesmíme zapomenout, že tranzistor pracuje v režimu nespojitých proudů, z čehož vyplývá, že ztrátový výkon bude nižší než v režimu spojitých proudů, což může podporovat využití tohoto řešení, ale špičkový proud bude dosahovat vysokých hodnot a toto je třeba zohlednit na desce plošných spojů.

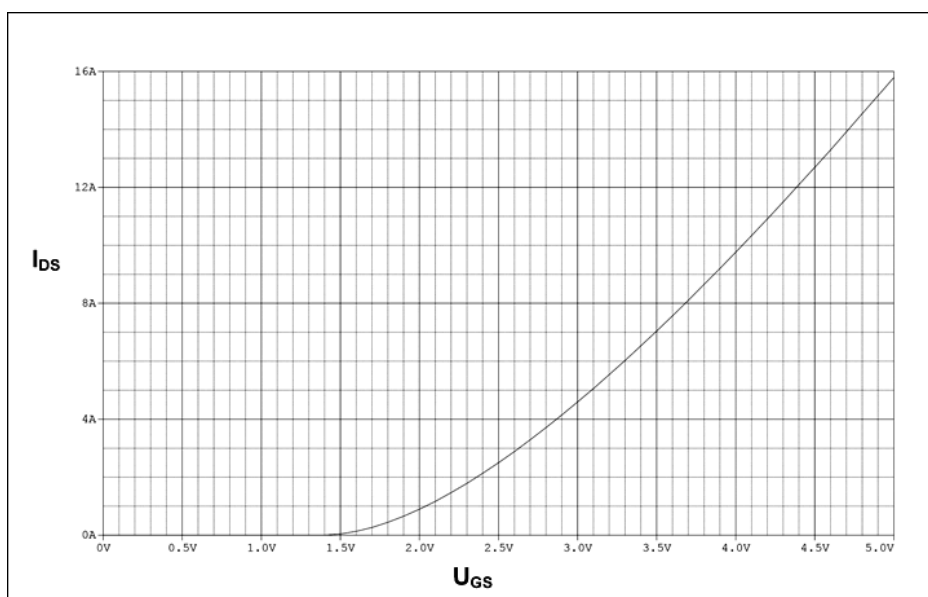
K řízení celého kolejiště prostřednictvím řídicí desky, bylo využito řešení s tranzistorem pracujícím v lineárním režimu s předřadným odporem. Předřadný odpor s IR LED diodou je umístěný mimo řídicí desku. V tomto případě se jedná o čistě vývodovou montáž. Napájení 5 V je získáno z řídicí desky.

Byl zvolen unipolární NMOS tranzistor IRLML2402. Jeho charakteristiky jsou na obrázcích 17 a 18. Tranzistor je umístěný na řídicí desce a přes konektor ovládá IR LED diodu. Řešení bylo zvoleno především z důvodu zvýšení proudu vlivem použití osmi IR LED diod pro pokrytí signálem větší rozlohy. Celkový proud tranzistorem je 480 mA. Pokud by bylo zvoleno předchozí řešení, ztrátový výkon by přesáhl mez stanovenou výrobcem. Následek by bylo přehřátí a zničení tranzistoru. Z převodní charakteristiky bylo vybráno napětí $U_{GS} = 2,5 \text{ V}$, protože se jedná o poloviční hodnotu napájecího napětí, což snižuje počet součástek s různými hodnotami, jelikož pro odporový dělič napětí budou použity rezistory o stejných hodnotách. A protože proud IR LED diodami je 480 mA, pak z charakteristiky vyplývá, že tranzistor bude pracovat v lineárním režimu s vysokou rezervou. Nejdůležitější jsou ovšem nízké tepelné ztráty.

V tabulce 8 jsou znázorněny parametry tranzistoru a parametry navrženého napěťového děliče.



Obrázek 17: Výstupní charakteristika tranzistoru IRLML2402



Obrázek 18: Převodní charakteristika tranzistoru IRLML2402

Tabulka 8: Parametry tranzistoru IRLML2402

Napěťový dělič		Tranzistor				
R ₁ , R ₂	I _R	R _{DS}	I _{OUTMAX}	P _{ZTRMAX}	U _{DSMAX}	U _{GS}
1 MΩ	2,5 μA	0,25 Ω	1,2 A	540 mW	20 V	2,5 V

Ztrátový výkon vypočítáme podle vztahu 5.1.

$$P_{ZTR} = R_{DS} I^2 \quad (5.1)$$

Pak se ztrátový výkon rovná:

$$P_{ZTR} = 0,25 * 0,480^2 = 57 \text{ mW}$$

4.1.7 Komunikační kmitočet

Komunikační kmitočet je omezený rychlostí použitých součástek. Z katalogových listů vyplývá, že nejpomalejší součástkou je vysílací fototranzistor. Právě tato součástka určuje rychlost komunikace. Dále musíme vzít v úvahu, že dochází k vysílání obdélníkového signálu. Tedy je nutné vysílat a v pořádku přijmout i další harmonické kmitočtové spektra, aby nedošlo k destrukci signálu a ztrátě informace. V tabulce 9 je přehled doporučených hodnot pro modulační a nosný kmitočet.

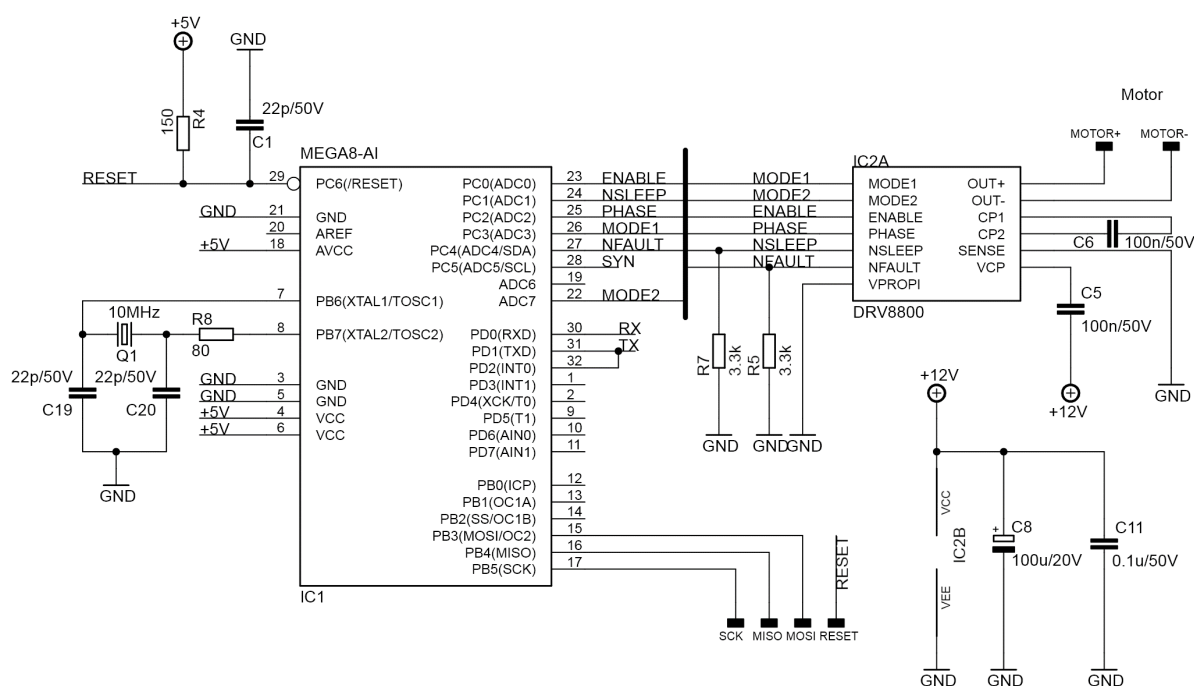
Kmitočty jsou voleny s rezervou, aby došlo k úspěšnému přenosu informace. Přenosová rychlost je pro danou aplikaci dostatečná.

Tabulka 9: Doporučené hodnoty komunikačních kmitočtů

Maximální kmitočet	20 kHz
Modulační kmitočet	Max 4 kHz
Nosný kmitočet	Min 5 x modulační kmitočet

4.1.8 H-můstek

Mezi hlavní prvky systému patří H-můstek, který ovládá rychlost a směr jízdy modelu vláčku. H-můstek je umístěný ve vláčku společně s přijímačem a z toho plynou požadavky na jeho velikost. Hlavním požadavkem byla nenáročnost na prostor. Proto byl vybrán integrovaný h-můstek. Integrovaný h-můstek navíc disponuje dalšími ochrannými funkcemi, jako je ochrana před přehřátím, předpětím nebo proudová ochrana. Jelikož proud odebíraný motorem je závislý na jeho zatížení, je h-můstek navržen s dostatečnou proudovou rezervou. Proud motorkem vláčku se podle výrobce pohybuje v hodnotách okolo 100 mA. Maximální proud protékající h-můstkem jsou 3 A. Schéma zapojení je na obrázku 19.



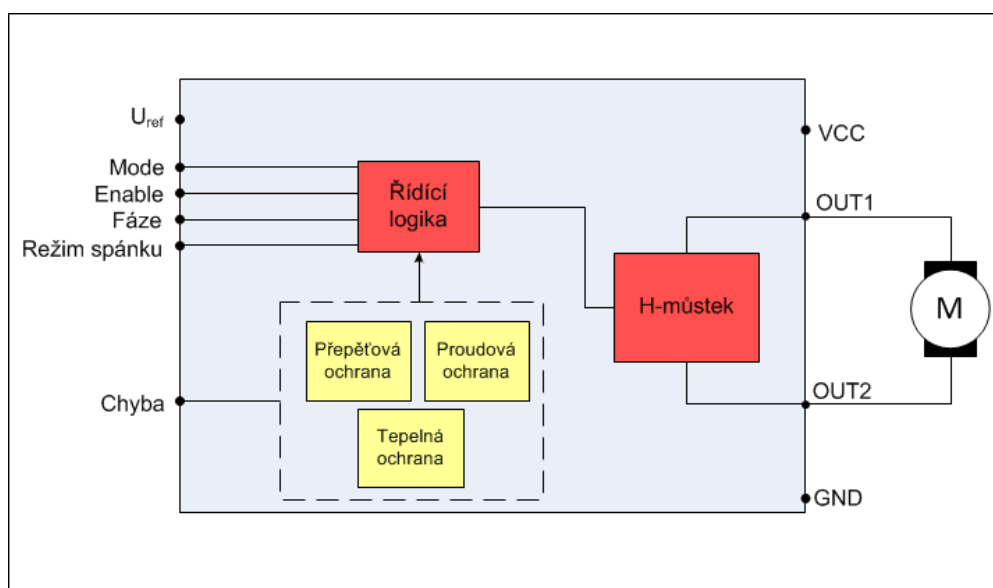
Obrázek 19: Schéma zapojení H-můstku a mikrokontroleru

Dalším parametrem pro výběr byl nízký odpor kanálu tranzistoru v sepnutém stavu a napájecí napětí.

Nalézt optimální h-můstek tak, aby splňoval všechny požadavky, nebylo snadné. Jako prvním optimálním řešením se jevil h-můstek od firmy Texas Instruments drv8833. Jeho předností byl nízký odpor kanálu MOS tranzistorů okolo 0,3 Ω . Další výhodou byly malé rozměry pouzdra. Jedinou nevýhodou se jevily pouze další funkce obvodu, které pro aplikaci byly nadbytečné, a to především, že obvod je určený pro řízení dvou motorků nebo jednoho krokového motorku. Malé rozměry pouzdra byly rozhodujícím parametrem, jelikož jiné h-můstky byly rozměrnější a zahrnovali daleko více možností, například generování

požadované modulace na základě kombinace vstupních hodnot. Tyto obvody výrazně ulehčují práci, ale jsou rozměrné a nákladné, a v aplikaci ve které je mikroprocesor, jsou neekonomické, jelikož PWM signál může generovat mikroprocesor. Jediná komplikace, která se vyskytla, bylo napájecí napětí, které bylo 10V což se později ukázalo jako problém.

Řešením se ukázal h-můstek opět od společnosti Texas Instruments drv8800. Je určený pro napájecí napětí motorku až 36V, proud 3A a odpor kanálu MOS tranzistoru 0,8Ω. Rozměry pouzdra jsou stejné jako v prvním případě. Jediný rozdíl je v jiném ovládní.



Obrázek 20: H-můstek

Drv8800 je určený pro řízení pouze jednoho motoru.

Na obrázku 20 jsou znázorněny jednotlivé bloky, které h-můstek obsahuje. Pracovní režim motorku určují vstupy Enable, fáze a mode. Integrovaný obvod obsahuje řadu bezpečnostních obvodů. Protože proud, který motorek odebírá, je úměrný zatížení. K přehřátí může dojít, pokud bude motorek dlouho v provozu pod zatížením. Celý obvod je umístěný uvnitř lokomotivy, kde je znemožněna cirkulace vzduchu, což má za následek rychlejší oteplení celého systému. Mezi tyto obvody patří předpětová ochrana, proudová ochrana a tepelná ochrana. Pokud došlo k přehřátí, proudovému přetížení apod. je na výstupu chyba (fault) logická úroveň 0. Ovládací obvod ve vlakové soupravě je připravený i k vysílání a tedy může poslat řídicí jednotce zprávu o poruše, a ta následně informuje obsluhu.

Pravdivostní tabulka 10 znázorňuje jednotlivé režimy motorku. Rychlost je regulována PWM modulací přivedenou na vstup fáze nebo enable. Vstupy mode 1 a mode 2 určují režim brzdění (pomalá demagnetizace) a demagnetizací (rychlá demagnetizace). K řízení rychlosti

motorku je přiveden PWM signál na vstup enable a směr jízdy je dán vstupem fáze. Na vstupu enable se objevuje střídavě vysoká a nízká úroveň v závislosti na PWM signálu a podle pravdivostní tabulky se střídá režim motoru mezi jízdou vpřed (vzad). V modelu vláčku je použitý stejnosměrný motorek s permanentními magnety. U těchto typů motorků není demagnetizace prakticky možná, proto nemusíme řídit vstupy mode 1 a mode 2.

Tabulka 10: Pravdivostní tabulka

Fáze	Enable	Mode 1	Mode 2	nSleep	Out+	Out-	Činnost
1	1	x	x	1	H	L	Jízda vpřed
0	1	x	x	1	L	H	Jízda vzad
x	0	1	0	1	L	L	Brzdění
1	0	0	1	1	L	H	Inverzní režim
0	0	0	x	1	H	L	Inverzní režim
x	x	x	x	0	Z	Z	Režim spánku
x – nezáleží na hodnotě Z – vysoká impedance							

Tepelné ztráty závisí na odporu kanálu tranzistoru v otevřeném směru a na efektivní hodnotě proudu podle vztahu 5.2.

$$P_{ztr} = R_{DS} I^2 \quad (5.2)$$

Odpor kanálu je $0,8\Omega$. Při uvažování efektivní hodnoty proudu $0,5\text{ A}$ je ztrátový výkon $0,4\text{ W}$. Předpokladem je, že celkový proud bude nižší, než je zvolená hodnota a tedy i ztrátový výkon. Pro dobrý odvod tepla bylo zvoleno pouzdro s ocelovou ploškou na spodní straně, která je připojena k zemi. Dodejme, že při návrhu h-můstku, ale i jiných spínacích tranzistorů, byla počítána potřeba chlazení. Jelikož v žádném případě nebylo zapotřebí využití chladiče, nejsou příklady výpočtu v práci uvedeny.

4.1.9 Spínací tranzistory

V této kapitole je popsán návrh výstupních spínacích tranzistorů. Spínací tranzistory pracují v lineární oblasti voltampérové charakteristiky a díky nízkému odporu jimi mohou protékat vysoké proudy při minimálním výkonovém zatížení.

Jedná se o tranzistory umístěné na řídicí desce celého kolejiště, které je možné využít pro ovládání návěstidel a přestavníků. Byl zvolen tranzistor IRF7301. Jedná se o unipolární NMOS tranzistor.

Při porovnání bipolárního a unipolárního tranzistoru hovoří ve prospěch unipolárního tranzistoru nižší spotřeba, tudíž nižší ztráty a tedy i tepelné namáhání. Ovládací proud unipolárního tranzistoru je nulový. Ovládací větví tranzistoru prochází pouze proud odporovým děličem, který nabývá minimálních hodnot (v jednotkách μA). Při porovnání unipolárních spínačů s bipolárními bylo dosaženo o 8 mA nižší spotřeby (celkem je na desce deset tranzistorů) když jsou všechny tranzistory v sepnutém stavu. To znamená menší proudové namáhání a ohřev mikroprocesoru a stabilizátoru napětí, na kterém je ztrátový výkon nižší o 56 mW.

Prvním krokem pro návrh spínacích tranzistorů bylo zjištění výstupní a převodní charakteristiky tranzistoru pomocí simulačního programu SPICE za použití odpovídajících spice modelu daného tranzistoru. Z převodní charakteristiky bylo odečteno prahové napětí 1,3 V. Napětí U_{GS} musí být vyšší, než tato hodnota. Dalším krokem bylo zjištění výstupní charakteristiky krokováním napětí U_{GS} do 5 V. Na obrázku 21 je znázorněna výstupní charakteristika pro napětí $U_{GS} = 2,5$ V. Z charakteristiky je patrné, že tranzistor pracuje v lineárním režimu až do proudu 19 A, což daleko převyšuje fyzické možnosti daného tranzistoru.

Napětí $U_{GS} = 2,5$ V je optimální volbou pro spínací tranzistor. Tato hodnota byla zvolena z důvodu, že se jedná o poloviční napětí výstupu mikroprocesoru, a proto je možné sestavit napěťový dělič z dvou shodných odporů. Toto je jedna ze zásad levného návrhu. Navrhnout co největší počet shodných pasivních součástí na desce plošných spojů.

Posledním krokem návrhu je výpočet ztrát na tranzistoru a případné chlazení. Odpor kanálu tranzistoru v sepnutém stavu je roven 50 m Ω . Ztrátový výkon byl určen podle vztahu 5.3.

$$P_{ZTR} = 2R_{DS}I^2 \quad (5.3)$$

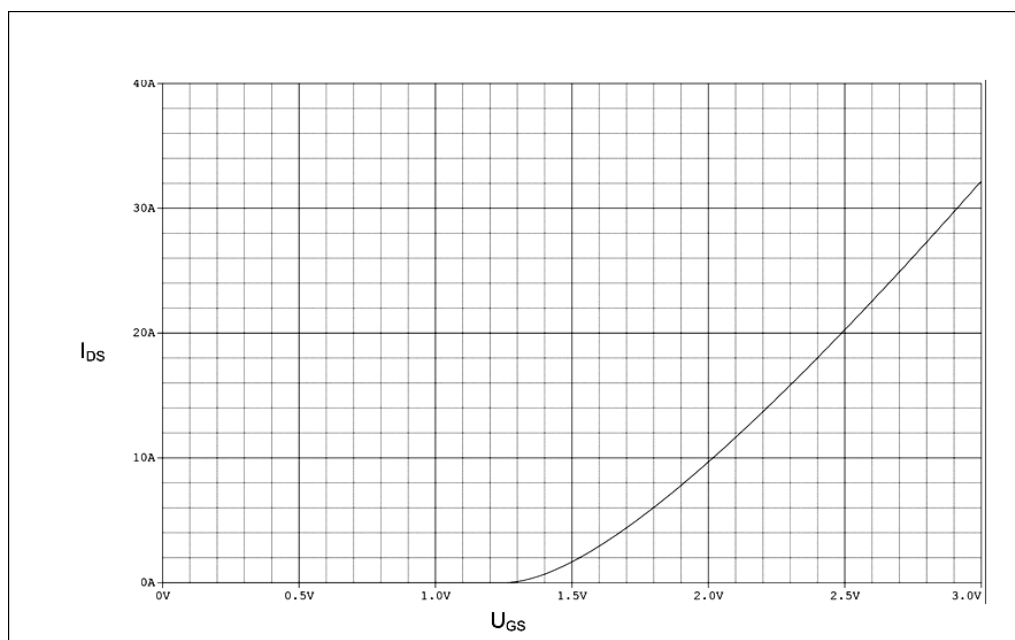
Celý vztah se násobí počtem tranzistorů v pouzdře Po dosazení za proud $I = 3$ A dostaneme:

$$P_{ZTR} = 2 * 0,05 * 3^2 = 900mW$$

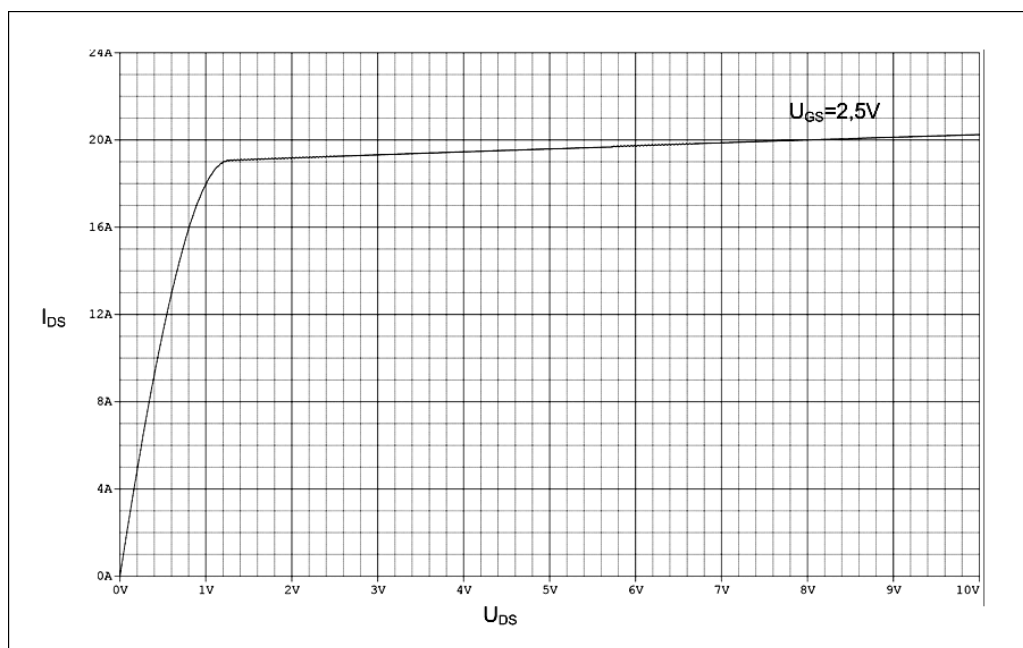
Při maximálním zatížení je předpokládán odběr na výstupu do 1 A. Katalogový list udává maximální výkonové zatížení 2 W. Při uvažování předpokládaného odběru proudu (1 A) je ztrátový výkon pouhých 100 mW. Další ztráty jsou přepínací, ale ty výrazně závisí na kmitočtu spínání a v tomto případě jsou zanedbatelné. Při ověření nutnosti chlazení se došlo k závěru, že se tranzistor ani při plném zatížení nedostane na kritickou teplotu. Výsledné parametry návrhu jsou shrnuty v tabulce 11.

Tabulka 11: Parametry spínacího tranzistoru

Napěťový dělič		Tranzistor				
R ₁ , R ₂	I _R	R _{DS}	I _{OUTMAX}	P _{ZTRMAX}	U _{DSMAX}	U _{GS}
1 MΩ	2,5 μA	0,05 Ω	3 A	900 mW	20 V	2,5 V



Obrázek 21: Převodní charakteristika



Obrázek 22: Výstupní charakteristika

4.1.10 Návrh desek plošných spojů

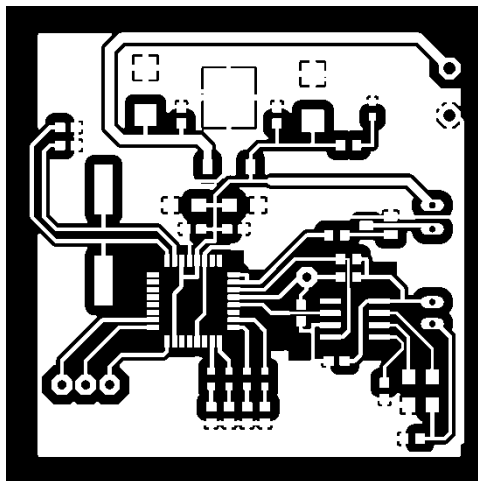
Při návrhu DPS byla dodržena obecná doporučení podle [5], [6] a [7], především snaha o vedení co nejkratších spojů a omezení zemních smyček. Byly navrženy blokové kondenzátory s dostatečnou rezervou, a to jak lokální tak i skupinové pro mikrokontroler. Pasivní prvky byly zvoleny pro povrchovou montáž ve velikosti 0603. Toto opatření se týkalo především návrhu DPS v modelu vlakové soupravy z důvodu omezeného prostoru. Následně byly stejné součástky použity i u ostatních DPS. Důvodem bylo snížení výrobních nákladů, proto bylo navrženo použití součástek se shodnými parametry. Všechny součástky byly vybírány podle katalogových listů výrobce. Elektrolytické kondenzátory byly voleny v pouzdře velikosti A. Na řídicí desce jsou použity i pouzdra B a C, což je dáno požadavkem vyššího provozního napětí.

Použité odpory jsou rovněž velikosti 0603. Odpory se vybíraly podle dostupnosti dané hodnoty. Výkonové zatížení je pro tuto velikost pouzdra standardně 0,1 W. Z toho vyplývá, že se současným trendem snižování rozměrů součástek musí následovat i snižování spotřeby integrovaných obvodů i celých aplikací. Dále je zřejmé, že výkonové obvody miniaturizace nejsou schopné.

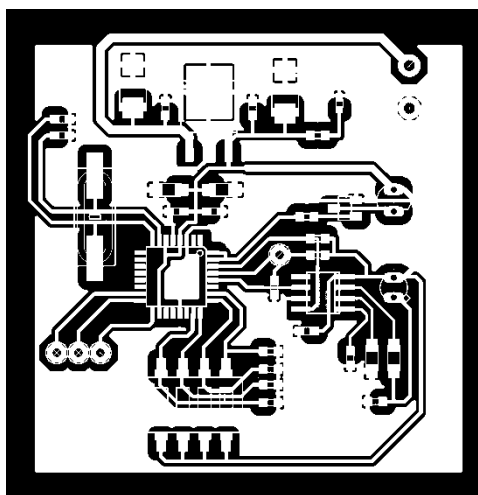
Návrh DPS pro model vláčku byl limitován prostorem, proto byla snaha o použití co nejmenšího počtu součástek a také volit součástky s minimálními rozměry. Deska je oboustranná. Na spodní straně desky je umístěný h-můstek k regulaci rychlosti jízdy vláčku

(jediná součástka pracující s napájecím napětím) a stabilizátor. Na vrchní straně je rozvod napětí 5 V. Tím jsou obě části oddělené. Toto řešení bylo zvoleno, aby proud procházející motorkem neovlivňoval řídicí část systému. Na desce jsou navrženy dva otvory pro přívod napájecího napětí z kolejí a další dva pro napájení motorku (výstup h-můstku).

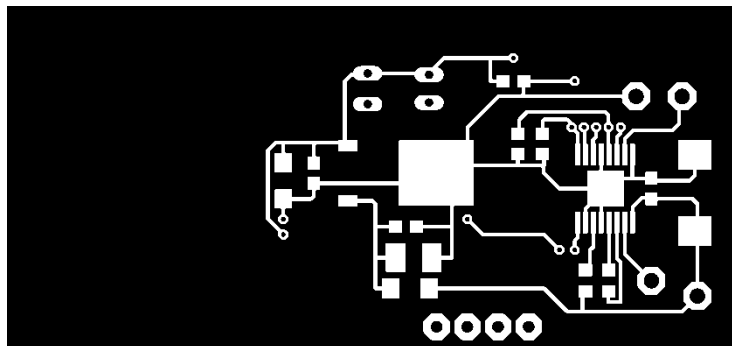
Zvětšené motivy navržených DPS jsou znázorněny na následujících obrázcích.



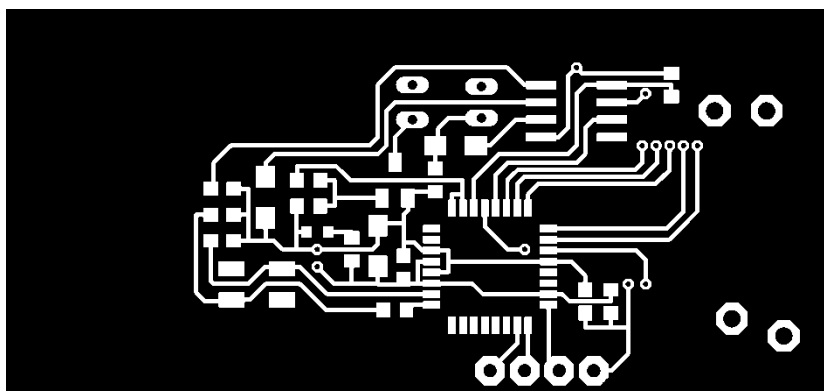
Obrázek 23: Motiv DPS vývojového modulu - Přijímač



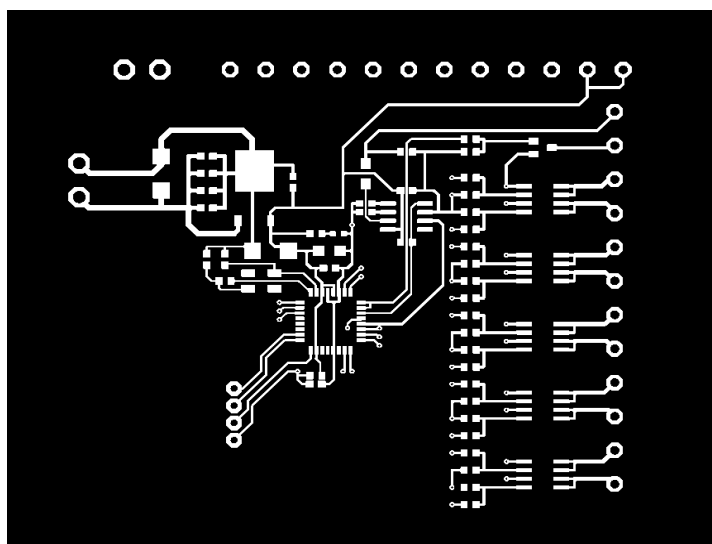
Obrázek 24: Motiv DPS vývojového modulu - Vysílač



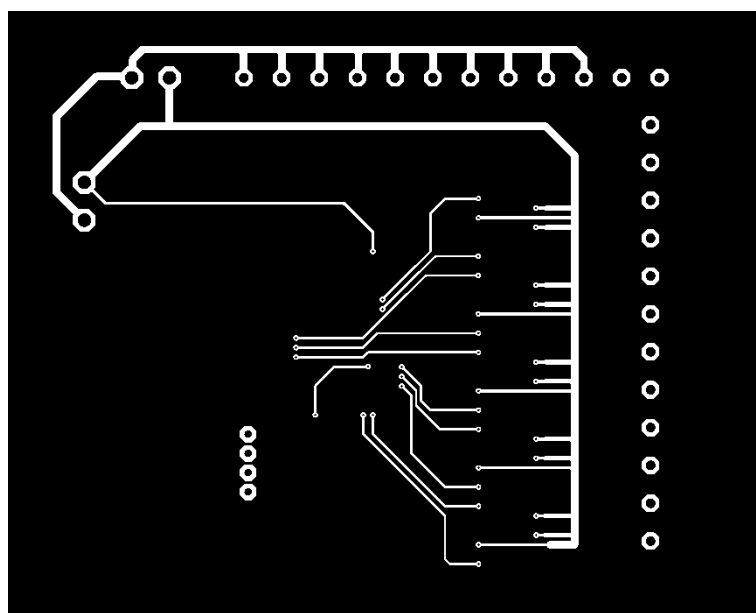
Obrázek 25: Motiv DPS Vláček – BOTTOM



Obrázek 26: Motiv DPS Vláček – TOP



Obrázek 27: Motiv DPS Řídící deska – TOP



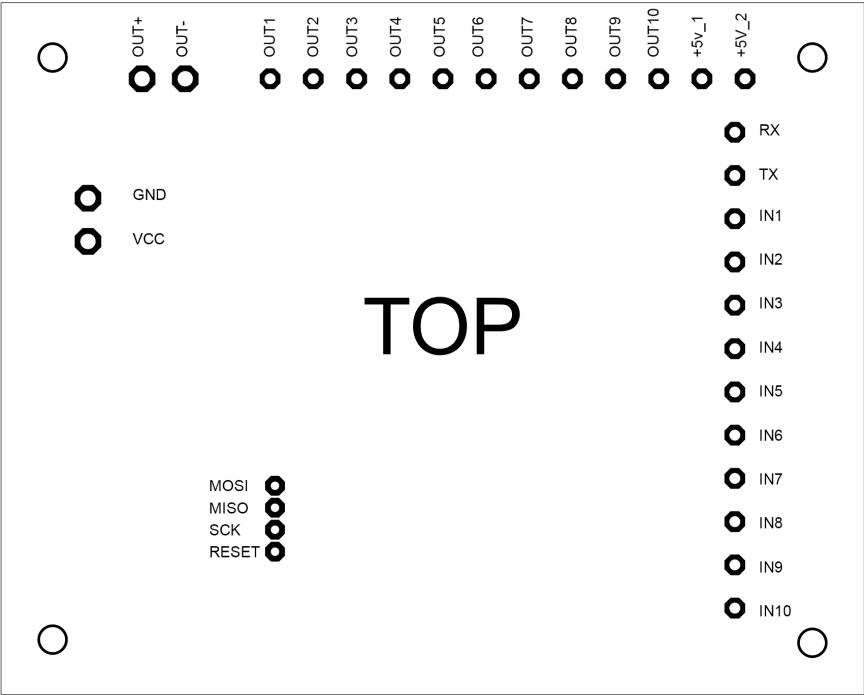
Obrázek 28: Motiv DPS Řídící deska - BOTTOM

4.1.11 Řídící deska

Z důvodu použití k návrhu DPS omezené verze programu EAGLE, je výsledná deska pouze oboustranná. Podle mého názoru by bylo výhodnější použití vícevrstvé DPS s vrstvami napájení +5V a řídicí část, napájení +12V, GND a signálová vrstva.

Na desce jsou připraveny otvory pro konektory s roztečí 5 mm s otvory o průměru 1,8 mm určenými pro konektory použité k napájení celé řídicí desky a jako výstupní konektory pro napájení kolejiště (OUT+ a OUT-). Dále otvory o průměru 1,3 mm, sloužící pro montáž konektorů určených pro napájení obslužných zařízení kolejiště (vyhybky, návěstidla), celkem deset (OUT1 – OUT10) a stejný počet pro jejich ovládání (IN1 – IN10). Ke konektorům IN1 – IN10 jsou připojeny spínací tranzistory, které je sepnutím připojí na GND. Dále jsou použity dva napájecí konektory +5V, které slouží pro napájení vysílacích IR LED diod a přijímacích fototranzistorů a dva konektory, které slouží pro připojení vysílacího a přijímacího signálu (TX a RX). Zde bych chtěl upozornit, že výstupy RX a TX slouží výhradně pro vysílání a příjem řídicích signálů. Není přípustné je připojovat k jiným zařízením. Poslední čtyři otvory s roztečí 2,54 mm a průměrem otvoru 1 mm slouží pro programování mikroprocesoru a jsou umístěny v jeho těsné blízkosti. Rozmístění vývodů

na řídicí desce je znázorněno na obrázku 29. Vlastnosti jednotlivých konektorů jsou shrnuty v tabulce 12.



Obrázek 29: Rozmístění vývodů

Tabulka 12: Parametry vstupů a výstupů

Konektor	Vstup/výstup	Vstupní/výstupní napětí	Vstupní/výstupní proud	Počet
VCC	Výstup	12V	-	1
OUT+	Výstup	12V	-	1
OUT1 – OUT 10	Výstup	12V	3A	10
+5V	Výstup	+5V	1,2 A	2
IN1 – IN10	Vstup	12V	3A	10
RX	Vstup	+5V	V jednotkách μA	1
TX	Výstup	0,2V	1,2A	1

4.2 Software

K naprogramování mikrokontroleru Atmega8 bylo využito vývojové prostředí Atmel Studio 6.1 a programátor AVR Dragon.

Za úkol bylo naprogramovat dva mikrokontrolery vzájemně spolu komunikující. Jeden umístěný v modelu vlakové soupravy, který přijatá data vyhodnocuje a na jejich základě řídí směr a rychlost jízdy modelu vlakové soupravy.

4.3 Přenos dat

Celý systém přenosu je navržen jako sériový, asynchronní, half duplex. Tomu odpovídá využití periférií UART mikrokontroleru Atmega8.

Přenos dat mezi jedním vysílačem a několika přijímači v modelech vlakových souprav je řešen přidělením adres přijímačům. Adresy mohou být až osmibitové. Tomu odpovídá použití až 255 přijímačů. Nemusí se přitom jednat pouze o modely lokomotiv, ale o přídatné příslušenství modelu železnice. Při přenosu dat je použito sedmi bitů jako datových a osmý bit signalizuje vysílání adresy přijímače. Pokud je osmý bit v logické jedničce, znamená to, že další přijatá data budou určovat adresu přijímače, se kterým chce vysílač komunikovat.

Logická nula v osmém bitu naznačuje, že jsou data určena pouze pro přijímač, kterému patřila posledně vysílaná adresa.

Program pro komunikaci přes UART psaný v jazyce C je rozdělen do několika funkcí. První funkce inicializuje samotný UART, druhá funkce řídí příjem dat přes UART, třetí funkce odesílá data přes UART a čtvrtá funkce vyhodnocuje přijatá data přes UART, porovnává je s přidělenou adresou je li to vyžádáno logickou jedničkou v osmém bitu a následně provádí příslušnou činnost na základě přijatých dat nebo volá další funkci.

Tabulka 13 znázorňuje inicializaci UARTu nastavením registru UCSRC a popisuje formát přenášených dat. Přenosová rychlost je 2400 b/s a hodinový signál je generován interním RC oscilátorem o hodnotě 2 MHz.

Z tabulky je patrné, že je přenášeno osm datových bitů. Tyto bity přenášejí zakódovanou informaci o rychlosti a směru jízdy modelu vlakové soupravy. Kódování informace je popsáno v následující kapitole.

Jelikož je celý systém realizován pouze na nepájivém poli, určuje vysílací data přepínač připojený k PORTu D vysílacího mikrokontroleru.

Tabulka 13: Nastavení registru UCSRC

Název bitu		Hodnota bitu		Formát přenosu dat
UMSEL		0		Asynchronní přenos
UPM1	UPM0	0	0	Bez paritního bitu
USBS		0		Jeden stop bit
UCSZ1	UCSZ0	1	1	Osm datových bitů

4.3.1 Vyhodnocení a formát příchozích dat

Tabulka 14 znázorňuje formát příchozích dat a význam jednotlivých bitů. Hodnoty datových bitů se detekují podmínkou logického součinu AND v podmínce if a na základě vyhodnocení podmínky je provedena daná činnost.

Tabulka 14: Formát příchozích dat

Číslo bitu	7	6	5	4	3	2	1	0
Význam	A	0	1	S	R	R	R	R

A - Signalizace příchodu adresy přijímače (Log 1)

S - Směr jízdy (log 1 – jízda vpřed, log 0 – jízda vzad)

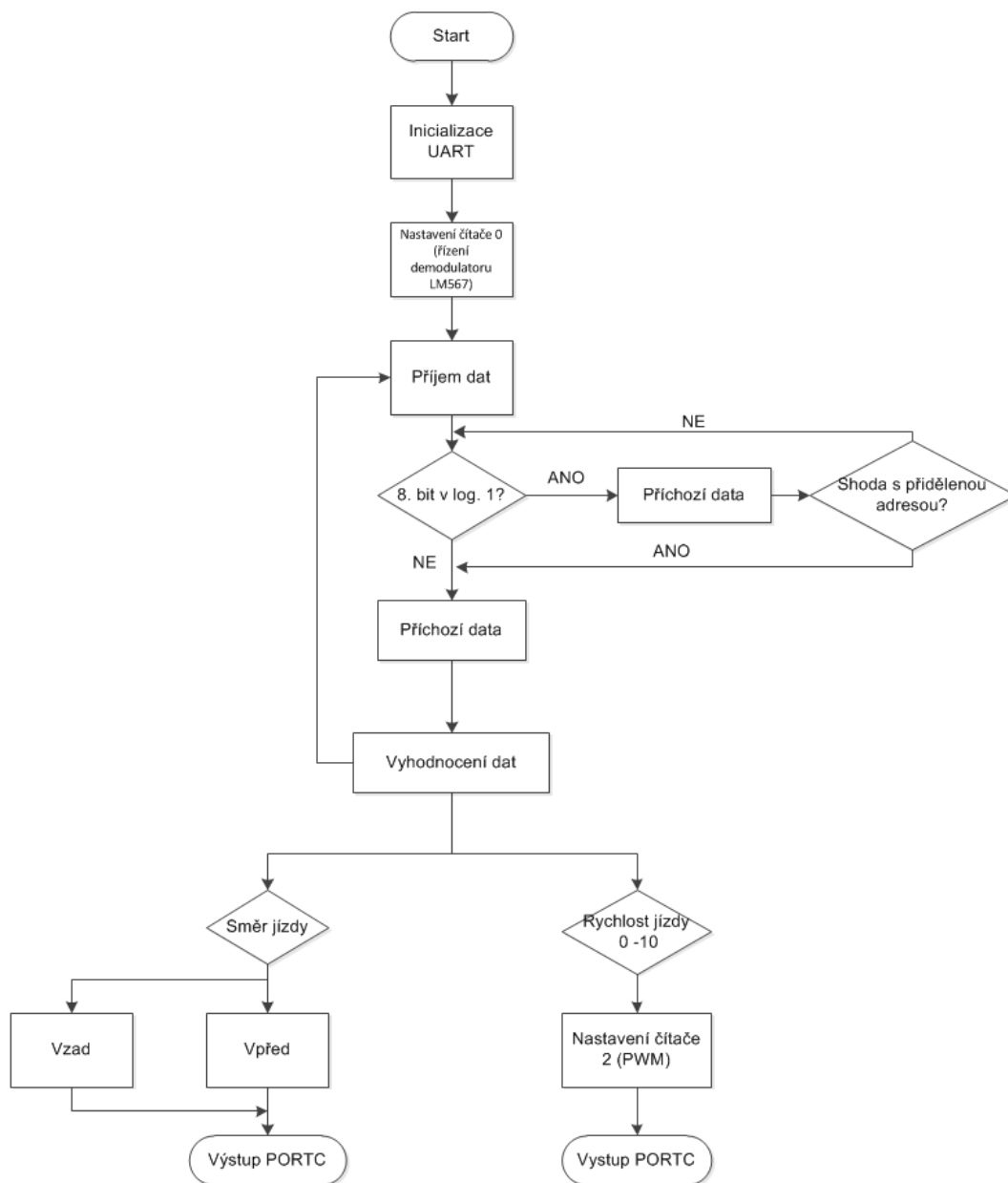
R - Kódování rychlosti jízdy (stupeň jízdy 1 - 10)

4.3.2 Kódování rychlosti

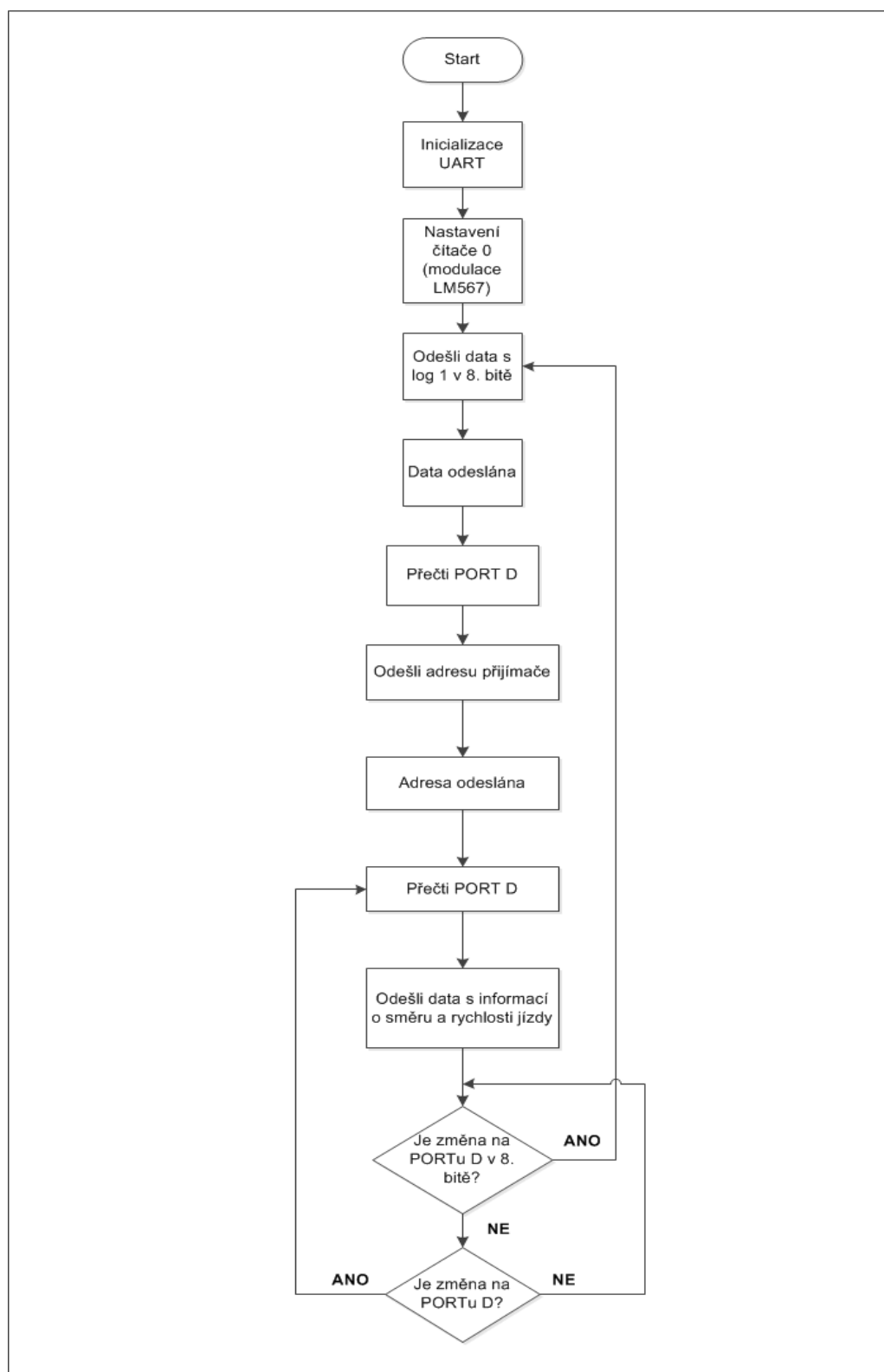
Rychlost se reguluje pulsně šířkovou modulací PWM (Pulse Width Modulation). PWM modulace je generována čítačem/časovačem2 mikrokontroleru Atmega8. Vyhodnocení příchozích dat, podle kterých se nastavuje střída je znázorněno v tabulce 15. Dále je znázorněno nastavení porovnávacího registru OCR2.

Tabulka 15: Kódování PWM modulace

S [%]	Kódování	OCR2
0	0000	0
10	0001	26
20	0010	51
30	0011	77
40	0100	102
50	0101	128
60	0110	154
70	0111	179
80	1000	205
90	1001	230
100	1010	256



Obrázek 30: Vývojový diagram vyhodnocení přijatých dat přes UART mikrokontrolerem



Obrázek 31: Vývojový diagram vysílání dat přes UART vysílacím mikrokontrolerem

5. Závěr

V práci je popsán podrobný postup návrhu jednotlivých součástí modelu vlakového kolejiště. Hardware i software. Podrobná schémata zapojení jsou uvedeny v přílohách.

Protože nedošlo z finančního hlediska k realizaci navržených desek plošných spojů, je systém přenosu informace mezi mikrokontrolery realizován na nepájivém poli. Vysílací mikrokontroler je naprogramován tak, aby četl hodnoty na vstupním portu D a tyto data následně odesílal pomocí periferního obvodu UART. Přijímací mikrokontroler je naprogramován tak, aby přijatá data vyhodnotil a na základě toho nastavil výstupní port C. K regulaci rychlosti jízdy modelu vlakové soupravy je využito PWM modulace, proto Mikrokontroler na základě vyhodnocení přijatých dat nastavuje požadovanou střídu PWM signálu, což se projevuje na svitu indukující LED diody.

Jelikož je systém realizován na nepájivém poli, neproběhne vždy přenos dat mezi mikrokontrolery bez chyby. Toto je pravděpodobně způsobeno nedokonalým kontaktem mezi přenosovým vodičem a vývodu mikrokontroleru.

Při testování celého systému bylo zjištěno, že navržený způsob modulace a demodulace, který používá integrovaný obvod LM567 jako demodulátor neplní předpokládanou funkci. Problém nastává při přenosu neperiodických signálů, na což nebyl integrovaný obvod testován. Otestování proběhlo pouze s periodickým signálem, tedy integrovaný obvod plnil požadovanou funkci správně. Protože integrovaný obvod LM567 na výstup přenáší signál se stejným kmitočtem jako je kmitočet vnitřního oscilátoru, tedy kmitočet generovaný mikrokontrolerem. Tento signál bude vždy periodický, kdežto přichází signál aperiodický. Proto není možné přichází signál demodulovat a přenést na výstup integrovaného obvodu, tedy na vstup RX mikrokontroleru

Přenos řídicího signálu probíhá prostřednictvím infračerveného záření. Tohoto řešení se u podobných modelů často používá. V modelu vláčku je umístěn pouze jeden fotocitlivý prvek, který slouží pro příjem signálu, což je jedna z hlavních nevýhod řešení. Mohou totiž nastat okamžiky, kdy zpráva od řídicího členu, například příkaz k rozjetí, zastavení, zrychlení nebo ke zpomalení, nebude modelem vláčku přijata z důvodu odstíněných míst na trati. Tento nedostatek je třeba zohlednit při stavbě modelu železnice.

6. Seznam použitých zdrojů:

- [1] DCC standard: popis. Modelová železnice a digitální řízení [online]. [cit. 2013-08-14]. Dostupné z: http://www.mtbbus.cz/dcc/dcc_doc.htm
- [2] FOROUZAN, Behrouz. *Introduction to Data Communications and Networking*. 1st Ed. Boston: WCB/McGraw-Hill, 1998, 714 s. ISBN 0-07-115710-7.
- [3] PINKER, Jiří. *Mikroprocesory a mikropočítače*. 1. vyd., 1. dot. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 159 s. ISBN 978-80-7300-110-0.
- [4] HALLIDAY, David et al. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: Vutium, 2000, viii s., s. 330-576, příl. ISBN 80-214-1868-0.
- [5] ŠAUFL, Jan Šaufl. PŘESTAVNÍKY VÝMĚN PRO MODELOVOU ŽELEZNICI. In: [online]. [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://modelyh0.com/tema/h0_prest.pdf
- [6] ZÁHLAVA, Vít. *Metodika návrhu plošných spojů*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 2000, 81 s. ISBN 80-01-02193-9.
- [7] ABEL, Martin. *Plošné spoje se SMD: návrh a konstrukce*. Pardubice: Nakladatelství Platan, 2000, 218 s. ISBN 80-902733-2-7.
- [8] ŠANDERA, Josef. *Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 270 s. ISBN 80-7300-181-0.
- [9] PLÍVA, Zdeněk. *EAGLE prakticky: řešení problémů při běžné práci*. Vyd. 1. Praha: BEN, 2007, 181 s. ISBN 978-80-7300-227-5.
- [10] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: začínáme se signály*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 271 s. ISBN 80-7300-200-0.
- [11] National Semiconductor. LM567/LM567C.1999. 8 s. [online]. Datasheet. [cit. 2013-05-01] Dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/955/955-009/dsh.955-009.1.pdf>
- [12] Kingbright. L-932P3BT. 3 s. [online]. Datasheet. [cit. 2013-04-24] Dostupné z WWW: http://www.sos.sk/a_info/resource/pdf/king/l932p.pdf
- [13] Texas Instruments. DRV8800. 2012. 27 s. [online]. Datasheet. [cit. 2013-5-05] dostupné z WWW: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8800.pdf>
- [14] Opto Semiconductors. SFH 409-2. 2003. 5 s. [online]. Datasheet. [cit. 2013-4-16] dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/511/511-400/dsh.511-400.1.pdf>

- [15] Para Light Electronics. L-C191KRCT. 2009. 14 s. [online]. Datasheet. [cit. 2013-4-16] dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/960/960-269/dsh.960-269.1.pdf>
- [16] Cosmo Electronic Corporation. KL191YGX. 2004. 9 s. [online]. Datasheet. [cit 2013-4-16] dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/960/960-035/dsh.960-035.1.pdf>
- [17] International Rectifier. IRF7301. [online]. Datasheet. [cit. 2013-05-04] dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/213/213-156/dsh.213-156.1.pdf>
- [18] Philips Semiconductors. BC817.1997. 8 s. [online]. Datasheet. [cit. 2013-4-16] dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/912/912-005/dsh.912-005.1.pdf>
- [19] Fairchild Semiconductor. KA7805. 2001. 29 s. [online]. Datasheet. [cit. 2013-4-29] dostupné z WWW:
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/K/A/7/8/KA78XX.shtml
- [20] Atmel. ATmega8. 2013. 331 s. [online]. Datasheet. [cit. 2013-04-01] dostupné z WWW: http://www.atmel.com/Images/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_datasheet.pdf
- [21] Euro Quartz. MJ Crystal. [online]. Datasheet. [cit. 2013-05-25] dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/970/970-053/dsh.970-053.1.pdf>
- [22] International Rectifier. IRLML2402. 2005. 8 s. [online] Datasheet. [cit. 2013-05-25] dostupné z WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/915/915-137/dsh.915-137.1.pdf>

7. Seznam obrázků, tabulek a příloh

Seznam obrázků:

Obrázek 1: Náčrt jednoduchého kolejiště.....	7
Obrázek 2: Podrobný návrh modelového kolejiště.....	8
Obrázek 3: Blokové schéma systému DCC	9
Obrázek 4: Kmitočtová pásma	15
Obrázek 5: Šířka pásma [2].....	16
Obrázek 6: FSK modulace.....	16
Obrázek 7: Blokové schéma IO LM567.....	17
Obrázek 8: Destruktivní interference.....	19
Obrázek 9: Částečná interference.....	20
Obrázek 10: Konstruktivní interference.....	20
Obrázek 11: Blokové schéma navrženého systému	22
Obrázek 12: Komunikace řídící desky s modely vlakových souprav	25
Obrázek 13: Schéma zapojení IO LM567 určeného k demodulaci přijímaného signálu fototranzistorem a následné vyhodnocení mikrokontrolerem	26
Obrázek 14: Schéma zapojení fototranzistoru pro zjištění jeho VA charakteristiky.....	27
Obrázek 15: VA charakteristika fototranzistoru pro vzdálenost od IR LED diody 0,6 m a 1,5 m	28
Obrázek 16: Zapojení IR LED diody.....	28
Obrázek 17: Výstupní charakteristika tranzistoru IRLML2402	30
Obrázek 18: Převodní charakteristika tranzistoru IRLML2402.....	30
Obrázek 19: Schéma zapojení H-můstku a mikrokontroleru	32
Obrázek 20: H-můstek.....	33
Obrázek 21: Převodní charakteristika	36
Obrázek 22: Výstupní charakteristika	37
Obrázek 23: Motiv DPS vývojového modulu - Přijímač.....	38
Obrázek 24: Motiv DPS vývojového modulu - Vysílač.....	38
Obrázek 25: Motiv DPS Vláček – BOTTOM.....	39
Obrázek 26: Motiv DPS Vláček – TOP.....	39
Obrázek 27: Motiv DPS Řídící deska – TOP	39
Obrázek 28: Motiv DPS Řídící deska - BOTTOM	40
Obrázek 29: Rozmístění vývodů	41
Obrázek 30: Vývojový diagram vyhodnocení přijatých dat přes UART mikrokontrolerem	46
Obrázek 31: Vývojový diagram vysíní dat přes UART vysílacím mikrokontrolerem	47

Seznam tabulek

Tabulka 1: Paket přenášených dat	11
Tabulka 2: Paket signalizující reset.....	11
Tabulka 3: Paket signalizující neaktivní paket IDLE	11
Tabulka 4: Typy přenosových kabelů	14
Tabulka 5: Příklady použití kmitočtových pásem	14
Tabulka 6: Druh interference odpovídající fázovému rozdílu	19
Tabulka 7: Naměřené hodnoty fototranzistoru při zjišťování VA charakteristiky.....	27
Tabulka 8: Parametry tranzistoru IRLML2402.....	31
Tabulka 9: Doporučené hodnoty komunikačních kmitočtů	31
Tabulka 10: Pravdivostní tabulka	34
Tabulka 11: Parametry spínacího tranzistoru	36
Tabulka 12: Parametry vstupů a výstupů.....	42
Tabulka 13: Nastavení registru UCSRC.....	43
Tabulka 14: Formát příchozích dat.....	44
Tabulka 15: Kódování PWM modulace	45

Seznam příloh

Příloha 1: Schéma zapojení Řídící desky
Příloha 2: Schéma zapojení Vláčku
Příloha 3: Schéma zapojení Vývojového modulu – Vysílač
Příloha 4: Schéma zapojení Vývojového modulu – Přijímač
Příloha 5: Schéma zapojení Vysílačích IR LED diod
Příloha 6: Schéma zapojení Přijímacích fototranzistorů

8. Seznam symbolů a zkratek

GND	Nulový potenciál	
I_{DS}	Proud kanálem tranzistoru MOS	A
k	Úhlový vlnočet	Rad
P_{ZTR}	Ztrátový výkon	W
R_{DS}	Odpor kanálu tranzistoru MOS	Ω
U_{DS}	Napětí drain – source u tranzistoru MOS	V
U_{GS}	Napětí gate – source u tranzistoru MOS	V
VCC	Napájecí napětí	V
φ	Fázový posun	°
ω	Úhlový kmitočet	Rad
DCC	DCC (Digital Command Control)	
DPS	Deska plošných spojů	
DV	Dlouhé vlny	
EKV	Extra krátké vlny	
FSK	Frequency Shift Keying, frekvenční klíčová modulace	
IR LED	Infračervená LED dioda	
KV	Krátké vlny	
NMOS	Tranzistor řízený polem	
PWM	Pulse Width Modulation, pulzní šířková modulace	
SKV	Super krátké vlny	

SMD	Součástky pro povrchovou montáž
STP	Shielded Twisted Pair, stíněná kroucená dvojlinka
SV	Střední vlny
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, univerzální asynchronní přijímač/vysílač
UKV	Ultra krátké vlny
UTP	Unshielded Twisted Pair, nestíněná kroucená dvojlinka
VDV	Velmi dlouhé vlny
VKV	Velmi krátké vlny