

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Řízení modelu lokomotivy

Praha, 2008

Autor: Martin Hönic

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou (bakalářskou) práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 10.7.2008

M. Honěk

podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Radkovi Šindelářovi za vedení bakalářské práce a Ing. Martinu Lesovi za možnost práce na daném tématu. Dále bych rád poděkoval všem ostatním, kteří mě během práce podpořili konzultací, radou, či jakýmkoliv jiným způsobem.

Abstrakt

Cílem této práce je analýza problému řízení modelové lokomotivy při nízkých rychlostech. Úloha regulace navazuje na (PAVLÍŠTA, D., 2007). Měření rychlosti se provádí pomocí inkrementálního čidla. Nově bude zkoumána možnost snímání a regulace rychlosti pomocí měření zpětně indukovaného napětí na motoru. Základní hardwarová realizace využívající procesor Atmel ATMega8 byla zachována. Zapojení bylo upraveno pro potřeby snímání zpětného indukovaného napětí motoru. Práce by měla zhodnotit výhody a nevýhody obou metod snímání rychlosti a pomoci při rozhodnutí o budoucím finálním provedení hardwaru a regulace.

Abstract

Objective of this bachelor thesis is analysis of trouble with control of model locomotive at low velocities. Problem of regulation is continuing of (PAVLIŠTA, D., 2007). Measuring of speed is implemented by incremental sensor. As new feature there will be research of measuring and regulation based on measuring inducted backward voltage on motor. Basic hardware realisation using processor Atmel ATmega8 sustained. Circuits were customised for needs of measuring inducted backward voltage on motor. Thesis should discuss advantages and disadvantages of both methods measuring of speed and help to decide the final realisation of hardware and regulation.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Martin Hönig**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Řízení modelu lokomotivy**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte stávající řešení a analyzujte problém řízení modelu při nízkých rychlostech
2. Navrhněte a realizujte regulátor rychlosti založený na měření otáček motoru pomocí inkrementálního čidla
3. Navrhněte a realizujte regulátor rychlosti založený na měření BMF
4. Navrhněte koncový stupeň řídicího obvodu, tak aby umožňoval realizovat regulátor podle bodu 3.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Ing. Radek Šindelář, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009



prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry



Boris Šimák
doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 2. 2008
V

Obsah

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xi
1 Úvod	1
1.1 Motivace	1
1.2 Analýza současného stavu	2
1.3 Návrh řešení	2
2 Analýza	5
2.1 Nedostatky infračidla	5
2.2 Nedostatky budícího stupně	7
2.3 Souvislost zpětného indukovaného napětí a rychlosti	8
3 Realizace řešení	13
3.1 Zásahy do hardwarového řešení	13
3.1.1 Zvýšení přesnosti infračidla	13
3.1.2 Přeprogramování budícího stupně	14
3.1.3 Realizace snímání zpětného napětí na motoru	14
3.2 Návrh regulace	17
3.2.1 Regulace na bázi inkrementálního čidla	17
3.2.2 Regulace na bázi měření BEMF	19
4 Závěr	25
4.1 Experimenty	25
4.1.1 Regulace na bázi IR čidla	25
4.1.2 Regulace na bázi měření BEMF	29
4.2 Zhodnocení výsledků	32

Literatura	35
A Seznam použitého software	I
B Obsah přiloženého CD	III

Seznam obrázků

1.1	Blokové zobrazení elementů kolejiště	3
2.1	Graf zátěže procesoru v závislosti na frekvenci signálu z infračidla	6
2.2	Náhradní schema stejnosměrného motoru	8
2.3	Závislost generovaného zpětného napětí na otáčkách motoru	11
3.1	Konfigurace infračidla pro snímání otáček motoru	14
3.2	Schema zapojení budícího obvodu	15
3.3	Schema zapojení měřícího obvodu BEFM	16
3.4	Převodní char. střídý PWM signálu na počet přerušení za T_{reg}	18
3.5	Signál na vstupu rozdílového zesilovače, střída PWM 0,04	20
3.6	Signál na vstupu rozdílového zesilovače, střída PWM 0,6	21
3.7	Převodní charakteristika střídý PWM signály z čidel	23
3.8	Převodní charakteristika otáček motoru na hodnotu z AD převodníku	24
4.1	Obecný regulační pochod v celém spektru rychlostních stupňů	26
4.2	Obecný regulační pochod v na velmi pomalou rychlost	27
4.3	Regulační pochod při jízdě do stoupání rychlostí $59mm \cdot s^{-1}$	27
4.4	Regulační pochod při jízdě do stoupání rychlostí $86mm \cdot s^{-1}$	28
4.5	Obecný regulační pochod v celém spektru rychlostních stupňů	29
4.6	Obecný regulační pochod na velmi pomalou rychlost	30
4.7	Regulační pochod při jízdě do stoupání rychlostí $59mm \cdot s^{-1}$	31
4.8	Regulační pochod při jízdě do stoupání rychlostí $86mm \cdot s^{-1}$	31

Seznam tabulek

2.1	Tabulka zatížení procesoru přerušením	6
2.2	Tabulka měření závislosti zpětného napětí na otáčkách motoru	10
2.3	Tabulka měření závislosti zpětného napětí na otáčkách motoru	11

Kapitola 1

Úvod

1.1 Motivace

Modelová lokomotiva je provozována v rámci projektu dopravního sálu fakulty dopravní (FD) ČVUT. Dopravní sál se sestává z kolejiště o rozloze cca $60m^2$. Kolejiště obsahuje pět stanic a dvě skrytá odstavná seřadiště. Kolejiště je realizováno v měřítku 1:87, mezi modeláři označované jako H0. Na tomto kolejišti se demonstruje funkce zabezpečovacích systému používaných v reálném provozu. Jedná se o elektromechanický zabezpečovací systém (tzv. bubnový stroj), ovládací pult releového zabezpečovacího zařízení AŽD 71 (tlačítková volba) a nově zaváděné jednotné obslužné pracoviště dle základních technických požadavků ZTP 4 (elektronické stavědlo).

Lokomotivy pohybující se po kolejišti komunikují s centrálním serverem pomocí bezdrátové technologie Bluetooth. Centrální server má za úkol monitorovat pohyb souprav po kolejišti, zajišťovat rozestupy souprav, povolení vjezdu do úseků kolejiště. Centrální server dále předává soupravám povely pro výběr směru jízdy, rychlosti, popřípadě další specializované povely. Soupravy centrálnímu serveru zasílají informace o ujeté vzdálenosti, aktuální rychlosti a případně informace o zachycení kódu právě projetího bodu infrastruktury kolejiště. Tyto body jsou reprezentovány infračervenými (dále jen IR) vysílači na centrálnímu serveru známých místech infrastruktury.

Soupravy jsou vybaveny IR přijímači a zasílají kódy těchto bodů centrálnímu serveru. Regulaci nastavené rychlosti, udržování a předávání informace o ujeté vzdálenosti, předávání sejmutých kódů IR bodů z infrastruktury zajišťuje mikroprocesor v lokomotivě. Procesor pro komunikaci využívá Bluetooth modul, se kterým je spojen sériovou sběrnici TWI (I2C kompatibilní). Napájení z kolejiště se pohybuje v rozsahu 12–14V.

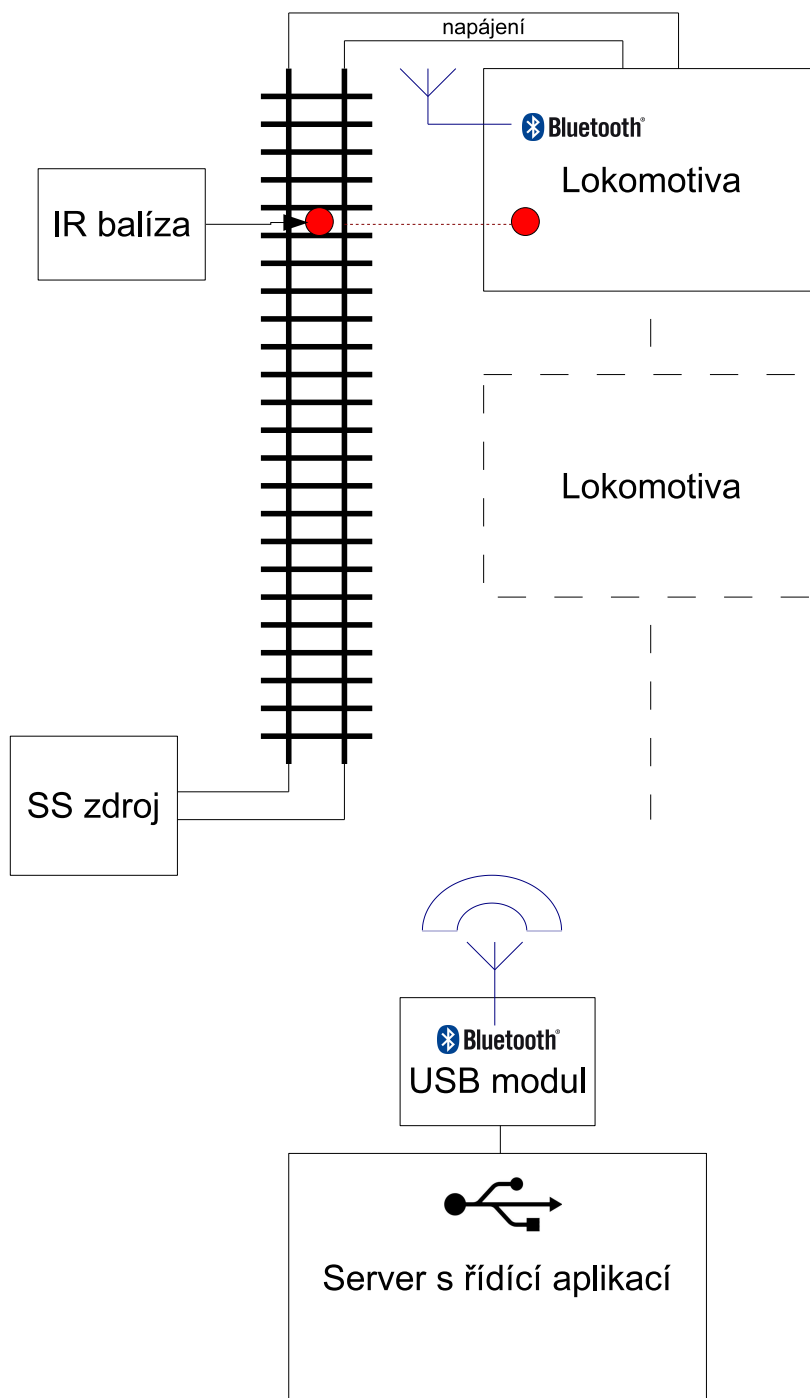
V soupravě je toto napětí usměrněno Grätzovým můstkem a používá se pro výkonový budič stejnosměrného (SS) motoru lokomotivy. Pro potřeby procesoru a další elektroniky je toto napětí stabilizováno na 5V.

1.2 Analýza současného stavu

Stávající řešení (viz. (PAVLIŠTA, D., 2007)) je realizováno pomocí mikroprocesoru Atmel ATmega8. Procesor získává informaci o rychlosti čítáním pulzů z infračidla. Toto infračidlo je namířeno na setrvačnick motoru, který je vybaven odrazovými značkami. Regulace otáček na tomto principu se ukázala jako neuspokojivá v oblasti nízkých rychlostí. Příčinou tohoto problému je pravděpodobně nedostatečná přesnost čidla, respektive nedostatečný počet impulzů načítaných infračidlem za dobu vzorkování.

1.3 Návrh řešení

Pro zlepšení regulačního pochodu je možno postupovat více způsoby. Je možno zvýšit přesnost čidla zvýšením počtu značek na setrvačnicku popřípadě použitím clonkového karuselu na osu motoru. Nebo je možno pokusit se získat informaci o rychlosti zcela jiným způsobem. V komerční oblasti se využívá regulace na principu měření zpětného indukovaného napětí na motoru. Pokusím se prozkoumat obě možnosti řešení, aby bylo možné zvolit vhodnější variantu pro budoucí použití.



Obrázek 1.1: Blokové zobrazení elementů kolejí

Kapitola 2

Analýza

2.1 Nedostatky infračidla

Pro zpřesnění měření rychlosti je možno zvýšit počet reflexních značek na setrvačnicku a tím zlepšit citlivost čidla na malé změny rychlosti. Pokud již nebude technicky možné zvětšit počet značek stávajícím nátěrem, lze použít fotoleptaných clonek připevněných na ose motoru.

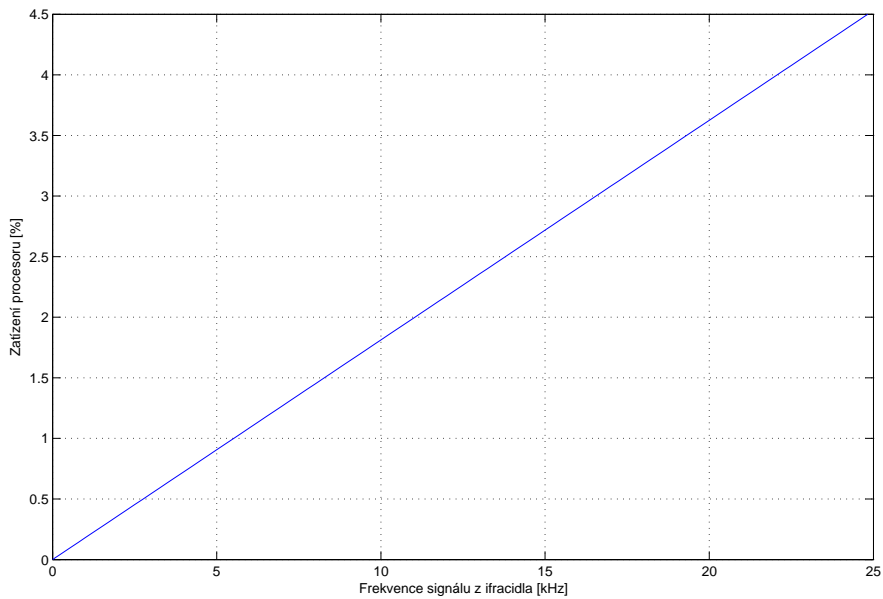
Stávající konfigurace infračidla pro snímání otáček dle (PAVLIŠTA, D., 2007) je realizována pomocí infrazávory namířené proti setrvačnicku, na kterém jsou po obvodu naneseny černou barvou čtyři značky, které kontrastují s původním kovovým povrchem setrvačnicku. Signál z infrazávory je tvarován pomocí komparátoru LM293 a je přiváděn na pin externího přerušení procesoru (/INT0). Procesor reaguje na každou změnu logické úrovně, čímž zdvojnásobuje citlivost čidla.

Je třeba zvážit jak zvýšení počtu značek na setrvačnicku zatíží procesor. Při maximální rychlosti dosahuje motor až 13 000 otáček za minutu (některé motory ale i 15 000 otáček za minutu). To znamená, že pokud jsou na setrvačnicku čtyři značky a procesor reaguje na vzestupnou i sestupnou hranu signálu, musí cca každých 5ms obsloužit přerušení. Přerušení samo o sobě pouze inkrementuje registr, ale volání tohoto přerušení má jistou režii. Pro ověření náročnosti této operace jsem provedl v (AVR studio odkaz) pomocí AVR simulátoru měření doby obsluhy přerušení. Simulátor ukázal, že operace inkrementace proměnné, tak jak ji přeložil z jazyka C překladač, trvá 5 strojových cyklů, režie přístupu a návratu z přerušení je 24 strojových cyklů. Simulátor ukazuje také uběhlý reálný čas, ale implicitně má nastaven takt procesoru 4MHz. Při tomto nastavení vykoná 4 instrukční cykly za 1μs. Snadným výpočtem lze odvodit, že tedy při použití

16MHz krystalu a celkové délce obsluhy přerušení 29 strojových cyklů dostáváme celkovou dobu obsluhy přerušení za $1,8125\mu s$. Zatížení procesoru čítáním přerušení v závislosti na frekvenci signálu z čidla udává tabulka 2.1.

Tabulka 2.1: Tabulka zatížení procesoru přerušením

četnost přerušení [Hz]	potřebný procesorový čas [%]
100	0,018
1100	0,199
2200	0,399
4400	0,797
8800	1,595
17600	3,190



Obrázek 2.1: Graf zátěže procesoru v závislosti na frekvenci signálu z infračidla

Z obr. 2.1 je zřejmé, že pro použitý procesor řady ATmega není přerušení od infračidla při současné realizaci velkou zátěží a stále bezpečně zbývá procesorový čas na ostatní operace. Při maximálním výkonu motoru bylo na vstupu procesoru signál o frekvenci $1,1KHz$ (čtyři značky na otáčku motoru). Při reakci na obě hrany tedy přerušení

spotřebovává přibližně 0,4% strojového času. Narůstání počtu značek na setrvačnicku je tedy možné, ale ne libovolné. Už při čtyřnásobném počtu značek (tedy šestnáct značek na otáčku motoru) přerušení spotřebuje obsluha 3,19% stojového času.

Mezi procesorem a čidlem dochází k tvarování signálu pomocí komparátoru LM293. Jeho reakční doba udaná katalogovým listem je $300ns$, takže toto omezení je méně striktní vzhledem ve srovnání se zvyšováním frekvence signálu z infračidla.

Zvýšení přesnosti tedy omezuje fyzická realizace většího počtu značek na setrvačnicku. Pokud bychom použili jinou technologii označování setrvačnicku, než ruční barvení, stejně bychom narazili na výkonovou náročnost obsluhy při maximálních rychlostech.

2.2 Nedostatky budícího stupně

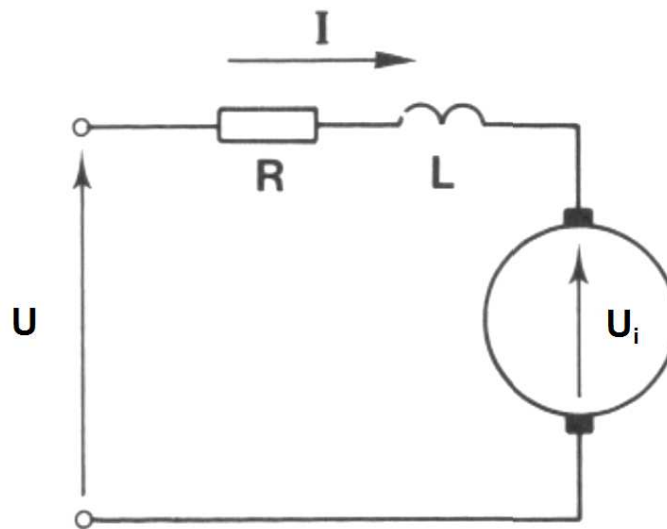
Doposud používaný budící obvod L293 byl připojen k procesoru pomocí dvou řídicích vodičů. Jednalo se o dva kanály PWM signálu. Interní logika vybírala, zda výstupní pin bude spojen se zemí nebo s napájecím napětím. Motor tak byl střídavě připojován mezi napájecí napětí a zem nebo oběma póly na zem. To způsobovalo zbytečně velký odběr proudu, protože motor byl střídavě napájen a zkratován, čímž docházelo k jeho střídavému roztáčení a nucenému brždění. Kromě nuceného brždění také zkratování svorek znemožňuje měření zpětně indukovaného napětí motorem. Budič L293 umožňuje galvanické oddělení výstupních svorek pomocí pinu EN (enabled - povoleno). Úprava zapojení mohla tento problém odstranit.

Druhým aspektem je otázka velikosti pouzdra. Budič L293 je dostupný v provedení DIP16 (dual in-line package) nebo SMD (surface mounted device) pouzdro v provedení SOIC16 (small outline integrated circuit). Cena SMD provedení je oproti DIL provedení téměř čtyřnásobná a také jeho dostupnost je horší. Aspekt velikosti se stal nakonec rozhodujícím, protože se naskytla možnost použít jiný budič v mnohem menším pouzdře SO8.

2.3 Souvislost zpětného indukovaného napětí a rychlosti

Při zkoumání možnosti regulace rychlosti na bázi měřeného zpětného napětí je třeba objasnit, jak souvisí toto naindukované napětí s otáčkami motoru. Následující úvahy vycházejí z (HUGHES, A., 1993).

Na 2.2 je znázorněn náhradní obvod stejnosměrného motoru.



Obrázek 2.2: Náhradní schema stejnosměrného motoru

Pro svorkové napětí U můžeme psát (2.1). Tento vztah platí pokud motor napájíme zdrojem napětí, tedy pokud je napětí na svorkách U větší, než zpětně indukované napětí U_i .

$$U = U_i + IR + L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

Ve chvíli měření napětí je však zdrojem v obvodu napětí U_i a proud I tedy teče opačně než na 2.2 a pro obvod lze psát rovnici (2.2).

$$U = U_i - IR - L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

Pokud motor není zatížen, tedy zatížení je způsobeno pouze jeho třením v ložiscích, je třeba pouze minimální kroutící moment pro udržení motoru v chodu. Pokud kroutící moment je přímo úměrný proudu vinutím (viz. (HUGHES, A., 1993, strana 86)), tak tento proud se bude blížit nule a pro ideální případ ho lze zanedbat. Nulový proud pak znamená, že napětí U_i je shodné s napětím U a (2.2) lze zjednodušit do tvaru (2.3).

$$U = U_i = K_E \Phi n \quad (2.3)$$

Vyjádřením otáček n z (2.3) dostáváme (2.4).

$$n = \frac{U}{K_E \Phi} \quad (2.4)$$

To znamená, že otáčky n jsou tedy přímo úměrné napětí U a nepřímo úměrné motorové konstantě K_E a magnetickému toku Φ . V ideálním případě tedy zpětně indukované napětí U_i závisí pouze na otáčkách n .

Při druhém přiblížení je však třeba zohlednit, že motor nebude pracovat bez zátěže. Pokud je motor zatěžován, je třeba pro udržení otáček zvýšit jeho kroutící moment. M v (2.5) je funkcí rádiusu rotoru a síly vyvozované elektromagnetickým polem.

$$M = rF = rBIl \quad (2.5)$$

Rádus je motorová konstanta, ale síla lze přepsat jako součin magnetického toku B , proudu vodičem I a délky vodiče l . Délka vodiče je pro nás také konstantou. Do rovnice (2.5) dosadíme za magnetický tok B a dostáváme (2.6).

$$M = r \frac{\Phi}{S} Il \quad (2.6)$$

Magnetická indukce je magnetický tok Φ na plochu S . Kroutící moment je tedy funkcí magnetického toku a proudu vodičem vinutí (v našem případě vinutím rotoru). Ostatní parametry lze zahrnout do motorové konstanty K_m , protože jsou dány fyzickou konstrukcí motoru.

$$M = K \Phi I \text{ kde } K = f \frac{rl}{S} \quad (2.7)$$

Magnetický tok v motoru s permanentním magnetem se vtať (2.7) ještě zjednodušuje, protože permanentní magnet vytváří konstantní magnetický tok, a Φ se tedy nahradit citlivostní konstantou. Stále však zůstává kroutící moment funkcí proudu vinutím I .

Pokud tedy dojde k zatížení motoru, tak je třeba zvýšit proud vinutím, svorkové napětí je pro nás neměnné a zvýšený přísun energie je ovládán střídou PWM signálu. Ve stavu vysoké impedance však zatěžujeme motor v režimu generátoru konstantní zátěží, která odpovídá zátěži na svorkách motoru. Ve stavu vysoké impedance je však na svorkách motoru jen měřicí obvod a ten zatěžuje motor konstantní odporovou zátěží. Generované zpětné napětí je tedy přímo úměrné otáčkám motoru. Toto tvrzení je podpořeno i měřeními.

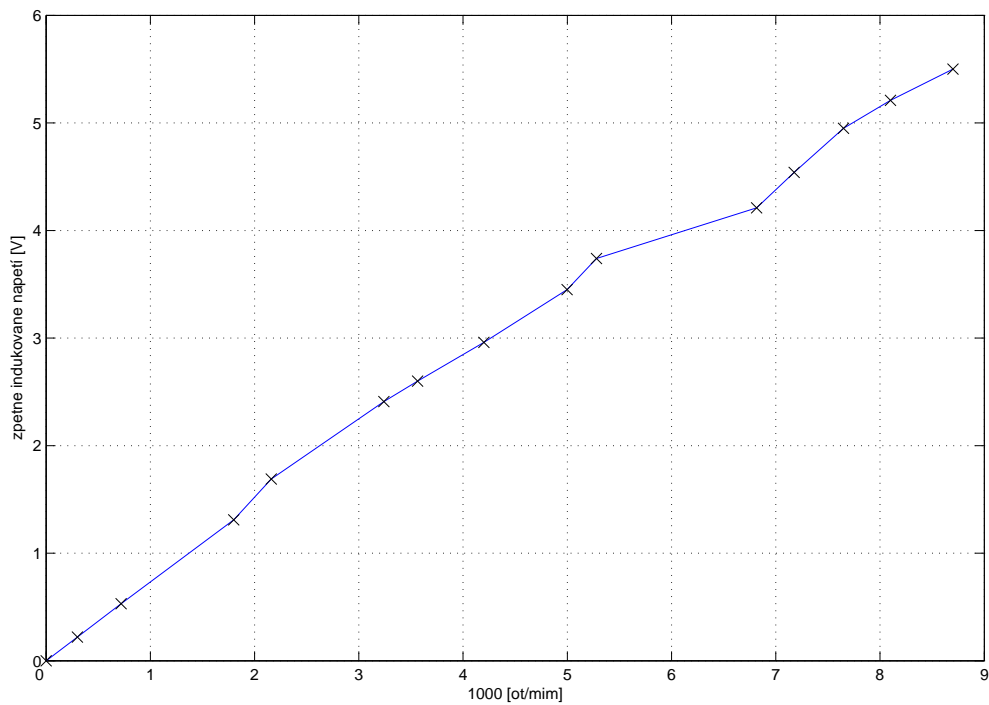
Měření bylo prováděno s dvěma motory spojenými kardanem. Jeden motor roztáčel soustavu a na druhém bylo měřeno zpětně generované napětí. Otáčky jsou odvozeny z infračidla na roztáčeném motoru, který byl vyjmut z lokomotivy. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 2.2 a následně vyneseny do grafu na obr. 2.3

Tabulka 2.2: Tabulka měření závislosti zpětného napětí na otáčkách motoru

frekvence signálu z IR čidla [Hz]	otáčky motoru [ot · min ⁻¹]	zpětně generované napětí [V]
50	300	0,22
120	720	0,53
300	1800	1,31
360	2160	1,69
540	3240	2,41
594	3564	2,6
700	4200	2,96
833	4998	3,45
880	5280	3,74
1136	6816	4,21
1196	7176	4,54
1275	7650	4,95
1350	8100	5,21
1450	8700	5,5

Pro ověření nezávislosti zpětně generovaného napětí na zatížení motoru bylo provedeno ještě další měření s různým zatížením motoru a shodných otáčkách. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 2.3

Na motoru bylo uskutečněno ještě měření na samostatném motoru buzeném PWM



Obrázek 2.3: Závislost generovaného zpětného napětí na otáčkách motoru

Tabulka 2.3: Tabulka měření závislosti zpětného napětí na otáčkách motoru

otáčky motoru [$ot \cdot min^{-1}$]	zpětně generované napětí [V]	střída PWM [-]
4800	2,56	0,12
4800	2,56	0,18
4800	2,56	0,22
7800	5,2	0,20
7800	5,2	0,33

signálem. Osciloskopem bylo snímána ustálená hodnota zpětně generovaného napětí při shodných otáčkách a měnící se zátěži. Opět se ukázalo, že ustálená hodnota zpětně indukovaného napětí je pro shodné otáčky motoru také shodná. Rozdílná zátěž se projevowała v amplitudě a délce trvání přechodového jevu, který nastává při odepínání motoru do stavu vysoké impedance.

Kapitola 3

Realizace řešení

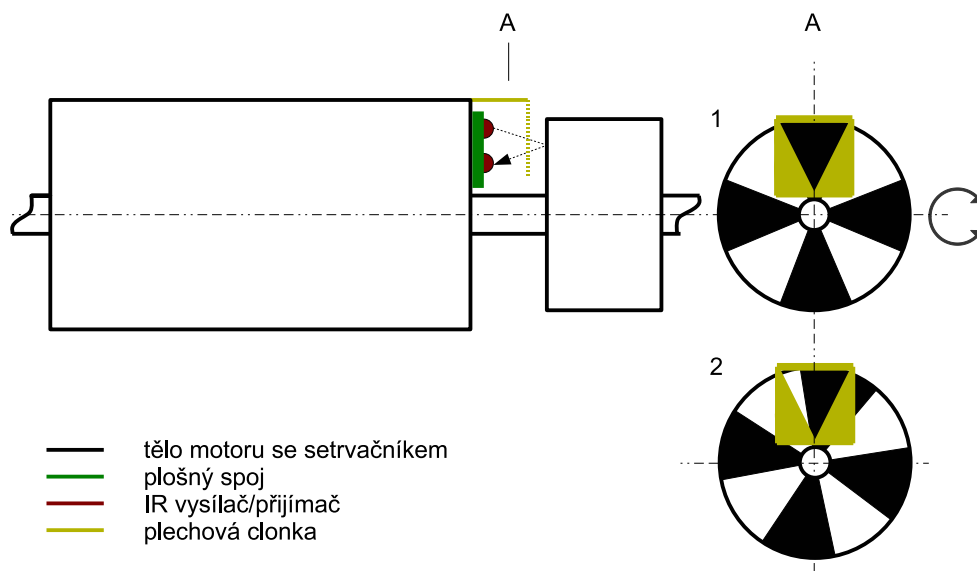
3.1 Zásahy do hardwarového řešení

3.1.1 Zvýšení přesnosti infračidla

Původní provedení IR čidla mělo setrvačnick označen čtyřmi matnými značkami. Zbroušením původních značek a nanesením nového nátěru se podařilo zvýšit počet značek na deset a tím zvýšit citlivost čidla na dvacet logických změn na otáčku motoru. Při testování regulace bylo zjištěno, že rozložení značek není vhodné provádět libovolně (případ 2 na obr. 3.1). Problém vytvářely tzv. "mrtvé" polohy rotoru. Permanentní magnet statoru nutí rotor při zastaveném motoru setrávat v poloze, která je energeticky nejméně náročná. Ačkoliv má námi používaný motor šikmo vinuté póly, které by měli tento jev omezit, přesto se rotor snaží zůstat v jedné z deseti energeticky nejméně náročných poloh. Z tohoto důvodu byly značky nanесeny právě do osy snímání IR čidla v těchto "mrtvých" polohách (případ 1 na obr. 3.1). Toto rozložení značek by mělo redukovat vznik falešného signálu o pohybu motoru. Problematika je podrobněji rozebrána v kapitole 3.2.1.

Dále byla mezi setrvačnick a IR závoru připevněna plechová clonka, která redukuje vliv povrchu setrvačnicku na množství odraženého záření pouze příspěvkem skrze úzký průzor.

Posledním krokem byla úprava rozhodovací úrovně komparátoru tak, aby přizpůsobena novému nátěru pro správné tvarování signálu pro procesor. Konfigurace čidla je znázorněna na obr. 3.1.



Obrázek 3.1: Konfigurace infračidla pro snímání otáček motoru

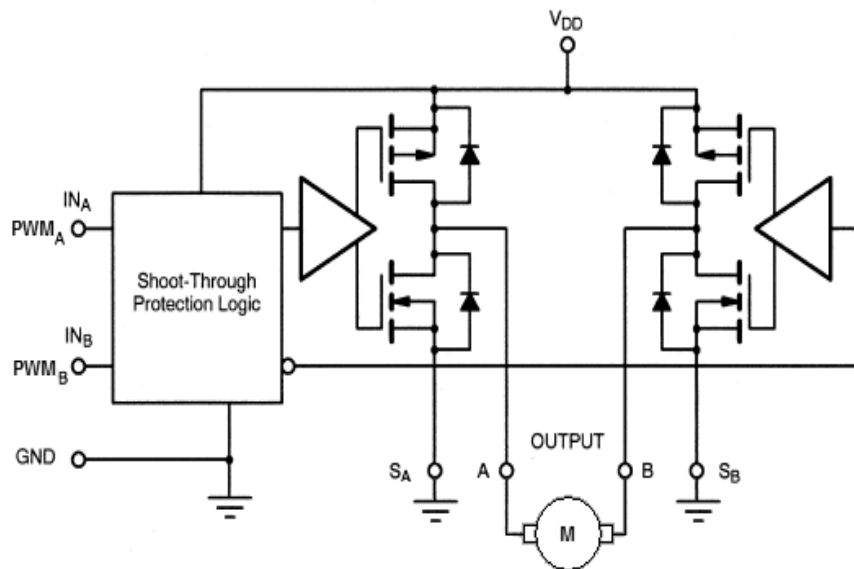
3.1.2 Přepřerování budícího stupně

Budící stupeň je nově implementován pomocí budiče Si9986 od firmy Vishay Siliconix. Při pokusech o měření BEMF s původním obvodem se ukázalo, že logika H můstku neodepínala motor do stavu vysoké impedance, ale střídavě přiváděla na motor napájecí napětí v aktivní fázi a nulové napětí na obě svorky motoru a neaktivní fázi PWM signálu. To způsobovalo zkratování vinutí motoru. Úpravou tohoto regulačního pochodu se již při prvním měření ukázalo, že odepínání motoru do vysoké impedance výrazně snížilo proudovou zátěž odebíranou budícím stupněm. Účinnost se měnila se střídou PWM signálu, při střídě 0,5 se proud snížil na polovinu. Střídou signálu se rozumí poměr vysoké logické úrovně signálu ku celkové periodě PWM signálu. Zapojení budícího stupně je na obr. 3.2.

3.1.3 Realizace snímání zpětného napětí na motoru

Snímání zpětného napětí přináší několik problémů a je omezeno několika hardwarovými parametry.

- napětí není možné vztáhnout vůči zemi, motor je ve stavu vysoké impedance,



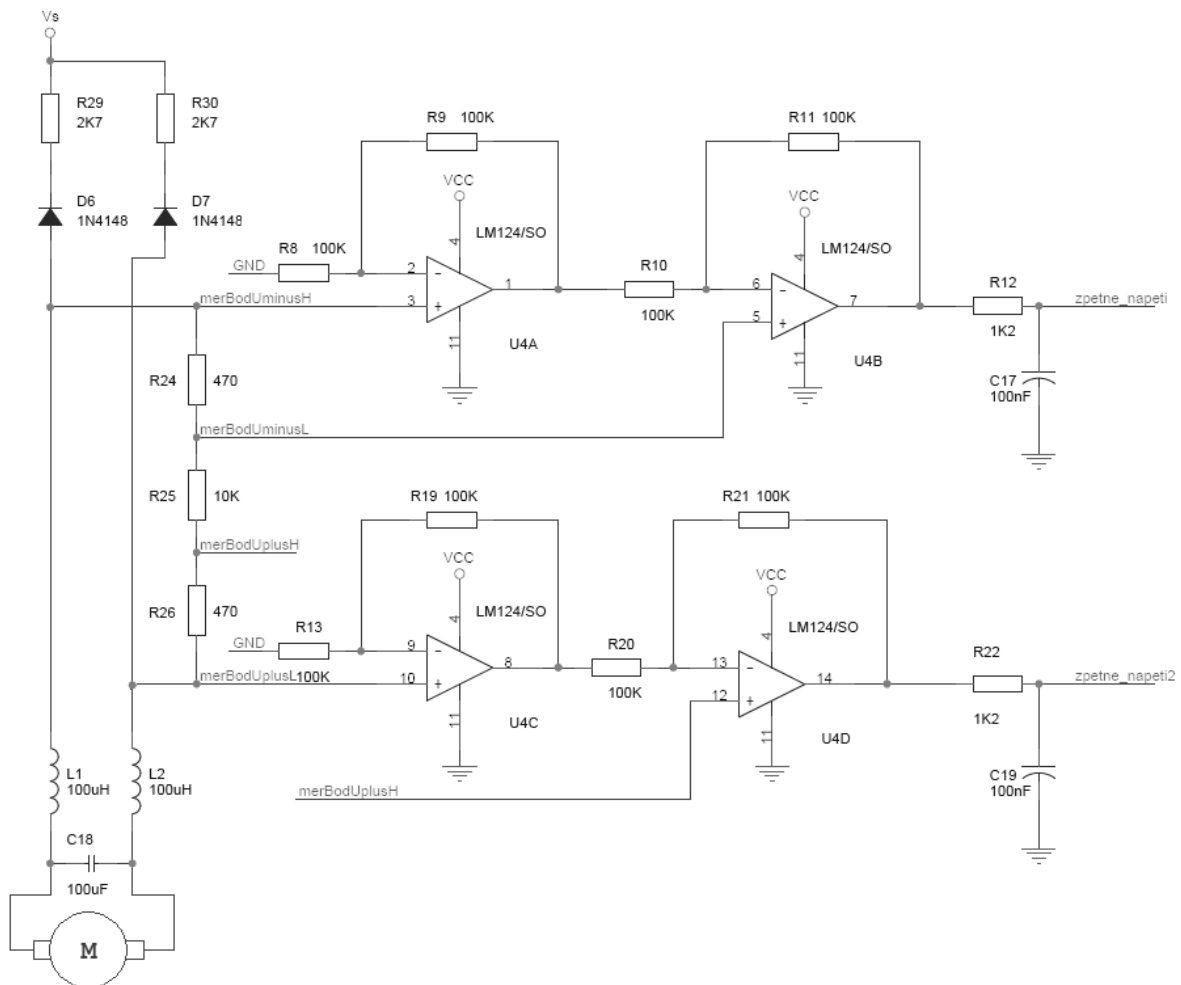
Obrázek 3.2: Schema zapojení budícího obvodu

- měření napětí nesmí příliš proudově zatěžovat motor, protože by ho brzdilo
- polarita napětí je různá podle směru jízdy lokomotivy,
- napětí je třeba omezit s ohledem na napájení a saturace operačních zesilovačů (OZ),
- napětí za OZ je třeba normovat na 0–1.1V vzhledem k vnitřní napěťové referenci AD převodníku procesoru,

Tyto kritéria vedou na použití rozdílového zesilovače v neinvertujícím zapojení. Neinvertující zapojení zajistí, že měření nebude odběrem proudu brzdit motor. Pro respektování napěťových úrovní je třeba proměřit charakteristiku generovaného napětí motorem v závislosti na jeho otáčkách. Tím vymezíme maximální napětí generované motorem. Pro případné úpravy napěťových úrovní postačí pasivní děliče napětí.

Pro měření zpětného napětí je použito zapojení odvozené od doporučeného zapojení z (NATIONAL SEMICONDUCTORS, 2000, strana 13). Pro možnost měření zpětného napětí obou polarit, respektive při jízdě oběma směry, je použito zapojení duálně, viz. obr. 3.3. Dělič napětí R24–R26 snižuje úroveň pro vstup do rozdílového zesilovače. Na výstupu

rozdílového zesilovače je signál filtrován pomocí RC článku R12, C17, respektive R22, C19.



Obrázek 3.3: Schema zapojení měřícího obvodu BEFM

3.2 Návrh regulace

3.2.1 Regulace na bázi inkrementálního čidla

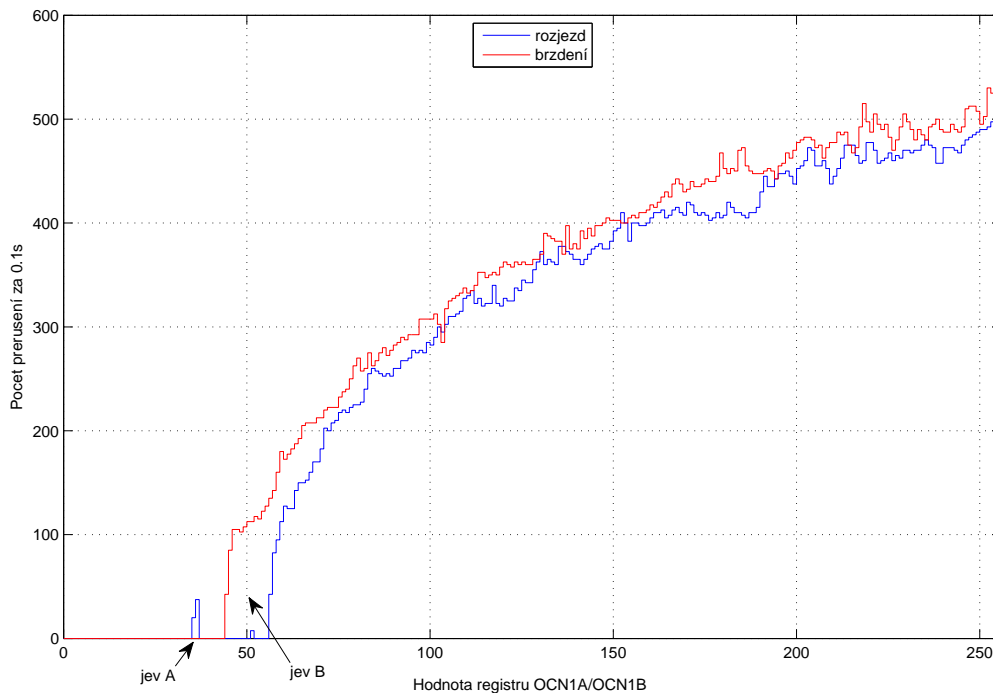
Jak bylo zmíněno v kapitole 1.2, dosavadní regulace nebyla uspokojivá při "malých" rychlostech. Budeme-li vycházet z měřítka 1:87 a dáme si za cílovou rychlost $41\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (pro možnost porovnání s experimentem v (PAVLIŠTA, D., 2007, strana 13)), Tato rychlost odpovídá v realitě cca $13\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$. Rychlost je při výpočtu regulačního zásahu reprezentována počtem přerušení za periodu výpočtu regulačního zásahu (dále jen T_{reg}), respektive jednou za 0,1s. Přírozenou jednotkou pro naši aplikaci je proto počet přerušení za T_{reg} . Pro přepočet na tuto jednotku je třeba znát další údaje. Průměr koleček modelové lokomotivy je 11mm, to znamená obvod kolečka 34,5mm. Motor je s nápravou z převodován v poměru 10/1 (10 otáček motoru na 1 otáčku kola nápravy). Cílovou rychlost lze tedy vyjádřit také jako 24 přerušení za T_{reg} .

Protože budící stupeň byl také obměněn, proměřil jsem proto znovu převodní charakteristiku PWM střídá na počet přerušení za dobu vzorkování $T_{reg} = 0.1\text{s}$. Hodnota 0–255 odpovídá střídě PWM signálu 0–1.

Přesto že nový budící stupeň používá obrácenou logiku, tak je v celém textu uváděna hodnota registru OCN1x jako 0–255, aby bylo zachována úměra hodnoty OCN1x s hodnotou střídá signálu PWM. Na obr. 3.4 je vidět zvýšení přesnosti čidla. Oproti dosavadnímu maximu cca 150 přerušení za dobu vzorkování nyní čidlo při maximální rychlosti generuje cca 500 přerušení za dobu vzorkování. Údaje je třeba brát jako orientační, protože charakteristika je závislá na napájecím napětí a na charakteru trati a velikosti zapřažené zátěže. Toto měření bylo prováděno v ideální podmínkách, to znamená na trati bez stoupání či klesání se samotnou lokomotivou a s napájecím napětím 12V v kolejích. Charakteristika obr. 3.4 je měřena pro rozjezd a následné brždění, protože má určitou hysterezi (jev B). Všimněme si, že v mezních podmínkách, kde mechanické tření a poloha rotoru nedovolují rozjezd, je při opětovném brždění z maximálních rychlosti motor schopen ještě udržet lokomotivu v pohybu při nižší střídě PWM.

Samotný regulátor byl ponechán v původní podobě, protože časové konstanty lokomotivy zůstaly zachovány. Požadovaná rychlost je přenášena do lokomotivy jako rychlostní stupeň v rozsahu 0–256. Informace o počtu přerušení z čidla dělena dvěma, aby se pokud rozložila do rozsahu hodnot rychlostního stupně.

Jak bylo zmíněno v komentáři k obr. 3.4, regulace při nízkou rychlost velmi ovlivňují nelinearity typu necitlivost a hystereze. Tyto nelinearity nás nutí zavádět speciální opatření



Obrázek 3.4: Převodní char. střída PWM signálu na počet přerušení za T_{reg}

pro tyto mezní situace. Prvním opatřením je softwarové zavedení necitlivosti regulátoru na nastavenou rychlost pod mezní rychlost motoru. Pokud se pokoušíme udržet motor na nižších otáčkách než jsou mezní, tak podle naladění konstant regulace je možno dosáhnout dvou stavů. Při hrubém zásahu regulace dochází k překmitávání regulované veličiny (rychlosti) do hodnot, kde se lokomotiva opravdu rozpohybuje a následné zastavování. V opačném případě, kdy je nastavena střída PWM signálu do oblasti, kde není motor schopen s tak malým množstvím energie překonat tření soustavy a "mrtvé" polohy rotoru (viz. kapitola 3.2.1). I když by integrační složka měla zajistit naintegrovaní dostatečného akčního zásahu, přesto regulátor tuto situaci není schopen vyřešit z důvodu konstrukce IR čidla. V této situaci dochází k chybnému signálu z infračidla, protože motor se snaží odpoutat od "mrtvé" polohy rotoru a toto kmitání způsobuje pohyb setrvačnicku na hraně odrazivé značky. Tím je generována mylná informace o nenulových otáčkách motoru. Tato chyba je označena v obr. 3.4 na modré charakteristice při rozjíždění jako jev A. Tento klamavý signál by bylo teoreticky možné eliminovat instalací dvou čidel

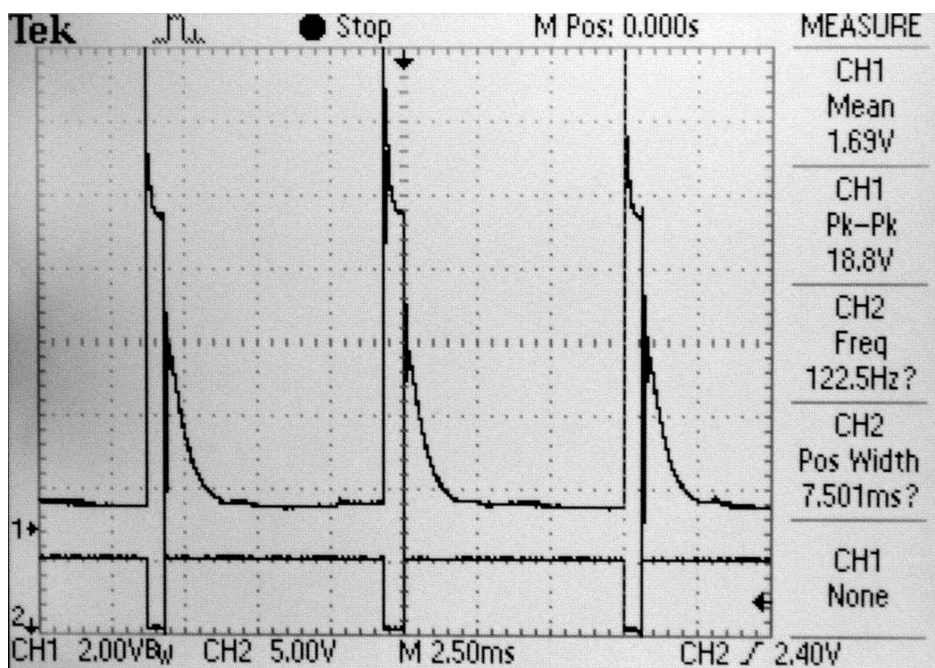
a po vzoru průmyslových aplikací sledovat sled vzestupné nebo sestupné hrany. Zástavba by si však vyžádala další požadavky na přesnost značek i místo v lokomotivě. U konstrukce čidla byla proto provedena maximální dostupná opatření pro eliminaci tohoto jevu. Softwarovým opatřením je spodní omezení střidy signálu, kterou dovolujeme procesoru generovat. Toto opatření vychází z experimentů o minimální možné dosažitelné rychlosti jízdy s regulací a sledování hodnoty střidy při těchto mezních podmínkách. Nastavení OCR1x je omezeno na hodnotu 10, respektive nastavení střidy pod hodnotu cca 0,04. Opatření má za následek zabránění chvilkového zastavení lokomotivy, ke kterému v případě poruch či zakmitání signálu z IR čidla při regulaci na nejnižší rychlosti občas dochází.

Druhé opatření si vyžádala nelinearita typu hystereze. Softwarově je detekován rozjezd jako přechod požadované rychlosti z nuly, respektive z pásma necitlivosti, na jakoukoliv vyšší rychlost, než je tato necitlivost. Softwarově zavedená necitlivost respektuje necitlivosti při měření charakteristiky obr. 3.4 při brždění. Jízda v pásmu mezi necitlivostí při rozjezdu a brždění je možná, ale je třeba dostat se na tuto rychlost shora, respektive zpomalením z nějaké vyšší rychlosti. Pro zabezpečení bezpečného rozběhu motoru je po dobu 0,7s nastaven rychlostní stupeň 35, který zajistí dostatečný impulz pro rozjetí motoru a dále již po dobu jízdy regulaci neovlivňuje. Parametry pro rozjezdový impulz jsou odvozeny experimentálně z měření a je otázkou dalšího testování přímo v provozu prověřit jejich správnost.

3.2.2 Regulace na bázi měření BEFM

Protože měření BEMF nebylo dosud použito, popíšeme nejdříve funkci analogově digitálního převodníku (dále jen AD převodník) mikroprocesoru ATmega8. Zkratky registrů vycházejí z dokumentace (ATMEL, 2007, kapitola Analog Digital converter). Procesor disponuje osmikanálovým vstupním analogovým multiplexerem na který je připojen 10 bitový AD převodník. Výrobce zaručuje nelinearitu maximálně $\pm 0,5$ LSB (lowest significant bit - nejméně významný bit) a absolutní přesnost 2 LSB. Doba převodu se pohybuje mezi 260–13 μ s. To vzhledem k námi používané frekvenci PWM signálu 122Hz (perioda cca 8,2ms) poskytuje dostatečnou rychlost na odebrání několika vzorků. AD převodník budeme používat v režimu automatického spouštění na signál přetečení čítače/časovače 1. Při překlopení výstupu OC1A/OC1B (podle směru jízdy) na hodnotu logické jedničky, když je motor odepnut do stavu vysoké impedance, začneme sbírat hodnoty pomocí přerušování, které signalizuje konec konverze.

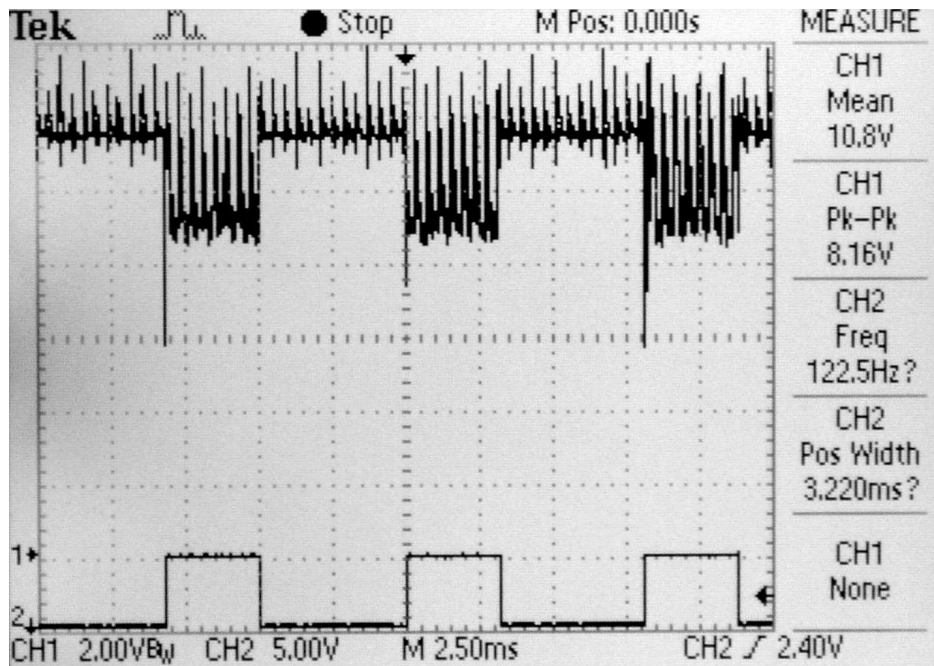
Počet vzorků je různý podle aktuální střídy PWM signálu. Je proto třeba volit kompromis rychlosti vzorkování s ohledem na mezní situace. Při nízké rychlosti bude motor většinu doby odepnut do stavu vysoké impedance, a proto bude nasbíráno za tuto dobu velké množství vzorků a sumace by mohla být mimo rozsah datového typu unsigned int. Na druhou stranu při velké rychlosti je doba na sběr vzorků malá a je třeba pro relevanci naměřených dat dostatečného množství vzorků pro určení průměru. Pro bližší představu jaké data budeme zpracovávat je na obr. 3.5 a obr. 3.6 snímek průběhu napětí na odporu R26 ze schématu na obr. 3.3.



Obrázek 3.5: Signál na vstupu rozdílového zesilovače, střída PWM 0,04

Mezní podmínky pro naše měření odpovídají oknu pro snímání napětí v rozmezí od $7,8ms$ při nízké rychlosti do $3,2ms$ při vysoké rychlosti. Tento odhad vychází z rozsahu hodnot PWM střídy při regulaci na obr. 4.1 a je ověřen měřením na obr. 3.5 a obr. 3.6.

Při vývoji došlo k odhalení chyb v generátoru nastavení periferií prostředí Image Craft. Nastavení čítače/časovače 1 mělo být nastaveno na generování PWM modulace o frekvenci $122Hz$. Ve skutečnosti se ukázalo, že předdělič hodin je nastaven na hodnotu 64. Pro generování frekvence $122Hz$ by musel být nastaven na hodnotu 256. Při opravě se však ukázalo, že PWM signál na $122Hz$ nedodával energii do motoru dostatečně rovnoměrně a při malé velikosti střídy nebyl chod motoru plynulý. Z tohoto důvodu jsem



Obrázek 3.6: Signál na vstupu rozdílového zesilovače, střída PWM 0,6

zachoval nastavení děliče na hodnotě 64. To znamená, že signál generovaný kanály PWM měl frekvenci 490Hz . To zkrátilo interval, ve kterém je možné vzorkovat zpětně generované napětí motorem, na rozsah $1,95\text{--}0,8\text{ms}$.

AD převodník je nastaven na automatické spouštění převodu na signál přetečení čítače/časovače 1. To znamená, že se spouští převod jednou za $0,5\text{ms}$. Sběr dat je řešen v rutině obsluhy přerušení, které generuje signál dokončení převodu. Při obsluze tohoto přerušení se rozhodne, zda je PWM signál v aktivní fázi a přivádí výkon na motor, nebo zda je signál ve fázi, kdy je motor odepnut a je možné měřit zpětně generované napětí. Pokud vzorek spadá do neaktivní fáze PWM signálu je zapsán do pole, které tvoří okno pro průměrování ovzorkovaného signálu. Okno pro výpočet aritmetického průměru či jiné statistické funkce je omezeno kombinací několika faktorů.

- náročnost algoritmu nesmí být příliš vysoká, aby bylo možné počítat tuto funkci často a rychleji než se navzorkuje další sada dat
- součet hodnot vzorků nesmí překročit rozsah použitého datového typu (v případě použití aritmetického průměru)
- délka okna, respektive časová historie, kterou okno postihuje nesmí příliš zpožd'ovat

informaci o rychlosti pro regulátor

- délku pole je vhodné volit jako mocninu 2^n , dělení se pak snadno provádí bitovým posuvem a zápis do pole se pak dá jednoduše řídit pomocí operace modulo n a je možné ji nechat volně přetékat

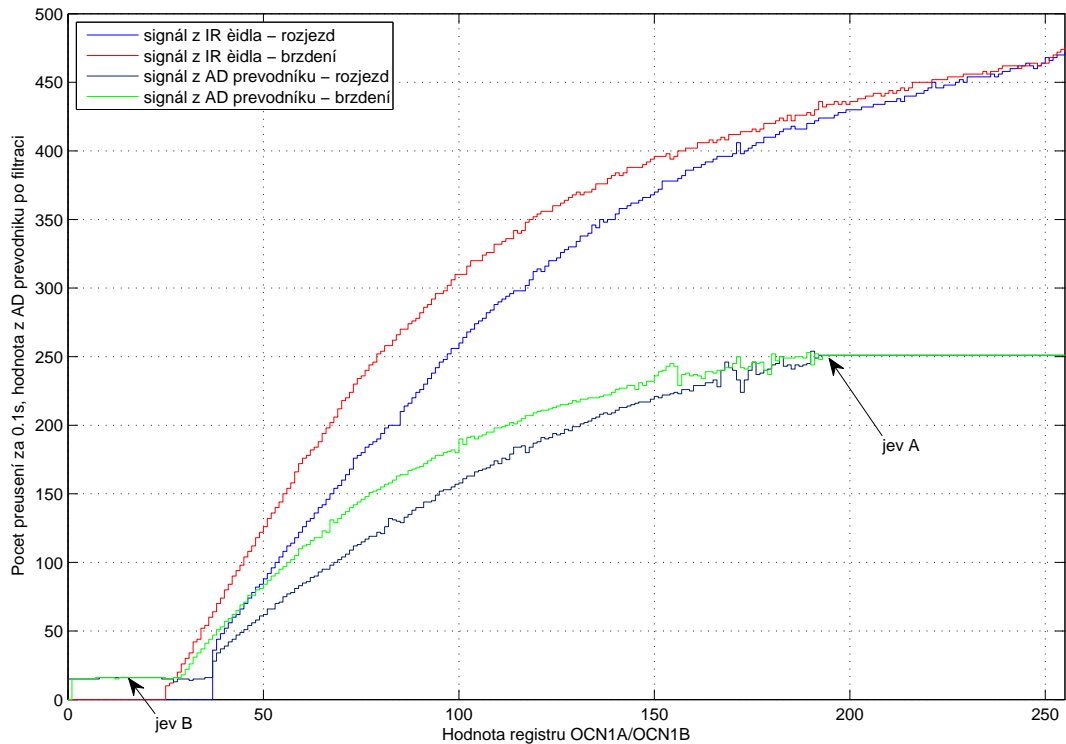
Během experimentů se snímáním zpětného napětí šli proti sobě dva požadavky. Signál z motoru byl i po filtraci pasivním RC článkem zarušen, takže nás nutilo vzorkovat většího množství vzorků a používat spíše delší okno pro průměrování většího množství vzorků.

Další možností je použití jen vrchních bitů z výsledku převodu. Jak bylo v úvodu kapitoly 3.2.2 zmíněno, výrobce zaručuje absolutní přesnost 2 LSB, to při použití vnitřní reference znamená $7,5mV$. Měření napětí s takovouto přesností nám přináší velkou citlivost, ale spodní dva bity jsou nejisté a jejich kolísání působí spíše jako rušivá složka signálu.

Požadavek na náročnost algoritmu a rychlost se kterou se projeví změna vstupního signálu, respektive rychlosti, na výstupu filtrace jsou naopak požadavky, které mají opačný důsledek. Jak rychlost výpočtu algoritmu, tak rychlost reakce na změnu rychlosti pozitivně ovlivňuje malý počet vzorků nad kterými provádíme filtraci.

Jako nejlépe fungující kompromis se ukázalo okno o délce šestnácti vzorků snímaných s odstupem $0,5ms$. Výsledek převodu je před zapsáním do pole redukován z deseti na osm bitů pomocí bitového posuvu vpravo. Protože RC článek filtrující signál na vstupu AD převodníku nestačí sledovat dostatečně rychle napětí na rozdílovém zesilovači, zahazují se první dva vzorky sejmuté po přechodu z aktivní fáze PWM signálu do fáze měření. Nad daty se počítá aritmetický průměr. Výpočet je spouštěn vždy, když dochází k přechodu do aktivní fáze PWM signálu a nesbírají se vzorky.

Pro určení převodní funkce otáček na napětí jsme proměřili znovu charakteristiku v celém rozsahu střídy modulace. Opět je měřen jak rozjezd, tak brždění motoru pro odhad hystereze charakteristiky. Signál z AD převodníku po filtraci je vynášen s dvojnásobnou amplitudou z důvodu zlepšení čitelnosti ve společném grafu. Graf je vyneseno na obr. 3.7. Na obrázku kromě známé hystereze funkce můžeme pozorovat jinou nelinearitu. Signál z AD převodníku dává spolehlivou informaci do střídy signálu cca 0,6 (označeno v obr. 3.7 jako jev A). Dále je signál zkreslen, protože okamžik kdy je možné snímat zpětně generované napětí z motoru je příliš krátký na odeznění přechodového děje, který vzniká při odepínání motoru do stavu vysoké impedance. Při překročení střídy 0,75 je díky zahazování prvních dvou vzorků filtrace přestane zapisovat vzorky do pole, ze kterého počítáme aritmetický průměr. Druhé specifikum signálu z AD převodníku je jisté zby-



Obrázek 3.7: Převodní charakteristika střídavého PWM signálu na počet přerušení za $T_{reg}/2$ a hodnoty z AD převodníku po filtraci

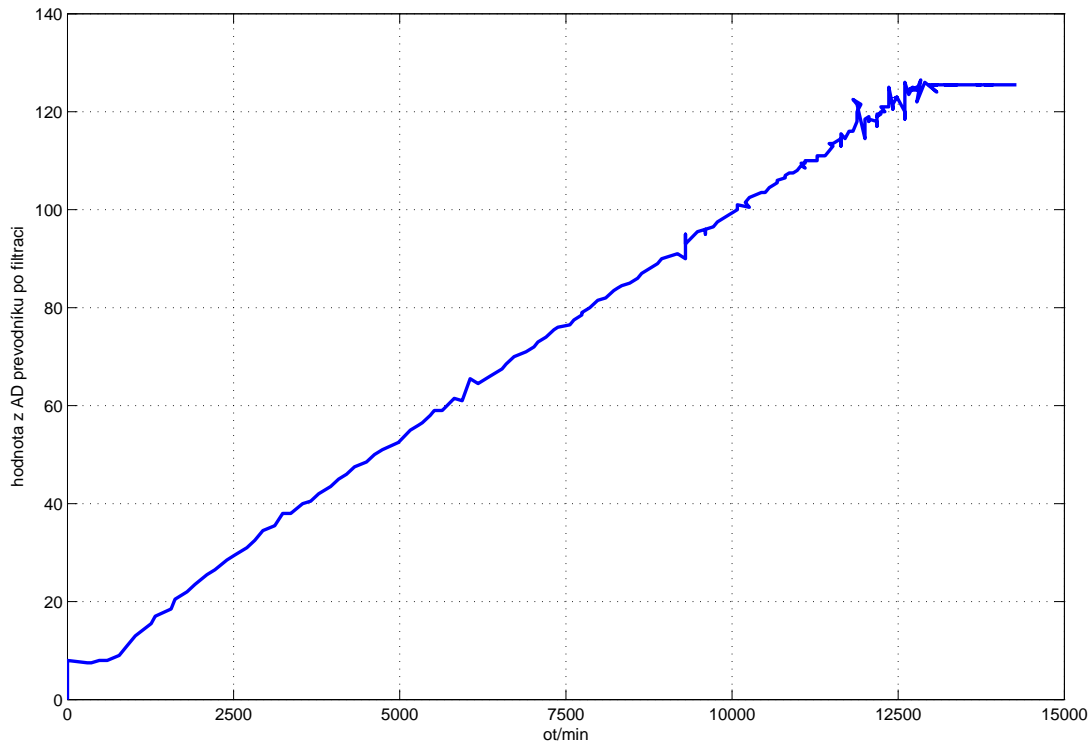
kové napětí, které zůstává i při nulové rychlosti na výstupu diferenciálního zesilovače (označeno v obr. 3.7 jako jev B).

Převodní charakteristiku otáček motoru na zpětně indukované napětí, respektive na signál z AD převodníku po filtraci, budeme odvozovat z charakteristiky pro brždění. Převodní charakteristika je vynesena na obr. 3.8

Na obr. 3.8 zde vidět, že charakteristika je po částech lineární. Na nízkých otáčkách se na AD převodníku objevuje zbytkové napětí. Na vysokých otáčkách je charakteristika omezena filtrací. Oba jevy jsou popsány již v komentáři k obr. 3.7. Pro regulaci se tedy omezíme na lineární část od cca $600 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ do cca $11000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$.

Charakteristika je pro rozložení přes všechny rychlostní stupně normována dle rovnice (3.1), kde O jsou otáčky motoru a U je naměřené zpětně indukované napětí na motoru.

$$O = 3 \cdot U \quad (3.1)$$



Obrázek 3.8: Převodní charakteristika otáček motoru na hodnotu z AD převodníku

Normováním dle rovnice (3.1) je splněna podmínka pro omezení měření rychlosti ve vysokých otáčkách motoru. Nelinearita na nízkých otáčkách motoru je zahrnuta do softwarové necitlivosti, tato necitlivost se zavádí ze stejného důvodu jako tomu bylo v kapitole 3.2.1. Tentokrát je zvoleno pásmo necitlivosti na hodnotu 20 a rozjezd je zajištěn nastavením rychlostního stupně 28 po dobu 4,5s. Pásmo necitlivosti odstraňuje nutnost korekce vertikálního posuvu z obr. 3.8. Nastavení nižšího rychlostního stupně nelze realizovat, protože hrozí uvážnutí motoru v "mrtvé" poloze. Uvážnutí může být způsobeno zvýšeným šumem z čidla nebo překážkou na trati.

Kapitola 4

Závěr

4.1 Experimenty

4.1.1 Regulace na bázi IR čidla

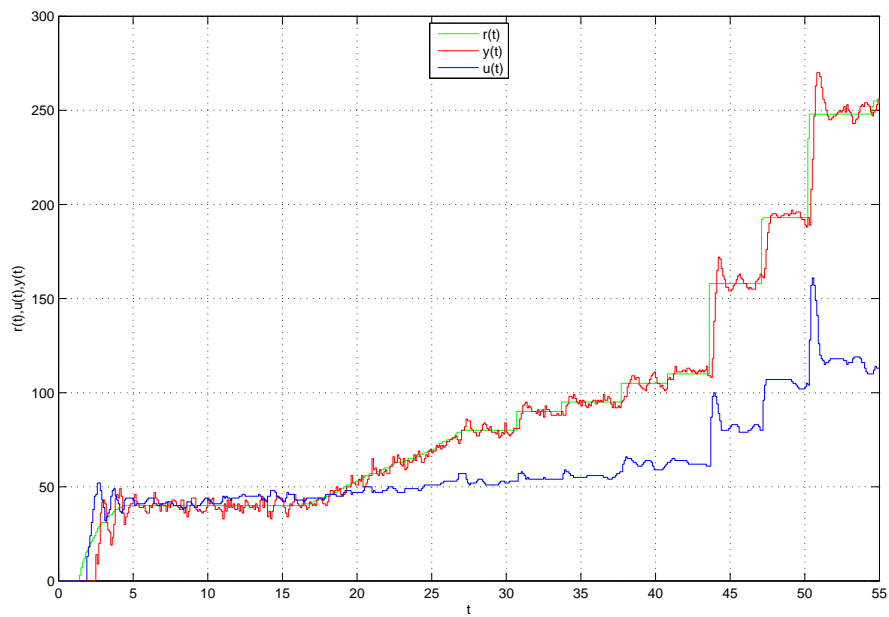
Na obr. 4.1 je ukázka chování regulace v celém spektru rychlostních stupňů. Značení následujících obrázků respektuje značení (ŠEBEK, M., 2007). Tedy $r(t)$ je požadovaná veličina, zvolený rychlostní stupeň, $y(t)$ je výstupní veličina, počet přerušení za periodu vzorkování a $u(t)$ je akční zásah do soustavy, hodnota registru OCN1x.

Na obr. 4.1 vidíme, že regulátor je schopen plynulé jízdy od rychlostního stupně 40. To odpovídá rychlosti $69mm \cdot s^{-1}$, respektive $22km \cdot h^{-1}$. Při plynulé změně rychlosti dokáže plynule zrychlovat. Velké skokové změně požadované rychlosti dochází k překmitu, ale dosavadní uplatnění počítá s propočtem rozjezdových a brzdících křivek na straně řídicího serveru.

Pro srovnání regulace s (PAVLIŠTA, D., 2007) jsme zopakovali experiment s regulací na rychlost $41mm \cdot s^{-1}$. Tato rychlost po změně citlivosti čidla znamená 24 přerušení za periodu vzorkování.

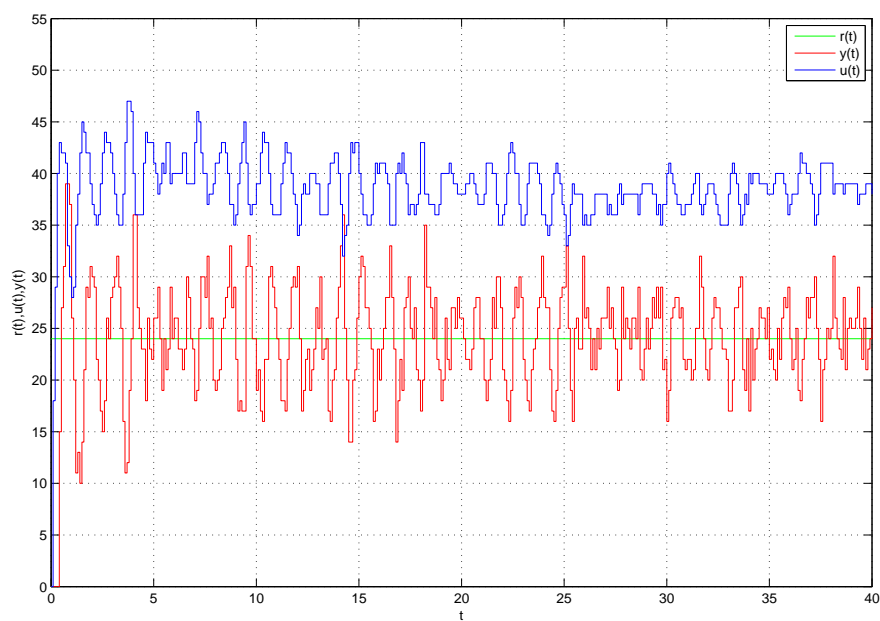
Měření na obr. 4.2 ukazuje, že po zvýšení citlivosti infračidla na 2,5 násobek původní hodnoty není regulace na takto malou rychlost příliš plynulá. Rozptyl hodnot se po rozjezdu drží cca na 50% požadované hodnoty, což je srovnatelná hodnota s obdobným experimentem na (PAVLIŠTA, D., 2007, obr. 3.3).

Posledním experimentem bylo ověření chování regulátoru při stoupání. Shodně s (PAVLIŠTA, D., 2007, strana 28) trať plynule přechází do stoupání 12%. Nastavený rychlostní stupeň 34 odpovídá shodně rychlosti $59mm \cdot s^{-1}$ ($18km \cdot h^{-1}$). Výsledek měření je na obr. 4.3.

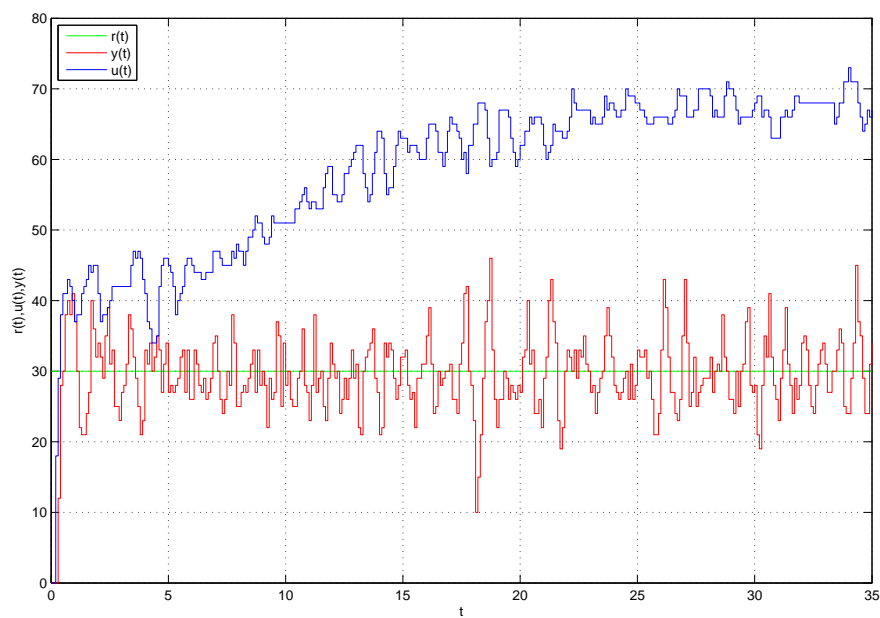


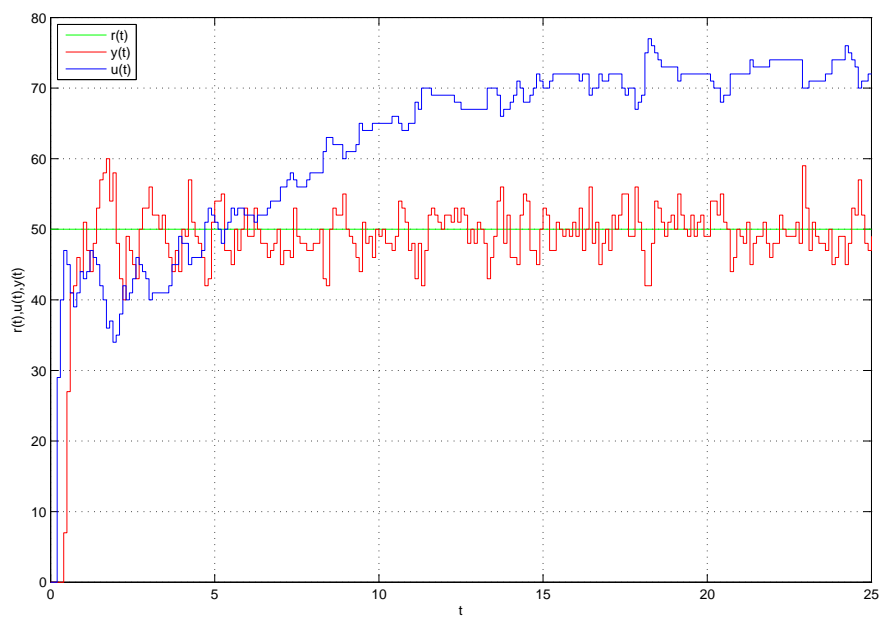
Obrázek 4.1: Obecný regulační pochod v celém spektru rychlostních stupňů

Na obr. 4.4 je vidět citelné zlepšení plynulosti regulačního pochodu. Rychlostní stupeň 50 odpovídá rychlosti $86\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ($27\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$).



Obrázek 4.2: Obecný regulační pochod v na velmi pomalou rychlost

Obrázek 4.3: Regulační pochod při jízdě do stoupání rychlostí $59\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$

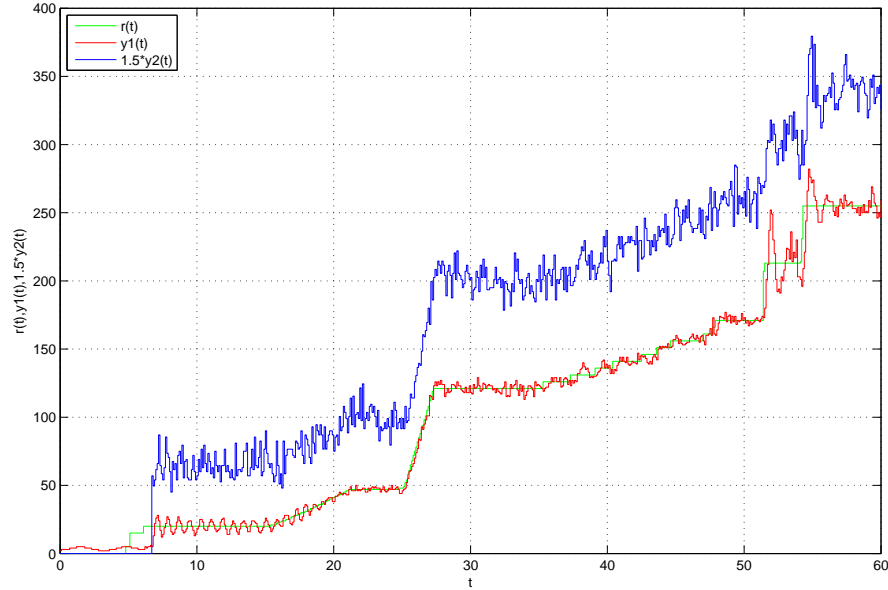


Obrázek 4.4: Regulační pochod při jízdě do stoupání rychlostí $86\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$

4.1.2 Regulace na bázi měření BEMF

Pro porovnání výsledků zopakujeme shodné experimenty jako v kapitole 4.1.1.

Na obr. 4.5 je vynesena graf zaznamenávající regulační pochod v celém rozsahu rychlostních stupňů.

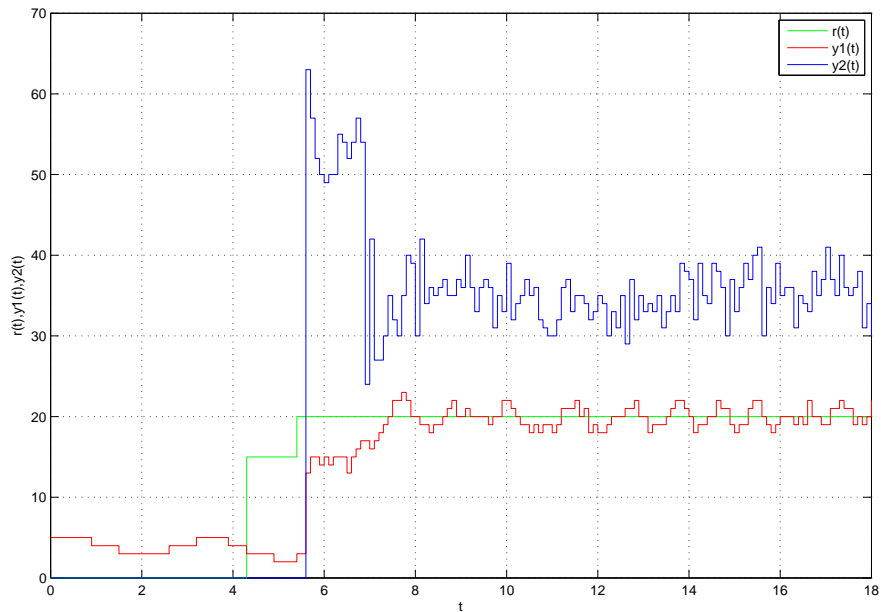


Obrázek 4.5: Obecný regulační pochod v celém spektru rychlostních stupňů

Regulace na obr. 4.5 ukazuje, že regulátor je schopen sledovat plynulou změnu rychlosti i skokové změny požadované veličiny. Protože se signál z IR čidla kryl s křivkami signálu z AD převodníku, byl signál z IR čidla vynásoben konstantou 1,5 pro lepší čitelnost grafu. Kolísání rychlosti je srovnatelné s regulací na bázi IR čidla. Subjektivně při pozorování modelu není rozdíl mezi jízdou s regulací na bázi IR čidla a na bázi snímání BEMF.

Experiment regulace rychlosti na extrémně pomalou jízdu se nepodařilo zopakovat, protože regulace na bázi snímání zpětného napětí nebyla schopna bezpečně udržet lokomotivu v jízdě rychlostí $41 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Na obr. 4.6 je měření za nejnižší možné rychlosti, kterou povedlo dosáhnout. průměrná hodnota 34 přerušení za T_{reg} (značena jako $y_2(t)$) odpovídá rychlosti $60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, respektive $18 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Ačkoliv se nám nepodařilo bezpečně regulovat rychlost na tak nízké hodnotě, jako při regulaci na bázi IR čidla, tak jízda ve srovnání s dalšími experimenty v kapitole 4.1.1 se ukazuje o poznání plynulejší. Kolísání rychlosti je dle informace z infračidla v rozmezí

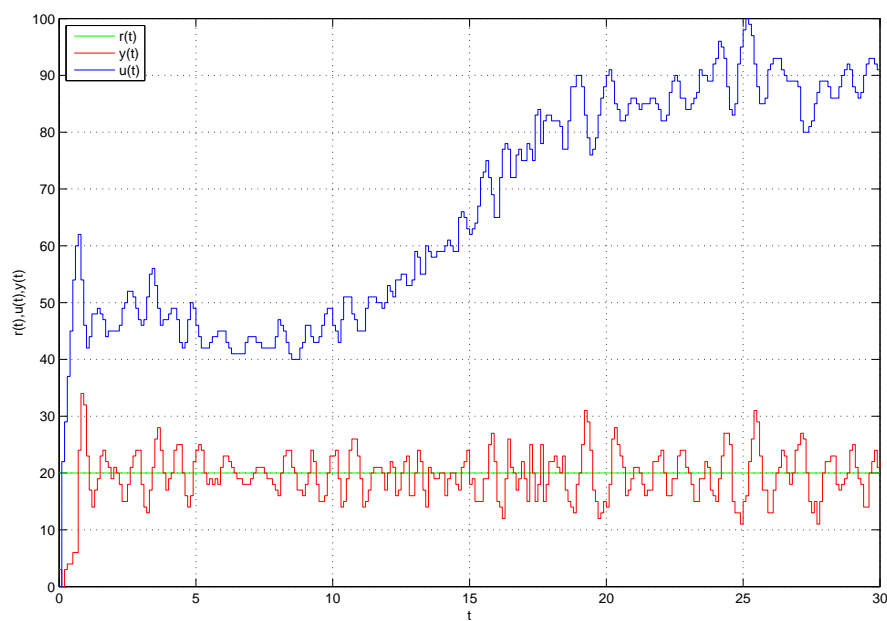
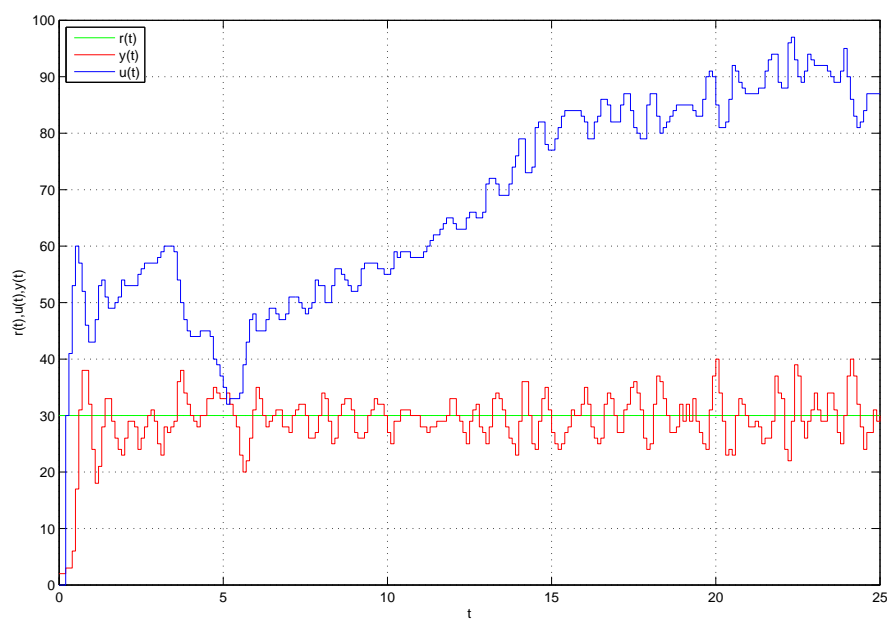


Obrázek 4.6: Obecný regulační pochod na velmi pomalou rychlost

20% od požadované hodnoty oproti 28% při srovnatelných rychlostech s regulací na bázi IR čidla.

Jako poslední srovnávací experiment je sledování chování regulace při přechodu do stoupání. Měření je zaznamenáno na obr. 4.7 a obr. 4.8.

Při jízdě do stoupání se ukázalo, že regulace na bázi měření BEMF není zcela nezávislá na zatížení, regulace sice dokázala udržet lokomotivu v jízdě do stoupání, ale rychlost začala viditelně kolísat.

Obrázek 4.7: Regulační pochod při jízdě do stoupání rychlostí $59 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ Obrázek 4.8: Regulační pochod při jízdě do stoupání rychlostí $86 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

4.2 Zhodnocení výsledků

Během práce se ukázalo, že zvolená platforma ATmega8 je dostačující pro realizaci úloh regulace na bázi IR čidla i na bázi měření BEMF. Bylo ověřeno, že odvozování rychlosti lze provádět i jinou cestou, než je jen pomocí čidla na mechanických částech motoru.

Vzhledem k narůstání úloh, které jsou přidávány k dosavadní funkčnosti je však vhodné zvážit alespoň použití rychlejšího modelu ATmega88(168). Tato změna by vyžadovala minimální zásah do dosavadního hardwarového řešení, protože modely ATmega8 a ATmega88 se v zásadě liší pouze v možnostech taktování jádra, ale pouzdro je shodné a zdrojový kód by vyžadoval jen minimální zásah do konfigurace periférií. Zvýšení výkonu by dovolovalo rychlejší vzorkování snímaného zpětného napětí a dokonalejší filtraci tohoto signálu pro potřeby regulace.

Pro srovnání obou regulací je třeba zvážit jejich výhody a nevýhody. Regulace na bázi IR čidla i při zvýšené přesnosti snímání napětí nepřinesla rapidní zlepšení regulačního pochodu. Na druhou stranu zvýšení přesnosti čidla přineslo problém se vznikem falešného signálu při odpoutávání se z "mrtvých" poloh rotoru a fyzická realizace byla poměrně náročná, pokud jsme chtěli zajistit spolehlivou funkci čidla.

Regulace na bázi měření zpětného napětí byla novou cestou řešení problému. V principu se podařilo tuto úlohu realizovat, ale kvalita regulace zatím nedosáhla tak dobrého výsledku jako regulace na bázi IR čidla. Veškeré experimenty s regulací na bázi měření BEMF byly prováděny s vývojovým kitem STK500 a procesorem ATmega16 který dovoloval použití interní reference napětí 2,56V. Vzhledem intenzivnímu vývoji a častým změnám zapojení, které by umožňovalo měření zpětného napětí se nepodařilo včas dodat do výroby nový tištěný spoj. Regulace na bázi měření BEMF by měla být dále vylepšená, protože jak tato práce ukazuje, tato cesta není slepou uličkou vývoje. Vyřešení úlohy regulace na bázi BEMF by přineslo velmi velkou výhodu, protože při hromadném nasazení by nevyžadovalo zástavbu infračidla do každé z lokomotiv, které ne vždy mohou nabízet vhodné místo pro instalaci infračidla.

Při hodnocení kvality regulace je třeba zmínit, že při regulaci na velmi malou rychlost se pohybujeme v pásmu, kde se nejvíce projevují nelinearity regulované soustavy. Pokud srovnáme dosaženou minimální rychlost s grafem na obr. 3.4, tak regulace na bázi infračidla i regulace na bázi AD převodníku minimální rychlosti zaváděla akční zásah kolísající na hranici, kdy se přestával motor točit. Je třeba prověřit souvislost frekvence PWM signálu s minimální mezní rychlostí motoru. Pro generování frekvence PWM signálu mezi 122Hz a 490Hz by bylo třeba přejít na devítibitové rozlišení čítače/časovače

1. Zvolením kompromisu mezi těmito frekvencemi by také mělo umožnit sběr více vzorků během jedné periody PWM signálu a tím umožnit dokonalejší filtraci měřeného zpětného napětí.

Na závěr bych rád ocenil dobrý základ v podobě (PAVLIŠTA, D., 2007). Aplikace LOCO-COM Reader byla velmi cenným nástrojem pro měření a získávání dat pro mojí navazující práci.

Literatura

ATMEL (2007), *Katalogový list ATmega ATmega8*.

ŠEBEK, M. (2007), *Přednášky k předmětu SRI*.

HUGHES, A. (1993), *Electric motors and drivers*, Oxford: Newnes. ISBN 0-7506-1741-1.

NATIONAL SEMICONDUCTORS (2000), *LM124/LM224/LM324/LM2902 datasheet*.

PAVLIŠTA, D. (2007), *Bakalářská práce – Řízení modelu lokomotivy*.

Příloha A

Seznam použitého software

- AVR Studio 4.13 SP1 + GCC kompilátor z jazyka C - volně dostupné vývojové prostředí pro Atmel AVR mikroprocesory
- Image Craft demo - komerční vývojové prostředí pro mikroprocesory, rychlé generování nastavení řídicích registrů
- Loco-com reader D. Pavlišty - k ovládání lokomotivy a sběr dat pro měření
- Mathworks Matlab 2007b - generování grafů z naměřených hodnot
- TeXnicCenter - editor zdrojového kódu pro \LaTeX
- MikTeX 2.7 - překladač zdrojového kódu \LaTeX
- Open Office 2.4 - tvorba a převod obrázků do formátu .eps
- GhostScript, GhostView - prohlížení souborů formátu .ps a jejich konverze do .pdf

Příloha B

Obsah příloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy zdrojové kódy.

- BRlocoIR_mega8: Projekt AVR Studia - program řízení lokomotivu na bázi IR čidla(ATMega8)
- BRlocoBEMF_mega16: Projekt AVR Studia - program řízení motoru na bázi měření BEMF (ATMega16)
- Měření: Grafy z prostředí matlab použité v textu